



Szatmáry Károly

Csillagok fényességének periódusváltozása

Értekezés az MTA Doktora cím megszerzéséért

Szeged

2012

Tartalomjegyzék

Előszó	3
1. Az O-C diagram módszer	5
2. A wavelet-analízis	11
2.1. Matematikai alapok	12
2.2. Diszkrét wavelet-transzformáció	13
2.3. A wavelet-térkép	13
3. A fényesség periódusváltozásának lehetséges okai	16
3.1. Pulzáló csillagok	16
3.2. Kettőscsillagok	17
4. A fényidő-effektus	19
4.1. Pulzáló csillagok kettős rendszerekben	19
4.2. Fedésidőpont-változás tranzitos exobolygóknál	26
5. Mira és szemireguláris csillagok	28
5.1. Y Lyn	30
5.2. AF Cyg	32
5.3. Z UMa	35
5.4. V Boo	37
5.5. T UMi	39
5.6. R Cyg	45
6. A Kepler űrtávcső adatainak elemzése	47
6.1. A távcsőről	47
6.2. Az adatsorok	50
6.3. A fénygörbék összetolása	50
6.4. Tesztelés generált adatsorokon	51
6.5. Valós csillagok fénygörbéi	61
6.6. Csillagok csoportjai	67
6.7. Három érdekes csillag	69
6.8. LPV csillagok a <i>Kepler</i> -mezőben	83
7. Összefoglalás, kitekintés	89
8. Köszönetnyilvánítás	90
9. Irodalomjegyzék	91

Előszó

Hazánkban sok évtizedes hagyománya van a változócsillagok vizsgálatának. Közismert, hogy asztrofizikai jelentőségük igen nagy (pl. Szeidl 1981), ugyanis több fizikai paraméterüket lehet meghatározni, mint a fényességváltozást nem mutató csillagok esetében. Nagyon sok magyar csillagász kutatási területe a változócsillagok valamelyik típusa vagy típusai, ezért számos PhD, kandidátusi és tudományok/MTA doktora értekezés született ezekben a témákban.

Hallgatóként TDK- és diplomamunkám a galaxisok spirálszerkezetéről szólt. Kezdő oktatóként az 1980-as években először δ Scuti csillagok fotometriájával foglalkoztam, főleg piszkés-tetői megfigyeléseket végeztem (pl. Szatmáry 1988). A négy hónapos odesszai tanulmányutam során megismerkedtem ezen csillagok spektroszkópiai elemzésével is (Garbusov et al. 1988). Különösen érdekelt a pulzáló csillagok kettős rendszerekben téma (Szatmáry 1990), az amplitúdó- és frekvenciamodulált fénygörbék esete. Ebből írtam egyetemi doktori értekezésemet (Szatmáry 1987).

Kisebb kirándulásokat tettem a fedési kettősök (pl. Vinkó, Gál, Szatmáry, Kiss 1993), az RR Lyrae csillagok és a cefeidák világába, ahol főleg a periódus változását elemeztem O-C diagramok alapján. A hazai és külföldi amatőrcsillagászokkal felvett kapcsolat után hozzáfértem olyan adatbankokhoz, ahol hosszúperiódusú vörös változók sok évtizedes fénygörbéit gyűjtötték össze. Ez a "szerelem" a mirák és félszabályos változócsillagok iránt még ma is tart, de a vizuális adatsorok mellett/helyett újabban a *Kepler* űrtávcső adatait elemzem.

A fénygörbék periodicitásának vizsgálatához a hagyományos, pl. Fourier-analízis mellett a 90-es évek elején egészen új, idő-frekvencia módszereket kezdtem használni, főleg a wavelet-analízist. Kandidátusi értekezésem erről szólt (Szatmáry 1994a).

Közben 1995-től, a Nap típusú csillagok körüli első exobolygó felfedezésétől figyelemmel kísérem ennek a területnek a fejlődését (Szatmáry 1996, 1997c, 2002, 2006, 2007). Amellett, hogy lebilincselően izgalmas, a csillagászat szinte összes ágát, módszerét felhasználja. Az utóbbi néhány évben kis csoportunkkal az exobolygók lehetséges holdjainak (exoholdaknak) a kimutatási lehetőségein is dolgoztam (Simon 2011).

A fentiekből látható, hogy sok témával foglalkoztam. Ez egy egyetemi oktató esetében nem is baj, hiszen mindezeken túlmenően a csillagászat szinte összes területét figyelemmel kell követni, ha az új eredményeket is be szeretnénk építeni az oktatásba. Véleményem szerint be is kell.

Nem volt túl nehéz megtalálnom a vezérfonalat, ami eddigi kutató munkámat jellemzi, úgymond összefogja: ez a csillagok fényességváltozási periódusa, illetve periódusainak az időbeli megváltozása. Nagyon izgalmas terület, hiszen a periódus valódi változásának – akár pulzáló, akár fedési kettős csillagnál – alapvető fizikai vagy evolúciós okai lehetnek, de a változás látszólagos is lehet (pl. fényidő-effektus).

A fénygörbék periodicitásának vizsgálatához a hagyományos O-C diagram módszeren túl az ablakozott Fourier-transzformációt, de főleg a már említett wavelet-analízist alkalmaztam. A tranzitos exobolygóknál a holdak kimutatására is valamilyen időbeli ciklikus eltolódás (angol szakkifejezéssel: timing) elemzését alkalmaztunk, általában a fedés közepének időpontjára vonatkozóan.

A változócsillagok öt fő típusa:

- Fedési kettőscsillagok
- Pulzáló csillagok
- Foltos (rotáló) változók
- Eruptív csillagok
- Kataklizmikus változók (nóvák, szupernóvák)

Tágabb értelemben változócsillagok közé sorolhatóak a gravitációs mikrolencsézés miatt felfényesedő csillagok, illetve az exobolygók tranzitjai miatt kissé elhalványodó csillagok is. Egy sor különleges objektum, röntgen- és gammafelvillanásokat produkálók (GRB-k) is ide tartoznak.

Sok csillag egyidejűleg több osztályba is sorolható. Napunk például nemradiálisan pulzál, foltos, eruptív és tőlünk nézve fedési is, hiszen a Merkúr, a Vénusz és a Hold időnként eltakarja egy részét. Különösen izgalmas kutatási terület a kettős rendszerekben lévő pulzáló csillagok. Szorosabb kettős esetén az árapály-hatások, a szinkronizáció befolyásolhatja a pulzációs módusok gerjesztődését. Rezonancia léphet fel az orbitális és a pulzációs periódus között. A pulzációs periódus pedig a keringés során látszólag ciklikusan változik a fényidő-effektus (LITE) következtében. Egy másik érdekes jelenség a keringő csillag fényességének változása (Doppler-boosting). Ennek amplitúdója kicsiny, mivel *v/c*-vel arányos, ahol *v* a látóirányú sebessége, *c* a fénysebesség. A *Kepler* űrtávcső fotometriai pontossága viszont már lehetővé teszi ennek az effektusnak a kimutatását.

Egy fedési kettős rendszerben lévő pulzáló csillag esetében érdekes lehetőség nyílik a Q pulzációs állandó kiszámítására, ami a módus meghatározását teszi lehetővé (Jørgensen & Grønbech 1978, Kiss & Szatmáry 1995). Kepler III. törvényéből

$$\frac{a^3}{P_{orb}^2} = \frac{G}{4\pi^2} (M_1 + M_2)$$
(1.1)

és a pulzációs állandó képletéből

$$\mathbf{Q} = \mathbf{P}_{\text{pul}} \left(\frac{\mathbf{M}_1}{\mathbf{R}_1^3} \right)^{1/2} \tag{1.2}$$

1 10

kapjuk, hogy

$$Q = 0,1159 \frac{P_{pul}}{P_{orb}} \left(\frac{R_1}{a}\right)^{-3/2} \left(1 + \frac{M_2}{M_1}\right)^{-1/2} , \qquad (1.3)$$

ahol P_{orb} [d] a keringési, P_{pul} [d] a pulzációs periódus, M_1 [M_o] és R_1 [R_o] a pulzáló komponens tömege és sugara, *a* [CsE] pedig a pálya fél nagytengelye.

A változócsillagok jellemzőit, alosztályait nem kívánom itt részletezni, ugyanis ez már több tucat értekezésben, dolgozatban szerepel. (Én ezt 30 éve tanítom az egyetemen, nyomon követve a legújabb kis altípusokat is. Épp most készítek erről egy digitális tananyagot az asztrofizikai MSc kurzusokhoz.)

Ebben az értekezésben főleg pulzáló változókról lesz szó, azon belül is döntően a hosszú periódusú mirákról és félszabályos csillagokról. A rövidebb periódusú pulzálókról és néhány fedési kettősről rövidebben szólok. Ezeknek lényegében csak a periódusváltozását elemeztem.

Az első fejezetben példákon keresztül áttekintem az O-C diagram módszert, a másodikban pedig az idő-frekvencia analízisek közül a wavelet-módszert. Mindkettő a periódusváltozás kimutatásának eszköze.

A harmadik fejezetben röviden összefoglalom a periódus megváltozásának lehetséges okait pulzáló és kettőscsillagok esetében. A negyedik fejezetben kissé részletesebben esik szó a fényidő-effektusről. Az ötödik fejezetben néhány mira és félszabályos csillag vizsgálatát mutatom be. A hatodik fejezetben végül legújabb kutatásaimról számolok be, a *Kepler* űrtávcső vörös óriás csillagokról végzett méréseit elemzem.

1. Az O-C diagram módszer

A periódusváltozás kimutatásának fő módszere sokáig az O-C diagram vizsgálata volt. A diagram: az idő függvényében a megfigyelt (O=observed) és a számolt (C=calculated) fénygörbemaximum (pulzálóknál) vagy minimum (fedési kettősöknél) időpontértékek különbségének ábrázolása. Itt nem kívánom részletesen bemutatni a módszert, hiszen erre is igaz, hogy számos dolgozatban, cikkben leírták (pl. Sterken 2005), leírtam én is már.

Jól tudjuk, hogy az egyenessel illeszthető O-C diagram állandó periódust jelent, a parabola lineárisan változó (a felfelé nyíló növekvő, a lefelé nyíló csökkenő) periódusra, a ciklikus pedig ciklikus periódusváltozásra utal. Két, egymást metsző, különböző meredekségű egyenes esetén két, különböző periódusértékről van szó, a hirtelen periódusváltozás a két egyenes metszésének időpontjában következett be.

Az, hogy mivel illesztjük az O-C diagramot, nagyon fontos, hiszen a periódusváltozás léte és magyarázata ettől függ. A leggyakrabban az fordul elő, hogy valaki metsző egyenesekkel, más kutató pedig parabolával közelíti ugyanazt az O-C görbét. Az első hirtelen periódusugrást, a másik folyamatos periódusváltozást jelent, amelyek mögött persze radikálisan eltérő fizikai magyarázat rejlik.

Általában az O-C diagramot egy korábbi cikkben megadott periódussal és epochával számolják (1.1 egyenlet), és nem próbálják változtatni a fénygörbe szélsőértékének C kalkulált időpontjait azáltal, hogy a kiszámolásukhoz használt periódus többféle értékét használnák.

$$\mathbf{C} = \mathbf{T}_0 + \mathbf{P}\mathbf{E},\tag{1.1}$$

ahol T_0 egy kezdő szélsőérték időpont (epocha), P a periódus és E a ciklusszám.

Ha a periódus lineárisan változik, akkor az O-C parabola:

$$C = T_0 + PE + \frac{1}{2}\beta E^2 , \text{ abol } \beta = P\frac{dP}{dt} . \qquad (1.2)$$

A dP/dt periódusváltozás mértékét változatos egységekben szokták megadni: nap/ciklus, nap/nap, nap/év, másodperc/évszázad.

Egy fontos dologra hívom fel a figyelmet, ami tapasztalataim szerint a kutatók között sem nagyon ismert és alkalmazott. Arról van szó, hogy más-más periódussal készítve az O-C diagramot, ránézésre más alakú, menetű, jellegű lesz a görbe. Az 1.1 ábra erre mutat példát. A felső és az alsó diagram két, egymást metsző egyenessel, míg a középső inkább egy lefelé nyíló parabolával illeszthető. Tehát rendkívül vigyázni kell az O-C diagram elkészítésénél és az abból levont következtetéseknél.

Az O-C módszer lényegében csak monoperiodikus jelek vizsgálatára alkalmas. Az O-C diagram értelmezésénél óvatosan kell eljárni, ha a csillag többszörös periodicitású (pl. Kiss et al. 2002), vagy a periódus véletlenszerűen ingadozik. Ilyen esetekben ciklusok jelenhetnek meg az O-C görbén, amelyek hamisak, nem valós változások következtében jönnek létre. Többszörös periódus esetén egy-egy periódus szerint O-C diagramot úgy érdemes készíteni, hogy előtte a többi periódussal fehérítjük az adatsort. Ez viszont megint csak problémás, ugyanis a periodikus komponensek fázisa csak kis pontossággal határozható meg. A vörös óriásoknál tapasztalható periódus-ingadozásra még visszatérünk.





1.1. ábra: Az RZ Cas Algol típusú fedési kettős O-C diagramjai három módon számolva (Hegedüs, Szatmáry, Vinkó 1992).

Az RZ Cas fotoelektromos mérésekből kapott O-C pontjaira 4 komponensű LITE görbét illesztettem, ami a rendszerben 4 további csillag jelenlétére utalhatna. Később a hatos-rendszer feltételezés nem igazolódott be. Az is kiderült, hogy az RZ Cas egyik csillaga δ Scuti típusú pulzáló változó.

A továbbiakban még néhány példát mutatok olyan O-C diagramokra, amelyek készítésénél, elemzésénél szerepet játszottam.



1.2. ábra: Az AU Peg II. populációs cefeida O-C diagramja periódus növekedésre utal (Vinkó, Szabados, Szatmáry 1993).

Az AU Peg az egyik legrövidebb periódusú kettős (P_{orb}=53,3 nap), az árapályerőknek jelentős szerepe lehet. Azt találtuk, hogy a periódus növekedése MJD=48000 körül megállt, sőt 2-3 ezred napot csökkent.



1.3. ábra: A HW Vir fedési kettőscsillag O-C diagramja. Felül: illesztés két egyenessel, illetve parabolával. Alul: a pillanatnyi periódus változása (Kiss, Csák, Szatmáry, Fűrész, Sziládi 2000).

dc_514_12



1.3. ábra: A TU UMa RR Lyrae típusú változócsillag O-C diagramja parabola és LITE illesztéssel (Kiss, Szatmáry, Gál, Kaszás 1995). A pálya lapultságára túl nagy érték adódott (e>0,9). A feltételezett kettősség még nem igazolódott be.



1.4. ábra: A BE Lyn δ Scuti típusú csillag O-C diagramjai. Felül az összes publikált adat, telt körök a fáziseltolás módszernél (Jurcsik et al. 2001) használt adatok. Alul a fáziseltolás diagram (Szakáts, Szabó, Szatmáry 2008). A korábban (Kiss & Szatmáry 1995) feltételezett kettősség, a LITE illesztés nem igazolódott be.

dc_514_12



1.5. ábra: Az SZ Lyn δ Scuti típusú csillag O-C diagramja, parabolikus trenddel és LITE görbével illesztve (Derekas et al. 2002, 2003, 2009). Ez a csillag a legszebb példa a lassú periódusváltozás és a kettősség miatti fény-idő effektus egyszerre való megjelenésére.



1.6. ábra: A MACHO J050918.712-695015.31 RR Lyrae típusú csillag O-C diagramja az OGLE III adatok alapján. A ciklikus periódusváltozás nyilvánvaló. A kettősséggel való (60 M_☉ tömegű kísérőt feltételez a nagy amplitúdó) és a mágneses aktivitással való

(60 M☉ tomegu kiserot renetelez a nagy amphtudo) és a magneses aktivitassal valo magyarázat sem igazán jó (Derekas, Kiss, Udalski, Bedding, Szatmáry 2004).



1.7. ábra: A VW Cep kontakt fedési kettős O-C diagramja és a rá illesztett parabola (balra). A parabola levonása után a reziduál (jobbra), harmadik test által okozott LITE görbékkel illesztve (Kaszás, Vinkó, Szatmáry, Hegedüs, Gál, Kiss, Borkovits 1998).

A VW Cep W UMa típusú fényes kettőscsillagot sokan és sokat mértük (P=0,27831 nap; <V>=7,5 mag; A_V=0,2 mag). A szegedi 40 cm-es távcsőnek az egyik első célpontja volt. Összegyűjtöttük az összes elérhető minimum időpontot, és elkészítettem az O-C diagramot. A nagyléptékű parabolikus trendet, – ami folyamatos perióduscsökkenésnek $(\Delta P/P = -5,8\cdot10^{-10})$ felel meg – levontam. A maradékot (reziduált) egy LITE görbével illesztettem (P_{orb} = 30,89 év; *a sini* = 277·10⁶ km; *e* = 0,431; ω = 221,4°), ami harmadik komponens létére utal. Látható, hogy a LITE görbe nem illeszkedik igazán jól az adatokra, és Hershey (1975) asztrometriai adataival sem esik egybe az elvárható pontossággal. A LITE és az asztrometriai megoldás között amplitúdó eltérés van, a kettő különbsége pedig két újabb ciklushosszra utal. Az eltérésre olyan magyarázatokat vetettünk fel, hogy a főkomponens árapályereje perturbálhatja a periódust. A VW Cephei az egyik legtöbbet és legalaposabban vizsgált kontakt fedési kettőscsillag. Periódusváltozásának elemzésére érdemes lesz visszatérni néhány év múlva, amikor már újabb 30-éves hullámmal bővül az O-C görbe.

2. A wavelet-analízis

A Fourier-transzformációval lényegében csak a fénygörbe egészére jellemző additív harmonikusokat szemléltethetjük. Az idő-frekvencia módszerekkel a periódus, az amplitúdó és a fázis időbeli változását is nyomon követhetjük.

Idő-frekvencia eloszlási függvényt nagyon sokfélét definiáltak (pl. Cohen 1994, Kolláth & Buchler 1997, Csubry 2002, Bebesi 2003). Először az ablakozott Fourieranalízist használták (Gábor-transzformált, ha Gauss-görbe az analizáló ablak). Ennél az ablak – amit végigcsúsztatunk az adatsoron, és csak a benne lévő adatokat vizsgáljuk – időben állandó szélességű, míg a wavelet-transzformációnál minden egyes időbeli elcsúsztatáson belül az ablak szélessége változik, a próbafrekvenciával fordítottan (a próbaperiódussal egyenesen) arányos. Emiatt a wavelet esetén az idő-frekvencia felbontás erősen változó: kis frekvenciáknál időben nyúlnak szét az amplitúdó-csúcsok, nagyobb frekvenciákon pedig a frekvencia mentén (2.1. ábra). Erre nagyon figyelni kell a wavelettérképek értelmezése során.



2.1. ábra: Idő-frekvencia felbontás az ablakozott Fourier (balra) és a wavelettranszformált (jobbra) esetében. A Heisenberg-féle határozatlansági relációhoz hasonlóan $\Delta t \cdot \Delta \omega =$ állandó $\geq \frac{1}{2}$.

Az ún. wavelet-transzformáció története hosszú időre nyúlik vissza, de sokáig csak matematikai vizsgálatok tárgya volt. Később az akusztikában, a zenében, a geofizikában, a meteorológiában, az orvostudományban használták különféle elnevezésekkel. Például a Föld atmoszférájában terjedő, kozmikus eredetű rádiójelek egy részének (a whistlereknek) az időbeli frekvenciaváltozását dinamikus (frekvencia-idő-amplitúdó) spektrumok térképeivel tanulmányozták.

Manapság tág fogalmat takar a wavelet-transzformáció. Egyre több területen használják, sokféle alakban és több dimenzióban. Az egyik fő alkalmazás a képfeldolgozás. Speciálisan a csillagászatban többször galaxisok térbeli eloszlásának vizsgálatát végezték segítségével. A wavelet-eljárások egyre gyakoribbak a turbulenciák és a fraktálok matematikai elemzésénél és a telekommunikáció területén is. Számos könyv jelent meg az utóbbi években a wavelet-analízisről és alkalmazásairól.

A módszert sokszor használják a napfizikusok is. Korábban a "sonagram" nevű idősor darabolásos Fourier-módszerrel próbálták a naptevékenységi ciklusok változását vizsgálni. Az 1990-es évektől a wavelet transzformáció megjelent a napfoltciklusok periodicitásának analízisénél is.

A wavelet-analízis a változócsillagok fénygörbéjének elemzéséhez mintegy két évtizede használatos. Olyan adatsorokra alkalmazható leginkább, amelyekben alig vannak kisebb űrök. A világon az elsők között alkalmaztam a wavelet-módszert hosszúperiódusú pulzáló változókra, mirákra és félszabályos csillagokra (Szatmáry & Vinkó 1992, Szatmáry & Gál 1992, Gál & Szatmáry 1993, Szatmáry 1994a, 1994b, Szatmáry, Vinkó, Gál 1994, Szatmáry, Gál, Vinkó 1995a, 1995b, Gál & Szatmáry 1995a, 1995b, 1995c, 1995d, Szatmáry, Gál, Kiss 1995, Szatmáry, Gál, Kiss 1996, Szatmáry 1997a, 1997b, Kiss, Szatmáry, Cadmus, Mattei 1999, Kiss & Szatmáry 1999, Kiss, Szatmáry, Mattei 1999, Kiss, Szabó, Szatmáry, Mattei 2000, Kiss, Szatmáry, Szabó, Mattei 2000, Szatmáry & Kiss 2000, Szatmáry & Kiss 2002, Kiss & Szatmáry 2002, 2003, Szatmáry, Kiss, Bebesi 2003, Derekas et al. 2010, Szatmáry et al. 2012).

2.1. Matematikai alapok

Egy valós m(t) függvény (általában komplex) g(t) ún. analizáló hullámra vonatkozó wavelet-transzformáltján (Grossmann et al. 1989) a következő kétváltozós kifejezést értjük:

W(b,a) =
$$1/\sqrt{a} \int_{-\infty}^{+\infty} m(t) \cdot g^*[(t-b)/a] dt$$
 (2.1)

amely a H = { $(b, a) \mid a \in \mathbb{R}, a > 0, b \in \mathbb{R}$ } nyitott félsíkon értelmezhető.

Nemegyenközű adateloszlás esetén egy konkrét realizáció a következő formában történhet:

$$W(\tau, f) = \frac{1}{C} \sum_{k=1}^{N} m(t_k) \cdot e^{-i2\pi f(t_k - \tau)} \cdot e^{-\frac{(t_k - \tau)^2}{\Delta \tau^2}}$$
(2.2)

ahol

$$C = \sum_{k=1}^{N} e^{-\frac{(t_k - \tau)^2}{(\Delta \tau)^2}}$$

Az itt szereplő τ a korábbi *b* változónak, ill. az 1/f idő dimenziójú mennyiség az *a* változónak felel meg. A τ az időbeli eltolás, $\Delta \tau$ pedig a Gauss-ablak félszélességével arányos. A fenti kifejezés szerint az ablak szélessége a frekvenciától független állandó. Általában azonban az ablakszélességet úgy választják meg, hogy megegyezzen a próbaperiódussal, azaz $\Delta \tau \approx P = 1/f$.

A (2.2) kifejezésben egy fix τ mellett kiemeljük a $\tau \approx t_k$ időponthoz közeli függvénytulajdonságokat az adateloszlástól és a próba-periódustól függő szélességben, és

képezzük a Fourier-spektrumot. Amennyiben a t_k -hoz közeli időben az érvényes frekvencia f', úgy a wavelet-transzformált amplitúdója nagy a (t_k , f') pont felett.

Az analizáló hullám, vagy magfüggvény alakja nagyon sokféle lehet, attól függően, hogy a vizsgálandó függvénynek milyen tulajdonságai vannak. A transzformáció – általánosságánál fogva – sok segítséget nyújthat előzetes tájékozódáshoz a legkülönfélébb változások felismerésében.

2.2. Diszkrét wavelet-transzformáció

Legyen $\mathbf{m}(\mathbf{t})$ a csillag fényváltozását leíró függvény. Az f frekvenciához és a τ időeltolási paraméterhez tartozó wavelet-transzformáció:

$$W(f,\tau) = \sqrt{f} \int_{-\infty}^{\infty} m(t) \cdot g^* [f(t-\tau)] dt$$
(2.3)

az ún. Morlet-féle analizáló wavelet egy módosított Gauss-görbe:

$$g^{*}[f(t-\tau)] = e^{-icx} e^{-\frac{1}{2}x^{2}}, \qquad (2.4)$$

ahol x = f (t- τ) és általában c = 2π (a c értéke a frekvencia- és időbeli felbontás paramétere).

A gyakorlatban a DFT-hez hasonlóan bevezethető a diszkrét wavelet-transzformáció (DWT), mely szerint az amplitúdó spektrum (Szatmáry & Gál 1992):

W(f,
$$\tau$$
) = $\left[f \cdot C(f, \tau)^2 + f \cdot S(f, \tau)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$, (2.5)

ahol

$$C(f,\tau) = \sum_{j=1}^{N} m(t_j) \cos(2\pi f(t_j - \tau)) \cdot e^{-\frac{1}{2}f^2(t_j - t_0 - \tau)^2}$$
(2.6)

$$S(f,\tau) = \sum_{j=1}^{N} m(t_j) \sin(2\pi f(t_j - \tau)) \cdot e^{-\frac{1}{2}f^2(t_j - t_0 - \tau)^2}$$
(2.7)

és t₀ az adatsor első eleméhez tartozó idő.

A Gauss-ablak félszélessége a próba-periódussal arányos (P=1/f), nem pedig állandó érték, mint a Fourier-módszernél. Az ablakot τ értékkel toljuk el az adatsor elejétől a végéig, és minden eltolásra kiszámoljuk a frekvenciaspektrumot.

Fontos megjegyezni, hogy a wavelet nem egyszerűen egy adatsor feldarabolásos (ablakozott) Fourier-módszer! A csúsztatott ablakozás mellett alapvető, hogy az ablak szélessége mindig illeszkedik a keresett periódus hosszához. Ennek következtében a frekvenciaspektrumban a csúcsok félszélessége nem egyforma, mint a Fourier-analízisnél, hanem a frekvenciával arányosan növekszik. Ez az aszimmetria egyetlen csúcs esetében is jelentkezik, a nagyobb frekvenciájú oldala "laposabb".

2.3. A wavelet-térkép

A wavelet-transzformációval kapott frekvencia-idő-amplitúdó adathármasok egy felületként ábrázolhatók, ezt nevezzük wavelet-térképnek. Ez azt szemlélteti, hogy a különböző frekvenciájú, ill. periódusú fényváltozások mikor és milyen amplitúdóval vannak jelen a fénygörbében.

A wavelet-analízishez annak idején több programot írtam Turbo Basic nyelven. A fénygörbe alapos szemrevételezése után a vizsgált adatsornak először mindig a Fourier-spektrumát számoltam ki, mely alapján tájékozódni lehet a periódusok helyéről, és megválaszthatóak a wavelet-analízis paraméterei (időbeli és frekvenciabeli felbontások, lépésközök, határok).

A módszer szemléltetésére a Z UMa SRb típusú csillag példáján keresztül bemutatom a wavelet-térképet (Szatmáry & Gál 1992). A 2.2. ábrán felül a fénygörbe, mellette a teljes adatsor Fourier-spektruma látható. A wavelet-térképet érdemes többféle nézőpontból ábrázolni. Szerencsére számos szoftver alkalmas arra, hogy a frekvencia-időamplitúdó adathármasok által alkotott felületet tetszőleges helyzetben kirajzolja.

A baloldali középső szintvonalas ábra a perspektivikus térkép, melyen az amplitúdó "hegyek és dombok" jól megfigyelhetők. Alatta szerepel ennek felülnézete, amelyen jobban nyomon követhető a csúcsok pozíciója. A jobb oldalon középen lévő ábra azt mutatja, hogy az egyes frekvenciákhoz tartozó amplitúdók hogyan változnak az időben, végül az alatta található ábra a Fourier-spektrum időbeli változását tárja elénk.

A cél az, hogy a térképek alapján olyan jelenségeket mutassunk ki (pl. modulációk, fázisugrás, módusváltás), amelyek a hagyományos Fourier-módszerrel nem tanulmányozhatók kielégítő részletességgel. Azonban a bemutatott példán látható, hogy a térkép rendkívül bonyolult. A wavelet-módszer tulajdonságainak a részletes vizsgálata nélkül hamis következtetésekre juthatunk, különösen az amplitúdó változására vonatkozóan.

különféle jelenségeket reprezentáló teszt-adatsorok wavelet-térképeinek А tulajdonságai mellett alapvető az adatok időbeli eloszlásának hatása az amplitúdó szempontjából. Mint ahogyan a Fourier-módszernél, itt is tapasztalható, hogy a mintavételezés romlásával, űrök jelenlétekor az amplitúdóspektrum ill. -térkép "kicsipkéződik", az űrök idején hirtelen nullára csökken, és sokszor amplitúdómodulációhoz hasonló képhez vezet. Emiatt speciális fehérítő eljárást vezettem be kandidátusi értekezésemben (Szatmáry 1994a). Ennek lényege, hogy az adateloszlás, adathiányok miatti amplitúdócsökkenésre úgy következtethetünk, hogy az eredeti adatok időpontjaiban egy szinuszt vagy több szinusz-függvény eredőjét generálunk (a periódusokat, amplitúdókat és fázisokat az adott csillag Fourier-spektrumából határozzuk meg előzőleg). Ennek a "teszt" fénygörbének a wavelet-térképe már mutatja az adathiánvok miatti amplitúdó mintázatot. A "teszt" és az eredeti wavelet összehasonlításával kiszűrhetők a nem valós amplitúdó változások.



2.2. ábra: A Z UMa fénygörbéje, Fourier-spektruma és wavelet-térképe több vetületből (Szatmáry 1994a).

3. A fényesség periódusváltozásának lehetséges okai

A periódusváltozások fő fajtái:

- folyamatos periódusváltozás (növekedés vagy csökkenés)
- hirtelen periódusváltozás (növekedés vagy csökkenés)
- ciklikus periódusváltozás
- sztochasztikus vagy bolyongásszerű periódusváltozás

3.1. Pulzáló csillagok

A periódus megváltozásának egyik fő oka evolúciós eredetű. Attól függően, hogy például egy pulzáló változócsillag merre halad fejlődése során a Hertzsprung–Russelldiagramon, a periódus nőhet vagy csökkenhet. Tipikus példa erre a cefeidák "hurkos" mozgása a HRD-n. Ez az evolúciós periódusváltozás lassú és kismértékű. A HRD-n történő elméleti fejlődési utak szerint a 3 M $_{\odot}$ feletti tömegű csillagok közel vízszintesen haladnak át az instabilitási sávon. Mivel az állandó periódus vonalai a vízszintestől jelentősen eltérnek, a csillagfejlődés során változik a pulzáció periódusa. Ha egy csillag balról jobbra halad át az instabilitási sávon, akkor periódusa nő, ugyanis az egyre hosszabb periódusok vonalait metszi. Amikor a sávon jobbról balra, a növekvő hőmérséklet felé halad át, akkor a periódus csökken (vö. 1.2 képlettel).



3.1. ábra: Elfejlődési utak a fősorozatról. A cefeidák néhány naptömeges tartományában jellegzetes hurkok vannak, így az instabilitási sávot többször is metszhetik (Lejeune & Schaerer 2001).

A klasszikus cefeidáknál tapasztalt folytonos (szekuláris) periódusváltozás a fejlődésből elméletileg meghatározott értékkel jó egyezésben van. Ez arra utal, hogy a megfigyelhető periódusváltozások főleg a csillagfejlődés következményei (pl. Szabados 1989, 1991). Hasonló eredmények születtek több RR Lyrae (pl. Szeidl 1985, Szeidl et al. 1986) és I. populációs törpecefeida, ill. nagy amplitúdójú δ Scuti (pl. Szeidl 1985, Derekas et al. 2003) csillagra. Az I. populációs törpecefeidák általában lassú, folytonos periódusváltozást mutatnak, míg a II. populációs törpecefeidák periódusa gyakran ugrásszerűen változik, ami fejlődéssel nem értelmezhető.

Meg kell jegyeznem, hogy a pulzáló csillagok periódusváltozásának vizsgálata Magyarországon fő kutatási téma volt már az 1930-as évektől. A magyar csillagászok nemzetközileg igen elismert eredményeket értek el.

A hosszú periódusú változók (LPV) esetén is a periódus szorosan összefügg a csillag fizikai paramétereivel, a felszíni gravitációs gyorsulással (Szatmáry & Kiss 2002) vagy a tömeggel, a luminozitással, a sugárral (Szatmáry 2004):

$$\log R = 0.63 \log P + 1.08, \tag{3.1}$$

ahol P (nap) a periódus, R (R_{\odot}) a sugár. Ez a képlet nagyon általános, a pulzáló csillagok szinte minden típusára egyszerre illesztettem (δ Scuti – Mira), így egy-egy típusra nem pontos.

A vörös óriásoknál domináns konvekció, turbulens áramlások, az erős csillagszél, a lökéshullámok, a légköri molekulalépződés jelentősen befolyásolhatják a pulzációt. A legtöbb mira és félszabályos csillag periódusa nem stabil, hanem kisebb-nagyobb mértékben ciklusról ciklusra változik. Bár emiatt az O-C diagramjuk valós változások nélkül is hullámos lehet (ld. Koen és Lombard cikkeit, pl. Lombard & Koen 1993), az egészen nagy léptékű és lassú periódusváltozások (parabolikus O-C görbék) evolúciós eredetűek lehetnek.

3.2. Kettőscsillagok

Kettős rendszereknél, különösen a fedési kettőscsillagoknál gyakran tapasztaljuk a keringési periódus változását. Ennek számos oka lehet (pl. Pribulla 1998, Manzoori & Gozaliasl 2007). Az 1. pontban látszólagos, a többiben valódi a periódus megváltozása:

- 1. Az O-C diagram hosszú ciklusú, szinuszos függvénnyel közelíthető. Ekkor a két legvalószínűbb magyarázat:
 - Ha a fő- és a mellékminimum O-C görbéje hasonlóan, de éppen ellentétes előjellel, alternálva változik, akkor ezt az excentrikus relatív pálya körbefordulása, az apszisvonal-vándorlás (klasszikus és/vagy relativisztikus) okozhatja.
 - Ha a fő- és a mellékminimum O-C görbéje hasonlóan, azonos előjellel, egyszerre változik, akkor ennek harmadik test által okozott fényidő-effektus (LITE) lehet az oka.
- 2. Ha legalább az egyik komponens F-K típusú csillag, akkor az gyakran mágneses aktivitást mutat. Az Algol rendszerekben a periódusváltozás okaként a mágneses aktivitási ciklust vélik magyarázatként. Arról van szó, hogy az aktív csillag alakja változik, így a gravitációs kvadrupólmomentuma is, ami kihat a keringési periódusra. Ilyenkor az aktív csillag luminozitása is változik a keringési periódus változásának periódusával megegyezően.

- 3. Tömeg és impulzusmomentum változása az L₂ belső Lagrange pont mentén a mágneses fékeződés (magnetic braking) által.
- 4. Tömegátadás a komponensek között.
- 5. Tömeg-átrendeződés az egyik vagy mindkét komponens belsejében.
- 6. Tömegkiáramlás, tömegvesztés a kettős rendszerből.

A szoros kettőscsillagok nagyobb része periódusváltozást mutat.

A tömegátadás miatti periódusváltozás (van't Veer 1986):

$$\frac{\Delta P}{P} = \alpha \frac{\Delta m}{m} , \qquad (3.1)$$

ahol P a periódus, $m=m_1+m_2$ a két komponens össztömege, az α pedig tartalmazza a tömegarányt.

A kettős rendszer teljes impulzusmomentuma:

$$L = \frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^{1/3}} \left(\frac{G^2 P}{2\pi}\right)^{1/3}.$$
 (3.2)

Ennek differenciálásával juthatunk el az α jelentéséhez:

$$\frac{\Delta P}{P} = 3\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta m_1}{m_1} \left(\frac{m_1}{m_1 + m_2} - 3\right) + \frac{\Delta m_2}{m_2} \left(\frac{m_2}{m_1 + m_2} - 3\right).$$
 (3.3)

Konzervatív tömegátadás esetén ($\Delta L=0$, $\Delta m1 = -\Delta m2 = \Delta m$) a relatív periódusváltozás (pl. Pribulla 1998, Yang & Liu 2003):

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{3(1-q^2)}{q} \frac{\Delta m}{m}, \quad \text{vagyis} \quad \frac{dm}{dt} = \frac{mq}{3P(1-q^2)} \frac{dP}{dt}, \quad (3.4)$$

ahol $q = m_2/m_1 (m_1 > m_2)$ a tömegarány.

Ha a tömeg a kisebb tömegű komponensről a nagyobb tömegűre áramlik, akkor $\Delta m = \Delta m_1 > 0$, a periódus növekszik, ellenkező esetben csökken.

A tömegtranszfer hatásosságát a periódusváltozásra az

$$\alpha = \frac{3(1-q^2)}{q} \tag{3.5}$$

értéke adja meg. Ha a q=1, azaz a két komponens egyforma tömegű, akkor $\alpha=0$, nincs változás. A csökkenő tömegaránnyal monoton növekszik a hatás a periódus változására.

4. A fényidő-effektus

Ha egy fényforrás látóirányban mozog hozzánk képest (vagy mi mozgunk relatíve), akkor a köztünk lévő távolság változásával az időtartam is változik, amely alatt a fény hozzánk ér. Ennek alapján mérte meg Olaf Römer 1676-ban a fény sebességét a Jupiter holdjainak a bolygó mögé történő belépése időpontjának mérése során. Ezen jelenség (a Föld keringése) miatt szükséges a megfigyelések időpontjának transzformációja is, a heliocentrikus korrekció. Ha ezt nem megfelelően vesszük figyelembe (pl. a Föld pályájának lapultsága is fontos), akkor helytelen következtetésekre juthatunk: pl. a PSR1829-10 pulzár jeleiben 1991-ben modulációt véltek felfedezni, amit bolygó létével magyaráztak, tévesen.

Ezt a jelenséget fényidő-effektusnak (az angol szakszövegben light-time effect, LITE vagy time-of-arrival, TOA) nevezik.

Ha egy csillag stabil periódussal változtatja a fényességét, de kettős rendszerben kering a közös tömegközéppont körül, azaz mozog hozzánk képest, akkor a pályaperiódus szerint modulálódik a periódus, egy ciklikus periódusváltozást figyelhetünk meg. Az O-C diagram ciklikus lesz, az idő-frekvencia analízisnél, pl. a wavelet-térképen hullámzó lesz a fő "frekvencia-gerinc".

Hasonlóan modulálódik egy fedési kettős periódusa is, ha jelen van egy harmadik komponens is a rendszerben. A fedési kettősnek a közös tömegközéppont körüli keringése során látszólag ciklikusan változik a periódusa (ld. 3.2 pontot is).

Megjegyzem, hogy a csillag látóirányú (radiális) sebességének (v) változásával a fényének intenzitása is változik, igaz csekély mértékben, az amplitúdó v/c-vel arányos. Ennek a jelenségnek az elnevezése Doppler-boosting (magyarul talán Doppler-erősítés lehetne). A kicsiny fényváltozást a *Kepler* űrtávcső méréseiből már ki tudták mutatni szoros kettőscsillagok esetében (pl. van Kerkwijk et al. 2010), és bolygóknál is ezt remélik.

A továbbiakban a kettős rendszerekben keringő pulzáló csillagok radiális sebességének és O-C görbéjének jellegéről lesz szó, majd röviden kitérek a tranzitos exobolygóknál tapasztalható hasonló jelenségre, a tranzitidőpont-változásra (TTV: transit timing variation), amit másik bolygó vagy hold gravitációs hatása okozhat.

4.1. Pulzáló csillagok kettős rendszerekben

Irwin (1952, 1959) vizsgálta először részletesebben a fényidő-effektust, fedési kettős és harmadik test esetében.

Számoljuk ki egy ellipszis-pályán keringő csillag radiális sebességét (Szatmáry 1987)! A pálya geometriája a 4.1. ábrán látható (O a tömegközéppont, z a látóirányú elmozdulás, r a rádiuszvektor, v a valódi anomália, ω a pericentrum-hosszúság, i az inklináció, a a félnagytengely, P_o a keringési periódus). Onnan leolvasható, hogy

$$z = r\sin i \sin(v + \omega) \tag{4.1}$$

A radiális sebesség:

$$\mathbf{V}_{\mathrm{r}} = \mathbf{V}_{0} + \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t} \ . \tag{4.2}$$

Időben változó mennyiség *r* és *v*, így



4.1. ábra: Kettős rendszerben keringő csillag pályájának geometriája (Szatmáry 1987).

Az égi mechanikából jól ismert, hogy

$$\mathbf{r} = \frac{\mathbf{a}(1 - \mathbf{e}^2)}{1 + \mathbf{e}\cos v} \quad \text{és} \quad \mathbf{r}^2 \frac{dv}{dt} = \frac{2\pi a^2 \sqrt{1 - \mathbf{e}^2}}{\mathbf{P}_o} \quad . \tag{4.4}$$

Ezek alapján

$$V_{r}(v) = V_{0} + \frac{2\pi a \sin i}{P_{0}\sqrt{1 - e^{2}}} \left[\cos(v + \omega) + e \cos \omega \right].$$
(4.5)

A radiális sebesség szélsőértékei:

 $V_r = \max$, ha $\cos(v+\omega)=1$

$$V_{\rm r}^{\rm max} = V_0 + \frac{2\pi a \sin i}{P_0 \sqrt{1 - e^2}} (e \cos \omega + 1)$$
(4.6)

 $V_r = \min$, ha $\cos(v+\omega) = -1$

$$V_{\rm r}^{\rm min} = V_0 + \frac{2\pi a \sin i}{P_0 \sqrt{1 - e^2}} (e \cos \omega - 1)$$
(4.7)

Legyen

$$K = \frac{2\pi a \sin i}{P_0 \sqrt{1 - e^2}} = \frac{V_r^{max} - V_r^{min}}{2} , \qquad (4.8)$$

a sebesség amplitúdó, így a radiális sebesség

$$\mathbf{V}_{\mathrm{r}}(\mathbf{v}) = \mathbf{V}_{0} + \mathbf{K} \left[\cos(\mathbf{v} + \omega) + \mathbf{e} \cos \omega \right] \quad . \tag{4.9}$$

Az E excentrikus anomália függvényében ugyanez (Szatmáry 1987):

$$V_{\rm r}(E) = V_0 + K \left[\frac{(1 - e^2) \cos \omega \cos E - \sqrt{1 - e^2} \sin \omega \sin E}{1 - e \cos E} \right] .$$
(4.10)

Nézzük meg ezután az O-C alakját a valódi anomália függvényében:

$$(O-C)_{v} = \frac{z(v) - z(v_{0})}{c} .$$
(4.11)

(4.1) és (4.4) alapján

$$z(v) = a(1 - e^{2})\sin i \frac{\sin(v + \omega)}{1 + e\cos v} , \qquad (4.12)$$

így

$$(O-C)_{v} = \frac{a\sin i}{c} (1-e^{2}) \left[\frac{\sin(v+\omega)}{1+e\cos v} \right]_{v_{0}}^{v} .$$
(4.13)

Látható, hogy az O-C görbe alakját e és ω határozza meg. Az E excentrikus anomália függvényében ugyanez (Szatmáry 1987):

$$(O-C)_{E} = \frac{a\sin i}{c} \left[\sqrt{1-e^{2}} \cos \omega \sin E + \sin \omega \cos E \right]_{E_{0}}^{E} .$$
(4.14)

A radiális sebesség és az O-C görbék kiszámításánál az excentrikus anomáliával felírt alakot használjuk, amikor megoldjuk a

$$\mathbf{E} = \mathbf{M} + \mathbf{e}\sin\mathbf{E} \tag{4.15}$$

Kepler-egyenletet, ahol M = $\frac{2\pi}{P_o}(t-\tau)$ a középanomália, τ pedig a pericentrumon való

áthaladás időpontja. A transzcendens Kepler-egyenletet az excentrikus anomália Besselfüggvény együtthatójú trigonometrikus sorfejtésével oldottam meg. A (4.2)-(4.5) ábrákon

e=0 0-C vr [10⁻³ d] $\left[\frac{km}{s}\right]$ 15 30 10 20 5 10 0 0 Guno O -5 -10 10 -20 -15 -30 $\omega = 0^{\circ}$ Porb 0 .2 .4 .6 .8 1 5 30 0 20 5 10 10 0 -10 -15 -20 -20 -30 $\omega = 45^{\circ}$ Porb .8 0 .2 .6 1 .4 0 5 30 -10 20 -15 10 -20 0 -25 -10 -20 -30 $\omega = 90^{\circ}$

láthatóak a görbék (P_p=0,1 nap, P_o=1000 nap, V₀=0 és K=25 km/s bemenő adatok mellett).



dc_514_12



4.3. ábra: LITE radiális sebesség (négyzetek) és O-C (pontok) görbék (e=0,2).

dc_514_12



4.4. ábra: LITE radiális sebesség (négyzetek) és O-C (pontok) görbék (e=0,4).



4.5. ábra: LITE radiális sebesség (négyzetek) és O-C (pontok) görbék (e=0,6).

Az O-C görbék alakja az excentricitás növekedésével egyre aszimmetrikusabb, a szinuszostól való eltérésük egyre jelentősebb (különösen kis ω értékeknél). Nagy excentricitásnál ω =90° környékén a fázis nagy részében parabolához hasonló az O-C alakja, így ezzel is meg lehet próbálni az olyan O-C görbék illesztését, amelyeket egyébként rendszerint parabolával szoktak közelíteni. Így két egészen más magyarázat is szóba jöhet: tág kettős rendszerben másodkomponens léte vagy evolúciós periódusváltozás.

Az O-C görbék kevésbé változatosak és jellegzetesek, mint a radiális sebesség görbék, így ránézésre belőlük nehezebb e és ω értéket becsülni.

Ahhoz, hogy egy pulzáló változó kettőssége megállapítható legyen az O-C diagramjából, legalább néhány keringési perióduson keresztül meg kell figyelni. Másik lényeges kívánalom, hogy a LITE hullám amplitúdója nagyobb legyen az O-C pontok hibájánál.

4.2. Fedésidőpont-változás tranzitos exobolygóknál

Röviden kitérek egy hasonló jelenségre. A tranzitos exobolygók egy részénél az tapasztalható, hogy a bolygó csillag előtti elhaladásakor bekövetkező kismértékű fényességcsökkenés nem pontosan, egy adott periódus szerint jelentkezik, hanem időbeli ingadozást mutat. Ez a TTV (transit timing variation) jelenség (Sartoretti & Schneider 1999).

Annak oka, hogy az exobolygó nem pontosan egyforma időközönként fedi a csillagát többféle is lehet. Az egyik további bolygó jelenléte a rendszerben, amelynek gravitációs hatása a csillagra megváltoztatja a tömegközéppont helyét, megmozgatja a csillagot (4.6. ábra). Így már több, fedést nem okozó bolygó létére sikerült következtetni.



bekövetkező fedési időpont

4.6. ábra: A fedés időpontjának változása másik bolygó hatása következtében.

A periasztron vándorlása is hasonló jelenséghez vezet, de az lassabb változást okoz. Egy esetleges exohold is magyarázhatja a TTV bekövetkezését. Erre vonatkozóan 2005-től kis csoportunk nemzetközileg is sikeres, sokszor idézett vizsgálatokat végzett (Szabó, Szatmáry, Divéki, Simon 2006; Simon, Szatmáry, Szabó 2007; Simon, Szabó,

Szatmáry 2009; Simon, Szabó, Szatmáry, Kiss 2010; Szabó, Haja, Szatmáry, Pál, Kiss 2010; Simon 2011; Simon, Szabó, Kiss, Szatmáry 2012, Simon 2012). A hold keringése a bolygó körül a bolygó térbeli helyzetét folyamatosan változtatja, ami arra vezet, hogy a bolygó más-más időpontokban lép be a csillag elé (általában legfeljebb néhány perces nagyságrendű eltérésekről van szó).



4.7. ábra: Exobolygó-exohold rendszer elhaladása a csillag korongja előtt. Simon Attila (2011) által fejlesztett, LabVIEW környezetben készített programcsomag kezelő felülete.

Eddig (2012. augusztus) nem találtak exoholdat, de szerintem néhány hónapon, legfeljebb 1-2 éven belül várható az első ilyen objektum felfedezése. Különösen a *Kepler* űrtávcső mérései adhatnak erre reményt (Kipping et al. 2012).

5. Mira és szemireguláris csillagok

A pulzáló vörös óriáscsillagok periódusváltozását már régen észrevették és vizsgálták (pl. Eddington & Plakidis 1929, Sterne & Campbell 1937). Különösen az R Aql és R Hya esetében találtak periódus-csökkenést az O-C diagram alapján. Újabban (pl. Zijlstra & Bedding 2002; Templeton, Mattei & Willson 2005) sok évtizedes vizuális adatsorok felhasználásával a mirák mintegy 1%-ánál találtak szekuláris, időben folyamatosan változó periódust, amit evolúciós hatásokkal magyaráztak. A hosszabb periódusú miráknál gyakoribb az instabil ciklushossz. Számos esetben pedig (pl. S Ori, W Hya, T Cep, R Nor) ingadozó, bolyongásszerű periódusváltozást mutattak ki, amit jelentős tömegvesztéssel, cirkumsztelláris anyagfelhővel vagy -gyűrűvel magyaráztak. A periódus fluktuáció általában néhány százalékos egy konstans fő periódusérték körül. Néhány csillag esetében a változás nagyobb: az R Aql periódusa 365 napról (1850 körül volt ennyi) 275 napra, az R Hya 495 napról 385 napra, az RU Vul 160 napról 110 napra csökkent. A W Dra periódusa viszont 155-ről 180 napra nőtt 90 év alatt (Zijlstra & Bedding 2002). A mirák pulzációs periódusa függ a tömegüktől és a sugaruktól. Az erős csillagszél sem tudja azonban nagymértékben csökkenteni a tömegüket (általában néhány százmilliomod

 M_{\odot} /év, ez a rövid mira állapot alatt nem sok). A jelentős periódusváltozás arra utal, hogy a sugaruk viszont változik (vö. 1.2 képlet).



5.1. ábra: Pulzáló változócsillagok a Hertzsprung–Russell-diagramon (Christensen-Dalsgaard (2003) alapján).

Kutatásaim legnagyobb és legsikeresebb részét a hosszú periódusú pulzáló óriáscsillagok vizsgálata képezi. Nagyon sok, száznál több ilyen csillagot elemeztem, hazai és nemzetközi adatbázisok fénygörbéit felhasználva (pl. Szatmáry, Mizser & Dömény 1985; Szatmáry 1986a, 1986b; Mizser, Szatmáry & Tepliczky 1990). Sok érdekes eredményre jutottunk. A 89 Her SRd típusú csillag esetében spektroszkópiai méréseket is végeztünk, melyből cirkumsztelláris anyagot tudtuk jellemezni (Szatmáry & Kiss 1997; Kiss, Szatmáry & Vinkó 2003).

A korábbi cikkeink részletes bemutatása nem hozna újat. Ezért amellett, hogy a fő eredményeket ismertetem, szeretnék újabb dolgokat is prezentálni. Ebben a fejezetben terjedelmi korlátok miatt csak 6 csillagot mutatok be, olyanokat, amelyek különösen érdekes fényváltozást mutatnak. A jelenségek, amelyek mind alapvetőek, nagyrészt még elméleti magyarázatra szorulnak. Példájukon keresztül vizsgálható jelenségek: többmódusú pulzáció, hosszú másodperiódus, módusváltás, radikális amplitúdócsökkenés (átmenet mira típusból félszabályosba), drasztikus perióduscsökkenés (He-héj fellobbanás), kaotikus csillagpulzáció.

A vizsgált csillagok: Y Lyn, AF Cyg, Z UMa, V Boo, T UMi, R Cyg. A fénygörbéket napra készen (2012. július) az AAVSO adatbázisából töltöttük le, a 10-napos átlagpontokat ábrázoltuk. Első lépésben Fourier-analízissel előállítottuk a frekvenciaspektrumot, a spektrál ablakot, és fehérítéseket végeztünk. Ehhez a Period04 programot használtuk fel (Lenz & Breger 2005).

A továbbiakban előállítottuk a fénygörbék wavelet-térképeit, amelyeken nyomon követhetjük az egyes módusok amplitúdó- és frekvencia változását, modulációját. Ehhez az AAVSO WinWWZ programját használtuk fel. (eredetileg: Foster 1996). Az ábrák elkészítésében nagy segítségemre volt Csányi István.

5.1. Y Lyn



5.2. ábra: Az Y Lyn 10 napos átlagolással készített AAVSO fénygörbéje. Egy szegmens 10 év hosszú.



5.3. ábra: Az Y Lyn fénygörbéje (fent), frekvenciaspektruma (balra) és wavelet-térképe (jobbra).

Az Y Lyn SRc típusú szuperóriás csillag, a színképtípusa M5 Ib-II, ZrO és TiO sávokkal. Az átlagfényessége 7,5 magnitúdó, a teljes amplitúdó meghaladja az 1 magnitúdót. Az amatőrcsillagászok egyik kedvenc célpontja.

Az Y Lyncis volt az első csillag, amelynél a wavelet módszert alkalmaztam (Szatmáry & Vinkó 1992). Akkor még csak 16,8 év hosszú adatsor állt rendelkezésünkre. Később az 1970-1999 időtartamban vizsgáltuk (Szatmáry & Kiss 2000). Az 5.2. ábrán már 1954 februárjától 2012 júliusáig látható a fénygörbe.

A domináns ciklus átlagos hossza 1246 nap, amire számos rövidebb (legtöbbször 135 nap körüli) hullám rakódik rá. Ez a 10-hez közeli periódusarány gyakori a félszabályos csillagoknál. A hosszú másodperiódus (LSP: Long Secondary Period) magyarázata még nem megoldott (pl. Wood, Olivier, Kawaler 2004). A P-L relációk diagramján ugyanúgy szekvenciaként jelenik meg, mint a radiális pulzációs periódusok.

5.2. AF Cyg



5.4. ábra: Az AF Cyg 10 napos átlagolással készített AAVSO fénygörbéje. Egy szegmens 10 év hosszú.

dc_514_12



5.5. ábra: Az AF Cyg fénygörbéje (fent), frekvenciaspektruma (balra) és wavelet-térképe (jobbra).

Az AF Cygni jellegzetes, hármas szerkezetű csúcssereget mutat frekvenciaspektrumában. Ehhez hasonló spektrum sok más félszabályos változócsillagnál is tapasztalható. Több csúcs jelentkezik kis frekvenciákon (1000–18000 nap periódusokkal), ez az utóbbi időkben intenzíven vizsgált hosszú másodperiódus (LSP) jelenléte lehet ennél a csillagnál is. A két rövidebb periódusnál (94 nap és 158 nap) lévő csúcs-csoport két radiális pulzációs módus lehet, véletlenszerűen ingadozó periódusértékkel. A periódusarány 1,7 körüli, ami jellegzetes a félszabályos csillagoknál.

A wavelet-térképen egyrészt az látszik, hogy a hosszú periódusok amplitúdója időszakosan nő meg. A szerintem izgalmas dolog a két rövidebb periódusnál figyelhető meg: már a fénygörbén is mutatkozott, hogy alternáló módon hol az egyik, hol a másik amplitúdója nagyobb. Ezt a módusváltással magyarázhatjuk: két pulzációs módus van gerjesztve, de sztochasztikus hatások (pl. konvekció) miatt a pulzáció energiája váltakozva "átfolyik" egyik módusból a másikba, majd vissza. Ezt a jelenséget a teljes

adatsor frekvenciaspektruma alapján nem tudjuk vizsgálni, ehhez idő-frekvencia módszer szükséges.



5.6. ábra: Ostlie & Cox (1986) lineáris modellje. P0 az alaprezgés, P1 az első-, P2 a második radiális felhang periódusa; R1=P0/P1 és R2=P1/P2 periódusarányok.

Az AF Cyg az 5.6. ábra modelljei alapján alaprezgésben és első felhangban pulzál, kb. 1,5 M $_{\odot}$ a tömege és 3000 L $_{\odot}$ a luminozitása.

5.3. Z UMa



5.7. ábra: A Z UMa 10 napos átlagolással készített AAVSO fénygörbéje. Egy szegmens 10 év hosszú.

dc_514_12



5.8. ábra: A Z UMa fénygörbéje (fent), frekvenciaspektruma (balra) és wavelet-térképe (jobbra).

A Z UMa nagyobb amplitúdójú, mint az AF Cyg, időnként mira-jellegű változást mutat. A frekvenciaspektruma hasonló az AF Cyg spektrumához, de itt a hosszú periódusok gyengébbek. A két rövidebb pulzációs módus jelen van, de a hosszabb (191 napos) periódus a domináns. A rövidebb (98 napos) periódus főleg az adatsor első 10 évében, valamint JD 2447000 és 2452000 körül válik jelentősebbé. A periódusarány 1,93. Ennél a csillagnál is módusváltásról beszélhetünk. Ostlie & Cox (1986) modelljei alapján (5.6. ábra) alaprezgésben és első felhangban pulzál, kb. 1,0 M_{\odot} a tömege és 2000 L_{\odot} a luminozitása.




5.9. ábra: A V Boo 10 napos átlagolással készített AAVSO fénygörbéje. Egy szegmens 10 év hosszú.

dc_514_12



5.10. ábra: A V Boo fénygörbéje (fent), frekvenciaspektruma (balra) és wavelet-térképe (jobbra).

A V Boo fénygörbéje korábban miraszerű volt, amely az utóbbi évtizedekben radikálisan megváltozott, az amplitúdója erősen lecsökkent, átment egy tipikus félszabályos, kétmódusú csillag állapotba, mint ezt már korábban kimutattuk (Szatmáry, Gál, Kiss 1996). A bő 3 magnitúdós változás lecsökkent néhány tized magnitúdósra, ez igen jól látszik az 5.10. ábra fénygörbéjén. A domináns periódus nem nagyon változott, de megjelent a kétszeres frekvenciánál, azaz feleakkora periódusnál egy csúcs. Ez a wavelet-térképen láthatóan alternatív módon, és a legutóbbi időben erősen jelentkezik.

5.5. T UMi

A T UMi esetében már régen feltűnt, hogy ennek a mirának a periódusa erősen csökken. A T UMi fénygörbe-analízisét még Gál Jánossal kezdtük 1994-ben. A délafrikai, fokvárosi pulzációs konferencián is bemutattuk ezt a különleges csillagot. Érdekes módon az AAVSO akkori igazgatója, Janet Mattei, aki szintén ott volt a résztvevők között, hamarosan írt erről a csillagról az egyesületi kiadványukba, "felfedezve" a drasztikus perióduscsökkenést (Mattei & Foster 1995). Szerencsére a mi cikkünk a sokkal rangosabb A&A folyóiratban szintén megjelent már akkorra (Gál & Szatmáry 1995c).

Ennek a csillagnak a szokatlanul gyors perióduscsökkenését egy olyan elméleti modellel próbáltuk magyarázni, amely az AGB csillagok belsejében, a mag körüli héjban időnként megfutó He-fúzió (He-shell flash) jelenséget feltételezi (Wood & Zarro 1981). Eszerint megváltozik a csillag luminozitása, és ennek következtében a csillag pulzációs periódusa. A modell szerint arra következtettünk, hogy a T UMi periódusa a nem túl távoli jövőben újra növekedni fog (Szatmáry, Kiss & Bebesi 2003). Ezeket az eredményeket idézzük fel a következő néhány ábrával.



5.11. ábra: A T UMi 90 év hosszú fénygörbéje (10 napos átlagpontok), amit 2003-ban elemeztünk. A kék vonal CCD V szűrős mérések (AFOEV).

dc_514_12



5.12. ábra: A T UMi O-C diagramja. A kék vonal parabolaillesztés az utolsó 7500 napra.



5.13. ábra: A T UMi ciklushossza az idő függvényében.



5.14. ábra: A T UMi frekvenciaspektruma (inzertben a spektrálablak-függvény). A kétszeres frekvenciánál lévő csúcs a fénygörbe "hegyes" alakja miatt jelentkezik. A főcsúcs nagyobb frekvenciák felé való kiszélesedése már utal a periódusváltozásra, de nem mond semmit annak időbeli lefolyásáról.





5.15. ábra: A T UMi adatsorának három idő-frekvencia eloszlása. Fent: wavelet-térkép (WAV), középen Choi–Williams-eloszlás (CWD), alul Zhao–Atlas–Marks-eloszlás (ZAMD). A kétszeres frekvenciától az amplitúdó erősített, a jobb láthatóság miatt. A különböző eloszlások frekvencia felbontása különböző, de ugyanazt mutatják. A periódus csökkenés jól látszik. Készült Kolláth Zoltán (2002) TiFrAn programja felhasználásával.

dc_514_12



5.16. ábra: Néhány mira csillag luminozitás változása Wood & Zarro (1981) modellje alapján. Egyedül a T UMi fényessége és vele a periódusa csökkenő.

A T UMi periódusváltozását a termális pulzusokat végző aszimptotikus óriáscsillagok (TP-AGB) belsejében, a magot körülvevő héjban lejátszódó He-fúzió időszakos megszaladásával (He-shell flash) magyarázhatjuk Wood & Zarro (1981) modellje alapján. A belső energiatermelés növekedésével nő a csillag luminozitása, amit rövidesen a pulzáció periódusának a hosszabbodása követ. A termális pulzusok jellegzetesen néhány tízezer évente következnek be, de a gyors változások szakaszai emberi időskálán is lejátszódhatnak (Vassiliadis & Wood 1993).

A T UMi periódusváltozása az eddig ismert legnagyobb értékű a pulzáló csillagok között ($\Delta P/P \approx 0,01$)! Izgalmas nyomon követni a csillag legújabb, utóbbi 10 év alatti, vizsgálataink (Szatmáry, Kiss & Bebesi 2003) utáni viselkedését. A következőkben ezt mutatom be. Napra készen (2012. július) összegyűjtöttük az AAVSO adatbankjából az összes elérhető fényességbecslést. Amellett, hogy a periódus továbbra is csökken, egészen szabálytalanná, félszabályos csillaghoz hasonlóvá vált a fénygörbe. Radikálisan változik, csökken az amplitúdó is (hasonlóan, mint a V Boo esetében). Mintha leállna a pulzáció. Az átlagos fényesség viszont szinte nem változik. Az 5.16. ábra azt sugallja, hogy hamarosan, néhány éven, esetleg évtizeden belül a luminozitás és a periódus csökkenése megáll, majd növekedni fog. Kíváncsian várhatjuk a folytatást...



5.17. ábra: A T UMi 10 napos átlagolással készített AAVSO fénygörbéje. Egy szegmens 10 év hosszú.



5.18. ábra: A T UMi fénygörbéje (fent), frekvenciaspektruma (balra) és wavelet-térképe (jobbra).

Érdekes vizsgálatot végzett Uttenthaler et al. (2011) 12 változó periódusú mira evolúciós állapotára vonatkozóan. Zijlstra & Bedding (2002) alapján ők is 3 osztályba sorolták a periódusváltozásokat: folyamatos-, hirtelen- és bolyongó változás. Arra gondoltak, hogy a termális pulzus után a konvektív zóna lehatolhat a magfúziós belső részig, és az anyag felkeveredik (3rd dredge-up). Ezáltal a He-fellobbanás és az s-folyamat során létrejövő kémiai elemek (lítium, szén, technécium) feljuthatnak a csillag felszínére – akár néhány év alatt –, és így a színképben kimutathatók. Ezzel a csillagok színképe elárulhatna belső folyamatokat. Végül arra a következtetésre jutottak, hogy nincs világos kapcsolat a periódusváltozás és a technécium tartalom között, de további színképi vizsgálatokat kellene elvégezni nagyobb mintán. A T UMi esetében arra utaltak ők is, hogy éppen átmegy mira állapotból félszabályosba.

Jelentős periódusváltozást okozhat a termális pulzusokon kívül a módusváltás és a kaotikus visszacsatolás a változó molekuláris opacitás és a pulzáció között.

5.6. R Cyg



5.19. ábra: Az R Cyg 10 napos átlagolással készített AAVSO fénygörbéje. Egy szegmens 20 év hosszú.



5.20. ábra: Az R Cyg fénygörbéje (fent), frekvenciaspektruma (balra) és wavelet-térképe (jobbra).

Az R Cyg periódusa alig változik, igen stabil. A jellegzetes viselkedése, az, hogy minden második maximum halványabb, a fénygörbe nagy részén megfigyelhető. Vizsgálataink szerint alacsony dimenziójú káosz mutatható ki ennél a csillagnál (Kiss & Szatmáry 2002, 2003). Ebben a munkában Kiss Lászlóé volt a vezető szerep, én a wavelet-analízissel vizsgáltam a periódusváltozást.

6. A Kepler űrtávcső adatainak elemzése

Ebben a fejezetben a *Kepler* űrtávcsőnek vörös óriás csillagokra vonatkozó méréseivel foglalkozom. A távcső vázlatos jellemzése után a nyers fénygörbék összetolásának, elemzésre való előkészítésének problémáit tárgyalom, majd a mintegy 300 vizsgált csillag közül tipikus és érdekes példákat mutatok be. E munkák nagy részében két szakdolgozatot készítő hallgatóm, Bódi Attila (Bódi, 2012) és Csányi István is részt vett (Csányi, 2012), Kiss László témavezetésével pedig Bányai Evelin foglalkozott e témával (Bányai, 2012).

6.1. A távcsőről

A *Kepler* űrtávcsövet 2009 márciusában állították Föld-követő, Nap körüli pályára. A hasonló feladatra tervezett elődei (CoRoT és MOST) Föld középpontú poláris pályán mozognak (Benkő, Szabó 2010), de ez nem előnyös bolygónk zavaró hatásai miatt, és nem képesek ugyanazt az égterületet figyelni hosszú időn át. A *Kepler* mentesült ezektől a problémáktól, állandó hőmérsékleti és sugárzási környezetet biztosít a pályája. A keringési ideje nem pontosan egy év (372,5 nap), így a Földtől fokozatosan lemarad. A növekedő távolság gondot okoz az adatok Földre juttatásában. A távcső üzemideje nem hosszabbítható korlátlanul, még ha kifogástalan állapotban is van. Eredetileg 3,5 évre tervezték, amit 2012-ben meghosszabbítottak 4 évvel, ez viszont már a program tényleges végét fogja jelenteni. Keringése során 93 naponként elfordítják 90°-kal a tengelye körül, mert a napelemeknek a Nap felé, a hűtőradiátoroknak pedig az ellenkező irányba kell nézniük. Ezek fixen vannak rögzítve, akár csak az antenna, amivel havonta a Földre küldik az adatokat.



6.1. ábra: A Kepler pályája (NASA).





6.2. ábra: A Kepler űrtávcső szerkezete (NASA).

A *Kepler* egy 95 cm nyílású Schmidt-távcső, detektora 42 CCD-ből áll, ami összesen 95 millió pixeles. Nem használ szűrőket, a detektor 430–840 nm közötti hullámhossztartományban érzékeny (Benkő, Szabó 2010), így szinte a teljes optikai tartományt lefedi. A távcső folyamatosan ugyanazt a 105 négyzetfoknyi égterületet figyeli meg a Cygnus és Lyra csillagképek határán. Az égbolt ezen része a galaktikus sík felett található, ahol sok fősorozati csillag van, nem túl zsúfoltan. A *Kepler* látómezejében négy nyílthalmaz és három korábban felfedezett exobolygó is található, de cefeida csupán egy van. A területen több mint 150000 csillagot vizsgál. Ezek a csillagok a KIC (Kepler Input Catalog)-ban szerepelnek (Brown et al. 2011). A katalógus többek közt tartalmazza a csillagok néhány fotometriai és fizikai adatát, valamint koordinátáikat és 2MASS katalógus-számukat.

A *Kepler* célpontjai alapvetően három kategóriába sorolhatók (Benkő, Szabó 2010). Az első kategóriába mintegy 150000 csillagot exobolygó keresésre használnak fel. Ezek főként F-K színképtípusú fősorozati csillagok, de van köztük körülbelül 1000 jó jel/zaj arányú vörös óriás is asztrometriai referenciának. Az űrtávcső elsődleges feladata az exobolygók felfedezése, a program ezen részét William Borucki és a Kepler Science Team irányítja. A bolygók felfedezése főként tranzitos módszerrel történik.

A másik nagy kategóriába asztroszeizmológiai célokra választanak ki csillagokat, ami nagyjából 4000 csillagot jelent (Benkő, Szabó 2010). Ezek a célpontok a HRD-n megtalálható összes pulzáló változó közül kerülnek ki. Az asztroszeizmológia segítségével nagy pontossággal meg lehet határozni a csillagok tömegét, sűrűségét, sugarát és korát, így jól kiegészítik az exobolygó-kutatást. Ezen kívül vizsgálják még a csillagok forgását, mágneses ciklusait is. A Kepler Asztroszeizmológiai Tudományos Konzorcium (KASC) arra jött létre, hogy ezeket az adatokat feldolgozza. Az adatok rendelkezésére bocsájtása a Kepler Asteroseismic Science Operations Centre (KASOC)on keresztül történik (Christensen-Dalsgaard 2011). A KASC-nak több mint 500 tagja van és 13 különböző feladatokat végző munkacsoport alkotja (Benkő, Szabó 2010). Ebből kettőnek magyar vezetője van. A WG7, cefeidákkal foglalkozót Szabó Róbert, az MTA CSFK KTM Csillagászati Intézet munkatársa vezeti, aki még az RR Lyrae csoport elméleti modellezés alcsoportját is irányítja. A WG12, mirákkal és szemiregulárisokkal foglalkozónak Kiss László (MTA CSFK KTM CSI) a vezetője. Ehhez csatlakoztam én is 2010-ben.

A harmadik csoportba a Guest Observer (GO) program által kiválasztott körülbelül 3000 célpont tartozik. Nem csak csillagok, előfordulnak köztük aktív galaxismagok, nóvák, törpenóvák is. Ebbe a programba bárki pályázhat általa kiválasztott célpontra.

A *Kepler* felvételei két üzemmódban készülnek (García et al. 2011). Az LC (long cadence) esetén minden 29,4244 percben készül mérés. Ebben az esetben a Nyquist-frekvencia 24,4685 c/d. Ez a mód alkalmas a tranzitos exobolygók észlelésére. Ennél gyorsabb mintavételezést tesz lehetővé a SC (short cadence) üzemmód, de csak 512 csillag vizsgálható így egy időben. Ebben a módban 58,84876 másodpercenként történik mérés, így a Nyquist-frekvencia körülbelül 730 c/d. Kezdetben mind az 512 csillagot a KASC választhatta ki. A tranzitok felfedezésével ez folyamatosan csökken, de 140 lehetőség mindvégig az asztroszeizmológia számára van fenntartva.



Kepler Mission Timeline

6.3. ábra: A *Kepler* adatgyűjtésének időrendje a negyedévek (quarterek) jelölésével (Barclay et al. 2012).

Sajnos a fénygörbék folytonosságát több esemény is megszakítja. Ilyen a távcső negyedéves (quarter) forgatása és az adatok Földre sugárzása havi rendszerességgel. Ezek előre tervezett események, de előfordul más probléma is, például mikor az űreszköz biztonsági üzemmódba kapcsol egy kozmikus sugár vagy egy rosszul értelmezett parancs

miatt (Christiansen et al. 2012). Más zavaró jelenségek is olyan hibákat okoznak a fénygörbében, mint például kiugró pontok (outliers), ugrások (jumps) és csúszások (drifts) (García et al. 2011). Ezeket a negyedeken belüli hibákat különböző programokkal ki lehet javítani. Az egyes negyedévek közt viszont jelentős ugrás van a görbében, mivel ilyenkor a csillag átkerül egy másik CCD-re. A CCD-ket megpróbálták teljesen egyformára készíteni, de így is különböző karakterisztikájúak lettek. Így a létrejövő ugrások negyedévenként és csillagonként eltérőek. Vizsgálatokat csak akkor tudunk végezni, ha ezeket az ugrásokat megszüntetjük a negyedévek összetolásával. A negyedek hossza 90 nap körüli, kivétel ez alól a rövidebb Q0 és Q1. A negyedévek közti űr ideális esetben 1 nap, de mindig rövidebb egy hétnél. Kivéve a Q7 és Q8 közti űrt, ami több mint 2 hét, mivel ekkor a távcső biztonsági üzemmódba is kapcsolt. A Q8 emiatt és az utána következő szintén nagynak mondható kb. 6 napos űr miatt csak 66 nap hosszú.

A távcsőben a 42 CCD-ből már 2 tönkrement (Callingham 2011). Így egy év folyamán egy-egy negyedév kimarad azoknál a csillagoknál, amelyek ezekre a detektorokra esnek.

6.2. Az adatsorok

A KASC nemzetközi kutatócsoporthoz történt csatlakozásom után 317 csillag adatait töltöttük le a *Kepler* adatbázisból. A csillagok kiválasztása a következő feltételek alapján történt: az ASAS North programjában már szerepelnek, a *J-K* színindex > 0,9 magnitúdó, a KIC T_{eff} < 4200 K, *log g* < 1,0. A fájlok 5 oszlopot tartalmaznak: Time, Raw Flux, Raw Flux error, Corrected Flux, Corrected Flux error. A vizsgálatokhoz a nyers (Raw Flux) görbéket használtuk. Ezek már átestek egy megelőző feldolgozáson, de nem történt olyan beavatkozás, amely lényegesen megváltoztatta volna a görbe menetét. (A Corrected Flux tranzit-keresésre van előkészítve, így nem használtuk fel.) Először csak Q0-tól Q7-ig álltak az adatok rendelkezésre, ezek már össze voltak tolva, de nem minden esetben volt megfelelő az összetolás. Később az adatok elérhetővé váltak Q10-ig. Ezek azonban már nem voltak összetolva. A fájloknak más lett a verziója, a mértékegységek is megváltoztak. Korábban az LC adatok fluxusértékei elektron/cadence, az SC fluxusai elektron/s voltak megadva. Ezt egységesítették, így az LC-t is elektron/s váltották. A fényességet magnitúdóba átszámolva körülbelül 8 magnitúdós eltérést okozott. A magnitúdó számítást az

$$m = -2,5\log F + C \tag{6.1}$$

képlettel végeztük, ahol *F* a fluxus, *C* egy konstans, amit a korábbi adatoknál 30-nak, az újabbaknál 22-nek vettünk, hogy a két fényesség könnyen összevethető legyen. Az így számolt értékek ritkán egyeztek meg a KIC-ban megadott *Kepler* magnitúdókkal, de a különböző CCD-k közt is több tized magnitúdós differencia van. Csillagonként különböző konstanst kellett volna használni, ha a katalógushoz igazodunk. A periodicitás vizsgálatára viszont nincs hatással ez az eltérés.

6.3. A fénygörbék összetolása

A negyedek közti ugrásokat meg kellett szüntetnünk a görbék összetolásával. Ehhez több módszert is alkalmaztunk, mivel az egyes fénygörbék nagyon eltérőek. Összetolás szempontjából két csoportra lehet osztani a csillagokat. Az egyik csoportba tartoznak azok, amelyek több 10 nap vagy annál is hosszabb periódussal változnak, és nem fordul elő rövidebb ciklus. Az ilyen csillagok fénygörbéi rövid szakaszon közelíthetőek egyenessel, és nem sokat változnak két negyedév között. A másik csoportba tartoznak a rövidebb periódust mutató csillagok. A két típushoz különböző összetolási módok szükségesek. További csoportot képeznek azok a csillagok, amelyekből egy vagy több negyed hiányzik. Ekkora űröket nehéz kezelni, hasonlóan a Q7 és Q8 közti kéthetes szünethez, ami azonban minden csillagot érint.

Az összetolás két különböző módszerrel és azok több paraméterével történt (Csányi, Szatmáry, Kiss et al. 2012).

1. Egyenesillesztés

Az egyik módszer: a szomszédos negyedek görbéi elejére és végére egy-egy egyenest illesztettünk. Az illesztésnél használt adatszegmensek időbeli hosszát változtattuk (10 óra, 2 nap, teljes negyed – jelölés a későbbi ábrákon: k1-10h, k1-2d, k1-Q). A két negyed adatsora úgy lett magnitúdóban eltolva, hogy a két egyenes a negyedek közötti űr közepén metssze egymást.



6.4. ábra: Az egyenesillesztéses összetolás szemléltetése.

2. Átlagolás

A másik módszerrel a szomszédos negyedévek végén és elején fényességátlagokat számoltunk, és a görbéket úgy toltuk el, hogy ezek az értékek megegyezzenek. Az átlagolásnál figyelembe vett adatszegmensek időbeli hosszát változtattuk (3, 5, 15 és 30 nap, teljes negyed – jelölés a későbbi ábrákon: k2-3d, k2-5d, k2-15d, k2-30d, k2-Q).

6.4. Tesztelés generált adatsorokon

Négy generált adatsorokon végeztünk teszteket. Azt vizsgáltuk, hogy melyik összetolási módszer/paraméter esetén kapjuk vissza leginkább az eredeti, még nem széttolt teszt adatsort, illetve milyen eltérések vannak a frekvenciaspektrumokban. A négy tesztgörbe (6.5. ábra) létrehozása két különböző jellegű fényváltozást mutató csillag alapján történt. Az első kettőhöz a KIC 2422539 szolgált alapul. A csillag viszonylag lassú, szabályos változást mutat, amelyre rövidebb periódusú szabálytalan ciklusok rakódnak. Az első görbe a hosszú periódus 8 frekvenciájú illesztése alapján készült. A másodikban ehhez még egy 5 napos rövid periódus társul. A harmadik tesztgörbe a KIC 2163829 néhány frekvenciájának felhasználásával és még több rövidebb periódus hozzáadásával készült. A negyedik abban különbözik ettől, hogy még egy hosszabb, körülbelül 1300 napos változást (trendet) adtunk hozzá, így adva vissza az eredeti csillag jellegét. A generált függvények kiszámítása a KIC 2422539 valódi időadataival történt, így a rések mérete és helye a valóságot tükrözi. Az adatsorokat negyedévekre bontottuk,

és ezeket véletlenszerűen, különböző mértékben toltuk szét fényesség szerint (6.6. ábra), így modellezve a nyers fénygörbéket.



6.5. ábra: A négy generált adatsor az összetolás teszteléséhez.







6.7. ábra: Az 1. generált adatsor összetolása az egyenesillesztéses módszerrel.



6.8. ábra: A 6.7. ábra görbéinek frekvenciaspektrumai.

A tesztelések által eredményként azt kaptuk, hogy a rövid periódusúaknál az átlagolásos, míg a hosszú periódusú csillagok estében az egyenes illesztéses módszer a használhatóbb (6.6. és 6.7. ábra). A Q7 és Q8 közti nagyobb űrnél egyik módszer sem hozott kielégítő eredményt. A periódusanalízis során azt tapasztaltuk, hogy a generált adatsor és különféle módon összetolt adatsorok spektrumai eltérnek egymástól. A

rövidebb periódusok kevésbé módosulnak, míg a hosszabbaknál az amplitúdó jelentősen megnőhet, hiszen a "lépcsős" ugrás egy hosszú periódushoz hasonló fénygörbealakhoz vezet (6.8. ábra).



6.9. ábra: Az 1. generált adatsor (piros), és a különféle módszerekkel és paraméterekkel összetolt fénygörbék (fekete). A kék vonalak a negyedek átlagfényességeit jelzik.



6.10. ábra: Az 1. generált adatsor (piros) és a 8 különböző összetolás frekvenciaspektruma. Nagy eltérések a kis frekvenciáknál (hosszú periódusoknál) látható.



6.11. ábra: A 6.10. ábra kinagyított részlete a fő periódus körül. A k1-2d (kék) összetolás spektruma közelíti legjobban az eredetiét.

dc_514_12



6.12. ábra: A 2. generált adatsor (piros), és a különféle módszerekkel és paraméterekkel összetolt fénygörbék (fekete). A kék vonalak a negyedek átlagfényességeit jelzik. Az 1. adatsorhoz képest csak a felső soroknál, az egyenesillesztéses módszernél van jelentősebb különbség (az 5 napos rövid periódus miatt).

dc_514_12



6.13. ábra: A 3. generált adatsor (piros), és a különféle módszerekkel és paraméterekkel összetolt fénygörbék (fekete). A kék vonalak a negyedek átlagfényességeit jelzik. Egyértelműen a hosszabb szegmensek átlagolási módszere a legjobb.

dc_514_12



6.14. ábra: A 4. generált adatsor (piros), és a különféle módszerekkel és paraméterekkel összetolt fénygörbék (fekete). A kék vonalak a negyedek átlagfényességeit jelzik.
A 3. adatsorral ellentétben a k1-Q, illetve a k2-5d módszerek adják vissza legjobban az eredeti adatsort. A hosszú szegmenst használó átlagolás (k2-30d, k2-Q) szinte eltünteti a hosszú periódusú trendet.

A tesztekből arra következtethetünk, hogy az összetolásra nincs egyedüli üdvözítő módszer. A különféle fénygörbéjű csillagoknál eltérő módszerek más-más paraméterekkel vezethetnek jó megoldáshoz. Újra hangsúlyozzuk, hogy az összetolást rendkívül körültekintően és saját szemmel ellenőrizve kell végrehajtani. Könnyen hamis trendek, ugrások maradhatnak a fénygörbében, amelyeket az analízisnél persze kimutatunk, és ezek magyarázatakor a valóságtól eltérő következtetésre juthatunk.

Az 1. generált adatsornál (6.9. ábra) a k1-2d látszik a legjobb összetolási módszernek. Ezt a (fekete) görbét Fourier-analízis során 10 frekvenciával fehérítettük, majd a reziduált (6.15. ábra) újra a k1-2d módon összetoltuk (6.16. ábra). Ennek az egyenesillesztéses módszernek a paramétereit alkalmazva a negyedenként széttolt adatsorra, szinte tökéletes egyezést kaptunk az eredeti generált adatsorral (6.17. ábra).



6.15. ábra: Az 1. generált adatsor k1-2d összetolásának 10 frekvenciával fehérített reziduálja.

dc_514_12



6.17. ábra: Az 1. generált (piros) adatsor és a széttoltra a 6.16. ábrán lévő görbe k1-2d paramétereit alkalmazva összetolt (fekete) adatsor összehasonlítása.

A fenti eredményeket a Balatonalmádiban 2012 júniusában megrendezésre került 5. KASC nemzetközi konferencián poszter formájában bemutattuk, jelentős érdeklődés mellett.

6.5. Valós csillagok fénygörbéi

Az összetolási módszereket valódi csillagokon is végrehajtottuk. A továbbiakban erre hozunk fel példákat (Szatmáry, Csányi, Kiss et al. 2012).

A több mint 300 csillagból itt ötöt mutatunk be, amelyek reprezentálják a különféle fénygörbéket (kivéve a mirákat és a nagy amplitúdójú félszabályos csillagokat).

"Legjobb megoldásnak" azt az összetolást választottuk, amely esetén a fénygörbe szakaszok legjobban illeszkedtek. Természetesen ez szubjektív, de az emberi szem sok szempontból, így ebben sem pótolható.

Sorrendben:

KIC 6838420 (6.18. ábra)

Több hosszú periódusú fényváltozásra számos rövid, néhány napos ciklus rakódik rá. A legjobb megoldás az összetolásra: k2-3d vagy k2-5d.

KIC 11242282 (6.19. ábra)

A kis amplitúdójú (A=0,04 magnitúdó), 44 napos domináns periódus mellett alig van más komponens a fénygörbében. A fő periódus mintegy fele a quarterek hosszának. A legjobb megoldás az összetolásra: k1-2d, inkább k2-5d.

<u>KIC 11768249</u> (6.20. ábra)

A kis amplitúdójú (A=0,03 magnitúdó), 80 napos domináns periódus mellett több rövid, néhány napos ciklushosszú, nagyon kicsi amplitúdójú komponens is jelen van a fénygörbében. A fő periódus alig rövidebb mint a jellemző negyed-hossz. A legjobb megoldás az összetolásra: k2-Q, azaz a teljes negyedév-átlagok illesztése.

KIC 2986893 (6.21. ábra)

Század magnitúdós amplitúdóval több 15-20 nap periódusú fényváltozás együttese. A legjobb megoldás az összetolásra: k2-Q.

KIC 6464293 (6.21. ábra)

Ezred magnitúdós amplitúdóval számos, pár nap periódusú fényváltozás összessége. A legjobb megoldás az összetolásra: k1-Q, inkább k2-Q.

Mint már a teszteléseknél említettük, arra következtethetünk, hogy a hosszú periódusú csillagok estében rövidebb szegmenseket véve az egyenesillesztéses és az átlagolási módszer is használható, míg a rövid periódusúaknál inkább hosszú szegmenseket (teljes negyedéveket) használva az átlagolásos módszer a jobb. A Q7 és Q8 közti nagyobb űrnél ezen fénygörbék esetén is több összetolási módszer nem alkalmazható.

A nyers fénygörbék összeillesztése tehát nem egyszerű és nem automatizálható folyamat. Szükség van a szemrevételezésre, hogy melyik módszert és milyen paraméterrel fogadjuk el. Ezzel persze szubjektív lesz a végül elfogadott fénygörbe, de ez még mindig közelebb lehet a valósághoz, mint ha gépiesen állítjuk elő. Különösen figyelni kell a trendekre és az esetleg előforduló hosszú másodlagos periódusokra (LSP), nehogy ezeket a valódi változásokat az összetolás eltüntesse.

dc_514_12



6.18. ábra: A KIC 6838420 fénygörbéi különböző összetolási módszerekkel. A legjobb megoldás: k2-3d vagy k2-5d.





6.19. ábra: A KIC 11242282 fénygörbéi különböző összetolási módszerekkel. A legjobb megoldás: k1-2d vagy k2-Q.





6.20. ábra: A KIC 11768249 fénygörbéi különböző összetolási módszerekkel. A legjobb megoldás: k2-Q.





6.21. ábra: A KIC 2986893 fénygörbéi különböző összetolási módszerekkel. A legjobb megoldás: k2-Q.





6.22. ábra: A KIC 6464293 fénygörbéi különböző összetolási módszerekkel. A legjobb megoldás: k1-Q vagy k2-Q.

6.6. Csillagok csoportjai

A Kepler Input Catalog (KIC) tartalmazza a mért csillagok számos adatát (bár ezek pontossága több esetben nem túl jó). Ábrázoltuk a 317 program csillagunk felszíni hőmérsékletének függvényében a fényességváltozás értékét (a fénygörbéről leolvasva a minimális és a maximális magnitúdó különbségét). Három, jól elkülönülő csoportra oszthatók a csillagok ezen a diagramon (6.23. ábra, fent). A pirossal jelöltek a leghidegebbek, és közöttük vannak a legnagyobb amplitúdójúak. Ide tartoznak a mirák és a félszabályos csillagok nagy része. A zölddel jelöltek melegebbek és egy esettől eltekintve 1 magnitúdónál kevesebbet változnak. A kékek a legmelegebbek, általában igen kicsiny amplitúdóval.

Az összes csillagra elkészítettük a frekvenciaspektrumot a Period04 programmal. A domináns, legnagyobb amplitúdójú csúcsot feleltettük meg az ún. főperiódusnak. Ennek függvényében ábrázolva a fényességváltozást (6.23. ábra, középen), a három csoport nem különül el, azaz mindegyik csoport csillagai között előfordulnak igen rövid és hosszú periódusú változások.

A főperiódus – csillagsugár diagramon a piros, alacsony hőmérsékletű csoport tagjainak többsége a nagy, 160-200 napsugár mérettartományba esik (6.23. ábra, alul). A zölddel jelölt csillagok kisebbek, a kékkel jelöltek általában a legkisebbek (40 napsugár alatt). Újra megjegyezzük, hogy a KIC sugáradatai nem pontosak.

A csillagokat fénygörbéjük jellege alapján is csoportosítottuk. A frekvenciaspektrumok hasonlósága szerint is elkülöníthető csoportokat találtunk. Ez a munka jelenleg is folyamatban van.

A 6.23. ábrán három csillagot kis kék háromszöggel jelöltünk. Ezek közös jellemzője, hogy egy hosszabb periódusú változásra több kisamplitúdójú, rövid periódusú hullám rakódik rá. A KIC-ben szereplő paramétereik is hasonlóak. Ezzel a három csillaggal a következő részben behatóbban foglalkozunk.

dc_514_12



6.23. ábra: 317 M színképtípusú óriáscsillag paraméterei a KIC adatai és a domináns periódusérték alapján.

6.7. Három érdekes csillag

A KIC 11242282 és a KIC 11768249 fénygörbéje és az előzőekben említett paraméterei nagyon hasonlók. Frekvenciaspektrumukban egy csúcs dominál. Ezen csillagok fényváltozása nem volt ismert a *Kepler* mérései előtt.



6.24. ábra: A KIC 11242282 fénygörbéje (Q0–Q10) 12 frekvenciás illesztéssel (vékony vonal).



6.25. ábra: A KIC 11242282 frekvenciaspektruma.

dc_514_12



6.26. ábra: A KIC 11242282 frekvenciaspektruma a főperiódussal való fehérítés után.

	periódus (nap)	frekvencia (c/d)	amplitúdó (mag)	fázis
f1	44,34	0,02255	0,0639	0,2607
f2	716,98	0,00139	0,0163	0,8214
f3 (= f1/2)	88,56	0,01129	0,0072	0,2075
f4	281,87	0,00355	0,0058	0,2167
f5	199,42	0,00501	0,0062	0,7157

6.1. táblázat: A KIC 11242282 öt legnagyobb amplitúdójú komponense.

A KIC 11242282 domináns periódusa 44,34 nap, ennek kétszerese is megjelenik (6.1. táblázat). A hosszú periódusú (717 napos) moduláció eredete talán a csillag forgása lehet. A rövid periódusok 5-10 nap közöttiek.

A wavelet térképeken (6.27. és 6.28. ábra) stabil fő periódus látszik, kis amplitúdójú változással. A fehérítés után véletlenszerű az 5-40 napos ciklusok időnkénti megjelenése, Nap típusú (solar-like) jelleggel.

dc_514_12





6.28. ábra: A KIC 11242282 13 frekvenciával fehérített fénygörbéjének wavelet-térképe.



6.29. ábra: A KIC 11768249 fénygörbéje (Q0–Q10) 12 frekvenciás illesztéssel (vékony vonal).



6.30. ábra: A KIC 11768249 frekvenciaspektruma.
dc_514_12



6.31. ábra: A KIC 11768249 frekvenciaspektruma a főperiódussal való fehérítés után.

	periódus (nap)	frekvencia (c/d)	amplitúdó (mag)	fázis
f1	80,31	0,01245	0,0313	0,5075
f2	556,24	0,00180	0,0044	0,8497
f3	219,02	0,00456	0,0040	0,9315
f4	348,91	0,00287	0,0036	0,9919
f5	53,65	0,01864	0,0026	0,3197

6.2. táblázat: A KIC 11768249 öt legnagyobb amplitúdójú komponense.

A KIC 11768249 fő periódusa 80,31 nap, amplitúdója csupán 0,03 magnitúdó. A rövid periódus 6 nap körüli.

A wavelet-térképeken (6.32. és 6.33. ábra) stabil fő periódus látszik, kis amplitúdójú változással. A fehérítés után véletlenszerű az 5-30 napos ciklusok időnkénti megjelenése, Nap típusú (solar-like) jelleggel.

Ezek a csillagok nagy valószínűséggel pulzáló változók. A rövid periódusok értéke mintegy tizede a fő ciklushossznak. Az egyik elképzelés az lehet, hogy a rövid periódusok pulzációs eredetűek, esetleg Nap-típusú konvekció által generált nemradiális módusok, és a domináns ciklusok pedig hosszú másodlagos periódus (LSP) jellegűek (Derekas, Kiss, Szatmáry et al. 2010). Ez utóbbiak fizikai magyarázata még várat magára.

Mivel a rövid periódusok amplitúdója század magnitúdós vagy még kisebb, nagyon nehéz a vizsgálatuk. Számos próbálkozást tettünk arra, hogy a fő periódusokkal fehérített, immár csak a rövid ciklusokat tartalmazó fénygörbéket elemezzük wavelet-analízissel. Ezek a fénygörbék persze jelentősen változnak a fehérítéstől függően, ezért nagyon körültekintően kell kezelni a folyamatot. Ez a munka jelenleg is tart.

dc_514_12







6.33. ábra: A KIC 11768249 11 frekvenciával fehérített fénygörbéjének wavelet-térképe.

A **KIC 2422539** az egyik legérdekesebb csillag, amivel a *Kepler* adatainak feldolgozása során találkoztunk. Eleve kérdéses volt, hogy fedési kettős vagy pulzáló.



(107) **190411+3746.1 QPER/CEP P=59.0**

dc_514_12

Field	Value	Units	Description	
Ш	190411+3746.1	-	Master ASAS identification	
	1701111271011		(format: hhmmss+ddmm.m)	
ASAS_ID_V	190411+3746.1	-	ASAS V identification	
ASAS_ID_I	190411+3746.2	-	ASAS I identification	
2MASS_ID	10041102 2746109	-	2MASS identification (format:	
	19041102+3740108		hhmmssss+ddmmsss)	
RAd	286.04593	[deg]	Right Ascension (in degrees)	
DEC	37.76968	[deg]	Declination	
V	12.269	[mag]	V mean brightness from ASAS	
Ι	10.391	[mag]	I mean brightness from ASAS	
V-I	1.878	[mag]	V-I color index from ASAS	
J	9.169	[mag]	J brightness from 2MASS	
J-H	0.831	[mag]	J-H color index from 2MASS	
H-K	0.202	[mag]	H-K color index from 2MASS	
Туре	QPER/CEP	-	Type of variability	
Period	59.0	[days]	Period	
V_amp	0.30	[mag]	Amplitude of variation in V	
I_amp	0.24	[mag]	Amplitude of variation in I	
Rem	-	-	Remarks	

Object position in the Kepler Field

Season	Chip No.	X	Y
Spring	11	186.753	449.062
Summer	15	186.756	449.064
Fall	75	186.753	449.062
Winter	71	186.756	449.064

A fenti adatokat az ASAS3 adatbázisából vettem át (http://www.astrouw.edu.pl/ asas/i_kepler/190411+3746.1.html). 59 napos periódusú cefeidaként sorolták be, tévesen.

A Kepler Input Catalog-ban a csillag adatai: koordináták: $\alpha = 19^{h} 04^{m} 11,02^{s}$; $\delta = 37^{o} 46' 10,8''$ mag = 11,559; T_{eff} = 3979 K; log g = 2,394; [M/H] = +0,358.

A fénygörbéjén (6.34. ábra) látható, hogy minden második minimum alacsonyabb, nagyon hasonlít egy fedési kettőscsillag fényességváltozására. A maximumok és a minimumok magnitúdóértékei is ingadoznak, ennek csak részben lehet oka az összetolási folyamat. A teljes fényváltozás értéke eléri a 0,3 magnitúdót.

A frekvenciaspektrumban a fő periódus 59,07 nap (6.35. ábra). Ennek kétszeresénél és más harmonikusainál is vannak csúcsok (6.3. táblázat). A rövid periódusok 6-8 naposak.

A 118 napos fázisdiagram egy klasszikus kontakt (W UMa típus), de sokkal inkább egy félig érintkező fedési kettős (β Lyrae típus) fénygörbéje, amire több kis amplitúdójú, rövid periódusú változás rakódik rá. A 118 nap nagyon hosszúnak tűnik egy kontakt rendszer periódusa szempontjából, ami jellegzetesen 1 nap alatti. A β Lyrae típusúaknál már előfordul 10 nap feletti fedési periódus, a leghosszabb 198,5 napos (W Crucis). A 100 nap feletti periódus esetén az egyik komponens általában szuperóriás csillag.



6.34. ábra: A KIC 2422539 fénygörbéje a negyedek szerint különböző színnel (felül) és a 118 napos fázisdiagram (alul).



6.35. ábra: A KIC 2422539 frekvenciaspektruma (felül) és a fő periódussal való fehérítés után (alul).

dc_514_12

	periódus (nap)	frekvencia (c/d)	amplitúdó (mag)	fázis
f1	59,07	0,01693	0,0948	0,3253
f2 (=3/2 f1)	39,45	0,02535	0,0191	0,2096
f3 (=1/2 f1)	118,42	0,00844	0,0204	0,8625
f4	415,73	0,00241	0,0107	0,7886
f5	1142,96	0,00087	0,0111	0,8227
f6 (=2 f1)	29,52	0,03387	0,0087	0,4267
f7 (=5/2 f1)	23,66	0,04227	0,0054	0,9205
f8 (=3 f1)	19,72	0,05070	0,0053	0,1846
f9	251,35	0,00398	0,0036	0,0873

6.3. táblázat: A KIC 2422539 kilenc legnagyobb amplitúdójú komponense.

A 118 napos fedési periódus fázisdiagramja 2 napos átlagpontjait határoztuk meg (binnelés), melyek a *Kepler* félórás LC-adatok és a majdnem 8 ciklus miatt mintegy 700 egyedi pont átlagai. Erre illesztettünk a Period04 programmal egy 8 frekvenciás görbét, és ezután ezt a "normálgörbét" vontuk le (6.39., 6.40. és 6.41. ábra).



6.36. ábra: A KIC 2422539 fázisdiagramja. Piros vonalak a mért adatok, kék pontok a 2 napos átlagok, a vékony fekete vonal ezek 8 frekvenciás illesztése.

dc_514_12



6.38. ábra: A teljes fénygörbe (piros) és a normálgörbe (vékony fekete vonal).

dc_514_12



6.39. ábra: A teljes fénygörbe a normálgörbe levonása után. Három hosszú periódusú hullámot illesztettünk még rá (vékony fekete vonal), amit szintén levontunk.



6.40. ábra: A 7,5 ciklus hosszú fénygörbe a 8, majd a 3 frekvenciás illesztés levonása után. Kék vonalak jelzik a fázis-negyedeket.

dc_514_12



6.41. ábra: A KIC 2422539 6.40. ábrán lévő fénygörbéje (fent), frekvenciaspektruma (balra) és wavelet-térképe (jobbra).

A 6.41. ábrán látható wavelet-térképen az 50–100 napos periódustartományban jelennek meg időnként jelentősebb amplitúdójú hullámok. Ezen kívül az 5–15 nap (f = 0,06–0,2 c/d) periódusú hullámok dominálnak, ami már a 6.40. ábrán szembeszökő. Ezek század magnitúdós amplitúdójú változások, valósak, hiszen a *Kepler* mérési pontossága ennél sokkal jobb (a fénygörbe vonalvastagságán belüli). Fizikai magyarázatuk nem könnyű. Nem stabil a periódus, az amplitúdó és a fázis sem. Foltosság, akkréciós korong, esetleg Nap típusú oszcilláció szóba jöhet. A megoldáshoz spektroszkópia kellene, hiszen a vonalprofilok alakjának változása, vagy UV- és röntgenexcesszus (és mindezek periodicitása) utalhatna ezekre a jelenségekre.

Néhány század magnitúdós, 10-20 napos fényességfluktuációt már más félig érintkező csillagoknál is tapasztaltak (pl. v Sgr, P=138 nap).

A β Lyrae csillagoknál a tömegátadás miatt gyakran tapasztalható az orbitális periódus változása. Az O-C diagram módszerrel szokták kimutatni e változást, de ehhez általában néhány évtizednyi megfigyelés szükséges. A KIC 2422539 esetében így periódusváltozást még nem időszerű vizsgálnunk.

6.8. LPV csillagok a Kepler-mezőben

A *Kepler* által megfigyelt területen van néhány, korábbról jól ismert hosszú periódusú változó (LPV), mira és félszabályos pulzáló vörös óriás. A következő ábrák elkészítésében Csányi István volt nagy segítségemre.



6.43. ábra: Az AF Cyg AAVSO egyedi vizuális adatai (kis fekete pontok), 10 napos átlagai (fekete négyzetek) és a *Kepler*-fénygörbe 2-szeres nyújtásban (piros vonal).



6.44. ábra: Az AF Cyg frekvenciaspektruma a teljes AAVSO vizuális adatsorra (fekete) és a *Kepler*-fénygörbére (piros).





6.46. ábra: A TU Cyg frekvenciaspektruma az AAVSO teljes vizuális adatsorára (fekete) és a *Kepler*-fénygörbére (piros).





6.48. ábra: Az RW Lyr frekvenciaspektruma az AAVSO teljes vizuális adatsorára (fekete) és a *Kepler*-fénygörbére (piros).



6.50. ábra: A TZ Cyg fénygörbéje: AAVSO vizuális 10 napos átlagok (fekete), AAVSO fotoelektromos (zöld), ASAS CCD V (világoskék), *Kepler* (kék) és kétszeresre nyújtva (piros).



6.51. ábra: A V1673 Cyg fénygörbéje: AAVSO fotoelektromos (zöld), ASAS CCD V (világoskék), *Kepler* (kék) és kétszeresre nyújtva (piros).

A *Kepler*-fénygörbéket a többivel összehasonlítva a következőket állapíthatjuk meg: A tízezred magnitúdó pontosságú *Kepler*-adatok jelentősen eltérnek az ugyanakkori század magnitúdós pontosságú fotoelektromos ASAS- és AAVSO-adatoktól. A vizuális megfigyelések még kevésbé pontosak, de a 10 napos átlagok és a fotoelektromos mérések általában elég jól illeszkednek egymáshoz, mint például ezt az RY Dra példáján (6.52. ábra) is bemutattuk (Kiss, Szatmáry, Cadmus, Mattei 1999).



6.52. ábra: Az RY Dra 10 napos átlagolású vizuális és fotoelektromos fénygörbéjének összehasonlítása.

Az ASAS és az AAVSO CCD-megfigyelései szépen egybeesnek, de a *Kepler*-adatok sok helyen jelentősen különböznek tőlük. Ez egy nagy probléma, megoldására eddig még nem jutottunk. A *Kepler*-adatok kétszeres nyújtása a magnitúdó skálán általában javít az illeszkedésen. Az RW Lyr esetén (6.47. ábra) különösen nagy az eltérés, főleg a maximumok környékén. Felmerülhet magyarázatként a *Kepler* CCD-jének érzékenysége, az, hogy esetleg szaturáció miatt tapasztalható az eltérés, de akkor ennek a még fényesebb csillagok esetén is, ráadásul fokozottan jelentkeznie kellene.

Az volt a célom eredetileg az ismert LPV csillagok *Kepler*-fénygörbéivel, hogy a vizuális adatsorokból nem kimutatható, rövid periódusú, kis amplitúdójú hullámokat keressek. Ez a munka jelenleg is tart.

A *Kepler* adatainak elemzésével kapott eddigi eredményeinket a KASC által szervezett nemzetközi konferenciákon, 3 poszteren mutattuk be. A referált folyóiratcikkek előkészítés alatt állnak.

7. Összefoglalás, kitekintés

Az értekezésben bő 30 évnyi kutatómunkám eredményeit összegeztem, különös tekintettel a csillagok fényváltozási periódusa változásának vizsgálataira.

A periódus változása számos valódi (fizikai) ok miatt következhet be, de látszólagos is lehet, pl. a fényidő-effektus következtében. A változás kimutatásának klasszikus módszere az O-C diagram, de újabban az idő-frekvencia analízis (pl. wavelet) használata egyre jobban elterjed.

Bemutattam korábbi munkáimat: néhány rövid periódusú pulzáló változócsillag és fedési kettős elemzését, majd a tevékenységem gerincét alkotó hosszú periódusú vörös óriáscsillagok vizsgálatát.

Az utóbbi években sikeres kirándulást tettünk az exobolygók témakörébe is: az exoholdak kimutatásának módszereivel foglalkoztunk.

A legújabb és igen ígéretes témám a *Kepler* űrtávcső méréseinek feldolgozása és értelmezése. Vörös óriáscsillagok eddig soha nem elért pontosságú fotometriája számos új, érdekes eredményre vezetett már eddig is.

A jövőben (amennyire az oktatási és egyéb terhelésem engedi) szeretnék továbbra is a mira és félszabályos változócsillagokkal foglalkozni. Ezek a csillagtípusok nem véletlenül kerültek néhány éve újra a kutatások előterébe. Sok megoldatlan kérdés merült fel tulajdonságaikkal, pulzációjukkal, fényváltozásuk magyarázatával kapcsolatban (pl. a hosszú másodlagos periódus, a gyors periódusváltozások, a radikális amplitúdó-csökkenések, a módusváltások, a konvekció és a pulzáció kapcsolata).

Úgy gondolom, hogy a *Kepler* űrtávcső működésének 4 éves meghosszabbításával a bővülő adatokra építve, valamint a földi észlelési programok felhasználásával, kiegészítve archív hosszú adatsorokkal, sok új eredményt érhetek még el.

A hazai és a külföldi kollégákkal a jövőben is szeretnék együttműködni. A csapatmunkában hol vezető szerepet vállalok, hol csak szerényebb a hozzájárulásom az eredményekhez.

A kutatásokba továbbra is szeretnék minél több tehetséges hallgatót bevonni. TDK- és szakdolgozatok készítése mellett a publikációs tevékenységüket, konferencia-szereplésüket szorgalmazni és segíteni szeretném a jövőben is.

8. Köszönetnyilvánítás

Köszönöm munkahelyemnek, hogy 1981 óta, 31 éve csillagászati kutatással és oktatással foglalkozhatok, bár kezdetben azt mondták a főnökök közül, hogy "az egyetem biztosítja a csillagos eget", a többi az én dolgom.

Sokat köszönhetek tehetséges volt tanítványaimnak, immár kollégáimnak: Kiss Lászlónak (messzemenően vele volt a legeredményesebb együttműködésünk), Vinkó Józsefnek, Hegedüs Tibornak, Gál Jánosnak, Szabó Gyulának, Székely Péternek, Csák Balázsnak, Derekas Aliznak, Simon Attilának és másoknak. A *Kepler* adatainak feldolgozásában értékes volt Csányi István közreműködése.

A csillagász kollégák közül szakmailag sokan segítették pályafutásomat, névsor szerint (és persze biztosan kimaradtak néhányan, amiért elnézést kérek): Balázs Lajos, Kolláth Zoltán, Kovács Géza, Szabados László, Szeidl Béla.

Az ilyen felsorolásokból ki szokott maradni, hogy kiktől tanulta az ember hajdanán a szakmát, én viszont itt is tisztelettel emlékszem rájuk: Balázs Béla, Marik Miklós†, Érdi Bálint, Szécsényi-Nagy Gábor†, Szabados László, Szeidl Béla, Almár Iván, Balázs Lajos, Barcza Szabolcs, Marx György†, Abonyi Iván.

Kutatásaimat a következő ösztöndíjak és pályázatok támogatták: Széchenyi Professzori Ösztöndíj, Széchenyi István Ösztöndíj, Öveges Kutatói Támogatás, OTKA T4330, T7522, T22259, T32258, T34615, T42509, K76816 (ezek közül hatnak voltam témavezetője).

Családomnak köszönöm a szeretetet, a biztatást és a türelmet.

9. Irodalomjegyzék

- Barclay T., Thompson S.E., Jenkins J.M., Caldwell D.A., Bryson S.T., Burke C.J., Christiansen J.L., Clarke B.D., Cote M.T., Girouard F., Haas M.R., Hall J.R., Ibrahim K., Kinemuchi K., Klaus T.C., Kolodziejczak J.J., Li J., McCauliff S.D., Morris R., Mullally F., Quintana E.V., Rowe J., Seader S., Smith J.C., Still M.D., Stumpe M.C., Tenenbaum P.G., Twicken J.D., Uddin A.K., Van Cleve J.E.: 2012, Kepler Data Release 15 Notes (KSCI-19055-001)
- Bányai E.: 2012, Vörös óriáscsillagok pulzációinak vizsgálata földi és űrfotometriai adatsorok alapján, MSc diplomamunka, ELTE (témavezető: Kiss L. László)
- Bebesi Zs.: 2003, Pulzáló vörös óriáscsillagok fényváltozásának idő-frekvencia analízise, Diplomamunka, SZTE (témavezető: Szatmáry Károly)
- Benkő J., Szabó R.: 2010, Idősorok az űrből, Meteor csillagászati évkönyv 2011, 207– 232. o., szerk. Benkő J., Mizser A., MCSE Budapest
- Bódi A.: 2012, Változócsillagok fénygörbe elemzése, BSc szakdolgozat, SZTE (témavezető: Szatmáry Károly)
- Brown T.M., Latham D.W., Everett M.E., Esquerdo G.A.: 2011, Kepler Input Catalog: Photometric Calibration and Stellar Classification, Astronomical Journal, 142, A112 [arXiv:1102.0342]
- Callingham J.R.: 2011, Asteroseismic analysis of M giants from Kepler observations, manuscript, University of Sydney
- Christensen-Dalsgaard L.: 2003, Stellar Oscillations http://users-phys.au.dk/jcd/oscilnotes/index-bw.html
- Christensen-Dalsgaard J.: 2011, Kepler asteroseismology of red-giant stars [arXiv:1110.5012v1]
- Christiansen J.L., Van Cleve J.E., Jenkins J.M., Caldwell D.A., Barclay T., Bryson S.T., Burke C.J., Clarke B.D., Cote M.T., Girouard F., Haas M.R., Hall J.R., Ibrahim K., Kinemuchi K., Klaus T.C., Kolodziejczak J.J., Li J., McCauliff S.D., Morris R., Mullally F., Quintana E.V., Rowe J., Seader S., Smith J.C., Still M.D., Stumpe M.C., Tenenbaum P.G., Thompson S.E., Twicken J.D., Uddin A.K.: 2012, Kepler Data Characteristics Handbook (KSCI-19040-003)
- Cohen L.: 1994, Time-Frequency Analysis, Prentice Hall PTR, Englewood Cliffs, NJ
- Csányi I.: 2012, Vörös óriás csillagok fényváltozásának analízise a Kepler űrtávcső mérései alapján, BSc szakdolgozat, SZTE (témavezető: Szatmáry Károly)
- 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
- Csubry Z.: 2002, Time-frequency analysis of variable star light curves The program package TiFrAn, Publ. Astron. Dept. Eötvös Univ. (PADEU) Vol. 12, 117–122.
- Derekas A., Kiss L.L., **Szatmáry K.**: 2002, A CCD photometric survey of highamplitude δ Scuti stars, in Proc. 33rd International Conference on Variable Star Research, 8-11 Nov 2001, Brno, Nicholas Copernicus Observatory and Planetarium, Brno, ed. M. Zejda, p. 33–36.
- Derekas A., Kiss L.L., Székely P., Alfaro E.J., Csák B., Mészáros Sz., Rodríguez E., Rolland A., Sárneczky K., Szabó Gy.M., **Szatmáry K.**, Váradi M., Kiss Cs.: 2003, A photometric monitoring of bright high-amplitude δ Scuti stars. II. Period update for seven stars, Astronomy and Astrophysics, 402, 733–743.
- Derekas A., Kiss L.L., Udalski A., Bedding T.R., Szatmáry K.: 2004, A first-overtone

RR Lyrae star with cyclic period changes, Monthly Notices of Royal Astron. Soc., 354, 821–826.

- Derekas A., Kiss L.L., Bedding T.R., Ashley M.C.B., Csák B., Danos A., Fernandez J.M., Fűrész G., Mészáros Sz., Szabó Gy.M., Szakáts R., Székely P., Szatmáry K.: 2009, Binarity and multiperiodicity in high-amplitude delta Scuti stars, Monthly Notices of Royal Astron. Soc., 394, 995–1008. [arXiv:0812.2139]
- Derekas A., Kiss L.L., Szatmáry K., Benkő J., Huber D., Szabó Gy.M., Szabó R. (KASC WG12): 2010, Long Secondary Periods in luminous red giant stars, poster on Third Kepler Asteroseismology Workshop: "Kepler Asteroseismology in Action", June 14-18, 2010, Aarhus, Denmark
- Eddington A.S., Plakidis S.: 1929, Irregularities of long-period variable stars, Monthly Notices of the Royal Astron. Soc., 90, 65–71.
- Foster G.: 1996, Wavelets for period analysis of unevenly sampled time series, Astronomical Journal, 112, 1709–1729.
- Garbusov G.A., Andrievskiy S.M., Paramonova O.P., **Szatmáry K.**, Fedotov Yu.T.: 1988, Search for high-frequency radial pulsation in delta Scuti stars, (in Russian) Variable Stars (USSR) 22. No.6. 911–913.
- García R.A., Hekker S., Stello D., Gutiérrez-Soto J., Handberg R., Huber D., Karoff C., Uytterhoeven K., Appourchaux T., Chaplin W.J., Elsworth Y., Mathur S., Ballot J., Christensen-Dalsgaard J., Gilliland R.L., Houdek G., Jenkins J.M., Kjeldsen H., McCauliff S., Metcalfe T., Middour C.K., Molenda-Zakowicz J., Monteiro M.J.P.F. G., Smith J.C., Thompson M.J.: 2011, Preparation of Kepler lightcurves for asteroseismic analyses, Monthly Notices of the Royal Astron. Soc., 414, L6–L10 [arXiv:1103.0382v1]
- Gál J., **Szatmáry K.**: 1993, Search for period changes of semiregular variable stars with wavelet analysis, Proc. Conference on "Applications of Time Series Analysis in Astronomy and Meteorology", Ed. O. Lessi, p. 191–194. Padova, Italy, 1993
- Gál J., Szatmáry K.: 1995a, Mode switching in red semiregular stars?, Proc. IAU Coll.
 155 on "Astrophysical Applications of Stellar Pulsation" Astron.Soc.Pac.Conf.Ser.
 Vol. 83. 405–406. eds. R.S.Stobie and P.A.Whitelock, Cape Town, South Africa
- Gál J., **Szatmáry K.**: 1995b, Search for period changes of semiregular variable stars with wavelet analysis, poster on IAPPP Symposium '94 Baja, Hungary, 1994 "Cooperation Between Amateurs and Professionals in Recent Photometric Studies of Variable Stars" IAPPP Communications No.59, p.30
- Gál J., **Szatmáry K.**: 1995c, T Ursae Minoris: A Mira star with rapidly decreasing period, Astronomy and Astrophysics, 297, 461–464.
- Gál J., Szatmáry K.: 1995d, Period update of 40 Mira stars, Astrophysics and Space Science, 225, 101–106.
- Grossmann A., Kronland-Martinet R., Morlet J.: 1989, in Wavelets: Time-Frequency Methods and Phase Space, eds. J.M. Combes, A. Grossmann, Ph.Tchamitchian, Springer-Verlag, p.2
- Hegedüs T., Szatmáry K., Vinkó J.: 1992, Light curve and O-C diagram analysis of RZ Cassiopeiae, Astrophysics and Space Science 187, 57–74.
- Hershey J.L.: 1975, Astrometric orbit, eclipsing period changes, and parallax of VW Cephei, Astronomical Journal, 80, 662-667.
- Irwin J.B.: 1952, The determination of a light-time orbit, Astrophysical Journal, 116, 211–217.
- Irwin J.B.: 1959, Standard light-time curves, Astronomical Journal, 64, 149–155.

- Jørgensen H.E., Grønbech B.: 1978, Four-colour photometry of eclipsing binaries. IX B AI Hya, light curves and photometric elements, Astronomy and Astrophysics, 66, 377–383.
- Jurcsik J., Clement C., Geyer E.H., Domsa I.: 2001, Period changes in ω Centauri RR Lyrae stars, Astronomical Journal, 121, 951–973.
- Kaszás G., Vinkó J., Szatmáry K., Hegedüs T., Gál J., Kiss L.L., Borkovits T.: 1998, Period variation and surface activity of the contact binary VW Cephei, Astronomy and Astrophysics, 331, 231–243.
- Kipping D.M., Bakos G.Á., Buchhave L., Nesvorny D., Schmitt A.: 2012, The hunt for exomoons with Kepler (HEK). I. Description of a new observational project, Astrophysical Journal, 750, A115
- Kiss L.L., **Szatmáry K.**: 1995, Has the delta Scuti star BE Lyn a companion?, Information Bulletin on Variable Stars No. 4166
- Kiss L.L., **Szatmáry K.**, Gál J., Kaszás G.: 1995, A new orbit of the binary RR Lyrae star TU UMa, Information Bulletin on Variable Stars No. 4205
- Kiss L.L., Szatmáry K., Cadmus R.R. Jr., Mattei J.A.: 1999, Multiperiodicity in semiregular variables. I. General properties, Astronomy and Astrophysics, 346, 542– 555.
- Kiss L.L., Szatmáry K.: 1999, Multiperiodicity in semiregular variables, in: Proc. IAU Symposium No.191 "Asymptotic Giant Branch Stars", Montpellier, France, Aug 1998, eds. T. Le Bertre, A. Lébre and C. Waelkens, Publ. ASP, p.133–138.
- Kiss L.L., Szatmáry K., Mattei J.A.: 1999, Changes of the physical state in semiregular variables, in "Atmospheres of M, S and C Giants", Abstracts of the 2nd Austrian ISO Workshop, Wien, May 27-29, 1999, Austria, eds. J. Hron and S. Höfner, p. 9–10.
- Kiss L.L., Szabó Gy., Szatmáry K., Mattei J.A.: 2000, Changes of the physical states in semiregular variables, in "The Impact of Large-Scale Surveys on Pulsating Star Research", IAU Colloquium No. 176, Budapest 1999, eds. L. Szabados and D. Kurtz, ASP Conf. Ser., 203, p. 117–118.
- Kiss L.L., Szatmáry K., Szabó Gy., Mattei J.A.: 2000, Multiperiodicity in semiregular variables. II. Systematic amplitude variations, Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 145, 283–292.
- Kiss L.L., Csák B., **Szatmáry K.**, Fűrész G., Sziládi K.: 2000, Spectrophotometry and period analysis of the sdB eclipsing binary HW Virginis, Astronomy and Astrophysics, 364, 199–204.
- Kiss L.L., **Szatmáry K.**: 2002, Period-doubling events in the light curve of R Cygni: Evidence for chaotic behaviour, Astronomy and Astrophysics, 390, 585–596.
- Kiss L.L., Derekas A., Alfaro E.J., Bíró I.B., Csák B., Garrido R., **Szatmáry K.**, Thomson J.R.: 2002, The multimode pulsation of the δ Scuti star V784 Cassiopeae, Astronomy and Astrophysics, 394, 97–106.
- Kiss L.L., Szatmáry K., Vinkó J.: 2003, Spectrophotometric signature of circumstellar matter around 89 Her, in Proc. of "Interaction of Stars with their Environment II.", Budapest, Hungary, 15-18 May 2002, Eds. Cs. Kiss, M. Kun and V. Könyves, Commun. Konkoly Obs. No. 103, p. 123–126.
- Kiss L.L., Szatmáry K.: 2003, R Cygni: a Mira star pulsating chaotically, in Proc. of "Asteroseismology Across the HR Diagram", CAUP, Porto, Portugal, 1-5 July 2002, Eds. Thompson M.J, Cunha M.S., Monteiro M.J.P.F.G., Kluwer Academic Publisher, p. 433–436.

Kiss L.L.: 2006, Pulzáló vörös óriáscsillagok, MTA Doktora értekezés, Sydney Kolláth Z., Buchler J.R.: 1997, Time-frequency analysis of of stellar light curves,

Proc. Nonlinear Signal and Image Analysis, Eds. J.R.Buchler and H.E.Kandrup, Annals of the New York Academy of Sciences, 808, 116–122.

- Kolláth Z., Csubry Z.: 2002, TiFrAn software package, http://www.konkoly.hu/tifran/
- Lejeune T., Schaerer D.: 2001, Database of Geneva stellar evolution tracks and isochrones for (UBV)_J(RI)_cJHKLL'M, HST-WFPC2, Geneva and Washington photometric systems, Astronomy and Astrophysics, 366, 538–546.
- Lenz P., Breger M.: 2005, Period04 user guide, Comm. in Asteroseismology, 146, 53–136. http://www.univie.ac.at/tops/Period04/
- Lombard F., Koen C.: 1993, The analysis of indexed astronomical time series II. The O-C (observed-calculated) technique reconsidered, Monthly Notices of Royal Astron. Soc., 263, 309–313.
- Manzoori D., Gozaliasl G.: 2007, A period study of the eclipsing binary U Sagittae, Astronomical Journal, 133, 1302–1306.
- Mattei J.A., Foster G.: 1995, Dramatic period decrease in T Ursae Minoris, Journal of AAVSO, 23, 106–116.
- Mizser A., **Szatmáry K.**, Tepliczky I.: 1990, Some results of Hungarian variable star observers, "First European Meeting of the AAVSO" Brussels, Journal of AAVSO, 19, No. 1. 47–51.
- Ostlie D.A., Cox A.N.: 1986, A linear survey of the Mira variable star instability region of the Hertzsprung-Russell diagram, Astrophysical Journal, 311, 864–872.
- Pribulla T.: 1998, Efficiency of mass transfer and outflow in close binaries, Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso, 28, 101–108.
- Sartoretti P., Schneider J.: 1999, On the detection of satellites of extrasolar planets with the methods of transits, Astronomy and Astrophysics Suppl. Ser., 134, 553–560.
- Simon A., **Szatmáry K.**, Szabó Gy.M.: 2007, Determination of the size, mass and density of "exomoons" from photometric transit timing variations, Astronomy and Astrophysics, 470, 727–731. [arXiv:0705.1046]
- Simon A.E., Szabó Gy.M., Szatmáry K.: 2009, Exomoon simulations, Earth, Moon, and Planets, 105, 385–389. [arXiv:0906.5442]
- Simon A.E., Szabó M.Gy., **Szatmáry K.**, Kiss L.L.: 2010, Methods for exomoon characterisation: combining transit photometry and the Rossiter-McLaughlin effect, Monthly Notices of Royal Astron. Soc., 406, 2038–2046. [arXiv:1004.1143]
- Simon A.: 2011, Exoholdak fedési exobolygók körül, PhD értekezés, SZTE
- Simon A., Szabó Gy.M., Kiss L.L., Szatmáry K.: 2012, Signals of exomoons in averaged light curves of exoplanets, Monthly Notices of Royal Astron. Soc., 419, 164–171. [arXiv:1108.4557]
- Simon A.: 2012, Úton az extraszoláris holdak felfedezése felé, Fizikai Szemle, 62, 7-8. szám, 239–243.
- Sterken C.: 2005, The O-C diagram: basic procedures, Proc. ,,The Light-Time Effect in Astrophysics – Causes and Cures of the O-C Diagram", ed. C. Sterken, ASP Conf. Ser. Vol. 335. 3–23.
- Sterne O., Campbell L.: 1937, Ann. Harvard Coll. Obs., 105, 459–489.
- Szabados L.: 1989, Period changes of bright southern Cepheids, Commun. Konkoly Obs. Hung. Acad. Sci., No. 94 (Vol. 11, Part 1)
- Szabados L.: 1991, Northern Cepheids: Period update and duplicity effects, Commun. Konkoly Obs. Hung. Acad. Sci., No. 96 (Vol. 11, Part 3)
- Szabó Gy.M., Szatmáry K., Divéki Zs., Simon A.: 2006, Possibility of a photometric detection of "exomoons", Astronomy and Astrophysics, 450, 395–398.
- Szabó M.Gy., Haja O., **Szatmáry K.**, Pál A., Kiss L.L.: 2010, Limits on Transit Timing Variations in HAT-P-6 and WASP-1, Information Bulletin on Variable

Stars No. 5919 [arXiv:1001.3059]

- Szakáts R., Szabó Gy.M., **Szatmáry K.**: 2008, Does the period of BE Lyncis really vary?, Information Bulletin on Variable Stars, No. 5816
- Szatmáry K., Mizser A., Dömény G.: 1985, Multiple-period red variables: Y Lyncis and W Cygni, BAA Variable Star Section Circular, No. 62. 2–8.
- Szatmáry K.: 1986a, Semiregular red variable stars a field of cooperation between amateurs and professionals, Proc. GIREP '86 Conference, Copenhagen, Denmark ESA SP-253 p. 407–409.
- Szatmáry K.: 1986b, Pulzáló változócsillagok periódusmeghatározása, Csillagászati Évkönyv az 1987. évre, Gondolat, 149–174.
- Szatmáry K.: 1987, Delta Scuti típusú változócsillagok kettős rendszerekben, Egyetemi doktori értekezés, JATE, Szeged
- Szatmáry K.: 1988, BV photometry of iota Bootis, Information Bulletin on Variable Stars No. 3262
- Szatmáry K.: 1990, Pulsating variable stars in binary systems, "First European Meeting of the AAVSO" Brussels, Journal of AAVSO, 19, No. 1. 52–56.
- Szatmáry K., Gál J.: 1992, Wavelet analysis of some pulsating stars, "Inside the Stars", IAU Colloquium No. 137, Vienna, Austria, Communications in Astroseismology No.43. 8/19. Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., Vol. 40, 761–763. 1993, Eds. W.W. Weiss and A. Baglin
- Szatmáry K., Vinkó J.: 1992, Periodicities of the light curve of the semiregular variable star Y Lyncis, Monthly Notices of Royal Astron. Soc., 256, 321–328.
- Szatmáry K., Gál J., Vinkó J.: 1993, Tests of wavelet analysis for periodic signals in astronomy, Proc. Conference on "Applications of Time Series Analysis in Astronomy and Meteorology", Ed. O. Lessi, p. 251–254. Padova, Italy, 1993
- Szatmáry K., Vinkó J., Gál J.: 1994, Applications of wavelet analysis in variable star research.I. Properties of the wavelet map of simulated variable star light curves, Astronomy and Astrophysics Suppl. Ser. 108, 377–394.
- Szatmáry K.: 1994a, Változócsillagok periódus-analízise az idő és a frekvencia tartományban, Kandidátusi értekezés, JATE, Szeged
- Szatmáry K.: 1994b, Wavelet analysis of deficient and gapped data series of variable stars, Proc. IAU 22nd General Assembly, Hague, Netherland, 1994 Astronomy Posters, Abstracts, Ed. Hugo van Woerden, p. 251
- Szatmáry K., Gál J., Vinkó J.: 1995a, Photoelectric photometry of variable stars at Szeged Observatory, poster on IAPPP Symposium '94 Baja, Hungary, 1994 "Cooperation Between Amateurs and Professionals in Recent Photometric Studies of Variable Stars" IAPPP Communications, No. 59, p. 28
- Szatmáry K., Gál J., Vinkó J.: 1995b, Tests of wavelet analysis for periodic signals in astronomy, poster on IAPPP Symposium '94 Baja, Hungary, 1994 "Cooperation Between Amateurs and Professionals in Recent Photometric Studies of Variable Stars" IAPPP Communications, No. 59, p. 29
- Szatmáry K., Gál J., Kiss L.L.: 1995, Light curve analysis of long period pulsating stars with the wavelet method: The semiregular star V Boo, Proc. IAU Coll. 155 "Astrophysical Applications of Stellar Pulsation", Astron. Soc. Pac. Conf. Ser. Vol. 83, 417–418. eds. R.S.Stobie and P.A.Whitelock, Cape Town, South Africa
- Szatmáry K., Gál J., Kiss L.L.: 1996, Applications of wavelet analysis in variable star research.II. The semiregular star V Bootis, Astronomy and Astrophysics, 308, 791– 798.
- Szatmáry K.: 1996, Más csillagok bolygóinak felfedezése, Meteor Csillagászati évkönyv 1997, 160–168.

Szatmáry K.: 1997a, Amplitude and period changes in the light variations of some Mira and SR stars, poster on 23rd IAU General Assembly, Kyoto, Japan Abstract Book, JD24-021P, p. 128.

Szatmáry K.: 1997b, Amplitude and period changes in the light variations of some SR stars, Pulsating Stars - Recent Developments in Theory and Observation, Proceedings of Joint Discussion No. 24 of the 23rd General Assembly of the IAU, in Kyoto, Japan Eds. M. Takeuti and D. D. Sasselov, Universal Academy Press, Japan, p. 103–106.

Szatmáry K.: 1997c, Más bolygórendszerek, Magyar Tudomány, 1997. március, 296– 302.0

Szatmáry K., Kiss L.L.: 1997, The strange semiregular star 89 Her, poster on IAPPP Symposium '96 Baja, Hungary IAPPP Communications No. 67, p. 66–69.

Szatmáry K., Kiss L.L.: 2000, Period analysis of the semiregular star Y Lyncis, Proc. PhD Conference '99 "A Bridge between Generations of Variable Star Researchers", Kecskemét, Hungary, eds. R.E. Wilson, T. Hegedüs, T. Borkovits and A Giménez, Baja-Madrid, p. 155–156.

Szatmáry K., Kiss L.L.: 2002, Period-gravity relation for semiregular stars, in Proc. IAU Colloquium 185 "Radial and Nonradial Pulsations as Probes of Stellar Physics", 26-31 July 2001, Leuven, Belgium, eds. C. Aerts, T. Bedding and J. Christensen-Dalsgaard, ASP Conf. Series 259, p. 566–567.

Szatmáry K.: 2002, Bolygók más csillagok körül, Meteor Csillagászati évkönyv 2003, 150–152, 204–221.

Szatmáry K., Kiss L.L., Bebesi Zs.: 2003, The He-shell flash in action: T Ursae Minoris revisited, Astronomy and Astrophysics, 398, 277–282.

- Szatmáry K.: 2004, Period-radius relation for semiregular and Mira stars, poster on "New Deal in European Astronomy: Trends and Perspectives" JENAM 2003, Budapest, Hungary, 25-30 Aug, Abstract Book p. 180, Commun. in Astroseismology 145, p. 58.
- Szatmáry K.: 2006, Exobolygók, Magyar Tudomány, 2006. augusztus, 968–979.o.
- Szatmáry K.: 2007, Bolygók mindenütt, Fizikai Szemle 57. No.12. 433–435.
- Szatmáry K., Csányi I., Kiss L.L., Bányai E., Derekas A., Szabó Gy.M.: 2012, Light curve analysis of M giant stars in the Kepler database, poster on Kepler Astroseismic Science Consortium 5th Workshop: "Extending the Kepler Mission: New Horizons in Asteroseismology", June 18-22, 2012, Balatonalmádi, Hungary, Abstract Book (ISBN 978-963-88019-9-9), Ed. R. Szabó, p. 156
- Szeidl B.: 1981, A változócsillagok asztrofizikai jelentősége, Fizikai Szemle, 31, No.4, 121–131.
- Szeidl B.: 1985, RR Lyrae és törpecepheida csillagok többszörös periodicitása és periódusváltozásai, Doktori értekezés tézisei, Budapest
- Szeidl B., Oláh K., Mizser A.: 1986, Period changes of RR Lyrae stars II, TW Her, VZ Her, AV Peg and TU UMa, Commun. Konkoly Obs. Hung. Acad. Sci., No. 89 (Vol. 10, Part 3)
- Templeton M.R., Mattei J.A., Willson L.A.: 2005, Secular evolution in Mira variable pulsations, Astronomical Journal, 130, 776–788.
- Uttenthaler S., Van Stiphout K., Voet K., Van Winckel H., Van Eck S., Jorissen A., Kerschbaum F., Raskin G., Prins S., Pessemier W., Waelkens Ch., Frémat Y., Hensberge H., Dumortier L., Lehmann H.: 2011, The evolutionary state of Miras with changing pulsation periods, Astronomy and Astrophysics, 531, A88 [arXiv:1105.2198]

Vinkó J., Szabados L., Szatmáry K.: 1993, Study of the population II Cepheid AU

Pegasi, Astronomy and Astrophysics, 279, 410-416.

- Vinkó J., Gál J., **Szatmáry K.**, Kiss L.: 1993, A seasonal light curve and new ephemeris of VW Cep, Information Bulletin on Variable Stars No. 3965
- van Kerkwijk M.H., Rappaport S., Breton R.P., Justham S., Podsiadlowski P., Han Z.: 2010, Observations of Doppler boosting in Kepler light curves, Astropysical Journal, 715, 51–58.
- van't Veer F.: 1986, Period variations of binary systems as a possible source of information about motions in the stellar core, Astronomy and Astrophysics, 156, 181– 185.
- Vassiliadis E., Wood P.R.: 1993, Evolution of low- and intermediate-mass stars to the end of the asymptotic giant branch with mass loss, Astrophysical Journal, 413, 641–657.
- Wood P.R., Zarro D.M.: 1981, Helium-shell flashing in low-mass stars and period changes in Mira variables, Astrophysical Journal, 247, 247–256.
- Wood P.R., Olivier E.A., Kawaler S.D.: 2004, Long secondary Periods in pulsating asymptotic giant branch stars: an investigation of their origin, Astrophysical Journal, 604, 800–816.
- WWZ wavelet software: http://www.aavso.org/software-directory/
- Yang Y., Liu Q.: 2003, Period changes of two W UMa-type contact binaries: RW Comae Berenices and CC Comae Berenices, Publ. Astron. Soc. Pacific, 115, 748–754.
- Zijlstra A.A., Bedding T.R.: 2002, Period evolution in Mira variables, Journal of AAVSO, 31, 2–10.