

*** 3/2007 ***

Sluneční fotosféra: Pohybová dynamika mnoha tváří I.

Slunce je vcelku obyčejnou hvězdou spektrální třídy G2 nacházející se na hlavní posloupnosti H-R diagramu. Kdybychom její parametry hodnotili ve vzorku hvězd, které jsou pozorovatelné okem na městské obloze, dospěli bychom k závěru, že je Slunce hvězdou naprosto podprůměrnou. Z pěti set hvězd jasnějších čtyř magnitud jsou pouze tři méně zářivé než Slunce. Situace se obrátí, vezmeme-li v úvahu lepší statistický vzorek, tedy hvězdy ve slunečním okolí. V tom případě se ukáže, že celých 95 procent hvězd ve slunečním okolí je méně zářivých než Slunce. Ve světle těchto okolností je Slunce superhvězdou. A jako správnou superhvězdu ji čeká ještě dlouhý život. Současné stárí 4,5 miliard let odpovídá střednímu věku, neboť ještě 6,4 miliard let pobude v produktivním stavu na hlavní posloupnosti a do důchodu, do stadia bílého trpaslíka, odejde až za nějakých 8 miliard let.

Na úvod si zopakujme stratifikaci slunečního nitra. Najdeme zde vše, co můžeme od hvězd očekávat. V samotném nitru probíhají v oblasti o poloměru cca $0,1R_{\odot}$ termojaderné reakce, tedy slučování vodíku na helium především proton-protonovým cyklem. Teplota a hustota ve slunečním jádře ($15,7$ MK, 151 g.cm^{-3}) jsou dostatečné k udržení stabilní reakce. Již téměř čtvrtina jaderného paliva se přeměnila na popel první fáze jaderného vývoje. Nad $0,15 R_{\odot}$ teplota poklesne pod zápalnou mez termojaderné reakce a další vrstva slouží jako médium pro přenos vznikajícího tepla ve formě vysokoenergetických fotonů. Oblast mezi $0,15$ a $0,7 R_{\odot}$ se nazývá vrstvou v zářivé rovnováze, neboť stavové parametry plazmatu dovolují téměř stoprocentní průhlednost pro procházející fotony. Na $0,7 R_{\odot}$ klesá stupeň ionizace vodíku a plazma se stává ve velmi tenké vrstvě téměř skokově neprůhledným. Energii je ale zapotřebí i nadále odvádět.

NEJBLIŽŠÍ AKCE PRAŽSKÉ POBOČKY



Žeň objevů 2006

Ve středu 4. dubna 2007 od 18.30 proběhne v přednáškovém sále Štefánikovy hvězdárny tradiční přednáška RNDr. Jiřího Grygara, CSc. „Žeň objevů 2006“. Přednáška je přístupná veřejnosti, členové Pražské pobočky mají vstup zdarma.

Nastupuje jiný způsob vedení energie – konvekce. Až k povrchu podléhá vnější obálka mohutným konvektivním pohybům na mnoha časových i prostorových škálách.

Hraniční vrstvou je sluneční fotosféra, jejíž dynamiku probereme poněkud podrobněji. Nad fotosférou se rozkládají řídké vrstvy sluneční atmosféry. Zatímco vrstvy až do fotosféry včetně byly dostatečně husté na to, aby se nacházely ve stavu lokální termodynamické rovnováhy, v chromosféře a koróně už toto neplatí. V obou vrstvách se obrací chod teplot, ohřev je způsoben jednak disipací magnetohydrodynamických vln, jednak – a především – Joulovým teplem, které uvolňují elektrické proudy tekoucí podél smyček magnetických siločar. Chromosféra i koróna jsou v důsledku non-LTE a nízké hustoty velmi strukturované s výskytem nejrůznějších aktivních jevů. Obě vrstvy jsou v současnosti tahounem slunečního výzkumu, je obtížné vytvořit odpovídající modely, které by s požadovanou přesností reprodukovaly vlastnosti pozorovaných struktur.

Fotosféra a její pozorování

Fotosféra je hraniční vrstvou slunečního nitra. Většinou je považována za spodní vrstvu sluneční atmosféry. Je poslední vrstvou, kterou lze považovat s dobrým přiblížením za vrstvu v lokální termodynamické rovnováze. Je definována jako vrstva, z níž k nám přímo přichází viditelné sluneční záření, což odpovídá tloušťce cca 300 km, v níž se mění hustota prakticky o tři řády. Fotosféra je jedinou vrstvou, kterou můžeme pouhým okem pozorovat bez speciálního vybavení každý bezoblačný den. Z tohoto důvodu je také pozorovatelsky nejlépe popsána a my víme, že se v ní vyskytují mnohé útvary, které jsou považovány za základní fyzikální struktury na Slunci. Jedná se především o sluneční skvrny, sluneční granulaci a fakulová pole.

Fotosféra je pozorována od pradávna v „bílém světle“. Protože je velmi intenzivním zdrojem záření, je velmi výhodné mít možnost si intenzitu ztlumit a vyhnout se tak poškození zraku. K tomuto účelu poslouží neutrální filtry nebo speciální helioskopický okulár, případně projekce za okulárem. Pokud chceme fotosféru fotografovat, je nutné použít krátkých expozic, neboť v amatérských podmínkách je světla přicházejícího z relativně velkého zorného pole dost. Moderním přístupem je ovšem pozorování pomocí velkých dalekohledů, které umožňují pozorování ve vysokém rozlišení, kdy jsme schopni rozlišit ve fotosféře útvary o rozměrech několika stovek kilometrů. Současným etalonem jsou dalekohledy na Kanárských ostrovech, které s nasazením adaptivní optiky a následného počítačového zpracování (skvrnkové interferometrie, fázové diverzity) umožňují rozlišit v bílém světle detaily o rozměrech 70 km.



S výhodou se používá pozorování nikoli v integrálním světle, ale v úzkopásmových filtrech, v oblasti vyzařování nebo absorpce určitého chemického prvku nebo molekuly. Taková pozorování pak přinášejí více informací o probíhajících procesech ve fotosféře. Např. pozorováním v oblasti zvané G-band v modré oblasti spektra je možné získat informace o nejmenších elementech magnetických polí.

Pozorování ve velmi úzkých spektrálních čarách se používá k pořizování specifických typů měření, popisujících jiné parametry plazmatu než jeho jas (a potažmo teplotu). Z Dopplerova a Zeemanova jevu lze změřit složku rychlosti plazmatu ve směru k pozorovateli a stejnou složku magnetického pole – použijeme-li polarimetrické filtry, můžeme z hodnot Stokesových parametrů s pomocí inverzních technik vypočítat celý vektor magnetického pole a další informace.

Velké množství přístrojů nejrůznějších typů bylo též umístěno na kosmické sondy, neboť pozorování na nich není omezováno střídáním dne a noci a atmosférickými podmínkami.

... pokračování v příštím čísle.

Mgr. Michal Švanda

*Michal Švanda (*1980), vystudoval obor astronomie a astrofyzika na MFF UK. V současnosti pokračuje v postgraduálním studiu se zaměřením na dynamiku sluneční fotosféry ve spolupráci s Astronomickým ústavem AV ČR. Člen sdružení Amatérská prohlídka oblohy a demonstrátor Štefánikovy hvězdárny.*

OBJEVITELÉ NEBES



Giovanni Battista Donati (1826 – 1873)

Italský astronom, od roku 1863 ředitel observatoře ve Florencii. Patřil k zakladatelům spektroskopie Slunce a hvězd. Prováděl rovněž spektroskopický výzkum komet a zjistil, že komety jsou alespoň z části plynné podstaty. V letech 1854–64 objevil šest nových komet, mezi nimi i slavnou Donatiho kometu z roku 1858 (objev 2. června).

-pn-

*** 4/2007 ***

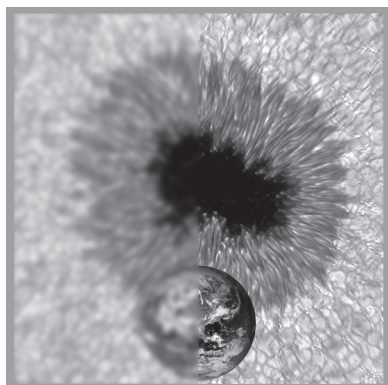
Sluneční fotosféra: Pohybová dynamika mnoha tváří II.

Měření rychlostních polí

Nutno podotknout, že ač se rychlostními poli, resp. pohyby, ve sluneční fotosféře zabývají sluneční fyzikové již od poloviny 19. století, kdy Richard Carrington z pohybů skvrn odvodil, že Slunce nerotuje jako tuhé těleso, ale že rotuje diferenciálně, zdaleka nejsou všechny otázky zodpovězeny, a naopak se zdá, že s objevem nových skutečností naopak otázky spíše vyvstávají. Obecně vzato nelze přímo změřit pohyby plazmatu nebo struktur ve fotosféře ve všech třech směrech. V současné době existují tři typy metod, které poskytují informace o pohybech ve fotosféře.

Na nejjednodušší z nich jsme již narazili. Změřením Dopplerova jevu lze odvodit informaci o pohybu plazmatu ve směru k pozorovateli. V zásadě je možné odvodit takovou informaci pro každý bod slunečního disku (v rámci rozlišení poskytovaného přístrojem). Takto vzniklým mapám podélné složky rychlosti se říká *dopplergramy* a jsou produktem měření na mnoha observatořích (Kitt Peak, WSO Stanfordovy univerzity, SoHO, Solar-B). Nejvýraznějším pohybem, který má svůj otisk v dopplergramu, je sluneční rotace. Výpočtem lze ověřit, že i takto změřená rotace je diferenciální. Podobně je možné z řezů diskem po odstranění rotačního profilu získat z variací rychlosti kolem střední hodnoty informaci o typických rozměrech dalších rychlostních struktur, např. *supergranulace*. Z koncentrických mezikruží lze získat statisticky významné hodnoty typických vnitřních rychlostí v supergranulaci. A v neposlední řadě lze v dopplergramech pozorovat *sluneční oscilace*, o nichž bude ještě řeč.

Možnost získat informaci o pohybech struktur, které nemusí být identické s pohyby hmoty, podává metoda *local correlation tracking*. Metoda byla navržena v roce 1986 Larrym Novemberem pro detekci distorze sekvence snímků granulace chvěním vzduchu. O dva roky později byla týmž autorem využita k detekci pohybů jednotlivých granulí. Metoda je velmi jednoduchá a přímočará: pro každý pixel obrazu vybere jeho zvolené okolí. Pak se prochází druhým obrazem, který postihuje stejnou oblast slunečního disku, jen v jiném čase, bod po bodu a porovnává (koreluje) stejně velké okolí. V praxi prohledává jen několik soused-



Obr. 1: Kouzlo adaptivní optiky. Vlevo snímek pořízený bez jejího použití (pro srovnání velikosti Země a simulace jejího rozostření), vpravo po zapnutí adaptivní optiky. (c) SST

ních pixelů původní pozice. Jakmile je nalezena nejlepší shoda obou oken, je rozdíl souřadnic jejich středů prohlášen za posuv pixelu oproti původní pozici a z tohoto posunutí a časového odstupu obou obrazů je vypočten vektor rychlosti v průmětně.

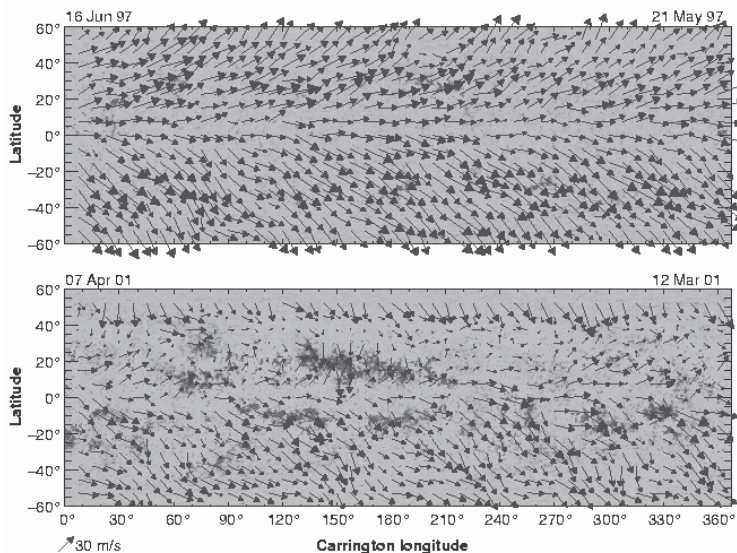
Metoda poskytuje obecně dvě složky vektoru, které leží v průmětně pozorování. O třetí složce musí být získána informace nezávislou metodou, případně si můžeme vystačit s předpokladem, že veškeré velko-
rozměrové pohyby ve fotosféře jsou vzhledem k její tloušťce horizontální. Výsledky měření budou samozřejmě závislé na volbě velikosti korelačního okna, jehož rozměr se volí v závislosti na typické velikosti objektu, který sledujeme.

Helioseismologie

Bezpochyby jednou z nejmodernějších analytických metod, kterou používají současní sluneční fyzikové, je *helioseismologie*. Přestože se metoda postupně vyvíjí v mnoha svých variantách od šedesátých let minulého století, kdy byly poprvé pozorovány sluneční oscilace, podléhá stálému zpřesňování i zcela novým postupům a zdaleka ji ještě nelze prohlásit za hotovou a stoprocentně spolehlivou.

Sluneční (a obecně hvězdné) oscilace mohou být pozorovány třemi způsoby. Jako změna celkového zářivého toku, jako změny dopplerovských rychlostí a také jako změny ekvivalentních šířek teplotně závislých čar. Všechny tři jevy jsou odrazem hydrodynamických nestabilit v nitru hvězdy. Podle typu jsou rozlišovány oscilační módy p , g a f . V případě Slunce poskytují nejsilnější signál zvukové (p) módy s periodou 296 sekund, které jsou ovšem konstruktivní interferencí cca 10 milionů různých druhů zvukových oscilací, odlišených frekvencí a vlnovou délkou.

Teorie oscilací se odvíjí od znalosti stavových parametrů ve slunečním nebo hvězdném nitru. Na jejich základě lze z hydrodynamických rovnic odvodit, jakým způsobem se bude chovat vnesená porucha, jako může být například element plazmatu vychýlený ze své rovnovážné pozice. Ze stejných rovnic lze odvodit, zda se element bude ve svém pohybu utlumovat a splyne s okolím, nebo jestli se



Obr. 2: „Sub-surface weather“ je termín používaný pro mapy podpovrchových toků ve fotosféře s odstraněnou diferenciální rotací a často i meridionální cirkulací. Jejich topologie je odlišná v období slunečního minima (nahore) a slunečního maxima (dole). Patrné jsou náznaky konvergentních toků v aktivních oblastech (na pozadí jsou struktury magnetického pole). Převzato z Toomre, J.: 2004, *Order Amidst Turbulence*, *Science* 296, 64–65.

vzruch bude šířit dál a budit při svém pohybu spektrum mechanického vlnění. Z rovnic lze dokonce i odvodit, jaký typ vln a jaké frekvence bude taková porucha budit.

Tímto způsobem funguje tzv. *přímá úloha* – tedy výpočet teoretického spektra oscilací na základě znalosti slunečního modelu. Již jednoduchá měření prováděná v šedesátých letech minulého století ukázala, že spektrum slunečních oscilací není spojité, ale diskrétní (tedy že se v něm vyskytují některé izolované frekvence) a že diagram vlnová délka-frekvence má charakter hřbetů. Modely ukázaly, že je to důsledek vzniku stojatého vlnění, které se jako jediné dlouhodobě uchová, zatímco ostatní kombinace vlnové délky a frekvence, které nedokáží vytvořit stojatou vlnu, se velmi rychle utlumí.

Problémem je však neznalost přesného modelu Slunce. Naštěstí lze v případě oscilací řešit úlohu opačnou – *inverzní*, pro jejíž řešení jsou vyvinuty inverzní

metody. V popisných rovnicích použitých pro konstrukci modelu se vyskytují volné parametry, které je možné s použitím inverzních metod na základě měřených frekvencí oscilací zafixovat.

Výhodou zejména zvukových módů oscilací je jejich lokalizace v hloubce. Mody s kratší vlnovou délkou pronikají relativně mělce do nitra, zatímco mody s delší vlnovou délkou pronikají hlouběji. Studium vln s konkrétní vlnovou délkou pak můžeme provádět hloubkovou sondáž.

Popsaným způsobem víceméně funguje tzv. *globální helioseismologie*. Ta využívá měřeného spektra oscilací pocházejících z velké oblasti slunečního disku ke stanovení globálních parametrů slunečního modelu a průběhu stavových funkcí. Ve své podstatě zachází se Sluncem jako s hvězdou, a proto je v poslední době tato metoda úspěšně aplikována i na další různé typy hvězd.

Oproti tomu *lokální helioseismologie* obecný sluneční model potřebuje jako vstupní informaci. Její úlohou je využít měření oscilací v malé lokalizované oblasti a vytěžit informace o struktuře slunečního nitra pod sledovanou oblastí. Metoda umožňuje získat informace o existujících magnetických polích, měnící se rychlosti zvuku a nebo měřit pohyby plazmatu.

V zásadě jsou dva přístupy k lokální helioseismologii. *Metoda kruhového diagramu* je založena na analýze rozšířené verze již zmíněného k-omega diagramu. Vlnový vektor k se obecně rozloží do složek ve dvou směrech, čímž diagram nabude své třírozměrné podoby. Každý řez rovinou rovnoběžnou s frekvenční osou má vzhled klasického k-omega diagramu, tedy hřebenovité struktury. Ovšem řezy při konstantní frekvenci mají v ideálním případě tvar soustředných kružnic, každá kružnice pro jednu vlnovou délku. V případě existence vnitřní poruchy jsou kružnice buď posunuté vůči středu (tímto způsobem lze usoudit na pohyby plazmatu), nebo jsou deformované (pak se usuzuje na problémy ve stavové rovnici, čili např. existenci magnetických polí). Metoda je přímočará, avšak vytvoření statisticky spolehlivého souboru k vytvoření ring-diagramu vyžaduje drastickou redukci prostorového rozlišení (obvyklé prostorové rozlišení je kolem pěti stupňů v heliografických souřadnicích).

Zcela jiný přístup přináší *metoda měření cestovních časů*, metoda *time-distance*. Měření spočívá ve sledování jednoho konkrétního vzruchu, o němž se předpokládá, že se v ideálním případě bude rozbíhat od sledovaného bodu jako kruhová vlna, která proniká nitrem a jednou se opět dostane k povrchu. Z odchylek od předpokládané kruhové trajektorie se dopočítají změny vnitřních toků a změna vnitřní struktury pod sledovanou oblastí. Zásadní výhodou této metody je prostorové rozlišení, které je téměř shodné s rozlišením použitých dat.

Zvláštní odrůdou lokální helioseismologie je *helioseismická holografie*, jež



je podobná metodě měření cestovních časů. Ze sledování oscilací na přivrácené straně lze usoudit na jejich fázové poruchy, které lze přímo převést na informace o magnetickém poli na odvrácené straně. Metoda je v rámci rozlišení velmi úspěšná a dnes jsou její výsledky platným pomocníkem při předpovídání sluneční aktivity.

Struktura rychlostních polí

Popsanými metodami, v poslední době zejména s důrazem na helioseismologii, jsou získávány informace o pohybech hmoty nebo struktur ve fotosféře (v případě dopplerovské analýzy nebo LCT), případně ve fotosféře a vnější obálce (to umožňuje jedinečně helioseismologie). Projděme si postupně poznatky, které byly uvedenými metodami získány.

Předně bych chtěl upozornit, že se zřejmě nedobereme žádného jednoznačného závěru, co se týče vazby mezi jednotlivými strukturami rychlostí. V problematice je stále ještě dost nejasností. Dá se s určitou mírou nadsázky říci, že pohyby ve fotosféře jeví *fraktální strukturu*. Tedy že jsme se zatím nedobrali prostorové škály, na níž by se v pohybech přestaly projevovat efekty prostorového ustřednění.

Důležitá otázka, která trápí fotosférické dynamiky, je, zda jsou velkoškálová rychlostní pole pouhým ustředněním polí maloškálových, nebo zda na jednotlivých škálách fungují separátní mechanismy, které dané pohyby udržují. Pokud konkrétních škálách funguje nějaký přídavný fyzikální mechanismus, pak studie s jiným než charakteristickým rozlišením jsou vlastně chybné, neboť do výsledků reálných pohybů se započítá chybné ustřednění, a výsledky jsou pak značně zkreslené. I díky tomu je dobře popsáno chování pohybů při konkrétních prostorových rozlišeních, ovšem jejich vzájemná interkontivita do jisté míry chybí, nebo dokonce vůbec nefunguje.

... pokračování v příštím čísle.

Mgr. Michal Švanda

*Michal Švanda (*1980), vystudoval obor astronomie a astrofyzika na MFF UK. V současnosti pokračuje v postgraduálním studiu se zaměřením na dynamiku sluneční fotosféry ve spolupráci s Astronomickým ústavem AV ČR. Člen sdružení Amatérská prohlídka oblohy a demonstrátor Štefánikovy hvězdárny*

*** 5/2007 ***

Sluneční fotosféra: Pohybová dynamika mnoha tváří III.

Konvekce

Základním řídicím mechanismem všech fotosférických pohybů je konvekce. Konvektivně nestabilní je celá vnější obálka slunečního nitra, počínající na 0,7 slunečního poloměru. To je místo, kde při teplotě 2 106 K klesá míra ionizace plazmatu, které se stává pro prodírající se gama a ultrafialové fotony neprůhledné. Hraniční vrstva je schopna jistou dobu akumulovat energii a pomalu ji odvádět vedením až do kritické teploty, při které již libovolná porucha rozžhýbe konvektivní pohyb. Základ konvekce spočívá ve vzestupu přehřátého objemu plazmatu (který má v důsledku stavové rovnice menší hustotu) k povrchu, kde se zářivým způsobem tepelně ochladí, jeho objem klesne (hustota naroste), díky čemuž klesá zpět dolů, kde se opět ohřeje atd. atd. Konvekce je jev chaotický, čili pouze v uměle stabilizovaných experimentech lze dosáhnout teoretiky předpovědného šestiúhelníkového povrchového obrazce, kdy uprostřed buněk dochází k vyvěrání teplé hmoty, zatímco na okrajích (na styku sousedních buněk) k poklesu chladné hmoty zpět dolů.

Nejvýraznějším projevem konvekce ve sluneční fotosféře je bezesporu granula-

NEJBLIŽŠÍ AKCE PRAŽSKÉ POBOČKY

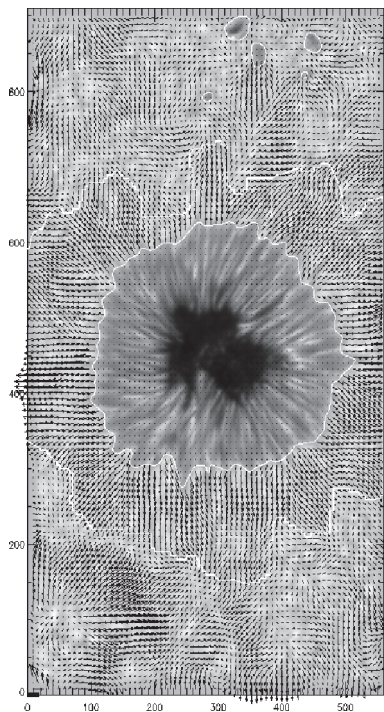


Exkurze ke stroji Pražského orloje na Staroměstském náměstí

Ve čtvrtek 17. května 2007 se koná exkurze ke stroji Pražského orloje na Staroměstském náměstí. Ke stroji (přístup dvířky pod orlojem) nás pustí orlojník pan Otakar Zámečník a odborný výklad provede RNDr. Zdislav Šíma. CSC. z AsÚ AV ČR, v.v.i.. Exkurze je již plně obsazena.

Exkurze na Český hydrometeorologický ústav v Libuši

Ve středu 6. června 2007 v 18.00 pořádá PP ČAS pro své členy exkurzi do Českého hydrometeorologického ústavu v Libuši. Na exkurzi zazní přednáška na téma „Meteorologické sondy, radarové a družicové technologie v meteorologii“. Na závěr exkurze budeme asistovat při vypuštění meteorologického balónu. Počet účastníků je omezen. Přihlášky na exkurzi přijímá Mgr. Lenka Soumarová (soumarova@observatory.cz, 603 759 280). Sraz účastníků je na autobusové zastávce „Observatoř Libuš“ (linky 165, 117) v 17:50.



Obr. 1.: Pohyby granulí v těsném okolí sluneční skvrny. Dobře patrný je tzv. moat, tedy oblast charakterizovaná toky směrem od skvrny.

a životností typicky kolem 24 hodin. O supergranulích, jejichž vnitřní rychlostní pole je převážně horizontální s amplitudou kolem 300 m/s, se předpokládá, že jsou odpovědné za středněrozměrový transport magnetického pole ve fotosféře, za koncentraci jednotlivých magnetických trubic v prostoru na styku více supergranulí, čímž přispívají ke vzniku slunečních skvrn. Pozorovatelé tvrdí, že sluneční skvrna vzniká vždy na rozhraní tří supergranulí a vyvinutá skvrna zabírá ve fotosféře vždy celistvý počet supergranulí. Teplotní kontrast mezi centrem a okrajem supergranule je velmi malý, teoretické studie a některé experimenty naznačují, že v řádu maximálně desítek kelvinů, proto není supergranulace pozorovatelná v bílém světle jako granulace. Díky převážně horizontálnímu rychlostnímu poli je vcelku dobře pozorovatelná v rychlostech – tedy v dopplergra-

ce. *Granulace* je pozorována při vizuálních pozorováních odpradáвна. Jedná se o vršíčky toho nejvyššího konvektivního modu s jednotlivými buňkami s průměrem kolem 1000 km. Životnost jednotlivých buněk je od tří do deseti minut. Ve vizuálním oboru jsou dobře pozorovatelné díky teplotnímu kontrastu mezi centrem a okrajem granulí. Rychlostní pole je převážně vertikální s poměrně velkou amplitudou – až 1 km/s, nejjemnější magnetické elementy, o nichž se předpokládá, že jsou tvořeny jednotlivými magnetickými trubicemi, se vynořují v mezigranulárním prostoru. Nejlepší pozorování granulace pocházejí z dalekohledů, které disponují adaptivní optikou (SST, DOT) nebo z dalekohledů na kosmických družicích (SOT na Solar-B). Sluneční fyzikové se domnívají, že granulace je z fotosféry to jediné, čemu opravdu rozumíme. Dnešní hydrodynamické modely spolehlivě napodobují chování a charakteristiky granulí.

Zajímavou strukturou je *sluneční supergranulace*. Konvektivní mod, za jehož vznik je zřejmě odpovědná rekombinace helia cca 10 000 km pod fotosférou, se vyznačuje buňkami o velikosti kolem 30 000 km



mech. Kromě toho je možné supergranulární okraje pozorovat ve filtrogramech pořízených ve spektrální čáře Ca II, v níž jsou magnetické elementy jasnější než okolí.

Existuje nějaký rozměrově větší konvektivní mod, než je supergranulace? Něco podobného bylo interferometricky detekováno u hvězdy Betelgeuse. Odpověď není jednoznačná. Podobné záležitosti byly již detekovány v několika studiích, avšak pokaždé s velmi rozdílnými výsledky. Očekává se, že tzv. obří buňky budou mít rozměry 100 až 200 Mm, životnost cca týden a že budou zasahovat velmi hluboko do konvektivní zóny, možná až na její dno. Buňky by měly být odpovědné za vynášení magnetických polí z místa jejich vzniku – na hranici konvektivní a zářivé vrstvy – do fotosféry. Teoretické studie však ukazují, že jejich existence pro pozorované chování magnetických polí není zcela nezbytná, a tak je honba za obřími buňkami možná zcela zbytečná.

Sluneční skvrny

Pohyby ve slunečních skvrnách jsou mapovány především s pomocí tracking metod. Materiálu pro studie tohoto typu je více než dost – zejména z dalekohledů pozorujících ve vysokém rozlišení s adaptivní optikou a následnou rekonstrukcí obrazu. Sluneční skvrny vykazují velmi zajímavé rychlostní struktury, které lze do jisté míry považovat za horizontální.

Nejvýraznější pohyby jsou pozorovány jednak v penumbře skvrny, jednak v jejím přilehlém okolí. Vyjma umbry a penumbry lze totiž ke skvrně ještě připočíst tzv. *moat*, který je popsán zejména dominujícími pohyby směrem od skvrny. Ve vláknité penumbře jsou pozorovány pohyby převážně rovnoběžné s jednotlivými penumbrálními vlákny. Tzv. *penumbrální zrna* se pohybují většinou směrem ven ze skvrny, pokud jsou ve vnější části penumbry, a dovnitř do skvrny, pokud jsou ve vnitřní části penumbry. Velká část pohybujících se zrn překračuje hranice penumbry a okolní fotosféry a zamíchá se mezi okolní granulací.

V umbře jsou ve vysokém rozlišení pozorovány tzv. *umbrální body*. Jejich podstatou jsou zřejmě degenerované granule, jejichž pohyb je v rámci umbry víceméně chaotický. Mnohem zajímavější situace je ve skvrnách se složitější strukturou obsahujících např. světelné mosty nebo jiné nesymetrické útvary. Rychlostní pole jednotlivých struktur je zde mnohem komplikovanější a zcela jistě souvisí se složitější topologií magnetického pole.

Samotné sluneční skvrny jako celky podléhají kromě výrazného a někdy rychlého vývoje velkorozměrovým pohybům. Samozřejmě jako prakticky všechny objekty slunečního tělesa diferenciálně rotují, ale ani pohyby slunečních skvrn vůči okolnímu plazmatu nepatří k nejjednodušším. Z pozorovatelského hledis-

ka je známo, že vedoucí část skupiny slunečních skvrn rotuje rychleji než část následná, v důsledku čehož se obě polarity téže skupiny v průběhu času vzdalují a skupina se tak v délce protahuje. Mnohokrát byly pozorovány složité otáčivé pohyby celé skupiny vůči nějakému bodu, ale i složité otáčivé pohyby vůči mnoha centrům. Ne zcela je jasný vztah vůči okolnímu plazmatu, tedy zda se skvrna okolním plazmatem „prodlívá“, nebo je naopak rotací plazmatu unášena (byť např. se zpožděním).

Rychlostní pole největších rozměrů

Rychlostní pole největších rozměrů, jejichž charakteristický rozměr zabírá celý sluneční disk, jsou celkem určitě integrálem polí menších škál, neboť jsou tak počítána. Nejvýraznějším projevem, odvozeným z pohybů skvrn již v polovině devatenáctého století R. Carringtonem, je sluneční *diferenciální rotace*. Diferenciální ve smyslu, že sluneční fotosféra se otáčí rychleji v rovníkových oblastech (jednou za cca 25 dní), nejpomaleji v polárních (jednou za cca 35 dní), tedy rotace neprobíhá jako v pevném tělese. Helioseismické studie ukazují, že diferenciální rotace se odehrává pouze v konvektivní obálce, zatímco radiativní zóna a jádro rotují víceméně jako tuhé těleso. Studie diferenciální rotace jsou však poněkud problematické. Ukazuje se totiž, že rotace měřená současně pro různé objekty vykazuje různé parametry. Zkoumáme-li pohyb objektů s větším rozměrem, blíží se jejich rotace více rotaci tuhého tělesa. Rotace koronálních děr je téměř rigidní, rotace plazmatu vysoce diferenciální. Rotace objektů (např. supergranulí) nemusí odpovídat rotaci plazmatu, které supergranule utváří.

Modely ukazují, že diferenciální rotace je běžnou záležitostí vyskytující se u všech hvězd s konvektivní obálkou – a pozorování to potvrzují. Zdá se, že existence turbulentní konvekce a meridionální cirkulace bohatě dostačuje k ustavení a udržení diferenciální rotace a ta je pak opravdu důsledkem, tedy integrálem, jiných pohybů.

V zonálních rychlostech jsou jako systematická porucha vůči diferenciální rychlosti pozorovány tzv. *torzní oscilace*. Jde o pás rychlejší (o několik desítek metrů za sekundu) rychlosti vůči průměrné zonální rychlosti v okolí. Tento pás se zdá rotovat rychleji, než okolí. S jedenáctiletým cyklem sluneční aktivity se pás stěhuje směrem k rovníku. Ti z vás, kteří jsou blíže obeznámeni se sluneční aktivitou, již tuší, že torzní oscilace se svým chováním nápadně podobají motýlkovému diagramu – výskyt slunečních skvrn na začátku cyklu začíná ve vysokých heliografických šířkách, s průběhem cyklu se však jejich výskyt stahuje k rovníku a v okamžiku jeho konce se vyskytují zbytky slunečních skvrn téměř výhradně v okolí rovníku. Skvrny nového cyklu se s opačnou polaritou začínají objevovat



opět ve vysokých heliografických šířkách.

Teoretické vysvětlení torzních oscilací prozatím chybí. Helioseismické studie ukazují, že nejvýraznější jsou ve fotosféře, s rostoucí hloubkou jejich výraznost klesá. Nedávno se objevily studie, podle nichž existuje souvislost torzních oscilací s lokálními variacemi v meridionální cirkulaci způsobenými konvergentními toky v aktivních oblastech.

Meridionální cirkulace je charakterizována pomalým proudem (ve fotosféře cca 10 m/s) od rovníku směrem k pólům. Doteď není jasné, zda je meridionální cirkulace tvořena jednou protáčející se buňkou, nebo zda je jich víc, případně zda se jejich počet v čase mění. Různé studie se v tomto ohledu neshodují. Zpětný tok v rámci buňky, který musí probíhat na dně konvektivní zóny, nebyl experimentálně potvrzen, nicméně na základě zákonů zachování se očekává, že tento proud existuje a jeho rychlost je řádu 1 m/s. Předpokládá se, že obří meridionální buňka se protočí jednou za 17 až 21 let. Meridionální proud je podle modelů odpovědný za recyklaci starých globálních magnetických polí, jejich přepólování v polárních oblastech, a tak řízení celého magnetického cyklu. Jak jsme si již řekli, jeho zonální změny mohou být odpovědné za generaci torzních oscilací.

Celkově vzato je povrchová velkoškálová dynamika velmi zajímavým, avšak do jisté míry ošidným tématem, jemuž se věnuje jen malá část komunity slunečních fyziků. Obecně jsou pozorovány některé zákonitosti, pro některé zatím chybí rigorózní vysvětlení. Např. v silných aktivních oblastech jsou v těsné podfotosférické vrstvě pozorovány konvergentní pohyby, které by odpovídaly koncentraci magnetického toku pomocí velkorozměrových pohybů. Avšak v hlubších vrstvách jsou tyto pohyby již divergentní, což se prozatím nedá odůvodnit žádným fyzikálním mechanismem.

Závěr

Závěrem mi dovoluť říci, že pohybové struktury ve fotosféře a v podfotosférických vrstvách jsou již po více než 40 let žhavým tématem sluneční fyziky, které do jisté míry zavání numerickou magií. Odpověď na otázku vazeb jednotlivých struktur rychlostí mezi sebou dají zřejmě až numerické modely zahrnující celou škálu dynamických jevů. Fotosférické pohyby tu byly a budou. A že jejich studium již není jen doménou sluneční fyziky, ale objevuje se již i v astronomii stelární, kdy metodami dopplerovského a zeemanovského-dopplerovského zobrazování lze sledovat povrchové struktury jiných hvězd a měřit tak jejich povrchová rychlostní pole. To se prozatím nedostalo za rámec měření diferenciální rotace.

Mgr. Michal Švanda