

**PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET
NOVI SAD**

**SEMINARSKI RAD IZ PREDMETA
“ASTROFIZIKA SUNCA”
TEMA: HELIOSEIZMOLOGIJA**

**MENTOR:
DR. IGOR SAVIĆ**

**STUDENT:
PRAŠTALO ZORAN**

Maj 2007.

Helioseizmologija

Nauka koja proučava talasne oscilacije Sunčeve unutrašnjosti naziva se *helioseizmologija*. Fizički procesi koji su uključeni u ovo, mogu se razmatrati na isti način kao kod proučavanja Zemljine unutrašnjosti, praćenjem talasa nastalih usled zemljotresa. Temperatura, sastav i pokreti u dubinama Sunca utiču na periode oscilacija i omogućavaju pristup uslovima koji vladaju u Sunčevoj unutrašnjosti.

1. Talasi

Osnovna oblast fizike, koja se primenjuje i u seizmologiji i u helioseizmologiji jeste talasno kretanje, koje se javlja u dubinama Zemlje, odnosno Sunca, i širi se kroz medijum. Međutim, postoji mnoštvo razlika u broju u tipu talasa koji se javljaju u terestrijalnom odnosno solarnom okruženju.

U slučaju Zemlje, postoji obično jedan ili nekoliko izvora agitacije: zemljotresi.

Kod Sunca nije u pitanju samo jedan izvor solarnih "seizmičkih" talasa. Izvori potresa, koji prouzrokuju solarne talase dostupne proučavanju, procesuiraju se u većem, konvektivnom regionu.

Usled nepostojanja samo jednog izvora, taj skup izvora možemo tretirati kao kontinuum, tako da je to "zvonko" Sunce ustvari kao zvonu koje neprekidno pogađa mnoštvo sitnih zrnaca peska. Na Sunčevoj površini, talasi se pojavljuju kao vertikalne oscilacije gasova, koje se manifestuju Doplerovim pomacima spektralnih linija. Ako se pretpostavi da tipična vidljiva linija Sunčevog spektra ima talasnu dužinu od oko 600 nm i širinu od oko 10 pm, tada brzina od 1 m/s (misli se na brzinu podizanja i spuštanja gasne površine) pomera liniju za oko 0,002 pm. U helioseizmologiji, pojedinačne mode oscilovanja imaju amplitude ne veće od 0,1 m/s. Stoga je posmatrački cilj, ustvari merenje pomeraja spektralne linije, sa tačnošću do nekoliko milionitih delova njene širine.

2. Mode oscilovanja

Tri različite vrste talasa, koje helioseizmolozi mere ili traže su: **akustični, gravitacioni i površinski gravitacioni talasi**. Ove tri grupe talasa generišu *p-mode*, *g-mode* i *f-mode*, respektivno, kao rezonantne mode oscilacija jer se sunce ponaša kao rezonantna šupljina. Postoji recimo oko 10^7 *p* i *f* talasnih moda. Svaka oscilaciona moda reprezentuje različite delove solarne unutrašnjosti. Spektar detektovanih oscilacija proteže se od moda sa periodima od oko 1,5 minuta do oko 20 minuta, i sa horizontalnim talasnim dužinama između nešto manje od nekoliko hiljada kilometara pa do dužine Sunčevog radijusa.

Slika ispod je kompjuterski generisana i predstavlja akustični talas koji rezonuje u unutrašnjosti Sunca.

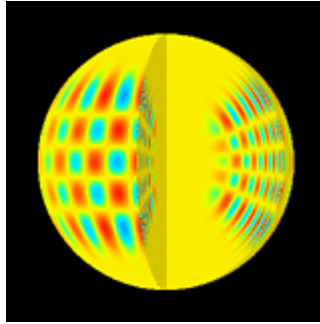
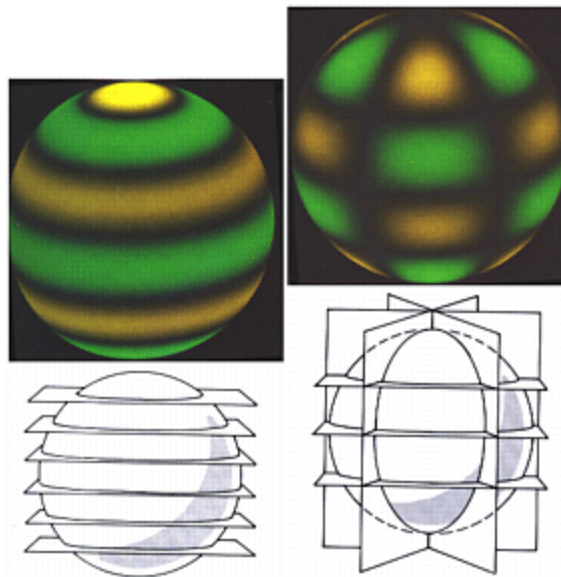


Figura prikazuje jedan set stojećih talasa Sunčevih vibracija. Ovde je radijalni broj (red) $n = 14$, angularni stepen $l = 20$ i angularni broj $m = 16$. Crvena i plava boja prikazuju zamenu elemenata suprotnog znaka. Frekvencija ove mode, određena iz MDI podataka, je (2935.88 ± 0.2) microHz.

Zašto se Sunce ponaša kao rezonantna šupljina? Akustični talasi bivaju trapirani u regionu koji je postojan od vrha, usled velikog pada gustine u blizini površine, pa do dna, gde se povećava brzina zvuka, što refraktuje nadole šireći talas nazad ka površini. Tako se formira stojeći talas. Fizički i matematički, oscilacione mode se mogu shvatiti upotrebom sfernih harmonika: l , m i n vrednosti. Funkcije sfernih harmonika daju čvoreve stojećeg talasa. Broj n je broj čvoreva u radijalnom pravcu. Harmonijski stepen, l , govori o broju čvornih linija na površini, koji je ustvari totalni broj ravni koje seku Sunce. Azimutalni broj, m , opisuje broj ravni koje seku Sunce longitudinalno.

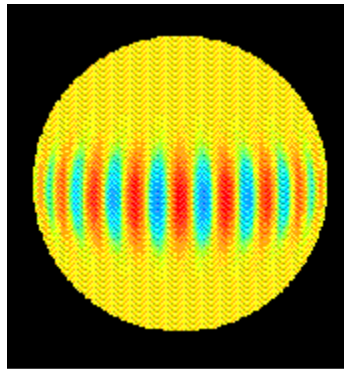


Slika levo prikazuje sferne harmonijske brojeve $l = 6$ i $m = 0$. Tamni regioni su čvorne granice, zeleni regioni označavaju površine koje se kreću radijalno ka spoljašnosti a žute boje pokazuju one oblasti koje se kreću radijalno ka unutrašnjosti. Desna slika

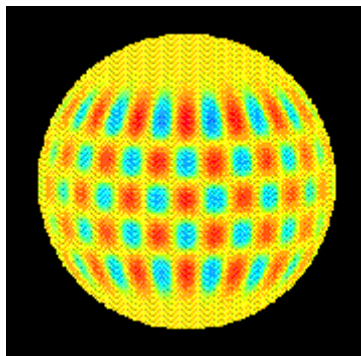
prikazuje sferne harmonijske brojeve $l = 6$ i $m = 3$. Boje označavaju iste regione kao kod prethodnog primera.

2.1. p -mode

Sferni harmonici imaju karakterističan prostorni šablon sa čvorevima koji su locirani i na Sunčevoj površini i radijalno u njegovoj unutrašnjosti. Broj m govori o tome koliko površinskih čvornih linija preseca ekvator a takođe daje i fazu; ide od $-l$ do $+l$ zato što smer talasa može biti veoma bitan. Može se reći da brojevi l i m opisuju šemu kontrolne table koja ima oblik površine lopte. Šablon oblika koordinatnog sistema je definisan prolaskom m -krugova kroz pol, kao meridijani, a $l-m$ linije odgovaraju paralelama heliografske širine. Broj n označava koliko puta se obrne model u Sunčevoj unutrašnjosti, između površine i centra.

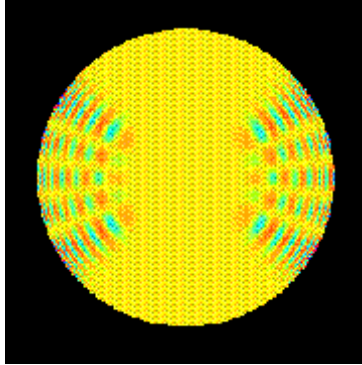


Ovde se vidi površinski figura pri modi od $l = 19$ i $m = 19$. Postoji 19 krugova koji prolaze kroz severni pol i koji presecaju ekvator. p -moda sa ovakvim prostornim dijagramom uzrokuje kretanje površine koja ima suprotan znak u susjednim regionima. Razlika između $m = +/-18$ je faza ovog dijagrama.



Na ovoj slici se vidi da je $l = 19$ i $m = 15$. Ovde postoji 15 čvornih meridijanskih krugova i 4 linije u istok-zapad smeru. Ovim se vidi na kojim se mestima materijal kreće ka unutrašnjosti ili ka spoljašnjosti.

Broj radijalnih čvoreva n u ova dva slučaja nije prikazan. On određuje koliko čvoreva postoji na liniji od centra do površine Sunca, i ne utiče na površinsko ispoljavanje mode.



Ova slika pokazuje presek Sunčeve unutrašnjosti po modi sa sledećim odgovarajućim brojevima: $n = 11$, $l = 19$ i $m = 15$. Postoji 11 inverzija površinskog dijagrama između površine i jezgra. Svaka moda je osetljiva na fizičke uslove dela unutrašnjosti gde su joj amplitude najveće. Lako je uvideti da se različite mode preklapaju ali svaka je pojedinačno osetljiva na različite delove unutrašnjosti Sunca. Kombinovanjem velikog broja moda može se stvoriti konzistentna slika onoga što se dešava u unurašnjosti Sunca. Interesantno je zapaziti da nijedna od ovih moda nije osetljiva na polovima Sunca. To je zbog toga što sve čvorne linije nulte amplitude konvergiraju na najvišoj širini. Mode $m = 0$ izgledaju kao horizontalne trake i samo one imaju neku osetljivost na 90 stepeni. Slični problemi postoje sa ispitivanjem najdublje unutrašnjosti. Samo niskostepene mode imaju neke šanse da opišu dešavanja u jezgru.

2.2. g - mode

Pošto se akustički talasi dužih perioda ne mogu prostirati na Suncu, teorijski se predviđa postojanje tzv. *unutrašnjih gravitacionih talasa* (g-talase mode), sa periodima većim od 20 minuta. Verovatno nastaju duboko u unutrašnjosti Sunca, ali se i reflektuju u dubljim slojevima. Njihove oscilacije nisu izazvane elastičnim silama, već su, kao i vodeni talasi u okeanu, odgovor sredine na perturbacije u gravitacionom polju. Nastaju kada se neka zapremina gasa pomeri iz ravnotežnog položaja, a ulogu restitucione sile ima sila teže. Njihovo postojanje zahteva ravnotežnu promenu masene gustine s dubinom. Ovi niskofrekventni talasi ne prostiru se duž radijusa, već ukoso. Kao progresivni, mogli bi da se “valjaju” po površinskim slojevima. Postojanje ovih talasa nije potvrđeno merenjima. Proračuni pokazuju da bi npr. u slučaju oscilacija sa periodom od 48 minuta, kod detekcije njihovog perioda oscilovanja mogle da nastupe razlike od 2%, u zavisnosti od toga da li je unutrašnjost Sunca slojevita ili izmešana.

2.3. f -mode

Fundamentalne, ili f -mode, su klasifikovane kao površinski gravitacioni talasi za koje važi relacija, veoma bliska klasičnoj disperziji vodenih talasa, $\omega^2 = gk$, gde je ω ugaona frekvencija, $g = 274 \text{ m/s}^2$ je gravitaciono ubrzanje na nivou Sunčeve površine, i $k = (l + 1/2)/R_{\odot}$ je horizontalni, prostorni talasni broj, izražen preko stepena sfernog harmonika l i solarnog radijusa. f -mode su pobuđene frekventnim omotačem, sličnim kao za p -mode, sa maksimumima oko kružne frekvencije $\nu = \omega/2\pi = 3 \text{ mHz}$ i punom širinom od 1mHz na polovini maksimuma. Vrh omotača je na oko $l = 880$ i puna širina pokriva stepeni opseg od 600 do 1200. U ovom opsegu, kinetička energija f -moda je koncentrisana unutar 2000 km solarne fotosfere.

Postoji nekoliko prednosti u korišćenju f -moda kao indikatora tokova materije blizu Sunčeve površine. Korišćenjem tehnike vreme-udaljenost može se pokazati da postoji direktna osetljivost f -moda na obe horizontalne komponente protoka materije. Već sada se ova metoda pokazala kao mnogo bolja od direktnih doplerovskih merenja, koja daju samo pravac posmatranja.

f -mode nisu direktno osetljive na vertikalna kretanja, mada se ispitivanjem horizontalnih divergencija može proceniti vertikalno kretanje. Zbog poznavanja svojstvenih funkcija f -moda moguće je dobro definisati dubinu čiji se prosek i traži.

3. Solarna struktura

Mnogi astrofizički fenomeni mogu se shvatiti ako se Sunce proučava kao sve ostale zvezde. Tu spadaju: produkcija nuklearne energije, protoci energije, interakcija magnetnog polja sa materijom kao i ubrzanje čestica do visokih energija. Teorija stelarne strukture i evolucije je principijelna osnova astrofizike a najviše trenutnog razumevanja Univerzuma. Glavni cilj helioseizmologije je da verifikuje korektnost teorija stelarne strukture i evolucije.

Ove teorije, primenjene na naše Sunce, nazivaju se solarni modeli.

Solarni model je rešenje seta jednačina koje opisuju fizičke procese koji se dešavaju u unutrašnjosti Sunca. Ove jednačine su često podeljene u dva podseta, i to u: strukturne jednačine i jednačine hemijske evolucije. U najuprošćenijim slučajevima, to su parne, nelinearne, obične diferencijalne jednačine prvog reda, ali realističniji modeli obično uključuju parne, nelinearne, parcijalne diferencijalne jednačine prvog reda. U oba slučaja, rešenja se ne mogu naći analitički nego samo numerički. Stoga, solarni modeli su uglavnom sačinjeni od seta tabela koje opisuju uslove na različitim dubinama Sunca (hemijski sastav, gustina, luminoznost, masa, pritisak, temperatura itd.).

3.1. Primer stelarnog modela (primenjivog na Sunce):

3.1.1. Jednačine stelarne strukture

Fizički parametri koji su uključeni u ove jednačine su luminoznost, masa, pritisak, radijus i temperatura. Ostale veličine, kao što su gustina, brzina stvaranja energije i

neprozračnost, izvedene su iz ovih prvih pet varijabli. U ovim jednačinama obično figuriše masa, kao nezavisna promenljiva, a ne radijus. Razlog za to je što većina stelarnih modela pretpostavlja da zvezda ima konstantnu masu u nekom vremenskom intervalu ali ne i radijus.

Na primeru ovog modela, jednačine stelarne strukture su:

$$\text{Luminoznost: } \frac{dL}{dM} = \varepsilon - c_p \left[\frac{dT}{dt} - \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{T}{P} \frac{dP}{dt} \right]$$

$$\text{Pritisak: } \frac{dP}{dM} = - \frac{GM}{4\pi R^4}$$

$$\text{Radijus: } \frac{dR}{dM} = \frac{1}{4\pi R^2 \rho}$$

$$\text{Temperatura: } \frac{dT_r}{dM} = \frac{-3\kappa L}{64\pi^2 acR^4 T^3} \quad - \text{ transfer energije zračenjem}$$

$$\text{Temperatura: } \frac{dT_c}{dM} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{T}{P} \frac{dP}{dM} \quad - \text{ transfer energije konvekcijom}$$

gde su: ε - stopa proizvodnje energije (iz nuklearne fuzije)
 κ - Roselandova srednja neprozračnost

3.1.2. Jednačine hemijske evolucije

Ove jednačine zavise od trenutnih nuklearnih procesa koji se odigravaju unutar zvezde. Znamo da je u Suncu dominantan p-p ciklus dok CNO ciklus javlja u manjoj meri. U ovom modelu, pratićemo 5 elemenata: vodonik, dve vrste helijuma, ugljenik i azot. U jednačinama su urađene neke pojednostavljujuće pretpostavke.

$$\frac{dX_1}{dt} = \frac{A_1}{N} \left[-3R_{11}X_1^2 + 2R_{33}X_3^2 - R_{34}X_2X_4 - 2R_{1,12}X_1X_{12} - 2R_{1,14}X_1X_{14} \right] + \frac{d}{dM} \left[\sigma \frac{dX_1}{dM} \right]$$

$$\frac{dX_3}{dt} = \frac{A_3}{N} \left[R_{11}X_1^2 - 2R_{33}X_3^2 - R_{34}X_3X_4 \right] + \frac{d}{dM} \left[\sigma \frac{dX_3}{dM} \right]$$

$$\frac{dX_4}{dt} = \frac{A_4}{N} \left[R_{33}X_3^2 - R_{34}X_3X_4 + R_{1,14}X_1X_{14} \right] + \frac{d}{dt} \left[\sigma \frac{dX_4}{dM} \right]$$

$$\frac{dX_{12}}{dt} = \frac{A_{12}}{N} \left[-R_{1,12}X_1X_{12} + R_{1,14}X_1X_{14} \right] + \frac{d}{dM} \left[\sigma \frac{dX_{12}}{dM} \right]$$

$$\frac{dX_{14}}{dt} = \frac{A_{14}}{N} [R_{1,12} X_1 X_{12} - R_{1,14} X_1 X_{14}] + \frac{d}{dM} \left[\sigma \frac{dX_{14}}{dM} \right]$$

gde je R_{ij} brzina reakcije između vrsta i i j . X_1 je zastupljenost vodonika, X_3 zastupljenost helijuma 3, X_4 zastupljenost helijuma 4, X_{12} zastupljenost ugljenika i X_{14} zastupljenost azota. σ je skup konstanti koji uključuje i koeficijent difuzije. Ukupna zastupljenost mora biti jednaka 1 pa je svaka pojedinačna zastupljenost ovih elemenata između 0 i 1.

3.1.3. Generisanje energije

Brzina generisanja energije se može opisati, u prvom redu zakonom snage, pa sve do opisa preko npr. brzina nuklearnih reakcija.

$$\begin{aligned} \varepsilon = & 1,069 \times 10^{-5} R_{11} X_1^2 + 2,060 \times 10^{-5} R_{33} X_3^2 + 3,043 \times 10^{-5} R_{34} X_3 X_4 + \\ & + 1,763 \times 10^{-5} R_{1,12} X_1 X_{12} + 2,246 \times 10^{-5} R_{1,14} X_1 X_{14} \end{aligned}$$

3.1.4. Neprozračnost

Komplikovani modeli najčešće koriste tabele neprozračnosti. U ovom modelu koriste se OPAL tabele neprozračnosti i primenjuje se 4-dimenziona interpolacija na vodonikove zastupljenosti, zatim zastupljenost metala, gustinu i temperaturu.

3.1.5. Gustina

Za ovaj model koristi se jednačina idealnog gasnog stanja:

$$\rho = \frac{\mu P}{Rg T},$$

u cilju dobijanja gustine. μ je srednja molekulska i data je sa:

$$\mu = \frac{84}{168X_1 + 84X_3 + 63X_4 + 49X_{12} + 48X_{14} + 42Z}$$

gde je Z zastupljenost metala (bez ugljenika 12 i azota 14).

3.1.6. Konvekcija i proticanje

Zbog nepostojanja teorije konvekcije, problem konvektivnog u odnosu na radijativni transport energije, tretira se veoma jednostavno. Za određivanje da li je u upotrebi izvod radijativnog ili konvektivnog transporta koristi se Švarcšildov uslov. Količina proticanja materije preko ivice bilo koje konvektivne zone se definiše procentom mase konvektivne zone. Stoga, više proticanja donosi duže trajanje početnog konvektivnog jezgra.

3.1.7. Difuzija

Ovde se koristi veoma jednostavna funkcija difuzije. Konstanta difuzije se uzima kao veoma velika vrednost u konvektivnim regionima dok je u radijativnom regionu nula. Funkcija difuzije je:

$$\sigma = \frac{16\pi^2 \rho^2 R^4 nu}{M_*^2}$$

gde je nu konstanta difuzije.

3.1.8. Granični uslovi

Centralni granični uslovi za jednačine stelarne strukture su: $L=0$, P = centralni pritisak, $R = 0$ i T = centralna temperatura. Centralni pritisak i temperatura su nepoznati i njihove vrednosti se procenjuju. Površinski granični uslovi su L = površinska luminoznost, $P = 0$, R = površinski radijus i $T = 0$. I opet, nepoznate veličine se procenjuju.

Za jednačine hemijske evolucije, za difuziju se uzima da je jednaka nuli i u centru i na površini.

3.1.9. Početni uslovi

Početni uslovi koji se moraju specificovati su početne hemijske zastupljenosti i procene centralne temperature i pritiska, kao i površinske luminoznosti i radijusa. Homogena raspodela hemijske zastupljenosti je najčešća konfiguracija. Ovaj model počinje sa sledećom konfiguracijom: $X_1 = 0,71$; $X_3 = 0,00001$; $X_4 = 0,27$; $X_{12} = 0,2$ i $X_{14} = 0,05$ Z gde je $Z = 1.0 - X_1 - X_3 - X_4$.

3.1.11. Singulariteti u centru i na površini

Jasno je da su za date početne uslove, jednačine stelarne strukture jedinstvene i u centru i na površini. Stoga, potrebno je iskoristiti posebne tehnike za oba granična slučaja. Za ovaj model pogodne su aproksimacije u redove, za rešenja u centru i na površini.

Helioseizmologija je trenutno najbolji metod verifikacije ovih teorija i razumevanja strukture i unutrašnjih procesa zvezde.

U skladu sa standardnim solarnim modelima, solarna struktura je sledeća: Sunce je sfera radijusa $R_{\odot} = 6,96 \times 10^8$ m, inicijalno sačinjena od 70% vodonika, 28% helijuma i 2% težih elemenata. Oko polovina mase i 98% proizvodnje energije (fuzija vodonika u helijum) sadržano je u jezgru ($0,25 \times R_{\odot}$). Od vrha jezgra dolazi stabilan region, poznat kao radijativna zona, gde se energija prenosi zračenjem. Od dubine $0,713 \times R_{\odot}$ pa na gore, skoro do same površine, temperatura je dovoljno niska da konvekcija postaje dominantan mehanizam prenosa energije. Ova zona se stoga zove konvektivna zona.

4. Slike brzine Sunca

Kako je svaka moda oscilovanja “senzitivna” na fizičke uslove u unutrašnjosti Sunca, gde su amplitude moda najveće, identifikovanje moda oscilovanja je glavni oslonac rada helioseizmologa.

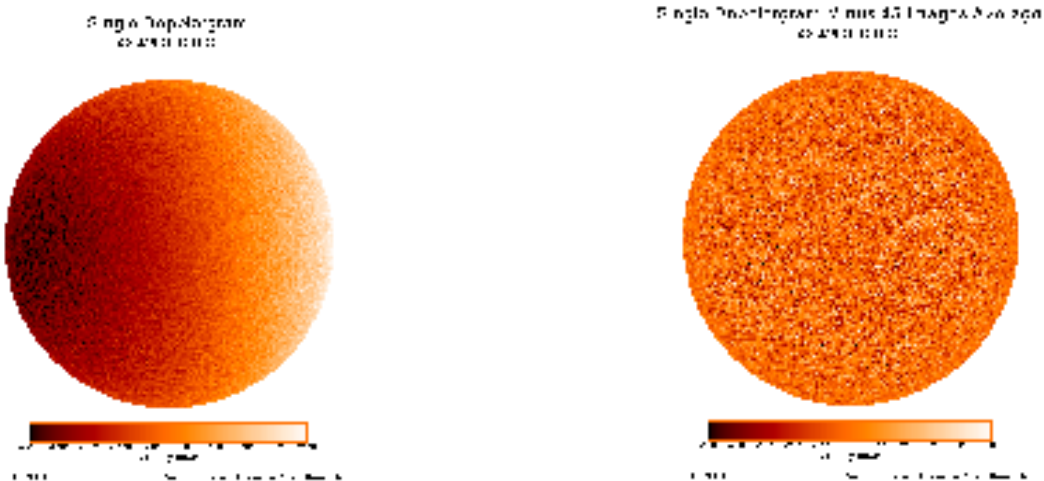
Da bi se identifikovale ove mode, mnogi helioseizmološki eksperimenti počinju sa slikama brzine Sunca, gde svaki piksel označava brzinu malog dela Sunčeve površine a metod je fiksiranje Doplerovog pomaka spektralne linije. Da bi se identifikovale mode oscilovanja, potrebne su sekvence ovih slika.

Dekomponovanje slika Doplerovog pomaka u prostorne sferne harmonike je naredni korak u određivanju moda oscilovanja. Koeficijenti svakog sfernog harmonika, kao funkcije vremena, su tada Furijeove transformacije za spektar snage, kao funkcije tri promenljive: frekvencije, stepena sfernog harmonika l , i azimutalnog broja m . L-nu figure su dijagrami poznati helioseizmolozima jer korišćenjem tog seta podataka, nalaze se mode oscilovanja.

4.1. Doplerogrami

Zbog rotacije Sunca, jedna strana nam se približava brzinom od 2 km/s a druga se odaljava. Slika predstavlja mapu brzine Sunčeve površine, merene SOHO/MDI instrumentom; boje ukazuju na kretanje ka nama (tamna), ili od nas (svetlija).

Na dominantnom levo-desno rotacionom gradijentu mogu se videti nadgrađene manje karakteristike. Ove pojave su uzrokovane solarnim fenomenima kao što su supergranulacija, granulacija i p talasne mode. Mala svetla pojava desno od centra je prouzrokovana jednim aktivnim regionom u kome je magnetno polje na površini bilo veoma jako. MDI meri brzinu i sjaj skoro milion tačaka Sunčeve površine svaki minut.



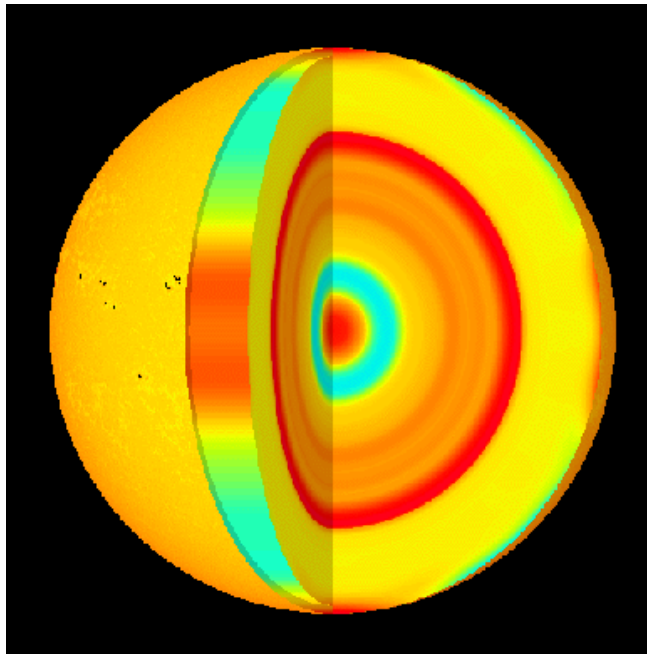
5. Problemi inverzije

Problemi inverzije obično počinju kod procedure za predviđanje odgovora fizičkog sistema sa poznatim parametrima. Tada se može postaviti pitanje: Kako se mogu odrediti nepoznati parametri iz dobijenih podataka? Cilj određivanja inverznog problema u helioseizmologiji je obrnuti osmotrene podatke da bi se izveo zaključak o unutrašnjim svojstvima Sunca. Drugim rečima, uzeti gustinu, temperaturu, brzinu zvuka itd., kao nepoznate veličine i upotrebiti uočene frekvencije oscilovanja za njihovo dobijanje.

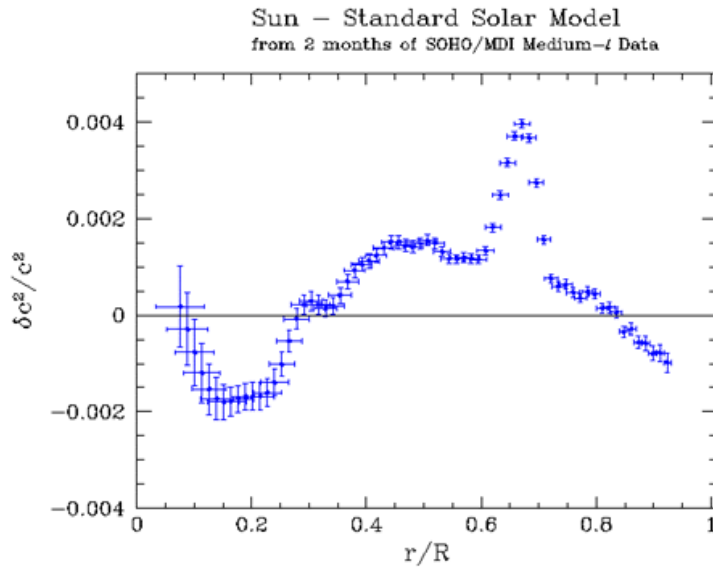
SOHO/SOI-MDI grupa je dobila rezultate za brzinu zvuka, brzinu rotacije Sunca i nagovestila poziciju hipotetičkog dinamo efekta, kroz inverziju izmerenih podataka o frekvenciji.

5.1. Varijacije brzine zvuka

Grafik prikazuje radijalne i latitudalne varijacije brzine zvuka, u poređenju sa standardnim solarnim modelom. Crvena boja odgovara pozitivnim varijacijama (topliji regioni) a plava boja odgovara negativnim varijacijama (hladniji regioni).



Relativne razlike između kvadrirane brzine zvuka u Suncu i u standardnom modelu su izvedene iz sledećeg nacrtu (po MDI).

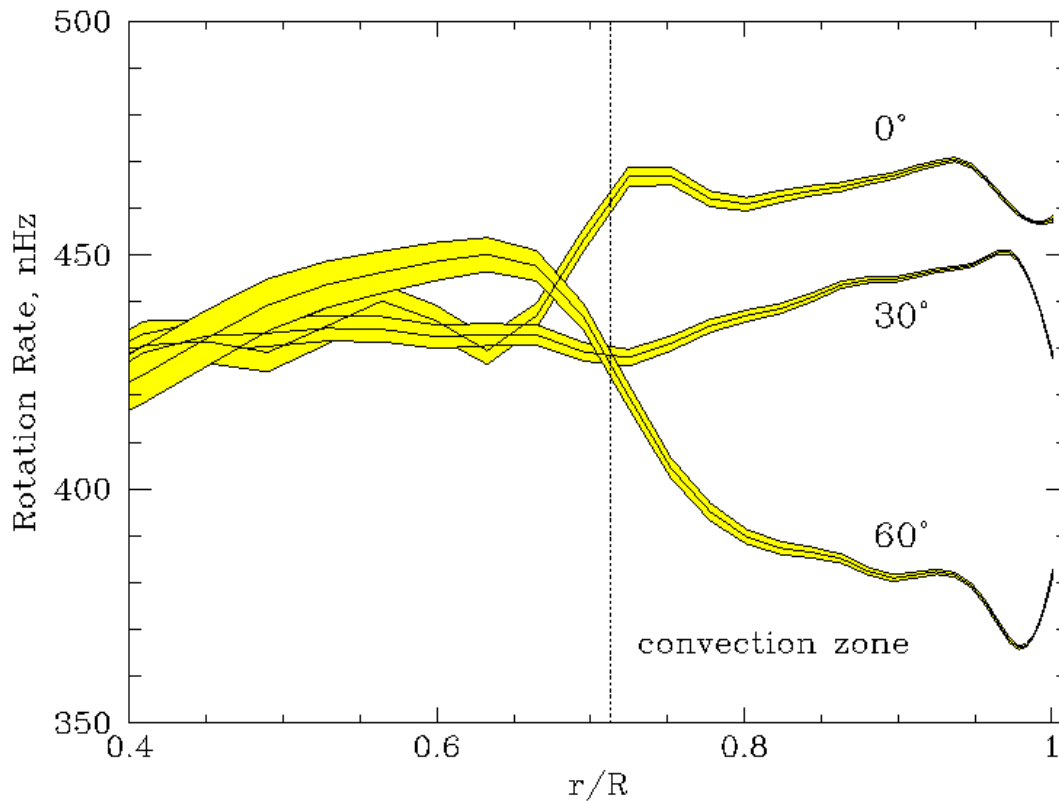


Horizontalne crte pokazuju prostornu rezoluciju, a vertikalne prikazuju procene grešaka. Referentni solarni model je bio Kristensen-Dalsgardov “S” model. Ovo je bio standardni evolucionni model, izračunat na osnovu najsvježijih informacija o brzinama nuklearnih reakcija, radijativne neprozračnosti i jednačine stanja. Uračunati su i gravitaciono pozicioniranje kao i difuzija helijuma i težih elemenata. Brzina zvuka je izračunata korišćenjem procesa inverzije, počevši od MDI podataka o oscilatornim frekvencijama pa do gore opisanih fizičkih modela i parametara.

Grafik prikazuje radijalne i latitudalne varijacije brzine zvuka, u poređenju sa standardnim solarnim modelom. Crvena boja odgovara pozitivnim varijacijama (topliji regioni) a plava boja odgovara negativnim varijacijama (hladniji regioni).

5.2. Brzina rotacije Sunca

Dijagram prikazuje solarne rotacije, kao funkcije radijusa i to na tri različite heliografske širine: 0° , 30° i 60° . Ovo je Medium-1 podatak, sa dvomesečnog istraživanja MDI, i predstavlja prostorne prosečne vrednosti Doplerovskih brzina celog diska, sve do 90% Sunčevog radijusa, merenih svaki minut.



6. Metode vreme-udaljenost

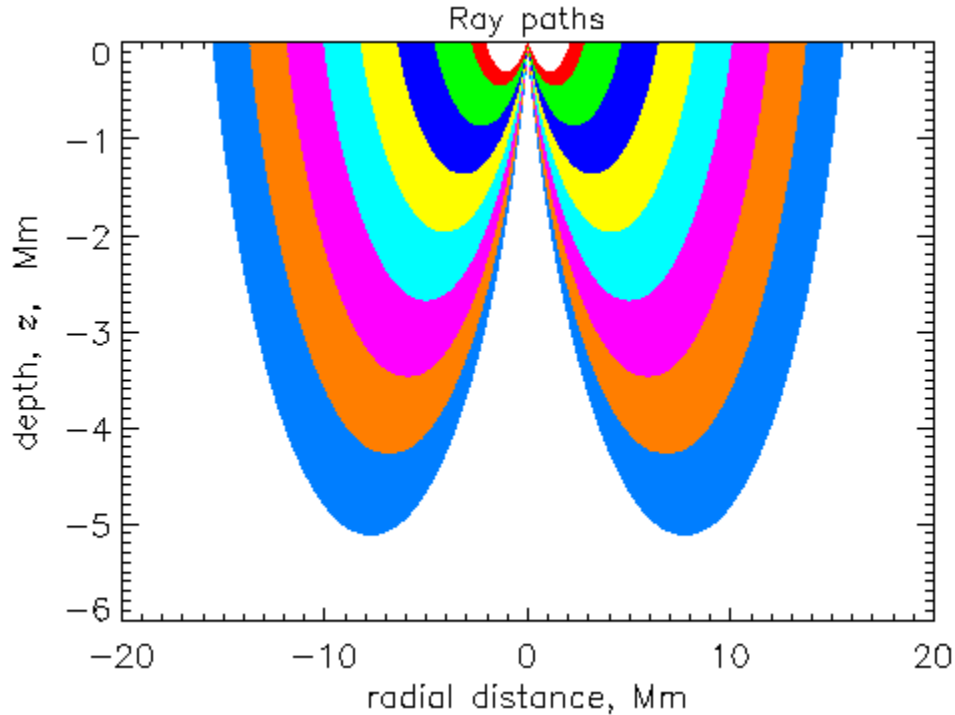
Najuopštenije razmatranje koje je urađeno u seizmologiji kad je u pitanju Zemlja je ono o vremenu stizanja početnog poremećaja. Ako znamo kako varira brzina seizmičkog talasa u Zemljinoj unutrašnjosti, onda možemo izračunati vreme putovanja signala između mesta nastanka zemljotresa i posmatrača, koristeći geometrijske aproksimacije. Tako, u principu, možemo locirati bilo koji zemljotres i u prostoru i u vremenu beležeći vreme prolaska talasa kroz stanice širom sveta.

U helioseizmologiji ovog tipa ideja je slična. Zamislimo jednu tačku na površini Sunca kao “izvor”, a zatim i jedan prsten na nekom velikom krugu oko te tačke, kao destinaciju do koje može da talas da doputuje. Korelacije između svih tačaka tog prstena su izračunate, kao i pulsiranje sa energijom, pa se onda mogu dobiti vreme i udaljenost za talase koji se kreću u različitim smerovima.

SOHO/SOI-MDI grupa je dobila rezultate za potpovršinske protoke i druge horizontalne protoke korišćenjem metoda vreme-udaljenost kao i metoda inverzije.

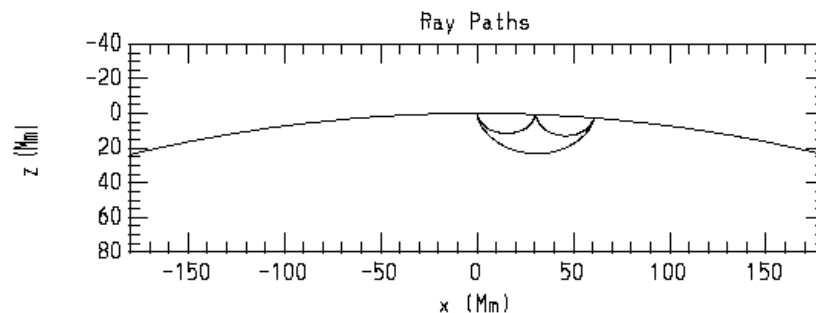
Analizom uz primenu ove helioseizmološke poddiscipline dobijaju se vremena potrebna akustičnim talasima da pređu rastojanje od površine do dna šupljine i nazad. Razmatraćemo ih kao zračne puteve. Ova analiza takođe meri udaljenosti i to kao uglove između površinskih refleksija.

Na slici ispod, prikazani su zračni putevi ispod Sunčeve površine. Zrak kreće od centra anulusa do drugih anulusa sa različitim radijusima. Putevi su zakrivljeni zbog povećanja brzine zvuka sa dubinom. Brzina zvuka raste od 7 km/sec, u blizini površine, pa do 35 km/sec, na dubini od 10^7 metara. Mereno vreme putovanja zavisi od komponente brzine koja je usmerena duž pojedinačne putanje.



Pravilo palca, koje je ovde pogodno za upotrebu, kaže da je horizontalna udaljenost između dve površinske refleksije dato, aproksimativno, kao dubina na kojoj se zrak reflektuje, pomnožena sa π . Ova relacija je tačna za politropni, i aproksimativno tačna za za realni solarni model. Drugo korisno pravilo palca je da je dužina zraka 4 puta veća od dubine.

Za fiksirane ugaone razdaljine (u stepenima), različiti talasi putuju do različitim dubina u Sunčevoj konvektivnoj zoni. Plići talasi se više, a dublji manje “odbijaju”.



7. Primena metoda helioseizmologije na različite probleme

7.1. Dubina konvektivne zone

Konvekcija na Suncu najpogodnije se može opisati u smislu teorije o mešanju i dužini. Ključni parametar je $\alpha = l/H_p$, a to je odnos dužine oblasti mešanja i visine pritiska. Povećanje α daje efikasniju konvekciju i to u smislu transporta energije. To znači da se konvekcijom prenosi luminoznost na većim dubinama. Zbog toga, dubina spoljašnje Sunčeve konvektivne zone raste sa α .

Ulrich i Rouds (1977) su pokazali da solarne p -mode visokog stepena l odgovaraju, na veoma osetljiv način, na promene α . Oni su iskoristili solarne modele omotača, koji su dovoljni za p -mode, zbog relativno plitkih talasnih profila ovih moda. Njihovi rezultati pokazuju da je najbolje slaganje sa posmatranim maksimumima p -moda pronađeno za α jednako između 2 i 3. Odgovarajuće konvektivne zone se protežu dvesta i više hiljada kilometara u dubinu. Veća efikasnost konvekcije postiže se transportom energije i za dati energijski fluks, $L_{\odot}/4\pi r^2$, potrebna je manja razlika između trenutnih i adijabatskih temperaturnih gradijenata. Saglasno tome, višak specifične entropije nad entropijom marginalnog stanja

$$\Delta S = \int c_p (\nabla - \nabla_a) d(\ln P)$$

opada sa povećanjem α . Kao što su Ulrich i Rouds pokazali (1977.), to je entropija koja fizički karakteriše konvektivni solarni omotač, dok je α samo tehnički parametar.

Entropijski višak ΔS se takođe može shvatiti kao entropijski "skok" preko spoljašnjih slojeva konvektivne zone jer je samo razlika $(\nabla - \nabla_a)$ od suštinskog značaja. Činjenica da teorijski modeli teže da predvide isuviše velike frekvencije visokostepenih p -moda bi značila: teorija solarne konvekcije malo precenjuje entropijski skok ΔS .

Nažalost, α je slobodan parametar samo za model omotača, koji ne podleže centralnim graničnim uslovima, ali ne i za potpuni solarni model. Parametar α je kalibrisan (zajedno sa zastupljenošću helijuma, Y_0) uslovom da model trenutnog Sunca mora imati posmatrani radijus (i luminoznost). Zato jedino možemo da menjamo (variramo) *treću* veličinu i nadamo se da će kalibracija posle takve varijacije voditi do povećanja α . Delimičan uspeh u ovom pravcu je došao iz elektrostatičkih korekcija u jednačini stanja, ali ipak u mnogo većoj meri iz detaljnih proračuna neprozračnosti Sunčeve materije. Na primer, standardni model u današnjim tekstovima nalaže $\alpha = 1,81$, za razliku od $\alpha = 1,38$ za model iz izdanja 1989. godine. Saglasno tome, današnja konvektivna zona je dublja i iznosi $R_v/R_{\odot} \approx 0,708$ (u poređenju sa 0,74 iz ranijeg modela), što je veoma blisko rezultatima helioseizmičke inverzije (R_v je poluprečnik koji odgovara bazi konvektivne zone).

Na graficima se baza konvektivne zone može prepoznati usled veoma fine promene nagiba krive $c^2(r)$, blizu vrednosti $r = 0,7R_{\odot}$. Zatim diferenciramo $c^2(r)$. Da bi pojednostavili slučaj, koristimo zakon idealnog gasa $p = \rho RT/\mu$, pri $\mu = const.$ i $\Gamma_1 = 5/3$ (jonizacija je nebitna blizu baze konvektivne zone). Tada:

$$\frac{dc^2}{dr} = \frac{5R}{3\mu} \frac{dT}{dr} = -\frac{5Gm}{3R^2} \nabla$$

gde je $\nabla = d \ln T / d \ln P$. Kako je $\nabla \cong \nabla_a \approx 0,4$, u dubokom delu konvektivne zone,

$$\text{izraz: } W = \frac{R^2}{Gm} \frac{dc^2}{dr} \text{ je približno jednak } -2/3.$$

U radijativnoj zoni, apsolutna vrednost veličine W je manja. Tako, vrednost R_v može biti određena kao radijus u seizmičkom solarnom modelu gde $W(r)$ dostiže konstantu $-2/3$. Na ovaj način, Kristensen-Dalsgard (1991.) i Bazu i Antia (1997.) su dobili da je:

$$R_v/R_{\odot} = 0,713$$

sa greškama $\pm 0,003$ i $\pm 0,001$, respektivno. Sa manjom greškom, ovako dobijena konkretna dužina radijusa konvektivne zone je (199700 ± 700) km.

7.2. Hemijski sastav

Mogu se razmotriti dva primera gde je helioseizmologija proširila znanje o hemijskom sastavu Sunca:

- 1) Zastupljenost helijuma u Sunčevom omotaču
- 2) Sadržaj elemenata težih od helijuma, izražen preko udela mase Z .

Adijabatski eksponent Γ_1 opada u sloju gde je zastupljeni element delimično jonizovan. Kako je brzina zvuka proporcionalna sa $\Gamma_1^{1/2}$, ovu veličinu moramo shvatiti kao funkciju dubine i obratiti posebnu pažnju na zone sa jonizovanim helijumom. Model koji opisuje difuziju helijuma u jezgru ima manju zastupljenost helijuma u konvektivnoj zoni i to je onaj model koji daje bolje slaganje svojstvenih (karakterističnih) frekvencija sa onim posmatranim.

Što se tiče teških elemenata, helioseizmologija nas primorava da odbacimo solarni model koji podrazumeva malo Z . Ovaj model je napravljen kao pokušaj rešavanja problema solarnih neutrina osobinom njihove male neprozračnosti, a samim tim i niske centralne temperature. Ali, računi za svojstvene frekvencije, za modele koji imaju unutrašnje vrednosti $Z = 0,001$; $Z = 0,004$ i $Z = 0,02$ jasno pokazuju da poslednja vrednost (0,02) donosi zadovoljavajuće slaganje sa posmatranim frekvencijama, a takođe bi moglo izgledati da još veće Z daje još korektnije rezultate. Međutim, postoji jedan problem. Veće Z grubo pogoršava problem neutrina i kontradiktorno je sa spektroskopski određenom zastupljenošću teških elemenata (opozivamo se da je manja vrednost Z od posmatrane dozvoljena zbog moguće akrecije prašine na površini Sunca). Zato se moraju naći druga značenja radi popravke neslaganja do najviše $\sim 10 \mu\text{Hz}$.

7.3. Jednačina stanja

U okviru Debaj-Hakelove teorije, moguće je objasniti elektrostatičke korekcije u zakonu idealnog gasa. Rezultati Noela (1984) baziraju se na solarnom modelu koji uključuje ovu korekciju.

Efekat elektrostatičke korekcije na spektar svojstvenih vrednosti niskostepenih p -moda može se prikazati grafički i vrlo često je uračunat efekat delimične degeneracije. Za niže tonove, do oko $p-23$, poboljšanje je dosta upadljivo. Više tonovi su izgleda pomereni ka isuviše velikim frekvencijama. Međutim, proračuni pokazuju da ovo može biti popravljeno modifikacijama u spoljašnjim slojevima solarnog modela npr. promenom u atmosferskom modelu ili detaljnim računom konvekcije u blizini površine. Niži tonovi

su manje osjetljivi na takve modifikacije zbog njihovog dubljeg nivoa totalne (spoljašnje) refleksije.

Zaključujemo da je elektrostatička korekcija potreba solarnog modela, u stvari, to je sada deo standardnog solarnog modela, isto onoliko koliko je to i delimična degeneracija elektronskog gasa i difuzija elemenata u unutrašnjosti.

Takođe, pri većem stepenu l , elektrostatička korekcija daje poboljšanje svojstvenih frekvencija. Teoretske frekvencije teže da se postave iznad posmatranih vrhova p -moda. Neslaganje je time znatno umanjeno.

Ovde se mora naglasiti da nijedan solarni model nema karakteristične frekvencije koje se po svim detaljima slažu sa celokupnim posmatranim spektrom p -moda.

7.4. Unutrašnje mešanje

Poređenje posmatranih i svojstvenih frekvencija daje model unutrašnjeg mešanja, što su uveli Ulrich i Rhodes a kasnije detaljnije potvrdili Ginter i Damark. Unutrašnje mešanje poravnava gradijente vodonikove i helijumove zastupljenosti i može da prouzrokuje smanjenje problema solarnih neutrina. Kao veličina koja je "najosetljivija" na unutrašnje mešanje, uvodi se mali interval frekvencija, $\delta\nu_{n,l}$, deinisana sa: $\delta\nu_{n,l} = \nu_{n,l} - \nu_{n-1,l+2}$. Mode sa malim l i velikim n prodiru nejdublje u Sunce, tako da je $\delta\nu_{n,l}$ za taj slučaj, najznačajnije za fiziku Sunčevog jezgra.

U granicama greške od 1 μ Hz, postoji zadovoljavajuće slaganje između posmatranja i standardnog modela. S druge strane, model sa unutrašnjim čistim mešanjem od 5% (mešanje mase), ima isuviše velike intervale $\delta\nu_{n,l}$. Stoga, nazire se da je standardni model potvrđen, premda i model sa blagim unutrašnjim mešanjem izgleda prihvatljiv jer ima tolerantno slaganje sa posmatranjima. Treba takođe dodati da neki drugi nestandardni modeli daju dosta konzistentne vrednosti $\delta\nu_{n,l}$. Primer je, recimo, model koji sadrži masivne čestice koje interaguju slabom silom. I kod modela sa malim Z ne postoji neko bitno odstupanje, te stoga, ne može se sa sigurnošću usvoiti solarni model samo na račun rezultata $\delta\nu_{n,l}$.

7.5. Precizno određivanje Solarnog radijusa

Najniže maksimum dijagnostičkog dijagrama solarnih oscilacija je f -moda. Ova moda, kao što je rečeno, nema čvoreve u radijalnom pravcu. To liči na površinski talas kod duboke vode, sa disperzijom $\nu = \sqrt{gk_h} / 2\pi$. Horizontalni talasni broj je asimptotski povezan sa stepenom sfernog harmonika l relacijom: $k_h = \sqrt{l(l+1)} / r$. Zbog jednostavne disperzione povezanosti, frekvencije f -mode su potrebno nezavisne od unutrašnje strukture Sunca, osim zavisnosti od radijusa. Promenljivost mase $m(r)$ zanemarljivo varira u posmatranim slojevima tako da se može uzeti:

$$g = \frac{GM}{R^2}$$

pa se vidi da $\nu \propto R^{-3/2}$.

S obzirom da frekvencije mogu biti određene sa visokom preciznošću, i kako se GM može odrediti iz Keplerovih zakona, može se odrediti solarni radijus. U principu, takvo određivanje radijusa je preciznije nego merenjem ugla posmatranja i udaljenosti od

Sunca. Problem sa metodom f -moda je samo u preciznom određivanju debljine Sunčeve atmosfere. Nije praktično računati disperzionu relaciju već računati solarne modele i njihove odgovarajuće svojstvene frekvencije f -moda, za modele različitih radijusa. Ako je radijus nekog modela fiksiran na optičkoj debljini $\tau = 2/3$, tada je rezultat, sa održivom vredošću greške, jednak $R_{\tau=2/3} = (6,957 \pm 0,001) \times 10^8 m$.

Literatura:

1. www.soi.stanford.edu/heliowhat
2. "The SUN" Michael Sticks