

Hvězdná seismologie

Michal Švanda

Helioseismologie je slibně se rozvíjející metodou výzkumu slunečního tělesa. Je nepřímou metodou, s jejíž pomocí se můžeme podívat dokonce do slunečního nitra, a získat tak informace o vnitřní rotaci, chemickém složení nebo stavových parametrech plazmatu v oblastech, z nichž do pozorovatelova oka nikdy nedorazí jediný foton detekovatelného záření. Otázka zní: Je možné podobné principy aplikovat i na jiné hvězdy? Odpověď nám přináší standardní hvězdné modely: Ano, v zásadě to možné je.

Bylo by chybou představit si hvězdný model jako fungující hvězdu v malém provedení. Pod pojmem model se ve fyzice obvykle míní matematický popis co možná nejvíce se přibližující skutečnosti. Model vychází ze známých fyzikálních zákonů i mnohých empirických faktů, které jsou využívány obvykle jako takzvané okrajové podmínky. Těmi může být v našem případě například měřené vyzařované spektrum studované hvězdy, jež by měl samozřejmě model s požadovanou přesností reprodukovat. Hvězdný model se tak obvykle omezuje na popis průběhu stavových parametrů hmoty (teplota, tlak, hustota, ...) v nitru hvězdy s rostoucí vzdáleností od středu. Konstrukce modelu není jednoduchou záležitostí, neboť fyzikální podstata jevů je v tomto

případě popsána formálně jednoduchými, ale diferenciálními rovnicemi. Až éra elektronických počítačů dovolila konstrukci modelů s požadovanou přesností a možností zahrnout méně důležité fyzikální děje, jakým je např. magnetické pole nebo rotace hvězdy.

Základem veškeré helio/astero-seismologie je sledování oscilací – poruch projevujících se periodicky v některých měřeních. Oscilace jsou úzce vázány na stavové parametry hvězdného nitra. Z průběhu stavových parametrů lze totiž vypočítat, jak bude plazma v daném místě reagovat na odchylky od rovnováhy – třeba na náhodné vychýlení určitého elementu hmoty ze své rovnovážné polohy. Náhodný pohyb se může například utlumit v případě, že element splyne se svým novým okolím, element může kolem své rovnovážné polohy kmitat, nebo pokračovat ve svém započatém pohybu do jiných vrstev hvězdného nitra. A nejen to – v druhém i třetím případě můžeme na základě znalostí stavových parametrů vypočítat, zda bude tento jev podporovat vznik mechanických vln šířících se nitrem, umožňuje určit jejich typ a také frekvence. Podle síly, která je odpovědná za vznik periodického pohybu, rozdělujeme oscilace na gravitační (g), akustické nebo tlakové (p), u nichž je řídicí síla tlaková, a fundamentální (f) povrchové gravitační, které jsou způsobem vzniku podobné vlnám na mořské hladině. Je vcelku přirozené, že při náhodných pohybech budou vznikat vlny se spojitým spektrem frekvencí, ale jen ty, které vytvoří stojaté vlnění, se dlouhodobě uchovávají – tyto frekvence jsou nazývány vlastními frekvencemi, tvoří diskrétní spektrum a jsou základem hvězdné seismologie všech druhů.

Jiný typ oscilací souvisí s ionizačními změnami v některé vrstvě hvězdného nitra, mluvíme pak zpravidla o pulsacích vznikajících záklplovým (opacitním, κ) mechanismem. Opacitní mechanismus je podmíněn existencí dvou ionizačních forem chemického elementu

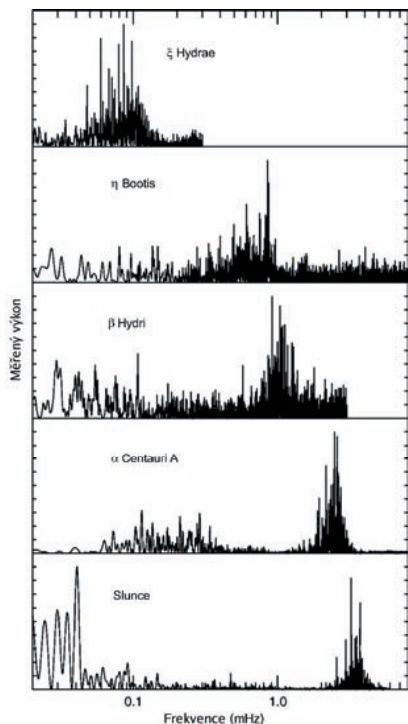
(nejčastěji vodíku nebo helia), které mají výrazně odlišné opacity, ve stejné vrstvě hvězdného nitra. Jedna z forem (obvykle ta s nižší ionizací) je pro procházející záření neprůhledná, ve vrstvě dochází ke kumulaci energie, která není odváděna pryč zářením, a růstu teploty. Nárůst vnitřní teploty znamená rozpínání hvězdy. Teplota dosáhne po určité době hranice, při níž dojde ke zvětšení ionizačního stavu důležitého prvku, který je spojen s poklesem opacity, uvolněním nahromaděné energie, smrštěním hvězdy a opětovné rekombinací prvku do „neprůhledného“ stavu. V případě mirid je zdrojem proměnné opacity nikoli ionizační změna některého z prvků, ale tvorba a rozpouštění oxidu titaničitého. Klasické pulsace vyvolané opacitním mechanismem jsou převážně radiální ($s = l = 0$), zatímco módy oscilací vznikajících například při konvektivních pohybech neradiální.

Samotná znalost frekvencí vlastních oscilací k měření parametrů hvězdného nitra nestačí. Zde nastupuje metoda matematické fyziky zvaná inverze. Ta spočívá ve výpočtu modelu hvězdy přibližně stejné hmotnosti a spektrálního typu, z něhož stanovené teoretické frekvence oscilací nejlépe odpovídají měřeným. Nejlépe se shodující model pak s vysokou pravděpodobností popisuje reálné fyzikální parametry studované hvězdy, detaily modelu jsou závislé na kvalitě dostupných pozorování.

Frekvence oscilací patří k nejpřesněji získaným parametrům vzdálených hvězd. Jejich měření však nepatří mezi nejjednodušší záležitosti, často vyžadují mnohaměsíční systematická pozorování, mnohdy koordinovaná mezi více observatořemi. Projevy oscilací je možné pozorovat třemi způsoby. Největší množství nových výsledků je založeno na měření dopplerovských posuvů vybraných spektrálních čar, v nichž se odrážejí lokální pohyby způsobené oscilacemi. K měření velmi malých posuvů jsou využívány vysokodisperzní spektrografy se stabilním zdrojem referenčních spektrálních čar. Dramatické zlepšení přesnosti této metody nastalo v poslední desítky let v souvislosti s metodami vedoucími k detekci extrasolárních planet. Asteroseismologie má oproti detekci exoplanet výhodu především v tom, že

(Pokračování na straně 25)

© T. R. Bedding, H. Kjeldsen, Publications of the Astronomical Society of Australia, 2003, 20, 203–212



Pozorovaná výkonová spektra oscilací slunečního typu pro Slunce a čtyři Slunci-podobné hvězdy získaná z různých pozorování. Vertikální osa popisuje normalizovaný výkon oscilací.

Mgr. Michal Švanda (*1980)

vystudoval astronomii a astrofyziku na MFF UK, kde nyní pokračuje v doktorském studiu se zaměřením na dynamické dění ve sluneční fotosféře. Pracuje v Astronomickém ústavu AV ČR v Ondřejově a v Astronomickém ústavu Univerzity Karlovy.
E-mail: svanda@asu.cas.cz

celková délka pozorování může být výrazně kratší. Nevýhodou pak je, že amplitudy jednotlivých oscilačních módů jsou velmi malé a že krátké časové období je zpravidla zapotřebí pokrýt pozorováními co možná nejhustěji.

Nejpřirozenější metodou měření oscilací je zaznamenávání celkového zářivého toku – fotometrie. Tento způsob měření má oproti ostatním metodám nespornou výhodu: k její aplikaci stačí velmi jednoduchý přístroj, využívá všechny fotony ze všech spektrálních oblastí a může být prováděna pro více hvězd současně. Nevýhodou je především ovlivnění fotometrie zemskou atmosférou, proto je ideálním místem pro fotometr určený k měření hvězdných oscilací paluba kosmické družice.

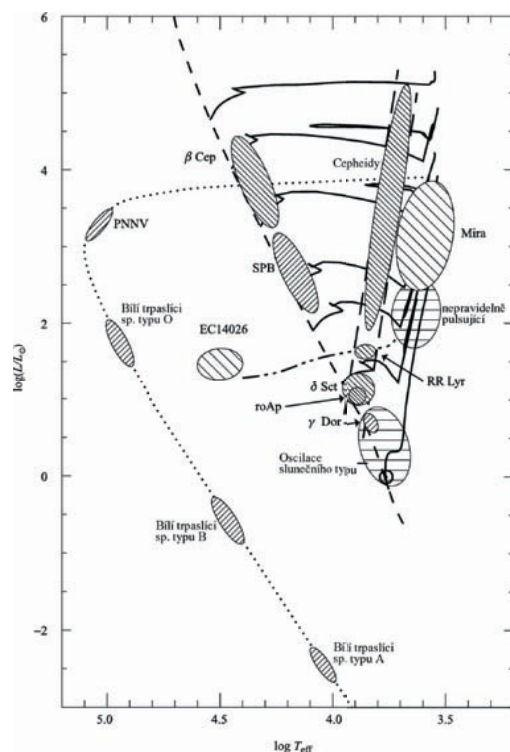
Třetí metodou je monitorování spektrálních čar, jejichž ekvivalentní šířky jsou teplotně citlivé. Zde se používají především spektrální čáry vodíku v Balmerově sérii. Vlny šířící se nitrem způsobují teplotní fluktuační, které se odrážejí v ekvivalentních šířkách vhodných čar. Dlouhá řada pozorování opět přináší informace o spektru oscilací jako takových.

Všechny tři metody je v současné astero-seismologii aktivně používají. Metody měření ekvivalentních šířek a dopplerovských posunů spektrálních čar jsou citlivé také na oscilace se stupněm větším než dvě, tudíž oproti měření integrální intenzity poskytují i omezené prostorově rozlišené informace související s nehomogenitami disku studované hvězdy. Všechny tři metody mají obecně různou citlivost pro různé mody oscilací a proto jejich současné použití zjednodušuje identifikaci (očíslování) jednotlivých módů. Metody ekvivalentních šířek a měření integrální intenzity vycházejí z detekce teplotních fluktuačních a jsou tudíž citlivé na pozadí pocházející z povrchové konvekce, převážně granule v případě Slunci podobných hvězd. Jakkoli je pro fyziky zabývající se modely hvězdné konvekce taková detekce velmi důležitá, v astero-seismologii znamená jen nechtěný a těžko odstranitelný šum. Rychlostní metoda je na povrchovou konvekci výrazně méně citlivá. Zásadní nevýhodou této metody je však její citlivost na velkorozměrové pohyby, zejména na rotaci hvězdy. Naštěstí hvězdy slunečního typu rotují vcelku pomalu, tudíž pro měření jejich oscilací se ukazuje dopplerovská metoda jako nejvýhodnější. Naopak u rychle rotujících hvězd se spíše používá měření ekvivalentních šířek a fotometrie.

Abychom mohli danou hvězdu seismicky zkoumat, musíme od ní detekovat více než jednu frekvenci vlastních oscilací. Čím více

různých frekvencí je možné od hvězdy měřit, tím méně volných parametrů musí nabývat „všeobecně přijímaných nebo očekávaných hodnot“ a je možné tak získat více konkrétních informací o nitru studovaného exempláře. Z tohoto důvodu jsou pro astero-seismology naprosto nevhodné hvězdy pulsující na jediné frekvenci, jakým jsou např. klasické cepheidy nebo miridy.

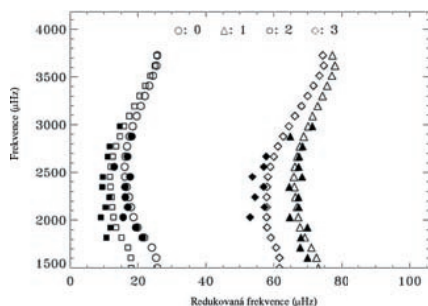
Největším problémem zaměstnávajícím astero-seismology v současnosti paradoxně není získávání kvalitních pozorovacích dat a vyvíjení nových metod k jejich pořizování, některá data jsou dostupná již v současnosti (byť nelze prohlásit, že dostupný datový soubor poskytuje zcela dostačující množství informací) a další budou výsledkem chystaných projektů. Ukazuje se však, že je velmi obtížné a v některých případech až nemožné pro naměřenou sadu frekvencí provést identifikaci (čili očíslování) jednotlivých oscilací. Každý oscilační mód je popsán třemi čísly: radiálním číslem n , které charakterizuje, kolik uzlových rovin má daná prostorová vlna ve směru od středu hvězdy k jejímu povrchu, úhlovým stupněm l , který popisuje počet uzlových kružnic na povrchu a azimutálním stupněm m , jenž říká, kolik povrchových uzlových kružnic prochází pólem. Každá sada čísel n, l, m má svoji charakteristickou frekvenci, jež je závislá na stavových parametrech hvězdného nitra. V některých případech nejsou ani pozorování, ani modelové sady frekvencí dostatečně přesné na spolehlivou identifikaci jednotlivých módů, čili na jednoznačné přiřazení trojice čísel n, l, m konkrétní změřené frekvenci. Jedna z mnoha studií zaměřená na hvězdu XX Pyx typu δ Scuti využila 13 pozorovaných oscilačních frekvencí a sít 40 000 hvězdných modelů lišících se parametry nitra, přičemž všechny modely splňovaly základní požadavek – produkovaly stejné výsledné elektromagnetické spektrum srovnatelné s pozorovaným spektrem této hvězdy. V síti modelů bylo nalezeno osm zcela odlišných řešení, které se blížily pozorovaným frekvencím oscilací, avšak nebylo možné říci, které z nich je lepší než ostatní. Nutno podotknout, že ani pro jeden z osmi nejlepších modelů nebyla shoda měřených a předpovězených frekvencí dokonalá. Důvodem v tomto případě je zřejmě skutečnost, že model δ Scuti hvězd není příliš přesvědčivý. Příklad jasně ilustruje obtížnost očíslování jednotlivých oscilačních



Různé typy pulsací a oscilací na pozadí Hertzsprungova-Russelova diagramu

frekvencí, bez něhož je astero-seismologie téměř bezmocná.

V současnosti se zdá, že astero-seismologie nemůže nikdy dosáhnout stejně detailních výsledků, jaké jsou dosahovány helioseismickou metodou. Objektivních důvodů pro tento stav je hned několik. Ostatní hvězdy jsou příliš vzdálené na to, abychom mohli určit jejich základní parametry (věk, chemické složení, poloměr, hmotnost, neutrinový tok a atmosférické charakteristiky) s takovou přesností, s jakou známe tyto údaje pro Slunce. Povrch vzdálených hvězd je v zásadě prostorově nerozlišen, což limituje použití astero-seismologie směrem ke globálním vlastnostem získatelným z módů s nízkým l , zatímco helioseismologie pracuje s mody s vysokým l a získává tak výsledky s velkým prostorovým rozlišením. Slunce je navíc relativně jednoduchou hvězdou, což naznačuje, že bychom mu mohli jednou úplně porozumět. V hvězdné zoo se však často vyskytují komplikovaní exoti. Posledním důvodem je pak přítomnost mnoha kampaní a dedikovaných přístrojů zaměřených na helioseismologii (SoHO, GONG, BiSON a další), zatímco množství přístrojů zabývajících se výhradně astero-seismologií je možné spočítat na prstech jedné ruky. To by se však mělo změnit v budoucnosti, neboť astero-seismologie se zdá být natolik perspektivním oborem, že jsou pro její potřeby konstruovány a navrhovány



Echeletové spektrum oscilací hvězdy α Centauri A. Prázdnými symboly jsou teoretické frekvence vypočtené z modelu, plné symboly udávají polohu naměřených hodnot příslušných módů. Různé tvary symbolů vyznačují různá n jednotlivých módů.

dedikované přístroje, případně přístroje, kde je asteroseismologie jedním z hlavních programů (např. MOST, COROT, Eddington atd.).

Pozorování oscilací a jejich interpretace je odlišně aplikována na různých skupinách hvězd, už proto, že v jednotlivých skupinách je fyzikální původ vzniku oscilací rozličný.

Klasické pulsující hvězdy – β Cephei

β Cephei hvězdy jsou vyvinutými hvězdami spektrálního typu B vyznačujícími se periodickými změnami jasnosti a radiálních rychlostí s periodami pod 0,3 dne. Jejich pulsace – často multiperiodické – jsou vysvětlovány opacitním mechanismem, který souvisí s prvky skupiny železa a je účinný při teplotách kolem 2×10^5 K. Na rozdíl od klasických cepheid pro β Cep hvězdy neexistuje dobře definovaný vztah perioda–barva–svítivost, což je zřejmě dáno tím, že pozorované oscilace jsou neradiální, tedy $l > 0$. β Cep hvězdy mají mohutné konvektivní jádro, což je činí velmi zajímavými cíly pro asteroseismologie, neboť modely konvektivních jader jsou značně nejisté a asteroseismologie by mohla jejich parametry upřesnit. Například V836 Cen byla studována po 21 let vícebarevnou fotometrií, v níž bylo identifikováno a očíslováno šest rozdílných oscilačních frekvencí s periodami mezi 0,14 a 0,17 dne. Inverzí napozorovaných frekvencí se potvrdilo významné konvektivní přestřelování z jádra do okolní konvektivně stabilní vrstvy a výšková diferenciální rotace naznačující, že jádro rotuje čtyřikrát rychleji než povrch hvězdy. Srovnáním period pulsací mezi β Cep hvězdami v naší Galaxii a ve Velkém Magellanovu mračnu ukázalo, že v závislosti na metalicitě hvězdy tohoto typu oscilují buď v p - (pro hvězdy s vyšší metalicitou, čili v naší Galaxii) nebo g - (nižší metalicita, hvězdy v LMC) modech. Přítomnost p nebo g módů podle

metalicity je dalším kamenem ve skládance teoretických modelů těchto hvězd.

roAp hvězdy

Označení Ap hvězdy se používá pro chemicky pekulární hvězdy spektrálního typu A na hlavní posloupnosti, u nichž jsou pozorovány nezvykle silné čáry některých kovů a které mají silné zhruba dipólové magnetické pole. Zvláštní chemické složení fotosféry je vysvětlováno zářivou difúzí, při níž dochází ve stabilní atmosféře (v tomto případě stabilizované zřejmě magnetickým polem) k chemické stratifikaci působením záření v určitých spektrálních čarách. Metodou dopplerovského mapování byly ve fotosférách Ap hvězd odhaleny chemické nehomogenity v návaznosti na přítomnost lokálních magnetických polí. roAp („rapidly oscillating“ Ap) hvězdy jsou představitelem Ap SrCrEu hvězd (tedy těch, které mají velmi silné čáry stroncia, chrómu a europia), jež pulsují v p -modech s periodami kolem 10 minut a velmi malými světelnými změnami kolem 0,01 magnitudy. U mnoha roAp hvězd jsou pulsace multiperiodické, popsatelné jako neradiální pulsace vysokých módů podél osy dipólového magnetického pole. Nejde tedy o čistě akustické, ale spíše o magneto-akustické oscilace. Pulsace jsou typicky modulovány rotační rychlostí hvězdy, což paradoxně usnadňuje jejich očíslování. Díky výrazné chemické stratifikaci může být pulsační chování studováno jako funkce hloubky v atmosféře pouhým výběrem vhodných spektrálních čar formujících se ve studované vrstvě.

Bílí trpaslíci, neutronové hvězdy

Bílí trpaslíci jsou šampióny současné asteroseismologie pulsujícími převážně ve vysoce harmonických gravitačních modech (pro něž platí, že $n \gg l$). Akustické mody nebyly doposud detekovány, protože se u nich očekávají periody 1 s a kratší. S využitím rychlé fotometrie se u bílých trpaslíků pozoruje více frekvencí, než u kteréhokoli jiného typu oscilujících hvězd, což umožnilo extrahovat podrobné informace o fyzikálních parametrech těchto degenerovaných hvězd. Tak předně je možné bílého trpaslíka zvážit na dálku s nebyvalou přesností. Asymptoticky by měly být gravitační mody ekvidistantní v periodách, rozdíl mezi periodami sousedních oscilací (s/l lišícím se o jedničku) přímo poskytuje informaci o celkové hmotnosti hvězdy. Naopak odchylky od pravidelnosti period sousedních oscilací vypovídají o hmotnosti a struktuře vnějších

vrstev tělesa. Pokud přidáme nezávisle spektrofotometricky změřenou efektivní teplotu, můžeme vypočítat celkový zářivý výkon a vzdálenost bílého trpaslíka od pozorovatele, a to s mnohem větší přesností, než s pomocí jiných metod. Z rozštěpu oscilačních frekvencí lze změřit rotační periodu (případně hloubkovou diferenciální rotaci) a povrchové magnetické pole. Ze změny základní periody v čase lze odhadnout časovou škálu, na níž se bílí trpaslíci vyvíjejí, jež je důležitým testem hvězdné teorie.

Totéž, co se dá říci o bílých trpaslících, lze připodobnit k neutronovým hvězdám. S tím rozdílem, že při výzkumu neutronových hvězd se zřídka využívá kontinuálního měření jejich oscilací, ale spíše náhodných událostí, které způsobí šíření balíku seismických vln nitrem neutronové hvězdy. Princip je pak vlastně zcela ekvivalentní zkoumání zemského nitra pomocí zemětřesných vln. 27. prosince 2004 bylo pozorováno významné zjasnění neutronové hvězdy SGR 1806-20 ležící ve vzdálenosti přibližně 40 000 světelných let od Země. Zjasnění, nazývané jako „hyper-erupce“, bylo způsobeno pravděpodobně náhlou přestavbou silného magnetického pole, které prolomilo kůru neutronové hvězdy, přičemž se uvolnilo velké množství energie. Následné vibrace procházející tělesem hvězdy, která má podle měření přibližně 20 km v průměru, se projeví oscilacemi v celkovém rentgenovém toku, jež byly změřeny družicí RHESSI, původně určené k výzkumu slunečních erupcí. Z frekvencí změřených oscilací vyplynulo, že kůra této neutronové hvězdy je 1,6 km tlustá. Další přesnější pozorování podobných událostí by mohla odpovědět na otázku struktury jádra neutronové hvězdy a potvrdit nebo vyvrátit domnělou existenci volných kvarků v jádře.

Pulsující A a F hvězdy typu δ Scuti

Hvězdy typu δ Scuti jsou pulsujícími hvězdami spektrálního typu A nebo F nacházející se na hlavní posloupnosti nebo v podobří fázi svého vývoje uvnitř klasického pásu nestability Hertzsprungova-Russelova diagramu. Hmotnosti tohoto typu hvězd spadají do rozmezí 1,5 až 2,5 hmotností Slunce. Amplitudy změn rychlostí se pohybují od prahu detekce po přibližně 0,8 magnitud, u některých zástupců byla detekována multiperiodicitu – takové exempláře jsou více než zajímavé pro asteroseismologie. δ Sct hvězdy na hlavní posloupnosti mají základní periodu kolem jedné hodiny, podobří hvězdy pak delší.



Různé módy oscilací. Vlevo: $l=19$, $m=19$, uprostřed: $l=19$, $m=15$, vpravo řez modem popsaným čísly $n=11$, $l=19$, $m=15$. V obsahu (str. 4) najdete barevnou verzi části obrázku, kde modrá barva značí pohyb směrem od středu tělesa, červená barva pohyb směrem ke středu tělesa. V protifázi se pohyby vymění.

Pouze asi jedna třetina hvězd nacházejících se v dolní oblasti pásu nestability vykazují pulsace. Zdá se tedy, že musí existovat nějaký faktor, který rozhoduje, zda bude daná hvězda pulsačně stabilní, nebo ne. U δ Sct hvězd by mohla být rozhodujícím faktorem existence ionizační zóny He II. Pro δ Sct hvězdy lze najít empirický vztah perioda–svítivost stejně jako pro cepheidy.

Jednou z dobře studovaných hvězd tohoto typu je FG Vir, u níž bylo identifikováno osm nejsilnějších oscilačních módů, celkově je od hvězdy měřeno dvacet čtyři individuálních frekvencí. Dva z těchto módů jsou čistě radiální, což umožňuje získat přesně střední hustotu ($\rho=0,1645\pm 0,0005\rho_{\odot}$), poloměr ($R=2,227\pm 0,0012R_{\odot}$), hmotnost ($M=1,82\pm 0,0327M_{\odot}$) a vzdálenost ($d=84\pm 3$ pc, která je ve shodě se vzdáleností získanou paralaktickou metodou družicí Hipparcos, pokud $V=6,57$ a $BC=-0,07$) za předpokladu, že povrchová teplota má hodnotu $T_{\text{eff}}=7500\pm 100$ K a metalicita je stejná, jako u Slunce ($Z=0,02$).

Obecně je pro asteroseismologii δ Sct hvězd problémem jejich rychlá rotace, která je šířkově i výškově diferenciální. Rozdílná vnitřní rotace ovlivňuje nejen frekvence oscilací (způsobuje jejich rozštěp), ale také stavové podmínky hvězdného nitra. Vnitřní rotace vnáší do modelu mnoho volných parametrů, které nelze uspokojivě zafixovat. Ze současných

pozorování vyplývá, že modely δ Sct hvězd nejsou dostatečně přesné, aby bylo možné srovnat teoreticky vypočtené spektrum oscilací s měřeným.

Oscilace hvězd slunečního typu

Helioseismologie je založena na analýze multipletu oscilací pocházejících z dynamických dějů v celém slunečním nitru. U Slunci-podobných hvězd mají g -módy svůj původ ve vrstvě v zářivé rovnováze, nešíří se konvektivní zónou a v principu jsou detekovatelné především v celkovém zářivém výkonu. Oscilace typu p jsou excitovány podpovrchovou konvekcí a jsou obvykle detekovány dopplerovskou metodou. Speciálním typem je povrchový mod typu f (čistě neradiální mod s $n=0$), který je vhodný ke studiu povrchových záležitostí. Nejvýznamnější část helioseismologie je založena na prostorově rozlišeném sledování módů p a f .

Hvězdy spektrálního typu F5 a chladnější mají vyvinuté podpovrchové konvektivní zóny a dá se tedy očekávat, že i u nich by mělo docházet ke vzniku oscilací stejného typu. Na rozdíl od hvězd typu δ Sct rotují hvězdy slunečního typu pomalu, pro jejich sledování tedy lze s výhodou použít dopplerovské metody. Pro balíky slunečních oscilací byly nalezeny asymptotické vztahy, které výrazným způsobem ulehčují identifikaci jednotlivých módů v případě jiných hvězd. Největším problémem této disciplíny asteroseismologie jsou však velmi malé amplitudy jednotlivých oscilačních módů. Z teoretických modelů vyplývá, že škálování amplitud splňuje hrubě relaci L/M , což je ekvivalentem T_{eff}^4/g , kde g je povrchové gravitační zrychlení. Na základě znalosti zářivého výkonu a hmotnosti hvězdy můžeme tedy odhadnout, jaké amplitudy oscilací lze u daného exempláře očekávat. Oscilace hvězd slunečního typu jsou v horších případech detekovány buď ve formě pouhého nadbytku výkonu

v určité části výkonového spektra, nebo jako balíky oscilací, z nichž lze vypočítat charakteristické frekvenční rozdíly módů se sousedním n („velká separace“) nebo charakteristické frekvenční rozdíly módů se stejným n , ale l lišícím se od dvojku („malá separace“). Z obou hodnot lze usuzovat na průběh rychlosti zvuku v nitru hvězdy. A konečně nejlepší pozorování poskytují jednotlivé oscilační frekvence, které lze s pomocí asymptotických vztahů očíslovat. Módy s $l>0$ lze využít k detekci vnitřní rotace hvězdy, neboť podléhají rotačnímu štěpení. V současnosti je katalogizováno mnoho hvězd vykazujících oscilace stejného typu, jako jsou oscilace sluneční. Jmenujme např. Arcturus, α Centauri A, β Hydrae nebo Prokyon. Získané informace jsou používány k ladění vnitřní struktury Slunci-podobných hvězd.

Pro α Centauri A, hvězdu typu G2V se spektrofotometricky změřenou efektivní teplotou $T_{\text{eff}}=5790\pm 30$ K, bylo detekováno 34 individuálních frekvencí převážně p módů s radiálními čísly $n=15-25$ s úhlovým stupněm $l=0-3$ ve frekvenčním rozsahu 1,8 až 2,9 mHz s amplitudami 13 až 48 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Z modelu, který nejlépe vystihl naměřené spektrum oscilací vyplývá, že α Cen A je hvězdou s hmotností $M=1,100\pm 0,006M_{\odot}$, svítivostí $L=1,519\pm 0,018L_{\odot}$ a poloměrem $R=1,230R_{\odot}$. Podpovrchová konvektivní zóna má dno ve vzdálenosti 0,725 poloměru, teplota na jejím dně dosahuje $1,893\times 10^6$ K, průměrná metalicita vnější obálky je $Z=0,0384$. Jádro, v němž se slučuje vodík na helium, zabírá v tělese pouhých 0,052 poloměru, teplota v něm dosahuje 19 milionů K a hustota $177,1\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Celkový zářivý výkon jasnější složky nejbližší dvojhvězdy $1,519\times$ přesahuje zářivý výkon Slunce.

Za pár desítek let let ušla asteroseismologie velký kus cesty. Přesnost měření je u nejlépe dokumentovaných exemplářů (např. α Cen) stejná, jako přesnost helioseismologie před dvaceti lety. Disciplína prochází převratným vývojem především díky novým projektům zahušťujícím datové řady (zejména díky projektu MOST). Do budoucna je plánováno mnoho kosmických misí, jejichž jednou z hlavních náplní bude sledování oscilací jiných hvězd – jmenujme COROT nebo Kepler. O asteroseismologii se již léta pořádají samostatné konference a ani Valné shromáždění Mezinárodní astronomické unie v Praze nebylo výjimkou – Joint Discussion 17 se věnovala výhradně helio- a asteroseismologii. ■

Parametry našeho Slunce

$R_{\odot} = 695\,980$ km
$M_{\odot} = 1,989\times 10^{30}$ kg
$L_{\odot} = 3,844\times 10^{26}$ W
$T_{\text{jádra}} = 15,696\times 10^6$ K
$\rho_{\text{jádra}} = 152,7\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
$R_{\text{konvektivní zóny}} = 0,7140R_{\odot}$
$T_{\text{konvektivní zóny}} = 2,18\times 10^6$ K
$R_{\text{jádra}} = 0,15R_{\odot}$
$Z_{\text{fotosféry}} = 0,01694$