

# Helioseismologie

## moderní směr ve výzkumu Slunce

Michal Švanda

*Slunečním fyzikům se pootevírají dveře umožňující nahlédnout pod doposud neproniknutelnou fotosféru. Za několik posledních desetiletí se slibně rozvinula metoda umožňující z pozorování sluneční fotosféry odvodit informace o slunečním nitru. Helioseismologie vděčí za svůj název podobnosti s jednou z metod geofyziky. Teprve sluneční fyzika ale dovedla tuto metodu k dokonalosti.*

První historicky doložená pozorování skvrn na Slunci pocházejí z 2. tisíciletí před naším letopočtem z Číny. Již tehdy orientální astronomové dobře věděli, že se na tváři nejbližší hvězdy tu a tam objeví piha. Evropané tento fakt přijali až mnohem později, podstatnou roli zde sehrál vynález dalekohledu na počátku 17. století. Evropská učenci použili při pozorování skvrn vědecké metody a začali o skvrnách uvažovat coby o reálném astronomickém objektu spojeném se Sluncem. Skvrny se nacházejí ve vrstvě, z níž pochází drtivá většina viditelného záření, a která byla právě proto nazvána fotosférou.

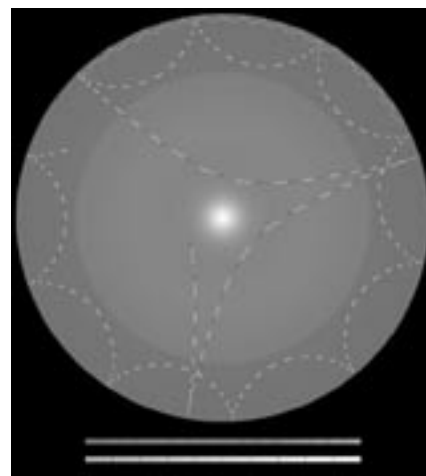
Kromě sledování slunečních skvrn ve fotosféře musíme ještě zmínit i jiná pozorování, která do značné míry ovlivnila náš pohled na podstatu Slunce. Vzpomeňme si na pozorování úplných slunečních zatmění,

kdy dostanou příležitost ukázat se i ostatní vrstvy sluneční atmosféry, jako je červená chromosféra nebo střapatá koróna.

Avšak všechna tato pozorování nám umožňují nahlížet do vrstev, jež se nacházejí nad povrchem Slunce, za který lze považovat právě fotosféru. Fotosféra sama o sobě je do jisté míry průhledná, čehož důsledkem je jev okrajového ztemnění, ale hlouběji než pod spodní hranici fotosféry nemáme možnost proniknout. Problémem se zabývali teoretici astrofyzikové a vytvořili několik modelových představ, jak by mohlo nitro Slunce vypadat. Modely, které dnes považujeme za standardní, jsou značným zjednodušením skutečnosti. Předpokládají, že Slunce nerotuje, nemá magnetické pole a hvězda je sféricky symetrická. Vstupními parametry každého modelu je změřená sluneční svítivost, povrchová teplota, hmotnost, sluneční poloměr a také zastoupení chemických prvků ve fotosféře, zjištěné analýzou spektra. Výstupem modelu jsou vypočítané závislosti teploty, hustoty, rychlosti zvuku, tlaku a chemického složení v závislosti na radiální vzdálenosti od středu slunečního tělesa. Tyto vypočítané závislosti je ale nesmírně obtížné experimentálně prověřit.

V několika posledních desetiletích se naskytla zcela nová metoda, která umožňuje vědcům pozorovat už nejen vnější vrstvy Slunce, ale dovoluje podívat se velmi hluboko do slunečního nitra.

Podstata metody byla původně odvozena pro potřeby geofyziky a seismologie. Geofyzikové již dlouho využívají zeměměření k hloubkové sondáži zemského tělesa, neboť je to v současnosti jediný způsob, jak odhalit některá tajemství skrytá kilometry



© NOAO

Obrázek zachycuje šíření vln nitrem Slunce. Všimněte si, že vlny s nižším modelem pronikají hlouběji do nitra než vlny s modelem vyšším.

pod povrchem Země. Jestliže na nějakém místě planety nastane zeměměření, nej-různější typy vln se rozběhnou od ohniska všemi směry. Každý z těchto typů jinak reaguje na látku, kterou prochází. Některé typy seismických vln se například nešíří v kapalinách. Z pozorování opožděných vln na nej-různějších seismologických observatořích na světě jsme schopni zrekonstruovat, co se s vlnou dělo od doby, co opustila oblast svého vzniku. Tím nepřímou určujeme, jakým prostředím procházela a jak se toto prostředí chovalo. Na Zemi máme situaci značně zjednodušenou faktem, že zdroje seismických vln jsou poměrně ojedinelé a tudíž se nemusíme obvykle zabývat například interferencí různých vln z různých zdrojů.

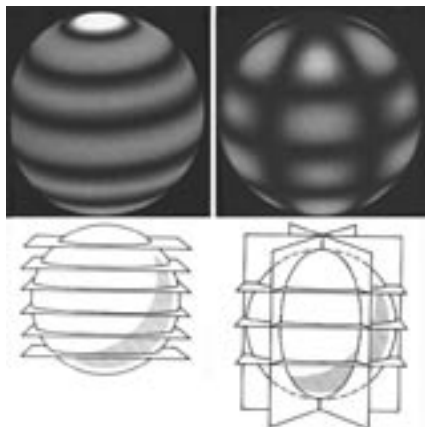
V případě Slunce je situace podobná, nicméně mnohem složitější. I v nitru Slunce vznikají mnohé vlny. Mechanismus jejich vzniku je v zásadě trojí.

Ionizované plazma se může v tělese Slunce poměrně snadno přemisťovat z místa na místo, ale také zhušťovat a zředovat. V současnosti se má za to, že původcem snad všech typů vln je náhodné vychýlení nějakého elementárního objemu sluneční plazmy. Další osud tohoto elementu pak závisí na okolním prostředí. Sledovaný objemový element byl totiž na svém původním místě v rovnováze s okolím. Při vychýlení

### Michal Švanda (\*1980)

studuje astronomii a astrofyziku na MFF UK, člen občanského sdružení Amatérská prohlídka oblohy a demonstrátor Štefánikovy hvězdárny v Praze.

© GONG



Dva z nepřeberného množství možných modů slunečních oscilací. Vlevo mod popsán čísly  $l=6, m=0$ , vpravo pak čísly  $l=6, m=3$ . Sousední světlé oblasti se pohybují opačným směrem, v dalším cyklu se pohyby vymění. Schémata dole naznačují polohu uzlových rovin.

se dostane do oblastí, kde jsou teplota, tlak i hustota jiné. Nacházíme-li se v oblasti pod konvektivní zónou, průběh teploty, tlaku i hustoty vykazuje nárůst ve směru do středu hvězdy. Pokud bude hustota sledovaného elementu větší než hustota okolí, převládá gravitační síla, která má tendenci vrátit tento element do oblastí, které mají hustotu stejnou. Ze setrvačných důvodů element překmitne na druhou stranu, kde převládá vztlačková síla snažící se element vytlačit opět vzhůru. Celý proces se pak periodicky opakuje a produkuje mechanické vlnění, které se šíří dále slunečním tělesem. Protože je podstatou tohoto typu gravitační síla, nazýváme tento typ  $g$ -vlnami.

V oblastech blíže sluneční fotosféry se průběh tlaku, teploty a hustoty mění na opačný. Vychýlený element pak není vrácen gravitační silou do své původní pozice, ale naopak je urychlován silou vztlačkovou a stoupá vzhůru až k horní hranici konvektivní zóny. Při svém pohybu dává do pohybu tlakové nehomogenity, které se v konvektivní zóně šíří na všechny směry (fyzikálně je tento princip analogický šíření zvuku). Podstatou tohoto typu oscilací je síla tlaková, mluvíme tedy o  $p$ -vlnách.

Třetí typ má opět podstatu v gravitaci a velmi připomíná vlnění mořské hladiny. Vyzdvížený element způsobí dočasný úbytek hmoty ve svém těsném okolí – vznikne tak jakýsi hřeben a údolí vlny. Hřeben je přitahován gravitací zpět a do údolí též působením gravitace padá látka z okolí. Proces je opět periodický a dává za vznik  $f$ -vlnám.

Zatím se zdá, že v hlubinách Slunce narážíme na podobné překážky, jako v hlubinách Země. Zatímco  $p$ - a  $f$ -vlny jsme schopni poměrně spolehlivě pozorovat a zdá se, že se bez velkých problémů šíří konvektivní zónou, na rozdíl od  $g$ -vln se nemohou šířit až do jádra a přinášet tedy informace o dění v nejhlubším nitru na povrch.  $G$ -vlny jsou na tom opačně, bez větších problémů se zřejmě šíří jádrem a radiativní vrstvou, nedokážou však buď proniknout až k povrchu a nebo jsou při svém průniku k povrchu již tak slabé, že je zatím nejsme schopni detekovat. Celá experimentální helioseismologie tedy prozatím opírá své závěry o pozorování  $p$ -vln.

Situaci komplikuje fakt, že ve slunečním tělese vzniká současně obrovské množství vln z mnoha nejruznějších zdrojů.

Tyto vlny se šíří nitrem hvězdy, odrážejí se, lámou a vzájemně se skládají. Vlny s vhodnou vlnovou délkou mohou vytvořit stojaté vlnění. Jak známo, stojaté vlny mají v některých místech takzvané uzly (v těch fakticky nekmitají), zatímco v jiných mají kmitny. V případě vícerozměrných vln (a to je případ Slunce) se nevytvářejí jednoduché uzlové body, ale celé uzlové obrazce.

Aby však v prostorových tělesech (rezonátorech) mohlo dojít ke vzniku stojatého vlnění, jsou k tomu naprosto nezbytné odrazy od stěn rezonátoru. V nitru Země jsou jednotlivé vrstvy od sebe odděleny diskontinuitami, na kterých dochází ke skokové změně parametrů a dochází na nich buď k odrazu nebo lomu zemětřesených vln. Jenže v nitrech hvězd takové diskontinuity nenajdeme, prostředí hvězdných niter jsou spojitá. Uvážíme-li ale, že se bavíme o vlnách s délkou desítek až stovek tisíc kilometrů, je pro ně fotosféra tlustá přinejlepším 300 km potřebnou diskontinuitou, neboť se v této tenké vrstvičce hustota prostředí mění o tři řády. Slunce tedy funguje jako obrovský rezonátor.

Každá vlna tedy již není popsána zcela jednoduše pouze svou vlnovou délkou, ale je jednoznačně dána uzlovým obrazcem, který způsobuje. Sluneční fyzikové je popisují třemi čísly – jedno z nich říká, kolik uzlových přímek vlna vytváří, další pak udává, kolik z nich prochází pólem. Třetí číslo popisuje radiální chování vlny a hraje podstatnou roli při určování vnitřní rotace. Tato čísla lze získat jednak pozorováním, ale mnohem efektivněji využitím analytické matematiky. Takové vícerozměrné vlny na kouli se využívají v mnoha partiích fyziky a matematiky a dostaly název sférické harmonické funkce. Díky mnoha jejich aplikacím pro ně byl dobře propracován složitý matematický aparát.

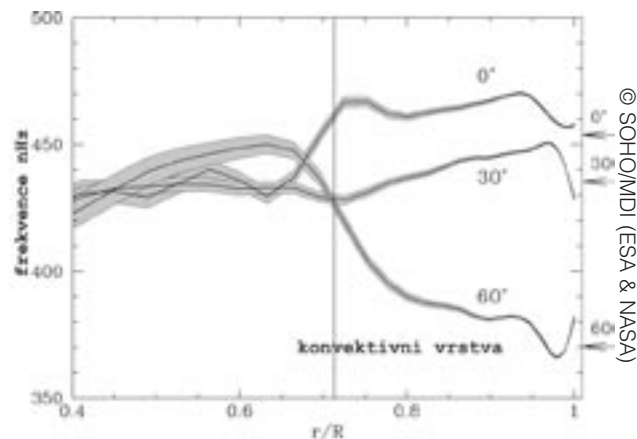
Celkový počet uzlových čar a jejich struktura charakterizuje mod kmitání. Každý mod je jednoznačně vztážen vůči pólu a rovníku. Avšak pro různé mody budou „jejich“ rovníky a póly navzájem různé.

Dá se říci, že mohou mít zcela libovolnou orientaci.

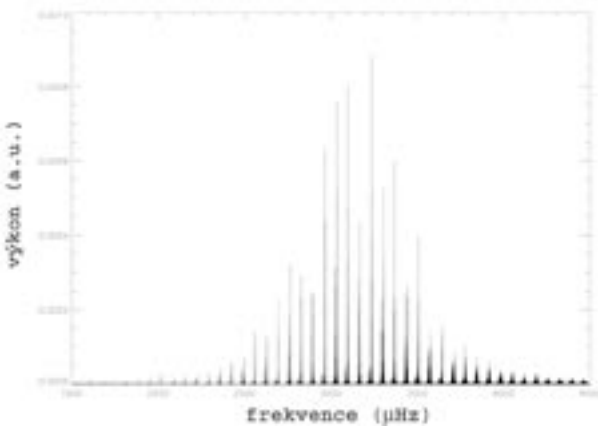
Obecně platí, že čím méně má vlna na povrchu uzlových křivek (má nižší mod), tím hlouběji do nitra proniká. Vlna se při svém průniku do nitra dostává do prostředí s vyšší teplotou a rychlostí zvuku a tedy nižším indexem lomu, prodělává spojité lom od kolmice, až se v jisté hloubce směr postupu zcela obrátí k povrchu. Dostává se naopak do oblastí s vyšším indexem lomu, spojitě se láme ke kolmici. Trajektorie, po níž vlna vystupuje, a trajektorie, podél které pronikala do nitra, jsou křivky stejného typu. Vlna proniká zpět do fotosféry, odráží se od ní a cyklus se opakuje. Je-li obvod Slunce celočíselným násobkem vlnové délky, vlna vytvoří stabilní uzlový obrazec. Vlny, jež nevytvoří stojaté vlnění, se vlastní interferencí během cesty nitrem hvězdy rychle utlumí.

Vlny se projeví oscilacemi v měřených rychlostech plazmatu nebo v jasů povrchových elementů. Rychlosti pohybujícího se plazmatu odvozujeme na základě Dopplerova jevu, z rozdílu vlnové délky vybrané spektrální čáry změřené v laboratoři a z pozorování Slunce.

Dopplerovské posuvy spektrálních čar dovedeme v současné době poměrně přesně měřit mnoha metodami a technikami. Přesnost, již potřebujeme dosáhnout, je pro leckoho nepředstavitelná. Vezměme si například fakt, že měříme typickou spektrální čáru ve viditelné oblasti spektra, řekněme,



Průběh úhlové rotační rychlosti pro tři heliografické šířky ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$  a  $60^\circ$ ) s hloubkou. S přibývajícím hloubkou se stírá diferenciálnost rotace, radiativní vrstva již rotuje téměř rigidně. Svislou čarou je naznačena přítomnost dna konvektivní zóny, pás kolem vypočteného průběhu naznačuje chybový interval.



Výkonové spektrum pozorovaných oscilací. Tento graf vznikl Fourierovou transformací nejdlejší pozorovací řady (805 dní). Všimněte si, že spektrum oscilací je diskretní. Největší výkon je pozorován u pětiminutových oscilací (3380  $\mu\text{Hz}$ ).

že bude mít vlnovou délku 600 nm. Rychlost zdroje 1 m/s směrem k nám znamená posun této čáry přibližně o 0,01 nm. Helioseismologie počítá s pohyby ještě desetkrát menšími. V případě Slunce jsme schopni v rámci rozlišovací schopnosti změřit posuv vybrané vhodné spektrální čáry v libovolném bodě jeho povrchu. Obrázky, které takto vznikají, se nazývají dopplergramy.

Dopplerovských posuvem spektrální čáry se projevují nejen vlnové procesy, ale také procesy konvektivní (granulace a supergranulace). Další komponentou dopplergramů je též sluneční rotace a meridionální cirkulace. Separace jednotlivých komponent je velice složitá úloha. Sluneční rotaci i meridionální proudění lze považovat v krátkých časových okamžicích za konstantní a tudíž je lze obvykle bez větších problémů pouze odečíst. Signál konvektivní komponenty lze získat časovým průměrováním série dopplerogramů.

V současnosti nejspolehlivějšími přístroji pro jejich pozorování jsou přístroje projektu GONG a též přístroj MDI na družicové observatoři SOHO. V některých obdobích své existence pořizoval MDI celodiskové dopplergramy s kadencí šedesáti sekund s rozlišením  $1024 \times 1024$  pixelů (čili přibližně  $2''$  na obrazový bod) a právě tato data se stala základem pro budování moderní helioseismologie.

Úkol tedy není úplně složitý. Abychom získali přehled o podpovrchových vrstvách Slunce, studujeme chování  $p$ - a  $g$ -vln, které vznikají v nitru Slunce. Je tedy jasné, že pokud budeme v čase sledovat vlnění jednoho

bodu sluneční fotosféry, získáme spoustu informací o chování vln v nitru a tudíž o nitru samém. Budeme-li sledovat vlnění všech bodů povrchu, získáme informací mnohem více.

To je podstata moderní helioseismologie. Sledují se pohyby všech bodů obrazu Slunce v dané spektrální čáře. Pravidelně se pořizují dopplergramy a s využitím rozkladu do sférických harmonických funkcí lze pak v měření, jež zahrnují složené vlnění mnoha zdrojů, identifikovat jednotlivé vlny. Vývoj rozkladu měření do sférických

funkcí v čase je pak odrazovým můstkem pro identifikaci jednotlivých oscilačních módů. Jak jsme si již řekli, každá vlna proniká do jiné hloubky nitra Slunce a tudíž přináší jinou důležitou informaci. Spektrum doposud detekovaných oscilací začíná na periodách 1,5 minuty a končí přibližně u 20 minut, vlnové délky těchto módů počínají na nějakých tisících kilometrech a končí na rozměru slunečního glóbu.

Celý problém se dá i obrátit – sledujeme odezvu námi modelovaného fyzikálního systému, který je popsán známými parametry. Aplikací numerického modelu lze vypočítat, jak by se měl tento systém projevovat v parametrech, které reálně pozorujeme – protože je výsledek jen modelem, nazývá se syntetickým měřením. Předmětem porovnání je, zda je v možnostech měřicí techniky tyto projevy odhalit a co by se mělo vlastně očekávat. Takové výzkumy často dávají prvotní podnět ke stavbě nového měřicího přístroje.

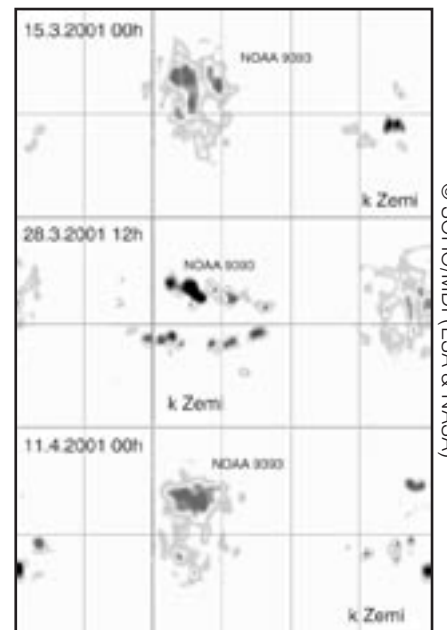
Podobně funguje i zpřesňování modelů – fyzikální systém je popsán opět několika parametry, které však nejsou pevně dané. Postupnou volbou těchto parametrů se snažíme přiblížit syntetické pozorování se skutečným. V okamžiku, kdy je rozdíl mezi syntetickým a skutečným pozorováním nejmenší, můžeme prohlásit, že náš fyzikální systém při daných parametrech nejlépe vystihuje chování skutečného Slunce.

Zatím jsme se zabývali aplikací helioseismologie globální, tedy takové, která využívá celodiskového signálu oscilací.

V posledních letech je na vzestupu poněkud odlišná metoda – takzvaně lokální helioseismologie (time distance helioseismology). Metoda je aplikovatelná bez výhrad na  $p$ -mody oscilací. Vychází ze způsobu průniku zvukové vlny konvektivní zónou, kdy vlna prostupuje prostředím se zmenšujícím se indexem lomu, láme se od kolmice, v určitém bodě se zcela obrací a vrací se k povrchu. Sluneční fyzikové dovedou na základě vlnového čísla vypočítat, kde se bude nacházet tento bod obratu a také vypočítat polohu kružnice (nesmíme zapomenout, že jde o vlnění třírozměrné), na níž by se měla vlna vrátit v případě přesně homogenního podpovrchového prostředí. Z rozdílů časů, v nichž se vlna vrací do různých bodů této kružnice je možné usuzovat na podpovrchová proudění nebo magnetická pole pod povrchem analyzované oblasti.

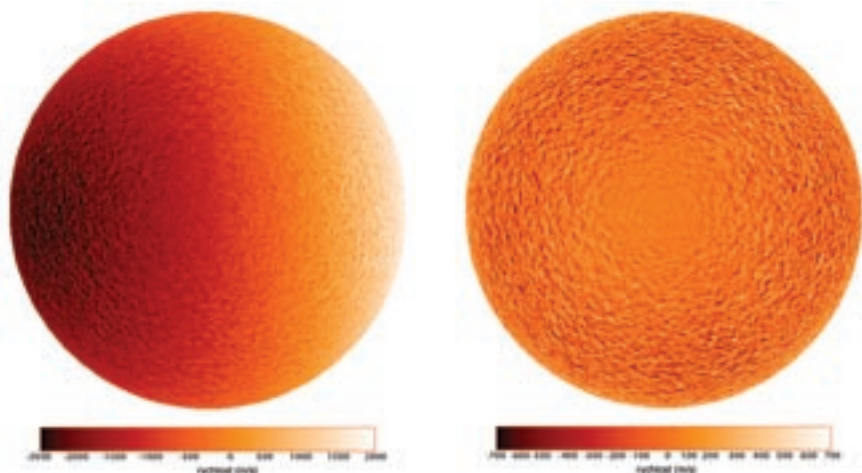
A jaké jsou výsledky moderní helioseismologie? Helioseismologie dala odpovědi na některé otázky týkající se stavby a složení slunečního nitra. Je také jedinečným a velmi mocným nástrojem pro nezávislé ověřování teoretických modelů.

Ukázalo se například, že konvektivní vrstva je mohutnější, než se původně předpokládalo. Podle současných představ založených na helioseismologických pozoro-



Polohy magnetických oblastí stanovené analýzou rychlostních polí přivrácené polokoule. Tmavší skvrny značí přítomnost magnetického pole. Nejvýraznější strukturou poblíž středu každého obrázku je aktivní oblast NOAA 9393, vůbec nejrozsáhlejší aktivní oblast 23. cyklu.





Dopplerogram pořízený přístrojem MDI na družicové observatoři SOHO. Různé intenzity barev charakterizují velikost dopplerovské rychlosti. Tmavá barva značí pohyb k pozorovateli, světlá od pozorovatele. Na levém obrázku vidíme, že dominantní strukturou slunečních dopplerogramů je sluneční rotace. Pravý obrázek je pak zbařen sluneční rotace, meridionální cirkulace a signálu oscilací. Zůstává jen signál konvektivních struktur, především supergranulace.

(Stanford Lockheed Institute for Space Research)

rováních leží dno konvektivní vrstvy na 0,67 poloměru Slunce.

P-mody se šíří okolním prostředím rychlostí zvuku, která je jednoznačně dána hustotou a teplotou tohoto prostředí. Díky helioseismologii bylo možné zkonstruovat experimentálně získané průběhy hustoty, tlaku a teploty s hloubkou pod povrchem a porovnat je s teoretickými modely. Ukázalo se, že se oba průběhy moc neliší až na několik bodů. Jedním z nich byly významné odchylky právě kolem 0,67 poloměru, kde

se téměř skokem mění rychlost zvuku. Přesně tak bylo odhaleno dno konvektivní vrstvy. Podobný skok na hodnotě 0,25 slunečního poloměru zřejmě odhalil přechod mezi jádrem a vrstvou v zářivé rovnováze.

Podobným způsobem se podařilo zmapovat závislost rotační rychlosti na heliografické délce v nitru Slunce. Zatímco fotosféra vykazuje značnou diferenciální rotaci (v rovníkových oblastech je rotace značně rychlejší, než v oblastech polárních), helioseismologická měření ukazují, že se tato závislost s hloubkou ztrácí a Slunce rotuje v samém nitru prakticky jako pevné těleso. Tím definitivně padla představa o válcově symetrické rotaci nitra, která by dobře vysvětlovala diferenciálnost pozorovanou ve fotosféře, ale těžko se pro ní hledá fyzikální opodstatnění. Stejně tak vzalo za své jiné vysvětlení nejen diferenciální rotace fotosféry, ale i tvorby silného magnetického pole – rychlejší rotace jádra. Helioseismologická pozorování ukazují, že tomu tak není, že jádro se otáčí pomaleji než fotosféra v rovníkových oblastech a tedy přesné vysvětlení tohoto jevu je nadále záhadou.

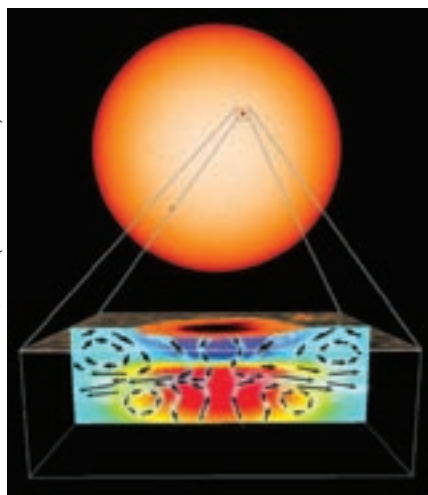
Nejvíce viditelným výsledkem lokální helioseismologie je trojrozměrný obraz proudění plazmatu v okolí sluneční skvrny a také pod ní. Měření ukazují, že sluneční skvrna je poměrně mělký útvar (5 000 – 10 000 km hluboký). Při analýze nebyly nalezeny žádné příznaky vynořující se

smyčky magnetické silotrubice vycházející ze spodní části konvektivní vrstvy. V případě potvrzení tohoto experimentálního faktu by to znamenalo narušení jednoho z vysvětlení mechanismu slunečního cyklu, který je dnes přijímáno širokou komunitou slunečních fyziků.

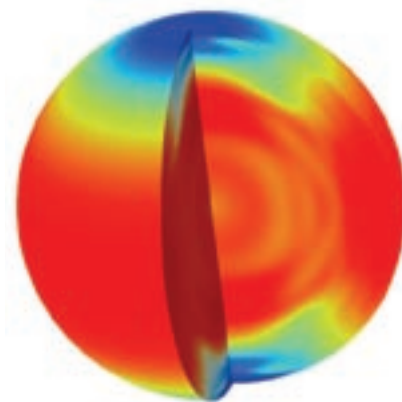
Helioseismologie je jedinečný nástroj, který dává možnost mapovat sluneční aktivitu i na odvrácené straně Slunce pomocí analýzy časového vývoje rychlostních polí na straně přivrácené. Metoda využívá experimentálně zjištěného faktu, že magnetická pole se značnou měrou podílejí na pohlcování a rozptylu šířících se oscilací. Takto lze lokalizovat poměrně spolehlivě i na odvrácené straně silná lokální magnetická pole, jejichž existence je pravidelně spojena s výskytem aktivních jevů, mezi něž patří například sluneční skvrny nebo protuberance a chromosférické erupce. Sluneční fyzikové dostali možnost, jak sledovat skvrny i na odvrácené straně a sledovat jejich vývoj a usnadnili si tak předpovědi sluneční aktivity.

#### Použitá literatura:

- [1] R. Kiepenhahn: Odhalená tajemství Slunce; Mladá fronta, Praha 1999 (edice Kolumbus)
- [2] Z. Mikulášek: Úvod do fyziky hvězd a hvězdných soustav; PFF MU v Brně, Brno 2000
- [3] K. G. Libbrecht, H. Zirin; Libbrecht and Zirin, Astrophysical Journal, 308 (1986), 413 – 423
- [4] D. H. Hathaway; Hathaway, Solar Physics 117 (1988) 1–12



Proudění plazmy v těsném okolí a pod sluneční skvrnou, jak bylo získáno z lokální helioseismologie. Výsledky naznačují, že skvrny jsou velmi mělkými útvary. Barvami je naznačena teplota (červená je nejteplejší, modrá nejchladnější).



Celkový přehled o úhlové rotaci nitru slunečního tělesa. Červená barva značí rychlejší, modrá pomalejší rotaci. Na povrchu se projevuje značná diferenciálnost (póly rotují pomalu, zatímco rovník rychleji), v nitru diferenciálnost prakticky mizí.