

Szegedi Tudományegyetem  
Természettudományi és Informatikai Kar  
Kísérleti Fizikai Tanszék

Diplomamunka

## A CH Cygni Kepler űrtávcsővel mért fényességváltozása

Készítette: Bódi Attila  
Csillagász MSc szakos hallgató

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

Szeged  
2014

# Tartalomjegyzék

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Bevezető</b>   | <b>2</b>  |
| <b>1. A <i>Kepler</i> űrtávcső</b>                                  | <b>7</b>  |
| <b>2. Fénygörbék előkészítése</b>                                   | <b>12</b> |
| <b>3. A Fourier- és wavelet-analízishez alkalmazott programok</b>   | <b>14</b> |
| 3.1. Period04 . . . . .   | 14        |
| 3.2. WinWWZ . . . . .   | 15        |
| 3.2.1. Wavelet térkép különböző paramétereinek hatásai . . . . .    | 16        |
| <b>4. Mira és félszabályos típusú változócsillagok osztályozása</b> | <b>20</b> |
| <b>5. A CH Cygni részletes analízise</b>                            | <b>21</b> |
| 5.1. Összefoglaló az eddigi ismeretekről . . . . .                  | 21        |
| 5.2. Vörös óriás komponens vizsgálata . . . . .                     | 33        |
| 5.3. Kis amplitúdójú változások vizsgálata . . . . .                | 43        |
| <b>Összefoglaló</b>   | <b>47</b> |
| <b>Köszönetnyilvánítás</b>  | <b>49</b> |
| <b>Irodalomjegyzék</b>  | <b>50</b> |

# Bevezető

A csillagok mindegyike mutat valamilyen időskálán fényváltozásokat. A különböző típusú változócsillagok esetében a fényváltozások többé-kevésbé szabályosak, melyeket más-más okok váltanak ki. A dolgozatom célja a hosszabb és kevésbé szabályos periódusokat mutató vörös óriás csillagok vizsgálata.

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

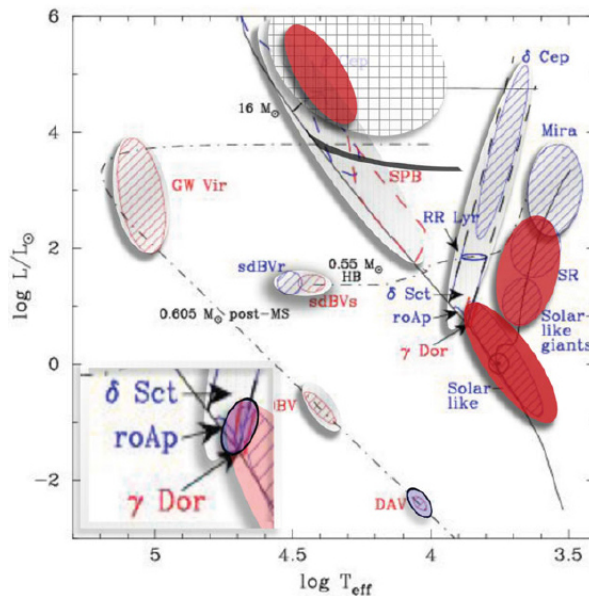
A csillagok fejlődésének útvonalát a Hertzsprung–Russell diagramon szokták ábrázolni (1. ábra). A vízszintes tengelyen az effektív hőmérséklet logaritmusát (balról jobbra csökkenve) vagy a színképosztályt, a függőlegesen a luminozitást vagy az abszolút fényességet szokták ábrázolni.

A diagramot metsző, a bal felső sarokból induló, a jobb alsóban végződő görbét 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, valamint az SZTE Csillagász mesterképzéséhez kapcsolódó elektronikus tananyagban találhatunk (<http://astro.u-szeged.hu/ismeret/valtozok/valtozok.htm> és <http://astro.u-szeged.hu/oktatas/asztrofizika/html/node61.html>).



1. ábra. Pulzáló változócsillagok a Hertzsprung–Russell diagramon. A különböző színű területek az eltérő gerjesztési mechanizmusokat jelölik: a  $\kappa$  mechanizmust a világos szürke, a sztochasztikus mechanizmust a piros és a konvektív blokkoló mechanizmust a feketével határolt kék terület jelzi. Az ábra bal alsó sarkában látható rész a klasszikus instabilitási sáv alsó részét nagyítja fel, ahol a különböző instabilitási sávok átfedése látható (Antoci, 2014).

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

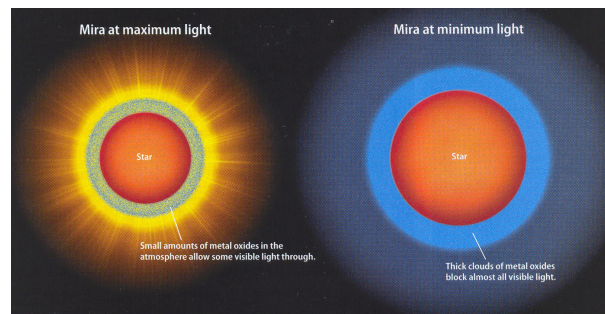
A pulzáció létrejöttéhez egy egyensúlyi helyzet és egy gerjesztő folyamat szükséges. Ezen pulzációknak kétféle módusa lehet attól függően, hogy a csillag rétegei radiális irányban tágulnak és húzódnak össze (radiális pulzáció) vagy oldal irányú elmozdulás is történik (nemradiális pulzáció).

- **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 fényváltozást mutató 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 ( $\chi$  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).



2. ábra. A mira csillagok fényessége a sugárral fordítottan arányosan változik. A legkisebb sugárhoz a legfényesebb, a legnagyobb sugárhoz a leghalványabb állapot tartozik. Ekkor ugyanis a lehülő légkörben rekombinálandó fém-oxidok (pl. TiO) leárnyékolják a csillag fényét (Zimmerman, 2007).

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 (2. ábra).

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, fénygörbéjük 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 mirákhhoz 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 ezen altípus esetében.

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 alosztályuk van. A K, M, C és S színképosztályú óriásokat *Lb* és a szabálytalan szuperóriásokat *Lc*-vel jelöljük. Ezeket a kis amplitúdójuk miatt elég nehéz vizsgálni.

- **Szimbiotikus változók**

Olyan esetben beszélünk szimbiotikus változóról, ha az objektum spektruma összetett, egyszerre mutat hűvös csillagokra jellemző abszorpciós sávokat és magasan gerjesztett

emissziós vonalakat. A Z Andromedae (ZAND) típusú változók egy szoros kettős rendszert alkotnak, ahol az egyik tag egy forró szubtörpe, a másik egy M (ritkán G vagy K) típusú óriás. A rendszer tagjait, a vörös óriásból származó egy vagy több közös héj vagy burok veszi körül.

A Z Andromedae típusú változók igen komplex fényváltozást mutatnak. A kiváltó okok között lehet a gázhéj opacitásának és gerjesztettségének változása, a forró csillag "anyaggyűjtése" a gázhéjból, ennek időbeli változásai, valamint a hűvös csillag hosszú periódusú változásai. Az ebbe a kategóriába sorolt objektumok fényváltozásaiban jelentős eltérések lehetnek. Magánál a Z And-nál nagyjából 714 napos kváziperiodikus fluktuációk figyelhetők meg, mellyel  $4^m$  amplitúdójú kitörések társulnak. Az AG Peg változó fénygörbéje teljesen eltér ettől. A múlt században egy 100 év hosszú  $3^m$  amplitúdójú kitörés kezdődött, melyet egy kb. 800 nap körüli periódikus változás követett.

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

A dolgozat elkészítése során a fénygörbék vizsgálatához a Fourier- és wavelet-analízist használtam.

# 1. A *Kepler* űrtávcső

Az exobolygók keresésére 2009. március 7-én bocsájtották fel a *Kepler* űrtávcsövet. Fő célként a lakhatósági zónában keringő, Föld típusú fedési exobolygók kimutatását tűzik ki. 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 programot 3,5 évre tervezték, melyet 2012 novemberében további 4 évvel meghosszabítottak. A távcső térbeli irányba állítását és stabil iránytartását 4 db lendkerékkel végezték. Ezek közül egy már akkor sem működött, így nem lehet tudni, hogy a további 4 évre kitűzött célokból mennyit sikerül majd teljesíteni. 2013 májusában a fennmaradó - a távcső irányításához feltételen szükséges - 3 db lendkerékből egy újabb tönkrement, ami a mérések befejezését jelentette. Így összesen 4 év hosszú missziót sikerült megvalósítani.

A távcső a görbült fókuszban elhelyezett, 42 db CCD chipre képezte le a képet (4. ábra), melynek felbontása 2200x1024 pixel. A megfigyelt égterület 105 négyzetfok volt. Az észleléseket a 430-840 nm közötti hullámhossztartományban végezték. Az optikai útban semilyen mozgó alkatrészt, színszűrőt, detektort, nem helyeztek el. A távcső folyamatosan a Hattyú (Cygnus) és a Lant (Lyra) csillagképek irányába nézett. A folyamatos megfigyelést a 372,5 napos keringési idejű, Nap körüli, úgynevezett Föld-követő pálya biztosította.

A 4 év során a folyamatos megfigyelés érdekében a távcső körülbelül negyed évente 90 fokkal elfordult, annak érdekében, hogy a napelemek mindig a Nap irányába nézzenek, illetve a hűtőrész a Nappal ellentétes oldalon legyen. A célpontok 9-16 magnitúdós tartományba estek, kivételes esetben lehetőség volt 7 magnitúdós objektumok fotometriájára is, és elvileg akár a 20 magnitúdós vagy annál halványabb csillagok is vizsgálhatóak voltak. A nagyméretű CCD-nek köszönhetően nagy volt a csillagok szögmérete, ezért rengeteg foton volt gyűjthető, ami javította a jel/zaj viszonyt. A telítődés elkerülése érdekében 6 másodpercenként olvasták ki az adatokat. A képek egy része 1 perces, a többség 30 perces expozíciós idejű felvételnként összegződött. Az adatok letöltése és a parancsok, valamint az új objektumok feltöltése havonta történt. Az összes adat tárolását nem tudták megoldani, ezért csak a kijelölt objektumok pixelei maradtak meg, a többi törlődött.

A *Kepler* három különböző kategóriába eső célpontokat észlelt:

- bolygókeresésre használt,
- asztroszeizmológiai,

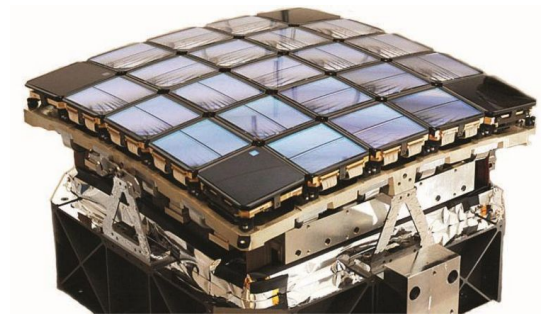


- Guest Observer ("vendégészlelő") célpontokat.

A első programban 150 000, főként F-K színképtípusú fősorozati csillagot figyeltek meg. Fő cél a más csillagok körül, a lakhatósági zónában keringő, Föld típusú bolygók kimutatása volt. Ezen célpontokat a küldetés teljes ideje alatt folyamatosan vizsgálták.



3. ábra. A *Kepler* űrtávcső felépítése (Link4).



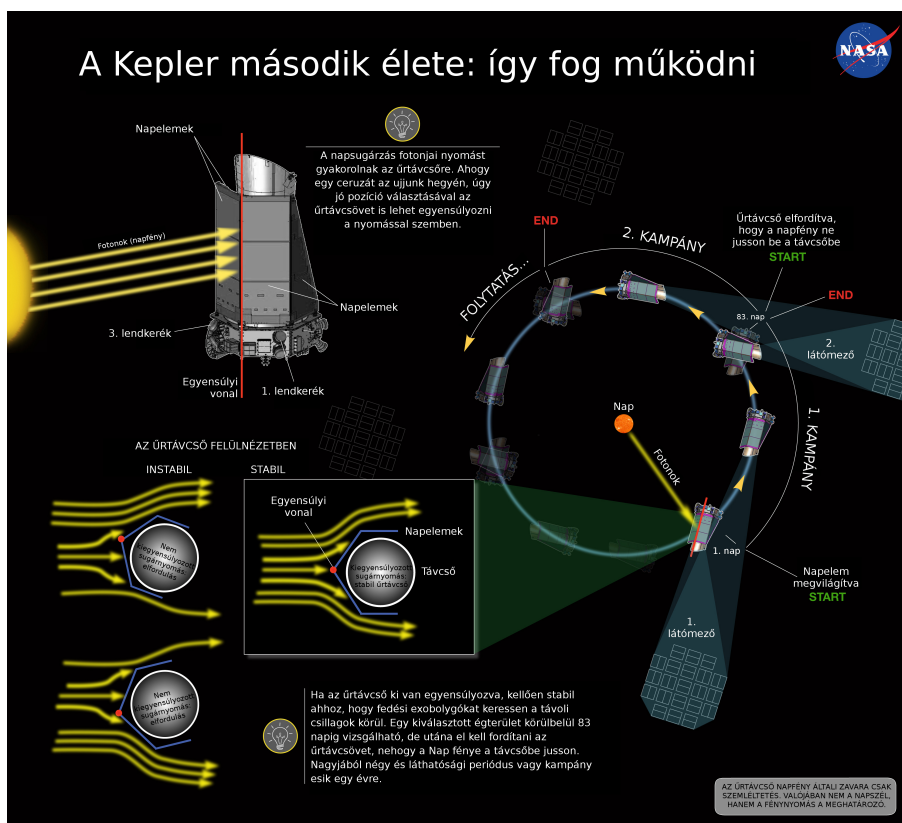
4. ábra. A *Kepler* űrtávcső CCD kamerája (Link5).

Az asztroszeizmológiai csoportba mintegy 4000 csillag megfigyelése került. A vizsgálatok kettős célt szolgáltak, 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 CSFK KTM CsI), a cefeidákét Szabó Róbert (MTA CSFK KTM CsI) vezeti. A célpontok kijelölésében, az adatfeldolgozásban, a földi támogatásban a magyar kutatók is részt vettek (Benkő - Szabó, 2010).

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

Az második lendkerék meghibásodása ellenére a *Kepler* űrtávcső műszerei továbbra is kiválóan működnek. A 42 db CCD-ből mindössze egy páros romlott el. A megmaradt üzemanyag is még évekre elegendő. Miért is kellene abbahagyni a kutatómunkát ezzel, a valaha létezett legpontosabb és legjobb időbeli lefedettségű fotometriát biztosító műszerrel (Molnár, 2014)?

2013 nyarán a *Keplert* gyártó Ball Aerospace próbálkozott is a meghibásodott lendkerekek újraindításával, de nem jártak sikerrel. A túl nagy súrlódás miatt nyilvánvalóvá vált, hogy az eredeti üzemmód nem állítható vissza. Persze nem ez volt az első ilyen eset. Az IUE (International Ultraviolet Explorer) űrtávcső lendkerekei is sorban tönkre mentek. Ezen esetben az egyetlen megmaradó lendkerék mellett a térbeli orientációt a napszerző és a csillagkövető kamerák biztosították. A *Kepler* esetében a CCD-k eltérő érzékenysége miatt ez a módszer nem működne, mivel ha egy csillag képe az egyik pixelről egy másikra csúszik át, akkor a detektált fényesség megváltozik. Ezt a földi mérések esetében flat-field korrekcióval oldják meg, de a *Kepler* erre az űrben nem képes. Másik módszer az, hogy a csillagok képét egy adott pixelen tized- vagy akár századpixelnnyi pontossággal tartjuk. Ennek feltétele a pontos térbeli orientáció, amihez három lendkerék kellene.



5. ábra. Az ábra az egyensúlyozás problémáját mutatja. Ha a sugárnyomás a távcső valamely oldalán nagyobb forgatónyomatékokat képes kifejteni, akkor az forogni kezd a hossz tengelye körül (Link1).

A mérések során a fő problémát a Nap sugárzása okozza. A beérkező fotonok sugárnyomása elfordítja a távcsövet, ha a tömegközépponthoz képest valamely irányban nagyobb forgatónyo-

matékot tud kelteni, mint a többiben. A hiányzó harmadik lendkerék által szabályozott tengely mentén a távcsövet vagy kiegyensúlyozzák, vagy az billegni, forogni fog, ahogy az a 5. ábrán látható.

2013 augusztusában a *Kepler* működéséért felelős NASA Ames Kutatóközpont felhívásában a tudományos közösségtől arra vártak javaslatokat, hogy milyen módon lehetne a távcsövet szabályozni, illetve hogy milyen méréseket lehetne végezni egy kissé billegős űrtávcsővel. A beérkezett 42 mű között kettő magyar kutatók által készített is szerepelt. Szabó Róbert vezetésével készült javaslat a déli ekliptikai pólust, a Nagy Magellán-felhő melletti égterületet javasolta, míg Molnár László és társszerzői által írt mű az eredeti területen található nagyobb amplitúdójú változók (fedési kettősök, RR Lyrek és  $\delta$  Scuti csillagok stb.) továbbészleléseinek előnyeit foglalta össze.

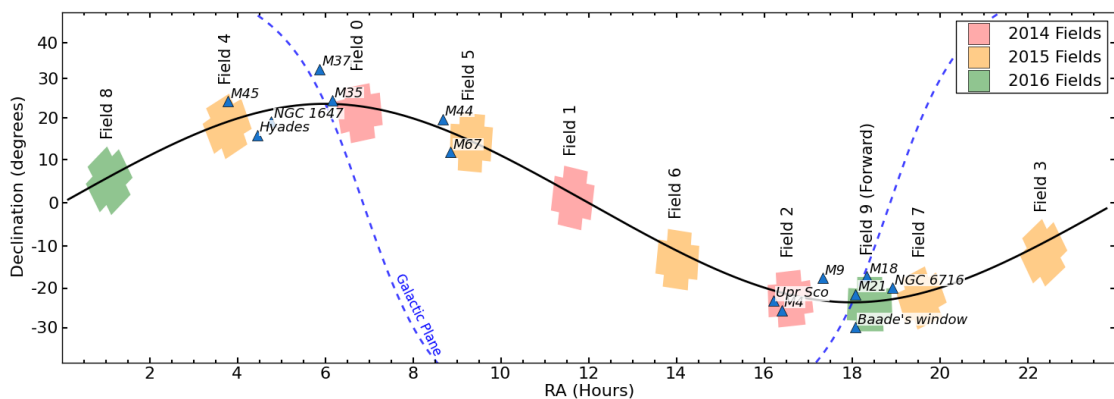
A 2013 novemberében tartott második *Kepler* tudományos konferencián derült fény az űrtávcső jövőjére. A K2-nek nevezett küldetés terveit ott mutatták be.

Elsődlegesen azt a problémát kellett megoldani, hogy hogyan lehet a Napból érkező fotonok sugárnyomásával szemben a távcsövet kiegyensúlyozni. Ezt úgy lehet megvalósítani, hogy a napelemeket pontosan olyan irányba kell állítani, hogy a középvonalhoz képest a Nap mindkét oldalon azonos nagyságú forgatónyomatékokat hozzon létre. Ekkor a látómező nem fordul el. Ez a jelenlegi vagy az ekliptika síkjára merőleges látómező esetében nem kivitelezhető. Így a magyar kutatók által javasolt méréseket sem lehet elvégezni.

A távcsövet a jövőben elfektetik, azaz a napelemek középvonala a pályasíkba fog esni. Mivel a *Kepler* Föld követő pályán kering, így a látómező az ekliptika síkjába fog esni. Ennek hátránya, hogy a Napot is ebben a síkban látjuk.

Az előbbi okok miatt a továbbiakban nem lehet majd hosszú, folytonos adatsorokat kapni. A számítások azt mutatják, hogy maximum 83 napig lehet majd egy adott irányban észlelni, majd újabb látómezőt kell keresni. Ennek oka, hogy hosszabb idő elteltével a fény már túl kis szögben esik a napelemekre, illetve a Nap fénye is beszűrődhet. A programot 2 évre tervezik, így 8-12 területet lehet majd megfigyelni, ha 40-80 nap hosszú észleléseket tételezünk fel. A tervezett mérési területek az 6. ábrán láthatóak.

Annak a kérdésnek az eldöntése érdekében, hogy a távcső képes lesz-e a jövőbe is elég pontosan fényességet mérni, 2013 decemberében egy 6 napos mérést végeztek (Link2). A



6. ábra. A K2 tervezett mérési területei az Ekliptika mentén (Link2).

teszt során egy 12 magnitúdós csillag adatait elemezve arra jutottak, hogy egy Föld-analógnak megfelelő bolygó 6 órás fedése alatt a zaj mindössze 80 ppm (milliomod rész), ami csak négyszer nagyobb az eredeti zajszintnél, a konzervatív jóslatokkal szemben, melyek legalább néhány száz ppm-es zajt jósltak előre.

A K2 során egy látómezőben 10-20 000 célpontot fognak megfigyelni. Az integrációs idők nem változnak, továbbra is egy, illetve harminc perces időközökkel fognak méréseket végezni. A NASA Asztrofizikai Divíziójának 2014 májusi döntése alapján a *Kepler* program a K2 misszióval folytatódik (Link6).

## 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 (Bódi, 2012).

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

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

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

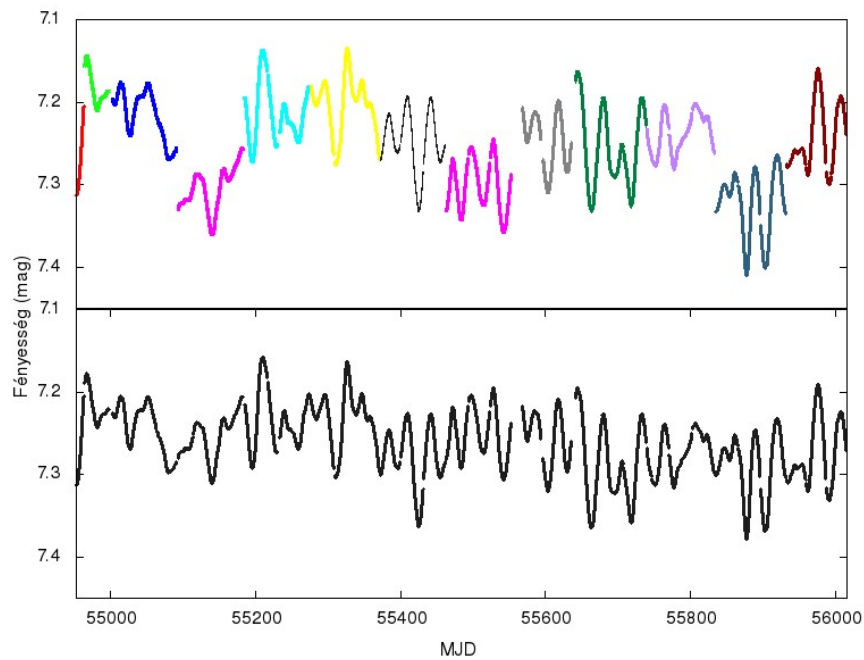
A távcső váratlan esemény következtében biztonsági üzemmódba kapcsolhat. Ilyen esemény lehet egy kozmikus sugár becsapódása vagy egy hibás parancs kiadása. Az ilyen fajta hibát nem lehet kiküszöbölni, ezek a fénygörbékben eltérő hosszúságú űröket hagynak.

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 7. 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 esett, akkor nem történt mérés. Ilyen csillagból 79 darab volt, melyek fénygörbéjét nem tudtuk megfelelő módon összetolni.



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

## 3. A Fourier- és wavelet-analízishez 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

$\Omega_i$ , az  $i$ -edik komponens frekvenciája

és  $\Phi_i$ , 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 ürök 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 átlépnénk, 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 csak a CH Cygni *Kepler* úrtávcső által mért fénygörbéje esetében 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 "fünek" 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,  
 $\tau$ , az időeltolás,  
és  $g^*[f(t-\tau)]$ , az analizáló wavelet komplex konjugáltja.

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  $\tau$  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, mely elérhető windows rendszer alatt futó verzióban, valamint található egy fortran nyelven írt változata is. A fortran nyelvű verzió futtatása linux rendszer alatt lehetséges. Bemenő paraméterként megadhatjuk az idő- és frekvenciabeli felbontást, valamint a vizsgálni kívánt idő- és frekvencia-tartományt és az ún. "c" paramétert.

A CH Cygni vizsgálata esetében a wavelet-térkép a fortran nyelven írt változattal készült, amely esetében a wavelet értékeket logaritmikus skálán ábrázoltam. A többi csillag vizsgálata során a windows alatt futó verziót alkalmaztam.

### 3.2.1. Wavelet térkép különböző paramétereinek hatásai

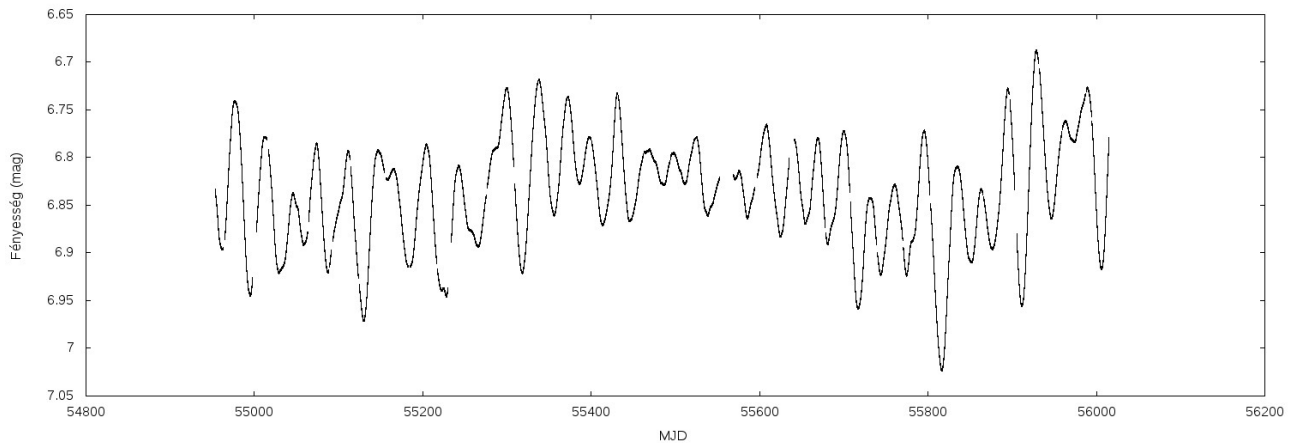
Wavelet térkép készítésekor több paramétert is beállíthatunk manuálisan. Megadható, hogy az adatsor milyen hosszú szakaszát, milyen frekvencia-tartományban vizsgáljuk. Ezen értékek változtatásával csak a vizsgálni kívánt területet jelölhetjük ki. Vannak olyan paraméterek, melyek hatással vannak a térkép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

Az 9., 10. és 11. ábrán található wavelet térképek mindegyike a fénygörbe teljes időbeli hosszára, valamint frekvencia  $0,5 \text{ c/d}$  (ciklus/nap) értékéig készült el.

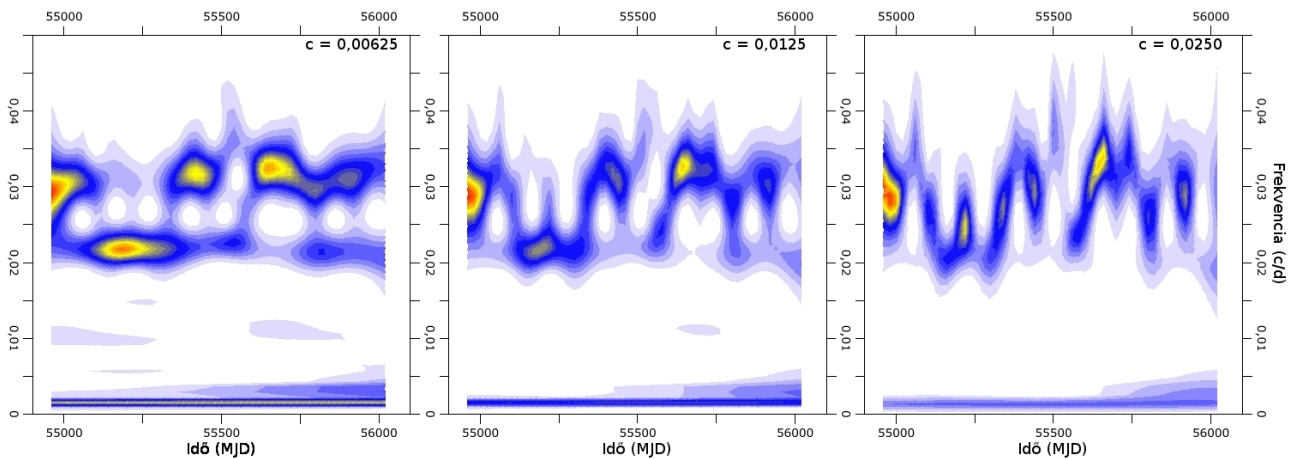
A "c" paraméter módosításával tudjuk beállítani, hogy a frekvenciabeli vagy az időbeli felbontás legyen a jobb. A kettő között fennáll egy határozatlansági reláció, hasonlóan a kvantummechanikában tapasztalhatóhoz. A programban alapértelmezettnek a  $c = 0,0125$

érték van beállítva. A "c" paraméter különböző értékeinél elkészített wavelet térképek az 9. 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.



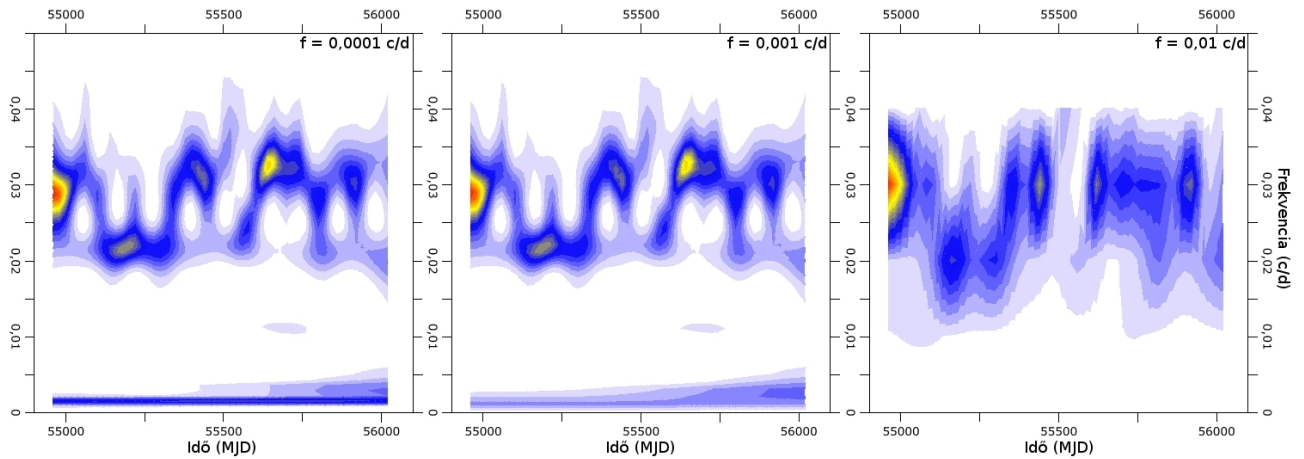
8. ábra. A KIC 2582664 jelű csillag fénygörbéje.



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

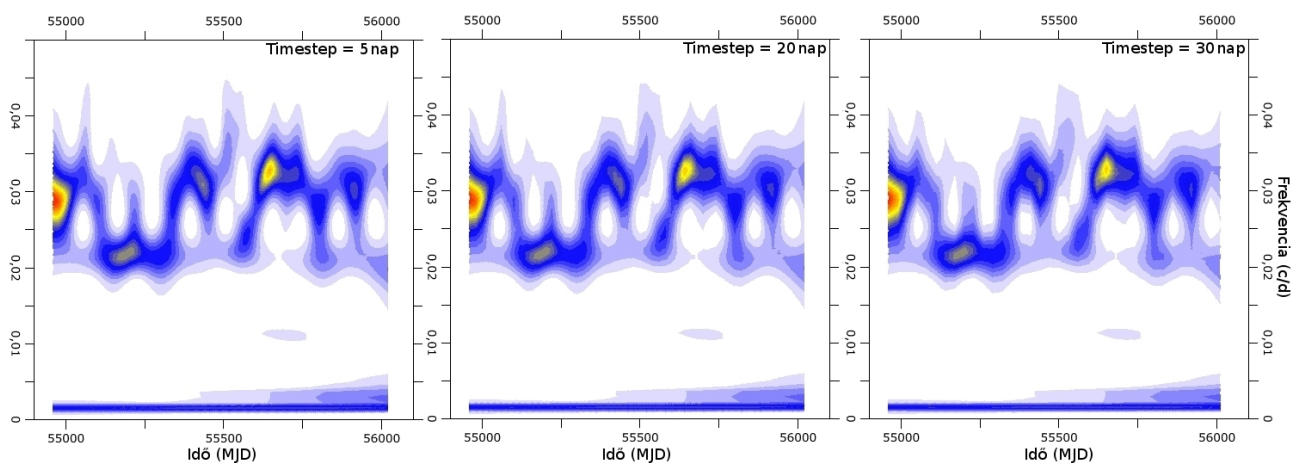
A 10. ábrán a frekvencia lépésköz változtatásának hatása látható a wavelet térképekre. A jobb oldali ábrán a lépésköz azonos nagyságrendű a maximális frekvencia értékkel, a kisebb frekvenciájú komponensek nem is jelennek meg a térképen, ezért az ilyen wavelet térkép felbontása túl kicsi ahhoz, hogy bármilyen 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 frekvencia-beli felbontást választani, mert a lefutás ideje érzékelhetően megnő, de az eredményben nem látszik a javulás.



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

A 11. 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.



11. 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. A CH Cygni fénygörbéjének vizsgálata során az alábbi paraméter beállításokat alkalmaztam:  $c = 0,0125$ ,  $f = 0,25 c/d$ , timestep = 20 nap. Egyetlen esetben tértem el ezektől. Az 5.2 fejezetben található wavelet térkép esetében a frekvenciabeli felbontást  $0,0001 c/d$  értékre változtattam, mivel ekkor a vizsgált frekvencia tartomány csak  $0,015 c/d$ -ig terjed.

## 4. Mira és félszabályos típusú változócsillagok osztályozása

A Mira és a félszabályos típusú változócsillagok fényességváltozásainak periódusa és amplitúdója is igen széles tartományon ingadozik. A *Kepler* 12. munkacsoportja ezen objektumokkal foglalkozik. A csillagok fénygörbéje a távcső negyedévente történő forgatása miatt nem folytonos, ezért az egymás után következő quatereket össze kellett illeszteni. Ez 219 csillag esetében sikerült, melyeket fényességváltozásuk alapján három osztályba soroltam (Bányai et al., 2013).

Az első osztályba (Hosszú periódusú változók) kerültek a több tíz naptól a több száz napig terjedő periódust és több magnitúdós fényességváltozást mutató csillagok. A második csoportba (Közepes periódusú változók) került csillagok néhány tíz napos periódusváltozással jellemezhetőek, néhány tized amplitúdó mellett. A periódusváltozás miatt ide már néhány század magnitúdó amplitúdójú változást mutató csillagok is bekerültek. A harmadik osztályba (Rövid periódusú változók) került csillagok néhány napos, esetleg ez alatti periódusokat mutatnak. Fényességváltozásuk a néhány tized, valamint a néhány ezred magnitúdó között változik.

A különböző osztályba sorolt csillagok bővebb jellemzése, a fénygörbék mellett frekvencia spektrumok és wavelet térképek, valamint a fényváltozások lehetséges okainak felvetése megtalálhatóak a TDK dolgozatomban (Bódi, 2012).

## 5. A CH Cygni részletes analízise

A CH Cygni felfedezése óta hatalmas fotometriai és spektroszkópai adatmennyiség gyűlt össze minden hullámhosszon. A bonyolult rendszer fizikai tulajdonságait még a mai napig sem sikerült minden kétséget kizáróan megfejteni. Emiatt az elmúlt évek során rengeteg szakcikk jelent meg az irodalomban, amelyekben található mérési adatokról és az azokból alkotott modellről készült összefoglalót mutatom be.

A *Kepler* űrtávcső nagyon pontos fotometriája révén mind a hosszú periódusú, nagy amplitúdójú, mind a rövid periódusú, kis amplitúdójú változások megfigyelhetők a fénygörbében. A dolgozatom ezen részének második alfejezetében a vörös óriás komponensre jellemző változásokat, majd az utolsó alfejezetben a *Kepler* pontossága által jól megfigyelhető nagyon kis amplitúdójú változásokat mutatom be.

### 5.1. Összefoglaló az eddigi ismeretekről

A CH Cygnit a fényváltozásának összetettsége alapján az ismert változó csillagok közül az egyik legbonyolultabb rendszernek tekinthetjük. Ezt mutatja az a tény is, hogy eddig több, mint 600 tudományos szakcikket írtak róla, valamint a Változócsillag-észlelők Amerikai Társaságának (AAVSO) adatbázisában közel százezer, amatőrök által mért fényesség adat érhető el.

A jelenleg M7IIIab+Be (Shenavrin et al., 2010) színeképtípusú szimbiotikus változóként ismert objektumot először Kasimir Graff figyelte meg 1924-ben, aki 90-100 nap hosszú változást észlelt és a csillagot félszabályos, M6 színeképtípusú óriáscsillagnak írta le, 1 magnitúdós amplitúdóval (Kiss, 2005). A későbbi mérésekből a 60 napostól egészen a 4700 napos kváziperiódusig találtak változásokat. Egy, a vörös óriásnak tulajdonított 100 napos periódust az 1885-ös adatokig visszamenőleg mindig sikerült kimutatni a fotografikus, majd a fotoelektronos mérésekből. A stabilitásból következően ennek oka vörös óriás pulzációja lehet. A fénygörbén a félszabályos változás mellett időnként egy-egy nagy amplitúdójú kitörés figyelhető meg. A spektroszkópai vizsgálatok útján fény derült rá, hogy ennek oka egy fehér törpe társcsillag, amelyre anyag áramlik át rá a vörös óriásból és akkréciós korongot alakít ki belőle. A korong instabilitásai vezetnek a megfigyelhető kitörésekhez.

A következőekben összefoglalom a CH Cygni alapvető paramétereit és azok alapján alkotott modelleket (Hinkle et al., 2009).

A CH Cygni fotometrikus fényváltozásait Muciek és Mikołajewski (1989), valamint Mikołajewski és munkatársai (1990a) tekintették át. A rendszer tömeget akkretáló komponense főként a kék hullámhosszbeli fényességhez járul hozzá. Az aktív fázisok során az akkréciós folyamatok az M óriás fényességének változását még az optikai tartományban is elfedhetik. Azonban a nyugodt fázisok során a kék tartományban is deketálható az óriás komponens.

A CH Cyg 1885 és 1963 között a nyugodt fázisban tartozkodott. Ez idő alatt egy késői típusú félszabályos változóként volt ismert. Muciek és Mikołajewski (1989) ezen fázis alatti vizsgálatai szerint az M óriás domináns periódusa kb. 100 nap. Az aktív fázis alatt ezen periódus alig észlelhető (Mikołajewski et al. 1992; Munari et al. 1996). A 100 napos periódus vizuális amplitúdója kb. 0,1 magnitúdó (Muciek & Mikołajewski 1989). A pontos periódus függ a mérés időpontjától. Mikołajewski és társai (1990a) szerint a domináns periódus 94 és  $99 \pm 2$  nap, míg egy újabb eredmény szerint (1992) ez  $102 \pm 3$  nap. Mikołajewski és társai (1992) megállapították, hogy a kb. 100 napos periódus hossza évszázadonként kb. 5 nappal nő és Wood és Zarro (1981) munkássága alapján azt feltételezték, hogy a vörös óriásban He-shell flash (He-héj felvillanás) zajlik. Mikołajewski és társainak (1990a; 1992) két cikke is megjegyzi, hogy a kb. 100 napos periódus szerint az óriás egy első felhangú pulzátor.

A kb. 100 napos periódus mellett gyakran egy kb. 770 napos is előkerül. Ezt a fotometriai periódust Mikołajewski és társai (1992) tanulmányozták részletesebben, eredményük szerint az amplitúdója a rövidebb hullámhosszak felé növekszik, de nem konzisztens módon a por extinkciójával. Továbbá az infravörös energia eloszlás alapján a spektrál osztály (és a hőmérséklet) is ciklusról-ciklusra változik, de ez a jelenség a kék tartományban nem figyelhető meg. Skopal és társai (2007) egy kb. 750 napos periódust is felismertek, közel egy magnitúdós V amplitúdóval, amely során a rendszer nyugalmi fázisban volt.

Az előbbi periódusok egyidejű megjelenését Payne-Gaposhkin (1954) publikálta. A hosszú másodlagos pulzátorok (LSP, Long Secondary Period) egyik osztályába sorolta a CH Cygnit és meghatározta a tipikus hosszú/rövid periódus arányt, amelyre kb. 9 adódott.

Hinkle és társai (2009) felismerték a 770 napos fotometriai és a 750 napos spektroszkópiai periódusok közelségét és feltételezik, hogy ezeket azonos mechanizmus gerjeszti. A 100 napos pulzációs periódust spektroszkópiai úton nem sikerült kimutatniuk.

Amikor az akkréciós korong az aktív fázisban van, akkor a spektrum kék és ibolya tartományát a korongból érkező sugárzás dominálja. Ekkor a fénygörbe meglehetősen össze-

tett (Eyres et al., 2002). Emiatt fedések kimutatásához nem elegendő csak az U sávban történő fényesség csökkenés kimutatása. Az első fedést az U sávban, amely 1985 májusa és októbere között következett be, Mikołajewski és munkatársai (1987) publikálták, amely során a vörös óriás fedte el a fehér törpe komponensét. A fedések közepének időpontjai: JD 2440585 és JD 2446270 (Hinkle et al., 2009). Ezt az állítást követően egy meggyőző bizonyítékot publikáltak, amely alátámasztja, hogy ez a fényesség csökkenés tényleg fedésből származik. Skopal és társai (1996a) összefoglalták a CH Cygni rendszerében, a fedés során bekövetkezett 5 változást. Ezek a következők: (1) a gyors optikai villódzás (flickering) eltűnik, (2) a fedés közepén az optikai spektrumot az M óriás kontinuum dominálja, (3) a fedés közepén átmenet van a dupla csúcsú Balmer emissziós vonalak és a gyenge, egy csúcsú emissziós vonalak között, (4) a fedés közepét megelőzően a  $H\alpha$  és  $H\beta$  dupla csúcsú emissziójában a vörös oldal dominál, míg a fedés közepe után a kék oldal, valamint a (5)  $[\text{Ne III}] 3869 \text{ \AA}$  és az  $[\text{O III}] 5007 \text{ \AA}$  hullámhosszú nebuláris vonalai felerősödnek. A 3. és 4. pont alapján az elfedett objektum egy forgó korong. Míg az 5. pont arra utal, hogy a fedés során a kék (UV) fluxus el volt nyomva, így a nebuláris vonalak láthatóvá váltak.

A fedések létét az 1999-es fedés megjósolása, majd megfigyelése bizonyította be (Eyres et al. 2002; Sokoloski & Kenyon 2003b). Eyres és társai (2002) a fedés UBV fotometriájának bemutatásával megmutatták, hogy az V-ben nem, B-ben tisztán és U-ban a legerőteljesebben látható. Ez várható egy forró objektumnak egy hűvös komponenssel való fedése során. Továbbá megmutatták, hogy az 1999-es fedés alkalmával sem tapasztalható a villódzás (flickering) jelenléte. A különböző akkréciós folyamatokhoz tartozó spektrálvonalak erőssége csökken a fedés során. A fedés közepének időpontja kb. JD 2451425 (Skopal et al., 2007).

A korábbi fedések időpontjaiból előre számolt 1999-es fedés időpontja eltér a mért időponttól (Mikołajewski et al., 1990a; Hinkle et al., 2009). Mivel a szimbiotikus csillagok esetében nem a melegebb komponens látható fedésben, hanem az UV-ben fényes forró foltot, így arra lehet következtetni, hogy az 1999-es fedés alkalmával az akkréciós korongban változások zajlottak (Hinkle et al., 2009).

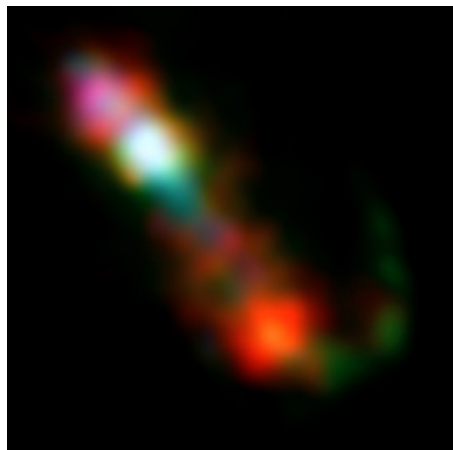
Az előbbi fedések összhangban vannak a 15,6 éves keringési periódussal. További problémát okoz az, hogy Skopal és társai szerint (1995; 1996a) a 2,1 éves periódus is fedéshez tartozik, de Sokoloski és Kenyon (2003a) feltételezik, hogy a Skopal és társai (1996a) által megfigyelt események nem fedések, hanem a belső akkréciós korong összeomlásainak eredményei.



Mikołajewski és társai (1990b) mérései szerint a gyors optikai változás (villódzás (flickering)) - amely egy kompakt, tömeget akkretáló objektumra utal - periódusa kb. 500 s. Más mérések szerint a periódus kb. 2200 - 3000 s közé esik (Hoard, 1993; Rodgers et al., 1997). Ez a változás a röntgen tartományban is észlelhető, ami megerősíti a másodlagos komponens fehér törpe létét (Ezuka et al., 1998).

Ismert, hogy a CH Cyg mind rádió (Taylor et al., 1986), mind optikai jetekkel is rendelkezik (Solf, 1987). Ezek információval szolgálnak a pályasík inklinációjáról. Crocker és társai (2002) által végzett mérésorozattól kiderült, hogy a jet kb.  $18 \pm 0,5$  év periódussal precesszál. Ez hasonló a 15,6 éves keringési periódushoz, amely arra utal, hogy a fehér törpe kering azon a pályán. Sokolowski és Kenyon (2003a) szerint lehetetlen megérteni a jetet és az optikai aktivitást a fehér törpe kísérő körüli akkréciós korong nélkül. Továbbá kapcsolatot találtak az optikai villódzás (flickering) és a fluxus változás között. A villódzás (flickering) csökkenése vagy eltűnése megfelel a kék tartománybeli fluxus csökkenésének. Arra jöttek rá, hogy ez a belső korong zavaraival áll kapcsolatban, amit jetek kialakulása követ.

A CH Cygniről készült kompozit felvételen látható a rendszerből kiáramló jet (12. ábra). Az ábra jobb alsó részén megfigyelhető zölddel jelzett optikai nyúlvány arra utal, hogy a jet precesszál. A jet külső részén látható csomók pedig arra utalnak, hogy a múltban erőteljes anyagkidobódás valamint, hogy a vörös óriás által létrehozott gázhéjjal való kölcsönhatás zajlott (Link 3).



12. ábra. A CH Cygni rendszerről a Chandra űrteleszkóppal (röntgen hullámhosszon, piros), a Hubble Űrtávcsővel (látható tartományban, zöld) és a VLA-val (rádió tartományban, kék) készült felvételek kompozit képe (Link3).

Kenyon és Fernandez-Castro (1987) fotometriai kalibrációja alapján a CH Cygni M6.5 ( $\pm 0.3$ ) III spektrál típusú. Ezt felhasználva Mürset és társai (1991)  $240_{-20}^{+30}$  pc távolságot számítottak egy spektroszkópiai parallaxisból. Ez közel áll a Hipparcos megfigyelésein alapuló  $268 \pm 66$  pc-hez (Viotti et al., 1997). van Leeuwen (2007) újra analizálta a Hipparcos parallaxisait, így 10 százalékkal kisebb értéket kapott a távolságra,  $244_{-35}^{+49}$  pc-et.

Biller és társai (2006) egy M6 III típusú csillagra vonatkozó Kurucz modell spektrumot és egy por spektrumot felhasználva az optikai és infravörös fotometriai adatsor illesztésével  $6900 L_{nap}$  luminozitást kaptak. Ez az érték közel áll a Skopal (1997) által számolthoz, amely esetében az UV-tól a távoli infravörösig terjedő energia eloszlást használt. A kapott bolometrikus luminozitás kb.  $8000 \pm 4000 L_{nap}$   $268 \pm 66$  pc távolság esetén. Ez a luminozitás kb.  $310 R_{nap}$ -nak felel meg.

Dyck és társai (1998)  $10,4$  mas (milli ívmásodperc) átmérőt mértek, melyből -  $244$  pc távolságot feltételezve - a csillag sugár  $273 R_{nap}$ . Schild és társai (1999) közeli infravörös fotometriából  $280 \pm 65 R_{nap}$ -at kaptak. Dyck és társai (1998) által mért sugár  $3084 \pm 130$  K effektív hőmérsékletté kalibrálható, amely jó egyezést mutat a Richichi és társai (1999) által kalibrált  $3150 \pm 95$  K-el.

A CH Cygni K magnitúdója  $-0,9$  és  $-0,3$  között változik. Egy  $K=-0,6$  és  $J-K=1,6$  átlagos értékekkel számolva - felhasználva a bolometrikus korrekciót (Bessel & Wood, 1984) - a bolometrikus magnitúdóra  $-4,3$  és a luminozitásra  $4200_{-1500}^{+2000} L_{nap}$  adódik (Hinkle et al., 2009).

A röntgen sugárzás az akkréciós korongból származik, amikor a fehér törpéről lerobbanó rétegek ütköznek a cirkumbináris anyaggal (Karovska et al., 2007). Ezuka és munkatársai (1998) röntgen spektroszkópiát alkalmaztak a fehér törpe hőmérsékletének és bolometrikus luminozitásának meghatározásához. A kapott kb.  $0,25 L_{nap}$  luminozitást a tömeg-sugár relációval kombinálva a tömegre egy alsó határ kapható, amely  $0,44 M_{nap}$ -nek adódott.

Az M óriás esetében a  $v \cdot \sin i$  értéket a közeli infravörös tartományban levő abszorpciós vonalak félértékszélességéből lehet meghatározni. Hinkle és társai (2009) a  $2,223 \mu\text{m}$  közeli atomi vonalakat és Fekel (1997) technikáját felhasználva meghatározták a  $v \cdot \sin i$  értéket, amire  $8 \pm 1 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ -t kaptak.

A vörös óriás tömegét csillagfejlődési modellekből is meg lehet határozni. Schmidt és társai (2006) meghatározták a CH Cygni vastartalmát, ezt és a bolometrikus fényességet

(-4,5-öt) felhasználva Vassiliadis és Wood (1993) táblázata alapján a kezdeti tömegnek kb. 1,5 és 3,5  $M_{nap}$  között kellett lennie. Más érvek szerint a tömeg közel 2  $M_{nap}$  (Hinkle et al., 2009). Az abszolút fényesség és az effektív hőmérséklet alapján Schmidt és társai (2006) a felszíni gravitációs gyorsulást,  $\log g$ -t kb. 0-nak találták, ami összhangban áll a 2  $M_{nap}$ -gel 280  $R_{nap}$  esetén.

A kettőségből adódóan a fehér törpe kezdeti tömegének nagyobbak kellett lennie a jelenlegi vörös óriás tömegénél, amely szerint a fehér törpe tömege  $>0.56 M_{nap}$  (Kalirai et al., 2008). Hinkle és társainak (2009) számítása szerint a fehér törpe tömege 0,7  $M_{nap}$ .

A CH Cygni esetében a por tömegvesztési rátája  $4 \cdot 10^{-7} \frac{M_{nap}}{év}$ , a gáz tömegvesztési rátája  $1 \cdot 10^{-8} \frac{M_{nap}}{év}$  az IRAS mérései alapján (Kenyon et al., 1988). Taranova és Shenavrin (2004; 2007) közeli infravörös fotometrián alapuló számításai alapján a por tömegvesztési rátája kb.  $3 \cdot 10^{-7} \frac{M_{nap}}{év}$ . 2006-ban egy por képződési folyamat miatt a fényesség lecsökkent a J,H,K,L és M sávban, ebből Taranova és Shenavrin (2007)  $2 \cdot 10^{-5} \frac{M_{nap}}{év}$  tömegvesztési rátát határozott meg.

Kenyon és munkatársainak (1988), valamint Taranova és Shenavrin (2004; 2007) eredményei a por tömegvesztési rátáját illetően hasonlóak, ezen értékeknél több nagyságrenddel nagyobbat kapott Taranova és Shenavrin az újabb, 2007-es mérések alapján.

A por hőmérsékletére Kenyon és társai (1988) 400 K-t, még Taranova és Shenavrin (2004) 750-800 K-t kapott. 400 K esetén a por sugara 108 CsE, 800 K esetén pedig 19 CsE (Kenyon et al., 1988). A 15,6 éves keringési periódus alapján a félnagy tengely 8 CsE, azaz bármelyik a valódi hőmérséklet, a por a keringési pályán kívül fekszik (Hinkle et al., 2009).

Fekel és munkatársai (2008) által felírt összefüggés alapján, felhasználva a komponensek sugarát és a periódusidőből származtatható félnagy tengelyt, a minimális inklinációra  $81^\circ$  adódik (Hinkle et al., 2009). Az inklináció meghatározható, ha összehasonlítjuk a fedés során megtett utat a vörös óriás sugarával, ebből  $84^\circ$  adódik (Hinkle et al., 2009), amely összhangban áll a Skopal (1995) által számolt  $i > 83^\circ$  -al.

A továbbiakban a CH Cygni megfigyelt paramétereire alapján felállított modelleket mutatunk be.

Mikołajewski és munkatársai (1987) az akkoriban elérhető elég gyenge minőségű radiális sebességek alapján állított fel egy modellt, amely szerint a CH Cygni egy kettős rendszer

kb. 5700 nap keringési periódussal és 0,55-ös excentricitással. Hinkle és társai (2009) mérései megerősítették a keringési periódust, de az excentricitást jelentősen csökkentették. Mikołajewski és munkatársai (1987) szerint a kettős egyik tagja egy M6 színeképtípusú,  $3 M_{nap}$ -ű óriás, a másik egy  $1 M_{nap}$ -ű fehér törpe, melyet a vörös óriásból származó akkréciós korong vesz körül. Az inklináció  $90^\circ$  volt, mivel az U sávban fedéseket azonosítottak.

Hinkle és munkatársai (1993) két független sebesség változást fedeztek fel, melyek egy 2,1 és egy kb. 15 éves periódusnak felelnek meg. Egyéb, jól ismert szimbiotikus változók alapján kis szeparációt feltételeztek a komponensek között. Továbbá, a fedésekre utaló jelek nem voltak meggyőzőek, így a keringési periódust 2,1 évesnek gondolták. Az alábbi összefüggés alapján a tömegre és a inklinációra lehet határokat becsülni (Russell et al., 1955):

$$f(m) = (m_{wd}^3 \sin^3 i) / (m_{rg} + m_{wd})^2 \quad (4)$$

ahol  $m_{wd}$  a fehér törpe,  $m_{rg}$  a vörös óriás tömege és  $i$  az inklináció. Mivel a jet közel a látóirányra merőleges síkba esik, így az inklinációt meg lehet becsülni, melyből az előbbi összefüggés alapján, nagyon alacsony fehér törpe tömeg adódik. A rendszer nem látható harmadik komponensének egy késői típusú törpét feltételeztek. Hinkle és munkatársainak (2009) pontosabb mérései rámutattak arra, hogy ez a modell nem működik.

Skopal és társai (1996a) azt állították, hogy a rövid és a hosszú periódusú fedések egyaránt megjelennek az optikai fénygörbében és a spektrumban is. Ez alapján egy módosított három-test modellt állítottak fel. Skopal és társai (1996b) más, ismert szimbiotikus változók alapján azt állították, hogy a 2,1 éves periódus keringésből származik. A megfigyelt fedések magyarázatához kicserélték a Hinkle és munkatársai (1993) modelljében szereplő G-K törpét egy óriással. Skopal (1997) szerint az egyik óriásnak igen fényesnek kell lennie, míg Taranova és Shenavrin (2004) úgy gondolják, hogy a két óriás közel azonos.

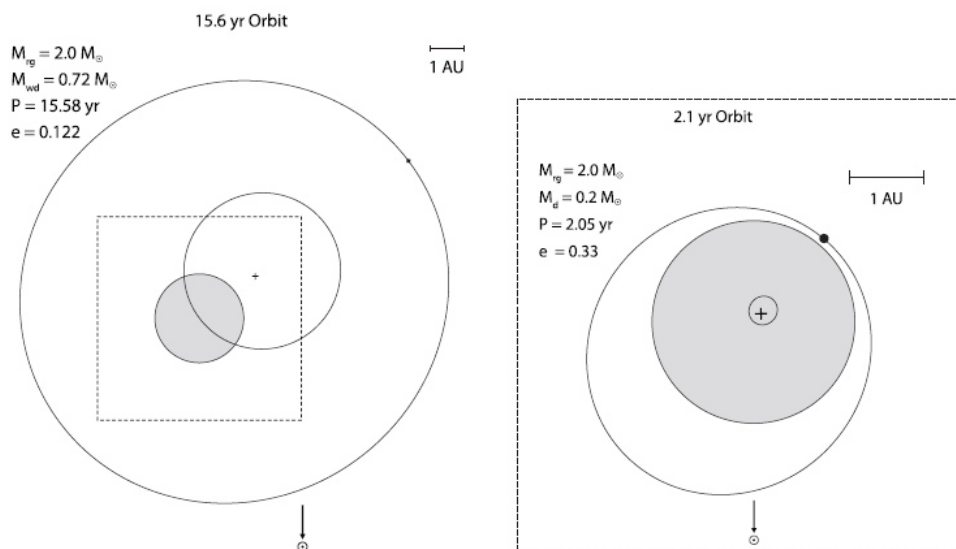
Ezen modellel több probléma is van. Mikkola és Tanikawa (1998) megvizsgálta a hármas rendszer stabilitását, amiből kiderült, hogy egy külső pályán keringő óriás nem stabil. A spektrumban nem látható a feltételezett fényes óriás. Továbbá, ha két óriást feltételezünk, akkor a csillagfejlődés miatt közel azonos tömeggel kell, hogy rendelkezzenek. Ez esetben az inklinációnak kicsinek kellene lennie, és a belső pályáról nem lenne látható fedés (Hinkle et al., 2009).

Mikkola és Tanikawa (1998) szerint a belső, közeli kettős teljes tömege kb.  $4 M_{nap}$  és kb.  $1 M_{nap}$ -ű a külső pályán keringő fehér törpe. A belső pályának jelentős az inklinációja a

külsőhöz képest. Modelljünkben a belső rendszer excentricitása jelentős mértékben változik, amely magyarázatot adhat a CH Cygni inaktív fázisaira.

Munari és társai (1996) számos kifogást soroltak fel a három komponensből álló modellel szemben. Ezek között található a stabilitás, a javasolt tömegek az egyes komponensekre, és a fotometriai viselkedés modellezése. Szerintük a 2,1 éves periódus pulzációból származik, így a rendszer csak két komponensből tevődik össze. Hinkle és társai (2009) szerint viszont ez a módus nem származhat sem a csillag normál pulzációs módusából, sem a pulzációs módusok közti kölcsönhatásból.

Ezuka és társai (1998)  $0,4 M_{nap}$ -et kaptak a fehér törpe minimális tömegére, ami nem konzisztens a 2,1 éves periódussal.

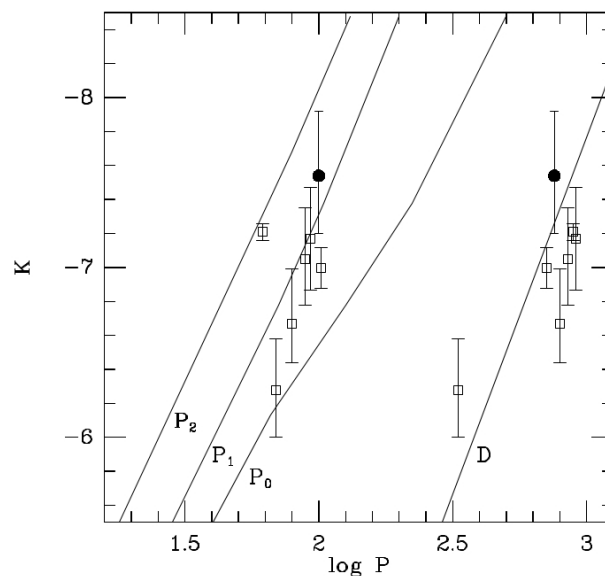


13. ábra. A CH Cygni rendszer tengely irányú nézete. A bal oldalon a 15,6 éves periódushoz tartozó pályák láthatóak. A vörös óriás tömege  $2 M_{nap}$ , a fehér törpe tömege  $0,72 M_{nap}$ . A szürke kör a vörös óriás, a fekete pont a fehér törpe a periasztronban. A szürke kör a  $280 R_{nap}$ -nak felel meg. A plusz jelöli a rendszer tömegközéppontját. A szaggatott vonallal jelölt tartomány a jobb oldalon látható kinagyítva. A pályák a 2,1 éves periódushoz tartoznak. A fekete ponttal jelölt objektum a periasztronban található. A kísérő objektum nem lehet fehér törpe és a 2,1 éves periódus sem tartozhat keringéshez. (Hinkle et al., 2009)

Schmidt és társai (2006) megvizsgálták, hogy a CH Cygni kettős vagy hármas rendszert

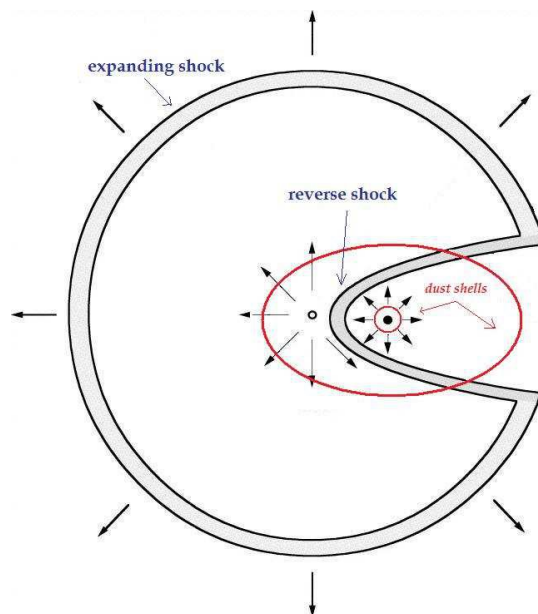
alkot-e, illetve hogy a fehér törpe komponens a belső vagy a külső pályán kering-e. Megjegyezték, hogy a félszabályos M óriásoknak hosszabb a periódusuk, mint az alap radiális módus (Hinkle et al., 2002). Eszerint a 2,1 éves periódus egy nem-radiális pulzációs módushoz tartozhat. Ezek alapján a CH Cygni egy kettős rendszert alkot (ld. 13. ábra).

Hinkle és társainak (2009) vizsgálata alapján a CH Cygni egy első felhangban pulzáló AGB csillag. A 2,1 éves periódus megkülönböztethetetlen a hosszú másodlagos periódust (LSP-t) mutató csillagoktól. A periódus-fényesség diagramon (ld. 14. ábra) ezek a csillagok egy jól meghatározott sávon helyezkednek el, melyet D sorozatnak neveznek (Wood et al., 1999). Az LSP-t az eddigi alapos vizsgálatok ellenére sem sikerült elméletileg alátámasztani. A CH Cygni esetében azonban két lehetőség valószínű. A csillag vagy egy forgó ellipszoidális gömb (Kiss et al., 2000), vagy ami valószínűbb, hogy a CH Cyg alacsony rendű nem radiális pulzációkon megy keresztül, amely egy forgó ellipszoid megfigyelhető tulajdonságait mutatja (Hinkle et al., 2009).



14. ábra. Periódus-abszolút K fényesség reláció. Minden LSP csillag két periódust mutat, egy normálisat és egy LSP-t. A fekete pöttyök a CH Cygni-hez tartozó értékeket mutatják. A nyitott négyzetek hat LSP csillaghoz tartoznak, melyek Hinkle és munkatársainak (2002), valamint Wood és munkatársainak (2004) cikkeiből származnak (Hinkle et al., 2009).

Contini, Angeloni, és Rafanelli (2008) elméleti modelljük felállításánál nem a fénygörbéket, hanem a rádiótól a röntgenig megfigyelt kontinuum és vonalas spektrumokból elkészített spektrális energia eloszlásokat használták fel. Ezeket a CH Cygni különböző aktív és inaktív

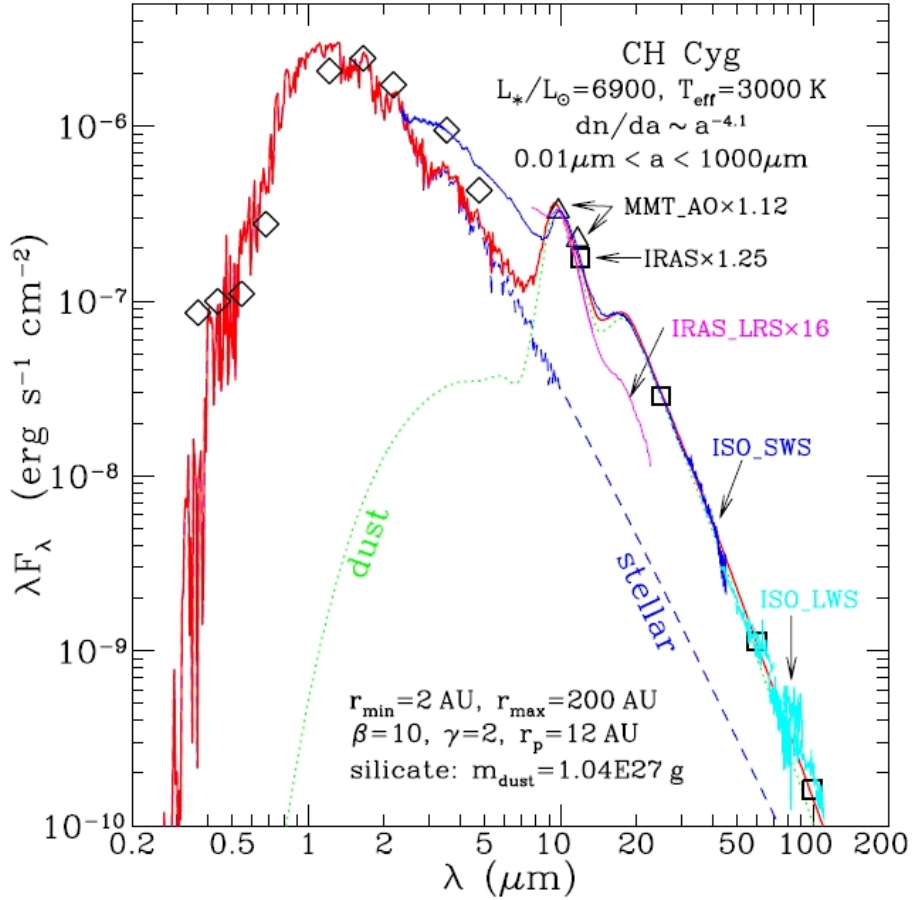


15. ábra. Az "ütköző szél" modell. A forró és a hűvös komponenseket az üres és a teli pöttyök jelölik. A külső tartomány (expanding shock) a táguló, a belső tartomány (reverse shock) a visszaverődő lökeshullámot reprezentálja. A piros ellipszis a por elhelyezkedését jelöli (Kenny & Taylor, 2005).

fázisai során készítették el és modellezték le.

A 15. ábrán látható "ütköző szél (colliding wind)" modell szerint a vörös óriásból származó lökeshullám a fehér törpéről visszaverődő lökeshullámmal ütközik és egy ködöt hoz létre. Ezt a lökeshullámok fűthetik. Ezen kívül az egész rendszert egy - a vörös óriás csillagszéléből származó - por héj veszi körül, amelyet a fehér törpéből érkező sugárzás ionizálhat.

Az első felbontott képet, mely igazolja, hogy a kettős rendszert egy por burok veszi körül Biller és munkatársai (2006) készítették. A 6,5 m-es, adaptív optikával rendelkező MMT távcsövet az infravörös tartományban használták. Az irodalomból vett és az általuk a  $9,8 \mu\text{m}$ -en és a  $11,7 \mu\text{m}$ -en mért fotometriai adatok alapján elkészítették a CH Cygni spektrális energia eloszlását. Erre modellt illesztettek, melyből látható, hogy a por szilikátot is tartalmaz (ld. 16. ábra). Az elkészített felvételeken az objektumok képét dekonvolálták, majd egy Gauss eloszlású fényesség profilt vontak le a CH Cygni-ből. Az így kapott maradék (reziduál) olyan struktúrát mutat, mint a rádió/optikai jet. A 17. ábrán az MMT-vel készült reziduál képeket lehet az 1999 augusztusában Crocker és munkatársai (2001) által rögzített HST (Hubble űrteleszkóp) felvételekkel összehasonlítani. Megfigyelhető, hogy az optikai/rádió képen megjelenő pontszerű/bipoláris struktúra hasonló az infravörös feltételeken

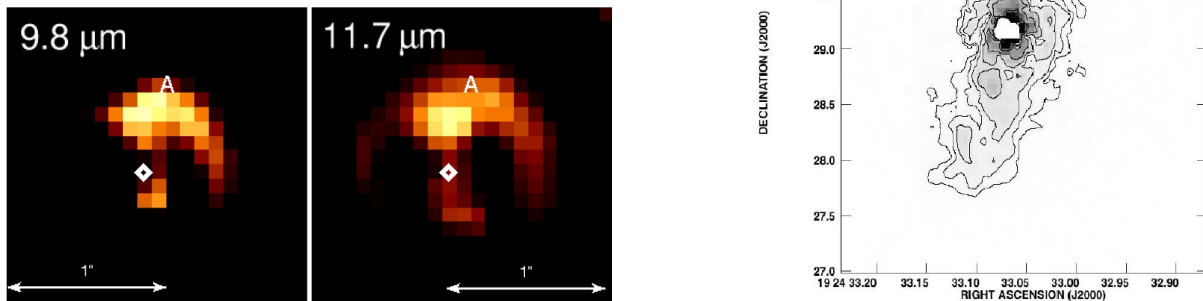


16. ábra. A CH Cygni por héjának IR emissziója és az arra illesztett modell. Az üres fekete rombuszokkal jelölt pontok az irodalomból, az üres fekete háromszögekkel jelölt pontok az MMT fotometriából és az üres fekete négyzetek IRAS fotometriából származnak. A kék szaggatott vonal a csillag fotoszférus spektrumát mutatja. A por modellt a zöld pontozott vonal jelzi, míg a piros folytonos vonal a por és a csillag spektrumának összegét mutatja (Biller et al., 2006).

láthatóhoz. A különbség, hogy az infravörösben megjelenő struktúra unipoláris. Egy lehetséges magyarázat erre az, hogy a közepes IR-ben sugárzó por sűrűbb a bipoláris kifúvás északi irányában, így ott jobban felmelegíti a kifúvás a port, mint a déli irányban, így onnan erősebb IR sugárzás érkezik, mint a déli tartományból (Biller et al., 2006).

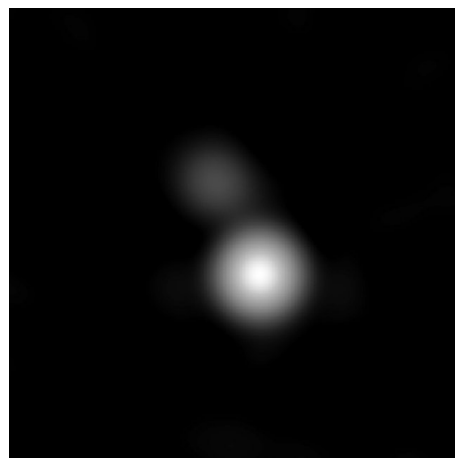
Mikołajewska és munkatársainak (2010) sikerült először olyan képet készíteni a CH Cygni rendszerről, ahol a komponensek felbontva látszanak. Ehhez 2004-ben az ún. (bispectrum) Speckle interferometriát alkalmazták a 6 m-es BTA teleszkóp segítségével. Az eredmény a 18. ábrán látható. A mérés idején a komponensek közti vizuális fényességkülönbség 2 magnitúdó





17. ábra. A bal oldali ábrákon a Gauss profil levonása után maradt struktúrák láthatóak. A rombusz a kettős rendszer helyzetét jelöli. A jobb oldali ábrán - az összehasonlítás érdekében - a Crocker és munkatársai (2001) által rögzített HST felvétel található. Megfigyelhető az IR maradék és az A-val jelölt optikai/rádió struktúrák helyzetének közel egyezése (Biller et al., 2006).

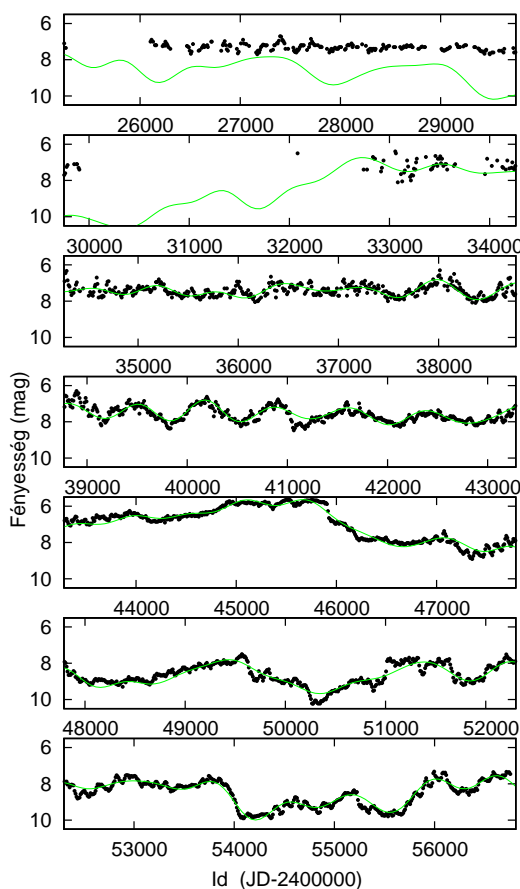
volt. Feltételezésünk szerint azért ilyen kicsi a különbség, mert a fehér törpét körülvevő forró akkréciós korog luminozitása hozzáadódik a mért értékhez. A mért szeparáció  $42 \pm 2$  mas, mely  $10,2^{+2,6}_{-1,9}$  CsE-nek felel meg, feltéve, hogy a CH Cygni Hipparcos által mért távolsága  $244^{+49}_{-35}$  pc (van Leeuwen, 2007).



18. ábra. A CH Cygni Speckle interferometriával felbontott képe. A látómező  $0,2''$ . Az északi irány felfelé, a keleti balra található. (Mikołajewska et al., 2010)

## 5.2. Vörös óriás komponens vizsgálata

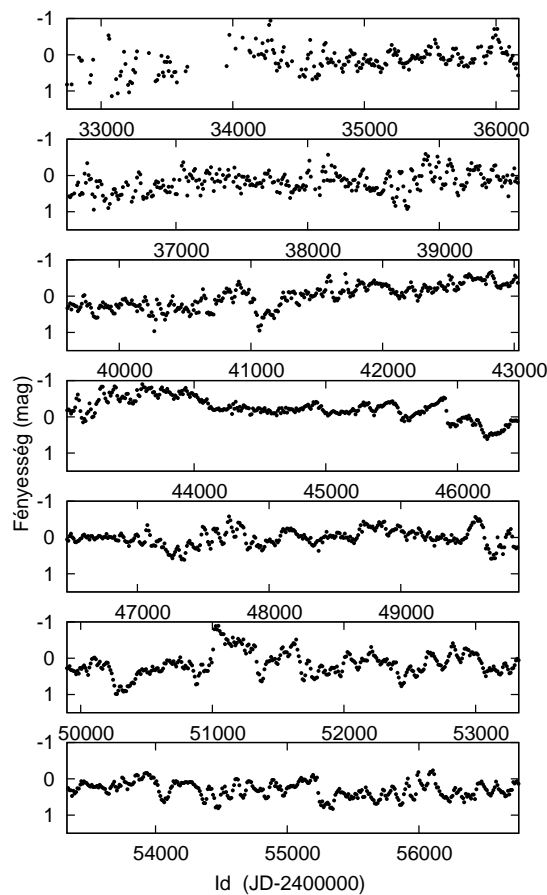
A *Kepler* űrtávcső működésének 4 éve alatt nem minden negyedévben mérte a CH Cygni fényességváltozását. Így az elérhető, hosszabb űrt tartalmazó fénygörbe időbeli hossza a mintavételezéstől függően kb. 3 és fél ill. 2 és fél év. Az irodalomban fellelhető hosszabb, kb. 750 napos periódusú fényváltozást így nehéz kimutatni, ezért fontosnak tartottam az AAVSO adatbázisában elérhető, - több, mint 80 év hosszú - kevésbé pontos fénygörbe vizsgálatát is.



19. ábra. A CH Cygni AAVSO vizuális fénygörbéje 10 napos átlagolással (fekete) és az erre illesztett változás az első 20 frekvencia komponens felhasználásával (zöld).

Az AAVSO adatbázisában elérhető kb. 86 év hosszú, vizuális fénygörbe esetében 10 nap hosszú szakaszokon a fényességeket összeátlagoltam. Az eredmény a 19. ábrán feketével látható. Ezen adatsornak a JD 2432741-től kezdődő szakaszát Fourier-analizáltam. A fénygörbe elejét annak lapos alakja és az adatpontok alacsony száma miatt nem vettem figyelembe. A frekvencia spektrumot 20-szor fehérítettem, az így kapott 20 frekvencia, amplitúdó és fázis értékek a 1. táblázatban találhatóak. Ezen adatok felhasználásával a

fénygörbére illesztett változás az 19. ábrán zölddel látható. A hosszabb periódusú, nagyobb amplitúdójú komponens a frekvencia- és fázisbeli lötyögése miatt több alias csúcsot is behoz a frekvencia spektrumba, ezáltal elnyomva a kisebb amplitúdójú valódi csúcsokat. Annak érdekében, hogy ezek is kimutathatóak legyenek, a 19. ábrán látható zöld görbét levontam az adatsorból, majd a reziduál fénygörbét is 20 fehérítésnek vettem alá. A reziduál adatsor a 20. ábrán, az annak Fourier-analízisével kapott frekvencia, amplitúdó és fázis komponensek a 2. táblázatban láthatóak.



20. ábra. A CH Cygni AAVSO vizuális fénygörbéjének az első 20 frekvencia komponens levonása után kapott reziduálja.

Az irodalomban szereplő kb. 750 napos változás az 1. táblázatban a 6. legerősebb csúcsként jelenik meg. Továbbá, az irodalom által ismert 100 napos fényességváltozás is felismerhető a 2. táblázat 12. sorában.

A *Kepler* a CH Cygniről mindkét üzemmódjában végzett méréseket. Mérési adatok a 30 perces mintavételezés esetében a Q0-Q1 (2009.05.02. - 2009.06.15), Q3-Q12 (2009.09.18 -

| No. | Periódus [nap] | Frekvencia [ $\frac{ciklus}{nap}$ ] | Amplitúdó | Fázis   |
|-----|----------------|-------------------------------------|-----------|---------|
| 1   | 30007          | 0,000033                            | 0,91183   | 0,39882 |
| 2   | 9679,19        | 0,00010                             | 0,62765   | 0,16660 |
| 3   | 6053,69        | 0,00017                             | 0,51530   | 0,82051 |
| 4   | 4014,99        | 0,00025                             | 0,36175   | 0,81064 |
| 5   | 1840,3         | 0,00054                             | 0,25042   | 0,82461 |
| 6   | 748,877        | 0,00134                             | 0,19572   | 0,21501 |
| 7   | 2057,21        | 0,00049                             | 0,22943   | 0,06995 |
| 8   | 3531,63        | 0,00028                             | 0,15698   | 0,19129 |
| 9   | 716,868        | 0,00139                             | 0,12418   | 0,86652 |
| 10  | 1130,12        | 0,00088                             | 0,09937   | 0,53528 |
| 11  | 886,165        | 0,00113                             | 0,11438   | 0,56537 |
| 12  | 1319,51        | 0,00076                             | 0,13101   | 0,23004 |
| 13  | 687,126        | 0,00146                             | 0,10632   | 0,45222 |
| 14  | 1392,18        | 0,00072                             | 0,08767   | 0,33838 |
| 15  | 625,392        | 0,00159                             | 0,08409   | 0,90786 |
| 16  | 1254,05        | 0,00079                             | 0,07784   | 0,09338 |
| 17  | 793,886        | 0,00126                             | 0,07656   | 0,02428 |
| 18  | 1715,36        | 0,00058                             | 0,07556   | 0,82406 |
| 19  | 548,916        | 0,00182                             | 0,06827   | 0,35332 |
| 20  | 2233,96        | 0,00045                             | 0,07750   | 0,37285 |

1. táblázat. Az AAVSO fénygörbe Fourier-analízise során kapott első 20 legerősebb frekvencia komponens.

2012.03.28.) és Q14 (2012.06.28 - 2012.10.03.) negyedévekből, míg az 1 perces mintavételezés esetében a Q5-Q12 (2010.03.20. - 2012.03.28.) és Q14 negyedévekből érhetőek el. A 21. ábrán pirossal a 30 percenként, feketével az 1 percenként mintavételezett fénygörbe látható. A ritkább mintavételezésű adatsor időbeli hossza 1251 nap, míg a sűrűbben mintavételezetté 928 nap. A piros fénygörbe 0,11 magnitúdóval el van tolvá az adatsorok összehasonlíthatósága érdekében.

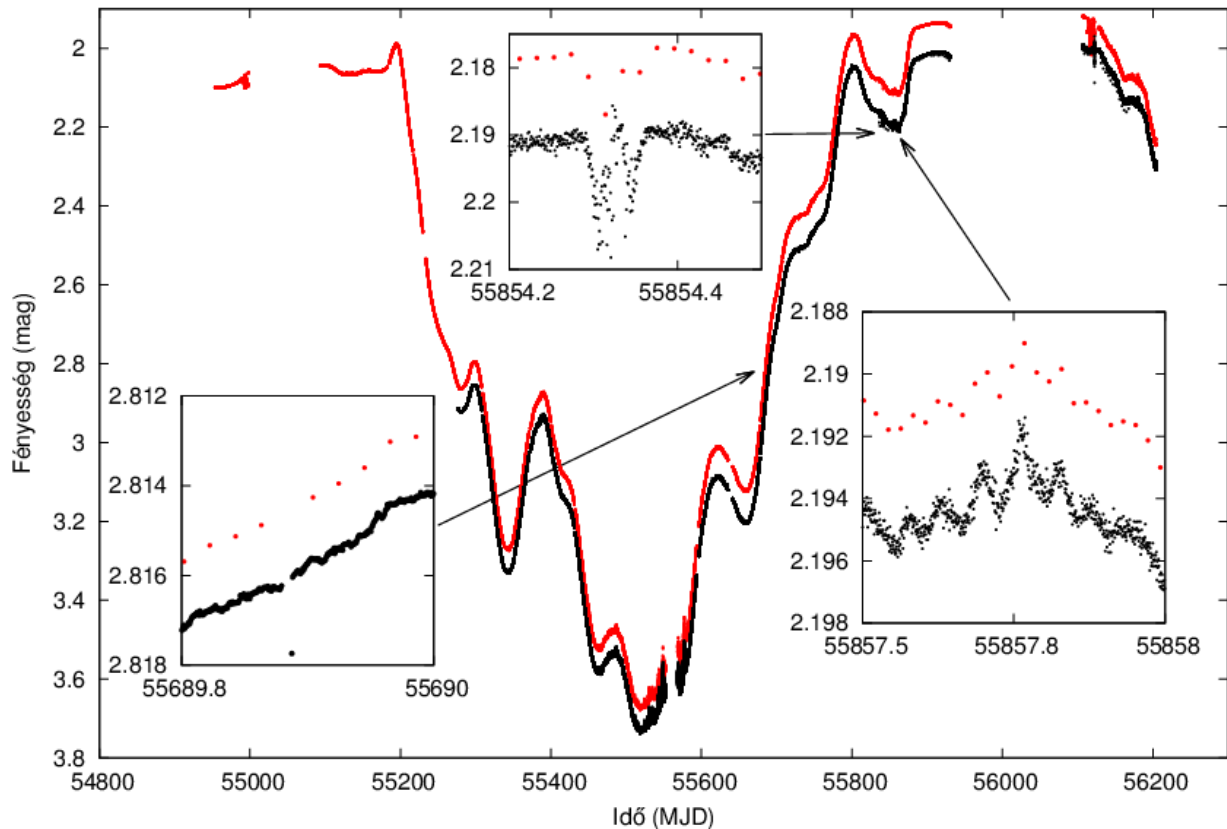
A *Kepler* űrtávcső által a CH Cygniről látható tartományban végzett mérések sokkal pontosabbak és folytonosabbak az eddig elérhető bármely adatsornál. Ezt hivatott bemutatni a 21. ábra. A három kiemelt tartomány a teljes fénygörbében megfigyelhető jellegzetes struktúrákat mutatja, melyeket az eddigi gyengébb minőségű fénygörbékben nem lehetett kimutatni. A bal oldali felnagyított szakaszon az látható, hogy a sűrűbb mintavételezés esetén egyetlen pont 1-2 millimagnitúdóval halványabb a körülötte levőknél. Ez a ritkább mintavételezésű piros görbén nem figyelhető meg. Ezt a jelenséget okozhatja valódi abszorpció is, de a rendkívüli rövidsége miatt valószínűbb, hogy ezen pontokat nem a CH Cygni

| No. | Periódus [nap] | Frekvencia [ $\frac{\text{ciklus}}{\text{nap}}$ ] | Amplitúdó | Fázis  |
|-----|----------------|---|-----------|--------|
| 1   | 20012,6        | 0,00005   | 0,22381   | 0,6091 |
| 2   | 8281,06        | 0,0001  | 0,14624   | 0,6568 |
| 3   | 4901,03        | 0,0002  | 0,10941   | 0,1700 |
| 4   | 1921,21        | 0,0005  | 0,09268   | 0,9049 |
| 5   | 1050,99        | 0,0009  | 0,06449   | 0,7078 |
| 6   | 1539,43        | 0,0006  | 0,05650   | 0,3912 |
| 7   | 6490,56        | 0,0001  | 0,06109   | 0,3784 |
| 8   | 996,476        | 0,0010  | 0,06453   | 0,2477 |
| 9   | 2463,08        | 0,0004  | 0,06288   | 0,5283 |
| 10  | 3335,43        | 0,0002  | 0,06153   | 0,6289 |
| 11  | 561,1          | 0,0017  | 0,05291   | 0,4205 |
| 12  | 100,104        | 0,0099  | 0,05061   | 0,2034 |
| 13  | 581,479        | 0,0017  | 0,05306   | 0,3704 |
| 14  | 507,718        | 0,0019  | 0,04734   | 0,0781 |
| 15  | 444,723        | 0,0022  | 0,04634   | 0,1551 |
| 16  | 938,088        | 0,0010  | 0,04796   | 0,7327 |
| 17  | 1408,51        | 0,0007  | 0,04885   | 0,6151 |
| 18  | 485,643        | 0,0020  | 0,04430   | 0,5990 |
| 19  | 1709,26        | 0,0005  | 0,04728   | 0,8180 |
| 20  | 156,145        | 0,0064  | 0,04229   | 0,9972 |

2. táblázat. Az AAVSO reziduál fénygörbe Fourier-analízise során kapott első 20 legerősebb frekvencia komponens.

fizikai változása okozza, hanem műszeres effektus. Ezzel szemben a középső kinagyított ábrán levő fényességcsökkenés valódi abszorpcióra utalhat. Rövidsége miatt az egy perces mintavételezésű adatsor hiányában nehezen lehetne észrevenni, valamint alakját megvizsgálni. Mivel ezek az abszorpciós jelenségek nem periódikusan lépnek fel, így valószínű, hogy a rendszert körülvevő porkorong instabilitásai okozzák ezeket. A jobb oldali kinagyításon látható fénygörbe szakasz mutat rá igazán, hogy mire is képes a *Kepler* mikromagnitúdós pontossága. Ha csak a ritkább mintavételezésű adatsor állna rendelkezésünkre, akkor kvázi folytonosnak gondolhatnánk a fénygörbe kinagyított szakaszát. Ezzel szemben a sűrűn mintavételezett fénygörbén jól kivehető egy rövid periódusú fényváltozás. Ezzel a jelenséggel a harmadik alfejezetben bővebben foglalkozom.

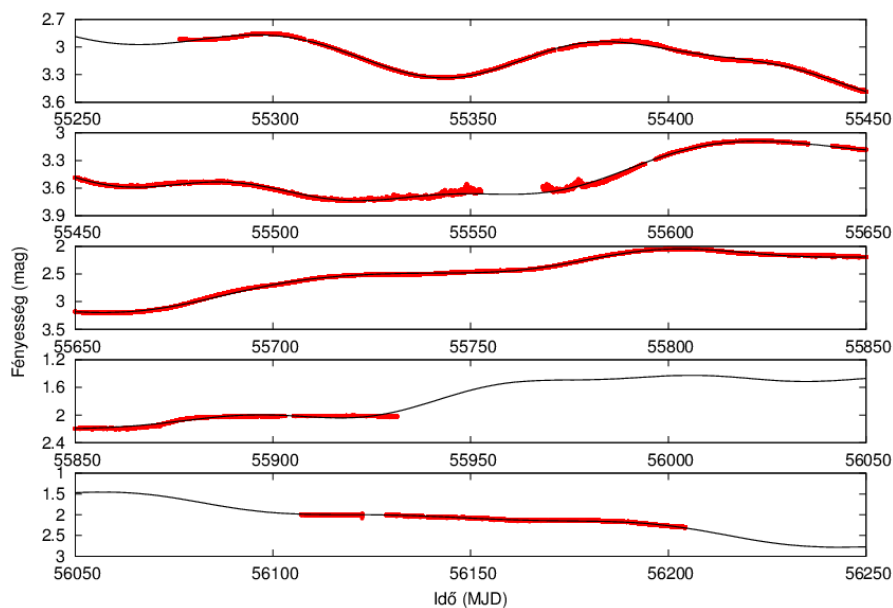
Sajnos a sűrűbb mintavételezésű adatsor időbeli hossza jelentősen rövidebb a ritkábban mintavételezetténél, viszont az előbb bemutatott, csak a rövidebb adatsorban megfigyelhető jelenségek miatt a további vizsgálatokhoz a rövidebb adatsort fogom alkalmazni.



21. ábra. A CH Cygni *Kepler* űrtávcső által mért ritkábban (piros) és sűrűbben (fekete) mintavételezett fénygörbéje. A nagyított ábrák a fénygörbében megjelenő jellegzetes struktúrákat mutatják, melyek forrásait a nyilak jelzik.

A teljes fénygörbét láthatóan a CH Cygni rendszer vörös óriás tagjának nagy amplitúdójú és hosszú periódusú változása dominálja. Ezen változás vizsgálata érdekében tízszer fehérítettem le a teljes fénygörbét. Az így kapott tíz frekvencia, amplitúdó és fázis adatokat a 3. táblázatban foglaltam össze. Az ezen adatok felhasználásával a fénygörbére illesztett szinuszos változás a 22. ábrán feketével látható.

A *Kepler* által mért fénygörbében található periódusok között is van egy közel 100 napos, pontosan 97,78 napos változás, mely a 3. táblázat 4 sorában foglal helyet. A legnagyobb amplitúdóval rendelkező 1006,55 napos periódus közel áll az AAVSO fénygörbében látható kb. 750 napos változáshoz. A kettő közötti eltérést valószínűleg az okozza, hogy a *Kepler* által mért fénygörbe hossza összemérhető a várt periódus hosszával, valamint hogy a 13. negyedév hiányzik az adatsorból. Továbbá, ha összehasonlítjuk az adatokat, akkor észrevehetjük, hogy a *Kepler* fénygörbében található 149,64 napos periódushoz nagyon közel áll az AAVSO adatsorában talált 156,145 napos periódus.



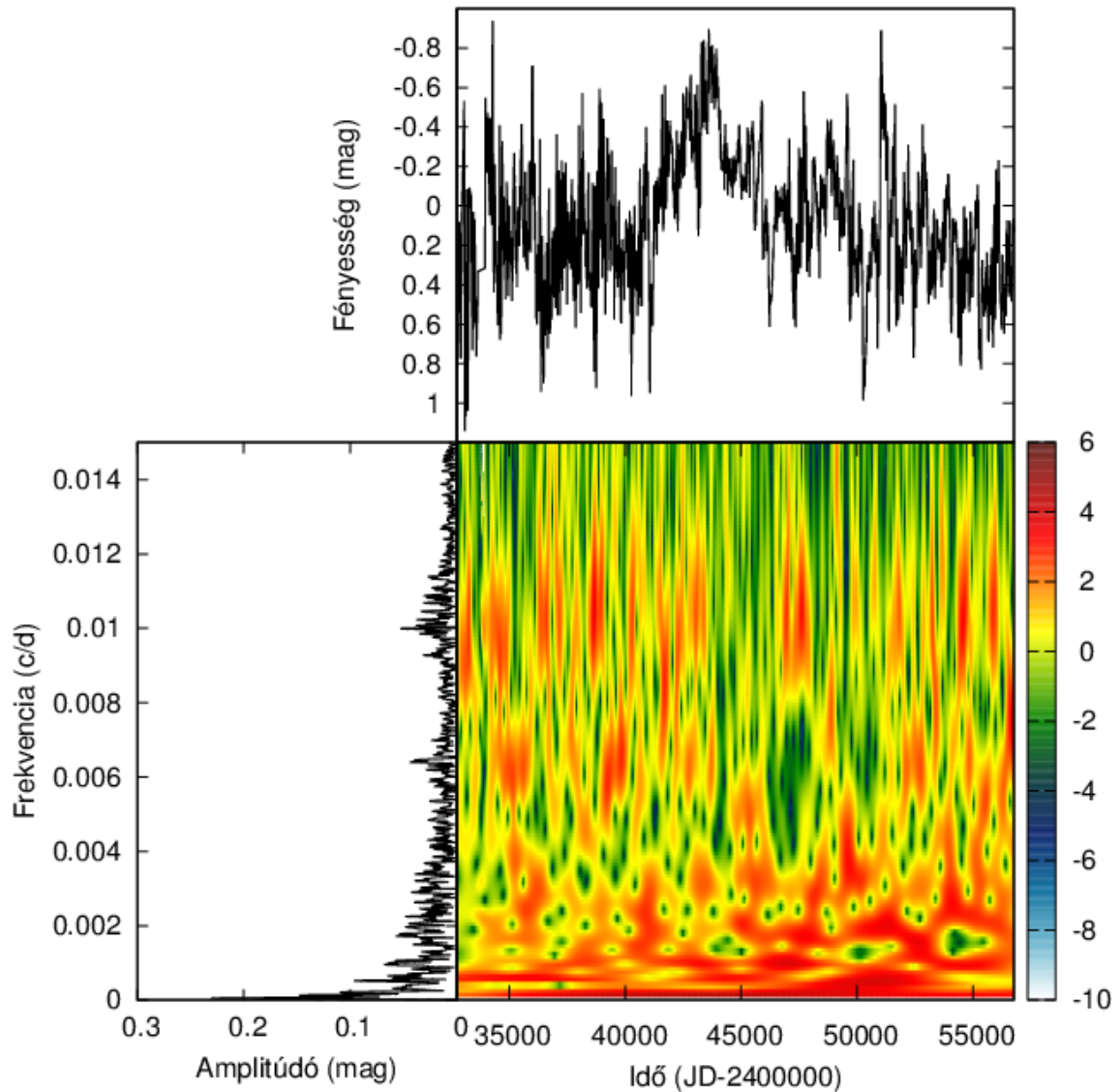
22. ábra. A *Kepler* által, sűrű mintavételezéssel mért fénygörbe (piros) és az arra illesztett 10 frekvenciával előállított jel (fekete).

| No. | Periódus [nap] | Frekvencia [ $\frac{\text{ciklus}}{\text{nap}}$ ] | Amplitúdó | Fázis   |
|-----|----------------|---|-----------|---------|
| 1   | 1006,55        | 0,00099   | 0,94933   | 0,11755 |
| 2   | 321,31         | 0,00311   | 0,16793   | 0,32738 |
| 3   | 196,31         | 0,00509   | 0,10808   | 0,51680 |
| 4   | 97,78          | 0,01022   | 0,07217   | 0,15349 |
| 5   | 83,97          | 0,01190   | 0,05902   | 0,27505 |
| 6   | 109,65         | 0,00911   | 0,06578   | 0,52909 |
| 7   | 58,97          | 0,01695   | 0,02873   | 0,84289 |
| 8   | 63,16          | 0,01583   | 0,02583   | 0,01216 |
| 9   | 51,87          | 0,01928   | 0,01910   | 0,90267 |
| 10  | 149,64         | 0,00668   | 0,01776   | 0,27351 |

3. táblázat. A *Kepler* által sűrű mintavételezéssel mért fénygörbe Fourier-analízise során kapott első 10 frekvencia komponens.

Ha a saját szemünkkel megvizsgáljuk a fénygörbét, akkor eldönthetjük, hogy a kapott frekvencia komponensek közül melyik tartozhat valódi fényességváltozáshoz és melyik nem. Ezek alapján azt mondhatjuk, hogy a kb. 750 napos változás az AAVSO fénygörbe alapján, a 321 napos, a 97 napos és a 149 napos változások a *Kepler* fénygörbe alapján valódi fényességváltozáshoz kapcsolhatóak.

A Fourier-analízis nem alkalmas annak vizsgálatára, hogy a talált frekvencia komponensek

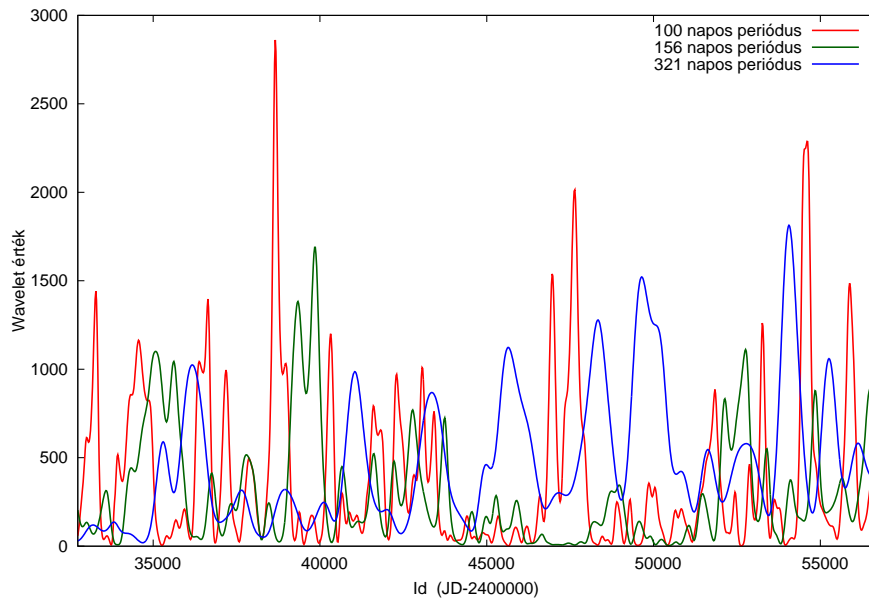


23. ábra. Az AAVSO fénygörbe JD 2432741-től kezdődő szakaszának wavelet térképe (középen), frekvencia spektruma (balra) és maga a fénygörbe (felül).

a teljes fénygörbe mely szakaszain erősek és mely tartományain nem jelennek meg. Ilyenfajta vizsgálatra a wavelet-analízis alkalmas. A 20. ábrán látható, meglehetősen hosszú AAVSO adatsort vizsgáltam meg ezen módszerrel. A kapott wavelet térkép, a CH Cygni fénygörbéjével és frekvencia-spektrumával együtt a 23. ábrán látható. A wavelet térképen jól kivehető, hogy a kb. 100 és a kb. 150 napos periódusok egymással alternálnak, egyszer az egyik komponensnek nagy az amplitúdója, majd a másiknak. Annak érdekében, hogy megmutassam, hogy ezen frekvenciák valóban alternálnak összeintegráltam az ezen frekvenciákhoz tartozó wavelet gerinceket egy 0,001  $c/d$  tartományon belül. Az eredményt a 24. ábra mutatja. Pirossal a 100 napos, zölddel a 156 napos periódushoz tartozó összeintegrált wavelet



értékek vannak ábrázolva. A grafikon jól mutatja azt a jelenséget, hogy ha az egyik módus van gerjesztődve, akkor a másik csillapodott. Ha összeintegráljuk a 321 napos periódushoz tartozó wavelet gerincet egy  $0,001 c/d$  tartományon belül és hozzáadjuk az ábránkhöz, akkor azt tapasztaljuk, hogy ezen módus amplitúdója akkor erősödik fel amikor a másik kettő kevésbé van gerjesztődve.

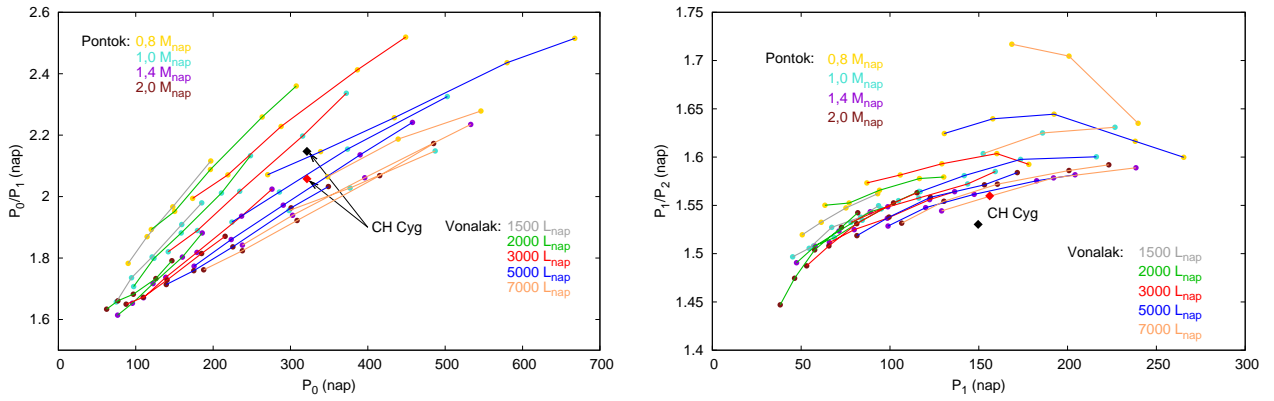


24. ábra. Az AAVSO fénygörbe wavelet térképének három frekvencia (321 nap, 156 nap és 100 nap) körüli  $0,001 c/d$  széles tartományban összeintegrált értékei az idő függvényben.

Annak eldöntésére, hogy az előbb vizsgált frekvencia komponensek a vörös óriás mely pulzációs módusaihoz tartozhatnak, kiterjedt vizsgálatokat végeztünk. Ezekhez háromféle csillag modellt használtunk fel, Ostlie és Cox (1986) Mira csillagokra vonatkozó lineáris pulzációs modelljét, Fox és Wood (1982) vörös óriásokra vonatkozó lineáris, radiális pulzációs modelljét és Xiong, Deng és Cheng (1997) hosszú periódusú változókra vonatkozó lineáris modelljét, melyben figyelembe veszik a turbulens nyomáson és turbulens viszkozitáson keresztüli csatolást a konvekció és a pulzáció között.

A 25. ábrán látható Ostlie és Cox modell esetében az alap ( $P_0$ ) és az első felhang ( $P_1$ ) aránya van ábrázolva az alaprezgés függvényében, valamint az első és a második felhang ( $P_2$ ) aránya van ábrázolva az első felhang függvényében. A pontok a különböző tömegű, a vonalak a különböző luminozitású modellekhez tartoznak.

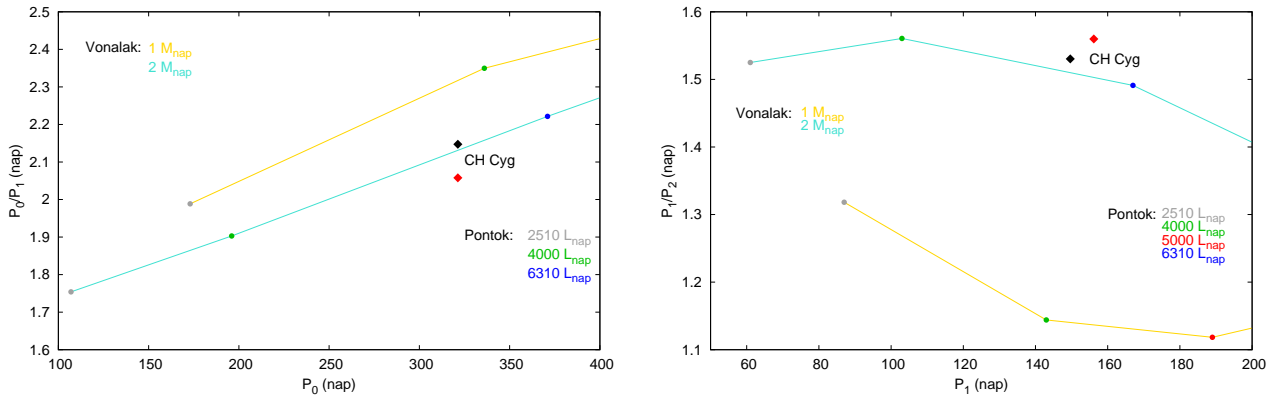
A 26. ábra Fox és Wood modelljét mutatja ugyanazon tengelyek felvételével, mint a 25. ábra esetében. A vonalak az eltérő tömegű, a pontok a különböző luminozitású modellekhez



25. ábra. Ostile és Cox (1986) Mira típusú csillagok pulzációjára vonatkozó modellje.  $P_0$  az alaprezgés,  $P_1$  az első-,  $P_2$  a második felhang. A rombuszok a CH Cygni vörös óriás pulzációjának feltételezett periódusainál találhatóak. Feketével a *Kepler*, pirossal az AAVSO adatokból származtatott értékek vannak feltüntetve.

tartoznak.

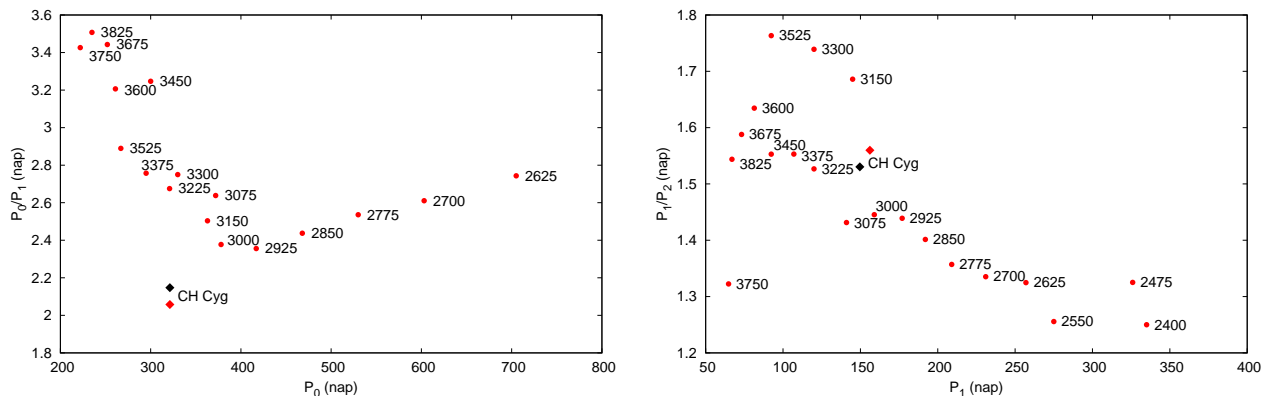
A 27. ábrán Xiong, Deng és Cseng modellje látható, az előző két modell esetében használt tengelyekkel. A modell csak egy naptömegű és 5000 napluminozitású csillagokra vonatkozik, a számok a különböző effektív hőmérsékleteket jelölik.



26. ábra. Fox és Wood (1982) vörös óriás csillagok pulzációjára vonatkozó modellje.  $P_0$  az alaprezgés,  $P_1$  az első-,  $P_2$  a második felhang. A rombuszok a CH Cygni vörös óriás pulzációjának feltételezett periódusainál találhatóak. Feketével a *Kepler*, pirossal az AAVSO adatokból származtatott értékek vannak feltüntetve.

A kiterjedt analíziseink során az AAVSO és *Kepler* fénygörbékből kapott frekvenciák felhasználásával minden lehetséges periódus arányt figyelembe véve megvizsgáltuk, hogy melyik fényességváltozás a vörös óriás melyik módusához tartozhat. Ezen vizsgálatok eredményeképp feltételezzük, hogy a 321 napos periódus az alpmódusnak, a 149 napos *Kepler* vagy

a 156 napos AAVSO periódus az első felhangnak, valamint a 97 napos *Kepler* vagy a 100 napos AAVSO periódus a második felhangnak felel meg. Ezen eredményt támasztják alá a 24. ábrán bemutatott összeintegrált wavelet értékek időbeli változásai. Az a jelenség, hogy egy csillagban egyszerre három módus is geresztődve legyen meglehetősen ritka, eddig összesen három rövid periódusú pulzáló változó esetében sikerült ezt kimutatni (AC And, RR Lyr, V823 Cas).



27. ábra. Xiong, Deng és Cheng (1997) hosszú periódusú változók pulzációjára vonatkozó modellje.  $P_0$  az alaprezgés,  $P_1$  az első-,  $P_2$  a második felhang. A rombuszok a CH Cygni vörös óriás pulzációjának feltételezett periódusainál találhatók. Feketével a *Kepler*, pirossal az AAVSO adatokból származtatott értékek vannak feltüntetve. A számok a különböző effektív hőmérsékleteket jelzik.

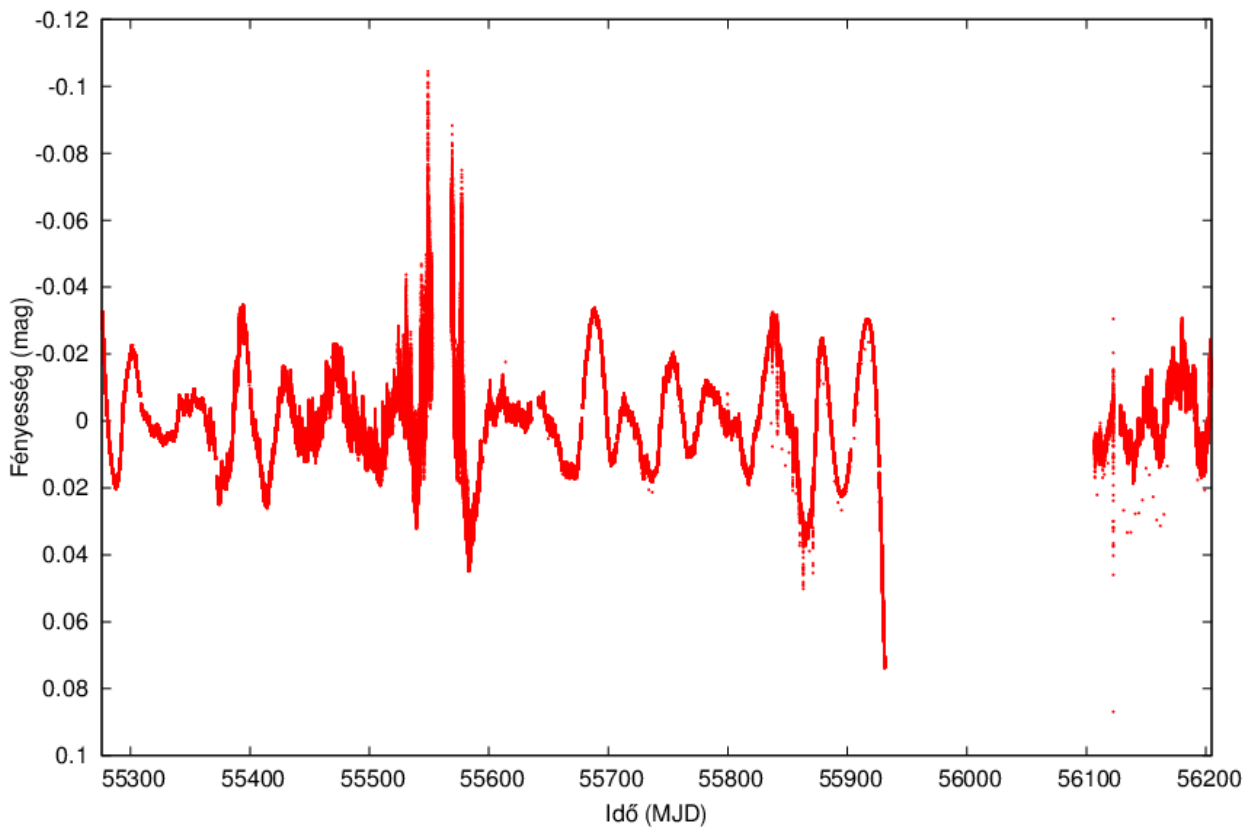
A 25-27. ábrákon a CH Cygni vörös óriás komponensére vonatkozó alaprezgésnek 321, az első felhangnak 149 és a második felhangnak 97 napot tételeztünk fel a fekete rombuszok esetében, így csak a *Kepler* mérési eredményeit használtuk, amíg a piros rombuszok esetében az első felhangnak 156 és második felhangnak 100 napot tételeztünk fel, amely esetben az adatok az AAVSO mérési eredményeiből származnak.

Ostile és Cox, valamint Fox és Wood modelljét figyelembe véve ezen periódusok egy kb. 2 naptömegű és kb. 5-6000 napluminozitású vörös óriáshoz tartoznak. Xiong, Deng és Cheng modellje csak 1 naptömegű vörös óriásokra vonatkozik, ezért térhet el a modelltől számított értékektől az alaprezgés és az első felhang aránya ekkora mértékben. Mivel nem közöltek más tömegekkel számított eredményeket, így nem tudjuk, hogy merre tolódnának el a pontok, ha növekedne a tömeg. Az első és a második felhang arányából arra következtethetünk, hogy a csillag effektív hőmérséklete 3000-3300 K között lehet.

A modellekből származtatható paraméterek az irodalomban találhatóakhoz hasonlóak.

### 5.3. Kis amplitúdójú változások vizsgálata

A *Kepler* által mért fénygörbe pontossága lehetőséget nyújt arra, hogy a vörös óriás nagy amplitúdójú változása mellett az akár néhány tized millimagnitúdós változásokat is megfigyelhessük és tanulmányozhassuk. Ennek érdekében a 22. ábrán feketével látható, a 3. táblázat tíz frekvencia komponensével előállított szinuszos jelet levontam az adatsorból. A maradék fénygörbét a 28. ábra mutatja.



28. ábra. A *Kepler* által mért fénygörbéből, az első 10 frekvencia komponens levonása után kapott reziduál.

A Nap-típusú oszcillációkat a konvekció sztochasztikusan gerjeszti (Bedding, 2011). A gerjesztés sztochasztikus természete miatt a frekvencia spektrumban egy egész sor csúcs jelenik meg. A Nap esetében ezek 1-től 4 MHz-ig terjednek (az un. 5 perces oszcillációk). Definíció szerint a Nap-típusú oszcillációk sztochasztikusan gerjesztődnek a külső konvektív zónában. Ilyet meg lehet figyelni más típusú, hűvösebb csillagok esetében is, ahol a konvektív

zóna elég közel van a felszínhez (Christensen-Dalsgaard et al., 2001; Bedding, 2003; Tabur et al., 2010).

A csillagok oszcillációja kétféle 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. Vannak olyan csillagok, melyek esetében mindkét módus előfordul, ilyen lehet a Nap is. Előfordulnak kevert módusok is, mikor a p-módus a felszín közelében, a g-módus a magban jellemző.

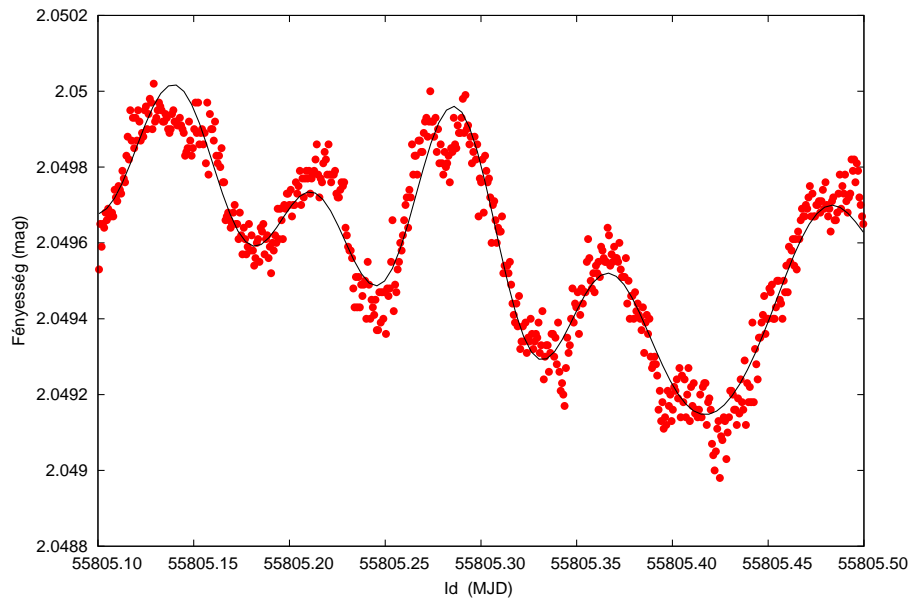
A frekvencia spektrumban megjelenő különböző radiális és nem-radiális módusokhoz tartozó csúcsok közti frekvencia különbségek, valamint a legnagyobb amplitúdójú csúcshoz tartozó frekvencia arányos a csillag tömegével, effektív hőmérsékletével és luminozitásával.

A vörös óriás csillagok nagyobb tömege miatt a Nap-típusú oszcillációk a frekvencia spektrumban hosszabb periódusidővel jelennek meg, mint a Napban. Ezen módusok a sztochasztikus gerjesztés miatt nem figyelhetőek meg hosszabb ideig folyamatosan. A vörös óriások esetében a módusok élettartama jelenleg nem tisztázott az irodalomban. Emiatt vizsgálatuk fontos szerepet játszik a Fourier-spektrumok analizálása során.

Annak érdekében, hogy egy módus élettartamát meg tudjam határozni, a 28. ábrán látható fénygörbét egy nap hosszú tartományokra osztottam. Minden egyes fénygörbe szakasznak elkészítettem a Fourier-spektrumát és a wavelet-térképét. A Fourier-spektrumokat logaritmikus skálán ábrázoltam azért, hogy a frekvencia csúcsok amplitúdója által átfogott több nagyságrend esetében mind a nagyon kicsi, mind a nagy amplitúdókat meg lehessen figyelni. Ezen ábrákat sorba rendeztem és egy videót készítettem belőlük, mely fájl megtalálható a diplomamunkámhoz mellékelt CD-n *CHCygn\_Kepler\_res\_fourier.vob* névvel. Ha valamely csúcs vagy csúcs sereg felerősödik a spektrumban, akkor végig lehet követni, hogy hány napon keresztül volt gerjesztődve, ezáltal megbecsülhető az adott módus élettartama. Másik módszerként a wavelet-térkép időtengelye felé a fénygörbét, frekvencia tengelye mellé a Fourier-spektrumot helyeztem el minden egyes egy nap hosszú adatsor esetében. Az így kapott ábrákat egymás után sorba rendezve egy másik videó fájlba menettem el, így a kisfilm megtekintésével a spektrumok változása mellett a fénygörbe és a wavelet térképek napról napra történő változásait is figyelemmel követhetjük, így megbecsülve egy adott módus élettartamát. Ezen kisfilm megtalálható a mellékelt CD-n *CHCygn\_Kepler\_res\_wavelet.vob* néven.

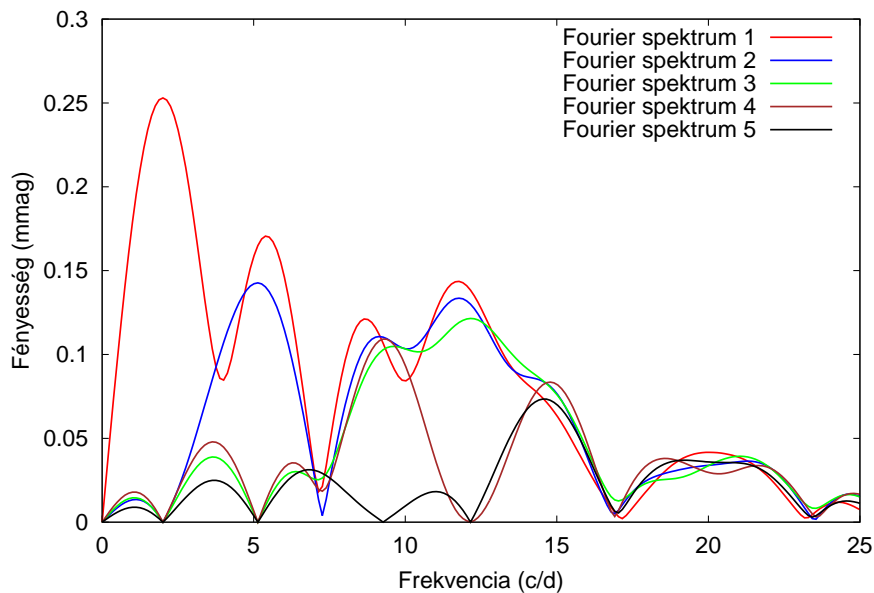
A CH Cygni fénygörbájének összetettsége miatt nagyon nehéz egyedi módusokat megfigyelni, mivel több helyen előfordul, hogy az egy nap hosszú fénygörbében jelentős amplitúdó különbség tapasztalható két frekvencia komponens között, illetve a korábban mutatott abszorpció

jellegű fényességcsökkenések is megnehezítik a kisebb amplitúdójú fényességváltozások vizsgálatát.



29. ábra. A sűrűn mintavételezett fénygörbében többször megjelenő 2,5 óra hosszú periódus (piros). Az első 5 frekvencia komponenssel illesztett görbe (fekete).

A videók végigkövetésével megfigyelhető, hogy a  $0,4 \text{ c/d}$  frekvencia környékén levő csúcs több helyen is jelen van a frekvencia spektrumokban, illetve a wavelet térképeken. Az ezt a csúcsot létrehozó periódikus fényességváltozás egy szakasza a 29. ábrán látható (pirossal) az 5 frekvencia komponenssel illesztett szinusszal együtt (feketével). Ennek Fourier-analízissel kapott frekvencia, amplitúdó és fázis komponenseit a 4. táblázat foglalja össze, valamint a fehérítések során kapott első öt frekvencia spektrum a 30. ábrán látható. A fénygörbe alapján egyértelműen megállapítható, hogy ezen módus periódusa 2,58 óra. A modellek szerint a vörös óriások esetében előforduló Nap-típusú oszcillációk periódusideje tíz nap alatt, pár nap körül van, így ezen változás valószínűleg nem tartozik a Nap-típusú oszcillációk közé. A vörös óriás és fehér törpe kettőséből álló törpe nóvák esetében megfigyelhető egy, a forró folt okozta kvázi periódikus oszcilláció. Feltehetőleg az általam kimutatott kb. 2,5 óra hosszú fényesség változás is ebbe a kategóriába tartozik, azaz valószínűleg nem pulzációs eredetű.



30. ábra. A *Kepler* reziduál fénygörbe 2,5 órás periódust mutató szakaszának Fourier-analízis használatával során 5 fehérítés után kapott frekvencia spektrumai.

| No. | Periódus [óra] | Frekvencia [ $\frac{ciklus}{nap}$ ] | Amplitúdó | Fázis   |
|-----|----------------|-------------------------------------|-----------|---------|
| 1   | 11,974         | 2,00434                             | 0,00021   | 0,90664 |
| 2   | 4,67279        | 5,13611                             | 0,00013   | 0,90760 |
| 3   | 1,9751         | 12,15129                            | 0,00013   | 0,80589 |
| 4   | 2,58899        | 9,27006                             | 0,00010   | 0,13015 |
| 5   | 1,65159        | 14,53144                            | 0,00007   | 0,98236 |

4. táblázat. A *Kepler* reziduál fénygörbe 2,5 órás periódust mutató szakaszának Fourier-analízis használatával kapott első 5 frekvencia komponense.

# Összefoglaló

A dolgozat egyik felében a Kepler Asztroszeizmológiai Tudományos Konzorcium (KASC) 12-es munkacsoportjához tartozó csillagok fénygörbéjét vizsgáltam. Ezek a nyers adatok különböző mértékű ugrásokat tartalmaztak, melyeket a *Kepler* űrtávcső negyedévente történő elfordítása okozza. Az analízis elvégzéséhez először összetoltam a fénygörbéket, hogy folytonosak legyenek. A művelet 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.

A vizsgált csillagokat fénygörbéjük alapján három osztályba soroltam, melyek részletes leírása és a fényességváltozásaik lehetséges okai megtalálhatóak a TDK dolgozatomban (Bódi, 2012).

A dolgozat fő célja a CH Cygni *Kepler* űrtávcső által mért fényességváltozásának a vizsgálata volt. Saját munkám bemutatása előtt összegeztem az irodalomban található eddigi mérési eredményeket és azok alapján a rendszerről alkotott modelleket. A fénygörbe összetettsége miatt a vizsgálatot két részre bontottam, a kis amplitúdójú változásokkal a nagy amplitúdójú változásoktól elkülönítve külön alfejezetben foglalkoztam.

Kiterjedt vizsgálatokat végeztem a rendszer egyik tagját alkotó vörös óriás komponens pulzációs módusainak értelmezése. A Fourier-spektrum és a wavelet térkép által mutatott értékeket összehasonlítva három különböző csillagmodellel, sikerült megmutatni, hogy a vörös óriásban feltehetőleg egyszerre három módus is gerjesztve van. Az alkalmazott modellekből kapható csillag paraméterek hasonló értéket mutatnak az irodalomban találhatóakkal.

A *Kepler* rendkívül nagy pontosságának köszönhetően sikerült a fénygörbében nagyon kis amplitúdójú periódikus, illetve nem periódikus változásokat kimutatni. A periódikus fényességváltozásokat mind Fourier-, mind wavelet-analízis segítségével vizsgáltam, melyekkel a vörös óriás Nap-típusú oszcillációinak élettartamát lehet megbecsülni.

A fénygörbében felismertem egy kb. 2,5 óra hosszú változást, mely a törpe nóvák esetében



jól ismert kvázi periódikus oszcilláció osztályába tartozhat.

A jövőben a változócsillagok vizsgálatát a Fizika Doktori Iskolán belül szeretném folytatni. A *Kepler* és más űrtávcsövek adatait szeretném elemezni, valamint az óriás csillagok radiális és nem-radiális oszcillációival szeretnék jobban megismerkedni.

## Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom Dr. Szatmáry Károlynak a rendszeres konzultálási lehetőségért, valamint a dolgozatom elkészítése során nyújtott segítségéért és végtelen türelméért. Továbbá köszönettel tartozom Dr. Kiss Lászlónak és a *Kepler* Asztroszeizmológiai Tudományos Konzorciumnak (KASC) a dolgozatom elkészülte során felhasznált adatokért.

## Irodalomjegyzék

1. Antoci V., Handler G., Campante T. L., et al., 2011, Nature, Volume 477, Issue 7366, pp. 570-573
2. Bányai E., Kiss L. L., Bedding T. R., Bellamy B., Benkő, J. M., **Bódi A.**, Callingham J. R., Compton D., Csányi I., Derekas A., Dorval J., Huber D., Shrier O., Simon A. E., Stello D., Szabó Gy. M., Szabó R., Szatmáry K., 2013  
Variability of M giant stars based on Kepler photometry: general characteristics  
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 436, Issue 2, p.1576-1587
3. 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
4. Bedding T. R., 2003, Ap&SS, 284, 61.
5. Benkő József, Szabó Róbert, 2010 Idősorok az úrből  
Meteor csillagászati évkönyv 2011. 207-232.
6. Bessel, M. S. & Wood, P. R., 1984, PASP, 96, 247
7. Beth A. Biller, Laird M. Close, Aigen Li, Massimo Marengo, John H. Bieging, Phil M. Hinz, William F. Hoffmann, Guido Brusa, Doug Miller, 2006, Astrophys.J.647: 464-470
8. Biller, B. A., Close, L. M., Li, A., Marengo, M., Bieging, J. H., Hinz, P. M., Hoffmann, W.F., Brusa, G., & Miller, D., 2006, ApJ, 647, 464
9. Bódi Attila, 2012  
Pulzáló vörös óriás csillagok fénygörbéjének vizsgálata a Kepler úrtávcső adatsorai alapján  
TDK Dolgozat SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék
10. Bódi Attila, 2012  
Változócsillagok fénygörbe elemzése  
BSc Szakdolgozat SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék
11. Christensen-Dalsgaard J., 2003

12. Christensen-Dalsgaard J., Kjeldsen H., & Mattei J. A., 2001, ApJ, 562, L141.
13. Contini, M., Angeloni, R., Rafanelli, P., 2008, eprint arXiv:0807.1480
14. Cooper W. A., Walker E. N., 1994  
Csillagok távcsővégen, Gondolat, Budapest
15. Crocker, M. M., Davis, R. J., Spencer, R. E., Eyres, S. P. S., Bode, M. F., & Skopal, A., 2002, MNRAS, 335, 1100
16. Crocker, M. M., et al., 2001, MNRAS, 326, 781
17. 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 Asteroseismology”, June 18-22, 2012, Balatonalmádi, Hungary, Abstract Book (ISBN 978-963-88019-9-9), Ed. R. Szabó, p. 157
18. Csányi István, 2012  
Vörös óriás csillagok fényváltozásának analízise a Kepler űrtávcső mérései alapján  
BSc szakdolgozat SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék
19. Dyck, H. M., van Belle, G. T., & Thompson, R. R., 1998, AJ, 116, 981
20. Eyres, S. P. S., Bode, M. F., Skopal, A., Crocker, M. M., Davis, R. J., Taylor, A. R., Teodorani, M., Errico, L., Vittone, A. A., & Elkin, V. G., 2002, MNRAS, 335, 526
21. Ezuka, H., Ishida, M., & Makino, F., 1998, ApJ, 499, 388
22. Fekel, F. C., Hinkle, K. H., Joyce, R. R., Wood, P. R., & Howarth, I. D., 2008, AJ, 136, 146
23. Fekel, F. C., 1997, PASP, 109, 514
24. Fox, M. W., Wood, P. R., 1982, ApJ, 259, 198-212
25. Gastine T. & Dintrans B., 2011, A&A, 528, A6.
26. Hinkle, K. H., Lebzelter, T., Joyce, R. R., & Fekel, F. C., 2002, AJ, 123, 1002

27. Hinkle, K. H., Fekel, F. C., Johnson, D. S., & Scharlach, W. W. G., 1993, AJ, 105, 1074
28. Hoard, D. W., 1993, PASP, 105, 1232
29. Joanna Mikołajewska, Yuri Balega, Karl-Heinz Hofmann, Gerd Weigelt, 2010, MNRAS: Letters, Volume 403, Issue 1, pp. L21-L25.
30. Kalirai, J. S., Hansen, B. M. S., Kelson, D. D., Reitzel, D. B., Rich, R. M., Richer, H. B., 2008, ApJ, 676, 594
31. Kallinger T. & Matthews J. M., 2010, ApJ, 711, L35.
32. Karovska, M., Carilli, C. L., Ramond, J. C., & Mattei, J. A., 2007, ApJ, 661, 1048
33. Kenneth H. Hinkle, Francis C. Fekel, Richard R. Joyce, 2009, ApJ, 692, 1360-1373
34. Kenny, H. T., & Taylor, A. R., 2005, ApJ, 619, 527
35. Kenyon, S. J., Fernandez-Castro, T., & Stencel, R. E., 1988, AJ, 95, 1817
36. Kenyon, S. J. & Fernandez-Castro, T., 1987, AJ, 93, 938
37. Kiss László, Mizser Attila, Csizmadia Szilárd, 2009  
Változócsillagok, Amatőrcsillagászok kézikönyve. 471-512. MCSE, Bp.
38. Kiss László, 2005  
CH Cygni 1971-2004, Meteor csillagászati folyóirat 2005/2. 40-45.
39. Kiss, L. L., Szatmáry, K., Szabó, G. & Mattei, J. A. 2000, A&AS, 145, 283
40. Lenz P. and Breger M., 2005  
Period04 User Guide, Communications in Asteroseismology, 146, 53-136.
41. Loeb A. and Gaudi S.B., 2003, The Astrophysical Journal, 588:L117-L120
42. Mikołajewski, M., Mikołajewska, & Khudyakova, T. N., 1992, A&A, 254, 127
43. Mikołajewski, M., Mikołajewska, J., & Khudiakova, T. N., 1990, A&A, 235, 219
44. Mikołajewski, M., Mikołajewska, J., Tomov, T., Kulesza, B., Szczerba, R., & Wikierski, B., 1990, Acta Astr., 40, 129
45. Mikołajewski, M., Tomov, T., Mikołajewska, J., 1987, Ap&SS, 131, 733

46. Molnár László, 2014  
Kepler-űrtávcső második élete, Meteor csillagászati folyóirat 2014/2. 44-48.
47. Muciek, M. & Mikołajewski, M., 1989, *Acta Astr.*, 39, 165
48. Munari, U., Yudin, B. F., Kolotilov, E. A., & Tomov, T. V., 1996, *A&A*, 311, 484
49. Mürset, U., Nussbaumer, H., Schmid, H. M., & Vogel, M., 1991, *A&A*, 248, 458
50. Ostlie, Dale A., Cox, Arthur N., 1986, *ApJ*, 311, 864-872
51. Payne-Gaposchkin, C. 1954, *Ann. Harvard College Observatory*, 113, 189
52. Richichi, A., Fabbroni, L., Ragland, S., & Scholz, M., 1999, *A&A*, 344, 511
53. Rodgers, B., Hoard, D. W., Burdullis, T., Machado-Pelaez, L., O'Toole, M., Reed, S., 1997, *PASP*, 109, 1093
54. Russell, H.N., Dugan, R. S., & Stewart, J. Q., 1955, "Astronomy II – Astrophysics & Stellar Astronomy," (Ginn:Boston), p. 700
55. Samadi R., Goupil M.-J., & Houdek G., 2002, *A&A*, 395, 563.
56. Schild, H., Dumm, T., Folini, D., Nussbaumer, H., & Schmutz, W., 1999, in "The Universe as Seen by ISO," P. Cox & M. F. Kessler, eds. (ESA-SP 427; ESA, Noordwijk), p. 397
57. Schmidt, M. R., Zacs, L., Mikołajewska, J., & Hinkle, K. H., 2006, *A&A*, 446, 603
58. Skopal, A., Vaňko, M., Pribulla, T., Chochol, D., Semkov, E., Wolf, M., & Jones, A., 2007, *nAstron. Nachr.*, 328, 909
59. Skopal, A., 1997, in "Physical Processes in Symbiotic Binaries and Related Systems" J. Mikołajewska, ed. (Copernicus Foundation for Polish Astronomy, Warsaw), p. 99
60. Skopal, A., Bode, M. F., Lloyd, H. M., Tamura, S., 1996a, *A&A*, 308, L9
61. Skopal, A., 1995, *IBVS*, 4157
62. Sokoloski, J. L. & Kenyon, S. J., 2003a, *ApJ*, 584, 1021
63. Sokoloski, J. L. & Kenyon, S. J., 2003b, *ApJ*, 584, 1027
64. Solf, J., 1987, *A&A*, 180, 207

65. 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 Astroseismology”, June 18-22, 2012, Balatonalmádi, Hungary, Abstract Book (ISBN 978-963-88019-9-9), Ed. R. Szabó, p. 156
66. Szatmáry K., Kiss L.L., Bebesi Zs., 2003, *Astronomy and Astrophysics*, 398, 277-282.
67. Szatmáry Károly, 1994  
Változócsillagok periódus-analízise az idő és a frekvencia tartományban  
kandidátusi értekezés, JATE, Szeged
68. Tabur V., Bedding T. R., Kiss L. L., et al., 2010, *MNRAS*, 409, 777
69. Taranova, O. G. & Shenavrin, V. I., 2007, *Astronomy Letters*, 33, 531
70. Taranova, O. G. & Shenavrin, V. I., 2004, *Astronomy Reports*, 48, 81
71. Taylor, A. R. , Seaquist, E. R., & Mattei, J. A., 1986, *Nature*, 319, 38
72. van Kerkwijk Marten H., Rappaport Saul A., Breton René P., Justham Stephen, Podsiadlowski Philipp, Han Zhanwen, 2010, *The Astrophysical Journal*, Volume 715, Issue 1, pp. 51-58
73. van Leeuwen, F., 2007, “Hipparcos, the New Reduction of the Raw Data,” (Heidelberg: Springer)
74. Vassiliadis, E. & Wood, P. R., 1993, *ApJ*413, 641
75. Victoria Antoci, 2014, *Precision Astroseismology*, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, 301, 333-340
76. Viotti, R., Badioli, M., Cardini, D., Emanuele, A., Iijima, T., 1997, in “Hipparcos Venice '97,” B. Battrick, ed., ESA SP-402, p. 405
77. V. I. Shenavrin, O. G. Taranova, A. E. Nadzhip, 2011, *Astronomy Reports*, Vol. 55, No. 1, 31-81
78. White T. R., Bedding T. R., Stello D., et al., 2011, *ApJ*, 743, Issue 2, article id. 161
79. Wood, P. R., Olivier, E. A., & Kawaler, S. D., 2004, *ApJ*, 604, 800
80. Wood, P. R. et al., 1999, in “Asymptotic Giant Branch Stars,” IAU Symp. 191, T. Le

Bertre, A. Lebre, C. Waelkens, eds., p. 151

81. Wood, P. R. & Zarro, D. M., 1981, ApJ, 247, 247
82. Xiong, D. R., Deng, L., Cheng, Q. L., 1998, ApJ, 499, 355-366
83. Zimmerman R., 2007, What makes Mira tick?, Astronomy 2007/Feb, p. 42
84. A Period04 program: <http://www.univie.ac.at/tops/Period04/>
85. Változócsillagok: <http://astro.u-szeged.hu/ismeret/valtozok/pulzalog.html>
86. A *Kepler* űrtávcső hivatalos oldala: <http://kepler.nasa.gov>
87. Link1: <http://www.csillagaszat.hu/hirek/tudomany/tu-urteleszkopok/ime-a-kepler-masodik-első-fénye/>
88. Link2: <http://www.csillagaszat.hu/hirek/tudomany/tu-urteleszkopok/ismet-bolygokat-lat-a-kepler-urtavcső/>
89. Link3: [http://www.daviddarling.info/encyclopedia/C/CH\\_Cygni.html](http://www.daviddarling.info/encyclopedia/C/CH_Cygni.html)
90. Link4: [http://hu.wikipedia.org/wiki/Kepler\\_űrtávcső](http://hu.wikipedia.org/wiki/Kepler_űrtávcső)
91. Link5: [http://en.wikipedia.org/wiki/Kepler\\_\(spacecraft\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Kepler_(spacecraft))
92. Link6: <http://www.csillagaszat.hu/hirek/tudomany/tu-urteleszkopok/a-kepler-folytatja-a-spitzertol-jo-esellyel-bucsuzhatunk/>



# NYILATKOZAT

Alulírott **Bódi Attila** csillagász MSc szakos hallgató (ETR azonosító: BOARAAT.SZE) „**A CH Cygni Kepler űrtávcsővel mért fényességváltozása**” című diplomamunka szerzője fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy dolgozatom önálló munkám eredménye, saját szellemi termékem, abban a hivatkozások és idézések általános szabályait következetesen alkalmaztam, mások által írt részeket a megfelelő idézés nélkül nem használtam fel.

Szeged, 2014. május

.....  
*a hallgató aláírása*