

Pulzáló változócsillagok és megfigyelésük I.

3. RR Lyrae és δ Cephei csillagok

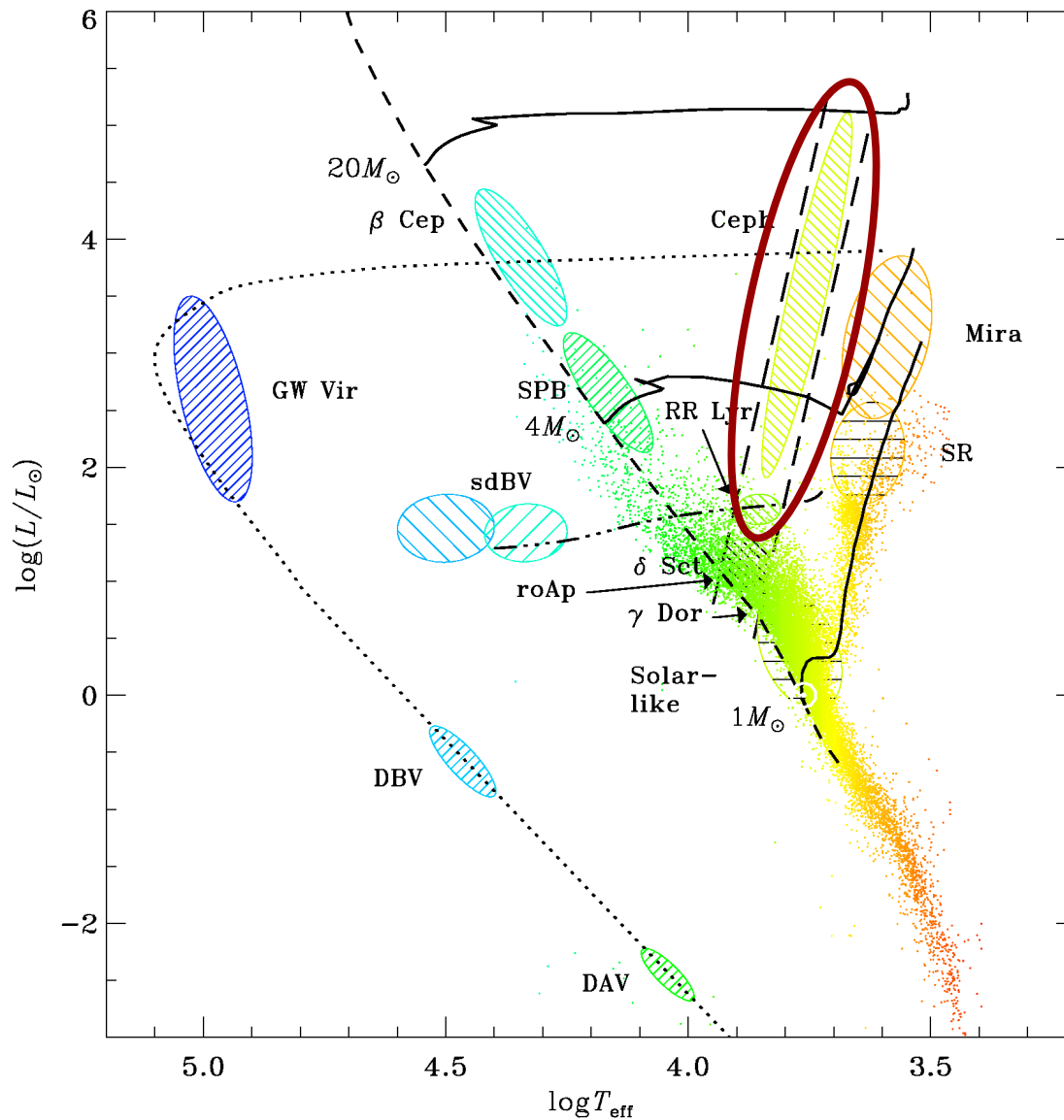
Sódor Ádám

ELTE – MTA CSFK CSI

2017.10.24.



Helyük a HRD-n



δ Cephei, RR Lyrae – a klasszikusok

Összehasonlítás

	(klasszikus) cefeidák	RR Lyrae-k
Fejlődési állapot	főszorozatról elfejlődő, H-t héjban égető, Napnál nagyobb tömegű csillagok $2 - 20 M_{\text{Nap}}$	horizontális-ági, magjukban He-ot égető, ~ 0.6 naptömegű csillagok
Életkor	10 – 100 Myr	>10 Gyr
Gerjesztési mechanizmus		kappa
Pulzáció módja	alacsony rendű, lényegében radiális, 1 – 2-max. 3 módusú	
Pulzációs periódus	1 – 80 d	0.2 – 1.0 d
T_{eff}	~ 6000 K	~ 7000 K
L	$300 - 40000 L_{\text{Nap}}$	$\sim 50 L_{\text{Nap}}$
Értjük?		igen
Teljesen?		nem!

RR Lyr – történelem, osztályozás

1890-es évek: Solon I Bailey felfedezi a halmazváltozókat gömbhalmazokban

1901: Williamina Fleming felfedezi a névadó RR Lyrae változást

Bailey osztályozása a fénygörbe alapján: a, b és c

Ma:

RRab – alpmódus

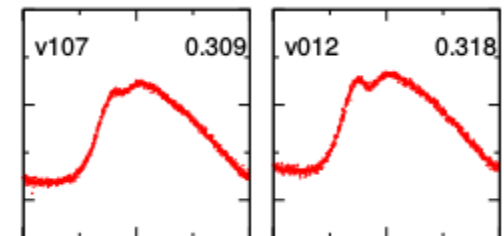
RRc – első felhang

RRd – mindkettő

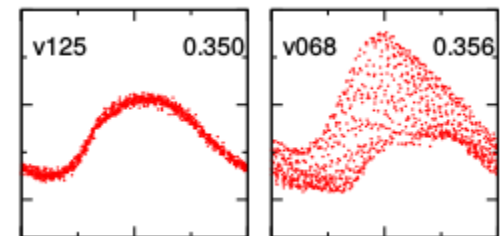
RRe – második felhang

RRab

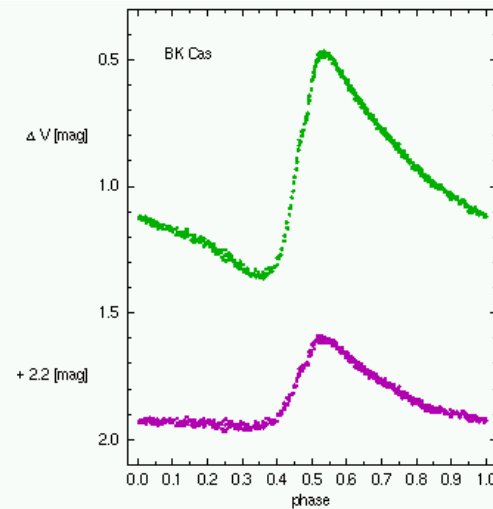
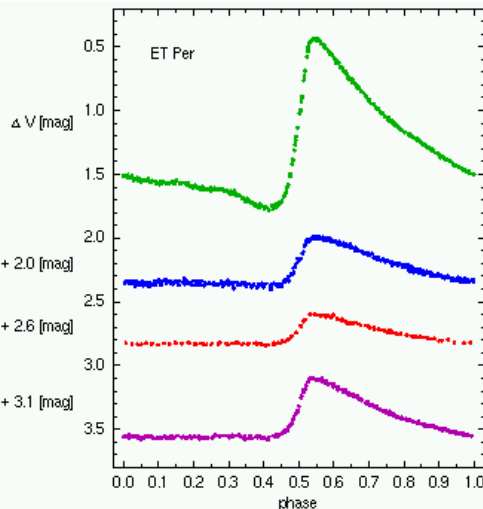
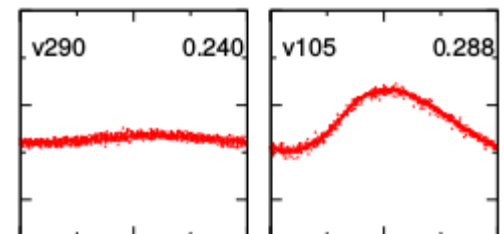
RRc



RRd



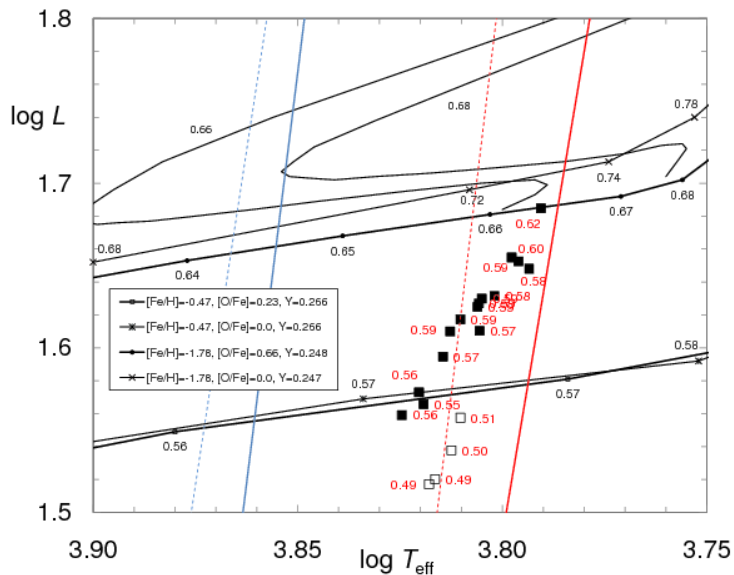
RRe



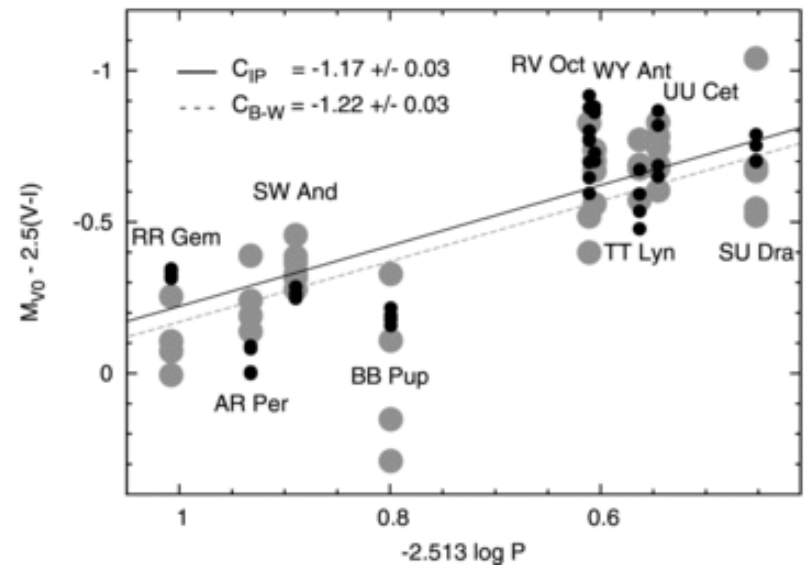
A HB és RR Lyrae PLC

A horizontális ág helyzete függ a fémtartalomtól:

Nagyobb fémtartalom → kisebb luminozitás, kisebb tömeg → rövidebb periódus



Nemec et al. 2011, MNRAS, 417, 1022



Sódor et al. 2009, MNRAS, 394, 261

Fiz. paraméterek és a fénygörbe

A fénygörbe alakját a periódussal, valamint a Fourier-paraméterekkel jellemezhetjük:

$$m(t) = A_0 + \sum_{j=1}^n A_j \sin(j\omega t + \phi_j),$$

E mennyiségek és a fizikai paraméterek között pedig empirikus összefüggések találhatóak, mint pl a fémtartalomra (vasformula):

$$[\text{Fe}/\text{H}] = -5.038 - 5.394P + 1.345\varphi_{31}$$

Jurcsik & Kovács 1996, A&A, 312, 111

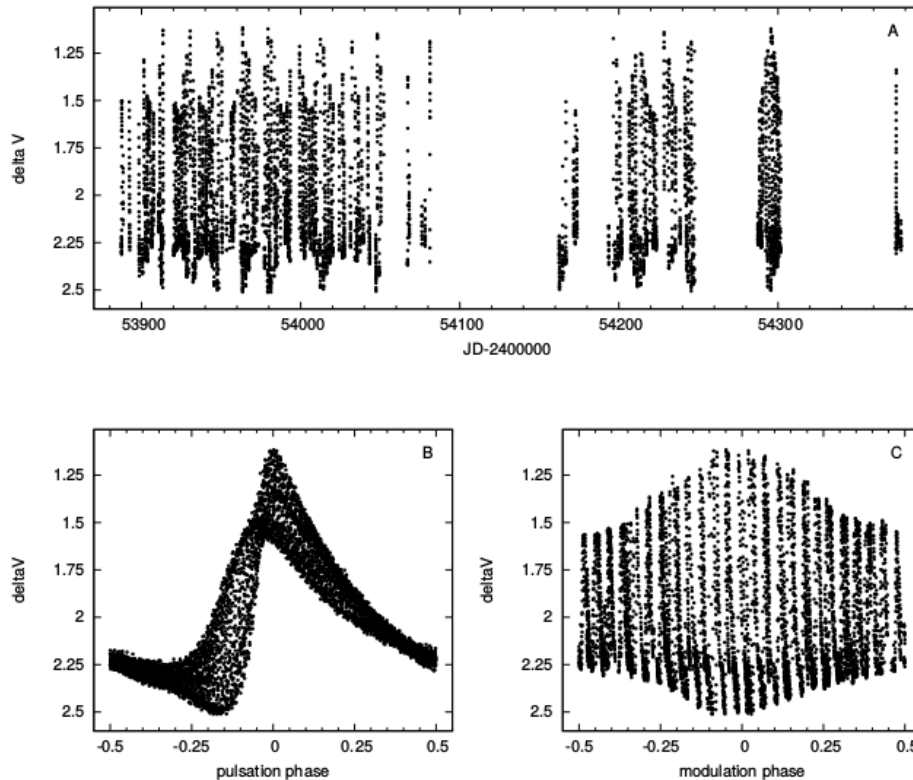
A Blazhko-effektus I

Sergei Blazhko, 1907: az RW Dra maximum fázisa periodikusan modulált

Harlow Shapley, 1915: az RR Lyr maximumának fényessége is periodikusan modulált

A Blazhko periódus ~5–500 nap hosszúságú (10–1000 pulzációs periódus)

Szépen modulált fénygörbe: MW Lyr – $P_0 = 0.398$ d; $P_{Bl} = 16.55$ d



Jurcsik et al. 2008, MNRAS, 391, 164

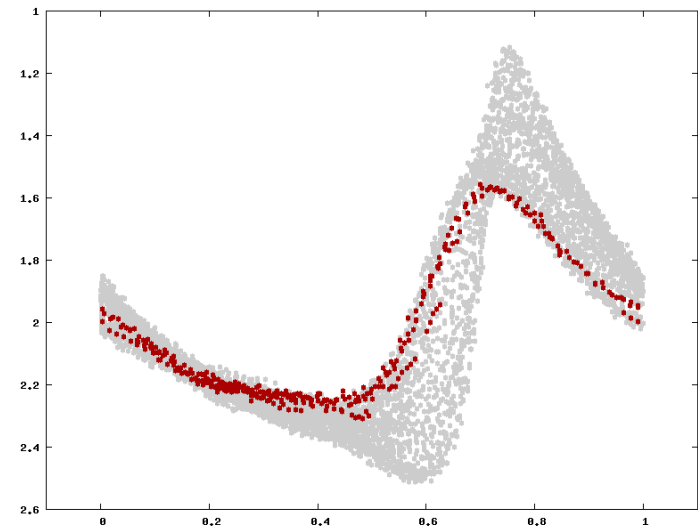
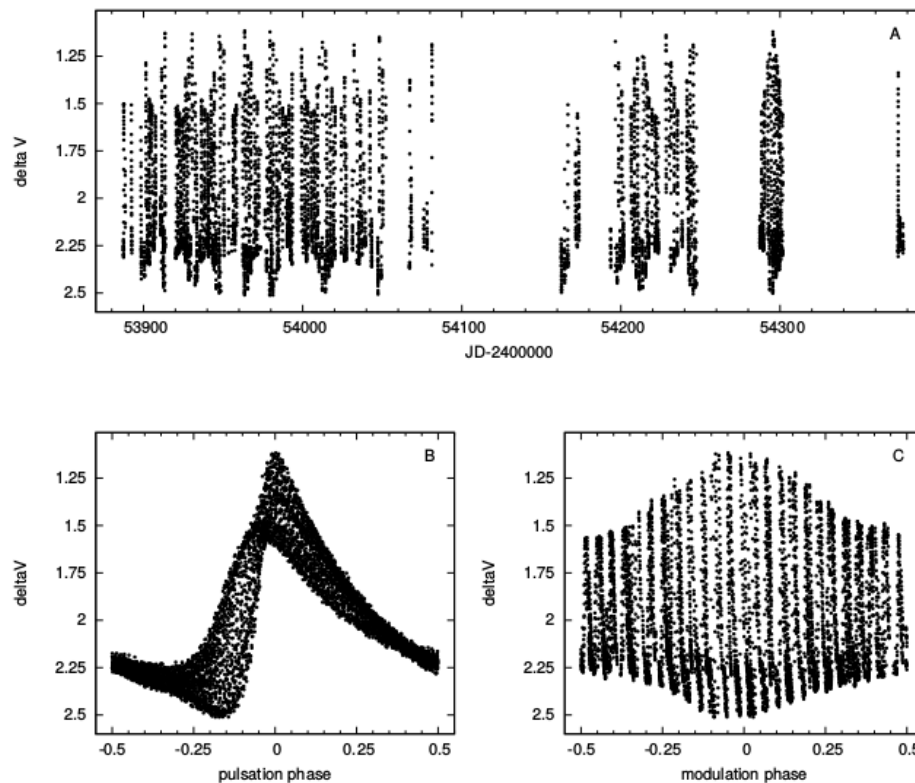
A Blazhko-effektus I

Sergei Blazhko, 1907: az RW Dra maximum fázisa periodikusan modulált

Harlow Shapley, 1915: az RR Lyr maximumának fényessége is periodikusan modulált

A Blazhko periódus $\sim 5\text{--}500$ nap hosszúságú (10–1000 pulzációs periódus)

Szépen modulált fénygörbe: MW Lyr – $P_0 = 0.398$ d; $P_{\text{Bl}} = 16.55$ d



A Blazhko-effektus II – Fourier sp.

Egy f_0 frekvenciájú harmonikus jel amplitúdóját f_m frekvenciával modulálva a jelalak:

$$f(t) = [A_0 + A_m \cdot \sin(2\pi f_m \cdot t)] \cdot \sin(2\pi f_0 \cdot t),$$

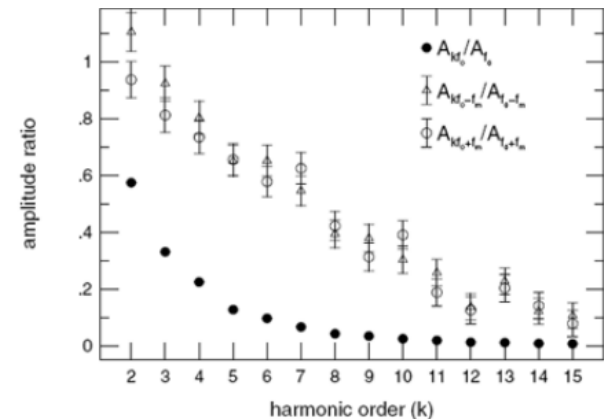
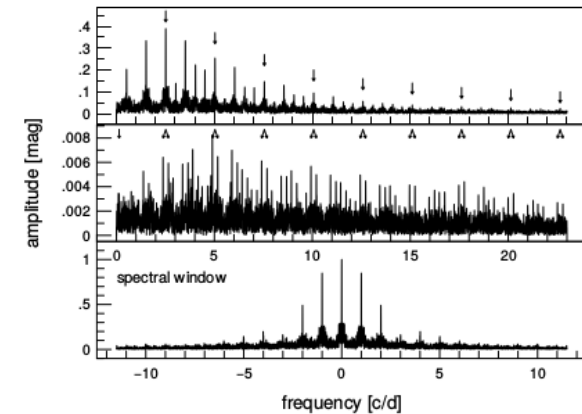
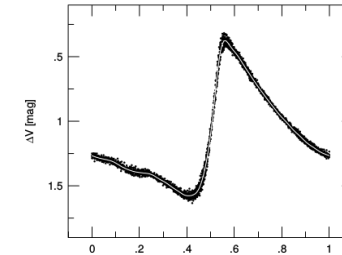
felhasználva a $\sin \alpha \sin \beta = \frac{1}{2}[\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)]$ trigonometrikus addíciós tételt kapjuk, hogy

$$f(t) = A_0 \cdot \sin(2\pi f_0 \cdot t) + \frac{A_m}{2} \cos[2\pi(f_0 - f_m) \cdot t] - \frac{A_m}{2} \cos[2\pi(f_0 + f_m) \cdot t].$$

Tehát a jel Fourier-spektruma egyenközű tripllett, a modulált jel középső csúcsa mellett kétoldalt f_m távolságban két egyenlő amplitúdójú modulációs csúcs jelenik meg. Ha a modulált jelnek felharmonikusai is vannak, akkor e felharmonikusok csúcsai mellett kétoldalt is megjelennek a modulációs csúcsok a spektrumban a $k \cdot f_0 \pm f_m$ helyeken, azonos amplitúdóval.

A valóságban természetesen nem ilyen egyszerű a helyzet, a modulációs csúcsok nem mindig jelennek meg ilyen szimmetrikusan. Gyakran nem egyforma amplitúdójúak, így néha csak az egyik oldali csúcs azonosítható. A modulációs csúcsok a pulzációs frekvencia felharmonikusainak csúcsai mellett is megjelennek, és ezek között is lehetnek eltérések. A Blazhko-viselkedés irregularitásai tovább bonyolítják a spektrumot.

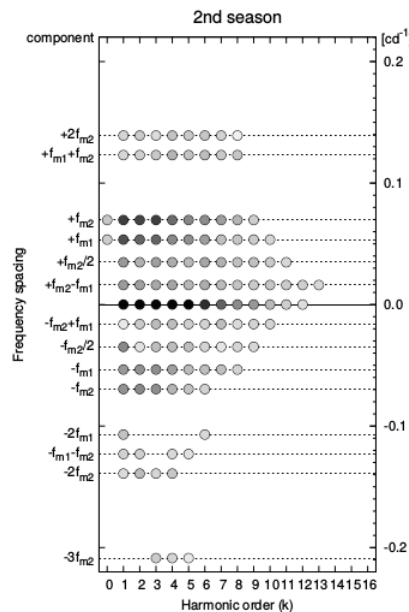
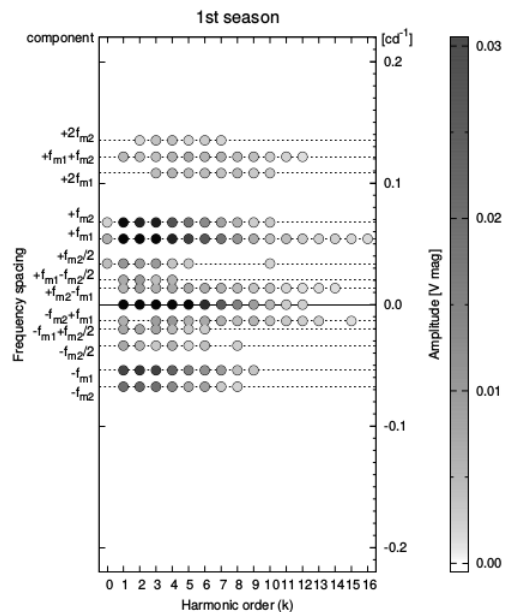
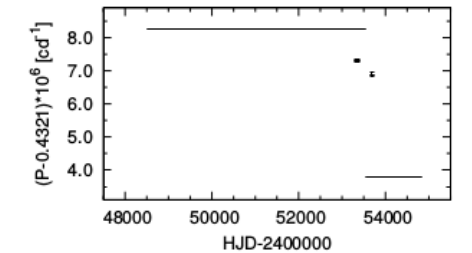
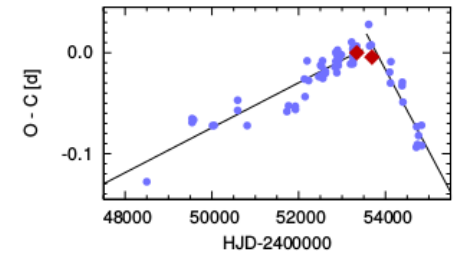
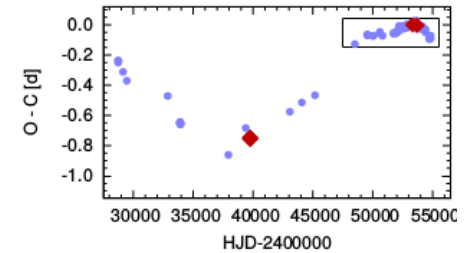
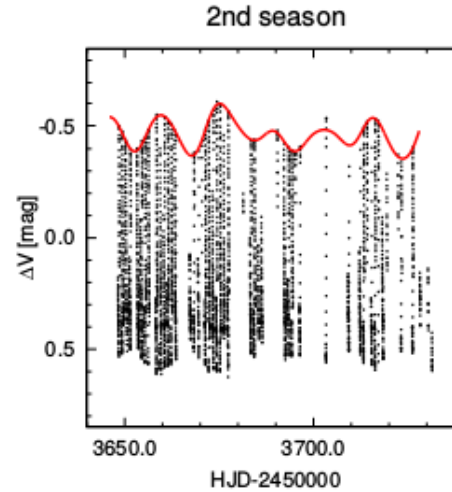
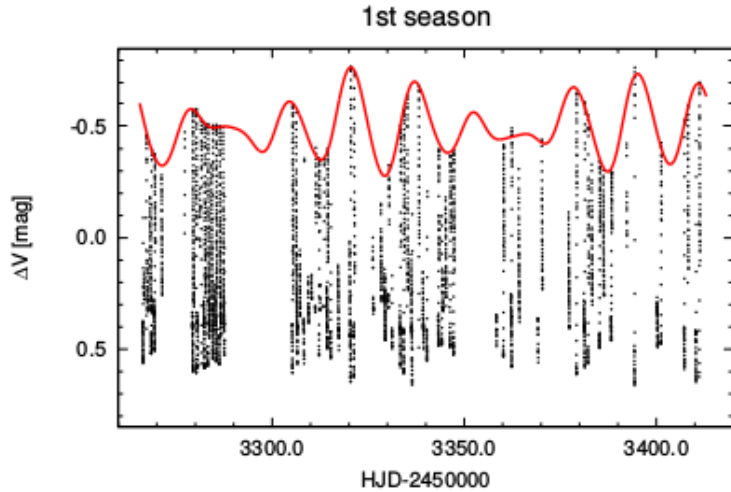
RR Gem



Jurcsik et al. 2005, A&A, 430, 1049

A Blazhko-effektus III. – egyebek

Multiperiodikus moduláció, a moduláció időbeli változása. PI: CZ Lac



A Blazhko-effektus III. – egyebek

Perióduskétszereződés bizonyos modulációs fázisban, pl: RR Lyrae
félegész pulzációs frekvenciák a Fourier-spektrumban

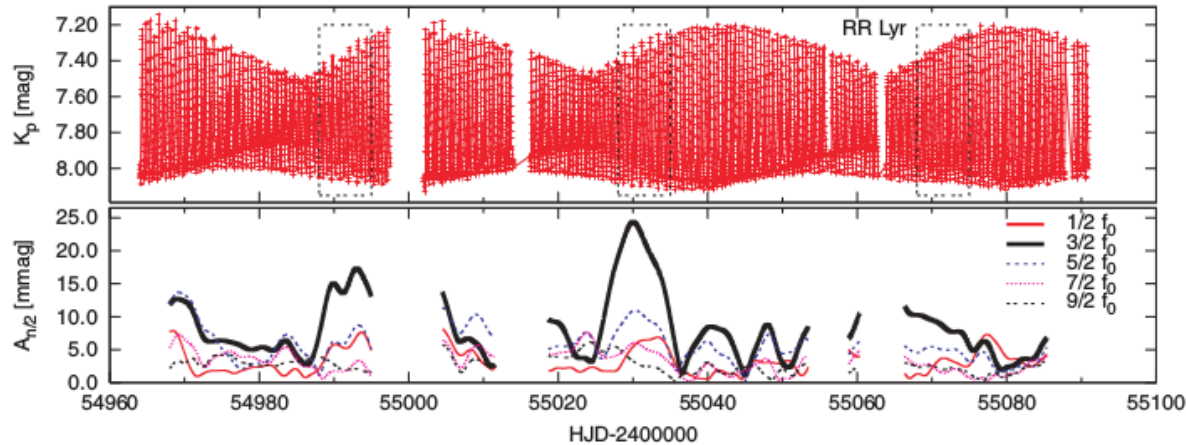


Figure 3. Upper panel: Q1+Q2 light curve of RR Lyr. Note that the individual pulsational cycles are hardly discernible, while the long period (39.6-d) Blazhko modulation clearly stands out. The three dashed boxes are enlarged in Fig. 4. Bottom panel: amplitudes of the HIFs.

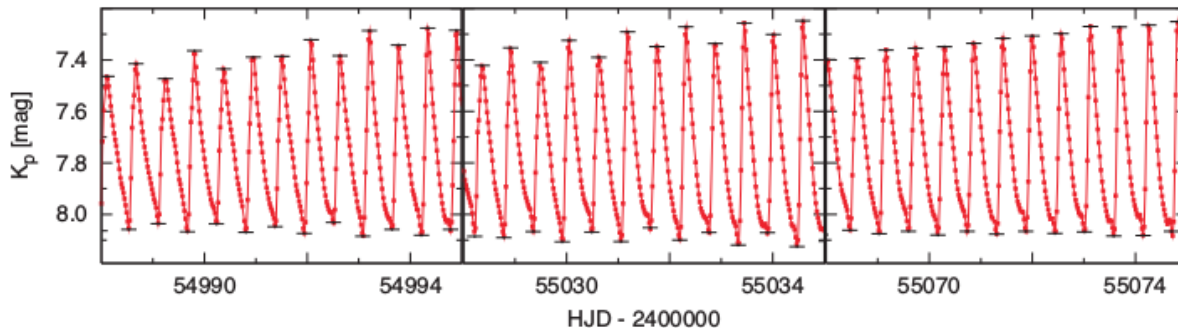
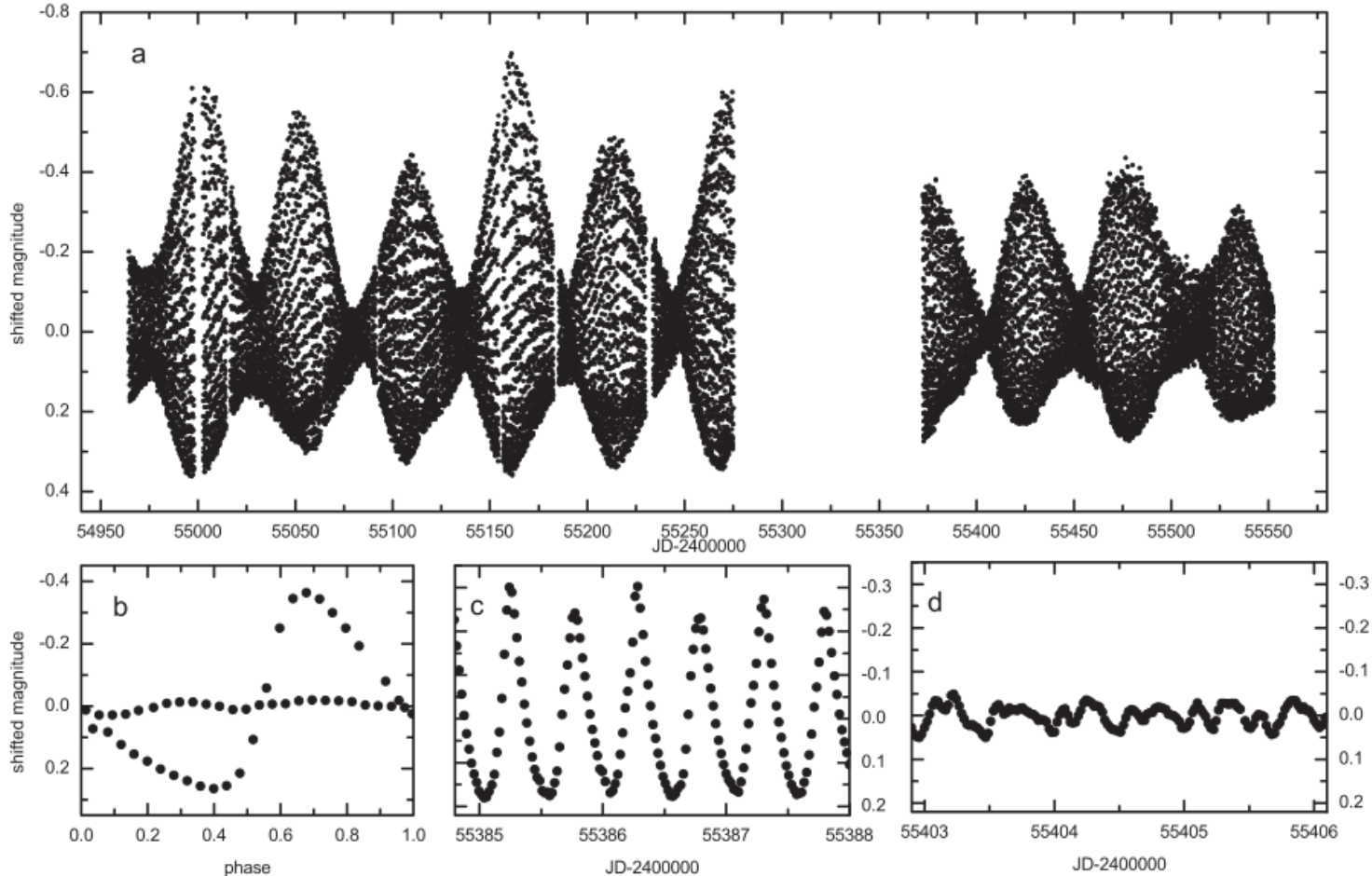


Figure 4. 7-d segments of the *Kepler* light curve of RR Lyr showing different degrees of PD effect at the same Blazhko phase. The maxima and the minima were fitted with a ninth-order polynomial and the small horizontal bars drawn through the extrema are plotted to guide the eye.

A Blazhko-effektus III. – egyebek

Mégbonyolultabb moduláció, pl: V445 Lyr



Guggenberger et al. 2012, MNRAS, 424, 649

A Blazhko-effektus IV. – modellek

Rotációhoz kapcsolódó:

- Az alaplómódushoz rezonánsan csatolt nemradiális módus
- Ferde mágneses rotátor

Egyik sem jó: a multiperiodikus modulációt, a modulációs periódus változásait nem magyarázza

Konvektív/mágneses ciklusok (Stothers-modell)

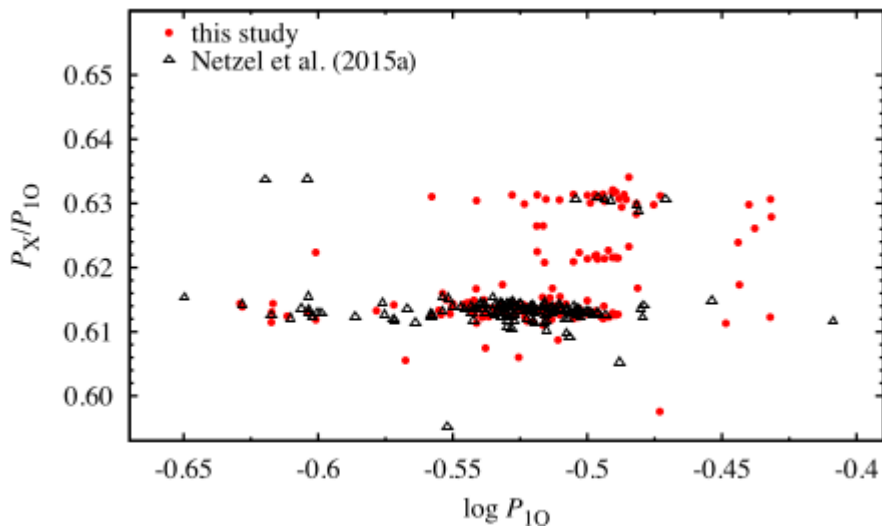
- A ciklikus mágneses tér a konvekciót befolyásolja, ami pedig kihat a pulzációra

Rezonancia az alaplómódus és a 9. felhang között

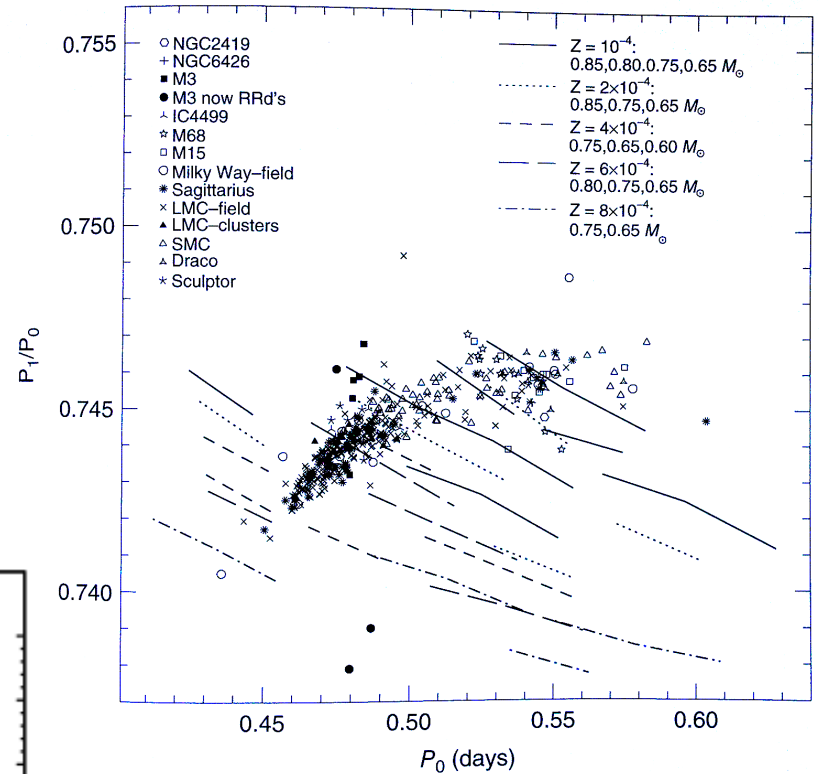
A Petersen-diagram



ÚJDONSÁG



Netzel et al. 2015, MNRAS, 453, 2035



Kettős RR Lyrae csillagok – I

Probléma: Hol vannak a kettős RR Lyrae csillagok?

Két évvel ezelőttig még csak egyet ismertünk: TU UMa.

Valószínű magyarázat:

- A rövid orbitális ($P < \text{kb. } 4 \text{ év}$) periódusú kettősök más fejlődési utat járnak be – szubtörpék?
- A hosszú periódusú kettős RR Lyrae-eket nehéz detektálni, mert:
 - Hosszú ideig, akár évtizedekig kellene követni őket.
 - Spektroszkópiai módszerrel nagyon sok radiális sebesség-mérés kellene a pulzáció hatásának elkülönítéséhez. Ha még Blazhko-effektus is van, akkor pedig nagyon-nagyon sok kellene. Ráadásul hosszú keringési periódus kis radsebet jelent.
 - Fotometriai módszerhez (fényidő-effektus) csak a legstabilabb pulzációs periódusú RR Lyraek jöhetnek szóba. Ilyen nagyon kevés van.

Kettős RR Lyrae csillagok – II

De aztán jött 2015:

Hajdu et al. (2015, MNRAS, 449, 113)

4 G. Hajdu et al.

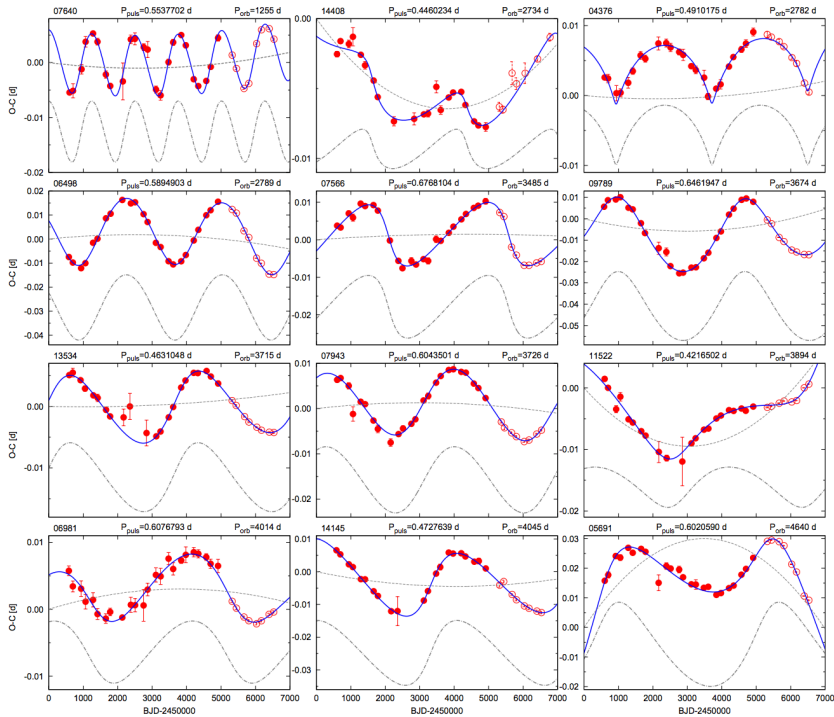


Figure 2. $O-C$ diagrams of RRL binary candidates. The $O-C$ points (filled circles: OGLE-III data; empty circles: OGLE-IV data) are fitted with the sum of a linear period change (Eq. 3, dashed line) and the binary orbit (Eq. 2, dot-dashed line, shifted downwards for clarity). For each star, the OGLE ID, pulsation period, and orbital period are given on top of the upper x-axis.

stb.

De ezek is mind csak kettős-jelöltek,
amíg spektroszkópiailag meg nem erősítjük vagy cáfoljuk a kettősségüket!

Liška et al.
(2016, MNRAS, 459, 4360)

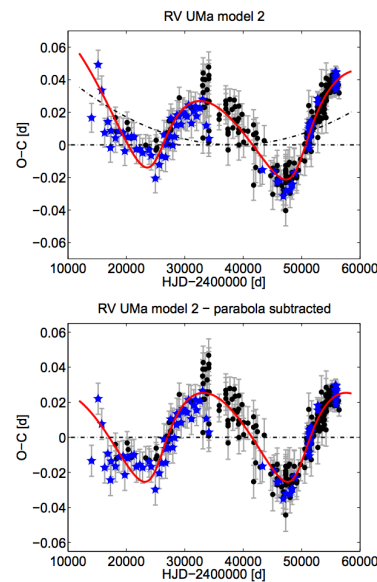


Figure 13. $O-C$ diagram of RV UMa together with our model 2 (top panel) and variation after subtracting the parabolic trend (bottom panel). Symbols are the same as in Fig. 1.

Sódor et al.
(2017, MNRAS, 465, L1)

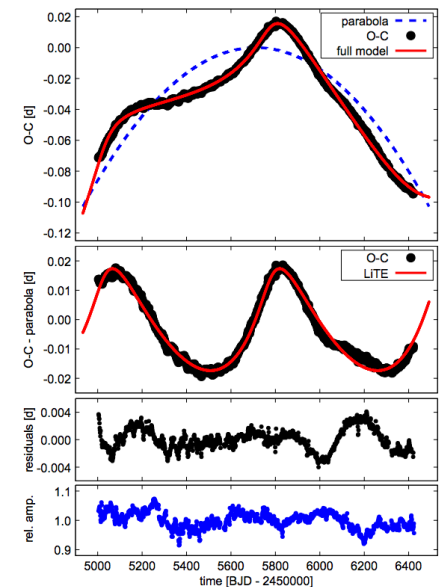


Figure 2. The $O-C$ diagram of KIC 2831097. Top: data fitted with constant period decrease (blue dashed curve), and the superimposed orbital light-delay variations (red continuous curve). Second panel: the data after the parabolic variation is subtracted, with the fitted orbital variation (continuous curve). Third panel: final residuals. Bottom: relative pulsation amplitude.

Cefeidák

Klasszifikáció

– Klasszikus cefeidák (I. típusú cefeidák vagy δ Cephei csillagok)

Fiatal, I. populációs csillagok – H héjégés
4–20 naptömeg,
 10^6 napluminozitás,
F6–K2 spektráltípus.

– II. típusú cefeidák

Idős, II. populációs csillagok:
 $\sim 0,5$ naptömeg,
 ~ 10 Gyr kor.

Alcsoportjai:

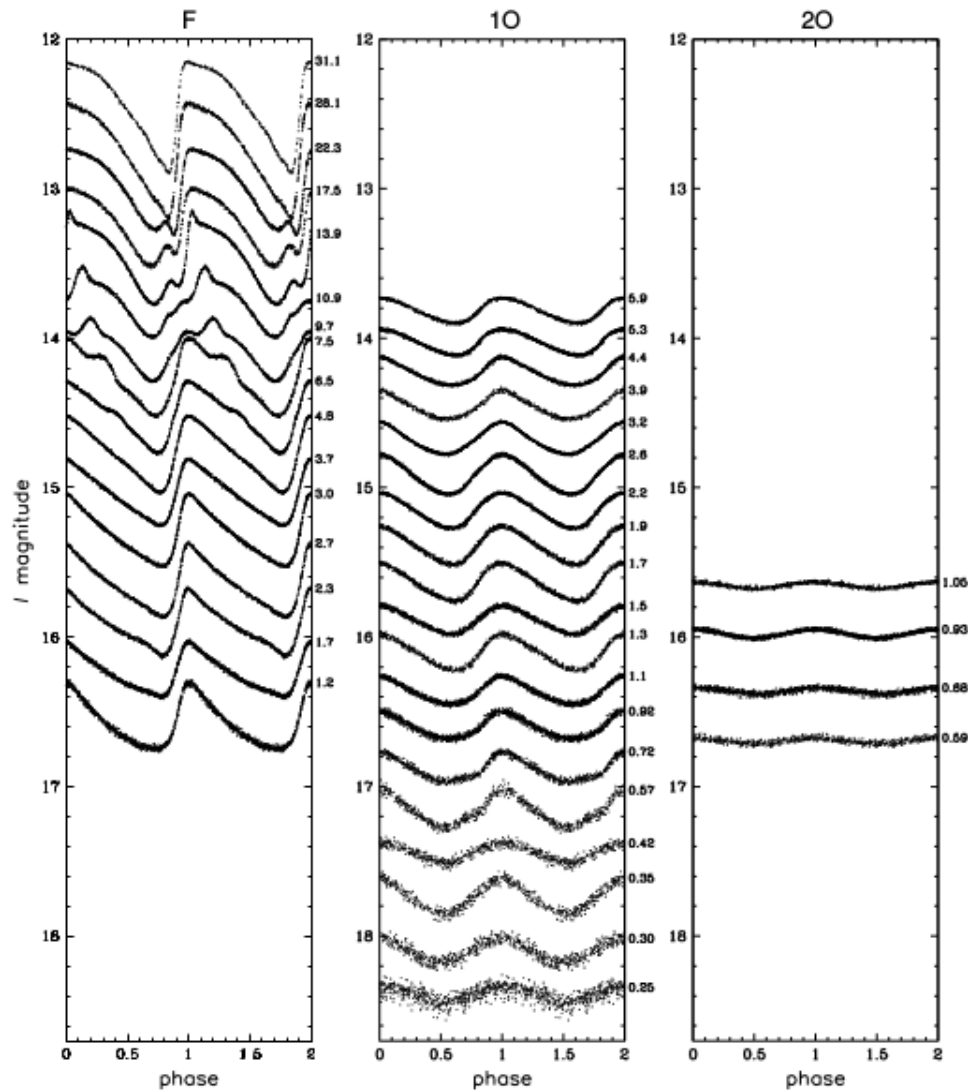
- BL Herculis: $P = 1\text{--}4$ nap – He égés a magban
- W Virginis: $P = 10\text{--}20$ nap – H vagy He héjégés, blue loop
- RV Tauri: $P > 20$ nap, alternáló mély és sekély minimumok – poszt AGB

– Anomális cefeidák (BL Boötis)

$P < 2$ nap, hasonlítanak az RR Lyrae csillagokra, de fényesebbek
 $m > 1$ naptömeg
tömegátadás kettősökben? (blue straglers?)

Klasszikus Cefeidák

3 pulzációs módusban,
illetve ezek keverékében
pulzálhatnak



LMC Soszynski et al. 2008, Aca, 58, 163

RV Taurik

A két egymást követő minimum nagyon eltérő mélységű lehet.

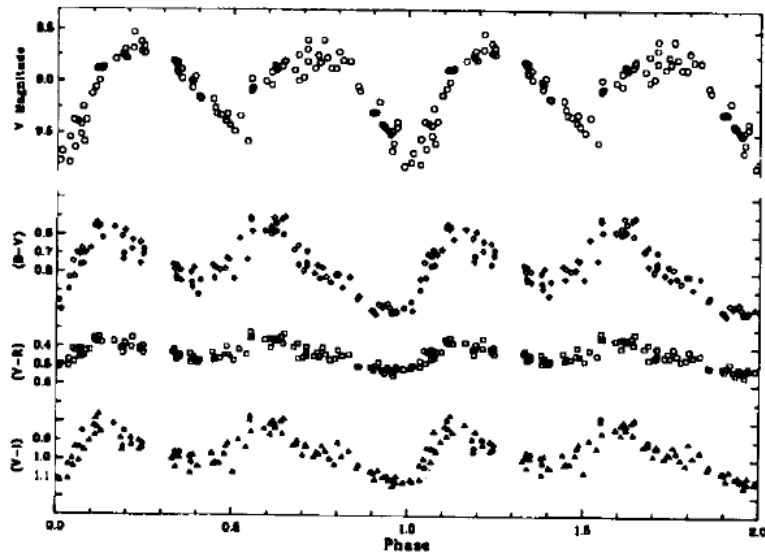


Figure 6. The phased V light and $(B-V)$, $(V-R)$ and $(V-I)$ colour curves for RU Cen. The period is 64.60 d.

Pollard et al. 1996, MNRAS, 279, 949

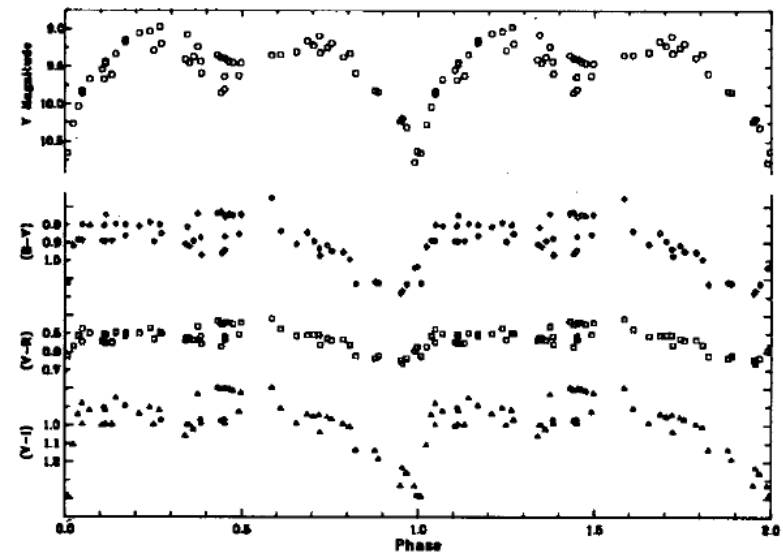


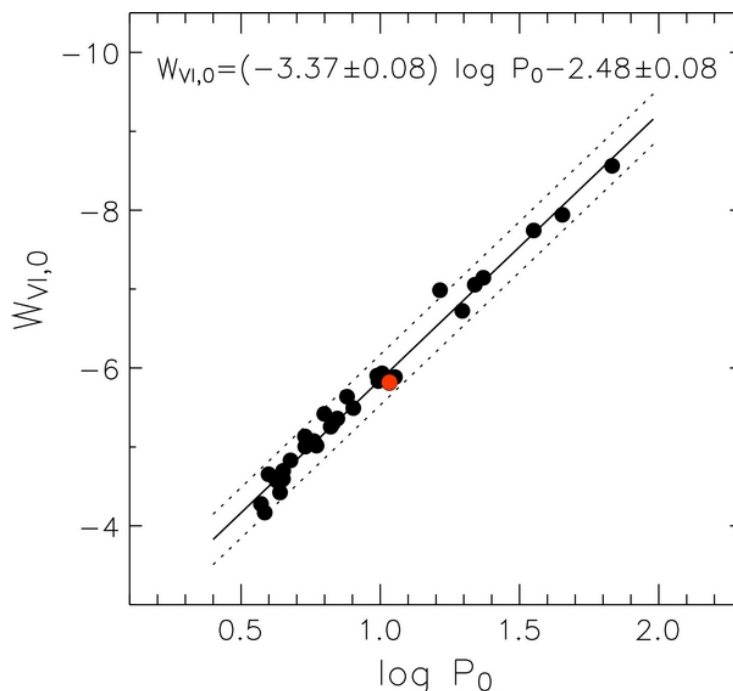
Figure 7. The phased V , $(B-V)$, $(V-R)$ and $(V-I)$ photometry for AR Sgr. The period is 88.86 d.

PL és PLC relációk

A cefeidák tudvalevőleg kitűnő távolságindikátorok, mivel fényesek, így ~30 Mpc-ig használhatóak 7-15% hibával. A luminozitásuk empirikus összefüggések felhasználásával egyszerűen a periódusuk és esetleg a színük alapján meghatározható.

Egy PLC (Period-Luminosity-Colour) reláció így néz ki:

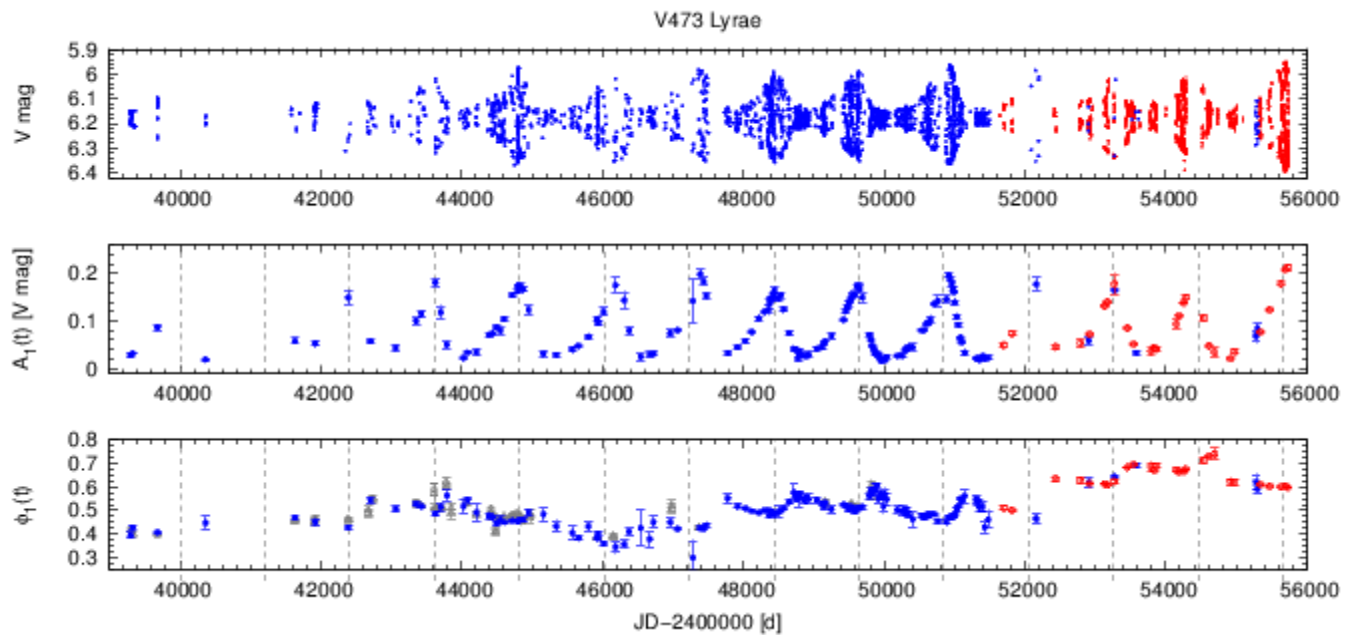
$$5 \log_{10} d = V + (3.37) \log_{10} P - (2.55)(V - I) + 7.48 .$$



Majaes et al. 2011, ApJL, 741, 27

Számos ilyen van, mindig javítgatják, felülvizsgálják, pontosítják őket. Ez itt pl. klasszikus cefeidák fundamentális módusára vonatkozik, de van a többire is külön-külön.

Blazhko-effektus



Molnár et al. 2013, AN, 334, 980

Petersen-diagram

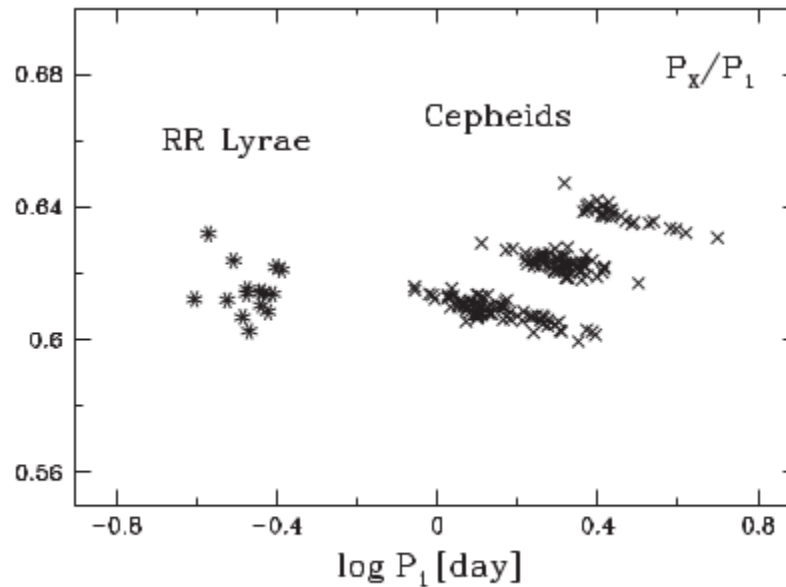


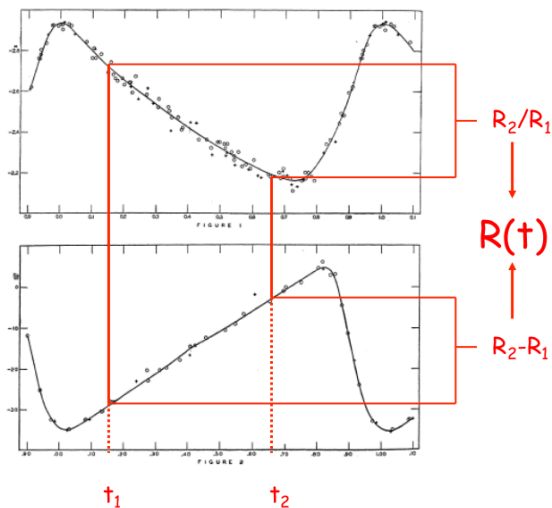
Figure 2. Petersen diagram for Cepheids and RR Lyrae-type stars with period ratio of $P_x/P_1 = 0.60 - 0.64$.

Moskalik et al. 2013, IAUS, 301, 249

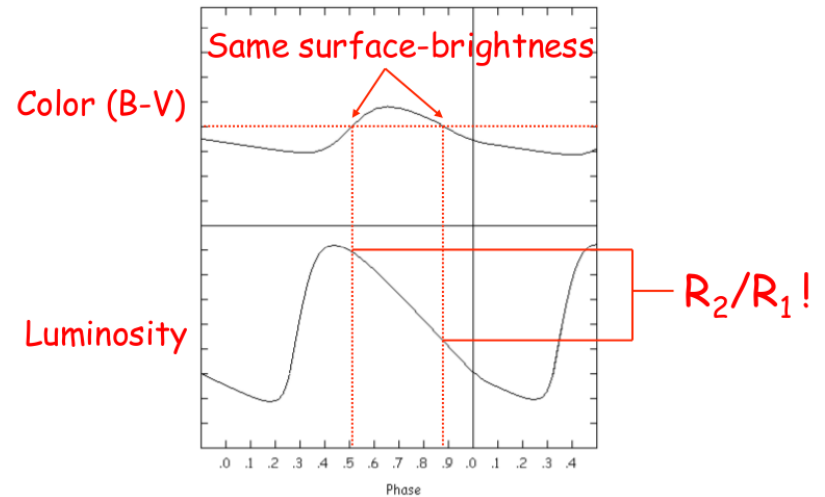
Baade–Wesselink-módszer

Megfigyelt szín → felszíni fényesség → felület → sugár tetszőleges skálán a fázis függvényében

Spektrum → radiális sebesség-görbe → integrálva: sugárváltozás
Szintúgy a fázis függvényében



Light and radial velocity curve of δ Cephei (Schwarzschild, M. 1938)



p (projection factor):

Radial velocity \neq Surface velocity

