

Sólskjálftar

Birgir Urbancic Ásgeirsson og Páll Jakobsson

Raunvísindadeild Háskóla Íslands

Vefútgáfa: 1. desember 2010

Ágrip – Sólskjálftar stafa af bylgjuhreyfingum í sólinni. Bylgjurnar sem birtast sem sveiflur á yfirborði sólarinnar samanstanda af mörgum eiginleikum með mismunandi tíðnir. Með mælingum á yfirborðinu hafa sveiflurnar verið greindar með hjálp Fourier ummyndunar. Slíkar rannsóknir veita innsýn í innri gerð sólarinnar. Hér verður greint frá því sólarlíkani sem viðtekið er í dag, stíklað á stóru um eiginleika sólskjálfta og hvernig mælingar á þeim fara fram. Einnig verða niðurstöður úr sólskjálftarannsóknum bornar saman við sólarlíkón. Að lokum verður stuttlega fjallað um skjálfta í öðrum sólstjörnum.

1. Inngangur

Rannsóknir á innri gerð sólarinnar eru erfiðar þar sem ekki er hægt að skyggjast undir yfirborðið með beinum hætti.¹ Líkón sem lýsa hinum ýmsu eiginleikum sólarinnar, t.d. hitastigi, þrýstingi og efnasamsetningu sem fall af radíus, hafa því verið smíðuð.

Með rannsóknum á sólskjálftum er unnt að skyggjast undir yfirborðið. Skjálftarnir koma fram sem örlitlar sveiflur í sólinni en eiginleikar bylgjanna ráðast af innri gerð sólar. Bylgjurnar eru margvíslegar og erfitt getur reynst að greina þær í sundur. Með nákvæmum tækjum fást þó niðurstöður sem eru notaðar til að segja til um innri gerð sólar og meta hefðbundin sólarlíkón. Almennt er góð samsvörun milli þeirra og niðurstaðna úr sólskjálftarannsóknum. Mikilvægt er þó að skoða hvar mælingum og líkönum ber ekki saman og rannsaka hvað liggur að baki slíks ósáttmæmis.

2. Innri gerð sólar

Í dag er talið að sólín sé að mestu úr vetni (74% massans) og helíni (25%) [2]. Innri gerð hennar er lýst með staðalsólarlíkani. Líkanið inniheldur fjórar ástandsjöfnur sem eru leiddar út frá þekktum eðlisfræðilögmálum og lýsa þrýstingi p , massa m , ljósaffi

L , og hitastigi T , í fjarlægð r frá miðju sólar [9]:

$$\frac{dp}{dr} = -\frac{Gmp}{r^2}$$

$$\frac{dm}{dr} = 4\pi r^2 \rho$$

$$\frac{dL}{dr} = 4\pi r^2 \left(\rho \epsilon - \rho \frac{d}{dt} \left(\frac{u}{\rho} \right) + \frac{p}{\rho} \frac{dp}{dt} \right)$$

þar sem G er þyngdarstuðullinn, m er massi kúlu innan radíuss r , ρ er þéttleiki, ϵ er sú orka sem verður til við kjarnasamruna á einingarmassa og einingartíma og u er innri orka á rúmmálseiningu. Hitastigsbreytingu er lýst með tveimur jöfnum því greinarmunur er gerður á hvort orkuflutningurinn eigi sér stað með geislun eða iðustreymi. Fyrir geislun gildir

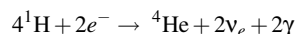
$$\frac{dT}{dr} = -\frac{3\kappa p L}{64\pi r^2 \sigma T^3}$$

þar sem κ er ljósdeyfni (e. *opacity*) efnisins og σ er Stefan-Boltzmann fastinn. Fyrir iðustreymi gildir

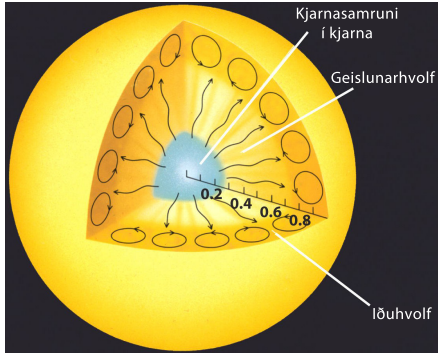
$$\frac{dT}{dr} = \left(1 - \frac{1}{\gamma} \right) \frac{T}{p} \frac{dp}{dr}$$

þar sem $\gamma = c_p/c_v$ er hlutfall eðlisvarma gassins við fastan þrýsting og fast rúmmál.

Hægt er að leysa þessar jöfnur tölulega þar sem jaðarskilyrðin við yfirborð sólar eru þekkt. Kjarninn nær frá miðju að um $0,25 R_\odot$ ($R_\odot$ er radíus sólar en lagskiptingu hennar má sjá á mynd 1) en í honum er þéttleikinn um 150 g/cm^3 og hitastigið rúmar 15 milljón gráður. Þar á orkuframleiðsla sólar sér stað við kjarnasamruna vetnis (H) í helín (He) og er lýst með



¹ Hér skal nefnt að rannsóknir á fiseindum geta gert okkur kleift að skyggjast inn í sólina. Við kjarnasamruna í iðrum sólar losna fiseindir. Þær sleppa mjög fljótt úr sólinni þar sem þær víxlverka ekki auðveldlega við efni. Fiseindirnar ferðast með nánast ljóshraða til jarðar en flestar þeirra fara í gegnum jörðina. Einstaka eind víxlverkar þó við efni. Þannig geta fiseindir gefið beinar upplýsingar um kjarna-hvörf í iðrum sólarinnar.



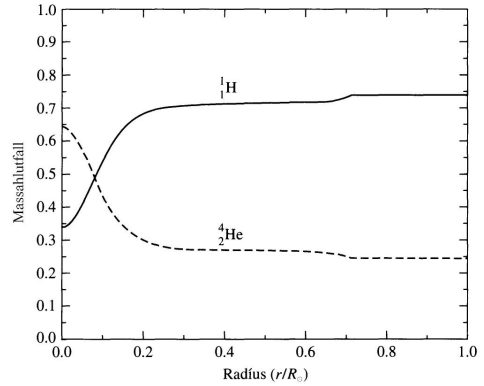
Mynd 1. Lagskipting sólar í kjarna, geislunarhvolf, iðuhvolf og ljóshvolf. Orkan berst fyrst með slembigöngu í geislunarhvolfinu og svo með iðustreymi í iðuhvolfinu á leið sinni frá kjarna til yfirborðs. Mynd: Stjörnufræðivefurinn.

þar sem e^- er rafeind, ν_e er raffiseind og γ er ljóseind. Í iðrum sólar er vetnið jónað og því um stakar róteindir að ræða. Til að kjarnasamruni geti orðið þarf hreyfiorka róteindanna að vera nægjanleg til að yfirvinna orkuþröskuld Coulomb-víxlverkunarinnar en þá taka kjarnakraftarnir við. Hreyfiorka róteindanna er háð hitastigi og ef Maxwell-Boltzmann hraðadreifingin fyrir vetni er skoðuð þá kemur í ljós að háhraðahluti dreifingarinnar hefur ekki nærri því nægjanlega hreyfiorku. Það sem gerir samrunann mögulegan er skammtafræðilegt smug en þannig nær hluti róteindanna að bindast og mynda helín. Líkurnar á smuginu eru litlar en þar sem tíðni árekstra er mikil þá dugar smugið til að viðhalda orkubúskap sólarinnar. Hlutfall helíns er hæst í kjarnanum, þar sem það myndast, en lægra nær yfirborðinu (mynd 2).

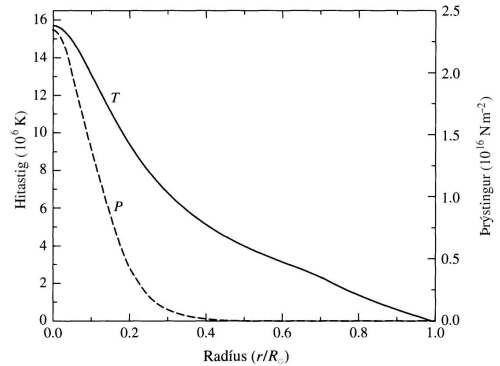
Orkan sem losnar við kjarnasamrunann er í formi fiseinda og ljóseinda. Fiseindirnar sleppa með næstum ljóshraða úr sól þar sem árekstrarþversnið þeirra er mjög lítið. Ljóseindirnar rekast strax á efni og ferðast utar með svokallaðri slembigöngu í geislunarhvolfi sólarinnar en það nær út að $0,7 R_\odot$. Fyrir utan geislunarhvolfið tekur svo iðuhvolfið við þar sem orkan berst að yfirborðinu með iðustreymi. Talið er að það taki nokkur hundruð þúsund ár fyrir ljóseindirnar að komast frá kjarnanum að yfirborðinu þar sem þær sleppa svo sem rafsegulgeislun út í geiminn. Við yfirborðið er hitastigið um 5.800°C og þéttleikinn um $0,2 \text{ g/cm}^3$. Hitastig og þrýstingur í sólinni sem fall af radíus samkvæmt sólarlíkaninu sjást á mynd 3.

3. Sólsveiflur

Sveiflur í ljósaflí stjarna hafa verið þekktar lengi. Sefítar og aðrar tegundir svokallaðra breytistjarna breyta birtu sinni margfalt með reglubundu millibili.



Mynd 2. Massahlutfall vetnis og helíns í sólinni sem fall af sólarradíus. Mest er af helíni í kjarnanum þar sem það myndast úr kjarnasamruna vetnis. Skörp breyting verður við $r = 0,7 R_\odot$ þar sem mörk geislunar- og iðuhvolfs eru. Myndin er fengin og uppfærð frá [8].

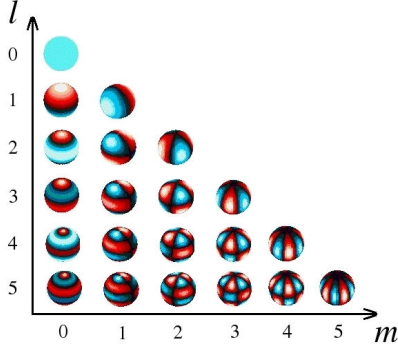


Mynd 3. Þrýstingur og hitastig í sólinni sem fall af radíus. Hámarkið er í miðju sólar en þrýstingurinn fellur hraðar en hitastigið eftir því sem utar dregur í kjarnanum. Myndin er fengin og uppfærð frá [8].

Hér verður hinsvegar einblínt á sveiflur sem koma fram sem örlitlar breytingar á yfirborði stjarna. Fyrstu staðfestu mælingar af sveiflum á yfirborði sólar voru gerðar árið 1962 [15]. Síðan þá hafa rannsóknir á þessu sviði aukist mikið og sérstaklega á síðustu tveimur áratugum með nýrri tækni og öflugri tölvum.

Gerum ráð fyrir að bylgjurnar séu truflanir á ástandsjöfnum stjarna. Lausnirnar á ástandsjöfnunum lýsa þrýsingsbylgjum í sólinni en þær koma fram sem hreyfing í efninu. Hentugt er að vinna með lausnirnar í kúluhnitum. Þá er hægt að beita aðskilnaði breytistærða og er hornlausninni lýst með eftirfarandi eiginildisjöfnu [9]:

$$\nabla^2 f(\theta, \phi) = -\frac{1}{r^2} A f(\theta, \phi), \quad (1)$$



Mynd 4. Nokkur kúluföll. Dálkanúmer jafngildir gildi á m og línunúmer gildi á l þar sem kúlan uppi í vinstra horninu er með $l = 0$ og $m = 0$. Gildið á l táknar fjölda svartra hringa meðan m segir til um hversu margir þeirra skera pólana. Hreyfing efnis á yfirborði sólarinnar samanstendur af mörgum sveiflum af þessu tagi. Mynd: Svetlana Panasyuk.

þar sem f er hornlausnin, r er fjarlægð frá miðju stjörnuinnar, A er fasti og

$$\nabla^2 = \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2}$$

er hornhluti Laplace virkjans. Lausnin á þessu eigin-gildisverkefni eru kúluföllin

$$f(\theta, \phi) = Y_l^m(\theta, \phi) = (-1)^m c_{lm} P_l^m(\cos \theta) e^{im\phi},$$

þar sem P_l^m eru Legendre föllin og c_{lm} er stöðlunarfasti þannig að

$$\int |Y_l^m|^2 d\Omega = 1,$$

þar sem $d\Omega = \sin \theta d\theta d\phi$. Þá eru l og m heiltölur þannig að $-l \leq m \leq l$ og $A = l(l+1)$ [10]. Kúluföllin lýsa því eiginleikum bylgjanna á yfirborði stjarna.

Þegar eiginleikar bylgja eru skoðaðir er oft þægtlegt að nálgast hegðun þeirra staðbundið með planbylgju $e^{ik \cdot r}$. Þá er hægt að skipta bylgjuvigrinum $\mathbf{k}$ upp í útpátt og þverstæðan hluta,

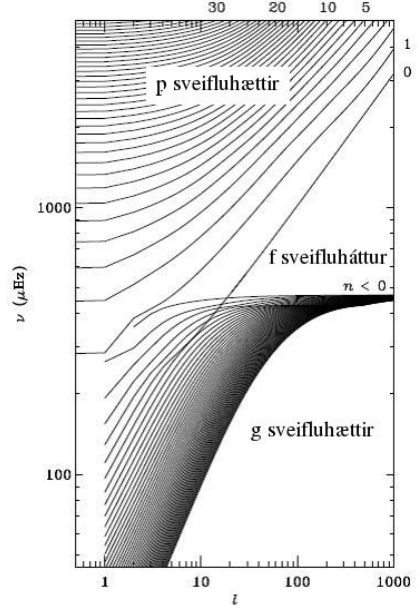
$$\mathbf{k} = k_r \mathbf{a}_r + \mathbf{k}_h. \quad (2)$$

Frá jöfnu 1 fæst því að [10]

$$k_h^2 = \frac{l(l+1)}{r^2}$$

þar sem $k_h = |\mathbf{k}_h|$. Yfirborðsbylgjulengd sveifluháttarins (á þverstæða hlutanum) fæst með (hér er $r = R_\odot$)

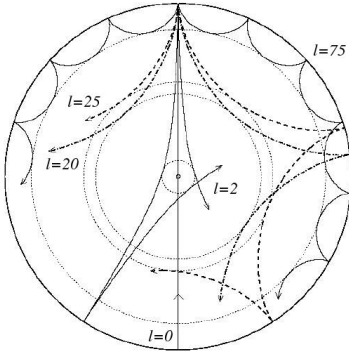
$$\lambda_h = \frac{2\pi}{k_h} = \frac{2\pi R_\odot}{\sqrt{l(l+1)}}. \quad (3)$$



Mynd 5. Sveiflutíðnir sem fall af l fyrir sólarlíkan þar sem sveifluháttir með sama n eru tengdir saman með línum. Tölurnar við efra hægra hornið segja til um n gildi viðkomandi línu. Þegar n er jákvætt er talað um p sveifluhátti, þegar $n = 0$ er talað um f sveifluhátt en annars g sveifluhátti. Myndin er fengin og uppfærð frá [9].

Nokkur kúluföll sjást á mynd 4 en þau lýsa hornlausnum bylgjanna. Bylgjurnar eru þess eðlis að fyrst færast rauðu svæðin út frá miðju kúlunnar meðan þau bláu fara inn og svo öfugt. Svörtu hringirnir táknar svæði sem sveiflast ekki. Bókstafurinn l táknar fjölda svartra hringja á yfirborði kúlunnar. Merking l sést einnig í jöfnu 3 en $\sqrt{l(l+1)}$ er fjöldi bylgjulengda í ummáli stjörnuinnar. Bókstafurinn m segir til um hversu margir af svörtu hringunum skera pólana. Það kemur heim og saman við að m getur aldrei verið stærra en l . Neikvæð gildi á m myndu táknar sömu myndir eftir snúning um $90^\circ/m$ um z -ás. Á hverjum tíma samanstendur hreyfing á yfirborði sólarinnar því af mörgum sveiflum af þessu tagi.

Ástandsjöfnurnar hafa einungis lausnir fyrir ákveðnar tíðnir $\omega = 2\pi\nu$, sem eru háðar l , m og n . Bókstafurinn n lýsir eiginleikum bylgjunnar í radíal stefnu þar sem $|n|$ er fjöldi radíal hnúða bylgjunnar (fyrir utan mögulegan hnúð í miðju sólar). Mynd 5 sýnir lausnirnar fyrir sólarlíkanið. Þar eru sveifluháttir með sama n tengdir saman með línum. Sveifluháttunum er skipt í þrjá flokka eins og rætt verður hér á eftir, p , g , og f [10]. Efri hluti myndarinnar sýnir p sveifluháttina. Sá sem er merktur



Mynd 6. Þversnið af sól þar sem vendipunktur nokkurra hljóðbylgja sjást. p bylgjurnar beygja þar sem hljóðhraðinn í efninu eykst með dýpt. Punktalínurnar sýna staðsetningu vendipunkta þar sem bylgjurnar snúa við. Myndin er fengin og uppfærð frá [9].

með $n = 0$ er f sveifluháttur og neðri hlutinn sýnir g sveifluháttina. Venja er að jákvæð gildi á n séu p sveifluháttir meðan neikvæð gildi á n séu g sveifluháttir en munurinn felst í uppruna bylgjanna og staðsetningu innan sólarinnar. Það getur verið mismunandi hvar í sólinni viðkomandi sveifluháttur er ríkjandi. Mörk þess svæðis þar sem hver sveifluháttur er takmarkaður kallast vendipunktur. Hér verður þessum þremur gerðum sveifluháttum stuttlega lýst.

3.1. p sveifluháttir

p sveifluháttir (e. *pressure*) eiga uppruna sinn í krafti vegna þrýstingsbreytinga. Bylgjurnar eru því hljóðbylgjur. Tíðni flestra p sveifluháttanna er meiri en 1 mHz. Tíðnin fæst með

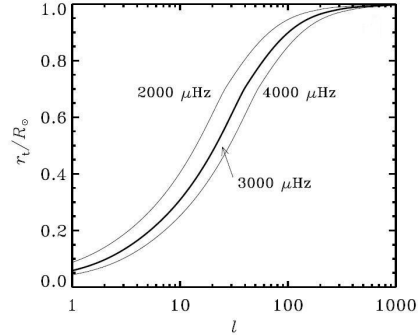
$$\omega^2 = c^2 |\mathbf{k}|^2$$

þar sem c er hljóðhraðinn í efninu. Af jöfnu 2 sést að lýsa má útpætti bylgjuvígursins með

$$k_r^2 = \frac{\omega^2}{c^2} - \frac{l(l+1)}{r^2}. \quad (4)$$

Eiginleikar sveifluháttarins ráðast af hljóðhraðanum. Með auknu dýpi (minnkandi r) eykst hitastig og því einnig hljóðhraðinn c . Útbreiðslustefnan beygir því frá radíal stefnu (nema þegar $l = 0$) þar sem k_r minnkar. Vendipunkturinn $r = r_l$ er þar sem stefna bylgjunnar er þvert á radíal stefnu [11]. Þar er $\omega^2 = l(l+1)c^2/r_l^2 = k_h^2 c^2$ og $k_r = 0$ og snúa bylgjurnar því við. p sveifluháttirnir eru því takmarkaðir milli innri vendipunkts r_l og yfirborðs sólar.

Á mynd 6 má sjá nokkra mismunandi p sveifluhátti í þversniði af sól. Sveifluháttirnir hafa allir tíðnina 3.000 μHz og l gildin 0, 2, 20, 25 og 75 þar sem



Mynd 7. Vendipunktur p sveifluháttanna í sólarradiusum sem fall af l . Vendipunkturinn er bæði háður l gildi sveifluháttanna og tíðni en ferlarnir eru við þrjú föst tíðnigildi. Myndin er fengin frá [10].

hærra l gildi endurspeglast í minna dýpi [10]. Sérstakt tilvik kemur upp þegar $l = 0$ en það eru sveifluháttir sem fara beint í gegnum sólina. Þegar $l \neq 0$ snýr bylgjan við en innri vendipunkturinn er sýndur með punktalínu. Ytri vendipunktur sveifluháttanna er við yfirborð. Þar verður endurkast bylgjanna vegna þess hve þéttleikinn minnkar hratt. Fyrir $r \leq r_l$ fæst tvinnigild lausn á k_r samkvæmt jöfnu 4 og því dofna bylgjan þar með veldisvísisfalli.

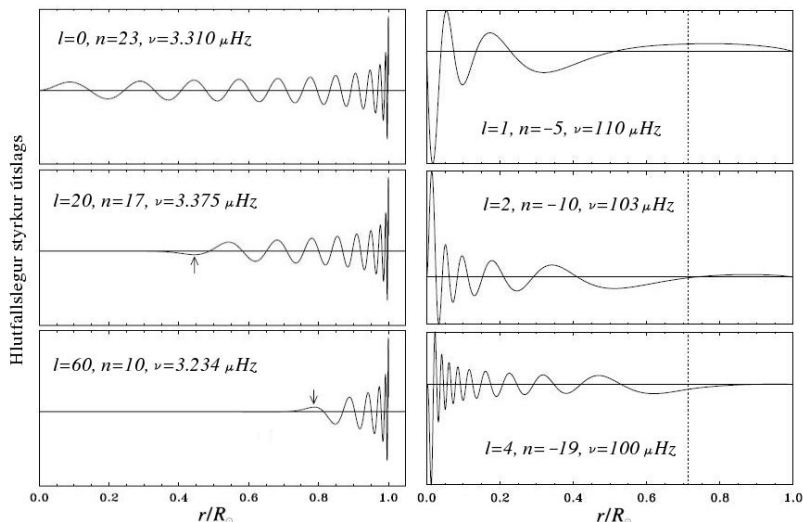
Vendipunkturinn r_l er háður sveifluháttum og tíðni (mynd 7). Með hækkanði tíðni fer bylgjan dýpra í sólina. Athyglisvert er að skoða hvað gerist við 0.7 $R_\odot$ þar sem skilin eru milli geislunarhvolfs og iðuvholfs. Fyrir $l \geq 40$ þá eru bylgjurnar fastar í iðuvholfinu í sólinni. Þetta á við sveiflur með tíðni um 3.000 μHz sem eru sterkustu bylgjur sólarinnar. Rannsóknir á sveifluháttunum fyrir $l \geq 40$ eru því notaðar til að meta ástandsjöfnurnar í iðuvholfinu.

Mynd 8 sýnir þrjú valin eiginföll p sveifluháttanna fyrir sólarlíkanið [10]. Á lóðrétta ásnúnum er hlutfallslegur styrkur útslags en á þeim lárétta er radius í sólarradiusum. Fyrir tilfellið $l = 0$ er orkan dreifð um mestan hluta stjörnuinnar og sveiflurnar ferðast um miðju hennar. Vendipunktur er næst yfirborði fyrir tilvikið $l = 60$ þar sem sá sveifluháttur hefur herra gildi en hinir tveir á l .

3.2. g sveifluháttir

g sveifluháttir (e. *gravity*) koma til vegna truflana sem þyngdarkrafturinn hefur á þéttleika djúpt í sólinni. Bylgjurnar eru því stundum kallaðar þyngdarbylgjur.² Í iðuvholfinu ferðast þær ekki. Þar deyjast þær

² Hér skal ekki rugla þyngdarbylgjum í sólinni saman við þær þyngdarbylgjur sem almenna afstæðiskennningin spáir



Mynd 8. Samanburður nokkurra p og g sveifluháttanna úr sólarlíkönum. Vinstra megin eru p hættir sem ná frá yfirborði og mislangt inn í sól meðan hægra megin eru g hættir sem ná frá miðju sólar og mislangt út, þó aldrei lengra en að iðuhvolfinu og því hafa þeir ekki enn mælst. Örvarnar sýna staðsetningu innri vendipunktsins og lóðrétta brotna línan sýnir skilin milli geislunarhvolfs og iðuhvolfs. Myndin er fengin og uppfærð frá [10].

fljótt með vaxandi radíus rétt eins og p bylgjurnar fyrir innan innri vendipunkt.

Tíðni g sveifluháttanna er 0–0,4 mHz. Þessir sveifluhættir eru með ytri vendipunkt í geislunarhvolfinu. Ef tíðnin er lág er hann rétt innan við mörk geislunar- og iðuhvolfsins. Ef tíðnin er há eru bylgjurnar takmarkaðar innarlega við kjarnann. Athyglisvert er að vendipunkturinn er hér óháður l en háður tíðni. Tíðni g sveifluháttanna minnkar með hækkandi $|n|$. Á mynd 5 eru einungis sýndir g sveifluhættir fyrir $n \leq -50$ en í raun er rófið til staðar fyrir öll $n \leq 0$. Það verður þó þéttara með stækkandi $|n|$. Mynd 8 sýnir eiginföll fyrir þrjá valda g sveifluhætti [10]. Bylgjurnar hafa mest útslag næst kjarna sólar. Áhrifasvæði sveifluháttanna er álfka. Ástæðan er að ytri vendipunkturinn er hér háður tíðni en ekki l öfugt við p sveifluhætti.

g sveifluhættirnir gætu gefið upplýsingar um ástand í iðrum sólar. Þar sem bylgjan dofnar sem veldisvísisfall þegar í iðuhvolfið kemur er erfitt að greina hana við yfirborð. g sveifluhættir í sólinni hafa því ekki enn fundist [1], en menn binda þó vonir við að þeir finnist og þá sérstaklega hættir með lága tíðni.

3.3. f sveifluhættur

f sveifluhættur (e. *fundamental*) myndast vegna áhrifa þyngdarkrafts við yfirborð sólar. Bylgjurnar eru því

fyrir um en þær koma fram sem truflanir í sveigju tímarúmsins.

yfirborðsþyngdarbylgjur. Í f sveiflum er $n = 0$. Tíðni þeirra fæst með [9]

$$\omega^2 = g_s k_h = \frac{GM_\odot}{R_\odot^3} l(l+1) \quad (5)$$

þar sem g_s er þyngdarhröðunin við yfirborðið og $M_\odot$ er massi sólar. Jafna 5 sýnir að rannsóknir á f sveifluháttunum eru óháðar líkönum um innri gerð hennar; slíkur sveifluhættur hefur mælst í sólinni.

4. Mælingar

Helstu rannsóknir á sveiflum í sól hafa verið gerðar með mælingum á sjónlínuhraða á yfirborðinu. Sjónlínuhraði reiknast út frá hliðrun litrófslína vegna Dopplerhrifa. Ef efnið sem sendir út ljós nálgast okkur hliðrast línurnar til styttri bylgjulengda, en til lengri bylgjulengda ef efnið fjarlægist okkur.

Mjög góða upplausn þarf fyrir mælingar sem þessar. Skipta þarf yfirborðinu upp í marga hluta og mæla á hverjum stað fyrir sig. Sveifluvidd hvers sveifluhættar er í mesta lagi um 0,1 m/s. Það er lítið í samanburði við heildaráhrif sveifluháttanna á hverjum stað sem nema um 500 m/s [15]. Mikið flókt og óstöðugleiki er í lofthjúpi sólar vegna mikillar virkni og hitauppstreymis. Til að mæla litlar breytingar sveifluháttanna á yfirborðinu þarf að framkvæma mælingar sem standa yfir í nokkrar vikur eða mánuði. Þannig má leiðrétta fyrir tilviljanakenndum óstöðugleika og ná upplýsingum um reglubundnar bylgjur.

4.1. Tækjabúnaður

Mælingar á sólskjálftum eru bæði gerðar á jörðu og í geimnum. Á jörðu er öflugasta rannsóknarnetið kallað *Birmingham Solar Oscillations Network* (BiSON) og samanstendur af sex stjörnuathugunarstöðvum um allan heim. Athuganir með gervitunglum eru hvorki háðar veðurfari né truflunum andrúmsloftsins. Á sporbraut um jörðu ber helst að nefna fjögur gervitungl.

- *Solar Dynamics Observatory* (SDO) var skotið á loft í febrúar 2010 af NASA og er sérhannað til rannsókna á sól. Meginviðfangsefni gervitunglsins eru sólblettir, segulvirkni sólar og kórónuskvettur. Tunglið ber myndavél sem kallast *Helioseismic and Magnetic Imager* (HMI). Greinigæði hennar er rúm bogasekúnda sem samsvarar 725 km á yfirborði sólar og mælir hún því um 3 milljónir staðsetningar. Hægt er að taka myndir á 10 sekúndna fresti af öllu yfirborðinu. Yfirborðs- og tímaupplausn eru því góðar. Vafalaust munu mælingar SDO gefa okkur enn betri mynd af innri gerð sólar í framtíðinni.
- *Solar and Heliospheric Observatory* (SOHO) var skotið á loft árið 1995 til að rannsaka sólina og er samstarfsverkefni ESA og NASA. Um borð eru tvö áhugaverð tæki. Annars vegar er það ljósmælirinn *Global Oscillations at Low Frequency* (GOLF) sem mælir Dopplerhrif á yfirborði sólar. Hann getur mælt hraða upp á 1 mm/s yfir 20 daga tímabil. Hins vegar *Solar Oscillations Investigation-Michelson Doppler Imager* (SOI/MDI) sem notar víxlunar-mælitækni. Greinigæði SOHO eru tvær bogasekúndur sem samsvara 1.450 km á yfirborði sólar og mælir því um 800.000 staðsetningar. Með nákvæmni sem þessari er því hægt að mæla sveifluhætti allt upp í $l \approx 1000$.
- *Convection Rotation and planetary Transits* (CoRoT) er gervitungl frá árinu 2006 sem er samstarfsverkefni Frakklands og ESA. Hlutverk CoRoT er tvíþætt, að leita að þvergöngu fjarreikistjarna og að mæla stjörnusveiflur. CoRoT rannsakar þó ekki sólina okkar, heldur skjálfta í fjarlægari stjörnum. Greinigæðin eru rúmar 2 bogasekúndur.
- *Microvariability and Oscillations of STars* (MOST) er kanadískt gervitungl frá 2005. Það var sérhannað til að rannsaka skjálfta í fjarlægum stjörnum og var það fyrsta sinnar tegundar.

5. Greining gagna

Sólskjálftagögnin innihalda upplýsingar frá mörgum sveifluháttum sólarinnar og mikilvægt er að aðskilja

þá. Aðeins þannig er hægt að meta innri gerð sólar og bera saman við lífön.

Fyrsta skrefið er að aðskilja framlag hvers kúlufalls. Hægt er að sýna fram á að sveiflurnar eru aðallega í radíal stefnu og því er algennt að líta fram hjá þeim hraðabreytingum sem eru þvert á sjónlínuna [9]. Með tvívíðri Fourier ummyndun í staðsetningu er hægt að aðskilja framlög hvers kúlufalls að hluta. Niðurstaða þessarar ummyndunar gefur svokallaðan tímastreng þar sem gögnum er safnað í langan tíma. Tímastrengurinn inniheldur nokkra sveifluhætti. Þeir eru svo aðskildir með Fourier ummyndun í tíma sem er einvíð og þannig fást eigintíðnirnar sem upphaflega var leitað eftir. Slík Fourier ummyndun getur verið talsvert flókin en hér er einfalt dæmi um það hvernig Fourier ummyndun í tíma fer fram.

Merki með hegðun hreintóna sveifils er hægt að skrifa sem

$$v(t) = a_0 \cos(\omega_0 t - \delta_0) \quad (6)$$

þar sem ω_0 er horn tíðni, t er tími, a_0 er fasti og δ_0 er fasahlíðrun. Fourier ummyndunin er þá

$$\begin{aligned} \tilde{v}(\omega) &= \int_0^T v(t) e^{i\omega t} dt \\ &= \frac{1}{2} a_0 \int_0^T \left[e^{i(\omega_0 t - \delta_0)} + e^{-i(\omega_0 t - \delta_0)} \right] e^{i\omega t} dt \\ &= \frac{1}{2} a_0 \frac{e^{-i\delta_0}}{i(\omega + \omega_0)} [e^{i(\omega + \omega_0)T} - 1] \\ &\quad + \frac{1}{2} a_0 \frac{e^{i\delta_0}}{i(\omega - \omega_0)} [e^{i(\omega - \omega_0)T} - 1] \\ &= a_0 e^{i[T/2(\omega + \omega_0) - \delta_0]} \frac{\sin(T/2(\omega + \omega_0))}{\omega + \omega_0} \\ &\quad + a_0 e^{i[T/2(\omega - \omega_0) + \delta_0]} \frac{\sin(T/2(\omega - \omega_0))}{\omega - \omega_0} \end{aligned}$$

Ef $T\omega_0 \gg 1$ þá eru $\omega = -\omega_0$ og $\omega = \omega_0$ vel aðgreind og við getum einblínt á jákvæð ω . Þá fæst

$$\tilde{v}(\omega) = a_0 \frac{T}{2} e^{i[T/2(\omega - \omega_0) + \delta_0]} \frac{\sin(T/2(\omega - \omega_0))}{T/2(\omega - \omega_0)}.$$

Nú er styrkrófið gefið með [10]

$$P(\omega) = |\tilde{v}(\omega)|^2 = \frac{1}{4} T^2 a_0^2 \text{sinc}^2 \left(\frac{T}{2} (\omega - \omega_0) \right)$$

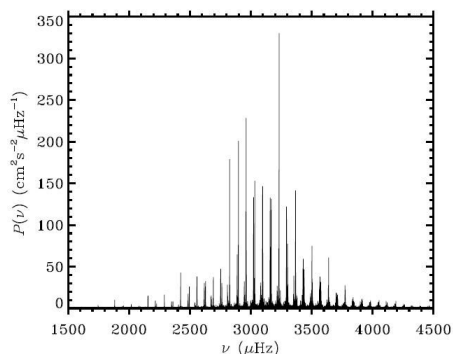
þar sem $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$. Rófið sést á mynd 9 en fram koma toppar bæði fyrir jákvæð og neikvæð gildi á ω .

Merki í sólskjálftamælingum er mun flóknara en það sem gefið er með jöfnu 6. Tímastrengurinn er þá á forminu:

$$v(t) = a_1 \cos(\omega_1 t - \delta_1) + a_2 \cos(\omega_2 t - \delta_2) + \dots \quad (7)$$



Mynd 9. Styrkróf fyrir einfalda hreintóna sveiflu sem lýst er með jöfnu 6. Hér er styrkur fall af tíðni. Tveir toppar koma fram. Myndin er fengin frá [10].



Mynd 10. Tíðniróf sólarinnar. Sterkustu sveiflurnar eru svokallaðar 5 mínútna sveiflur með tíðnina $\nu = 3.300 \mu\text{Hz}$. Myndin er fengin frá [9].

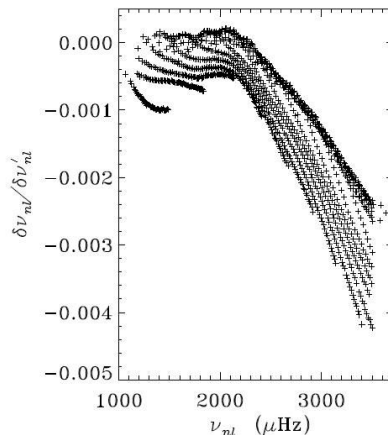
þar sem fjöldi liða segir til um fjölda sveifluháttá.

Róf fyrir bylgjur sólar má sjá á mynd 10. Það fékkst frá Doppler hraðamælingum með BiSON netinu yfir fjögurra mánaða tímabil. Sterkustu bylgjur sólar hafa tíðni um $3.300 \mu\text{Hz}$ sem samsvarar horn-tíðni $\omega = 2\pi\nu = 0,021 \text{ s}^{-1}$ og lotu $L = 1/\nu = 5$ mínútur. Í sól hafa fundist p sveifluhættir frá $l = 0$ upp í $l = 1.500$. Einnig hefur f sveifluháttur fundist með hátt l . Enn hafa ekki fundist g sveifluhættir í sólinni eins og áður hefur komið fram enda er styrkur þeirra mjög lítil á yfirborðinu.

Með eigintíðnir að vopni eru vísindamönnum ýmsar leiðir færar. Innri eiginleikar sólar eru tengdir eigintíðnum með flóknum heildum. Með hjálp ofurtölva er hægt að leysa þessi heildi tölulega. Þessi aðferð kallast umsnúningur (e. *inversion*) en ekki verður greint frá smáatriðum umsnúnings í þessari grein. Lesendum er bent á [12] og [13] til frekari fróðleiks.

6. Helstu niðurstöður og samanburður við líkön

Hér verða nokkrar niðurstöður úr sólskjálftamælingum bornar saman við sólarlíkanið sem fjallað var um í kafla 2. Ef skoðað er hvernig tíðniróf sólar samsvarar útreiknaðri tíðni samkvæmt sólarlíkani þá passar rófið vel við líkanið fyrir lága tíðni en áberandi frá-



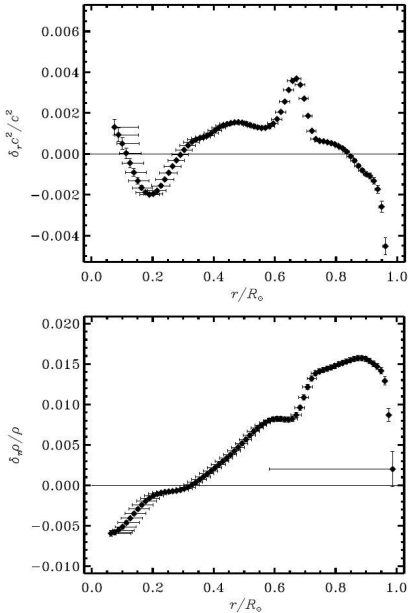
Mynd 11. Hlutfallslegur tíðnimunur á mældum niðurstöðum og sólarlíkani. Frávik verður áberandi með vaxandi tíðni. Myndin er fengin frá [9].

vik koma fram þegar tíðnin er komin yfir $2.000 \mu\text{Hz}$. Á mynd 11 má sjá hlutfallslegan tíðnimun sem fall af tíðni milli mælinga og líkans en mælingarnar voru gerðar af BiSON [9]. Ekki er ljóst hvað veldur þessum mun.

Á mynd 12 má annars vegar sjá hlutfallslegan mun á hljóðhraðnum í efninu og hins vegar mun á þéttleika innan sólarinnar milli mælinga og sólarlíkana. Þetta eru niðurstöður frá árinu 1996 [5]. Talið er að toppurinn á hljóðhraðagrafinu við $r/R_\odot \approx 0,65$ sé vegna áhrifa frá skilmörkum iðuhvolfs og geislunarhvolfs [10]. Sömu sögu má segja um áhrif frá kjarnanum við $r/R_\odot \approx 0,2$. Merkilegt er þó hversu vel sólarlíkónin passa við niðurstöður úr sólskjálftarannsóknunum.

Á mynd 13 sést snúningshraði efnis í sólinni sem fall af rás fyrir ákveðnar breiddargráður. Niðurstöðurnar eru frá árinu 1998 eftir greiningu á gögnum úr 144 daga mælingu frá MDI tækinu á SOHO [17]. Brotalínan sýnir hvar geislunarholfur byrjar. Athyglisvert er að sjá muninn milli geislunarhvolfs og iðuhvolfs. Innan iðuhvolfsins er snúningshraðinn mjög líkur því sem sést á yfirborðinu. Hins vegar er snúningshraðinn í geislunarhvolfinu næstum óháður breiddargráðu. Litlar sem engar upplýsingar eru um snúningshraðann fyrir innan $r/R = 0,5$. Óvissa mælinga er það mikil að enn er lítið hægt að segja um snúningshraðann á því svæði.

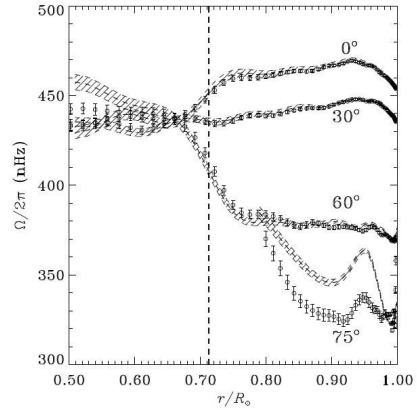
Hægt er að meta aldur sólar út frá niðurstöðum sólskjálftarannsókna [6]. Í innri lögum sólar hefur efnasamsetningin áhrif á hegðun hljóðbylgja. Með rannsóknum á þeim sveifluháttum sem ná innanlega í sólina hafa vísindamenn áætlað aldur sólarinnar. Gert



Mynd 12. Samanburður mælinga við sólarlíkón sem fall af radius, annars vegar fyrir hljóðhraða (efri mynd) og hins vegar fyrir þéttleika í sólinni (neðri mynd). Myndin er fengin frá [10].

er ráð fyrir ákveðnu hlutfalli milli vetnis og helíns við myndun sólkerfisins en hlutfallið er sífellt að breytast. Með rannsóknum á efnasamsetningu í dag fæst mat á aldurrinn. Niðurstaðan er $4,57 \pm 0,11$ Gár [6]. Það kemur heim og saman við niðurstöður úr aldursgreiningu á loftsteinum sem er um 4,57 Gár en loftsteinarnir eru taldir hafa myndast við myndun sólkerfisins [3].

Á síðasta áratug síðustu aldar var staðalsólarlíkan-ið gagnrýnt mikið. Ástæðan var að mældur fjöldi fiseinda frá sól var einungis um þriðjungur þess fjölda sem líkón gerðu ráð fyrir. Menn fóru því að endurskoða sólarlíkónin. Hitastigið í kjarna sólarinnar þyrfti að vera um 3% lægra en líkónin gerðu ráð fyrir [9]. Það myndi samsvara álíka breytingu á hljóðhraðanum en samkvæmt mynd 12 gefa sólskjálftamælingar ekki svigrúm til þess [4]. Eftir fjölda rannsókna komust vísindamenn að þeirri niðurstöðu að þetta ósamræmi ætti frekar að rekja til kenninga öreindafræðinnar um eiginleika fiseindarinnar. Með mælingum frá *Sudbury Neutrino Observatory* (SNO) í Kanada og *Super-Kamiokande* í Japan um aldamótin kom svo í ljós að fiseindir ganga í gegnum hamskipti í vissum skilningi. Til eru þrjár tegundir fiseinda, raffiseindir, μ -fiseindir og τ -fiseindir. Þegar fiseindirnar frá sölu koma til jarðar hefur hluti þeirra geng-



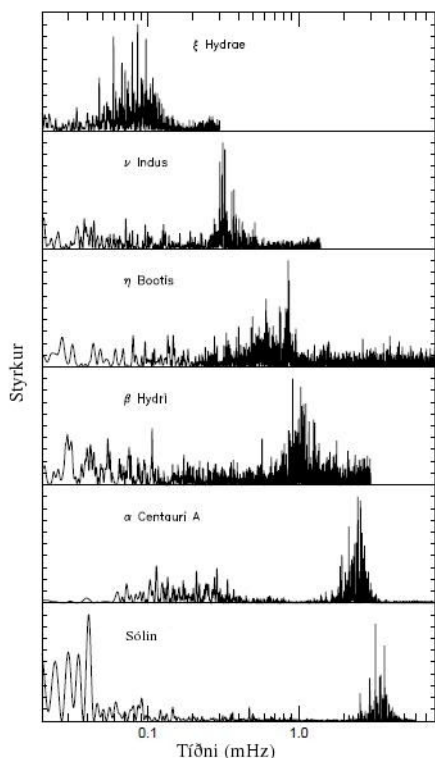
Mynd 13. Tíðni í snúningi sólarinnar, mælt í nHz, fyrir fjórar breiddargráður. Í iðuhvolfinu er snúningshraðinn háður breiddargráðu en í geislunarhvolfinu er snúningshraðinn ávallt sá sami. Hér birtast tvennar niðurstöður fyrir hverja breiddargráðu, hringir og brotalínur, sem fengnar eru með mismunandi aðferðum við umsnúning. Myndin er frá [9].

ið í gegnum hamskipti á leiðinni og skipt um tegund. Vegna þessa mældist fjöldinn minni en ella. Með þetta í huga var hægt að hanna fiseindasjónauka sem tóku tillit til hamskipta þeirra. Með nýjum mælingum komst á samræmi milli fjölda fiseinda sem greindust á jörðu og því sem sólarlíkón höfðu spáð fyrir um. Þessi niðurstaða festi sólarlíkónin betur í sessi.

7. Skjálftar í öðrum sólstjörnum

Rannsóknir á skjálftum í öðrum stjörnum eru erfiðar vegna fjarlægðar þeirra. Breytingar á yfirborði stjarnanna vegna sveifluháttanna eru mjög litlar og því illgreinanlegar. Þó hefur vísindamönnum tekist að greina nokkra p sveifluhætti í öðrum stjörnum [16].

Fyrsta stjarnan sem var greind með þessum hætti var η Boötis árið 1995 [14]. Tíðniróf má sjá á mynd 14 en sterkasti sveifluhátturinn er með tíðni um $850 \mu\text{Hz}$ sem er í samræmi við líkón. Þessar niðurstöður eru þó umdeildar þar sem aðrir vísindamenn fundu ekki þessar bylgjur árið 1997 [7]. Á mynd 14 má einnig sjá róf frá nokkrum öðrum stjörnum. Styrkleikaskallinn er handahófskenndur og stjörnunum raðað eftir tíðni sterkustu toppanna. Af þessum stjörnum má nefna β Hydri sem er í 24 ljósára fjarlægð með svipað yfirborðshitastig og sólin þó að ljósafið sé um 3,5 falt meira. Þar er skýr toppur við um 1 mHz sem kemur heim og saman við líkón. Áhugavert er að skoða stjörnuna α Centauri A sem er svipuð sól og er í um 4,4 ljósára fjarlægð en eigin sveiflur hennar eru með svipaða tíðni og sólin.



Mynd 14. Tíðniróf nokkurra stjarna, tekið saman af Kjeldsen. Styrkleikaskalin er handahófskenndur. Stjörnunum er raðað eftir tíðni sterkustu toppanna. Myndin er fengin og uppfærð frá [10].

Það getur tekið mörg ár að ná rófi sem þessu, sérstaklega fyrir rauða risa þar sem lota bylgjanna er vikur eða mánuðir. Rannsóknir af þessu tagi gefa mjög verðmætar upplýsingar um innri gerð stjarna og eru þess vegna ákveðin prófraun á þær kenningar sem eru uppi um þróun og uppbyggingu stjarna. Þar sem aðrar stjörnur birtist einungis sem punktuppsprettur ljóss verða gögnin frá þeim þó aldrei jafnnákvæm og þau sem við fáum frá sólinni okkar.

8. Lokaorð

Jöfnur fyrir þrýsting, massa, hitastig og ljósafl á mismunandi stöðum í sólinni lýsa hinu svokallaða staðalsólarlíkani. Rannsóknir á sólskjálftum veita okkur innsýn í innri gerð sólarinnar og eru að miklu leyti óháðar þeim athugunum sem gefa okkur sólarlíkөн nútímans og eru því ágætis prófsteinn á þau. Niðurstöður sólskjálftarannsókna falla vel að þessum líkönum. Nú hefur SDO nýlega hafið mælingar á sól-

skjálftum sem munu vonandi gefa okkur betri innsýn í innri gerð þessarar gríðarstóru rafgaskúlu.

Gunnlaugi Björnssyni eru færðar þakkir fyrir ítarlegan yfirllestur og gagnlegar ábendingar. Verkefni þetta er styrkt af Rannsóknasjóði Háskóla Íslands.

Heimildir

- [1] Appourchaux, T., et al. 2010, A&ARv, 18, 197.
- [2] Asplund, M., et al. 2009, ARA&A, 47, 481.
- [3] Bahcall, J. N. og Pinsonneault, M. H. 1995, RvMP, 67, 781.
- [4] Bahcall, J. N., et al. 1997, PhRvL, 78, 171.
- [5] Basu, S., et al. 1996, BASI, 24, 147.
- [6] Bonanno, A., et al. 2002, A&A, 390, 1115.
- [7] Brown, T. M., et al. 1997, ApJ, 475, 322.
- [8] Carroll, B. W. og Ostlie, D. A. *An Introduction to Modern Astrophysics*. San Francisco 2007.
- [9] Christensen-Dalsgaard, J. 2002, RvMP, 74, 1073.
- [10] Christensen-Dalsgaard, J. 2003, Lecture Notes on Stellar Oscillations.
- [11] Gough, D. O. 1984, RSPTA, 313, 27.
- [12] Gough, D. O. og Thompson, M. J. 1991, í bókinni *Solar Interior and Atmosphere*. Ritstj. Cox, A. N., Livingston, W. C. og Matthews, M. S., Arizona, 519.
- [13] Gough, D. O. 1996, Proceedings of the VI IAC Winter School: The Structure of the Sun, 141.
- [14] Kjeldsen, H., et al. 1995, AJ, 109, 1313.
- [15] Leighton, R. B., et al. 1962, ApJ, 135, 474.
- [16] Matthews, J. M., et al. 2004, Nature, 430, 51.
- [17] Schou, J. 1998, Proceedings of the SOHO 6/GONG 98 Workshop: Structure and dynamics of the interior of the Sun and Sun-like stars, 341.

Summary: Solar oscillations consist of many eigenmodes with different frequencies and intensities. The oscillations appear as movements on the surface of the Sun. By examining the solar surface, scientists are able to analyze the eigenmodes using Fourier-transformation. By studying the observed eigenmodes, it is possible to know the inner structure of the sun. This article gives a short overview of the *Standard Solar Model* (SSM), discusses the properties of solar oscillations and how the measurements are carried out. A comparison between the SSM and the results from solar oscillation analysis is given. Finally, oscillations in other stars are discussed.

Um höfunda: Birgir Urbancic Ásgeirsson er MS-nemi í eðlisfræði við Universität Heidelberg. Páll Jakobsson er dósent í stjarnaeðlisfræði við Háskóla Íslands.

Raunvísindadeild Háskóla Íslands
Hjarðarhaga 2–6, 107 Reykjavík
bual@hi.is
pja@raunvis.hi.is
Móttakin: 6. september 2010