

## Válasz Dr. Kovács Géza opponens kérdéseire

Köszönöm Dr. Kovács Gézának az értekezésem gondos átolvasását, a véleményét, valamint a megjegyzéseket és kérdéseket, melyeket az alábbiakban válaszolok meg.

„Kritikai megjegyzések

1.1-1.3 egyenletek: Az összefüggés valóban hasznos lehet, a pulzációs módus azonosításra, feltéve, hogy az adott módus radiális. A probléma az, hogy ez többnyire nem igaz kettős rendszerekben gerjesztett pulzációs módusok esetében, úgyhogy a pulzációs állandó ismerete meg messze nem elegendő a módusazonosításra.”

Valóban, az alábbi módon meghatározható pulzációs állandó csak a radiális módusokra engedhet következtetni:

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

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

és a pulzációs állandó képletéből

$$Q = P_{pul} \left( \frac{M_1}{R_1^3} \right)^{1/2} \quad (1.2)$$

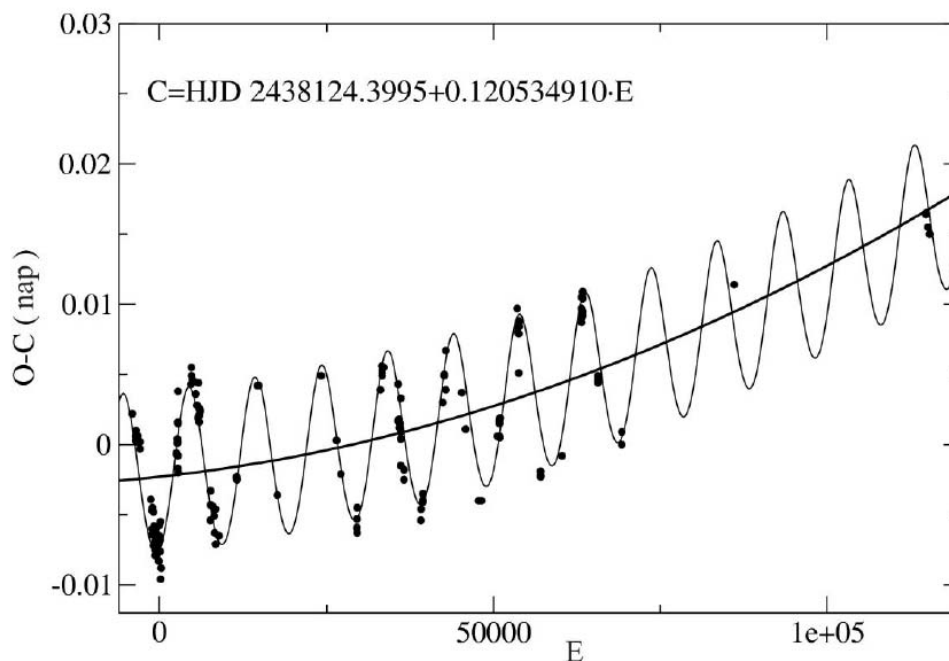
kapjuk, hogy

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

ahol  $P_{orb}$  [d] a keringési,  $P_{pul}$  [d] a pulzációs periódus,  $M_1$  [ $M_\odot$ ] és  $R_1$  [ $R_\odot$ ] a pulzáló komponens tömege és sugara,  $a$  [CsE] pedig a pálya fél nagytengelye.

„9. oldal, 1.5 ábra: Az SZ Lyn egy igen fontos objektum, melynek vizsgálata elsősorban Szeidl Béla nevéhez fűződik. Furcsának tartom, hogy ezzel kapcsolatban semmi hivatkozás nincsen, nevezetesen a Paparo, M.; Szeidl, B.; Mahdy, Hamid A., 1988Ap&SS.149...73P cikkben az ábrán látható utolsó 4 pont kivételével már minden pont szerepel (természetesen a megfelelő LITE görbével együtt).”

Az SZ Lyncis csillagot én is szeretem. Az egyetemi doktori (1987) és a kandidátusi (1994) értekezésemben is foglalkoztam vele. Utóbbiban szerepel az irodalomjegyzékben a fenti cikk. Igaz, most is idéznem kellett volna.



1.5. ábra: Az SZ Lyn  $\delta$  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.

„19. oldal: Doppler-beaming-et már bolygórendszerekben is kimutattak, pl.: Faigler, S.; Tal-Or, L.; Mazeh, T.; Latham, D. W.; Buchhave, L. A., 2013ApJ...771...26F.”

Mivel a doktori értekezés 2012 szeptemberében zárult, ott e cikket még nem idézhettem. A Doppler-beaming jelenséget olyan fontosnak tartom, hogy témavezetésemmel egy egész csillagász szakirányos fizika BSc szakdolgozat erről szól:

A <http://astro.u-szeged.hu/oktatas/szakdolgo.html> honlapon

--- 178. [A Doppler-erősítés \(pdf, 2.5 Mb\)](#) ---

--- Virág Dániel fizika BSc tv. Szatmáry Károly ---

A 2013 tavaszán a fenti cikk már megjelent az arXiv preprintek között, a szakdolgozatban az eredményei már említésre kerülnek.

„48. oldal: Ez egy formai hiba, de nem teljesen látom, hogy mi indokolja a négyszeres hivatkozást a Benkő & Szabó (2010) cikkre (Csillagászati Évkönyv, 2011) bő féloldalon belül a Kepler úrtávcső leírásakor. Nem ignorálva természetesen a hazai ismeretterjesztés fontosságát, de a projekt leírása igen sok helyen megtalálható, elég ha csak egy pillantást vetünk a Kepler honlapjára.”

A fenti cikk tömör, jó összefoglalást ad, jobban nem tudtam volna megfogalmazni a *Kepler* leírását, ezért több helyen felhasználtam. Elkerülendő a plágiumot, inkább többször idéztem. A *Kepler* honlapját is meg kellett volna említenem.

„50-66 oldal: A szerző meglepően és érthetetlen módon mellőzi a Kepler és hasonló tömeges fotometriai adatsorokra az utóbbi ~ 8 évben kifejlesztett és általánosan alkalmazott módszereket, melyeknek a célja a szisztematikus effektusok kiszűrése (idetartozik a legegyszerűbb szisztematika, a nullpontok figyelembevétele). Ezen módszerek tették lehetővé

a fedési exobolygók túlnyomó részének a felfedezését és természetesen fontos szerepet játszanak bármely fizikai/egyedi és szisztematikus változás szétválasztásában. Néhány referencia ezekre, a lényegében TFA és SysRem módszereken alapuló szűrési eljárásokra:

2012PASP..124.1000S Smith, Jeffrey C.; Stumpe, Martin C. et al. "Kepler Presearch Data Conditioning II - A Bayesian Approach to Systematic Error Correction"  
2012PASP..124.1073P Petigura, Erik A.; Marcy, Geoffrey W. "Identification and Removal of Noise Modes in Kepler Photometry"  
2007ASPC..366..119M Mazeh, T.; Tamuz, O.; Zucker, S. "The Sys-Rem Detrending Algorithm: Implementation and Testing"  
2005MNRAS.356..557K Kovács, Géza; Bakos, Gáspár; Noyes, Robert W. "A trend filtering algorithm for wide-field variability surveys" "

Igen, ezek a módszerek nagyon fontosak és hatékonyak a szisztematikák kiszűrésére. Különösen sikeresek a kis jel/zajjal terhelt adatsorokban az exobolygó tranzitok kimutatására (pl. HAT adatsorok). A *Kepler* esetében is használnak ilyen módszereket, de főleg az exobolygó vadászok.

A *Kepler* LC adatsoroknál a nyers fluxusokat használtam. A jel/zaj kiváló, hiszen néhány mikromagnitúdó a fotometriai pontosság. Az általam felfedezett „*Kepler*-év trend” kivételével más trendekkel nem számoltunk (ld. a 3.1 fejezetet: **Variability of M giant stars based on *Kepler* photometry: general characteristics**, E. Bányai, L. L. Kiss, T. R. Bedding, B. Bellamy, J. M. Benkő, A. Bódi, J. R. Callingham, D. Compton, I. Csányi, A. Derekas, J. Dorval, D. Huber, O. Shrier, A. E. Simon, D. Stello, Gy. M. Szabó, R. Szabó, K. Szatmáry, MNRAS, 2013, in press [arXiv:1309.1012]). Az analízis előtti legfontosabb módosítás az adatsoron a negyedek összetolása volt, amihez két módszert használtunk, különféle paraméterekkel.

## Kérdések

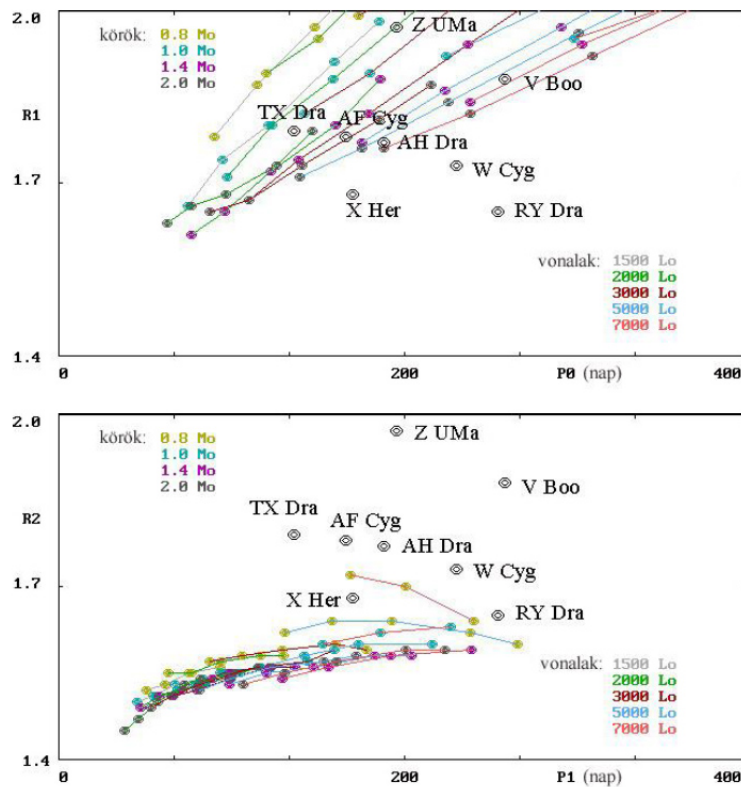
„• Mit kell azon érteni, hogy ”sztochasztikus hatások (pl. konvekció) miatt a pulzáció energiája váltakozva ‘átfolyik’ egyik módusból a másikba, majd vissza”? Léteznek olyan hidrodinamikai modellek amelyek ezt a jelenséget mutatják?”

Buchler, Kolláth, Cadmus szerint (2004, Evidence for low-dimensional chaos in semiregular variable stars, ApJ, 613, 532) néhány SR csillagnál a szabálytalan pulzáció annak az eredménye, hogy két, erősen nemadiabatikus módus között folyamatos energiacsere játszódik le (a periódusok 2:1 rezonancia közelében vannak). Az RV Tauri csillagoknál nemlineáris modellek kellenek a módusok felváltva való megjelenéséhez, és a turbulens energia általában nem elegendő a tapasztalt pulzációs energiához. Más vizsgálatok szerint a turbulens konvekció sztochasztikusan gerjeszthet pulzációt vörös óriásnál (Bedding et al. 2005, The light curve of the semiregular variable L<sub>2</sub> Puppis - II. Evidence for solar-like excitation of the oscillations, MNRAS, 361, 1375).

Korábban az amplitúdóegyenletek megoldásai között is kerestek módusváltásra, illetve zaj hatására egyből két módus kialakulására utaló eseteket (Buchler, Goupil, Kovács 1993, Stellar pulsations with stochastic driving, A&A, 280, 157).

Megjegyzem, hogy a két- és többmódusú pulzáció mechanizmusát még nem nagyon értjük, még a klasszikus radiális pulzátoroknál sem (pl. Smolec R.: 2013, Mode selection in pulsating stars, IAU Symp. 301 „Precision Asteroseismology” [arXiv:1309.5959]). Ehhez teljes, 3D hidrodinamikai modellekre van szükség, ezek fejlesztése jelenleg is folyik.

„• 34. oldal: Az 5.6 ábrán látható a lineáris modellek által megjósolt pulzációs periódusok a szemireguláris csillagokra jellemző paramétertartományban. Mint ismert, nagy luminozitás/tömeg aránnyal rendelkező csillagok esetén a lineáris periódusok jelentősen eltérhetnek a nemlineárisokétól (pl. Ya’Ari, A.; Tuchman, Y., 1999ApJ...514L...35Y). Hogy változna a fenti ábra, ha ezt a fontos effektust figyelembe vennénk?”



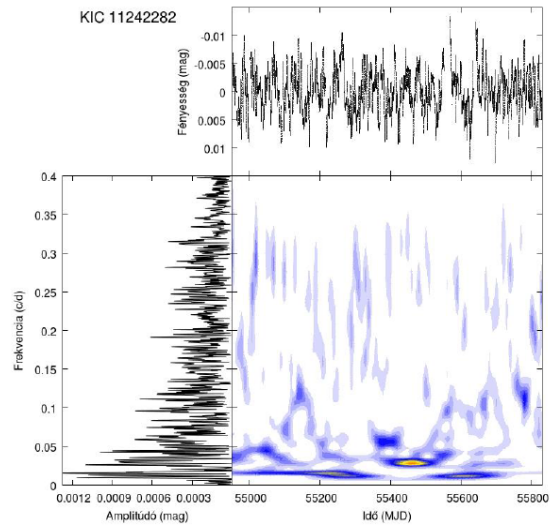
5.6. ábra: Ostlie & Cox (1986) lineáris modellje. P0 az alaprezgés, P1 az első-, P2 a második radiális félhang periódusa;  $R1=P0/P1$  és  $R2=P1/P2$  periódusarányok.

A modellek (pl. Ya’ari & Tuchman 1999, ApJ 514, L35) szerint a nemlineáris alaprezgési periódus sokkal, akár 30%-kal rövidebb, mint a lineáris. Az  $R1=P0/P1=2-3$  közötti, az  $R2=P1/P2=1,3-1,5$  közötti érték (Ya’ari & Tuchman 1996, ApJ 456, 350). Tehát a felső ábrán a modellek balra és felfelé, az alsó ábrán balra és kissé lejjebb kerülnének. Ezáltal a megfigyelésekkel való egyezés rosszabb lesz.

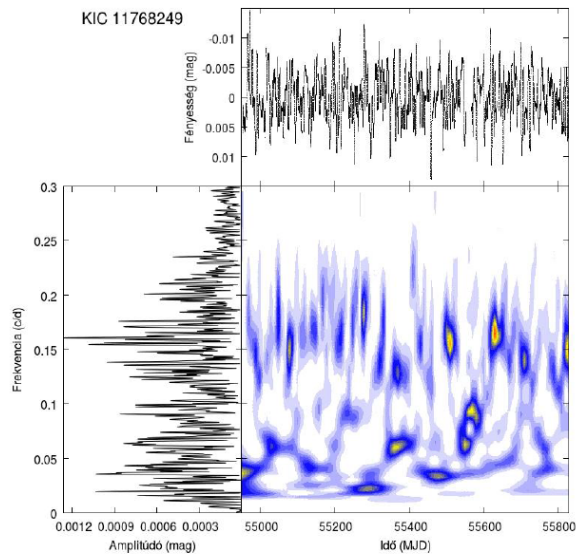
„• 73, 82. oldal: Amennyiben a KIC 1124, KIC 1176 és a KIC 2422 irregularisnak tűnő reziduálja valóban nap-típusú oszcillációból ered, úgy a módusok véges élettartama és amplitúdója összhangban kell lenni a konvektív gerjesztés erősségével. A csillagok paraméterei és konvektív modellek alapján kimondható-e, hogy ez a reláció fennáll?”

A  $2 M_{\odot}$ -nél kisebb tömegű csillagokra 3D szimulációkkal vizsgálták nemradiális p-módusoknak a turbulens konvekció által való sztochasztikus gerjesztődését (pl. Samadi et al. 2007, Excitation of solar-like oscillations across the HR diagram, A&A, 463, 297), de nem vörös óriásokra.

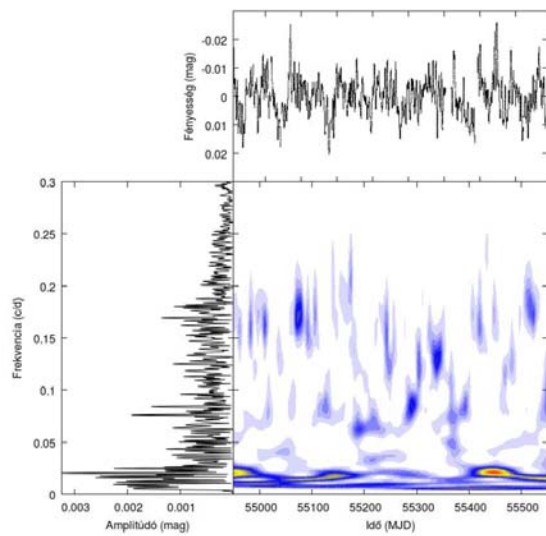
Buchler, Kolláth, Cadmus szerint (2004, Evidence for low-dimensional chaos in semiregular variable stars, ApJ, 613, 532) néhány SR csillagnál a pulzáció nem sztochasztikus jellegű, hanem kaotikus.



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



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



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

A nap-típusú oszcillációs módusok élettartama a Naphoz hasonló csillagoknál néhány nap, esetleg 10-20 nap (de Ridder et al. 2009, Nature, 459, 398), míg a félszabályos vörös óriásoknál több év is lehet (pl. Bedding et al. 2005, The light curve of the semiregular variable L<sub>2</sub> Puppis - II. Evidence for solar-like excitation of the oscillations, MNRAS, 361, 1375, a Fourier-spektrumra illesztett Lorentz-profil szélessége alapján). Az ilyen módusok amplitúdója az  $L/M$ , illetve  $L/(M T_{\text{eff}})$  mennyiséggel skálázódik (Kjeldsen & Bedding 2001, ESA SP-464, p. 361). Újabban a vörös óriásokra más skálázási relációt, más kitevőket határoztak meg (Huber et al. 2011, Testing scaling relations for solar-like oscillations from the main sequence to red giants using Kepler data, ApJ, 743, A143).

A vörös óriásoknál a pulzáció kétféle gerjesztése (nap-típusú konvektív és a  $\kappa$ -mechanizmus) jó eséllyel elkülöníthető. Az előzőt  $P=10$  nap periódus és  $A=0,001$  magn. alatti értékek jellemzik (Bányai ... Szatmáry 2013, MNRAS, in press, Fig. 11). A fenti 3 csillag oszcillációi a P-A értékek alapján nap-típusú lehet.

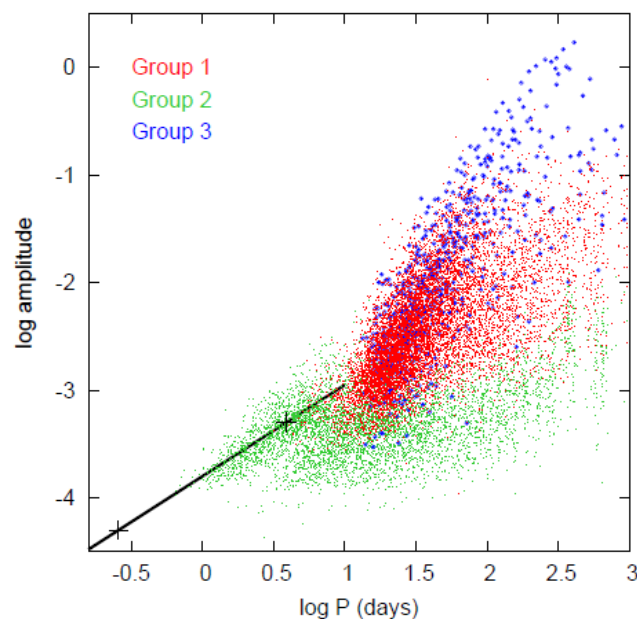


Figure 11. (Top panel) the period-amplitude relations for the whole sample. (Bottom panel) different colours distinguishes the three groups. Plus signs refer to two selected points in the top panel of Fig. 3. of Huber et al. (2011) related to solar-like oscillations. The black line is drawn through these points. (See the electronic version of the article for the figure in colours.)

Az ábrán látható, hogy a nap-típusú oszcillációs módusok amplitúdója nő a periódussal. A periódus pedig nagyobb a vörös óriásoknál, ahol a konvekció erősebb. A konvektív gerjesztés erősségével a nap-típusú oszcillációs módusok élettartama és amplitúdója várhatóan nő, de szerintem csak egy határig. Az erre vonatkozó modellek a vörös óriásokra még hiányoznak, rájuk inkább extrapolációkat alkalmaznak.

Az egyik legújabb eredmény (Mosser et al. 2013, Period-luminosity relations in evolved red giants explained by solar-like oscillations, A&A, accepted) szerint a félszabályos vörös óriások periódus-fényesség diagramja szekvenciáit jól lehet sztochasztikusan gerjesztett nap-típusú oszcillációkkal magyarázni, de csak max. 1 magnitúdós amplitúdóig. A nagyobb fényváltozást mutató miráknál a radiális módusok dominálnak.

„• 88. oldal: Lehetséges-e, hogy a Kepler és a földi észlelések közötti eltérés egy (jelentős?) része a vörös változók amplitúdóinak esetleges erősebb színfüggőségéből származik?”

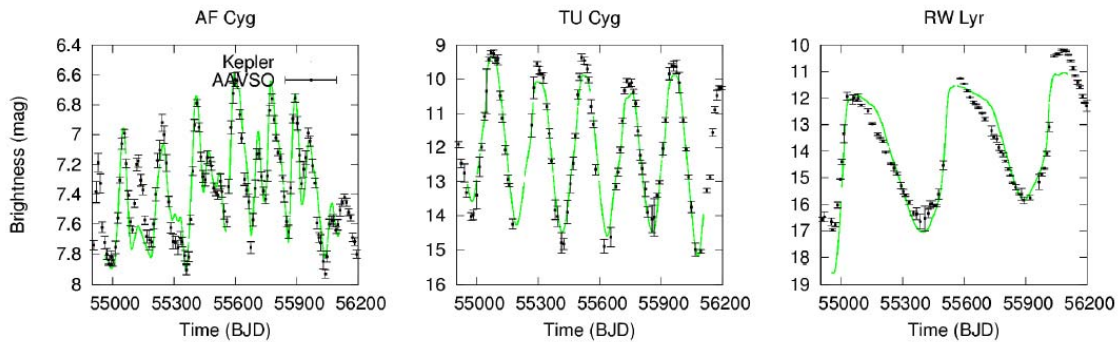
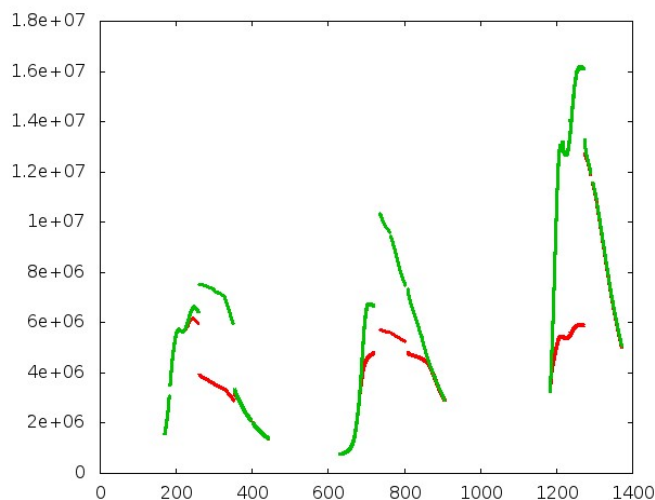


Figure 8. A comparison of AAVSO and the scaled Kepler light curves for three well-known long-period variables – AF Cyg, TU Cyg, RW Lyr. In left and middle panel the AAVSO data are 10-day means of visual observations; in the right panel the brightnesses came from average measurements in Johnson V and the green channel of RGB DSLR observations. Black squares are the AAVSO data with error bars, the green dots correspond to the *Kepler* data.

A pulzáló vörös óriások fényváltozási amplitúdója valóban erősen színfüggő, ez különbséget okoz a *Kepler* és az AAVSO fénygörbék között, hiszen más a megfigyelési hullámhossz-tartomány. De a tapasztalt, időnként egy magnitúdónál is nagyobb, és időben változó mértékű eltérést ezzel nem lehet magyarázni.

Egy másik dolog sokkal inkább figyelembe veendő: ezek a vörös félszabályos és mira változók aránylag fényesek, valójában túl fényesek voltak a *Kepler* kamerája számára. Telítődés, szaturáció jött létre mindegyikük esetében. Ezt az RW Lyrae esetében Szabó Róbert ez év júniusában megvizsgálta. Úgy találta, hogy „az erős szaturáció miatt sok fluxus elveszik, ezért a mért amplitúdó kisebb a valóságosnál, és a fénygörbe alakja is torzul(hat) „.



Az RW Lyr fenti fluxus-idő (nap) fénygörbéjén a Q2,3,4 a Q7,8,9 és a Q13,14 negyedek szerepelnek, pirossal az eredeti, zölddel a szaturációra korrigált értékek (Szabó Róbert).

Ezek a megfontolások már szerepelnek a KASC 12 Working Group első nagy áttekintő cikkében, és további vizsgálatokat tervezünk e problémakörben:

#### Variability of M giant stars based on *Kepler* photometry: general characteristics

E. Bányai, L. L. Kiss, T. R. Bedding, B. Bellamy, J. M. Benkő, A. Bódi, J. R. Callingham, D. Compton, I. Csányi, A. Derekas, J. Dorval, D. Huber, O. Shrier, A. E. Simon, D. Stello, Gy. M. Szabó, R. Szabó, K. Szatmáry, MNRAS, 2013, in press [arXiv:1309.1012]

Szeged, 2013. október 6.

Szatmáry Károly