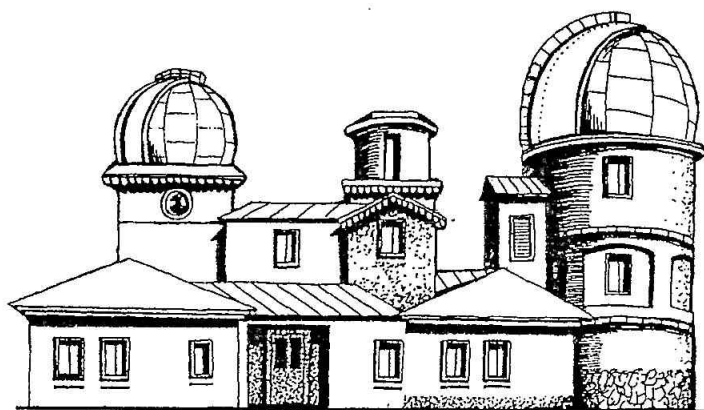
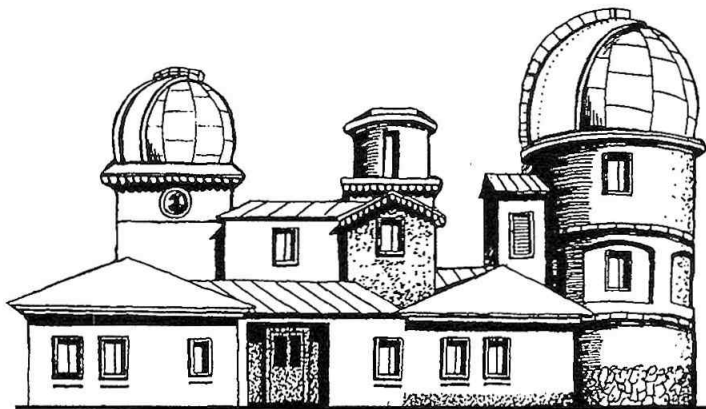


16. Celoštátny slnečný seminár, Turčianske Teplice 2002



Slovenská ústredná hviezdáreň Hurbanovo

16. Celoštátny slnečný seminár, Turčianske Teplice 2002



Slovenská ústredná hviezdáreň Hurbanovo

ZBORNÍK REFERÁTOV ZO 16. CELOŠTÁTNEHO SLNEČNÉHO SEMINÁRA,
TURČIANSKE TEPLICE 2002

Vydala: Slovenská ústredná hviezdáreň Hurbanovo

Zostavil: I. Dorotovič

Autori: Ambrož P., Badalyan O.G., Bárta M., Bellot Rubio L.R., Bělík M., Bielek J., Bieleková M., Bochníček J., Bonet J.A., Boška J., Brandt P.N., Brčeková K., Bumba V., Burešová D., Curdt W., Dorotovič I., Druckmuller M., Dzifčáková E., Feik V., Feldstein Ya. I., Garcia A., Gömöry P., Guba P., Hanslmeier A., Heinzl P., Hejda P., Hvoždara M., Ichimoto K., Jurčák J., Kalmančok D., Kaltman T. I., Karlický M., Karlovský V., Kláčka J., Klimeš J.ml., Klimeš J.st., Klocok L., Klvaňa M., Kotrč P., Koza J., Krivtsov A., Křivský L., Kučera A., Kudela K., Kulinová A., Kupřakov J. A., Laštovička J., Letkovičová M., Lorenc M., Lukáč B., Marková E., Márquez I., Mínavojech M., Müller R., Obridko V.N., Paluš P., Pastorek L., Pintér T., Prigancová A., Ričany I., Roth L.E., Rybanský M., Rybák J., Simon G.W., Sobotka M., Střeštík J., Sýkora J., Šauli P., Švanda M., Timko M., Tomasz F., Túnyi I., Valach F., Vávřík M., Vörös Z., Wöhl H., Zunker A.

Zodpovedný za publikáciu: T. Pintér

Redaktor: M. Lackovič

Náklad: 100 ks

Počet AH: 38,16

Rok vydania: 2002

Tlač: Tlačiareň KASICO a. s. Bratislava

Za vecnú a jazykovú správnosť referátov zodpovedajú autori

ISBN 80-85221-42-X

Predslov

Slovenská ústredná hviezdáreň v Hurbanove v spolupráci so Slnčnou sekciou SAS pri SAV usporiadali 16. Celoštátny slnečný seminár, ktorý sa konal v dňoch 3. – 7. júna 2002 v hoteli G v Turčianskych Tepliciach.

Cielom seminára bolo oboznámiť sa s najnovšími poznatkami o fyzike Slnka, slnečnej aktivite a jej vplyve na Zem. S touto problematikou sa zaoberá aj medzinárodná mimovládna vedecká organizácia SCOSTEP (Scientific Committee on Solar Terrestrial Physics), ktorého slovenský výbor zasadal počas seminára. Na seminári odznelo 57 pôvodných referátov zo slovenských a českých pracovísk a takmer všetky sú obsiahnuté v tomto Zborníku. Pri referátoch, ktoré autori včas nedodali, sú publikované iba abstrakty tak, ako boli dodané pred seminárom. Sme veľmi radi, že medzi 55 účastníkmi seminára boli prítomní okrem pracovníkov hviezdární na Slovensku aj vedeckí pracovníci ústavov SAV SR, AV ČR, vysokých škôl a pracovníci hviezdární v Čechách. Poukazuje to na to, že pokračuje naša vzájomne dobrá spolupráca a výmena skúseností medzi pracoviskami v Slovenskej republike a v Českej republike. Okrem toho sme mohli privítať aj A. Zunkera, zástupcu pozorovateľskej siete SONNE v Nemecku. S nemeckými pozorovateľmi Slnka udržujeme už dlhoročné kontakty. Účastníci seminára dostali niekoľko pekných propagačných materiálov od Európskej vesmírnej agentúry (ESA). Dúfame, že tradícia slnečných seminárov bude aj naďalej pokračovať napriek zložitým finančným možnostiam. Veríme, že sa 17. slnečného seminára, plánovaného na rok 2004, zúčastníme aspoň v takom počte ako doteraz. Slovenská ústredná hviezdáreň v Hurbanove už vopred srdečne pozýva všetkých na tento seminár.

Veríme, že predložená publikácia poslúži odborníkom a širokej astronomickej verejnosti na získanie nových poznatkov, ktoré budú využité tak v odbornej ako aj popularizačnej činnosti. Slovenská ústredná hviezdáreň v Hurbanove aj touto cestou ďakuje všetkým autorom za dodané referáty, ako aj všetkým, ktorí sa akoukoľvek cestou podieľali na príprave tohto Zborníka.

V neposlednom rade ďakujeme všetkým sponzorom, ktorí sa pričínili o úspešný priebeh seminára.

Ivan Dorotovič

Slovenská ústredná hviezdáreň Hurbanovo

Obsah

Predslov	3
P. Ambrož	
Helioseismologie a nové objevy z poslední doby	7
V. Bumba, M. Klvaňa a A. García	
Magnetická a rychlostní pole v aktivní oblasti (NOAA 7757, 1994) a v jejím okolí	16
P. Ambrož	
Cyklické změny v dynamice sluneční konvektivní zóny	20
A. Kučera	
Slunečná granulácia: I. Pozorovania	25
Koza, L.R. Bellot Rubio, A. Kučera, A. Hanslmeier, J. Rybák, H. Wöhl,	
Časový vývoj fyzikálních parametrů v granule	36
J. Rybák, A. Kučera, A. Hanslmeier, H. Wöhl	
Pozorovanie rázových vln v sluneční fotosféře	40
I. Dorotovič, M. Sobotka, P.N. Brandt, G.W. Simon	
Časový vývoj a pohyby jemnej štruktúry fotosféry v okolí slunečního póru	46
M. Klvaňa, T. I. Kaltman a V. Bumba	
Semiempirický model magnetického pole skvrn, pozorovaných ve spektrálních čarách FeI a MgI	52
M. Sobotka, R. Müller, J.A. Bonet, I. Márquez,	
Vývoj a pohyby jemných struktur na vnější hranici penumbry	60
V. Bumba, M. Klvaňa a A. García	
Krátkodobé pravidelnosti v časovém rozložení impulsů sluneční aktivity a jejich možná příčina	64
A. Krivtsov, M. Klvaňa a V. Bumba	
Pohyby slunečního plazmatu, vyvolané slapovými silami	69
M. Klvaňa, M. Švanda, M. Sobotka a V. Bumba	
Proudění fotosférického plazmatu po slunečním povrchu	73
J. Střeščík	
Dlouhodobé periodicity ve Wolfových číslech slunečních skvrn	78
M. Lorenc, I. Dorotovič	
Variácie žiarenia Slnka vo vybraných spektrálnych oblastiach na vzostupnej vetve 23. slunečního cyklu	82
L. Pastorek, Z. Vörös	
Kvantitativná charakteristika sluneční cykličnosti	86
V. Karlovský	
Vlnková analýza Wolfovho relativného čísla	90
A. Zunker	
25 Years of SONNE Sunspot Network	93
P. Heinzel	
Struktura a dynamika sluneční chromosféry	95
K. Brčková, A. Kučera, J. Rybák, A. Hanslmeier, H. Wöhl	
Dynamická väzba medzi fotosférickou a chromosférickou plazmou v erupcii	96
P. Kotrč, J. Kuprjakov	
Anomální tvary emisních vláken a optických spekter ve slunečních erupcích	100
A. Kulínová, E. Dzifčáková, J. Klačka, M. Karlický	
Analýza jednej zo zaujímavých erupcií v aktívnej oblasti NOAA AR 9393	101
J. Jurčák, P. Kotrč	
Rozšíření spektrální čáry H_{α} v erupcích na slunečním limbu	106
P. Kotrč, J. Kuprjakov	
Spektrální a spektropolarimetrická měření čáry H_{α} v erupci 15. 6. 2001	112
M. Bárta, M. Karlický	
Radiová diagnostika plazmatu ve sluneční erupci	115
J. Rybák	
Prechodová vrstva medzi slunečnou chromosférou a korónou	120
P. Gömöry, J. Rybák, A. Kučera, W. Curdt, H. Wöhl	
Variabilita prechodovej vrstvy pokojnej sluneční atmosféry	129
F. Tomasz, J. Rybák, A. Kučera, W. Curdt, H. Wöhl	
Eruptívne javy v pokojnej atmosféře Slnka: príklad zjasnenia	135

P. Heinzel	
Jemná struktura slunečních protuberancí	141
M. Rybanský	
Problémy interpretácie pozorovaní koróny	142
E. Džifčáková	
Vplyv kappa-distribúcie na ionizačnú rovnováhu uhlíka a kyslíka v slnečnej koróne	144
B. Lukáč	
Zmena výškového gradientu zelenej koróny v závislosti na jej intenzite	148
O.G. Badalyan, V. N. Obridko, J. Sýkora	
Dlhodobý priebeh jasnosti „zelenej“ koróny vo vzťahu k cyklickým a evolučným procesom na Slnku	149
J. Rybák, K. Ichimoto	
Hranie sa s dátami : dôsledky pre skúmanie dynamiky koróny	159
E. Marková, L. Křivský, M. I Bělík, M. Druckmuller	
Struktura bílé koróny při úplném zatmění Slunce 21. 6. 2001	163
J. Sýkora, O. G. Badalyan, V. N. Obridko	
Vzťahy medzi zatmeňovou „bielou“ korónou a magnetickým poľom v priebehu slnečného cyklu	167
B. Lukáč, M. Minarovjech, M. Rybanský	
Pokus o určenie farby slnečnej koróny počas úplného zatmenia Slnka 21. júna 2001 (predbežné výsledky)	175
M. Bělík, E. Marková	
Možnosti pozorování „rázových vln“ v koronálních paprscích během úplných zatmění Slunce	178
T. Pintér, M. Rybanský	
Polarizačné merania v čiare FeXIV 530,3 nm počas zatmenia Slnka 21. júna 2001	182
J. Sýkora	
Slnečné „počasie a klíma“ – rôzne aspekty variability a cykličnosti slnečnej činnosti	185
K. Kudela	
Variabilita kozmického žiarenia a kozmické počasie	186
A. Prigancová, Ya. I. Feldstein	
Zákonitosti generovania magnetickej búrky	196
J. Bochníček, P. Hejda	
Předpovědi geomagnetické aktivity v době kolem slunečního maxima a v době sestupné fáze slunečního cyklu	201
J. Laštovička	
Podíl sluneční aktivity na dlouhodobých trendech v atmosféře a ionosféře	207
M. Hvoždara, A. Prigancová	
Geomagnetické efekty úplného zatmenia Slnka 11. augusta 1999	211
J. Střeštík	
Změny geomagnetických pulzací v průběhu úplného zatmění Slunce	215
J. Boška, D. Burešová, P. Šauli	
Účinky slunečního zatmění 1999 v ionosféře	219
M. Bieleková, A. Prigancová, J. Bielek	
Dynamika slnečného svitu v matematickom vyjadrení	223
L. Klocok, M. Rybanský, M. Letkovičová	
Úmrtnosť na Slovensku 1981 – 2000, slnečná aktivita a počasie	227
Túnyi, P. Guba, L. E. Roth, M. Timko	
Impulzné magnetické polia generované elektrostatickými výbojmi v protoplanetárnych oblakoch	233
F. Valach	
Umelá neurónová sieť – príklad použitia	235
I. Ričany	
Fázové priestory pre časové rady II. Analýza autoregresíí	239
M. Sobotka, M. Klvaňa	
O projekte GREGOR	242
M. Klvaňa, M. Sobotka a V. Bumba	
Derotátor, skener a depolarizátor obrazu Slunce	243
V. Feik, M. Vávřík	
Pozorování polárních fakulových polí na hvězdárně Františka Pešty v Sezimově Ústí	248
J. Klimeš st., J. Klimeš ml.	
Zajímavá pozorování jevů v sluneční atmosféře v letech 2001-2002	252
P. Paľuš, D. Kalmančok	
Pozorovanie slnečných erupcií na Astronomickom observatóriu FMFI UK v Modre-Piesok	254
L. Křivský	
Zabezpečení technických a přístrojových podmínek k pozorování úplných zatmění Slunce	257

Zoznam účastníkov

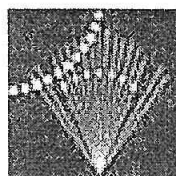
16. celoštátneho slnečného seminára

1. Ambrož Pavel, AÚ AV ČR Ondřejov
2. Bárta Miroslav, AÚ AV ČR Ondřejov
3. Marcel Bělík, Hvězdárna, Úpice
4. Bochníček Jozef, Geofyzikální ústav AV ČR Praha
5. Boška Jozef, Ústav fyziky atmosféry AV ČR Praha
6. Brčková Katarína, AÚ SAV, Tatranská Lomnica
7. Bumba Václav, AÚ AV ČR Ondřejov
8. Čalfa Vladimír, SÚH Hurbanovo
9. Dobrovoda Luboslav, AK Modra
10. Dorotovič Ivan, SÚH Hurbanovo
11. Džifčáková Elena, Astronomický ústav, MFFI UK Bratislava
12. Feik Vlastislav, Hvězdárna Františka Pešty, Sezimovo Ústí
13. Gindl Eugen, Redakcia Kozmos, Bratislava
14. Gömöry Peter, Astronomický ústav FMFI UK Bratislava
15. Hamran Jozef, SÚH Hurbanovo
16. Heinzel Peter, AÚ AV ČR Ondřejov
17. Hejna Ladislav, AÚ AV ČR Ondřejov
18. Ivan Peter, Hvezdáreň a planetárium, Prešov
19. Kalmančok Dušan, Astronomický ústav FMFI UK Bratislava
20. Karlovský Vladimír, Hvezdáreň a planetárium Hlohovec
21. Kerekešová Katarína, Hvezdáreň, Rimavská Sobota
22. Klimeš Ján, Hvězdárna Úpice
23. Klvaňa Miroslav, AÚ AV ČR Ondřejov
24. Kotrč Pavel, AÚ AV ČR Ondřejov
25. Koza Július, AÚ SAV Tatranská Lomnica
26. Křivský Ladislav, Hvězdárna Úpice
27. Kučera Aleš, AÚ SAV Tatranská Lomnica
28. Kudela Karel, Ústav experimen. fyziky SAV, Košice
29. Kulinová Alena, Astronomický ústav FMFI UK Bratislava
30. Laštovička Ján, Ústav fyziky atmosféry AV ČR Praha
31. Lorenc Marián, SÚH Hurbanovo
32. Lovászová Anna, SÚH Hurbanovo
33. Lukáč Bohuslav, SÚH Hurbanovo
34. Mačanský Mikuláš, SÚH Hurbanovo
35. Marková Eva, Hvězdárna Úpice
36. Očenáš Daniel, Hvezdáreň Banská Bystrica
37. Paľuš Pavol, Astronomický ústav FMFI UK Bratislava
38. Pastorek Ladislav, SÚH Hurbanovo
39. Teodor Pintér, SÚH Hurbanovo
40. Prigancová Alina, Geofyzikálny ústav SAV Bratislava
41. Príhodová Melánia, HaP Maximiliána Hella, Žiar n/Hronom
42. Rapavá Daniela, Hvezdáreň Rimavská Sobota
43. Rapavý Pavol, Hvezdáreň Rimavská Sobota
44. Ričany Ivan, Martin
45. Rybanský Milan, AÚ SAV, Tatranská Lomnica
46. Rybák Ján, AÚ SAV Tatranská Lomnica
47. Sobotka Michal, AÚ AV ČR Ondřejov
48. Střeštík Jaroslav, Geofyz. ústav AV ČR, Praha
49. Sýkora Július, AÚ SAV Tatranská Lomnica
50. Švanda Michal, MFF UK Praha
51. Tomasz František, Prírodovedecká fakulta URJŠ Košice
52. Túnyi Igor, Geofyzikálny ústav SAV Bratislava
53. Váňa Jaroslav, HaP Maximiliána Hella, Žiar n/Hronom
54. Zunker Andreas, SONNE, Nemecko
55. Valach Frichrich, Geofyzikálny ústav SAV Hurbanovo

Seminár podporili:



European Space Agency
(Európska vesmírna agentúra)
<http://www.esa.int>



Hvezdáreň a planetárium
Maximiliána Hella
v Žiari nad Hronom
<http://www.planetarium.sk>



Mesto Turčianske Teplice
<http://turcianske.home.sk>

Múzeum mincí a medailí
v Kremnici
<http://www.nbs.sk/MMM>



Slovenské liečebné kúpele
Turčianske Teplice, a. s.
<http://www.tureslk.sk>



Helioseismologie a nové objevy z poslední doby

P. Ambrož, Astronomický ústav AVČR, Ondřejov, pambroz@asu.cas.cz

Abstrakt

Helioseismologie se řadí mezi nové, moderní a perspektivní metodiky pro diagnostiku stavů a procesů ve slunečním nitru. Podstata metody a způsoby její aplikace na možná pozorování Slunce a hvězd jsou nastíněny jak z hlediska historické retrospektivy, tak i s ohledem na perspektivní možnosti tohoto přístupu. Je zmíněna hlavní charakteristika vzniku a udržování různých typů slunečních a hvězdných oscilací a specifické vlastnosti jejich pozorování i interpretace. Základní principy této diagnostické metody slunečního nitra jsou demonstrovány na několika mezinárodních programech. Je diskutována citlivost metody a její možnosti jak z hlediska stanovení termodynamických parametrů slunečního nitra, tak, a to především, z hlediska rychlostního pole v různých podpovrchových vrstvách. Rotace a meridionální cirkulace slunečního tělesa, velkorozměrové proudění a konečně 3-D analýza proudění v aktivních oblastech, skýtají nový komplexní pohled na celkovou dynamiku sluneční konvektivní zóny. Podstatná část příspěvku je věnována stěžejním výsledkům, získaných na základě helioseismologie za období posledních třiceti let.

1. HISTORICKÝ ÚVOD

Pozorování a studium sluneční atmosféry stále představuje hlavní oblast vědeckého zájmu o naši hvězdu. Poznání skladby, struktury a procesů i jejich vývoje ve sluneční atmosféře se stále urychluje. Zároveň ovšem lze pocítovat potřebu chápat procesy na Slunci zcela komplexně, v souvislosti nejen s meziplanetárním prostorem, ale především s vlastnostmi a procesy ve slunečním nitru.

Sluneční nitro, přestože je prostředím v němž je generována veškerá energie Slunce a probíhá v něm její transport ke slunečnímu povrchu, je z hlediska pozorování obzvláště nedostupné. Zhruba až do poloviny šedesátých let dvacátého století byly informace o slunečním nitru založeny téměř výhradně na numerickém řešení modelů, pro něž určujícími byla pozorování sluneční zářivosti, povrchové teploty, hmotnosti a slunečního poloměru. Obecně se předpokládá že chemické složení a zastoupení jednotlivých prvků v celém slunečním tělese je podobné jako ve sluneční fotosféře. Modely, které považujeme za standardní, vynikají značnou jednoduchostí několika uvažovaných parametrů. Předpokládáme, že hvězda nerotuje, nemá magnetické pole, její vnitřní procesy jsou adiabatické a hvězda je sféricky symetrická. Touto cestou bylo možné stanovit jak dlouhodobý časový vývoj jednotlivých parametrů jako slunečního poloměru, rychlosti zvuku, hustoty, tlaku, teploty, koncentrace vodíku a hloubky konvektivní zóny vzhledem k současnému stavu, jakož i závislosti většiny těchto veličin na slunečním poloměru. Jedním z podstatných výsledků takových modelů bylo stanovení centrální teploty Slunce a následně i skladbu a efektivní průřezy jaderných reakcí v nitru. Tady se naskytla objektivní možnost nepřímě prověřovat výsledky modelů nezávislým pozorováním ne-

utrínového toku Slunce. V souvislosti s modelovou centrální teplotou v jádře kolem 15 milionů K byl očekáván neutrinový tok 7.3 SNU. Když potom později ze známého Davisova experimentu v Homestake (chlor-argon) byla naměřena hodnota o zhruba 60 % nižší, tj. 2.6 SNU, objevil se zásadní problém. První reakce vedla k pochybnostem o metodě, v druhém stadiu se začalo pochybovat o věrohodnosti modelu. Zde byla zpochybněna hodnota centrální teploty (měření odpovídalo asi 13-ti milionům K), předmětem úvah byla interní difuze těžších prvků a diskutovala se i možnost interního promíchávání jádra resp. oblastí zářivé rovnováhy. Většina úvah byla spekulativního charakteru a pro seriózní vědeckou analýzu chyběly odpovídající pozorovatelské údaje. V následující etapě, dlouhé téměř třicet let se většinu z těchto počátečních problémů podařilo vyřešit. Bylo to období markantního zdokonalení modelů sluneční stavby, vytvoření neobyčejně nákladné základny nových přístrojů pro měření neutrinového toku a měření, která odhalila nové poznatky o neutrinech samotných. Sluneční astrofyzika sem přispěla vytvořením a rozvojem zcela nové fyzikální metody, která dovoluje diagnostikovat sluneční nitro prostřednictvím vlnových sondází z oscilací, detekovaných na slunečním povrchu.

Oscilace ve sluneční chromosféře poprvé z pozorování detekoval Leighton a kol. (1962) na základě fotografické metody. Fotoelektrická pozorování na sebe nenechala dlouho čekat, ale teprve Deubner (1975) poprvé stanovil spektrum slunečních oscilací, když určil jejich dlouhodobý časový vývoj. Stěžejní výkon oscilací se koncentroval na tzv. 5 minutové (300 s) oscilace. Krátce na to Fossat a kol. (1974) našli oscilace s periodou 10 min. Teoreticky se předpoklad existence hvězdných oscilací uvádí od roku 1907. O něco později uvádí úvahy o spektru oscilací

a o jejich různých očekávaných typech. Významná je i otázka generování oscilací. Jejich konvektivní původ byl zmíněn již v roce 1964. Možnost hloubkové sondáže slunečního nitra byla poprvé navržena 1977. Zde sehrála významnou roli rýsující se naděje na porovnání výsledku interpretace pozorování slunečních oscilací se stavbou slunečního nitra, odvozenou z výpočtů. Ukázala se vynikající možnost přímého prověření výsledků modelů slunečního nitra s nezávislým pozorováním. Podobnost principu nově navržené metodiky s metodami pozemské seismologie vedla k zavedení názvu helioseismologie. Astrofyzice se tak dostal do rukou velmi účinný a efektivní nástroj pro měření struktury a dynamiky slunečního nitra. Ve stejném období se ukázalo, že oscilace, doposud detekované jako rychlostní oscilace se mohou měřit i jako oscilace jasu slunečního povrchu. Jen o málo později se poprvé podařilo detekovat oscilace (jasové i rychlostní) na některých hvězdách. Všechny měřicí postupy vycházely z kontinuálního pozorování záření Slunce, integrovaného přes celý disk a následně z analýzy časové řady prostřednictvím Fourierovy transformace na výkonové spektrum. Zájem o co nejspojitější a co nejdelší řadu pozorování vyvolal nutnost organizovat buď celosvětové pozorovací sítě a kampaně, případně extravagantní expedice do oblasti za jižním polárním kruhem, kde na stabilní základně po dlouhou dobu místního léta Slunce nezapadá. Zároveň se začaly připravovat první aparatury i na takových kosmických zařízeních, kde dlouhodobě Slunce není zastíňováno Zemí a signál není rušen stíháním dne a noci. Připomeňme např. nakonec neúspěšnou sondu Phobos (zanikla v roce 1988) během letu k Marsu. Historický přelom v pozorování slunečních oscilací znamenala evropsko-americká observatoř SOHO (start v roce 1996), kde na americkém zařízení MDI/SOI se podařilo získat velmi kvalitní pozorování oscilací se značným časovým i prostorovým rozlišením. Za těchto okolností je považováno za dosavadní neúspěch, že se zatím nepodařilo detekovat a k analýze slunečního nitra použít tzv. g -módy slunečních oscilací, takže všechna dosavadní měření se provádějí na bázi p -módů.

2. ZÁKLADY METODY

Motivací pro studium slunečních a hvězdných oscilací je teoreticky odvozený předpoklad, že existuje závislost oscilačních frekvencí na vlastnostech hvězd, tedy na jejich hmotnosti a poloměru. S nimi je samozřejmě spojena celá vnitřní struktura hvězd a tedy oscilace jsou cestou k poznání slunečního nitra.

Teorie slunečních a hvězdných oscilací

Při diskusi o slunečních oscilacích je na místě otázka, co je jejich příčinou a jaký je jejich charakter. Přestože na definitivní odpověď je příliš brzy, má se za to, že náhodným vzruchem, který oscilace vyvolá je dostatečně rychlé posunutí nějakého elementárního objemu sluneční plazmy při dodržení adiabatičnosti procesu. Připustíme, že v in-

terní (pod hranici konvektivní zóny) oblasti Slunce dojde z nějakých příčin k malé výchylce objemového elementu ze stavu hydrostatické rovnováhy. Jeho hustota a teplota zaručují určitý plynový tlak a je vytvořena rovnováha mezi elementem a jeho okolím. Po vychýlení se element s původními parametry dostane do oblastí, kde hustota, teplota i tlak mají jinou hodnotu. Radiální průběh všech tří veličin vykazuje spojité pokles od středu k povrchu Slunce. Pro naši úlohu je podstatné, zda element ve vychýleném stavu má hustotu větší nebo menší než jeho nové okolí. Pokud je hustota větší (a tak tomu skutečně je), potom vzplývavá síla má zápornou hodnotu a v důsledku gravitace se objemový element nejen vrátí zpět, ale dokonce překmitne na opačnou stranu od rovnovážné polohy. Zde je ale vzplývavá síla kladná a celý proces se periodicky opakuje znovu. Říkáme, že oblast je stabilní vůči malým výchylkám. Je zřejmé, že objemový element vykonává oscilační pohyb a že síla, která výchylku vrací do rovnovážného stavu je gravitační síla. Oscilace tohoto typu obecně nazýváme g -mód slunečních oscilací.

Takový scénář ale nemusí platit v celém slunečním nitru. Dostáváme-li se blíže ke slunečnímu povrchu, vztah hustoty, teploty a tlaku se mění a jiný vychýlený element může mít naopak hustotu nižší než jeho okolí. Potom se výchylka spojitě zvětšuje a vzplývavá síla je trvale kladná, takže element se dá do pohybu vzhůru až k horní hranici konvektivní zóny. Oblast je konvektivně nestabilní, konvekce v ní trvale probíhá a rychlost konvektivního elementu narůstá. Konvektivní pohyb přirozenou cestou způsobuje variace plazmatického tlaku v konvektivní zóně a tlakové nehomogenity se šíří v konvektivní zóně všemi směry. Pohybující se objem prochází prostředím o různé hustotě a stlačuje a opět uvolňuje sousední objemy. Prostředí konvektivní zóny je trvale vystavováno periodickým tlakovým změnám. V tomto případě síla, která výchylky vrací do původního stavu je tlaková síla, kterou obvykle značíme písmenem p . Oscilace tohoto typu nazýváme p -mód slunečních oscilací.

Oscilace obojího typu lze znázornit v diagnostickém diagramu, v němž je vynesena závislost frekvence oscilací na vlnovém čísle. Oba dva typy oscilací souvisí s pohybem plazmatu uvnitř slunečního nitra, nicméně jejich projevy lze sledovat v měření radiálních rychlostí při jejich časovém vývoji. Speciální typ oscilací se vyskytuje pouze na slunečním povrchu. Jsou to povrchové gravitační vlny, jejichž amplitudu je možné měřit na povrchu prostřednictvím Dopplerova efektu. Vedle těchto vlnových procesů je při měření ve fotosféře měřitelná i rychlost konvektivních pohybů ve strukturách známých pod názvem granule a supergranule, případně obří cely. Zde jsou rozhodující parametry závislosti doby života na charakteristickém rozměru. Přes všechny tyto signály se překrývá ještě sluneční rotace případně meridionální cirkulace. Všechny zmíněné rychlostní komponenty jsou trvale na Slunci přítomny a považujeme je za projevy uspořádaných rychlostních polí. Není sporu o tom, že jejich

vzájemné oddělení je velmi složitá úloha. Rychlosti, které měříme v souvislosti s rychlými resp. eruptivními procesy na Slunci charakterizujeme jako neuspořádané a až na jednu výjimku se o nich zde nebudeme zmiňovat.

Resonanční struktury ve Slunci

Pátrání po příčině vzniku slunečních oscilací se zatím soustředilo na sluneční konvekci. Konvektivní zóna jako vnější slupka slunečního nitra je schopna efektivního transportu energie z jádra do sluneční atmosféry především prostřednictvím konvekce. Relativně malý objem sluneční plazmy na dně konvektivní zóny se ohřeje natolik, že zvětší svůj objem v důsledku nárůstu tlaku a sníží svoji specifickou hustotu vzhledem ke svému bezprostřednímu okolí. Proces je adiabatický, při němž nedochází k výměně tepla mezi objemem a okolím. To je okamžik, kdy na objem začne působit vzplývavá síla, která zapříčiní, že objem začne zvolna stoupat vzhůru směrem k povrchu Slunce. Během této cesty částice ve vzplývajícím objemu sledují poměrně komplikovaný systém trajektorií. Zpravidla ale původní objem nedorazí bez změny až k povrchu. Během svého výstupu ztrácí jednou či několikrát svoji identitu a jeho průměrný charakteristický rozměr kolem 200 – 300 Mm se postupně diskretně zmenšuje a většinou končí jako spousta malých útvarů o středním rozměru kolem 1 Mm, jehož horní strukturu pozorujeme ve fotosféře jako granulaci. Teorie konvekce je do dnešních dnů poměrně složitou teoretickou úlohou a její analytické vyjádření jen velmi špatně a neúplně může sloužit k popisu reálného konvektivního procesu. Numerické postupy s využitím nejmodernějších superpočítačů dokáží proces konvekce popsat poměrně věrohodně jen ve velmi malých vzorcích a numerická řešení pro jednotlivé charakteristické rozměry nejsou doposud vzájemně konzistentní.

Přes tyto nesnáze je zřejmé, že poměrně rychlé proudění konvektivní plazmy a jeho výrazné strukturální členění v důsledku značné proměnlivosti plynového tlaku v jednotlivých elementárních objemech konvektivní zóny vyvolává situaci, kdy původně stacionární plazma je vychýlena ze svého rovnovážného stavu a počne kolem původních klidových hodnot oscilovat. Dnes se tedy soudí, že příčinou slunečních oscilací je sluneční konvekce. Předmětem zájmu astrofyziků je i mechanismus, kterým konvekce oscilace budí a udržuje sluneční povrch v rytmickém kmitání. Zatím není jasné zda z nitra Slunce proud energie přichází již v určitém rytmu, či zda jednotlivé diskretní konvektivní proudy udělují sluneční kouli neuspořádané impulsy, které ji jako celek udržují v kmitání. Konvekce tak zcela náhodně generuje obrovské množství vzruchů, kterým přísluší téměř nekonečné množství frekvencí, jimiž objemy v konvektivní zóně oscilují. Zdá se, že tento druhý mechanismus je pro Slunce přijatelnější.

Typy oscilací

Sluneční oscilace byly objeveny prostřednictvím měření Dopplerových rychlostí ve fotosféře. Nevysoká štěrbina spektrografu vybere z obrazu slunečního disku jen velmi malou část a odpovídající spektrální čára vykazuje určitý Dopplerův posuv čáry; prostředí je v pohybu. Vedle lokální rychlosti, spojené s příslušnou konvektivní strukturou (granulární či supergranulární) lze při dlouhodobém měření ve stejném místě slunečního kotouče zaznamenat periodické variace této základní rychlosti. Zcela počáteční údaj uváděl periodu 5 minut, resp. 300 sekund. Momentální obraz Slunce, znázorňující rozložení Dopplerových rychlostí, dovoluje indikovat především sluneční rotaci, vykazující na východní polokouli rychlost k pozorovateli a na západní polokouli rychlost opačnou. Při slunečním okraji je výrazně patrný tzv. rudý posuv, v němž směrem k limbu exponenciálně narůstá rychlost od pozorovatele. Na samotném disku dominují struktury, odpovídající konvektivním elementům, především granulím a supergranulím. Doba života je řádově kolem několika minut u granulí a asi deseti hodin u supergranulí. Rychlosti rotace a rudého posuvu lze považovat v prvním přiblížení za konstantní a proto je lze z obrazu odečíst. Totéž se týká relativní rychlosti pozorovatele vůči Slunci. Zbývající rychlostní signál je možné potom sledovat v čase a zjištění, že jeho velikost ve všech bodech obrazu se neustále chaoticky mění na sebe nedá dlouho čekat. Zjištěný chaos je ale jen zdánlivý. Čím delší pozorovací řada je k dispozici, tím zřetelnější periodické struktury lze vystopovat. Je patrné, že sluneční těleso může oscilovat jako pružná koule, není to však ani pevné pružné těleso, ba ani kapalně těleso s přítomným povrchovým napětím. Jedná se o plazmatickou oscilující kouli, v jejímž nitru musíme počítat s přítomností rotace a magnetického i rychlostního pole, které mohou oscilační vlastnosti Slunce mírně ovlivnit.

Jednotlivé náhodné poruchy, které v důsledku vnitřní konvekce vedou k narušení stability a k vyvolání oscilací se na konečném oscilačním obraze Slunce projevují jen částečně. Většina vln, které se ve slunečním tělese šíří se vzájemně po srážkách progresivně tlumí a poměrně rychle zaniká. Jen relativně malé množství vln dokáže navzájem rezonovat, vzájemně se posilovat a přežívat po dlouhou dobu. Jedná se o stacionární vlny, jejichž vlnová čísla jsou celá a vytvářejí charakteristický oscilační obraz Slunce. Ve sluneční fotosféře pozorujeme pouze tzv. normální módy.

Zde krátce odbočíme. Poněvadž oscilující koule nemá přirozené uzlové body a čáry, mohou oscilace vytvářet veliké množství tzv. módů. K matematickému popisu takových kulových kmitů se používají kulové či sférické harmonické funkce. Ty mohou nabývat nekonečně veliké množství forem a stejně jako oscilační módy jsou aditivní, tj. mohou se sčítat. Struktura sférických harmonických funkcí závisí na třech základních indexech, obvykle

označovaných písmeny l , m a n . Hlavní index značíme l , azimutální index je označen m a radiální index je r . V praxi hlavní index určuje typ oscilačního módu a stanovuje celkový počet uzlových čar, které se na oscilující kouli vytvoří. Zpravidla může nabývat hodnoty od 0 do nekonečna. Azimutální index m se pohybuje od nuly až do hodnoty l a udává počet uzlových čar, které procházejí póly. Radiální index n udává počet uzlových čar ve směru poloměru koule a jeho hodnoty se také pohybují od nuly do nekonečna. V praxi lze ale „nekonečno“ omezit na hodnotu 4 – 5 tisíc. Oscilační módy tak mohou být zonální ($m=0$), meridionální ($m=1$) a tesserální ($0 < m < l$). Uvedený popis oscilačního schématu se váže k jedné zadané poloze pólu a rovníku na kouli. Z hlediska oscilací na Slunci ale takový dominantní výběr nelze provést, ten je jasně definován pouze s ohledem na sluneční rotaci. Pro oscilace může být pólů na sluneční kouli a jím odpovídajících rovníků téměř nekonečně mnoho. Je zřejmé, že v určitém bodě na Slunci může tak být příspěvek od obrovského množství oscilačních módů s téměř libovolnou orientací vůči rotační ose a odtud odvozeným pólům.

Reálné kmity, máme-li dostatečně dlouhou a hustou pozorovací řadu, lze numerickými metodami navzájem rozlišit a pro každý oscilační mód stanovit energetický výkon s jakým do oscilačního obrazu Slunce vstupuje. Uvedme jen, že nejvýrazněji se sluneční oscilace pozorují ve frekvenčním pásmu od 1.5 do 4.5 mHz se středem na 3 mHz, což odpovídá 5ti minutovým oscilacím.

Hodnota radiálního indexu n je podstatná pro přítomnost základních globálních oscilací. Ty vznikají, když $n=0$ a známe je také pod pojmem povrchové gravitační vlny. Jestliže $n > 0$, potom se jedná o p -typ oscilací.

V diskusi o módech oscilací, objevila se zmínka o f (fundamentálním)-módu oscilací, které se pojí s povrchovými stojatými vlnami s poměrně vysokým l .

Jiný typ oscilací se nazývá r -typ oscilací, který byl v minulosti nazván torzními oscilacemi, je charakterizován dlouhodobým driftem směrem k rovníku a patrně souvisí s velkorozměrovými konvektivními procesy a s problematikou helioseismologické metody nemá téměř nic společného.

Velké projekty na detekci a měření slunečních oscilací

Potřeba pořizovat velmi dlouhé a nepřerušované řady měření slunečních oscilací vedla již v počátku rozvoje tohoto oboru k zakládání poměrně komplexní mezinárodní spolupráce. V první etapě se jednalo o síť pozemních stanic, rozmístěných tak, aby se v jejich zorném poli Slunce překrývalo a spolu s dobrými vyhlídkami na počasí bylo možné měření slučovat a potom dlouhodobě vyhodnotit. Jednalo se o tyto projekty:

BiSON (Birmingham Solar Oscillation Network) byl projekt University v Birminghamu, který se zabýval po-

zorováním celého slunečního disku a využíval k měření techniky rezonančního rozptylu řadu let po roce 1976.

IRIS (International Research on the Interior of the Sun) byl podobný projekt, organizovaný Fossatem z University v Nice. Na Universitě v Bordeaux vyvinuli již koncem 80tých let přístroj pro pozorování oscilací na celém slunečním disku s časovým rozlišením několika desítek sekund.

GONG (Global Oscillation Network Group) byl cílevědomě budovanou sítí šesti identických pozorovacích systémů z prostředků NSO Spojených států. Zařízení byla rozmístěna na místech s vynikajícími pozorovacími podmínkami a s využitím interferometrické techniky bylo možné sledovat oscilace o řádu kolem 250. Systém začal kompletně pracovat od roku 1995. Jedná se o jeden z mála globálních projektů, který řadu let pracuje a nad jeho sítí doslova „Slunce nezapadá“.

Observatoř SOHO byla vypuštěna koncem roku 1995 a na dráze kolem libračního bodu L1 je schopna pozorovat Slunce nepřetržitě a bez všech nepříjemných vlivů zemské atmosféry, které v důsledku seeingu omezují měření oscilací o vysokém stupni a v důsledku atmosférických fluktuací brání i seriózním měřením nízkých frekvencí.

SOHO/GOLF (Solar and Heliospheric Observatory / Global Oscillations at Low Frequency) je zařízení na bázi rezonančního rozptylu, které je určeno k měření oscilací s nízkými frekvencemi, jinými slovy je orientováno na měření g -typu oscilací. Svoji kvalitou je ale i vhodné pro přesná měření nízkofrekvenčních p -módů.

SOHO/SOI-MDI (Solar and Heliospheric Observatory / Solar Oscillations Investigations – Michelson Doppler Imager) patří bezesporu mezi nejúspěšnější systém pro měření slunečních oscilací na bázi Michelsonova interferometru. Pozoruje celý sluneční disk s rozlišením 10 a 4 obl. sekundy a centrální část disku s rozlišením 1.2 obl. sekundy. Systém je schopen měřit módy oscilací se stupněm až 1000. Zařízení pracuje ve třech programech, lišících se rozsahem hlavního čísla l . Jedná se o nízké střední a vysoké hodnoty l , při čemž hranice jsou dány hodnotami $l = 0, 20, 300$ a 1000.

SOHO/VIRGO (Solar and Heliospheric Observatory / Variability of solar Irradiance and Gravity Oscillations) je systém, který používá k měření radiometr a zajímá se o signál odvozený z oscilací sluneční zářivosti a intenzity v širokém pásmu. Předpokládalo se, že tímto systémem by bylo možné detekovat oscilace typu g .

Rotace a sluneční oscilace

Charakteristickou vlastností teorie slunečních oscilací je, že její základ byl odvozena pro nerotující hvězdu. Reálné objekty, ať Slunce či některé studované hvězdy však obvykle rotují. Poměrně jednoduchou úvahou lze usoudit,

že přítomnost rotace může ovlivnit pozorované frekvence. Poněvadž vzruchy ve slunečním tělese se šíří od výchozího bodu na všechny strany, lze nalézt trajektorii šíření ve směru a proti směru sluneční rotace. Pokud rotace není rigidní, a to jak s hloubkou nebo ve směru šířky, pohybují se vybrané objemy ve slunečním nitru oproti výchozímu referenčnímu bodu určitou relativní rychlostí. Potom je důležité zda vektor relativní rychlosti se k rotační rychlosti přičítá či odčítá. To zároveň prodlužuje nebo zkracuje podpovrchovou trajektorii vzruchu a mění vlnové číslo odpovídajících oscilací. Projeví se to tak, že pro pozorovatele v inerciální soustavě se pozorované frekvence rotující hvězdy rozštěpí a to rovnoměrně podle hodnoty sektoriálního čísla m . Přesněji, rotační rozštěp sektoriálních módů poskytuje informaci o rovníkové rotační rychlosti. Z rozštěpu ostatních módů je možné stanovit závislost rotační rychlosti na heliografické šířce a samozřejmě, ve všech případech i na hloubce. Numerická cesta jak takové rotační informace získat je v podstatě nejjednodušší formou tzv. helioseismologické inverze, kdy z oscilačních frekvencí se získají informace o slunečním nitru.

Helioseismická inverze

Podstatou helioseismologie jako diagnostické metody je skutečnost, že charakter oscilací slunečního tělesa je zcela determinován nikoliv procesem buzení těchto oscilací (ten považujeme za zcela náhodný ve statistickém smyslu), ale především skladbou fyzikálních parametrů a strukturou slunečního nitra. Problém je ovšem v tom, že měříme charakter oscilací a z nich chceme odvodit vnitřní parametry, zatím co běžná fyzikální cesta je zpravidla opačná – ze známé struktury nitra vyvozujeme vlastnosti oscilací. Různé módy a různé frekvence, pozorované na povrchu, pronikají do různých hloubek slunečního tělesa. Podle toho, jak dotyčná hloubka, resp. hloubkový profil se podílí na šíření vzruchu nitrem, je odpovídající vlna výrazná. Šíření je ovlivňováno interní strukturou Slunce, tj. průběhem tlaku a hustoty a chemickým složením (zastoupení helia). Podstata inverzních metod byla v minulosti vyvinuta v geofyzice, pro sluneční helioseismologii se ale dostala do nové dimenze. Zpravidla se jedná o početně velmi náročnou proceduru. Tak např. jedna z metod dovoluje stanovit očekávaný výsledek řešením soustavy lineárních rovnic, kterých ovšem je tolik co měřených bodů. A těch, jak jsme již zmínili, by mělo být velmi mnoho a tedy řešení je velmi zdoluhavé.

„Time distance helioseismology“ neboli lokální helioseismologie

Vedle globálního signálu slunečních oscilací, který je využíván nejdéle, nabývá v posledních létech na významu speciální postup při analýze slunečních oscilací, nazývaný „time distance helioseismology“. Princip me-

tody je velmi jednoduchý a vychází z analýzy průběhu akustické vlny mezi různými body na slunečním povrchu. Akustické vlny detekované na slunečním povrchu se v důsledku narůstající rychlosti zvuku s hloubkou postupně odchyľují od radiálního směru, procházejí jednotlivými vrstvami pod stále větším úhlem až k bodu obratu a potom se po křivce stejného tvaru vracejí zpět k povrchu. V případě určitého vlnového čísla dokážeme velmi přesně stanovit bod návratu a tedy i povrchovou vzdálenost od výchozího bodu. Jestliže pod povrchem je prostředí striktně homogenní, potom oscilace ve výchozím bodě a na kružnici, jejíž poloměr odpovídá povrchové vzdálenosti bodu návratu, jsou amplitudou velmi podobné a jejich fáze je zpožděná o určitý čas t . Porovnáním oscilačního signálu ve výchozím bodě a kterýmkoliv bodem návratu na kružnici návratu prostřednictvím křížové korelace obou signálů můžeme tento časový interval určit se značnou přesností. V případě homogenního prostředí je tento časový údaj ve všech bodech na kružnici návratu stejný. Jestliže ale pod povrchem v oblasti testování jsou nehomogenity, potom čas t závisí na charakteru nehomogenit podél dráhy spojující výchozí bod a bod návratu. Za nehomogenity považujeme jakékoliv prostředí, které se podílí na lokálních změnách podpovrchové rychlosti zvuku. Obecně se jedná o oblasti teplotních nehomogenit, oblasti s uspořádaným velkorozměrovým prouděním a oblastí s přítomným silným magnetickým polem. Při zvýšení teploty v oblasti je rychlost zvuku vyšší a čas se zkracuje.

Pokud je v oblasti proudění se složkou podél paprsku, potom v závislosti na směru zda vůči výchozímu bodu se rychlost zvětšuje (proudění k bodu návratu) či zmenšuje a čas je kratší nebo delší. Pokud proudění je kolmé k paprsku, vliv na rychlost šíření se neuplatňuje.

Přítomnost magnetického pole se na rychlosti šíření podílí, ale je obtížné vliv magnetické pole izolovat. Vlny podél magnetických siločar mají větší rychlost, než vlny kolmo k siločarám. Pro konkrétní geometrii magnetického pole lze nalézt dvojici paprsků, které se v místě nehomogenity protínají pod pravým úhlem. Problém je ale v tom, že dráhy mají různý tvar a tedy i výchozí body a body návratu, které na povrchu není snadné nalézt. Kromě toho do procesu mohou vstupovat i jiné nehomogenity, o nichž byla řeč výše.

S ohledem na vlastnosti metody je podstatné dostatečné prostorové a časové rozlišení pozorovacího teleskopu. S tím souvisí i vysoká kvalita pozorovacích podmínek, především velká stabilita obrazu. Z těchto důvodů je optimální využívat zařízení na oběžné dráze, kde tyto podmínky mohou být již dnes uspokojivě splněny. Zařízení SOHO/MDI poskytuje v obrazové rovině rozlišení až 2.4 Mm, nepůsobí zde nežádoucí „seeing“ a pozorování není přerušováno např. oblačností. Tato metodika navíc nevyžaduje příliš dlouhé pozorovací řady, obvykle stačí série pozorování o délce 8–9 hodin.

3. APLIKACE VE SLUNEČNÍ A HVĚZDNÉ ASTROFYZICE

Helioseismologie je dnes již dobře zavedenou metodou, které vstoupila do pokročilé etapy svého rozvoje. Hovoří se o třetí etapě rozvoje tohoto oboru.

První etapou bylo poskytnutí počátečních výsledků o hloubce konvektivní zóny a o zastoupení helia v raném období života Slunce. V této éře byly pro měření využívány přístroje, které ale původně nebyly navrženy k měřením tohoto typu.

Ve druhé etapě došlo k měření sféricky symetrické komponenty hydrostatické stratifikace ve slunečním nitru a úhlové rychlosti s využitím inverzních metod normálních módů. Zde již byly využity speciální přístroje, pro takové projekty navržené.

V současnosti byla odstartována třetí etapa, která využívá pokročilých metod, které tlačí přesnost do zcela nových hranic. Systematicky se využívají odchylky od normálních módů (rotační rozštěp, asymetrický profil čar atp.) tak, že mohou být kladeny mnohem rafinovanější otázky o slunečním dynamu, stavové rovnici, chemickém složení, vlastnostech konvekce a projevech sluneční činnosti.

Je zajímavé se podívat, které informace o měřených frekvencích mohou být využity k vědecké diagnostice a jaké informace o vlastnostech Slunce z nich lze odvodit. Vždy se jedná především o frekvenci oscilací, podstatné ovšem je, jaký modální charakter je k dispozici.

V první etapě se jednalo o oscilace, závislé především na radiálním čísle n a hlavním indexu l . Tam na základě p -módů oscilací bylo možné očekávat poznatky o stratifikaci hustoty, teploty a tlaku v závislosti na hloubce. Taková diagnostika je přínosem pro kalibraci teorie hvězdné struktury a ke stanovení hloubky konvektivní zóny. Pokud by se podařilo podobně detekovat g -módy oscilací, napomohlo by to k určení chemického složení a jeho gradientů. To by dovolilo stanovit odhad primordiálního zastoupení helia, testovat promíchávání slunečního nitra a podle starších představ i vysvětlit příčiny neutrinového problému. Jak je známo, po nějakém čase se astrofyzika této ambice zřekla a konstatovala, že žádná varianta slunečního modelu tento problém nedokáže uspokojivě vysvětlit a přesunula tuto záhadu do rukou fyziků studujících elementární částice. Těm, jak se zdá nabídl řešení objev tzv. oscilačních vlastností neutrina, kdy patrně běžně měřenou složkou neutronového toku je jen část celkového toku a v čase neutrina mění svůj charakter.

Pozdější možnosti stanovit frekvence oscilací, charakterizovaných všemi třemi čísly, tedy i meridionálním indexem m dovolily se zabývat jemnou strukturou oscilací. Tím se otevřela cesta ke stanovení diferenciální rotace, tedy úhlové rychlosti Slunce v závislosti na heliografické šířce a vzdálenosti od středu. To souvisí s vnitřní dynamikou Slunce a se stanovením kvadrupólové komponenty J_2 , případně se zploštěním Slunce a dále s dlouhodobým zpomalováním sluneční rotace. Závislost rotace na hloubce dovoluje studovat propojení konvekce s rotací

a poskytnout významný přínos pro další rozvoj teorie slunečního MHD dynama a vyjádřit se např. k silnému fosilnímu charakteru slunečního magnetického pole.

Pokud údaje o frekvencích, charakterizovaných úplnou trojicí čísel dokážeme sledovat dlouhodobě a tedy poznáme jejich časovou proměnlivost, je zde naděje pro sledování velkých rychlostních a teplotních struktur především v konvektivní zóně. Zde máme co do činění s tzv. obřimi celami a je možné testovat přítomnost velkorozměrové stlačitelné konvekce a částečně tak kalibrovat teorie hvězdné konvekce.

4. NEJVÝZNAMNĚJŠÍ VÝSLEDKY

Jestliže v tomto roce uplynulo již čtyřicet let od nalezení slunečních 5ti minutových oscilací, je třeba říci, že první astrofyzikální výsledky této metody se objevily zhruba před deseti léty a skutečně podnětné výsledky, důležité pro rozvoj sluneční astrofyziky se objevily až po vypuštění observatoře SOHO v roce 1996. Přínos je tedy výrazně patrný teprve posledních pět let.

Stanovení slunečního seismického poloměru

Stanovení rozměru Slunce je důležitý astronomický problém, řešený již několik století. Měření prováděná ze zemského povrchu i ze stratosféry za posledních 25 let a korigovaná o atmosférické zkreslení, ztemnění slunečního okraje a jejich časové změny vedly nakonec ke střední hodnotě 969.60 obloukových sekund. To se velmi blíží obvyklé standardní hodnotě 959.63 ± 0.10 obl. sek, resp. 695.99 ± 0.07 Mm, užívané při výpočtu slunečního evolučního modelu. Při práci s materiálem ze SOHO/MDI došlo k porovnání frekvencí pozorovaných f -módů s odpovídajícími frekvencemi několika slunečních modelů. Frekvence těchto módů v oblasti středních vlnových čísel $88 < l < 250$ závisí především na gravitační síle a na změně hustoty v poměrně mělké vrstvě pod povrchem. Ukázalo se, že frekvence odvozené z pozorování jsou o zlomek procenta vyšší než ty, odvozené z modelu. Věc se dá do pořádku, když akceptujeme snížení slunečního poloměru o 0.044 %, tj. na hodnotu 695.68 obloukových sekund, což představuje snížení asi o 300 km. Rozdíl mezi fotosférickým a seismickým poloměrem Slunce, bude-li definitivně potvrzen, otevírá zajímavé perspektivy pro rozvoj teorie sluneční konvekce a pro další upřesnění slunečního modelu.

Rychlost zvuku ve slunečním nitru

Relativní rozdíl mezi průběhem rychlosti zvuku, odvozeným ze standardního modelu a měřeními hodnotami, odvozenými z inverze ukazuje, že maximální difference je jen asi 0.4 % se nachází se ve vzdálenosti 0.67 poloměru, kde odchylka je kladná a potom na poloměru 0.25, kde je záporná. Zvýšená rychlost je patrně důsledkem deficitu helia a souvisí s anomálně vysokou turbu-