

**MICHAL ŠVANDA**

# **STUDIUM SUPERGRANULACE**

Studentský fakultní grant

Akademický rok 2000-2001



Matematicko-fyzikální fakulta  
Univerzity Karlovy v Praze



Astronomický ústav Akademie věd  
České republiky v Ondřejově

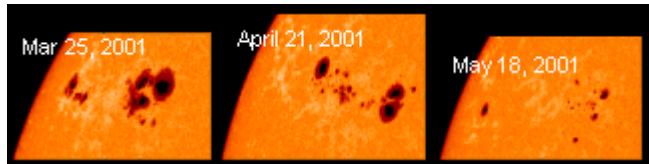
## 1 Úvod

Přestože je Slunce člověku nejbližší hvězdou, každý další pokus o zodpovězení některé otázky pouze vyvolá další nejasnosti. I přes staletí trvající řadu pozorování povrchu Slunce v bílém světle a desetiletí pozorování v různých spektrálních čarách nemáme dosud v některých pochodech na Slunci jasno.

Slunce je hvězdou na hlavní posloupnosti projevující značnou aktivitu. Tato aktivita je převážně řízena silným lokálním magnetickým polem, jehož nejvýraznějším projevem jsou sluneční skvrny. Sluneční skvrny vyskytující se ve skupině a ovlivňované ve svém vývoji jedním lokálním magnetickým polem sdružujeme pro přehled do aktivní oblasti. Každá aktivní oblast se navenek projevuje aktivními jevy, které zasahují všechny vrstvy sluneční atmosféry v lokalizované a ohraničené oblasti a které spolu velmi úzce souvisí. Magnetické pole zde vystupuje jako jednotící element, který hraje u aktivity prvotní roli.

Aktivní oblasti procházejí zajímavým vývojem. Nastěneme si jeden z možných scénářů: Předně, jak ukázala pozorování BUMBY a HOWARDA (11) z roku 1965, nová oblast vzniká vždy v místě, kde se již někdy předtím aktivní oblast vyskytovala, přesněji v místech, kde se nacházejí staré magnetické pole. Nejprve se objeví jasná ploška v jinak poklidné chromosféře, která rychle zvětšuje svůj rozměr v longitudálním směru. V průběhu několika dní se ve fotosféře objeví malá skvrnka v přední části aktivní oblasti (objeví se vždy v místě, kde se stýkají tři a více supergranulí), jež rychle zvětšuje svoji velikost a nazývá se *vedoucí skvrna*. V dalších dnech se vyvine skupina skvrn, v nichž lze obvykle odlišit dvě polarity magnetického pole - polarita tzn. *chvostové skvrny* je opačná než polarita skvrny vedoucí. Skupina se dále protahuje v rovnoběžkovém směru. Do maxima se skupina zpravidla dostane po jednom až dvou týdnech od vzniku - obsahuje nejvíce skvrn a ty jsou také největší. V době kolem maxima aktivní oblasti v jejím okolí vznikají klidné protuberance, které se nám při promítání na fotosféru jeví jako tmavé filamenty - oblaka hustého a chladného plazmatu sledujícího silokřivky magnetického pole a zasahující často velmi vysoko do koróny Slunce. Skvrny chvostové části se začínají rozpadat a vytrácet a zpravidla po dvou otočkách Slunce (cca 40-60 dní) se již ztrácí všechny skvrny v oblasti. Další vývoj oblasti je poznamenaný především klidným filamentem, který se vlivem diferenciální rotace Slunce prodlužuje a rozdělí oblast do dvou částí opačné polarity. Tehdy dosahuje filament největší délky, obvykle však již nepřežije další otočku a rozpadá se. Tím končí existence aktivní oblasti na Slunci.

Důkazem tohoto scénáře je například vývoj aktivní oblasti číslo 9393, která přežila tři otočky Slunce a její vývoj lze sledovat na přiloženém obrázku (zdroj [www.spaceweather.com](http://www.spaceweather.com), snímky pořizovaný sondou SOHO).



Samotný vývoj a život sluneční skvrny je velmi úzce vázán na supergranulační síť. Nová skvrna se objeví vždy v místě, kde se stýkají tři a více supergranulí. Růst skvrny pokračuje podél hranice supergranule a začne ji v prstenci obtékat. Teprve po překročení jisté meze zaplní supergranuli i uvnitř. Velké skvrny zaujmají ve fotosféře Slunce celistvý počet supergranulí a také díky tomu jsou velmi stabilní a dlouho vydrží (jako např. skvrna ze skupiny 9393).

J. SÝKORA (10) ukázal, že také obě paty filamentu se nacházejí v místě styku tří a více sousedních supergranulí a že jejich rozměry jsou "kvantovány" s ohledem na velikost supergranulí.

I nejenergetičtější jevy na Slunci - sluneční erupce, obrovské výrony energie na celém spektru vlnových délek, mají svůj prvotní zážeh vždy v místech, kde se stýkají supergranule. Jak uvádí (13), z dvou set pečlivě studovaných erupcí žádná nevznikla uprostřed supergranule, ale vždy v místě, kde se supergranule dotýkají.

Jak vidíme, vývoj aktivní oblasti je ve skutečnosti celý komplex jevů, které následují od jejího vzniku až po zánik a je velmi úzce vázán na supergranulační síť.

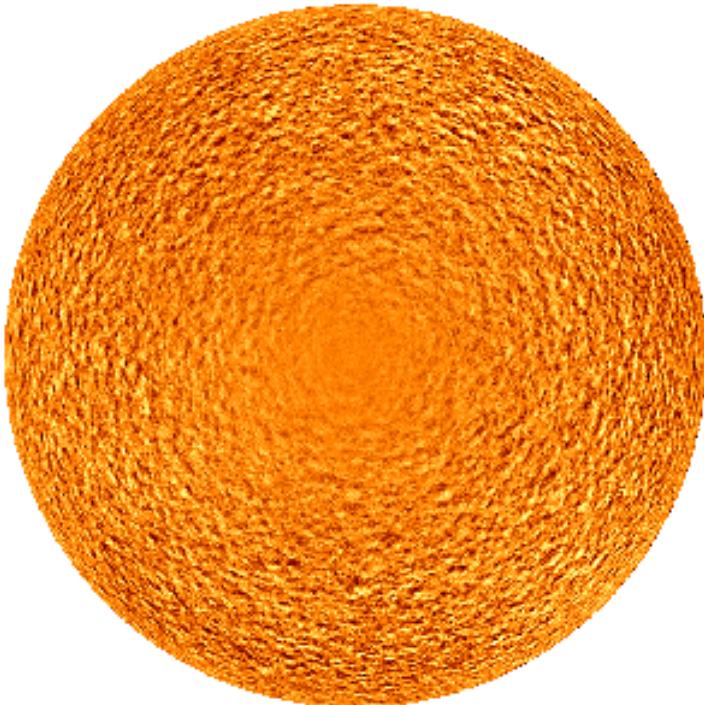
## 2 Co je supergranulace

Zdrojem energie hvězd jsou termonukleární reakce, které probíhají hluboko v nitru každé hvězdy. K uvolňování energie dochází u Slunce především proton-protonovým řetězcem. Při reakci se jako energie uvolňují gama fotony, pro které je podpovrchová vrstva slunečního nitra neprůhledná. Vzniklé teplo musí být tedy odváděno jiným fyzikálním pochodem, než je záření, a to konvekcí. Pod povrchem Slunce se nachází mohutná konvektivní zóna, ve které se vyskytují vzestupné a sestupné proudy, které se na povrchu Slunce projeví jako *granulace*. Granule nemají dlouhého trvání, přežívají maximálně několik desítek minut a jejich průměr je řádově tisíc kilometrů. Určité oblasti konvektivní zóny vykazují společné rychlostní struktury a tak superpozicí granulace vzniká mnohem větší a stabilnější struktura -

*supergranulace*. Velikosti supergranulí jsou kolem třiceti tisíc kilometrů a délka jejich trvání dosahuje až desítek hodin (viz dále). Na rozdíl od granulí nejsou supergranule pozorovatelné v bílém světle. Zatímco vrcholky granulí mají především vertikální komponentu rychlosti s hodnotami řádově v kilometrech za sekundu, u supergranulí je to kolem 500 m/s a proudění v nich je převážně horizontální.

Supergranule jsme schopni identifikovat například v rychlostním poli - projeví se pomocí dopplerova efektu posunem čar ve spektru. Jejich amplitudy jsou malé (řádově 100 m/s, viz dále) a proto je supergranulace překryta dalšími rychlostními jevy ve fotosféře, především tzv. pětiminutovými oscilacemi. Tyto oscilace sledují přibližně sinusový průběh s modulovanou amplitudou, proto je můžeme odstranit průměrováním snímků pokrývajících celočiselný násobek intervalu pěti minut.

Průměrováním přes třicet minut získáme např. následující obrázek (zdroj: *Solar Oscillations Investigation* - <http://soi.stanford.edu>):



Na tomto obrázku je již patrná téměř výhradně supergranulace, tmavší odstíny znamenají pohyb směrem k nám, světlejší směrem od nás. Obrázek byl získán pomocí dopplerogramů z družicové observatoře SOHO.

Podstatnou vlastností supergranulační sítě je její relativní časová stálost. Této její vlastnosti lze využít ke sledování skutečného pohybu slunečních skvrn ve fotosféře. Projevy supergranulace můžeme považovat za projevy fotosférické. To například o slunečních

skvrnách říci takto přesně nemůžeme, přestože se vyskytují ve fotosféře. Nemáme totiž vůbec představu, jak hluboko zasahují aktivní oblasti do nitra Slunce. Protože sluneční fotosféra vykazuje značnou diferenciální rotaci, která je celkovým součtem mnoha dílčích pohybů, způsobených např. Coriolisovou silou, nemůžeme se při výzkumu pohybů skvrn ve fotosféře spolehnout na nějakou pevnou síť spojenou s tělesem Slunce. Pro usnadnění práce byla definována referenční Carringtonovská síť, vůči které pohyby studujeme, ale tato umělá souřadnicová síť vůbec nebere diferenciální rotaci v úvahu. Proto je nalezení supergranulační sítě přímo spojené s tělesem Slunce prvotním odrazovým můstkom pro pochopení horizontálních pohybů ve fotosféře Slunce.

### **3 Historie výzkumu supergranulační sítě**

Supergranulační rychlostní pole bylo objeveno HARTEM v letech 1954 a 1956. Když pečlivě studoval rychlostní fotosférické pole, všiml si dlouho přetrvávajících struktur s rychlostními amplitudami kolem 170 m/s a rozměry kolem 26 000 km. V pracech LEIGHTONA, NOYESE a SIMONA bylo v letech 1962, 1964 a 1969 toto pole správně interpretováno jako obraz konvektivních proudů a oni také jako první nazvali tento fenomén "supergranulací". V roce 1981 se v pracech ANTIAY, CHITREHO a PANDEYE objevilo odvození (spíše odhad) rozložení rychlostí a teplotní struktury uvnitř jednotlivých supergranulárních buněk na základě konvektivní teorie. Délka života jedné buňky je důležitá i z jiného důvodu. LEIGHTON v roce 1964 a 1969 vysvětlil pozorované zániky a rozpady aktivních oblastí jako náhodný proces. Jestliže jsou supergranule odpovědné pouze za změnu polohy magnetických polí a mají délku života kolem 20 hodin, pak Leightonův mechanismus bude fungovat správně. SIMON a LEIGHTON poukázali v roce 1964 na prostorovou korespondenci hranic supergranulí s magnetickou sítí. Také na základě životní doby a vertikální rychlosti proudění v supergranulích odhadli jejich hloubku na 7 200 km. Tuto hodnotu prakticky potvrdil v roce 1998 DUVALL s využitím helioseismologických dat a nalezl přesvědčivé důkazy, že supergranule by mohly zasahovat do hloubek kolem 8 000 km.

Studie provedené v roce 1964 SIMONEM a LEIGHTONEM na základě propočtů metodou křížové korelace chromosférické sítě v čáře CaK daly životní dobu jedné supergranule kolem 20 hodin. ROGERS a JANSSEN v roce 1970 provedli podobnou analýzu šedesáti dvou hodinového kontinuálního pozorování vývoje chromosférické H $\alpha$  sítě a získali ekvivalentní výsledek. Výpočty a pozorování SMITHSONA (1973), WORDENA a SIMONA (1976) a DUVALLA

(1980) ukázaly, že životnost supergranulí by mohla být kolem 40 hodin. LIVINGSTON a ORRALL v roce 1974 poukázali na magnetické struktury neměnící se po dobu čtyř až sedmi dnů. Tento fenomén vysvětlili existencí velmi stabilních supergranulárních konvektivních buněk. KUBICELA v roce 1976 pořídil doklad o tom, že supergranule vyskytující se v klidných oblastech Slunce mají životní dobu 72 hodin a více.

Životnost supergranulí lze určit několika metodami, jedna z nich (křížová korelace, použitá SIMONEM a LEIGHTONEM v roce 1964 a WORDENEM a SIMONEM v roce 1976) dává životnost supergranulí 18 hodin při lineární aproximaci a 23 hodin při použití přesnější exponenciální aproximace. Použití stejně metody na magnetogramy dává životnost magnetických struktur kolem 10 hodin (WANG, 1988).

Odlišným způsobem zjišťovali životnost supergranulí WANG a ZIRIN v roce 1987. (2) Zjistili, že v oblasti  $256'' \times 256''$  lze nalézt přibližně 30 supergranulí a opticky sledovali jejich vývoj v čase. Supergranuli považovali za rozpadlou v okamžiku, kdy ji již nemohli jednoznačně ztotožnit s některou supergranulí z počátečního stavu. Zjistili, že se v průměru rozpadnou v oblasti  $256'' \times 256''$  necelé tři supergranule za jeden pozorovací den. Počet supergranulí vykazoval exponenciální pokles, lze ho tedy popsát vztahem:

$$N(t) = N_0 e^{(-t/\tau)},$$

kde  $N_0$  je počáteční počet sledovaných supergranulí ( $\sim 30$  v oblasti  $256'' \times 256''$ ) a  $\tau$  je střední doba rozpadu jedné supergranule (životní doba).

Získaná životnost supergranule je  $50 \div 80$  hodin.

Přestože je životnost supergranulí pravděpodobně to nejdůležitější, co nás v současné době zajímá, velmi pečlivě byly studovány také horizontální komponenty supergranulárního rychlostního pole. Nejvyšší nalezené horizontální rychlosti dosahují hodnot kolem 0,3 až 0,5 km/s (vyskytuje se v pracích LEIGHTONA, NOYESE a SIMONA z roku 1962, WORDENA a SIMONA z roku 1976). Navzdory četným studiím a pracem zůstává amplituda vertikální komponenty supergranulárního rychlostního pole velkou neznámou. Různí autoři udávají různé rychlosti v rozsahu 0,01 km/s (MUSMAN a RUST 1970, GIOVANELLI 1980) až po 0,4 km/s (SKUMANICH, SMYTHE a FRAZIER 1975, DEUBNER 1971). Přitom byla prokázána souvislost mezi gradientem rychlosti a velikostí magnetického pole (např. práce FRAZIERA z roku 1970). Studie vertikální komponenty rychlosti v supergranulích byly znova prověřeny GIOVANELLOM v roce 1980 a jeho výsledky ukazují, že vertikální rychlostní proudění v supergranulích je zřejmě menší než

0,01 km/s. Několikrát pozorované rychlosti větší než 0,1 km/s v oblastech se silným magnetickým polem jsou přisuzovány vnitřním pohybům uvnitř samotných buněk a pravděpodobně přímo nesouvisí se supergranulační sítí.

NOVEMBER, TOOMRE a GEBII v roce 1981 a NOVEMBER v roce 1982 pozorovali konvektivní mody, které mají velikosti a vlastnosti mezi granulací a supergranulací a nazvali je mesogranulací. Nalezli pro mesogranule typickou vertikální rychlosť kolem 0,06 km/s. S ohledem na předchozí výzkumy je tedy jasné, že rychlostní proudění ve vertikálním směru je zřejmě dvakrát až šestkrát větší v mesogranulích než v supergranulích.

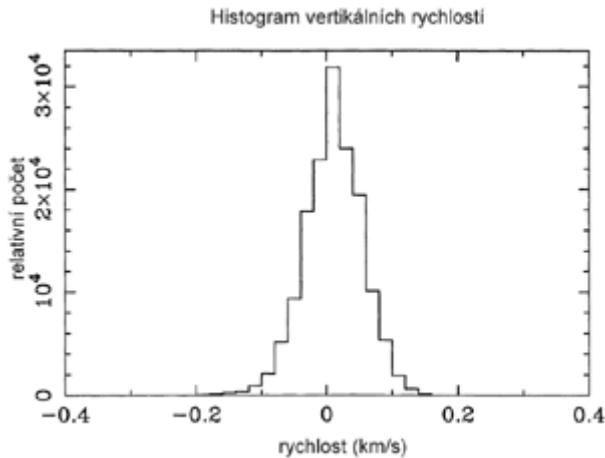
Práce (2) napsaná v roce 1988 H. WANGEM a H. ZIRINEM (oba Big Bear Solar Observatory, CIT, Pasadena) zřejmě nejcelistvěji pokrývá problém supergranulační sítě a proto se o ní zmínme trochu podrobněji.

Oba vědci použili měření rychlostního pole provedená na Národní sluneční observatoři na hoře Kitt Peak v Arizoně LIVINGSTONEM v roce 1976 a rychlostního a magnetického pole získaného na Kitt Peaku a BBSO v letech 1985 a 1986. Rozlišení údajů získaných na BBSO pomocí videomagnetografu (detailně popsán v pracích MOSHERA, 1976 a ZIRINA, 1985) je okolo 0,5", měřené oblasti měly rozměr  $250'' \times 250''$ . Každý den se pozorovalo 7 až 12 hodin a každá oblast se pozorovala průměrně ve třech následujících dnech.

Z principiálních důvodů (rychlostní pole se měří na základě Dopplerova jevu) byla vertikální rychlosť pozorována pouze v okolí středu slunečního disku a horizontální rychlosť dále než  $20^\circ$  v heliografickém úhlu od středu disku.

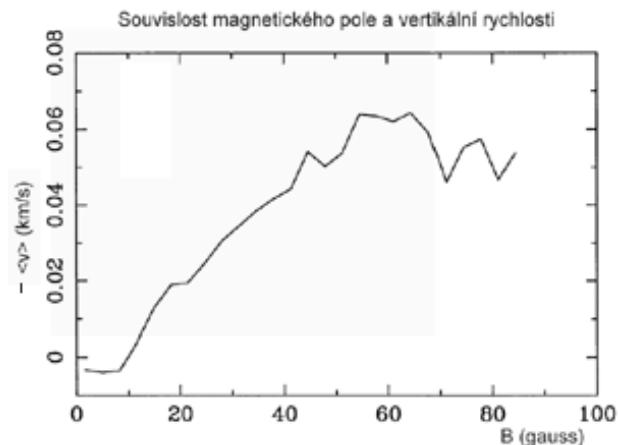
Pětiminutové oscilace byly vyjmuty průměrováním přes jednu pozorovací hodinu. Protože mají různé rychlostní jevy (granulace, rotace, supergranulace a pětiminutové oscilace) různé prostorové škály, můžeme je rozlišit například pomocí Fourierovy transformace tak, že z Fourierova obrazu vyjmeme všechny frekvence výrazně se lišící od předpokládaných velikostí supergranulí (které jsou kolem 30 000 km).

Získané rozložení vertikálních rychlosťí na centru disku ukazuje následující histogram:



Graf ukazuje, že 98,4% plochy měřené oblasti má vertikální komponentu rychlosti menší než 0,1 km/s. Průměrná rychlosť je 0,04 km/s.

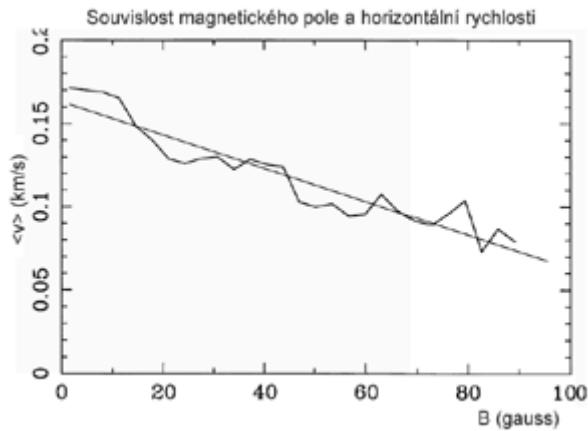
Porovnáním dopplerogramů s magnetogramy se oběma vědcům podařilo odvodit empirický vztah mezi záporně vzatou průměrnou vertikální rychlostí a magnetickým polem v oblasti. Souvislost naznačuje následující graf:



Z grafu je patrné, že pro hodnoty magnetického pole mezi 0 a 50 gaussů je závislost téměř lineární. Proložená regresní přímka je dána rovnicí:

$$\langle \mathbf{v} \rangle [\text{km/s}] = -1,2 \times 10^{-3} B [\text{gauss}]$$

Souvislost mezi průměrnou horizontální rychlostí a změřeným magnetickým polem vystihuje následující graf:



Z grafů je patrné, že rychlostní proudění v aktivních oblastech klesá s rostoucím magnetickým polem, což lze očekávat. Znamená to však, že hranice supergranulační sítě jsou na místech, kde je nejsilnější magnetické pole? Předpokládáme, že dochází k vytlačování magnetických struktur k hranicím supergranulí, zřejmě horizontálním prouděním v supergranulích.

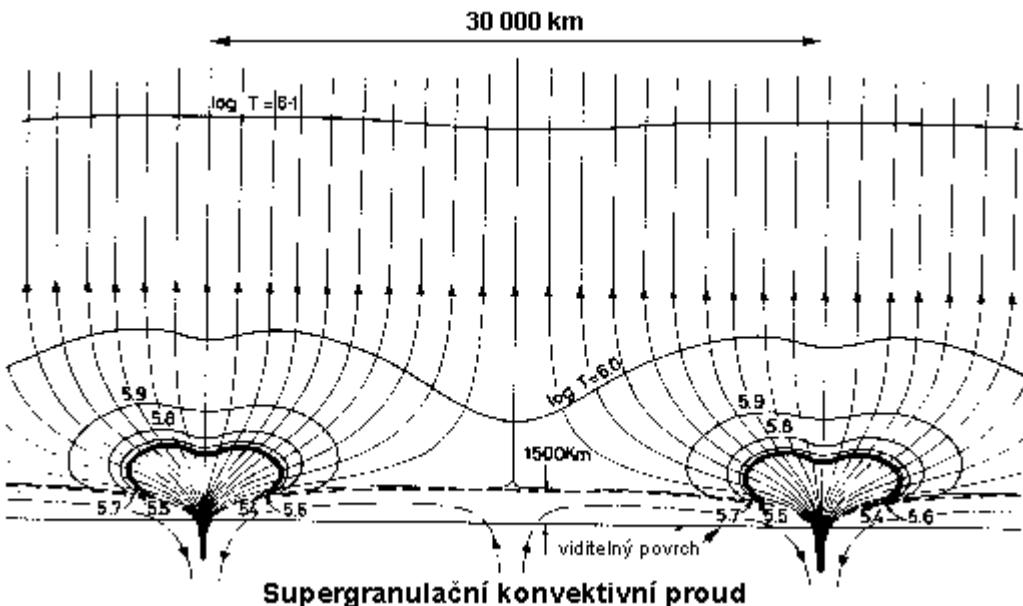
Dlouhodobá pozorování ukazují na velikost supergranulí v hodnotách  $31200 \pm 2300$  km. Touto hodnotou WANG a ZIRIN potvrdili hodnoty získané LEIGHTONEM, NOYESEM a SIMONEM brzy po objevení supergranulace (2). SÝKORA v roce 1971 ukázal, že supergranule jsou zploštělé ve směru kolmém na sluneční rotaci a vysvětlil tento jev působením magnetických polí na pohybující se plazmu. Ukázal, že v době minima je průměrné zploštění supergranule  $\alpha = 0,112 \pm 0,034$  a že v období maxima aktivity zploštění supergranulí klesá. Ve své práci (10) se zabýval velikostí supergranulí v závislosti na fázi slunečního cyklu a poloze supergranule na Slunci. Všiml si, že velikost supergranule roste se sluneční aktivitou; v minimu mívají supergranulární buňky i poloviční velikost, než udává průměrná hodnota, zatímco v maximu činnosti jsou extrémy až dvojnásobně veliké, než uvádí průměrná hodnota. Dále ukázal, že rozměr supergranulí ve směru rotace klesá s heliografickou šírkou. Zatímco v rovníkové oblasti odhalil průměrnou velikost supergranule na 37 000 km, v heliografických šírkách  $\pm 30^\circ$  pak pomocí autokorelační metody změřil průměrnou velikost supergranulí na 32 500 km.

Astronomové operující se sondou ACE monitorující vlastnosti slunečního větru v blízkosti Země vyslovili domněnku, že pomalu se měnící supergranulační síť způsobuje velkorozměrové fluktuace meziplanetárního magnetického pole a tím přímo ovlivňuje

vlastnosti slunečního větru, případně může urychlovat nabité částice, z nichž se sluneční vítr skládá.

Rozhodujícím zlomem při výzkumu supergranulace bylo vypuštění evropsko-americké družicové observatoře SOHO do libračního bodu L1 2. prosince roku 1995. Od té doby máme stálý přísun informací o Slunci a můžeme je s výhodou využít.

V (4) můžeme nalézt následující obrázky popisující numerické simulace rychlostních proudů v supergranululích s použitím dat z observatoře SOHO.



Vertikální řez, horizontální průměr viz příloha č. 5.

#### 4 Návrh metody hledání supergranulí

Numericky lze supergranule nalézt ze sekvence snímků vcelku jednoduchým postupem. Supergranulární síť hledáme v dopplerogramech získaných přímým měřením dopplerovského posunu vybraných spektrálních čar ve viditelném světle. Abychom jednoznačně odhalili supergranulační síť, musíme z dopplerogramů odstranit všechny superponované rušivé jevy. Největší amplitudu z těchto jevů mají tzv. *pětiminutové oscilace*, jejichž perioda je skutečně téměř přesně pět minut a průběh přibližně sinusový. Příklad celkového nezpracovaného dopplerogramu je v příloze č. 1.

Pětiminutové oscilace odstraníme průměrováním série rychle za sebou jdoucích dopplerogramů. Z nich ovšem musíme odstranit posun oblastí způsobený rotací Slunce.

Pro odečítání rychlostí a poloh jednotlivých fotosférických elementů využijeme Carringtonovský systém a jako rychlosť rotace vezmeme hodnotu  $\omega=13,2^\circ/\text{den}$  stanovenou Carringtonem.

Potrebujeme spočítat, o kolik se posune každý bod dané oblasti fotosféry Slunce, pootočí-li se souřadnicový systém o úhel  $\omega t$ , kde  $t$  je časový rozdíl mezi prvním snímkem série, který použijeme pro průměrování, a zpracovávaným snímkem. Přes použití dalších approximací lze bez větších nepřesností použitím zde navrhované metody průměrovat snímky přes asi jednu hodinu.

Vezměme v úvahu, že v námi navrhovaném časovém intervalu max. jedné hodiny bude úhel pootočení Slunce velmi malý (max.  $0,6^\circ$ ), pro posun souřadnice bude tedy platit vztah:

$$(1.) \quad d = R\omega t,$$

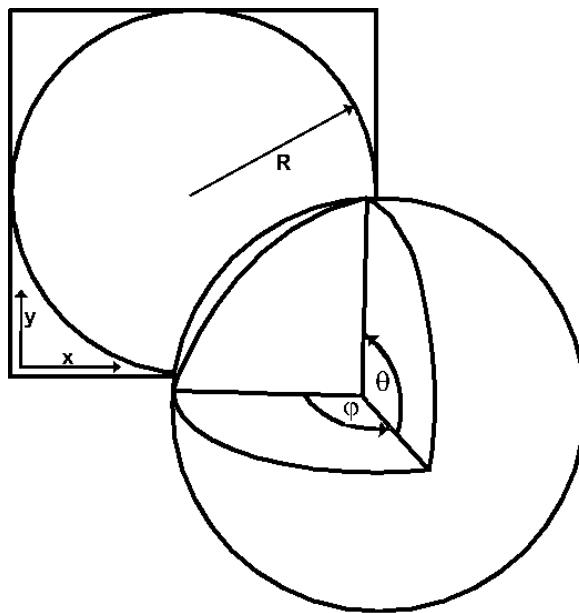
kde  $R$  je poloměr Slunce ( $R \sim 700\,000$  km, v použitých datech  $R=480$  pixelů).

Nyní již stačí jen promítnout takto získanou vzdálenost do směru pozorovatel-střed Slunce (udělat dvojrozměrný průměr na tečnou rovinu v bodě Slunce nejbližším pozorovateli). Označíme-li úhel  $\theta$  jako orientovaný úhel od spojnice východní okraj - střed Slunce ke směru pozorovatele v horizontálním směru a  $\varphi$  orientovaný úhel od horizontální roviny procházející středem Slunce směrem k severnímu pólu, získané korekce budou mít tvar:

$$(2.) \quad \mathbf{dy} = R\omega t \sin b \cos \vartheta \cos \varphi$$

$$(3.) \quad \mathbf{dx} = R\omega t \sin \vartheta \cos (\varphi + b),$$

kde  $\mathbf{dx}$  je již přímo posun souřadnice v horizontálním směru,  $\mathbf{dy}$  posun souřadnice ve vertikálním směru a  $b$  heliografická šířka procházející středem slunečního disku (uvedená např. v tabulkách), zavedeme-li pro dvojrozměrný průměr kartézský souřadnicový systém tak, aby kladný směr  $x$  byl zleva doprava a kladný směr  $y$  byl zdola nahoru.



*Význam a orientace směrů a úhlů*

Použitím součtových vzorců a dalších approximací získáme z (2.) a (3.) konečné vztahy:

$$(4.) \quad \mathbf{dy} = \frac{\omega t}{R}(R-x)\sqrt{2Ry-y^2} \sin b$$

$$(5.) \quad \mathbf{dx} = \frac{\omega t}{R}\sqrt{2Rx-x^2} \left( \sqrt{2Ry-y^2} \cos b - (R-y)\sin b \right)$$

Tento vzorec lze již bez problémů použít při zpracování dat na počítači a pro naše účely je dostatečně přesný.

Pro odstranění rotace jsem v programu IDL použil tuto proceduru:

```

pro DeleteRotation, SourceFile, DestFile, Time, Incl
  SourceFull=read_bmp(SourceFile) ;načtení dat
  source=sourcefull(32:992,32:992) ;ořezání o okrajové oblasti
  res=source

  t=time ; čas, o který se má rotace odstranit (v minutách)
  b=incl ; heliografická šířka středu slunečního disku
  R=480.0 ; poloměr disku Slunce v datech (v pixelech)
  const=13.2/180.0*3.141592*t/60.0/24.0*R ; převod jednotek
  print, const
  for i=0,959 do begin
    for j=0,959 do begin
      if Time gt 0.0 then ii=float(i) else ii=float(959-i)
        ;volba směru průchodu v závislosti na znaménku parametru Time
      jj=float(j)
      x=const*sqr(2.0*R*ii-ii*ii)/R
      x=fix(x/R*(sqr(2.0*R*jj-jj*jj)*cos(b)-(R-jj)*sin(b)))
      y=const*(R-ii)*sqr(2.0*R*jj-jj*jj)*sin(b)/(R*R)
      y=fix(y)
      res[i, j]=source[i+x, j+y]
    endfor
  endfor
  save_bmp, DestFile, Res
end

```

Procedura očekává jako dva parametry popis cesty ke zdrojovému a cílovému souboru (řetězec znaků v uvozovkách; očekává se formát BMP, ale není problém proceduru přepracovat tak, aby byla čtena data v libovolném formátu), pak parametr značící, o kolik se má rotace Slunce "vrátit" v minutách (nebo posunou dopředu, pak je parametr *Time* záporný) a heliografickou šířku středu slunečního disku, kterou lze nalézt v nejrůznějších tabulkách nebo vypočítat podle empirického vztahu:

$$(6.) \quad b = b_{\max} \cos(2\pi(\varphi_p - 0,688)),$$

kde  $b_{\max} = 7^{\circ}15'$  a  $\varphi_p$  je fáze roku (v intervalu 0 až 1), tento vztah můžeme považovat za dostatečně přesný, protože v případě přestupného roku a podobných eventualit se dopouštíme chyby maximálně jedné desetiny pixelu ve zpracovávaném obrazu.

Procedura načte uložený obrázek, ořízne z něj přebytečné prázdné okraje, které by zbytečně prodlužovaly výpočet, projde celý dopplerogram a provede příslušné posuny. Dopplerogram je procházen ve směru východ-západ, pokud je parametr *Time* kladný (otáčíme Slunce v čase zpět), nebo ve směru západ-východ, pokud je parametr *Time* záporný (otáčíme Slunce v čase napřed), aby nedocházelo ke ztrátě informací, protože disk je potřeba "pootočit" ve směru přesně opačném. Vertikální průchod může mít libovolnou orientaci a na její volbě výsledek nezávisí.

Takto získanou sadu opravených měření jsem zprůměroval přes pět minut a odstranil tak dominantní pětiminutové oscilace. Výsledek viz příloha č. 2.

Pro zvýraznění supergranulární struktury jsem napsal proceduru v IDL.

```

pro SmoothImage, SourceFile, DestFile
    Source=read_bmp(SourceFile) ;načtení dat
    Back=Smooth(Source, 30) ;výpočet "pozadí" ze zdrojového obrázku
    Res=Source-Back ;odečet pozadí
    save_bmp, DestFile, Res
end

```

Procedura očekává dva parametry specifikující zdrojový a cílový soubor s daty jako dva textové řetězce specifikující cestu k souborům. Očekává se, že data budou ve formátu BMP, ale není problém změnit proceduru tak, aby načítala a zapisovala data v libovolném formátu.

Procedura také odstraní struktury, které mají charakteristikou velikost mnohem větší, než je předpokládaná velikost supergranulí.

Její aplikací na výsledek průměrování (příloha 2) jsem získal kontrastní obrázek (příloha 3).

## 5 Výsledky

Při práci na svém studentském fakultním grantu jsem úspěšně vyřešil několik fází.

Vyhledal a nastudoval jsem množství prací zabývajících se supergranulační strukturou a jejími vazbami na fyzikální pochody ve sluneční atmosféře. Z těchto prací (uvedených na závěr zprávy o projektu) jsem udělal rešerši a shrnul současné vědomosti o chování, vlastnostech a kvalitativním i kvantitativním pohledu na jevy souvisejícími se sluneční supergranulární strukturou.

Navázal jsem elektronickou cestou kontakt se správci archívu dat kosmické sluneční observatoře SOHO a získal od nich sérii celodiskových dopplerogramů pořizovaných v krátké době za sebou (po třiceti sekundách), které jsou vhodné pro další zpracování navrhovanou metodou. Ze získaných dat (113 high-cadence měření z 15. prosince 1996) jsem použil vzorek pro zpracování a hledání fotosférické supergranulační struktury.

Navrhl jsem metodu, jakou lze odstranit dominantní pětiminutové oscilace a zdůraznit tak supergranulační strukturu v sadě dopplerogramů. Navržený algoritmus umožňuje odstraňovat sluneční rotaci přes interval až jedného hodiny. Tento algoritmus jsem implementoval v programovacím jazyce IDL a vytvořil programové vybavení použitelné pro zpracování získaných dat. Algoritmus je výpočetně i paměťově náročný, sčítání snímků přes prvních pět pozorovacích minut (deset snímků) trvalo na počítači AMD 5x86 133 MHz s 24 MB RAM přes 45 minut.

Hledal jsem souvislosti supergranulační struktury s dalšími fenomény ve sluneční atmosféře.

V případě magnetického pole jsem získal výsledek (viz příloha 4) zasluhující další zkoumání především na úrovni detailních dopplerogramů a magnetogramů.

Odečetl jsem supergranulační síť od chromosférického snímku pořízeného v čáře H $\alpha$  (který jsem aplikací stejné procedury opravil o rotaci) a získal zajímavý výsledek (viz příloha 6), kde je korelace mezi útvary v chromosféře a supergranulační síti více než evidentní. Chromosférická jasová pole v rámci rozlišení přesně navazují na supergranulační síť. Z toho usuzuji, že supergranulace je fenoménem ovlivňujícím velmi silnou vrstvu sluneční atmosféry, nejen jevem fotosférickým.

## 6 Diskuse výsledků

Tato práce je prvním krokem k analýze reálných pohybů ve fotosféře Slunce a pochopení návazností konvektivních struktur na další fyzikální jevy ve sluneční atmosféře.

## 7 Poděkování

Za výraznou pomoc při práci na tomto projektu bych chtěl poděkovat ING. MIROSLAVU KLVAŇOVI, CSc. a RNDr. MICHALU SOBOTKOVI, CSc., pracovníkům slunečního oddělení Astronomického ústavu v Ondřejově, za cennou konzultaci o vývoji aktivních oblastí s ohledem na supergranulační síť pak RNDr. VÁCLAVU BUMBOVI, DrSc. Díky také patří STEELE HILLOVI a WILLIAMU THOMPSONOVÍ za poskytnutí přístupu k datům z družicové observatoře SOHO. Při hledání literatury mi hodně pomohla knihovna Astronomického ústavu a Státní technická knihovna v Praze. Děkuji doc. RNDr. VLADIMÍRU KARASOVÍ, CSc. za to, že mi umožnil tuto práci zpracovat v rámci fakultního grantu.

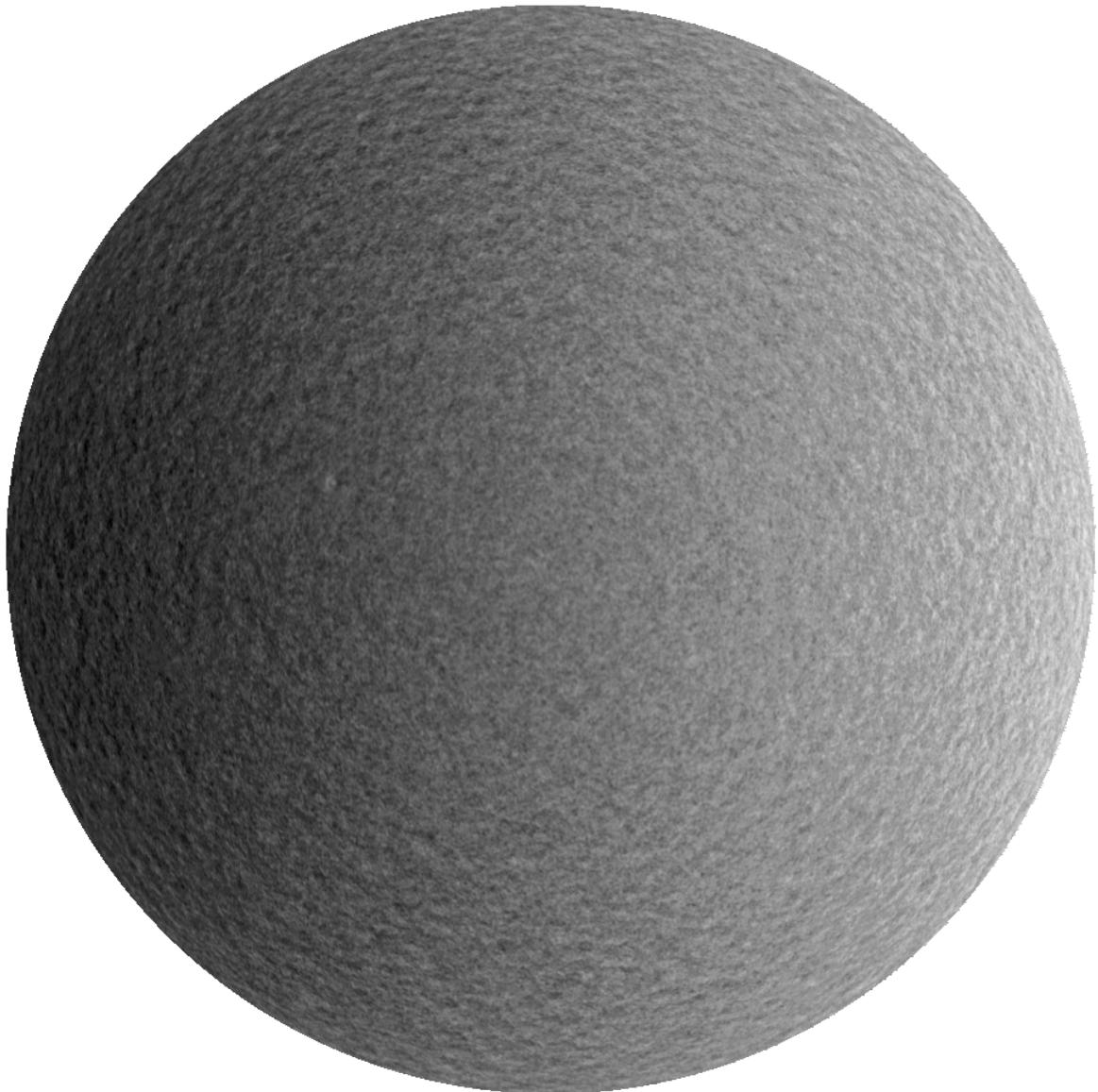
## 8 Literatura

- (1) Knoška, Š. - Vztah magnetického poľa a supergranulačnej siete v niektorých fázach vývoja aktívnej oblasti (*dizertační práce*)
- (2) Wang, H., Zirin, H. - Study of supergranules (*Solar Physics (ISSN 0038-0938)*, vol. 120, no. 1, 1989, p. 1-17.)
- (3) Bogart, R. S., Beck, J. G., Bush, R. I., Schou, J. - Supergranular and Photospheric Motions Near the Solar Poles (*American Astronomical Society Meeting 194*, #93.03)
- (4) Tým MEDOC, Paris - Quiet Sun Transition Region Network ([http://www.medoc-ias.u-psud.fr/instruments/cds\\_spiros.html](http://www.medoc-ias.u-psud.fr/instruments/cds_spiros.html))
- (5) Meunier, N. - Fractal of MDI magnetograms: a contribution to the study of the formation of solar active regions (*The Astrophysical Journal, Volume 515, Issue 2*, pp. 801-811.)
- (6) Kippenhahn, R. - Odhalená tajemství Slunce (*Mladá fronta, Praha 1999*)

- (7) November, L. - The vertical component of the supergranular convection (*Astrophysical Journal, Part 1 (ISSN 0004-637X)*, vol. 344, Sept. 1, 1989, p. 494-503.)
  - (8) Beck, J.G., Schou, J. - Supergranulation rotation (*Solar Physics (ISSN 0038-0938)*, vol. 193, no. 1, 2000, p. 333-343)
  - (9) Beck, J.G., Ulrich, R.K., Hill, F., Bogart, R.S. - Supergranule lifetime and angular momentum transport
  - (10) Sýkora, J. - Vzťah fotosférických magnetických polí ku štruktúre vyšších vrstiev slnečnej atmosféry (*dizertační práce*)
  - (11) Bumba, V., Howard, R. - A study of the development of active regions on the Sun (*Astrophysical Journal, vol. 141*, p.1492)
  - (12) Bumba, V., Howard, R. - On the fine-scale distribution of solar magnetic fields
  - (13) Bumba, V., Howard, R. - On the development of solar flares within the calcium network (*Astrophysical Journal, vol. 142*, p.796)
  - (14) Bumba, V., Howard, R. - Large-scale distribution of solar magnetic fields (*Astrophysical Journal, vol. 141*, p.1502)
  - (15) Bumba, V., Suda, J. - Internal structure of sunspot umbrae (*Astronomical Institutes of Czechoslovakia, Bulletin, vol. 31, no. 2, 1980*, p. 101-111.)
- (X) Materiály na internetu

Příloha 1

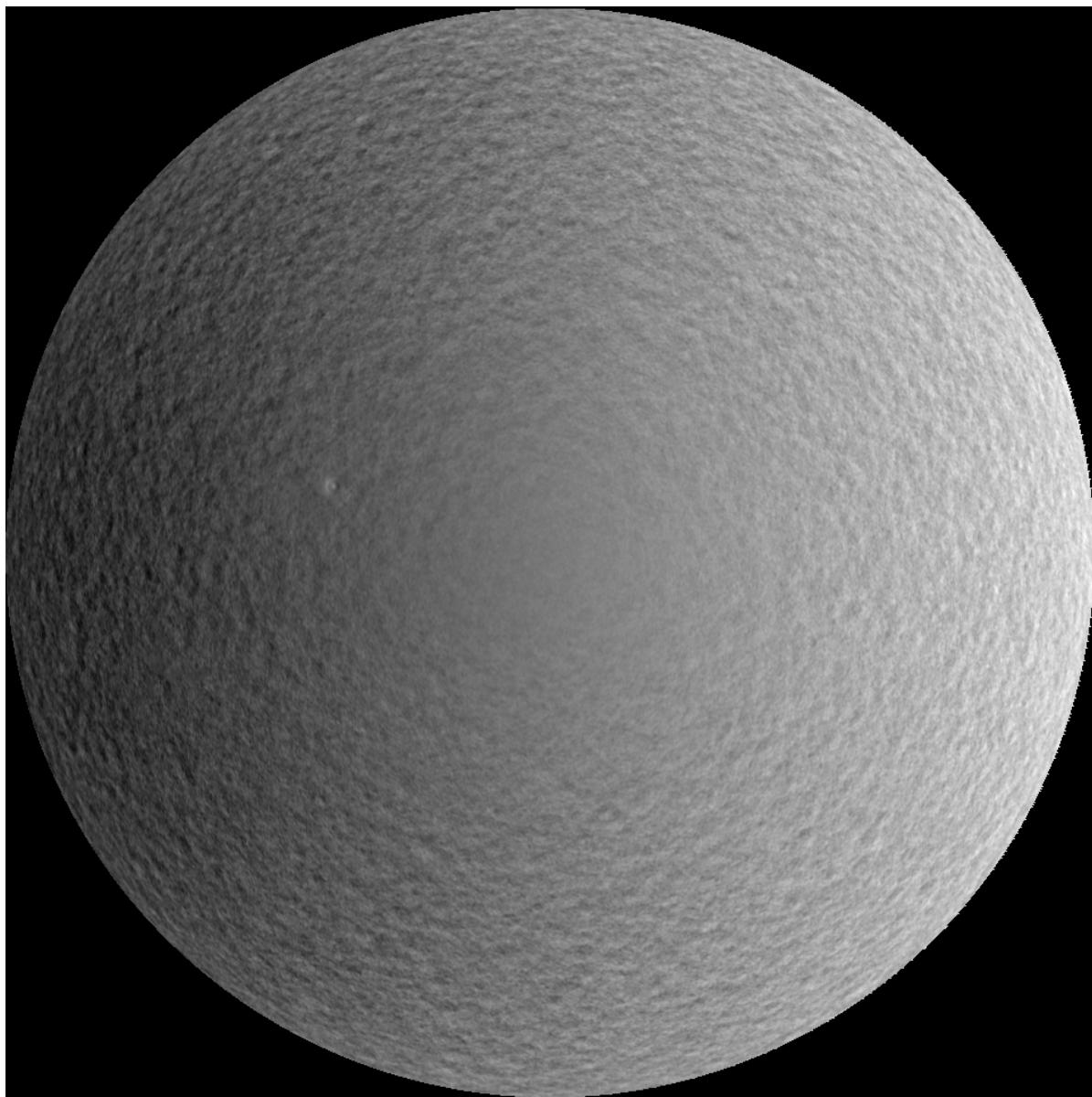
Původní dopplerogram, pořízený 15.12.1996 v 18:03 UT družicí SOHO



*Supergranulační síť není téměř patrná, je překryta pětiminutovými oscilacemi  
Tmavší barva znamená směr pohybu k pozorovateli, světlejší od pozorovatele*

Příloha 2

Průměrovaný snímek přes prvních pět minut pozorovací série

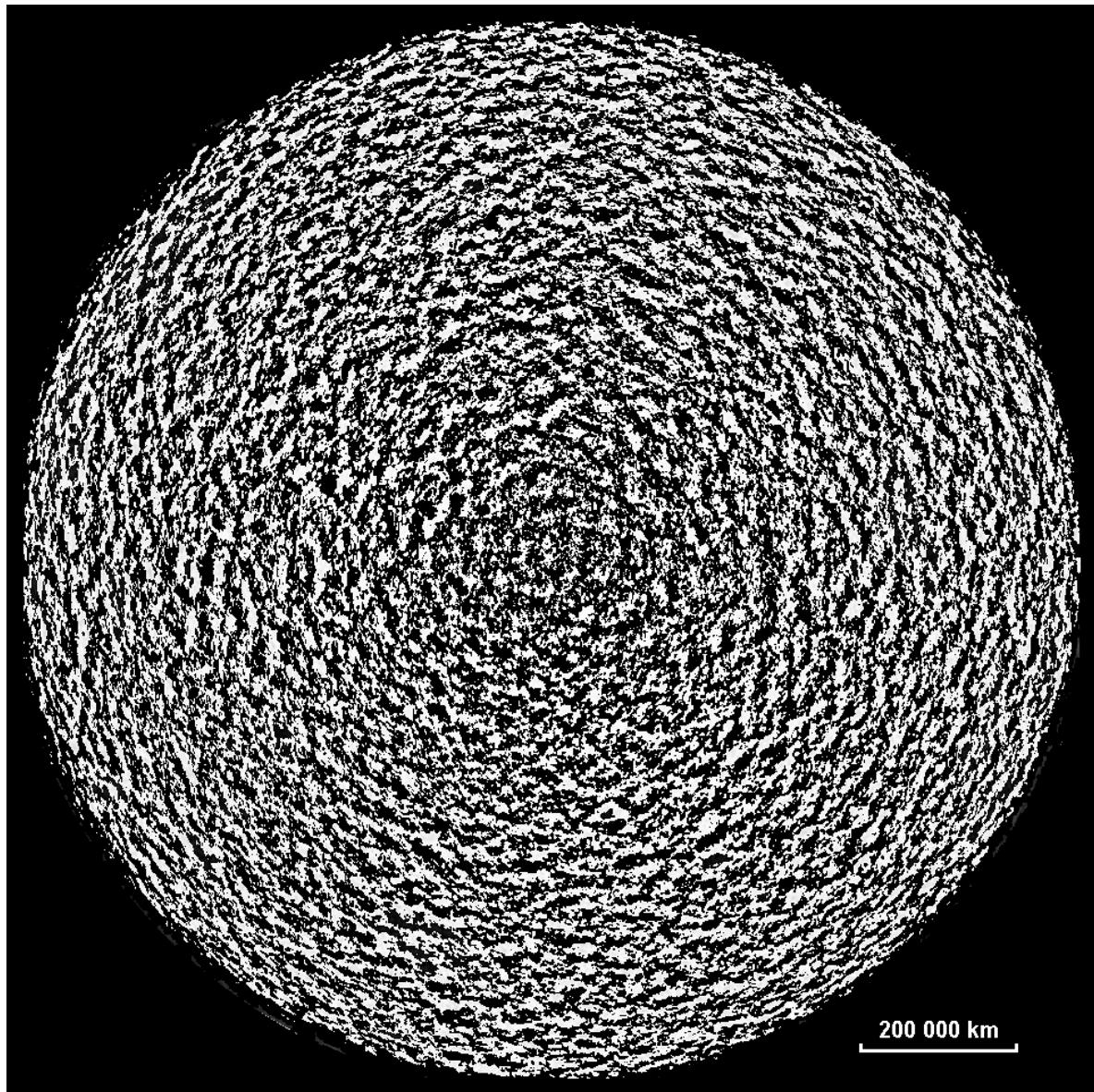


15.12.1996 18:03:00-18:08:00

*Po průměrování jsou odstraněny pětiminutové oscilace a supegranulační síť je již docela  
dobře patrná*

*Tmavší barva znamená směr pohybu k pozorovateli, světlejší od pozorovatele*

Příloha 3  
Průměrováný snímek bez pozadí

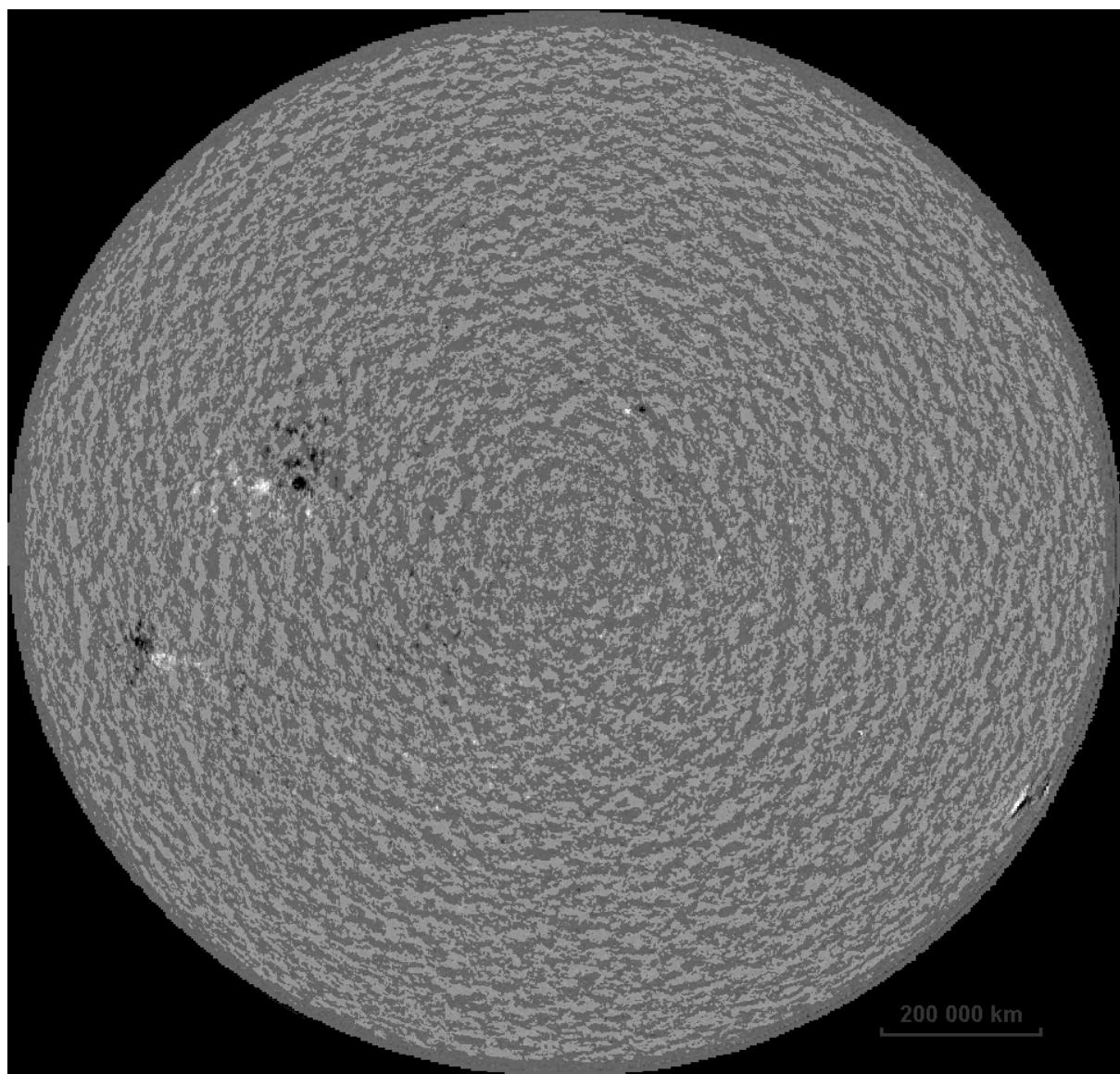


*Supergranulační síť je velmi zvýrazněna. Přidané měřítko ukazuje, že nalezené struktury mají předpokládané rozměry kolem 30 000 km*

*Tmavší barva znamená směr pohybu k pozorovateli, světlejší od pozorovatele*

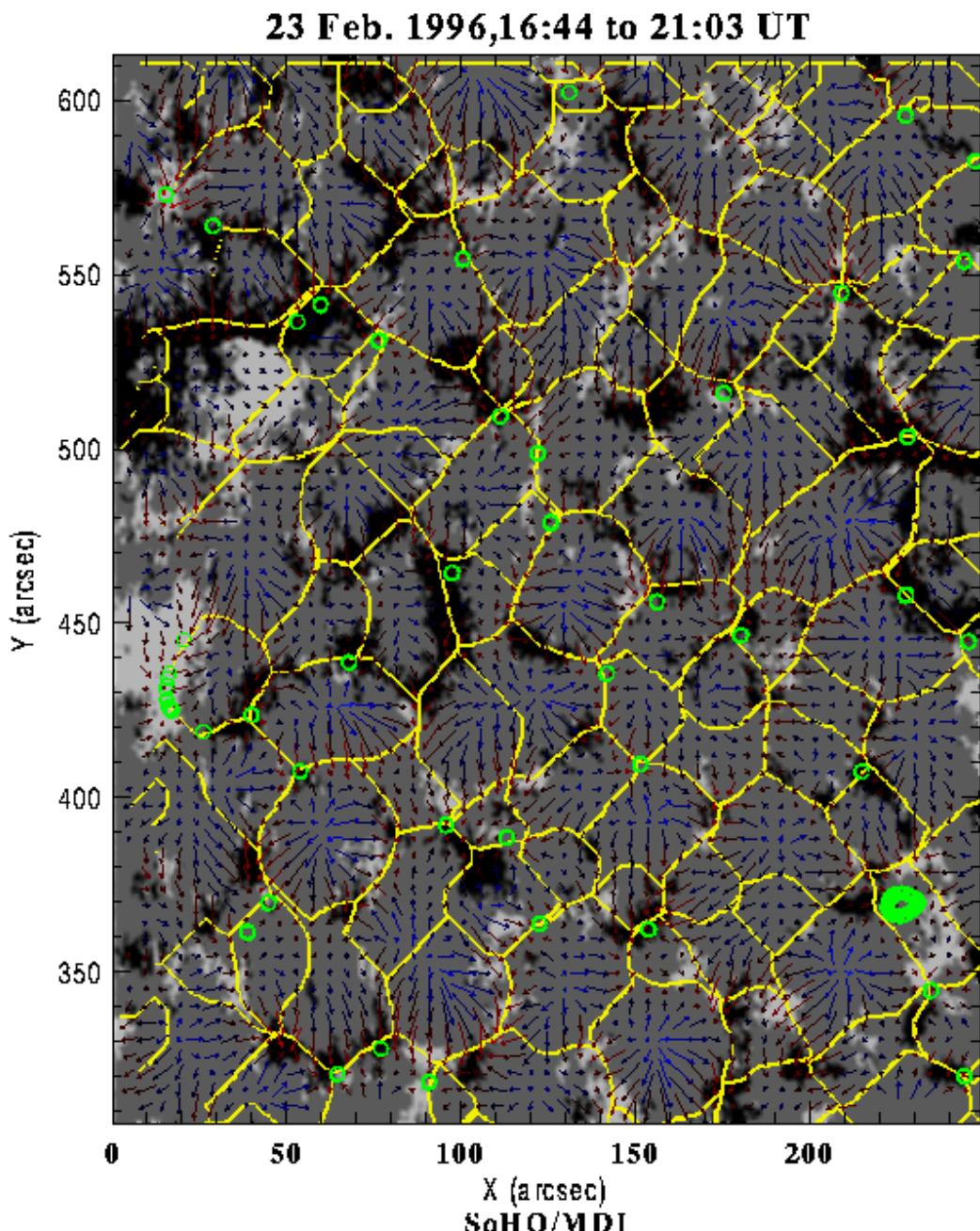
Příloha 4

Překrytí magnetického pole a supegranulační sítě z předchozího obrázku



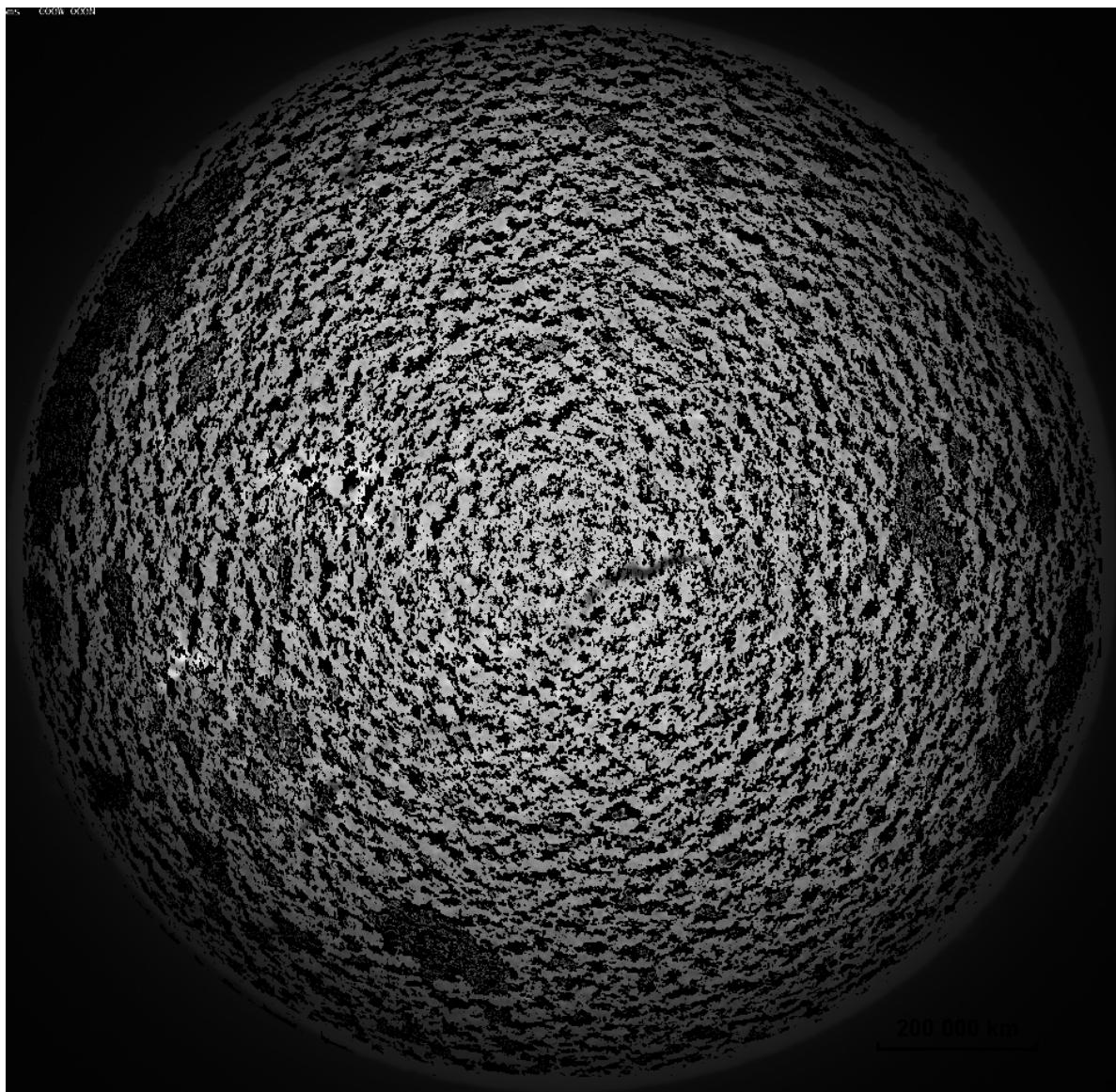
Příloha 5

Horizontální průmět modelovaného rychlostního pole



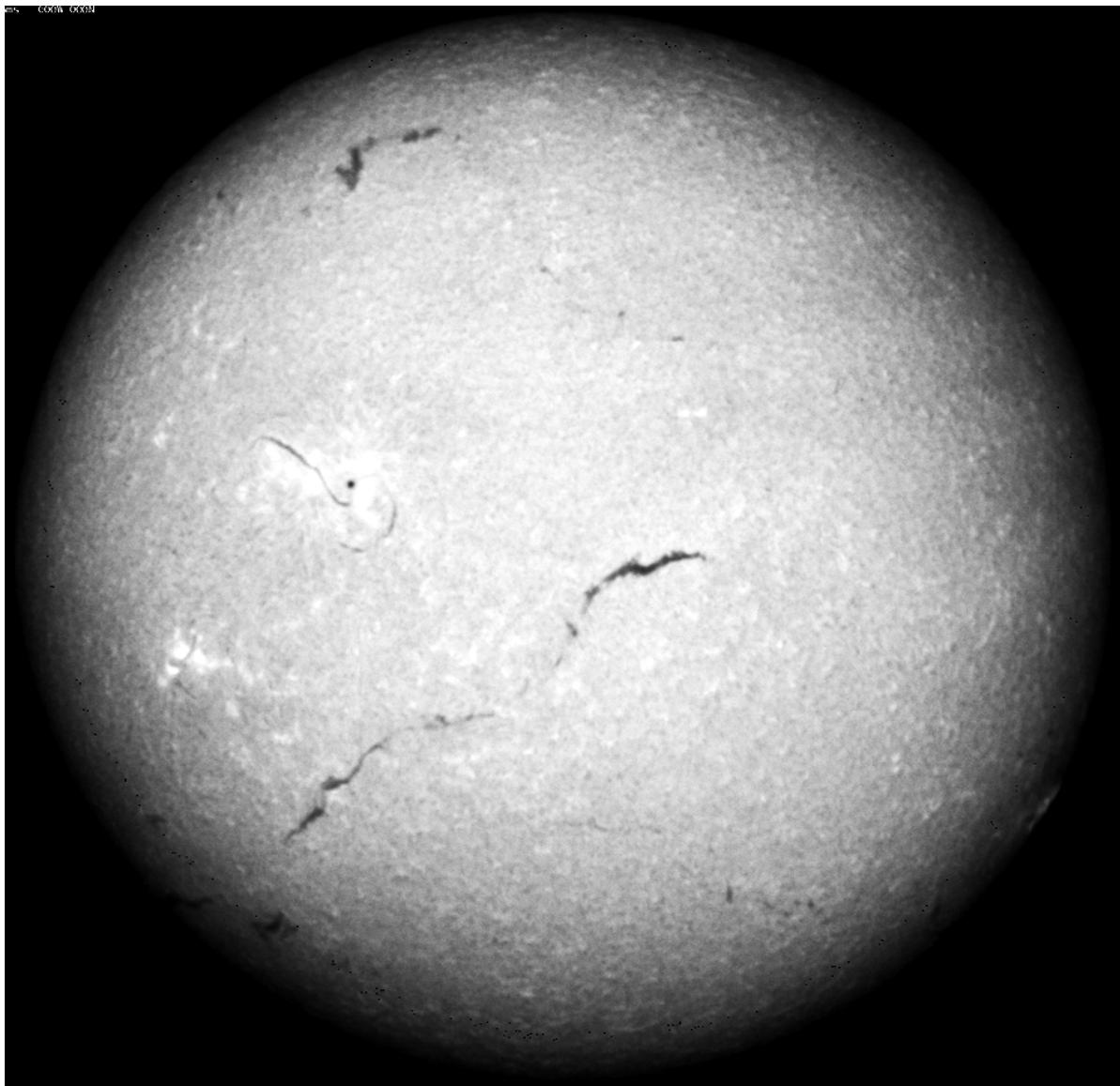
## Příloha 6

Překrytí supergranulační sítě a chromosférického snímku v čáře H $\alpha$



*Tmavší plochy jsou chromosférickými útvary, jejich souvislost s fotosférickou  
supergranulační sítí je evidentní*

## Příloha 7



Chromosférický snímek, upravený na 18:03:00 UT

*Snímek pořízený 15.12.1996 v 16:11:05 UT na BBSO zachycuje aktuální stav chromosféry. Za zmínku jistě stojí velmi dlouhý filament vedoucí od jihovýchodu směrem k centru disku.*