

Szegedi Tudományegyetem
Természettudományi és Informatikai Kar
Kísérleti Fizikai Tanszék

TDK Dolgozat

Pulzáló vörös óriás csillagok fénygörbéjének vizsgálata a Kepler úrtávcső
adatsorai alapján

Készítette: Bódi Attila
Csillagász MSc szakos hallgató

Témavezető:
Dr. Szatmáry Károly
egyetemi docens
SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék

Szeged
2012

Tartalomjegyzék

Bevezető	2
1. Kepler	6
2. Fénygörbék előkészítése	8
3. Alkalmazott programok	10
3.1. Period04	10
3.2. WinWWZ	11
3.2.1. Wavelet térkép különböző paramétereinek hatásai	12
4. Osztályozás	15
4.1. Hosszú periódusú változók	15
4.1.1. κ mechanizmus	17
4.2. Közepes periódusú változók	19
4.2.1. Csillagaktivitás és foltosság	22
4.2.2. Kettőscsillagok	22
4.3. Rövid periódusú változók	24
4.3.1. Nap-típusú oszcillációk	26
4.3.2. Doppler erősítés (boosting)	28
Összefoglaló	30
Köszönetnyilvánítás	32
Irodalomjegyzék	33
Függelék	36

Bevezető

A távcsövek megszületése előtt az emberek nem tudták, hogy a csillagok mutathatnak változásokat. Az első felfedezés a 17. században történt. Mivel nem találtak magyarázatot, hogy az α Ceti csillagnak miért változik időben a fényessége, ezért elnevezték mirának, mely csodálatost jelent. Ezzel elkezdődött a csillagok változásáért felelős okok keresése.

Az első megfigyelések során a távcső detektoraként a szem szolgált. Mivel a halványabb csillagokat nem látták és a kis amplitúdójú változásokat nem észlelték, ezért csak kevés csillagról tudták, hogy annak fényessége valóban nem állandó.

A múlt századig ezen változásokat nem tudták magyarázni, nem ismerték a csillagok belső felépítését, fizikai működésüket. A spektroszkópia létrejöttével és az egyre pontosabb megfigyeléseknek köszönhetően megszülettek az első csillagmodellek, melyek magyarázatot adtak a különböző változások okaira.

Változócsillagnak nevezünk minden olyan csillagot, melynek fényessége időben nem állandó. Azonban azokat is változónak nevezzük, melyek színképében történik változás. Összeségében a csillag állapotjelzőiben emberi időskálán változás történik (Kiss - Mizser - Csizmadia, 2009; Cooper - Walker, 1994).

A csillagok fejlődésének útvonalát a Hertzsprung–Russell diagramon szokták ábrázolni (1. ábra). A vízszintes tengelyen az effektív hőmérséklet logaritmusát (balról jobbra csökkenve) vagy a színképosztályt, a függőlegesen a luminozitást vagy az abszolút fényességet szokták ábrázolni.

A diagramot metsző, a bal felső sarokból induló, a jobb alsóban végződő szakaszt fősorozatnak nevezik. Ezen állapotban levő csillagok energiatermelése a H-He fúzióval történik, itt töltik el az életük legnagyobb részét. A pulzáló csillagok jelentős része a fősorozatot meredeken metsző instabilitási sávban helyezkedik el. Ezek a klasszikus pulzátorok. Ezen kívül is vannak olyan tartományok a HR diagramon, ahol a csillagok pulzálhatnak (ld. 1.ábra).

A változócsillagokat az alábbi öt kategóriába sorolhatjuk:

- pulzáló változócsillagok
- fedési kettőscsillagok
- rotációs (foltos) csillagok

- eruptív változók
- kataklizmikus változócsillagok

A különféle változócsillagokról bővebb információt a Szatmáry Károly által készített weboldalon találhatunk. <http://astro.u-szeged.hu/ismeret/valtozok/valtozok.htm>

A TDK dolgozatomban szereplő csillagok a pulzáló változók kategóriájába tartozó mira és félszabályos változók.

A pulzáció létrejöttéhez egy egyensúlyi helyzet és egy gerjesztő folyamat szükséges. Ezen pulzációknak kétféle módusa lehet attól függően, hogy a csillag rétegei radiális irányban tágulnak és húzódnak össze (radiális pulzáció) vagy oldal irányú elmozdulás is történik (nem-radiális pulzáció).

- **Mirák**

A mira típusú változók magjában korábban a H-He fúzió megszűnt és a fősorozatról fejlődtek az aszimptotikus óriáságra. A 2,5 magnitúdónál nagyobb amplitúdójú vörös óriásokat és szuperóriásokat nevezük miráknak. Nincs éles határ a mirák, a kisebb amplitúdójú félszabályos és a szabálytalan változók között. Jellemzően 4-5 magnitúdó az amplitúdójuk, de előfordul nagyobb, akár 11^m -s is (χ Cygni). Periódusuk széles határok között változik, 90 naptól akár ezer napig is terjedhet. Jellemzően 200-300 nap körüli.

Színképük az M osztályba sorolható, de előfordul S,N,R vagy C is. Emisszió nélküli M színképosztályú csillagok között találhatóak félszabályos, szabálytalan, valamint 210-220 nap körüli periódusú mirák is. Általánosan kijelenthető, hogy a hűvösebb csillagok periódusa hosszabb.

A mirák fényváltozása általában szabályos, a fénygörbe menete ciklusról ciklusra nagyon hasonló. A maximum értéke és a fénygörbe lefutása viszont ciklusonként eltérő lehet, valamint a periódus hossza is változhat (csökken vagy nő, sok esetben véletlenszerűen ingadozik). Vannak csillagok, melyek esetében a periódus akár 100 napot is csökkent néhány 10, esetleg 100 év alatt. Ilyen a Szatmáry Károly által vizsgált T UMi is, melynek 1980-as években mért 315 nap körüli periódusa 2002-re 220 napra csökkent (Szatmáry, Kiss, Bebesi, 2003).

A mirák tömege 1-2 naptömeg körüli. Pulzációjuk során nagymértékben változhat az átmérőjük, például a Mira Ceti esetében ez 18 százalékot jelent. Ennél érdekesebb az a

jelenség, hogy még a vizuális fénygörbe több magnitúdót változik, addig a bolometrikus (teljes hullámhossz tartományra integrált) fényesség csupán egy magnitúdót. A jelenséget a külső légkörben előforduló titán-oxid okozza. Fényességminimum esetén a csillag sugara a legnagyobb, ekkor lehül és a keletkező részecskék (pl. TiO) a fény nagy részét abszorbeálják. Maximumban a sugár a minimális, a csillag felmelegszik és a magas hőmérséklet miatt a külső légkör molekulái disszociálnak.

A vörös óriások, szuperóriások, de különösképp a mirák körül kiterjedt gáz és porfelhő található, mely a csillag pulzációja során fellépő jelentős anyagvesztés hoz létre ($2 \cdot 10^{-6} - 10^{-5}$ naptömeg/év).

- **Félszabályos változók**

Periódusuk 20-2000 nap közötti, fénygörbékük alakja eléggé szabálytalan, amplitúdója néhány század magnitúdótól néhány magnitúdóig terjed. Négy alcsoportra bonthatók, melyekre az SR (semiregular = félig szabályos) jelölés utal.

Az *SRa* típus képviselői késői (M,C,S) színképtípusúak, mint az *SRb* és *SRc* tagjai. Amplitúdójuk 1-2 magnitúdó. Periódusuk 35-1200 nap közötti. A fénygörbe alakja, a mirákhoz hasonlóan, ciklusról ciklusra változik.

Az *SRb* típusúak amplitúdója elérheti az 1-2 magnitúdót. Periódusuk 20-2300 nap közötti. Kisebb amplitúdóval és általában több periódussal pulzálnak, felváltva mutatnak periodicitást és lassú, szabálytalan fényváltozást, esetleg fényállandósulást.

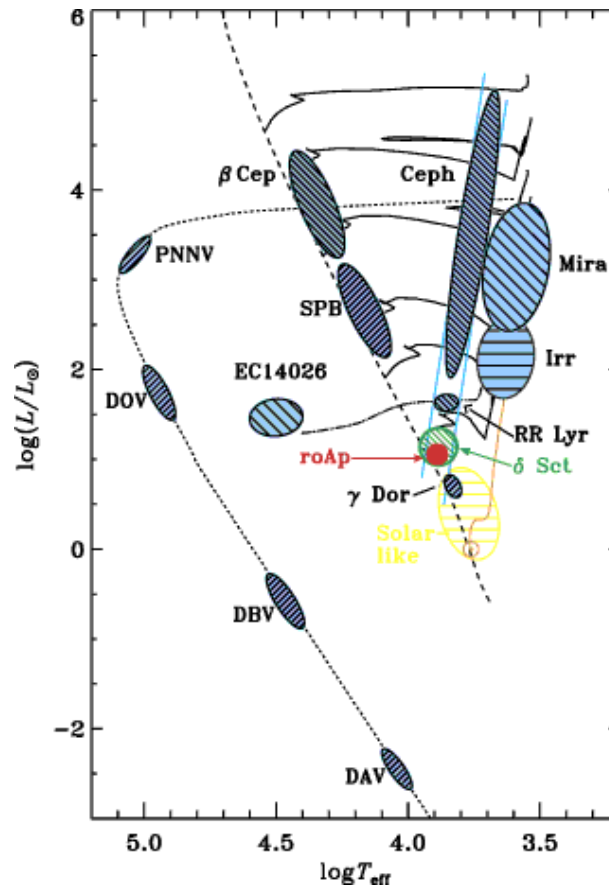
Az *SRc* típusú szuperóriások amplitúdója jellemzően 1 magnitúdó. Periódusuk 30 naptól kezdve néhány ezer nap is lehet. Több periódus egyidejű megjelenése jellemző.

Az *SRd* változók F,G vagy K színképosztályú óriások vagy szuperóriások, előfordul, hogy emissziós vonalakat mutatnak. A fényváltozás amplitúdója 0,1-4 magnitúdó közötti, periódusuk 30-1100 nap.

- **Szabálytalan változók**

A szabálytalan vörös óriások és szuperóriások jele L. Fényváltozásukat nem jellemzi egyértelmű periodicitás, ilyen csak nagyon ritka esetben észlelhető. Előfordul, hogy nem kielégítően vizsgált félszabályos és más típusú csillagokat is ide sorolnak. Amplitúdójuk 1 magnitúdó körüli. Két alosztálya van. A K,M,C és S színképosztályú óriá-

sokat *Lb* és a szabálytalan szuperóriásokat *Lc*-vel jelöljük. Ezeket a kis amplitúdójuk miatt elég nehéz vizsgálni.



1. ábra. Pulzáló változócsillagok a Hertzsprung–Russell diagramon (Christensen-Dalsgaard, 2003).

A TDK dolgozatomhoz használt csillagok fotometriáját a *Kepler* űrtávcső végezte. Az általa felvett fénygörbék több nagyságrenddel pontosabbak az eddig a Föld felszínről készíttetekhez képest. Ezen fénygörbéken olyan változásokat fedezhetünk fel, melyek eddig nem voltak kimutathatóak.

A dolgozatban a vörös óriás csillagok Fourier- és wavelet-analízését végeztem el. Ezeket a fénygörbéjükre jellemző adatok alapján több osztályba soroltam. Mind a 219 csillag nem kerül részletes bemutatásra, csak esettanulmányok kerültek a dolgozatba, melyek áttekintést nyújtanak a vörös óriás változócsillagok rendkívül sokféle fényváltozásának jellemzéséhez.

1. Kepler

Az exobolygók keresésére 2009. március 7-én bocsájtották fel a *Kepler* űrtávcsövet. Fő célja a lakhatósági zónában keringő, Föld típusú fedési exobolygók kimutatása. Ezen cél megvalósításához legalább 100 ezer csillag folyamatos megfigyelése szükséges, éveken át tartó, extrém pontos fényességmérés mellett.

Ezen kritériumoknak megfelelő rendszer egy 1,4 méter átmérőjű, f/1-es nyílászórányú, 95 cm szabad apertúrájú Schmidt-rendszer (Benkő - Szabó, 2010).

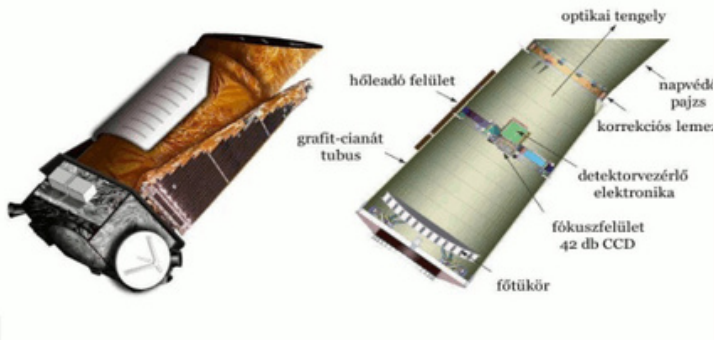
A távcső a görbült fókuszban elhelyezett, 42 db CCD chipre képezi le a képet (3. ábra), melynek felbontása 2200x1024 pixel. A megfigyelt égterület 105 négyzetfok. Az észleléseket a 430-840 nm közötti hullámhossztartományban végzik. Az optikai útban semmilyen mozgó alkatrészt, színszűrőt, detektort, nem helyeztek el. A távcső folyamatosan a Hattyú (Cygnus) és a Lant (Lyra) csillagképek irányába néz. A folyamatos megfigyelést a 372,5 napos keringési idejű, Nap körüli, úgynevezett Föld-követő pálya biztosítja.

A programot 3,5 évre tervezték, de ezt 2012 tavaszán további 4 évvel meghosszabították. A folyamatos megfigyelés érdekében a távcső körülbelül negyed évente 90 fokkal elfordul, annak érdekében, hogy a napelemek mindig a Nap irányába nézzenek, illetve a hűtőrész, a Nappal ellentétes oldalon legyen. A célpontok 9-16 magnitúdós tartományba esnek, kivételes esetben lehetőség van 7 magnitúdós objektumok fotometriájára, elvileg akár a 20 magnitúdós vagy annál halványabb csillagok is vizsgálhatóak. A nagyméretű CCD-nek köszönhetően nagy a csillagok szögmérete, ezért rengeteg foton gyűjthető, ami javítja a jel/zaj viszonyt. A telítődés elkerülése érdekében 6 másodpercenként olvassák ki az adatokat. A képek egy része 1 perces, a többség 30 perces expozíciós idejű felvételnként összegződik. Az adatok letöltése és a parancsok, valamint az új objektumok feltöltése havonta történik. Az összes adat tárolását nem tudják megoldani, ezért csak a kijelölt objektumok pixelei maradnak meg, a többi törlődik.

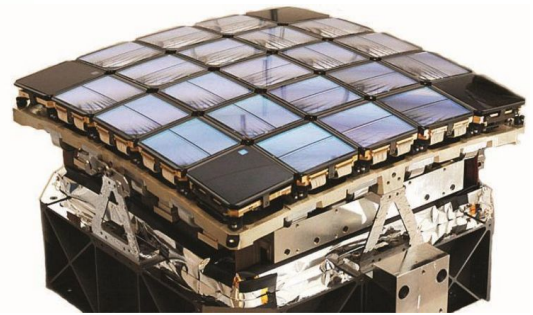
A *Kepler* három különböző kategóriába eső célpontot észlel:

- bolygókeresésre használt,
- asztroszeizmológiai,
- Guest Observer ("vendégészlelő") célpontok.

A első programban 150 000, főként F-K színképtípusú fősorozati csillagot figyelnek meg. Fő cél a más csillagok körül, a lakhatósági zónában keringő, Föld típusú bolygók kimutatása.



2. ábra. A *Kepler* űrtávcső felépítése.



3. ábra. A *Kepler* űrtávcső CCD kamerája.

Ezen célpontokat a küldetés teljes ideje alatt folyamatosan vizsgálják.

Az asztroszeizmológiai csoportba mintegy 4000 csillag megfigyelése kerül. A vizsgálatok kettős célt szolgálnak, az exobolygók gazdacsillagai fizikai tulajdonságainak pontosítását és a pulzáló változócsillagok jobb megértését. Ezen adatok kiértékelésére jött létre a nemzetközi *Kepler* Asztroszeizmológiai Tudományos Konzorcium (KASC), melyen belül 13 munkacsoportot hoztak létre, ezek további alcsoportokra oszlanak a földi támogatás, adatfeldolgozás, modellezés szerint. A mirák és félszabályos változók vizsgálatait Kiss László (MTA KTM CsKI), a cefeidákét Szabó Róbert (MTA KTM CsKI) vezeti. A célpontok kijelölésében, az adatfeldolgozásban, a földi támogatásban a magyar kutatók is részt vesznek (Benkő - Szabó, 2010).

A vendégészlelő kategóriába mintegy 3000 objektum észlelésére van lehetőség. Ide bárki adhat be pályázatot egyéb (aktív galaxismagok, nóvák, törpenóvák), a *Kepler* látómezejébe eső, asztrofizikai objektum fotometriai vizsgálatára.

2. Fénygörbék előkészítése

A KASC adatbázisból letölthető fájlokban a csillagok mért fluxusa, a korrigált fluxus és ezek hibája található. Nekünk az adatok magnitúdóban kellene, így át kell számolni a mért fluxust, mely az alábbi képlet alapján történik:

$$m = -2,5 \log F + C \quad (1)$$

ahol a m a magnitúdó érték, F a mért fluxus és C egy konstans, melyet 22-nek választottunk.

A *Kepler* folyamatos megfigyelései ellenére is vannak kisebb-nagyobb űrök, hibák a fénygörbékben.

A távcső negyedévente elfordul, ezért a csillagok ennyi időnként másik CCD chipre esnek. Megpróbálták ezen chipeket teljesen azonosra felépíteni, de így is van eltérés az érzékenységükben. Emiatt a különböző negyedévekben (quarterekben) felvett fénygörbe szakaszok között ugrás tapasztalható. Ezt a hibát a feldolgozás előtt javítani kell. Az elfordulás ideje alatt nem történik mérés, ami néhány napnyi adatkiesést is jelent.

Előfordulnak kiugró pontok, elcsúszások, ezeket a negyedéven belüli hibákat különböző programokkal lehet kijavítani.

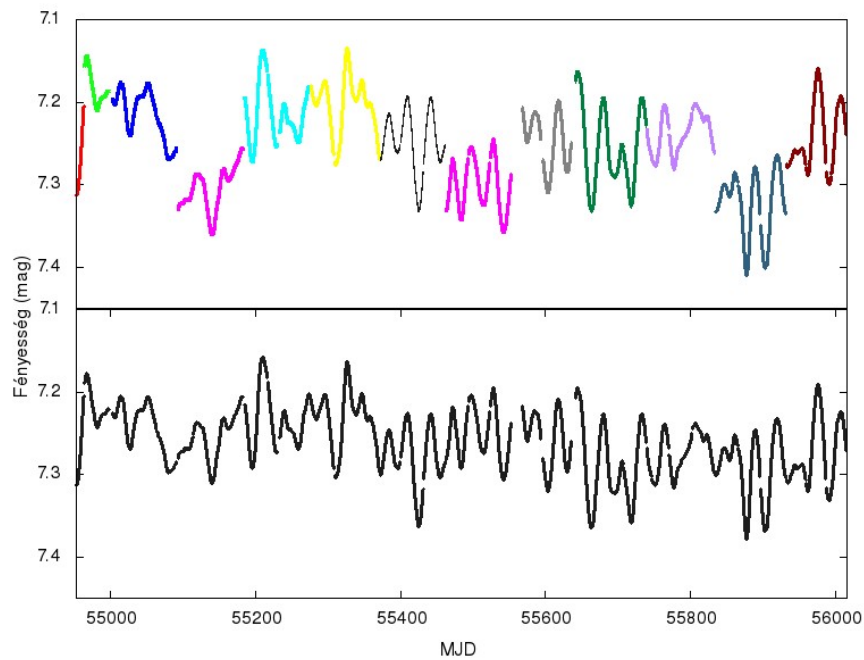
A távcső váratlan esemény következtében biztonsági üzemmódba kapcsolhat. Ilyen esemény lehet egy kozmikus sugár becsapódása vagy egy hibás parancs kiadása. Az ilyen fajta hibát nem lehet kiküszöbölni, ezek a fénygörbékben eltérő hosszúságú űröket hagynak.

Nekem a magnitúdó skálára való átszámolás után össze kellett illesztenem az egymáshoz képest eltérő pozícióban levő quartereket. Erre két módszert lehet alkalmazni. Az egyiknél a quarterek különböző hosszúságú szakaszaira egyenest illesztünk. A szakaszokat úgy toljuk el egymáshoz képest, hogy az egyenesek pontosan a quarterek közötti űr felénél metszék egymást. Ez a módszer a több 10 napos vagy annál hosszabb periódusú változásokat mutató csillagok esetében működik jól. Másik módszer, amikor a quarterek átlagát vesszük különböző hosszúságú szakaszokon. Az ebből adódó párhuzamos egyeneseket toljuk el egymáshoz. Ezen módszer a nagyon rövid (napos) periódusokat mutató csillagok esetében működik megfelelően. A 4. ábrán a KIC 5722894 (Kepler Input Catalog) katalógusjelű csillag fénygörbéje látható az összetolás előtti és utáni állapotban (Csányi, 2012; Csányi et al., 2012; Szatmáry et al., 2012).

A Q0 egy 10 nap hosszú próba üzem volt, ezért a Q0 és Q1 is ugyanarra a chipre készült, így itt nem kell az összetolást elvégezni egyik csillag esetében sem.

Sajnos a Q7 és a Q8 között a távcső biztonsági üzemmódba kapcsolt, ami miatt több, mint 2 hét hiányzik az összes fénygörbéből.

A távcső működése során 2 CCD chip elromlott, ezért ha a csillag valamelyik negyedében ezen chippek valamelyikére esik, akkor nem történik mérés. Ilyen csillagból 79 darab volt, melyeket nem tudtunk megfelelő módon összetolni.



4. ábra. A KIC 5722894 fénygörbéje összetolás előtt (fent) és után (lent).

3. Alkalmazott programok

3.1. Period04

Minden periódikus jel felbontható különböző amplitúdójú szinuszos és koszinuszos jelek összegére.

Ez matematikailag az alábbi sor összegeként állítható elő:

$$\sum A_i \cdot \sin(2\pi(\Omega_i t + \Phi_i)) \quad (2)$$

ahol A_i , az i -edik komponens amplitúdója

Ω_i , az i -edik komponens frekvenciája

és Φ_i , az i -edik komponens fázisa.

A Period04 programcsomag a Period98-nak egy kiterjesztett változata, melyet idősor analízisre terveztek (Lenz - Breger, 2005).

A Period04 program a diszkrét Fourier transzformációt alkalmazva bontja fel a jelet periódikus komponensekre. Azért van erre az eljárásra szükség, mivel a csillagászatban alkalmazott adatsorok nem folytonosak. Általában egyenlő időközzel mintavételezettek, de sok esetben nagyobb űrök is elfordulnak bennük (Szatmáry, 1994). A programban elkészíthető az adott adatsor spektrál ablaka, melyből megállapítható, hogy az adatsor hossza és a mintavételezés milyen frekvencia mintázatot okoz (a Dirac-delta helyett minden frekvencia komponensnél). Segít a hamis (alias) csúcsok azonosításában.

A Period04 három fő részből épül fel.

Első lépésként a "Fourier modulban" készíthetjük el a teljes adatsor időbeli frekvencia spektrumát. Itt beállíthatunk egy maximális frekvencia értéket, mely megadja a spektrum határát. Alapértelmezetten a Nyquist frekvencia érhető el, melyet ha átlépünk, akkor megsértenénk a mintavételezési tételt. Az általam vizsgált csillagok esetében ennél az értéknél sokkal kisebb frekvenciáig volt szükséges a Fourier-analízis elvégzése.

Az előbbi modulban kapott legnagyobb amplitúdójú komponens frekvencia és amplitúdó értékét a "Fit modulban" tudjuk pontosítani, ezen felül meghatározhatjuk a fázisát is. Ezen adatok a "calculate" gomb megnyomásával érhetőek el. Ekkor megtörténik az adatsorból ezen paraméterekkel rendelkező hullám levonása. Ezt nevezzük fehérítésnek.

Az értékek pontosságát tovább növelhetjük a legkisebb négyzetek módszerével történő illesztéssel. Ez nem került alkalmazásra a dolgozatom elkészítése során, mivel nagyon alacsony

frekvenciájú komponens megjelenése esetén a program hibás értékeket jeleníthet meg (Bódi, 2012). A "Time string modulban" megtekinthetjük a fénygörbét és a rá illesztett hullámot is.

Második lépésként visszatérünk a "Fourier modulba", ahol ismét elkészítünk egy időbeli frekvencia spektrumot. Most a "Residual at original" kapcsolóval beállítjuk, hogy az előbb meghatározott hullám levonásával kapott maradék fénygörbén történjen a Fourier-analízis. Az így kapott értékeket ismét a "Fit modulban" pontosíthatjuk, a fázist meghatározhatjuk. Ezen paraméterű hullám is levonásra kerül az adatsorból, mellyel kapjuk a második reziduált. Ekkor két frekvenciával fehérítettük le az adatsorunkat.

A fehérítések számát addig szabad végezni, míg az időbeli frekvencia spektrumban nem jelennek meg a nagyon alacsony amplitúdójú komponensek a teljes fénygörbe amplitúdójához képest. Ezek már hamis csúcsok lesznek, melyeknek nincs köze a csillagban lezajló változásokhoz, a szakzsargonban ezeket "fűnek" nevezik.

A megfelelő számú fehérítési lépés után a frekvencia, amplitúdó és fázis értékeket, a kapott Fourier spektrumokat és a spektrál ablakot kimenthetjük különböző formátumokban.

Nagyszámú csillag vizsgálata esetén a rengeteg fehérítés elkészítése és az adatok kimentése nagyon sok időbe telhet, ezért a programhoz linux rendszer alatt batch szkriptet is készíthetünk. Így nem kell egyesével minden lépést nekünk végezni, mert az elkészült szkript a felhasználó helyett elvégzi a lépéseket, az általunk megadott paraméterekkel.

3.2. WinWWZ

A Fourier-analízis csak az adatsorban megjelenő frekvencia komponenseket adja meg. Ezek, főként a sztochasztikus folyamatok által gerjesztett pulzáló csillagok esetén, időben nem állandóak. A wavelet-analízis a frekvenciabeli felbontás mellett időbeli felbontást is készít (Szatmáry, 1994).

A wavelet-analízis matematikailag a következő formula alapján történik:

$$W(f, \tau) = \sqrt{f} \int_{-\infty}^{\infty} m(t)g^*[f(t - \tau)] dt \quad (3)$$

ahol $m(t)$, az adatsor pontjai,
 f , a frekvencia,
 τ , az időeltolás,
és $g^*[f(t-\tau)]$, az analizáló wavelet.

Az analízis során egyszerre nem a teljes adatsor kerül vizsgálat alá, hanem egy ablakozási módszer történik. Az ablak szélessége arányos az éppen keresett periódus nagyságával. Ennek az ablaknak az eltolása történik τ időtartamokkal.

A programban a "c" paraméter beállításával szabályozhatjuk, hogy az időbeli vagy a frekvenciabeli felbontás legyen a jobb.

A folyamat egy wavelet térképet készít, melyen a kapott frekvencia-idő-amplitúdó hármass van ábrázolva. Ilyen módon minden, az adatsorban megjelenő frekvenciáról megmutatható, hogy időben hogyan változik az amplitúdója.

A WinWWZ az AAVSO munkatársai által írt, wavelet térképek készítésére alkalmas program. Futtatása csak Windows XP rendszerek alatt lehetséges, .NET keretrendszer mellett. Mivel linux rendszereken nem használható, ezért szkriptek írására sincs lehetőség, minden paramétert nekünk kell megadni minden vizsgálat esetében. Az elkészült wavelet térképek lementése sem lehetséges, csak az aktuális projektet tárolhatjuk el. A szükséges térképek a képernyő mentéssel tárolhatók el.

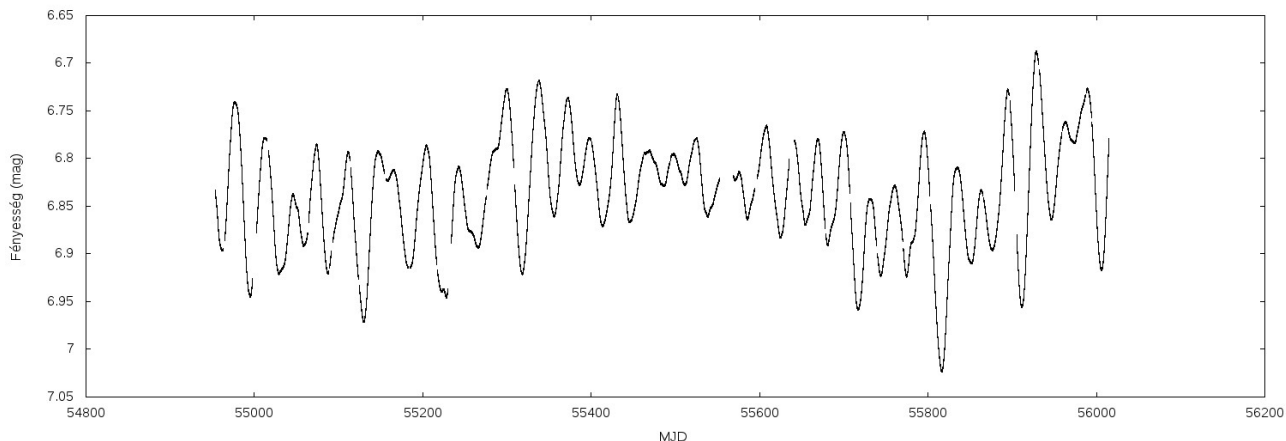
3.2.1. Wavelet térkép különböző paramétereinek hatásai

Wavelet térkép készítésekor több paramétert is manuálisan beállíthatunk. Megadható, hogy az adatsor milyen hosszú szakaszát, milyen frekvencia-tartományban vizsgáljuk. Ezen értékek változtatásával csak a vizsgálni kívánt területet jelölhetjük ki. Vannak olyan paraméterek, melyek hatással vannak a térkép alakjára, azon megjelenő információkra.

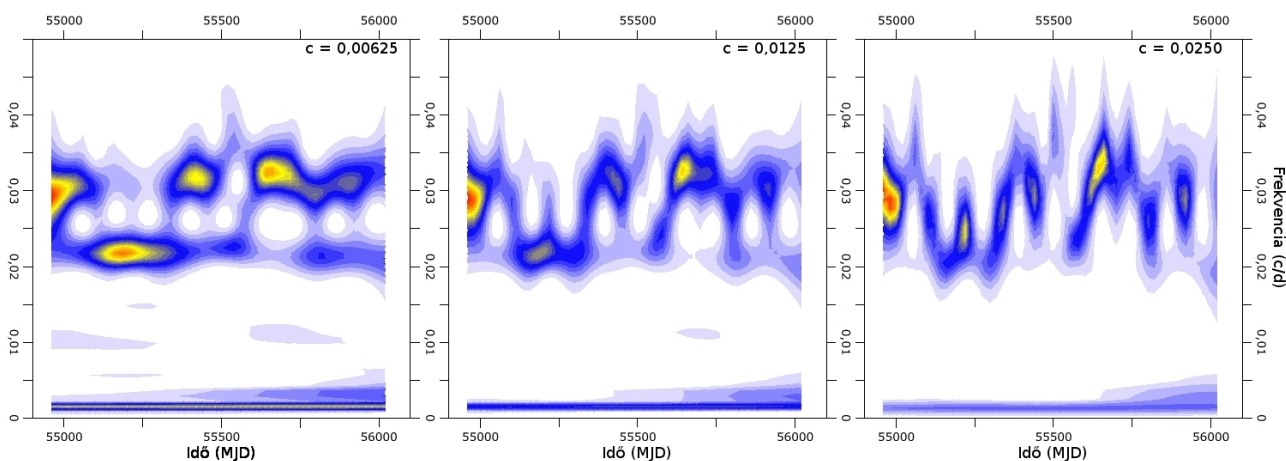
Az 6., 7. és 8. ábrán található wavelet térképek mindegyike a fénygörbe teljes időbeli hosszára, valamint frekvencia $0,5 c/d$ (ciklus/nap) értékéig készült el.

A "c" paraméter módosításával tudjuk beállítani, hogy a frekvenciabeli vagy az időbeli felbontás legyen a jobb. A kettő között fennáll egy határozatlansági reláció, hasonlóan a kvantummechanikában tapasztalhatóhoz. A programban alapértelmezettnek a $c = 0,0125$ érték van beállítva. A "c" paraméter különböző értékeinél elkészített wavelet térképek az 6. ábrán találhatóak.

Látható, hogy a kisebb frekvenciák esetében a frekvenciabeli, nagyobbak esetében az időbeli felbontás a jobb. Az alapértelmezett értéket növelve az időbeli, azt csökkentve a frekvenciabeli felbontás növekedése tapasztalható.



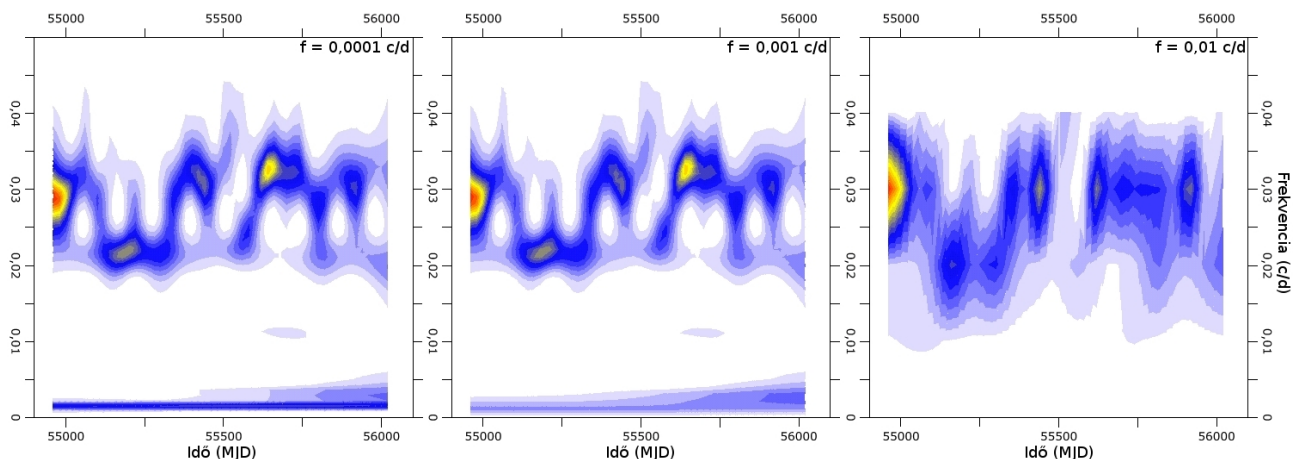
5. ábra. A KIC 2582664 jelű csillag fénygörbéje.



6. ábra. A "c" paraméter változtatása a KIC 2582664 esetében

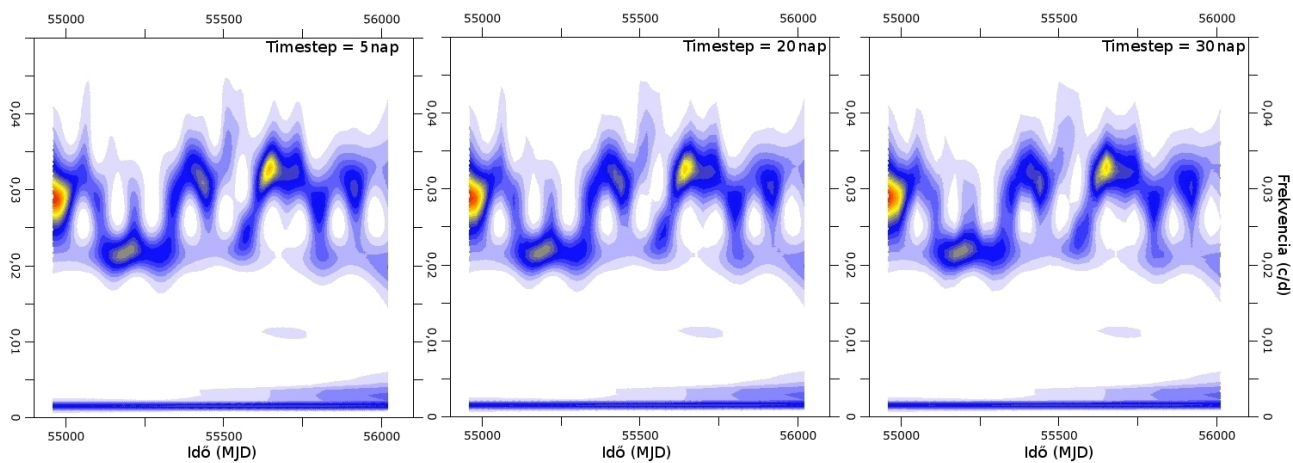
A 7. ábrán a frekvencia lépésköz változtatásának hatása látható a wavelet térképekre. A jobb oldali ábrán a lépésköz azonos nagyságrendű a maximális frekvencia értékkel, a kisebb frekvenciájú komponensek nem is jelennek meg a térképen, ezért az ilyen wavelet térkép felbontása túl kicsi ahhoz, hogy bármilyen információt is leolvashassunk róla.

A középső ábrához képest a bal oldali ábrán látható térkép felbontása nem javult jelentősen, miközben a frekvencia lépés egy nagyságrenddel nőtt. Ezért nem érdemes túl nagy frekvenciabeli felbontást választani, mert a lefutás ideje érzékelhetően megnő, de az eredményben nem látszik a javulás.



7. ábra. A frekvenciabeli lépésköz változtatása a KIC 2582664 esetében

A 8. ábrán az időbeli felbontás változtatásának hatása látható a wavelet térképre. A program alapértelmezettnek 20 napot jelöl meg, amit nem érdemes változtatni, mert a térképek között különbség nem látható. Az érték növekedésével csak a lefutási idő növekszik, az időbeli felbontás nem javul.



8. ábra. Az időbeli lépésköz változtatása a KIC 2582664 esetében

A látható okok miatt a wavelet térképeket a $c = 0,0125$, az $f = 0,01$ c/d és a timestep = 20 nap értékek mellett készítettem el.

4. Osztályozás

A csillagokat a fénygörbéjük alapján három osztályba soroltam. Az elsőbe (Hosszú periódusú változók) olyan csillagok kerültek, melyek periódusa több tíz naptól, több száz napig terjed. Ezen csoportba találhatóak a több magnitúdós változást mutatók is. A második csoportba (Közepes periódusú változók) a néhány tíz napos periódust mutató csillagok kerültek, melyek fényváltozásának amplitúdója maximum néhány tized magnitúdó. Itt már előfordulnak néhány század magnitúdó amplitúdójúak is. A harmadik csoportba (Rövid periódusú változók) a néhány napos, esetleg az alatti periódusokat mutató csillagok kerültek. Itt a legnagyobb amplitúdó mindössze néhány tized, a legkisebb pedig néhány ezred magnitúdó. A csillagok fénygörbéje mellett a spektrumok és a wavelet térképek is szerepelnek. A fénygörbék elemzése után felsorolom a sokféle fényváltozás lehetséges okait. A könnyebb áttekintés érdekében ezeket egy ábrán ábrázoltam. A wavelet térkép frekvencia tengely oldalán a spektrum, az időtengely felől a fénygörbe látható.

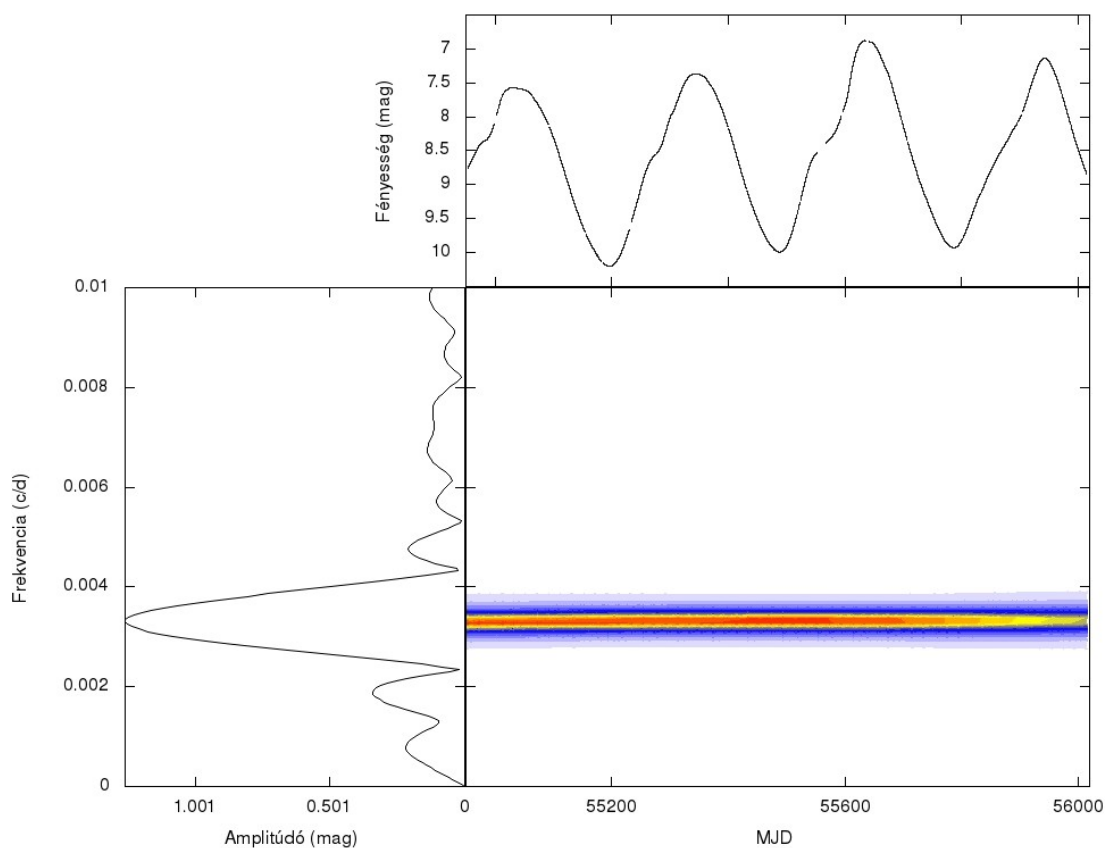
4.1. Hosszú periódusú változók

A hosszú periódusú változókat két csoportra lehet bontani. Az egyikben, melyhez 12 darab csillagot soroltam, a fénygörbe elég stabil periodicitást mutat. Az amplitúdó ciklusról ciklusra csak kis mértékben módosul. Ilyen a 9. ábrán látható KIC 5870047 katalógusjelű is. Ezen típusba 12 darab csillagot soroltam be.

Ezen esetekben a wavelet térkép és a spektrum is egyszerű felépítésű. A nagy amplitúdójú, hosszú, több száz napos periódus minden esetben meghatározza a wavelet térkép alakját. Csak egy, a fénygörbe teljes hosszában elnyúló csíkot látunk. Az esetleg előforduló rövidebb, kis amplitúdójú periódusok teljesen rejtve maradnak. Ezek megjelenítése úgy lehetséges, ha a nagy amplitúdójú komponenseket kihagyva, az utánuk kezdődő frekvencia értéktől készítjük el a wavelet térképet.

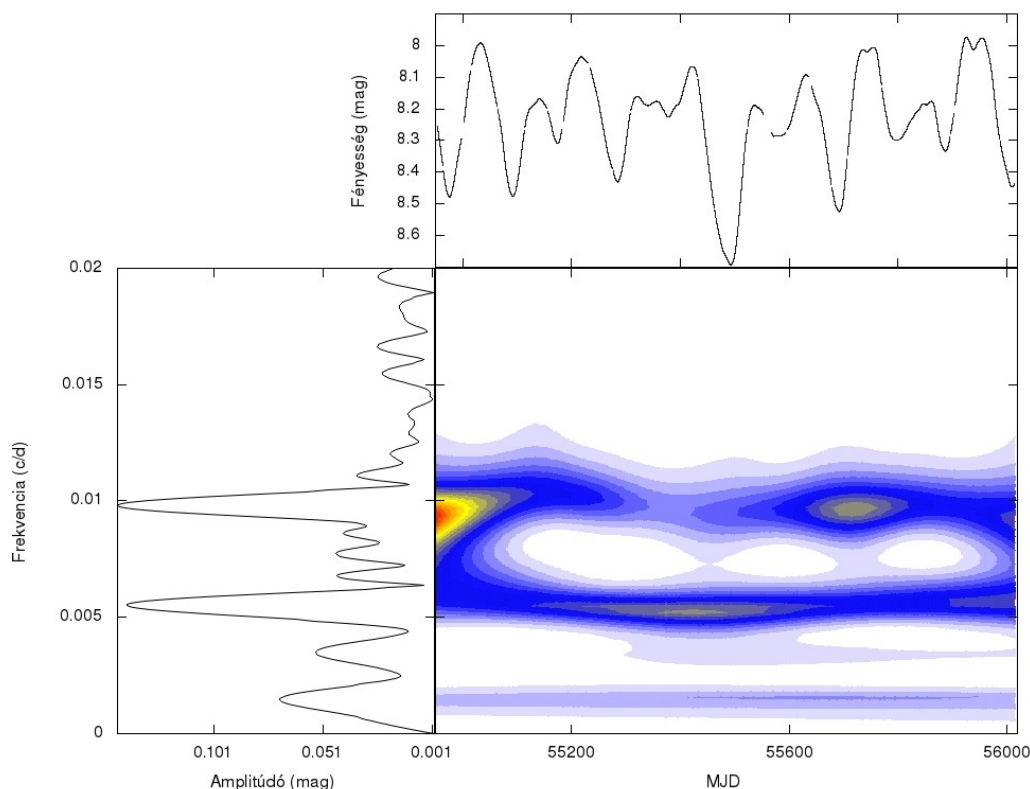
Az ilyen típusú csillagok fénygörbéjének jellegzetessége, hogy a felszálló ág minden ciklusában tapasztalható egy úgynevezett plató megjelenése. Ezen tulajdonságok a mira típusú csillagokra jellemzőek.

Az ekkora amplitúdójú változást mutató csillagok esetében a *Kepler* nem tud új információval szolgálni, csak abban az esetben, ha a fénygörbére ráakódna egy néhány tized vagy század magnitúdójú változás. Ezen fénygörbék az eddig a Föld felszínéről készített szabadszemes, fotoelektromos és CCD-s felvételek kiegészítéseként szolgálhatnak.



9. ábra. KIC 5870047 (Felül a fénygörbe, balra lent a frekvencia spektrum, jobbra tőle a wavelet térkép).

A másik csoportba 11 darab csillag került, melyek tagjai néhány tized magitúdós változást mutatnak. A több száz napos periódusú változásra további kisebb amplitúdójú modulációk rakódnak rá. A wavelet térképeken megjelenik a hosszú periódusú változás mellett a moduláció is. Ezen térképeken jól megfigyelhető, hogy az adott periódusok a fénygörbe mely szakaszára jellemzőek. A 10. ábrán látható KIC 4056751 jelű csillag esetében a 102,15 és a 181,82 napos periódusok jellemnek meg nagyobb amplitúdóval. Ezek majdnem periodikusan váltják egymást, ami arra utalhat, hogy az ezeket gerjesztő pulzációs módusok között energiacsere lehetséges (módusváltás). A modellek szerint, ha az első két periódus aránya 1,8, akkor a csillag alaplómódusban és első felhangban pulzál egyszerre. Jelen esetben ez az arány 1,77, ezért feltételezhetjük, hogy a KIC 4056751 jelű csillag alaplómódusának periódusa 181 nap, az első felhangjának pedig 102 nap. Ez az arány a félszabályos változócsillagokra nagyon jellemző. Ezen kívül a 685 napos periódusnál is megfigyelhető egy halvány vonulat,



10. ábra. KIC 4056751.

mely a fénygörbében megjelenő trendre utal.

Az ebben az osztályban található csillagok fénygörbéjének változását legnagyobb részben a κ mechanizmus által gerjesztett pulzációk okozhatják.

4.1.1. κ mechanizmus

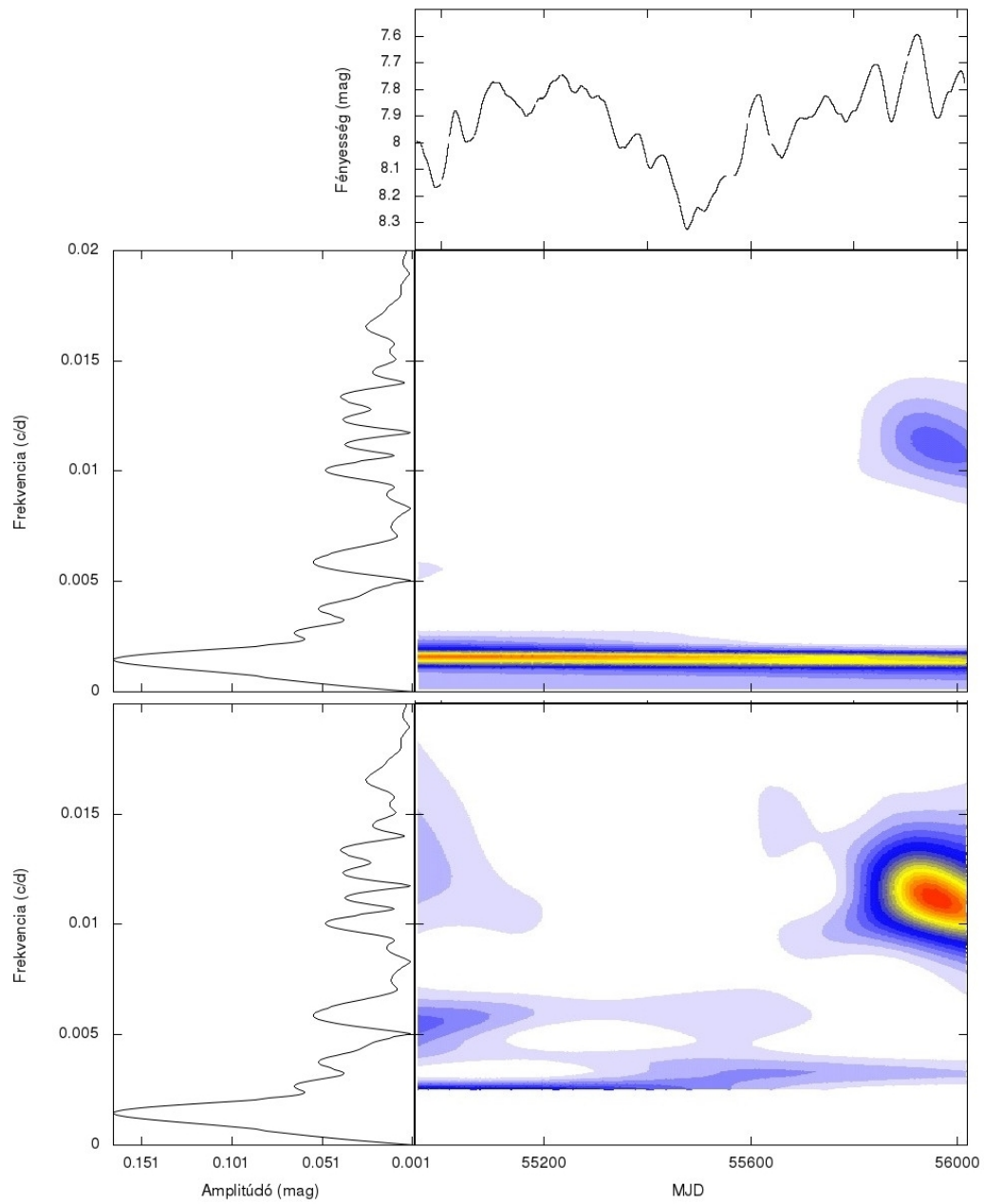
A csillagok pulzációját sokáig adiabatikus folyamatokkal írták le. Ekkor nem történik energiacsere a környezettel. Ha csak ilyen folyamatok hajtják a pulzációt, akkor azok idővel csillapodnának. Ezen modellek legnagyobb hátránya volt, hogy nem tudták magyarázni a többfrekvenciás rezgéseket. Két határeset lehet, vagy gyorsan leáll a pulzáció vagy a csillagról héjak dobodhatnak le. Ezért kell lennie egy másik mechanizmusnak, amely gerjeszti a pulzációt és tartósan fenn is tartja azt. Ez a kappa-mechanizmus. A csillag rétegeiben találhatóak a H és a He ionizációs zónák, melyek opacitása (átlátszatlansága) exponenciálisan függ a hőmérséklettől. Kis hőmérséklet növekedés esetén nő az ionizáció foka, ezért több

lesz a szabad elektron. Mivel ezek nagy hatáskeresztmetszettel szórják a fotonokat, ezért ez a sugárnyomás növekedéséhez és a csillaglégkör kitágulásához vezet. A tágulás következtében a hőmérséklet csökken, az opacitás és a sugárnyomás szintén, rekombináció megy végbe, mely a csillag összehúzódásához vezet. Ez a folyamat addig tart, míg a hőmérséklet és az opacitás növekedés miatt a sugárnyomás nagyobb nem lesz a gravitációs összehúzódásnál. Ekkor ez a körfolyamat kezdődik előlről.

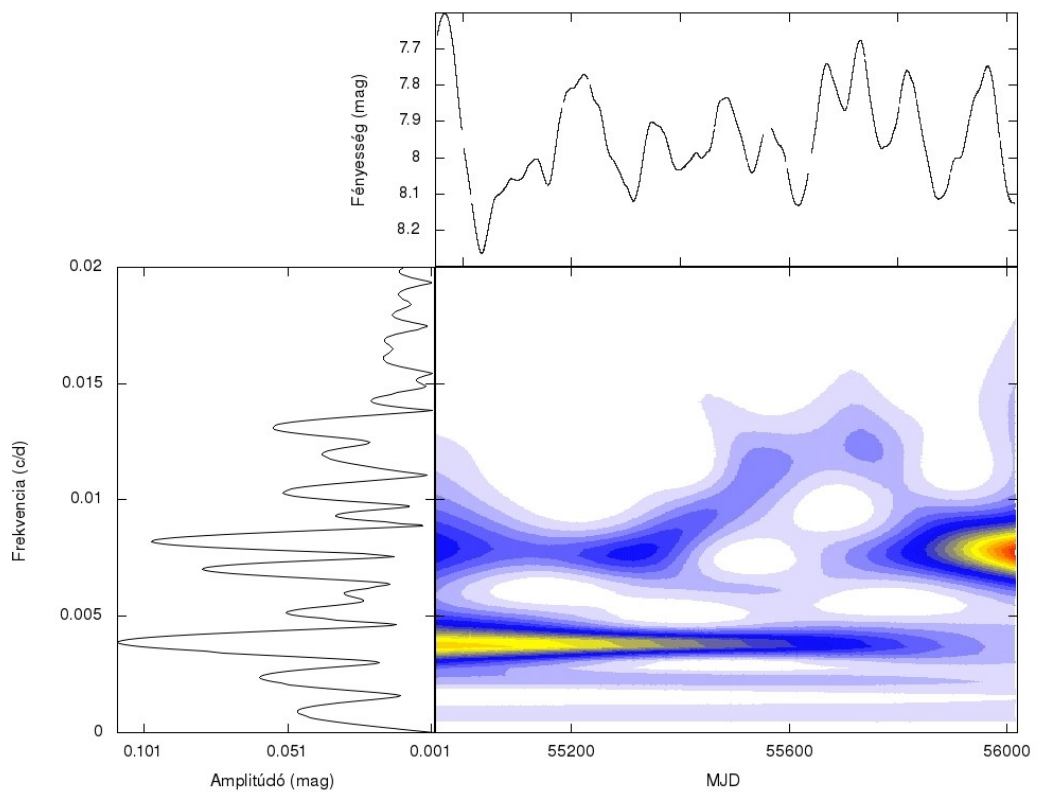
4.2. Közepes periódusú változók

Ezen osztályban található csillagok többszörös periodicitást mutatnak. Az amplitúdó maximum néhány tized magnitúdó. A fénygörbékben néhány 10 napos periódusok fordulnak elő. Ezen csillagok száma 86 lett. De vannak olyan csillagok, melyek esetében egy több száz nap periódusú változásra rakódnak a rövidebb modulációk, ezekből 23-at találtam. Ilyen a 11. ábrán látható KIC 5296307 jelű csillag is. A hosszú 685 napos változás jól látható a wavelet térképen, illetve a spektrumban. Ennek oka lehet az, hogy a csillag kettős rendszer tagja, vagy nagyméretű folt található rajta. Ha foltos, akkor a csillag keringési ideje meg kell, hogy egyezzen a hosszú változás periódusával. A rövidebb periódusok a wavelet térkép jobb szélén válnak láthatóvá. Ekkor az amplitúdójuk elég nagy a görbe teljes amplitúdójához képest. Viszont a spektrumban jól látható, hogy milyen periódusú változások vannak még a csillag fénygörbéjében. Ezen rövidebb változásokat gerjesztheti a pulzáció. A 11. ábra alsó részén található wavelet térkép esetében a frekvencia a $0,0025 \text{ c/d}$ értéktől indul, így más, kisebb amplitúdójú komponensek is láthatóvá válnak.

A 12. ábrán látható KIC 5388155 jelű csillag esetében nincsen olyan periodikus változás mely, a fénygörbe menetét meghatározná. A wavelet térképből látható, hogy több olyan periódus van, mely jelentősebb amplitúdóval jelentkezik. Ezek, bár nem a teljes fénygörbében vannak jelen, hosszabb ideig maradnak fenn, mint az előbb látott csillag esetében. A görbe az elején még fél magnitúdót változik, ezt követően egy szakaszon csak egy-két tizedet, majd ismét a nagyobb lesz az amplitúdója. Ez a wavelet térképen is látható, a középső szakaszon levő periódusok amplitúdója kisebb (kékebb színezetűek). Ez félszabályos (SR) csillagra utal, mely változásait okozhatja pulzáció.



11. ábra. KIC 5296307 (Az alsó wavelet térkép esetében a frekvencia 0,0025 c/d értéktől indul).



12. ábra. KIC 5388155.

4.2.1. Csillagaktivitás és foltosság

A csillagok aktivitása kapcsolatban áll a mágneses terükkel. Leggyakrabban flereket és kitöréseket figyelhetünk meg. Ezen folyamatok a csillag kromoszférájában és a koronájában játszódhatnak le. Ha a kiáramló anyag sebessége meghaladja a szökési sebességet, akkor az az anyag eltávolodásához vezet. A vörös óriás és szuperóriások csillagok körül jelentős gáz és porfelhő található, ami miatt jellemző a nagymértékű anyagvesztés.

A kitörések rövid ideig tartó felfényesedést okozhatnak. Ezeket, a nagy energiájuk miatt, a röntgen tartományban figyelhetjük meg, de létezik olyan eset, amely során a látható fény tartományába is felfényesedés történik.

A foltok a mágneses tér kilépésének helyén találhatóak. Ezek hűvösebbek a csillag fotoszférájánál, ezért ha a Föld felé mutató oldalon helyezkednek el, akkor a fényesség csökkenését okozzák. A csillag forgása miatt a foltok helyzete változik, ami a fénygörbében is változást okoz. A foltok méretét és számát nem tudjuk megmondani, csak egy minimális foltszám értéket lehet becsülni különböző modellek segítségével. A Johnson-féle szűrőrendszerbeli B (kék) és V (vizuális, sárgászöld) színekkel felvett fénygörbék különbsége, azaz a B-V színindex görbe jól korrelál a hőmérséklettel. Ha ismerjük a hőmérséklet időbeli változását, akkor az segíthet megtudni, hogy a csillag foltos-e. Ha a hőmérséklet nem nagy mértékben változik a fényesség változásához képest, akkor a csillag fényesség modulációját nem foltok okozzák. Ellenkező esetben feltételezhetjük a foltok jelenlétét. Sajnos a *Kepler* nem használ szűrőt a mérései során, így ilyen vizsgálatokra jelenleg nincs lehetőségünk.

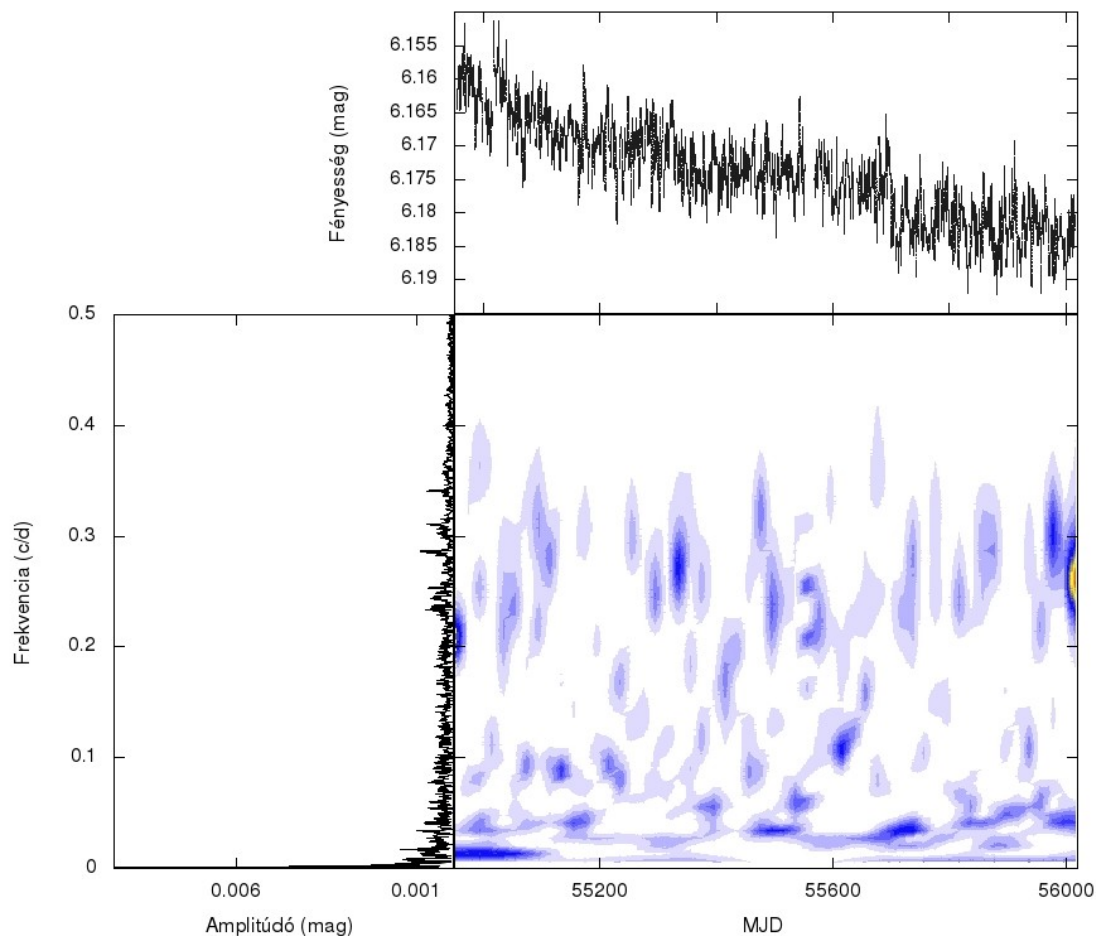
4.2.2. Kettőscsillagok

A kettőscsillagok esetében a rendszernek legalább két tagja van, melyek egymás körül keringenek. Ha ezek egymást periódikusan elfedik, akkor beszélünk fedési kettősökről. Ezeknek három alosztálya létezik, melyeket a fénygörbéjük alapján különíthetünk el. Az Algol-típusúak keringési periódusa 0,2 naptól 10 ezer napig terjed. Távol keringenek egymástól, alakjuk közelítőleg gömb. A fedések során a fénygörbében periódikus fényesség csökkenés következik be, melyek éles csúcsként láthatóak. A β Lyrae-típus esetében a periódus több, mint egy nap. A csillagok alakja kissé ellipszoidális. A fénygörbében a fedések során megjelenő minimumok kiszélesedtek, de még jól elkülöníthetőek. A W UMa-típus esetén a periódus rövidebb egy napnál. A fénygörbe változása folyamatos, nem különülnek el az egyes fedések által okozott fényességcsökkenések. Ezen adatok a fősorozati csillagokra érvényesek. A vörös óriások sugara több százszor is nagyobb, ezért a keringési idő többszörösére növekedhet.

Ha a csillag kettős rendszer tagja, akkor a színekvonalai periódikusan változnak, ide-oda tolódnak a laboratóriumi hullámhosszhoz képest. Ha készülne folyamatos spektrum felvétel ezen csillagokról, akkor meg lehetne állapítani a kettősség létét.

4.3. Rövid periódusú változók

Az ide tartozó csillagok amplitúdója mindössze néhány század magnitúdó. Rengeteg, napos vagy néhány napos periódusú komponens jellemzi őket. Az eddigi felvételeken ezek a változások nem voltak kimutathatóak. A *Kepler* pontossága által sikerült először ilyen kis amplitúdójú változásokat kimutatni vörös óriás csillagok esetében.



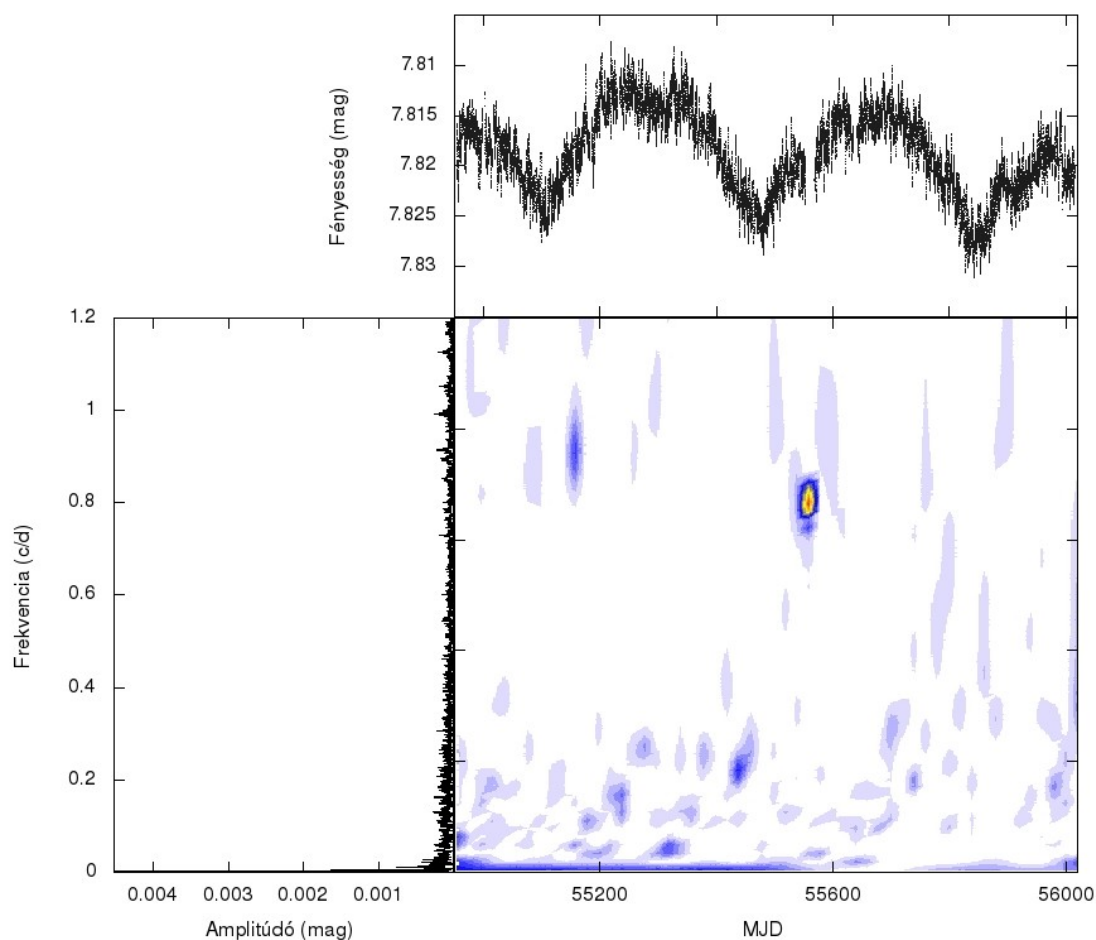
13. ábra. KIC 6382244.

Két jól elkülönülő csoportra lehet őket bontani. Az egyik esetében a fénygörbét vagy nem jellemzi semmilyen hosszabb periódusú változás, vagy egy több száz napos moduláció figyelhető meg. Ezekre ülnek rá a kis amplitúdójú változások. Ilyen változást mutató csillagok száma 39 lett. A hosszú periódus kialakulását, amit trendnek nevezünk, valószínűleg a csillag foltosságá okozza. A 13. ábrán látható KIC 6382244 jelű csillag esetében ezen változás amplitúdója körülbelül 0,03 magnitúdó. A spektrumban is ezen változáshoz tartozó

csúcs jól kiemelkedik a többi közül. A wavelet térkép esetében ez nem lett ábrázolva, így jól látható, hogy a rövid, néhány napos periódusú modulációk a fénygörbe mely szakaszán erősödnek fel. Ezek valószínűleg a konvekció által sztochasztikusan gerjesztett Nap-típusú (solar-like) oszcillációk.

A másik csoport esetében a fénygörbét egy néhány század magnitúdós változás jellemzi. Ennek periódusa körülbelül megegyezik a *Kepler* keringési idejével. Ezen moduláció 48 csillag esetében jelenik meg, mely jól látható a 14. ábrán levő KIC 8840004 jelű csillag fénygörbéjén. Ennek oka nem lehet a csillag foltossága, mert akkor azon 47 csillagnak, melyek esetében észlelhető ez a változás, azonos periódusidővel kellene forogniuk. Valószínűleg a *Kepler* keringéséből származó Doppler-erősítés áll a jelenség mögött. A rövid periódusú változások ezt a hosszú, több, mint egy éves trendet modulálják, melyek feltételezhetően Nap-típusú oszcillációk.

A 14. ábrán látható wavelet térképen körülbelül $0,8 \text{ c/d}$ frekvenciánál megjelenik egy nagy amplitúdójú folt. Ez a fénygörbében jelentkező több, mint két hetes űr helyén található, ahol nincsenek adatpontok. A wavelet-analízis tulajdonsága szerint, ahol nincs adatpont ott le kellene mennie az amplitúdónak nullára (Szatmáry, 1994). Az, hogy miért jelenik meg ott egy $1,25$ napos periódusú jel, ahol nem történt mérés, egyelőre nem ismeretes. Valószínűleg a WinWWZ program egy hibája lehet. Ezt a foltot minden olyan analízis esetén tapasztaltam, ahol a maximális frekvencia értéke legalább $0,9 \text{ c/d}$ volt.



14. ábra. KIC 8840004.

4.3.1. Nap-típusú oszcillációk

A Napban az oszcillációkat a konvekció sztochasztikusan gerjeszti (Bedding, 2011). Más csillagok esetében a Nap-típusú kifejezést használjuk a hasonlóan gerjesztett pulzációkra, de közben tudjuk, hogy ezen csillagok nagyon különbözhetnek a Naptól. A gerjesztés sztochasztikus természete miatt egy egész sor frekvencia jelenik meg a pulzáció során. Ezek a Nap esetében 1-től 4 MHz-ig terjednek (a jól ismert 5 perces oszcillációk). A csillag pulzációkat gerjesztheti az opacitás változás (κ mechanizmus), ahogy sok klasszikus pulzáló csillag esetében megfigyelhető. Ha egy csillag Nap-típusú oszcillációkat mutat, akkor elég hűvösnek kell lennie ahhoz, hogy felszín közeli konvektív zónával rendelkezessen. Gyakorlatban ez hűvösebbeket jelent, mint a klasszikus instabilitási sáv vörös szélé, ami az alacsonyabb fősorozatot tartalmazza, valamint a hűvös szubóriásokat és a vörösóriásokat. Valóban megfigyeltek több órás (vagy hosszabb) periódusú Nap-típusú oszcillációkat G és K típusú

óriások ezreinél. Arra is van bizonyíték, hogy a félszabályos óriások (M óriások) pulzációja is Nap-típusú (Christensen-Dalsgaard et al., 2001; Bedding, 2003; Tabur et al., 2010). Definíció szerint a Nap-típusú oszcillációk sztochasztikusan gerjesztődnek a külső konvektív zónában. Feltéve, hogy a felületi konvekcióról azt gondoljuk, hogy meggátolja a κ mechanizmus működését (pl.: Gastine and Dintrans, 2011), úgy tűnik a két mechanizmus kölcsönösen kizárja egymást. Valójában mindkét folyamat működhethet a csillagban feltéve, hogy a konvekciós réteg vékony (Samadi et al., 2002; Kallinger and Matthews, 2010). Legalább egy δ Scuti típusú csillag esetén tudták bizonyítani a Nap-típusú oszcilláció létét (Antoci et al., 2011). A csillagok oszcillációja két féle lehet. A nyomás módusok (p-módusok) akusztikus hullámok, melyek esetében az egyensúlyi helyzetbe való visszatérítő erő a nyomásgradiensből származik. Ilyenek a Napban és a Nap-típusú csillagokban fordulnak elő, illetve a klasszikus pulzátorokban. A gravitációs módusok (g-módusok) esetében a visszatérítő hatás a felhajtóerő. A legjobban tanulmányozott példákat a fehér törpék között találjuk. Vannak olyan csillagok, melyek esetében mindkét módus előfordul, ilyen lehet a Nap is. Előfordulnak kevert módusok is, mikor a p-módus felszín közelében, a g-módus a magban jellemző.

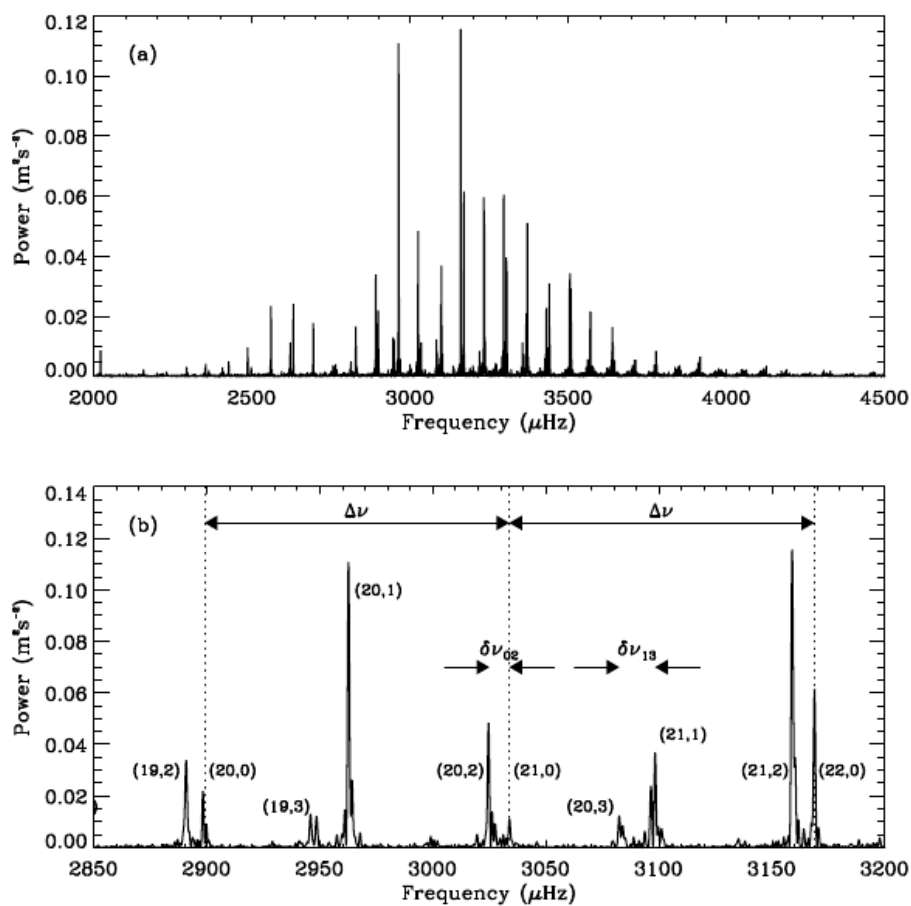
A p-módust matematikailag három paraméterrel jellemezhetjük. Ezek az n , m és l számok. Az n az állóhullám radiális csomófelületeinek számát, az l szám a felületen húzódnó csomóvonalak számát adja, ha $l=0$, akkor radiális a mozgás. Az m értéke $-l$ -től $+l$ -ig mehet.

A 15a. ábrán a Napbéli p-módusok frekvencia spektruma látható, ahol a függőleges tengelyen az amplitúdó négyzete (power) van ábrázolva. A csúcsok burkolójának maximumához tartozó frekvencia a ν_{max} . A frekvenciák nagyon szabályos mintát mutatnak, melyek egy oszcilláló gömbre jellemzőek. A 15b. ábrán egy kinagyítás látható, ahol a módusok n és l értéke a zárójelekben fel van tüntetve. Ezeket elméleti modellekből származnak. A $\Delta\nu$ az egymás után következő radiális felhangok közötti úr (olyan módusok, melyek l értéke adott, az n eggyel különbözik). Ezt nevezik a nagy frekvencia szeparációnak. A kis frekvencia szeparációkat a $\delta\nu$ -k jelölik, melyek esetében az l is különbözik.

A nagy frekvencia szeparáció nagyjából arányos a csillag átlagos sűrűségének négyzetgyökével:

$$\frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_{\odot}} \approx \left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)^{0,5} \left(\frac{T_{eff}}{T_{eff\odot}}\right)^3 \left(\frac{L}{L_{\odot}}\right)^{-0,75}. \quad (4)$$

Ezen skálázási reláció nagyon széles körben alkalmazott, melyet elméleti modellekkel teszteltek (White et al., 2011). Az összefüggés alkalmazásával meghatározható egy csillag tömege, effektív hőmérséklete vagy luminozitása, abban az esetben ha a másik két adat ismert.



15. ábra. A Nap frekvencia spektruma (Bedding, 2011).

4.3.2. Doppler erősítés (boosting)

Az 1990-es évek közepén fedezték fel, hogy más naprendszeren kívüli csillag körül is kering bolygó. A kimutatás kétféle módon lehetséges. A bolygó keringése során rángatja a csillagát, így radiális sebesség méréssel periódikus sebesség változást észlelünk. Ha viszont a bolygó el is halad a csillaga előtt, akkor kitakar annak fényéből, amely fényességcsökkenést okoz.

Az egyre nagyobb érzékenyséű távcsöveknek köszönhetően már μ magnitúdós változásokat is ki lehet mutatni. Ilyen pontosság mellett olyan jelenségek válnak láthatóvá, mint a csillag alakjának, a bolygó által okozott változásából származó fényesség módosulás vagy a csillag oszcillációja.

Létezik egy másik fajta jelenség is, mely a csillag mérhető fluxusának enyhe, periódikus változását okozza. Ez a Doppler-erősítés, mely a csillagnak, a bolygó által okozott mozgásából származik (Loeb - Gaudi, 2003).

Ha a csillag nemrelativisztikus radiális sebessége a megfigyelőhöz képest v_r , akkor a Doppler-erősítés által okozott bolometrikus fluxus változás:

$$F = F_0(1 + 4\frac{v_r}{c}), \quad (5)$$

ahol a c a fénysebesség és a 0 index a forrás mozgása nélkül mérhető mennyiségeket jelenti.

Ismeretes, hogy a Doppler-erősítés abban az esetben is bekövetkezik, ha nem a forrás mozog, hanem a megfigyelő. Feltételezhetően ezt a jelenséget figyelhetjük meg a *Kepler* által mért csillagok fénygörbéjének is. Ezt a fajta változást eddig csak kettőscsillagok esetében sikerült kimutatni (van Kerkwijk, et al., 2010). Az űrtávcső keringési sebessége nagyjából megegyezik a Földével, ami 30 km/s. A keringési idő 372,5 nap. Az effektus csak kis mértékben változtatja meg a fluxus értékét, ezért nem látható a nagyobb amplitúdójú csillagok fénygörbéjében. Az ebbe az osztályba sorolt csillagok esetében sem mindig látható a jelenség. Azon csillagoknál, melyeknél a jelenség fennáll, a moduláció periódusa nagyjából megegyezik a *Kepler* keringési idejével. Ennek az effektusnak a vizsgálata még folyamatban van. Egyelőre nem tudjuk megmagyarázni, hogy miért nem látható az összes kis amplitúdójú csillag fénygörbéjében, és hogy miért nem egyezik meg a fázis minden esetben.

Összefoglaló

A Kepler Asztroszeizmológiai Tudományos Konzorcium (KASC) 12-es munkacsoportjához tartozó csillagok fénygörbéjét vizsgáltam a dolgozat elkészítése során. Ezek a nyers adatok különböző mértékű ugrásokat tartalmaztak, melyeket a *Kepler* űrtávcső negyedévente történő elfordítása okoz. Az analízis elvégzéséhez először összetoltam a fénygörbét, hogy folytonosak legyenek. A művelet elvégzése kétféle módszerrel történt, melyekből ki kellett választani minden esetben a legjobbat. Így 219 csillag fénygörbéjét sikerült összeilleszteni.

Minden csillag esetében elvégeztem a fénygörbe Fourier- és wavelet-analízisét, hogy megtudjam milyen frekvenciájú, amplitúdójú és fázisú szinuszos komponensek alkotják azokat, illetve, hogy ezek időben hogyan változnak. A wavelet-analízis esetében megvizsgáltam, hogy a bemenő paraméterek változtatása hogyan hat a wavelet térképre.

Három osztályba soroltam a vörös óriás pulzáló változócsillagokat a fénygörbéjük alapján. Az elsőbe olyanok kerültek, melyekben a fő periódus több tíz naptól több száz napig terjed. Az amplitúdók néhány tizedtől több magnitúdóig terjednek, ezért a *Kepler* rendkívül magas pontossága ezen esetben nem nyújt új információt, csak akkor, ha a hosszú változásra valamilyen rövid periódusú moduláció rakodik rá. A fényességükben több magnitúdó változást mutató csillagok mira típusúak lehetnek. Ezek esetében a pulzációt a opacitás (átlátszatlanság) változása okozza (κ mechanizmus). Ezek a fénygörbék az eddig készített felvételek kiegészítéseként szolgálhatnak.

A második osztályba olyan csillagok kerültek, melyek fénygörbéjében néhány 10 napos periódusok észlelhetőek. Ezek sok esetben többszörös periodicitást mutatnak. Az amplitúdók értéke maximum néhány tized magnitúdó. Ezen esetekben is a pulzációt a κ mechanizmus hajthatja. A csillagokat ezen belül két alosztályba tudtam sorolni, aszerint, hogy a fénygörbében megjelenik-e egy több száz napos változás vagy sem. A hosszú modulációt okozhatja a csillag foltossága, vagy kettősség. Ennek kimutatásához nem elegendő a bolometrikus fotometria elvégzése. Ezen kívül a hirtelen, nem periódikus változások kapcsolatban állhatnak a csillag aktivitásával, kitörésekkel, flerekkel.

A harmadik osztályba azon csillagok kerültek, melyek fénygörbéjében nagy sok, néhány napos (vagy rövidebb) periódusú modulációk jelentkeznek. Az amplitúdók a néhány ezredtől a pár tized magnitúdóig terjednek. Itt is két alosztályt tudtam kialakítani, aszerint, hogy a fénygörbében látható-e egy körülbelül egy év periódusú moduláció vagy sem. Ennek oka lehet a távcső keringése miatt fellépő Doppler erősítés. A rengeteg, nagyon rövid periódusú

komponens oka a konvekció által sztochasztikusan gerjesztett oszcillációk lehetnek.

Remélem az általam készített osztályozások segítségét nyújtanak a pulzáló vörös óriások számos változást mutató fénygörbéjének áttekintéséhez.

A jövőben szeretném folytatni a pulzáló vörös óriás csillagok vizsgálatait. Szeretnék magyarázatot találni arra, hogy miért nem látjuk az összes kis amplitúdójú csillag esetében a feltételezett Doppler erősítést. Bővíteném az ismereteimet a Nap-típusú oszcillációkról. Várom a *Kepler* további adatsorait, melyek remélhetőleg újabb értékes információkat nyújtanak a vörös óriás csillagok működésének tanulmányozásához.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. Szatmáry Károlynak a rendszeres konzultálási lehetőségért és a türelméért, melyet a dolgozatom elkészítése során kaptam tőle. Köszönettel tartozom Kiss Lászlónak, aki által hozzáférhettem a *Kepler* űrtávcső adatsoraihoz. Továbbá köszönöm Csányi Istvánnak, hogy segített a különböző ábrák elkészítésében.

Irodalomjegyzék

- Loeb A. and Gaudi S.B., 2003
Periodic flux variability of stars due to the reflex Doppler effect induced by planetary companions
The Astrophysical Journal, 588:L117–L120
- Antoci V., Handler G., Campante T. L., et al., 2011
The excitation of solar-like oscillations in a δ Sct star by efficient envelope convection
Nature, Volume 477, Issue 7366, pp. 570-573
- Bedding T. R., 2011
Solar-like Oscillations: An Observational Perspective, astro-ph 1107.1723, in "Astero-seismology", Canary Islands Winter School of Astrophysics, Volume XXII, edited by Pere L. Pallé, published by Cambridge University Press
- Bedding T. R., 2003
Solar-like oscillations in semiregular variables
Ap&SS, 284, 61.
- Benkő József, Szabó Róbert, 2010
Idősorok az úrből
Meteor csillagászati évkönyv 2011. 207-232.
- Bódi Attila, 2012
Változócsillagok fénygörbe elemzése
Szakdolgozat SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék
- Christensen-Dalsgaard J., 2003
Lecture Notes on Stellar Oscillations
<http://users-phys.au.dk/jcd/oscilnotes/>

- Christensen-Dalsgaard J., Kjeldsen H., & Mattei J. A., 2001
Solar-like oscillations of semiregular variables
ApJ, 562, L141.

- Csányi István, 2012
Vörös óriás csillagok fényváltozásának analízise a Kepler űrtávcső mérései alapján
Szakdolgozat SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék

- Csányi I., Szatmáry K., Kiss L.L., Bányai E., Derekas A., Szabó Gy.M.: 2012, Methods for light curve preparation: the case of long-period variables, poster on Kepler Astroseismic Science Consortium 5th Workshop: “Extending the Kepler Mission: New Horizons in Astroseismology”, June 18-22, 2012, Balatonalmádi, Hungary, Abstract Book (ISBN 978-963-88019-9-9), Ed. R. Szabó, p. 157

- Gastine T. & Dintrans B., 2011
Convective quenching of stellar pulsations
A&A, 528, A6.

- Kallinger T. & Matthews J. M., 2010
Evidence for Granulation in Early A-Type Stars
ApJ, 711, L35.

- Lenz P. and Breger M., 2005
Period04 User Guide
Communications in Astroseismology, 146, 53-136.

- Samadi R., Goupil M.-J., & Houdek G., 2002
Solar-like oscillations in δ Scuti stars
A&A, 395, 563.

- Szatmáry K., Csányi I., Kiss L.L., Bányai E., Derekas A., Szabó Gy.M.: 2012, Light curve analysis of M giant stars in the Kepler database, poster on Kepler Astroseismic

Science Consortium 5th Workshop: “Extending the Kepler Mission: New Horizons in Asteroseismology”, June 18-22, 2012, Balatonalmádi, Hungary, Abstract Book (ISBN 978-963-88019-9-9), Ed. R. Szabó, p. 156

- Szatmáry K., Kiss L.L., Bebesi Zs., 2003
The He-shell flash in action: T Ursae Minoris revisited
Astronomy and Astrophysics, 398, 277-282.
- Szatmáry Károly, 1994
Változócsillagok periódus-analízise az idő és a frekvencia tartományban
kandidátusi értekezés, JATE, Szeged
- Tabur V., Bedding T. R., Kiss L. L., et al., 2010
Period-luminosity relations of pulsating M giants in the solar neighbourhood and the Magellanic Clouds
MNRAS, 409, 777.
- van Kerkwijk Marten H., Rappaport Saul A., Breton René P., Justham Stephen, Podsiadlowski Philipp, Han Zhanwen, 2010
Observations of Doppler Boosting in Kepler Light Curves
The Astrophysical Journal, Volume 715, Issue 1, pp. 51-58
- White T. R., Bedding T. R., Stello D., et al., 2011
Calculating asteroseismic diagrams for solar-like oscillations
Astrophysical Journal, Volume 743, Issue 2, article id. 161
- A Period04 program: <http://www.univie.ac.at/tops/Period04/>
- Változócsillagok: <http://astro.u-szeged.hu/ismeret/valtozok/pulzalok.html>
- A *Kepler* űrtávcső hivatalos oldala: <http://kepler.nasa.gov>

Függelék

Hosszú periódusú változók kategóriájába sorolt csillagok adatai I.			
KIC sorszám	Frekvencia (c/d)	Amplitúdó	Fázis
3838380	0.00654	0.1857	0.6368
	0.00348	0.1241	0.7660
	0.00485	0.1006	0.4689
4056751	0.00979	0.1337	0.6202
	0.00551	0.1303	0.4644
	0.00146	0.0807	0.1766
4548551	0.00489	0.3866	0.7092
	0.00993	0.1791	0.2486
	0.00381	0.0888	0.0203
5093223	0.00504	1.1476	0.3652
	0.00080	0.2666	0.9092
	0.00970	0.2776	0.4346
5732847	0.00758	0.1825	0.0124
	0.00452	0.0821	0.8037
	0.00268	0.0618	0.0337
5818205	0.00108	0.0774	0.5569
	0.01262	0.0748	0.7712
	0.00273	0.0507	0.5966
5870047	0.00329	1.2380	0.2858
	0.00089	0.1893	0.9272
	0.00706	0.1187	0.4069
6279696	0.00993	0.9362	0.7406
	0.00428	0.2852	0.2678
	0.00588	0.2221	0.4058
7274171	0.00263	1.3174	0.5090
	0.00131	0.1636	0.6723
	0.00786	0.0999	0.6187
7368621	0.00277	1.2355	0.7859
	0.00833	0.1680	0.8524
	0.00551	0.1341	0.3198
7624629	0.00357	1.3358	0.9842
	0.00070	0.1183	0.6146
	0.00183	0.0850	0.6643

Hosszú periódusú változók kategóriájába sorolt csillagok adatai II.			
KIC sorszám	Frekvencia (c/d)	Amplitúdó	Fázis
7699331	0.00400	0.1788	0.8497
	0.00772	0.0950	0.2176
	0.00080	0.0510	0.4327
7868889	0.00197	1.0617	0.6677
	0.00061	0.3111	0.5180
	0.00419	0.3503	0.9017
8096758	0.00461	0.4833	0.1652
	0.00909	0.1816	0.0375
	0.00065	0.1261	0.4171
8154017	0.00951	0.1098	0.4081
	0.00103	0.0728	0.7108
	0.00692	0.0506	0.3858
8296417	0.00560	0.1701	0.5141
	0.00065	0.0580	0.4297
	0.00725	0.0505	0.1167
8429085	0.00320	1.5530	0.9296
	0.00113	0.2830	0.9774
	0.00631	0.2746	0.8796
9570858	0.00343	0.2445	0.3644
	0.00518	0.0827	0.8967
	0.00720	0.0843	0.8007
9760924	0.00207	0.1796	0.8845
	0.00993	0.1244	0.9262
	0.00423	0.1213	0.3319
10978008	0.00386	1.5215	0.0043
	0.00117	0.3103	0.9695
	0.00226	0.1759	0.5914
10978948	0.00320	1.1532	0.5109
	0.00146	0.2229	0.1083
	0.00970	0.1384	0.7360
11229003	0.00287	1.9473	0.2118
	0.00075	0.4713	0.3018
	0.00579	0.3345	0.2754
11307603	0.00452	1.3292	0.6643
	0.00070	0.2139	0.9415
	0.00193	0.1255	0.4922

Közepes periódusú változók kategóriájába sorolt csillagok adatai I.			
KIC sorszám	Frekvencia (c/d)	Amplitúdó	Fázis
1434591	0.00065	0.0284	0.3342
	0.02722	0.0220	0.9121
	0.03773	0.0224	0.8685
1569822	0.00065	0.0483	0.8794
	0.02124	0.0390	0.7227
	0.00343	0.0242	0.4579
1573867	0.00202	0.0253	0.8384
	0.03320	0.0192	0.1047
	0.00065	0.0184	0.0076
2302624	0.00065	0.0461	0.3516
	0.00188	0.0281	0.1873
	0.02322	0.0220	0.5968
2307675	0.01827	0.0682	0.4036
	0.00193	0.0622	0.8134
	0.01738	0.0574	0.3378
2422539	0.01691	0.0945	0.3166
	0.00857	0.0198	0.7384
	0.02534	0.0187	0.6666
2447175	0.01078	0.0953	0.7805
	0.00131	0.0797	0.2594
	0.00697	0.0472	0.5067
2582664	0.03052	0.0373	0.6491
	0.02185	0.0372	0.2865
	0.00160	0.0349	0.9665
2972941	0.00164	0.1366	0.6705
	0.01370	0.0736	0.7121
	0.01479	0.0355	0.7440
3339623	0.02341	0.0361	0.6245
	0.03306	0.0213	0.6826
	0.00075	0.0171	0.2287
3532685	0.01455	0.0717	0.8025
	0.00932	0.0586	0.1257
	0.00216	0.0584	0.3097
3847254	0.00263	0.0653	0.1815
	0.00070	0.0359	0.2400
	0.02571	0.0345	0.9248
3849933	0.00065	0.0983	0.3085
	0.01431	0.0779	0.8819
	0.01526	0.0706	0.4977
4142365	0.00433	0.0551	0.5294
	0.00103	0.0448	0.8967
	0.02265	0.0248	0.9566
4365417	0.00084	0.0893	0.9564
	0.01205	0.0763	0.5168
	0.01827	0.0379	0.6432
4459725	0.03297	0.0349	0.8463
	0.00202	0.0225	0.0684
	0.03367	0.0217	0.4016

Közepes periódusú változók kategóriájába sorolt csillagok adatai II.			
KIC sorszám	Frekvencia (c/d)	Amplitúdó	Fázis
4679457	0.02016	0.0627	0.6599
	0.02934	0.0458	0.3593
	0.01394	0.0271	0.8504
5176879	0.00263	0.0925	0.8633
	0.00772	0.0749	0.2049
	0.00348	0.0484	0.1975
5182451	0.00061	0.0685	0.0333
	0.00329	0.0263	0.3603
	0.00536	0.0193	0.7349
5184472	0.00226	0.0655	0.6834
	0.00325	0.0368	0.4444
	0.02341	0.0356	0.5851
5212374	0.00089	0.0230	0.7445
	0.00221	0.0208	0.3281
	0.03603	0.0119	0.3844
5296307	0.00146	0.1778	0.1706
	0.00277	0.0668	0.1196
	0.01003	0.0456	0.7035
5388155	0.00386	0.0948	0.5010
	0.00824	0.0780	0.5544
	0.00711	0.0560	0.8249
5522358	0.00117	0.1063	0.7820
	0.00777	0.0945	0.3345
	0.01314	0.0695	0.3432
5621913	0.00207	0.1100	0.2461
	0.00376	0.0542	0.2777
	0.00061	0.0389	0.1216
5722894	0.00070	0.0212	0.7816
	0.03386	0.0274	0.0328
	0.01728	0.0177	0.0734
5786406	0.00287	0.0342	0.3989
	0.00075	0.0265	0.5974
	0.00362	0.0188	0.2411
5892704	0.00061	0.0134	0.8896
	0.05242	0.0051	0.2108
	0.00150	0.0055	0.8516
5949422	0.00226	0.0743	0.3612
	0.01008	0.0736	0.3413
	0.01535	0.0440	0.9505
6044909	0.00263	0.0654	0.2384
	0.01601	0.0464	0.5428
	0.00456	0.0404	0.9726
6110695	0.00070	0.0461	0.2539
	0.00211	0.0186	0.9417
	0.03801	0.0158	0.7434
6140581	0.05553	0.0097	0.5548
	0.07126	0.0065	0.7085
	0.00164	0.0077	0.1586
6200250	0.00070	0.0521	0.8335
	0.01022	0.0333	0.3846
	0.02293	0.0312	0.1143

Közepes periódusú váltózők kategóriájába sorolt csillagok adatai III.			
KIC sorszám	Frekvencia (c/d)	Amplitúdó	Fázis
6286419	0.00065	0.0399	0.9195
	0.03254	0.0318	0.7910
	0.02251	0.0203	0.3331
6286466	0.03297	0.0252	0.2469
	0.00061	0.0174	0.4481
	0.02369	0.0101	0.5716
6366130	0.00155	0.0524	0.7069
	0.00551	0.0241	0.8121
	0.01879	0.0277	0.4375
6451307	0.00061	0.0745	0.0679
	0.01450	0.0686	0.3061
	0.01347	0.0286	0.6305
6451461	0.00155	0.0806	0.4660
	0.01643	0.0657	0.1641
	0.00065	0.0399	0.3146
6467790	0.01351	0.1137	0.0400
	0.00164	0.0748	0.8799
	0.01884	0.0466	0.3171
6528882	0.00075	0.0580	0.6121
	0.00207	0.0203	0.4382
	0.03419	0.0129	0.1768
6665041	0.00273	0.2511	0.7223
	0.00532	0.0789	0.1748
	0.00131	0.0532	0.6913
6693107	0.00065	0.0445	0.3281
	0.00254	0.0331	0.8844
	0.02454	0.0328	0.7066
6780530	0.00169	0.1111	0.7629
	0.01281	0.0626	0.6327
	0.00800	0.0614	0.3762
6849670	0.00075	0.0963	0.1860
	0.00259	0.0997	0.6808
	0.01417	0.0750	0.0078
6852771	0.00193	0.0959	0.7303
	0.00080	0.0451	0.9278
	0.00904	0.0448	0.2149
6862553	0.00555	0.1370	0.7844
	0.00979	0.1084	0.1337
	0.01163	0.0504	0.7885
6966770	0.00061	0.0195	0.9946
	0.04729	0.0182	0.5421
	0.03405	0.0139	0.7622
7039688	0.00372	0.1351	0.1988
	0.00701	0.0931	0.0522
	0.00800	0.0668	0.4646
7115384	0.00089	0.0127	0.2180
	0.00188	0.0079	0.6293
	0.04140	0.0099	0.0704

Közepes periódusú váltózők kategóriájába sorolt csillagok adatai IV.			
KIC sorszám	Frekvencia (c/d)	Amplitúdó	Fázis
7220332	0.00480	0.0971	0.6580
	0.00150	0.1067	0.9200
	0.00852	0.0843	0.0476
7266266	0.00146	0.0765	0.4488
	0.00263	0.0512	0.7664
	0.01592	0.0482	0.4888
7376484	0.01785	0.0530	0.7050
	0.00400	0.0535	0.3238
	0.00075	0.0419	0.6148
7506871	0.00188	0.0700	0.2230
	0.01700	0.0691	0.3225
	0.01818	0.0464	0.9296
7532435	0.00504	0.0984	0.6306
	0.00621	0.0820	0.7004
	0.00155	0.0633	0.8669
7594180	0.01267	0.0879	0.6659
	0.00405	0.0551	0.3383
	0.00174	0.0543	0.7343
7731110	0.02176	0.0421	0.6605
	0.00070	0.0287	0.8199
	0.00226	0.0306	0.5229
7842386	0.00829	0.0490	0.3939
	0.00155	0.0413	0.7950
	0.00753	0.0434	0.4580
7899526	0.00226	0.0568	0.7982
	0.00306	0.0329	0.5435
	0.02006	0.0279	0.3919
8022886	0.00061	0.0671	0.9362
	0.02044	0.0487	0.7900
	0.00150	0.0330	0.9421
8036035	0.00193	0.0752	0.6521
	0.01427	0.0424	0.0661
	0.02049	0.0290	0.2476
8091579	0.00301	0.1086	0.0213
	0.00178	0.1184	0.1592
	0.01507	0.0839	0.5490
8165162	0.01643	0.0581	0.7454
	0.00155	0.0365	0.1413
	0.02345	0.0303	0.2776
8183622	0.01366	0.1295	0.0687
	0.00899	0.0748	0.5962
	0.00174	0.0746	0.6463
8247669	0.00094	0.1184	0.1225
	0.00207	0.1112	0.2746
	0.00960	0.0498	0.7242
8362400	0.00117	0.1522	0.3949
	0.00739	0.0815	0.1332
	0.01187	0.0778	0.1637
8375132	0.00075	0.0529	0.6153
	0.00202	0.0239	0.9930
	0.02708	0.0235	0.1162

Közepes periódusú változók kategóriájába sorolt csillagok adatai V.			
KIC sorszám	Frekvencia (c/d)	Amplitúdó	Fázis
8376357	0.00084	0.0472	0.3988
	0.01676	0.0444	0.9106
	0.02388	0.0350	0.9346
8440194	0.00098	0.1093	0.9931
	0.01285	0.0547	0.6807
	0.00188	0.0354	0.1096
8580394	0.00070	0.0296	0.8438
	0.02195	0.0181	0.0156
	0.03382	0.0155	0.7165
8638273	0.02463	0.0195	0.4981
	0.03372	0.0182	0.9956
	0.00136	0.0150	0.6801
8693728	0.00216	0.0560	0.2144
	0.01662	0.0480	0.9823
	0.01766	0.0470	0.6569
8694690	0.00117	0.1102	0.1407
	0.01337	0.1416	0.5690
	0.00211	0.1081	0.6795
8695820	0.00065	0.0513	0.8016
	0.02892	0.0234	0.0635
	0.02016	0.0228	0.5264
8742293	0.00089	0.0750	0.2955
	0.00202	0.0544	0.4951
	0.02265	0.0305	0.7429
8766897	0.00061	0.0670	0.9825
	0.03758	0.0215	0.9417
	0.00631	0.0172	0.5703
8905990	0.00065	0.0469	0.3909
	0.00193	0.0184	0.5965
	0.02826	0.0121	0.0144
9026866	0.01662	0.2454	0.4592
	0.00894	0.0989	0.8732
	0.01587	0.0617	0.5644
9085926	0.01384	0.1011	0.4862
	0.00061	0.0707	0.5640
	0.00409	0.0811	0.9526
9145762	0.00202	0.0729	0.1344
	0.01714	0.0486	0.2958
	0.00395	0.0407	0.5803
9272761	0.02110	0.0634	0.7111
	0.02256	0.0392	0.9852
	0.02981	0.0261	0.3499
9273992	0.00070	0.0734	0.1848
	0.01945	0.0462	0.4815
	0.00348	0.0410	0.8260
9655091	0.00188	0.1351	0.6814
	0.01375	0.1095	0.6640
	0.00094	0.0746	0.1298
9820825	0.02204	0.0224	0.8478
	0.00160	0.0241	0.3515
	0.02308	0.0188	0.6759
9885332	0.00103	0.0775	0.4179
	0.01417	0.0701	0.1808
	0.01540	0.0507	0.5730

Közepes periódusú váltóozók kategóriájába sorolt csillagok adatai VI.			
KIC sorszám	Frekvencia (c/d)	Amplitúdó	Fázis
10016403	0.01841	0.1230	0.5389
	0.00221	0.0686	0.4347
	0.01926	0.0459	0.6260
10191142	0.00070	0.0782	0.7744
	0.00211	0.0611	0.2320
	0.02779	0.0347	0.4408
10330437	0.00188	0.1371	0.4402
	0.01620	0.0511	0.7788
	0.00367	0.0481	0.9224
10338877	0.00329	0.1463	0.7124
	0.00230	0.0706	0.8102
	0.00065	0.0597	0.2778
10383777	0.01870	0.0670	0.0993
	0.00249	0.0554	0.3372
	0.02086	0.0372	0.6711
10526137	0.00532	0.1458	0.2481
	0.01059	0.0921	0.3927
	0.00631	0.0455	0.8089
10658378	0.00103	0.0679	0.9828
	0.00249	0.0619	0.2657
	0.01643	0.0440	0.6094
10658947	0.00193	0.1444	0.8425
	0.00405	0.0660	0.9835
	0.00089	0.0544	0.8940
10723766	0.01474	0.1806	0.6349
	0.01370	0.0746	0.4402
	0.00065	0.0593	0.8322
10865491	0.00197	0.0924	0.4524
	0.01559	0.0759	0.1216
	0.00339	0.0414	0.2738
10976252	0.03433	0.0270	0.9380
	0.00249	0.0306	0.5220
	0.02524	0.0223	0.7810
10976775	0.02468	0.0173	0.5972
	0.00103	0.0149	0.3708
	0.03292	0.0152	0.9510
11199736	0.00065	0.0233	0.9271
	0.00230	0.0091	0.3334
	0.06307	0.0053	0.3522
11242282	0.02270	0.0371	0.8273
	0.00065	0.0264	0.4120
	0.00230	0.0072	0.8170
11352504	0.00070	0.0481	0.2631
	0.02444	0.0293	0.5116
	0.00282	0.0246	0.9965
11468899	0.00584	0.0100	0.2385
	0.02736	0.0102	0.1694
	0.00061	0.0078	0.0240
11663337	0.00098	0.0721	0.0207
	0.00193	0.0605	0.9538
	0.01318	0.0388	0.7274

Közepes periódusú változók kategóriájába sorolt csillagok adatai VII.			
KIC sorszám	Frekvencia (c/d)	Amplitúdó	Fázis
11719849	0.00061	0.0539	0.0626
	0.01766	0.0435	0.9401
	0.01257	0.0304	0.7838
11759262	0.00334	0.1471	0.7740
	0.00221	0.1072	0.2844
	0.00499	0.0789	0.1513
11819401	0.00188	0.1281	0.2666
	0.00395	0.0716	0.0064
	0.00913	0.0664	0.3781
11859158	0.00178	0.1385	0.6442
	0.01182	0.1092	0.1249
	0.00631	0.0651	0.2017
11910244	0.00070	0.0492	0.7636
	0.03236	0.0410	0.0804
	0.02242	0.0294	0.4504
12215566	0.00108	0.1274	0.6119
	0.00607	0.1124	0.6685
	0.01059	0.0878	0.0032
12554427	0.00438	0.1129	0.9444
	0.00805	0.1083	0.2448
	0.00513	0.0613	0.3451
12601040	0.00259	0.0942	0.5074
	0.01507	0.0650	0.8619
	0.00909	0.0600	0.6923

Rövid periódusú változók kategóriájába sorolt csillagok adatai I. Egy év periódusú moduláció nem tapasztalható.			
KIC sorszám	Frekvencia (c/d)	Amplitúdó	Fázis
2163829	0.00061	0.0159	0.0083
	0.00150	0.0038	0.8329
	0.17762	0.0027	0.4359
3339055	0.00061	0.0077	0.0619
	0.00150	0.0028	0.9464
	0.00334	0.0011	0.8884
3539483	0.00056	0.0058	0.4973
	0.00146	0.0040	0.4837
	0.00240	0.0017	0.8006
4742716	0.00065	0.0041	0.4078
	0.00221	0.0018	0.7121
	0.02576	0.0008	0.8673
4918925	0.00061	0.0107	0.0201
	0.00259	0.0026	0.3165
	0.00178	0.0018	0.3839
5035849	0.00070	0.0239	0.2509
	0.00240	0.0068	0.8842
	0.00551	0.0032	0.5928
5090928	0.00065	0.0167	0.4929
	0.00259	0.0041	0.1573
	0.00343	0.0039	0.8292
5357380	0.00061	0.0198	0.0555
	0.00164	0.0061	0.1514
	0.00433	0.0033	0.6023
5525172	0.00061	0.0202	0.0375
	0.00254	0.0054	0.8705
	0.10132	0.0028	0.4645
6370104	0.00066	0.0243	0.1050
	0.00178	0.0083	0.3582
	0.06755	0.0064	0.9660
6382244	0.00070	0.0030	0.7006
	0.00541	0.0014	0.7264
	0.00810	0.0008	0.1690
6464293	0.00065	0.0059	0.3615
	0.00442	0.0009	0.1601
	0.00141	0.0010	0.1695
6937131	0.00061	0.0208	0.9670
	0.00268	0.0070	0.9277
	0.00164	0.0049	0.8584
7264847	0.00065	0.0062	0.4324
	0.00160	0.0006	0.7256
	0.00381	0.0004	0.5364
7285602	0.00061	0.0065	0.0806
	0.00155	0.0021	0.1963
	0.00273	0.0008	0.4712
7587506	0.00070	0.0117	0.8857
	0.00423	0.0029	0.7930
	0.08638	0.0028	0.5954
7687231	0.00075	0.0048	0.0233
	0.00230	0.0034	0.7176
	0.00386	0.0010	0.3910

Rövid periódusú változók kategóriájába sorolt csillagok adatai II. Egy év periódusú moduláció nem tapasztalható.			
KIC sorszám	Frekvencia (c/d)	Amplitúdó	Fázis
7899183	0.00065	0.0159	0.3730
	0.00353	0.0027	0.4979
	0.00819	0.0023	0.2952
7938294	0.00061	0.0097	0.5791
	0.00230	0.0070	0.5257
	0.00155	0.0050	0.6033
7983752	0.00061	0.0061	0.0222
	0.00155	0.0016	0.2979
	0.00296	0.0008	0.9707
8114988	0.00075	0.0086	0.2597
	0.00183	0.0036	0.2440
	0.00715	0.0016	0.2388
8211008	0.00061	0.0041	0.9081
	0.00174	0.0022	0.8144
	0.00287	0.0012	0.9350
8227019	0.00070	0.0077	0.7100
	0.00183	0.0024	0.3401
	0.00489	0.0019	0.0712
8712103	0.00061	0.0033	0.9005
	0.00268	0.0020	0.1667
	0.00560	0.0015	0.3507
9223757	0.00277	0.0024	0.5952
	0.00160	0.0020	0.2274
	0.00833	0.0018	0.2109
10055061	0.00061	0.0167	0.0420
	0.00146	0.0038	0.5239
	0.00249	0.0017	0.6275
10215903	0.00061	0.0090	0.0668
	0.00259	0.0030	0.2704
	0.00155	0.0025	0.1618
10338650	0.00061	0.0087	0.9718
	0.00155	0.0027	0.1583
	0.00668	0.0019	0.3026
10649021	0.00065	0.0046	0.5089
	0.05525	0.0025	0.2847
	0.14531	0.0020	0.6613
10709020	0.00155	0.0082	0.1889
	0.00080	0.0091	0.7192
	0.00273	0.0023	0.7327
10790188	0.00070	0.0221	0.2270
	0.00588	0.0039	0.6832
	0.00273	0.0025	0.2840
10802990	0.00061	0.0078	0.9834
	0.00150	0.0035	0.9576
	0.00259	0.0014	0.4093
11968730	0.00183	0.0041	0.3128
	0.00061	0.0025	0.4358
	0.16015	0.0021	0.5945
12118871	0.00061	0.0039	0.0144
	0.00244	0.0021	0.2497
	0.01073	0.0006	0.8550

Rövid periódusú változók kategóriájába sorolt csillagok adatai III. Egy év periódusú moduláció nem tapasztalható.			
KIC sorszám	Frekvencia (c/d)	Amplitúdó	Fázis
12158574	0.00075	0.0067	0.2681
	0.00240	0.0013	0.0912
	0.00546	0.0007	0.8511
12350093	0.00061	0.0081	0.0565
	0.00178	0.0080	0.1951
	0.00292	0.0046	0.3442
12406610	0.00061	0.0125	0.0118
	0.00160	0.0037	0.6891
	0.00292	0.0022	0.3969
12645224	0.00065	0.0280	0.9008
	0.00240	0.0074	0.5430
	0.08492	0.0056	0.2989

Rövid periódusú változók kategóriájába sorolt csillagok adatai I. Egy év periódusú moduláció tapasztalható.			
KIC sorszám	Frekvencia (c/d)	Amplitúdó	Fázis
3236748	0.00249	0.0053	0.8503
	0.00164	0.0018	0.1820
	0.00819	0.0016	0.5632
3833455	0.00273	0.0090	0.6625
	0.00183	0.0017	0.4642
	0.00084	0.0015	0.0577
4908338	0.00287	0.0045	0.7755
	0.00061	0.0035	0.9472
	0.00178	0.0022	0.1456
5270737	0.00103	0.0098	0.1943
	0.00240	0.0056	0.7285
	0.00339	0.0035	0.8670
5438922	0.00061	0.0068	0.0709
	0.00263	0.0021	0.7107
	0.00155	0.0008	0.2545
5443536	0.00098	0.0060	0.7669
	0.00197	0.0026	0.1718
	0.00320	0.0022	0.2697
5566078	0.00061	0.0019	0.4973
	0.00282	0.0022	0.5289
	0.00183	0.0015	0.2095
5906289	0.00061	0.0126	0.5175
	0.00273	0.0050	0.7947
	0.00160	0.0027	0.1813
5961703	0.00061	0.0321	0.0526
	0.00259	0.0120	0.2444
	0.00155	0.0093	0.3443
5989072	0.00056	0.0063	0.6800
	0.00141	0.0038	0.1156
	0.00244	0.0023	0.1425
6038057	0.00061	0.0107	0.0138
	0.00263	0.0044	0.5725
	0.00155	0.0021	0.2940
6122976	0.00056	0.0076	0.6423
	0.00268	0.0048	0.9513
	0.00160	0.0027	0.6261
6229677	0.00244	0.0022	0.3920
	0.00070	0.0017	0.7005
	0.00551	0.0006	0.5108
6761256	0.00061	0.0076	0.9696
	0.00160	0.0038	0.5261
	0.00541	0.0015	0.2054
6838420	0.00065	0.0108	0.3910
	0.00277	0.0108	0.1237
	0.00155	0.0027	0.2001
7286739	0.00061	0.0172	0.9813
	0.00263	0.0086	0.5591
	0.00824	0.0018	0.5435
7672453	0.00070	0.0047	0.7772
	0.00259	0.0036	0.1143
	0.00155	0.0018	0.7592

Rövid periódusú változók kategóriájába sorolt csillagok adatai II. Egy év periódusú moduláció tapasztalható.			
KIC sorszám	Frekvencia (c/d)	Amplitúdó	Fázis
7703530	0.00061	0.0080	0.9601
	0.00146	0.0026	0.4800
	0.00277	0.0025	0.0271
7954576	0.00056	0.0101	0.5387
	0.00273	0.0066	0.3003
	0.00150	0.0036	0.8280
8037095	0.00094	0.0086	0.5570
	0.00259	0.0057	0.2210
	0.00178	0.0035	0.8453
8094889	0.00061	0.0072	0.0454
	0.00259	0.0062	0.1799
	0.00532	0.0018	0.5832
8231947	0.00061	0.0066	0.9511
	0.00268	0.0043	0.9301
	0.00579	0.0007	0.8142
8414116	0.00070	0.0075	0.7424
	0.00259	0.0021	0.4433
	0.00438	0.0014	0.6901
8589163	0.00268	0.0037	0.3494
	0.00065	0.0021	0.3450
	0.00536	0.0020	0.4110
8629689	0.00061	0.0076	0.0488
	0.00263	0.0055	0.4651
	0.00164	0.0031	0.1096
8689860	0.00070	0.0062	0.6309
	0.00268	0.0041	0.9034
	0.00155	0.0011	0.2780
8840004	0.00259	0.0048	0.5282
	0.00065	0.0016	0.3588
	0.00560	0.0014	0.3084
8976283	0.00277	0.0064	0.0245
	0.00061	0.0041	0.9943
	0.00174	0.0018	0.6786
9158722	0.00061	0.0112	0.5048
	0.00268	0.0090	0.9388
	0.00155	0.0059	0.7504
9334666	0.00277	0.0076	0.6944
	0.00070	0.0042	0.3271
	0.00569	0.0024	0.8892
9363969	0.00065	0.0084	0.9576
	0.00268	0.0040	0.4202
	0.01097	0.0007	0.3805
9415248	0.00065	0.0097	0.3753
	0.00263	0.0034	0.8293
	0.00164	0.0019	0.9367
9521696	0.00273	0.0073	0.3240
	0.00084	0.0029	0.8339
	0.00791	0.0011	0.6447
9574272	0.00061	0.0042	0.0137
	0.00155	0.0020	0.1708
	0.00367	0.0014	0.8335

Rövid periódusú változók kategóriájába sorolt csillagok adatai III. Egy év periódusú moduláció tapasztalható.			
KIC sorszám	Frekvencia (c/d)	Amplitúdó	Fázis
9754625	0.00381	0.0013	0.0818
	0.00202	0.0013	0.8826
	0.00075	0.0012	0.3205
9821863	0.00141	0.0035	0.0859
	0.00221	0.0033	0.9881
	0.20725	0.0018	0.0313
9825822	0.00070	0.0044	0.9397
	0.00282	0.0028	0.0164
	0.00485	0.0012	0.7915
10128746	0.00244	0.0108	0.6262
	0.00075	0.0095	0.1060
	0.00414	0.0059	0.0899
10337695	0.00065	0.0108	0.5344
	0.00268	0.0065	0.8906
	0.00174	0.0035	0.9337
11068543	0.00065	0.0155	0.4233
	0.00315	0.0040	0.3503
	0.00155	0.0022	0.3282
11193457	0.00065	0.0097	0.4303
	0.00343	0.0029	0.6683
	0.00211	0.0031	0.6408
11415061	0.00065	0.0058	0.3432
	0.00282	0.0026	0.4766
	0.00146	0.0006	0.4576
11623314	0.00065	0.0146	0.3924
	0.00282	0.0046	0.4912
	0.00141	0.0033	0.9979
11725476	0.00065	0.0104	0.4334
	0.00301	0.0059	0.1167
	0.00155	0.0017	0.2309
12007085	0.00065	0.0159	0.3743
	0.00268	0.0047	0.2433
	0.00155	0.0025	0.2220
12121435	0.00169	0.0033	0.4672
	0.00287	0.0025	0.9066
	0.00070	0.0019	0.6922
12219282	0.00065	0.0112	0.8620
	0.00263	0.0063	0.8831
	0.00504	0.0025	0.2418
12301444	0.00061	0.0145	0.0358
	0.00268	0.0082	0.2857
	0.00155	0.0041	0.2002