

ŰRCSILLAGÁSZAT

ŰRFOTOMETRIA

Összeállította: Szabados László

Szegedi Tudományegyetem

2020

Az űrfotometria jelentősége

- Mikrováltozások kimutatása: pontosság milli- és mikromagnitúdó között;
- Bolygókeresés fedéssel. Föld-típusú bolygók keresése, exobolygók pályaperturbációjának kimutatásával is
- Megszakítás nélküli, hosszú adatsor: asztroszeizmológia (tömeg, belső szerkezet, összetétel);

De általában csak 1 (optikai) sávban mérnek (színindex nem ismert). Emiatt pedig kooperáció szükséges más távcsövekkel.

Olcsóbb más űrcsillagászati projekteknél: kis országok önálló projektje: MOST, CoRoT, de „sérülékeny” (MONS, Eddington).

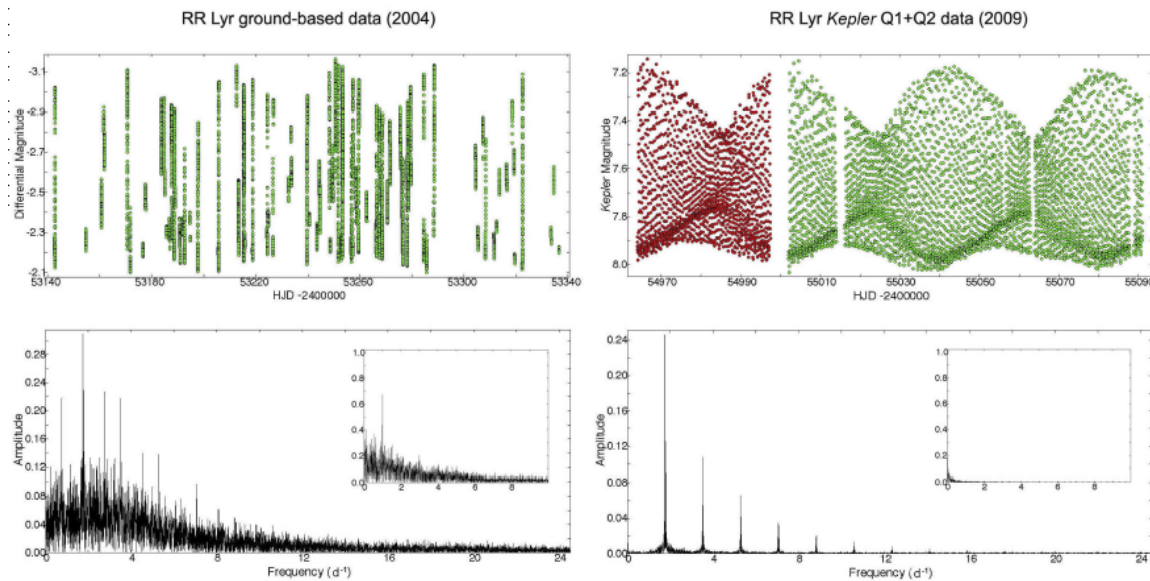
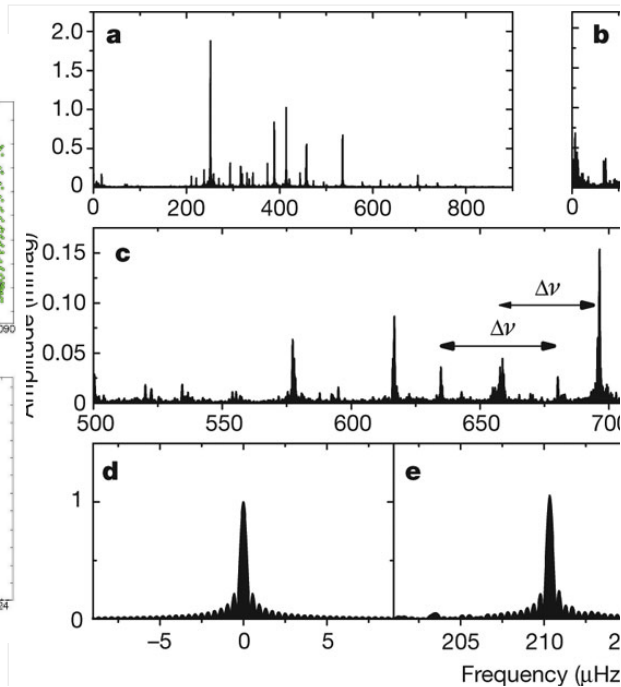


Figure 1: Fourier amplitude spectra of the Kepler light curve of HD 187547.



Fotometriát (is) végző űrtávcsövek

Név (időtartam)	Átmérő (cm)	Sáv (nm)	Megjegyzés
IUE (1978–1996)	45	széles	Fine Error Sensor, kalibrálatlan 0,03; vált.; vált.; UV színek készítése során
Hipparcos (1989–1993)	29	400–800 (<i>H_p</i>)	Tycho <i>B_T</i> : 350–500 nm; <i>V_T</i> : 460–600 nm 0,2; 30–380; 3 év; 118 000 (Tycho: $2,5 \times 10^6$)
HST (1990–)	240	460–700	Fine Guidance Sensor 0,001; vált.; vált.; több millió
WIRE (1999–2011)	5,2	<i>V + R_J</i>	csillagkövető 0,005; $> 10^3$; 21 nap; 200 fényes csillag
INTEGRAL (2002–)	5	Johnson <i>V</i>	Optical Monitoring Camera 0,04; vált.; vált.; $> 10^3$
Coriolis (2003–2011)	1,3	széles	a SMEI űrszondán 0,02; $> 10^3$; több év; a legfényesebb csillagok
MOST (2003–2014)	15	380–800	limitált mező (CVZ) 0,0001; $> 10^3$; legfeljebb 60 nap; 5000 fényes csillag
CoRoT (2006–2012)	27	350–1000	nagyon limitált mező 0,0001; $> 10^5$; fél év; 120 000
Kepler (2009–2013)	95	400–900	nagyon limitált mező 0,00003; $> 10^5$; 4 év; 150 000
BRITE (2013/2014–)	3	550–700 vagy 390–460	5 űrszonda: 3 kék, 2 vörös sávban 0,001; $> 10^3$; 30–180 nap; ~1000 fényes csillag
Gaia (2013–)	68	330–1050 (<i>G</i>)	<i>G_{B_P}</i> : 330–680 nm; <i>G_{R_P}</i> : 640–1050 nm 0,001–0,020; ~70; > 5 év; 1,6 milliárd csillag
K2 (2014–2018)	95	400–900	kis mezők az ekliptika mentén 0,0005; 10^5 ; 80 nap; 350 000
TESS (2018–)	4×10,5	600–1000	nagy látómező 0,0005; $> 10^4$; 27 nap; 200 000
CHEOPS (2019–)	30	400–1100	mérések 2020-tól 0,00002; n.a.; n.a.; exobolygók fényes gazdacsillagai

A megjegyzések
2. sorában szereplő
adatok:
- pontosság;
- észlelések száma
1-1 csillagra;
- az adatsor hossza;
- az észlelt csillagok
száma

Vannak fotometriai tárgyú cikkek az OAO–2 (1968–1973), a COBE (1989–1993), a Swift (2004–) és a STEREO (2006–) mérései alapján is.

Fotometriai űrprojektek összehasonlítása

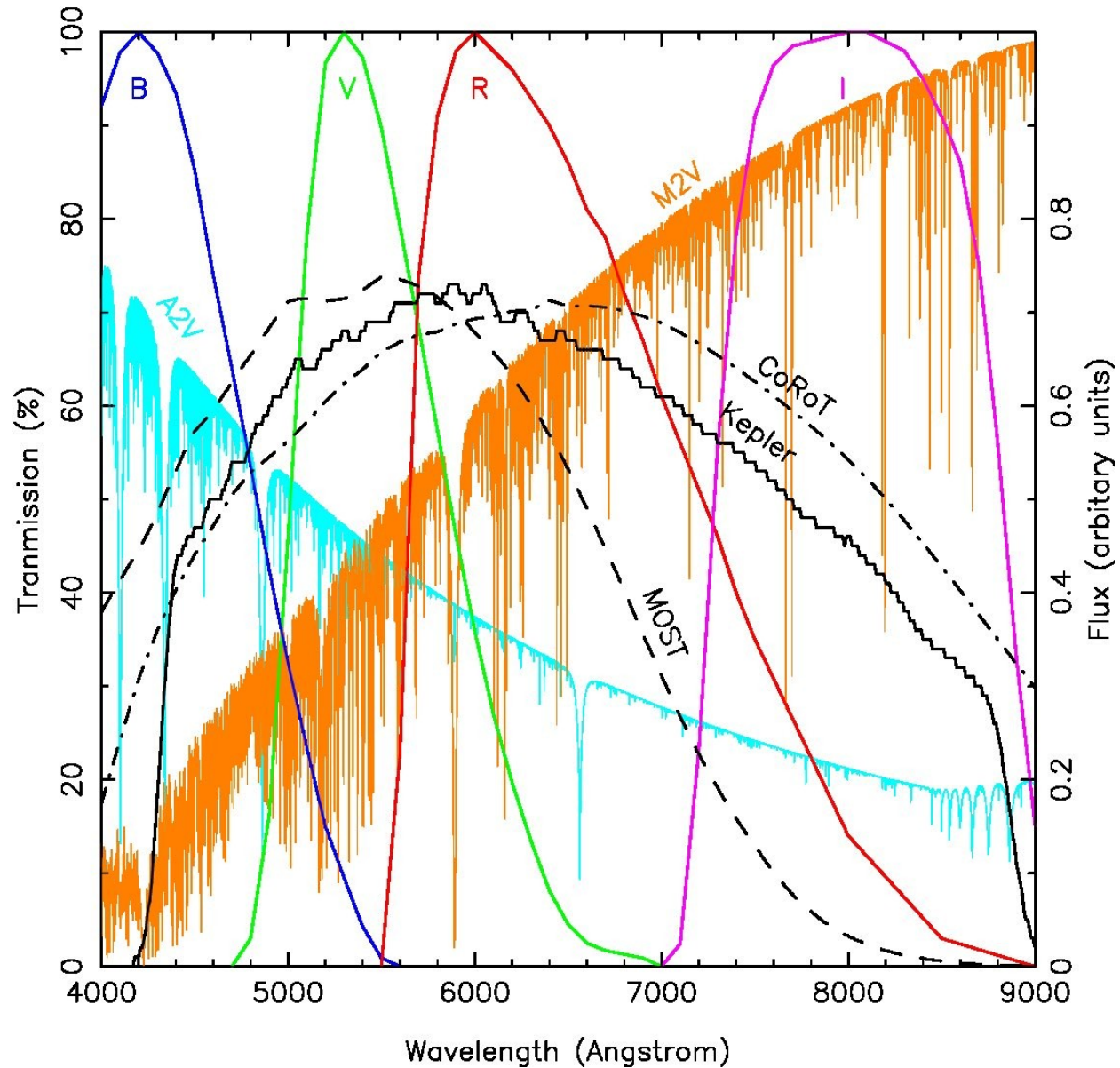
Table 1. Comparison among different past, current, and future space missions with asteroseismi

	MOST	CoRoT	<i>Kepler</i>	
			<i>Kepler</i>	K2
Mission years	≥ 13	6.5	4	≥ 4
Telescope aperture (cm)	15	27	95	
Orbit	Geocentric polar	Geocentric polar	Earth-trailing heliocentric	
Duty cycle (in %)	Variable	>90	>95	
Cadence	<1 min	32/512 s	59 s/29 min	
Pointing freedom	Free	Several fixed FOVs	Fixed FOV	Free
Sky coverage (in square degrees)	PIT ^b	<600	100	$\approx 80\%$ ecliptic plane

Notes. ^(a)Weak coverage for Dec in the range $[-6^\circ, 6^\circ]$. ^(b)PIT = pointing individual targets.

	BRITE	TESS	CHEOPS
	≥ 4	≥ 2	≥ 3.5
	5×3	4×10.5	32
	Geocentric low Earth	High Earth elliptical	Geocentric sun-synchronous
	Variable	>95	[60, 100]
	1 s	20 s/2/30 min	60 s
	Ecliptic plane	All sky monitoring	Free
	PIT ^b	Almost full ^a	PIT ^b

Fotometriai űrprojektek összehasonlítása



Az űrfotometria kezdetei

Nehezen indult el, mert az optikai tartomány a Földről is észlelhető. Először más célú űreszközökkel végeztek fotometriát.

VV Ori (B1V + B7V): az **OAO-2**-vel mérték (jobbra).

Fedési kettősök fontossága: pontos csillagtömeg és -sugár fénygörbe és rad.seb.-adatok alapján. (T_{eff} ismeretében luminozitás és távolság is.)

Voyager szondákkal spektrális méréseket végeztek fedési kettősökről.

β Lyrae: **OAO-2**-vel UV-fotometria 2 héten át (lent), + IUE + Voyager (spektr.)

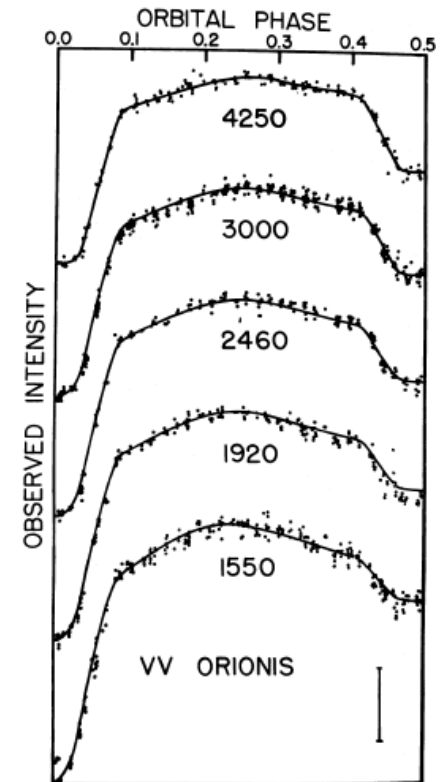
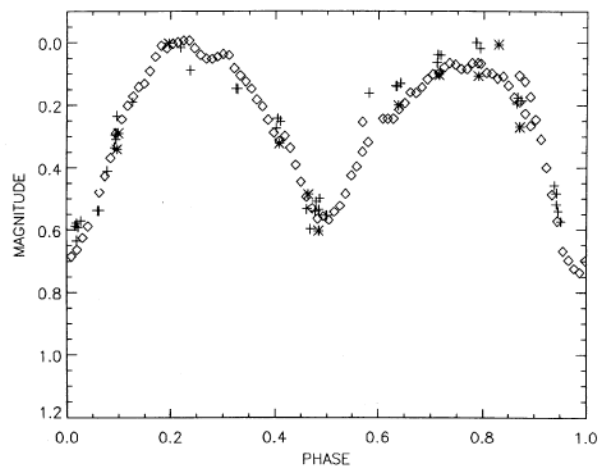
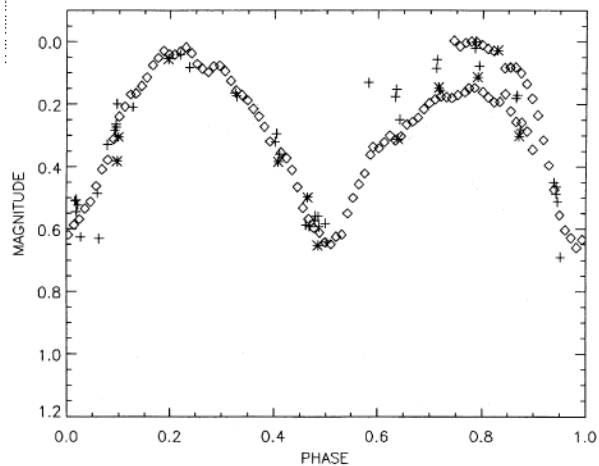


FIG. 2.—The best fit of the five OAO 2 light curves for VV Ori. The flux through the photometer, normalized to

Az űrfotometria kezdetei

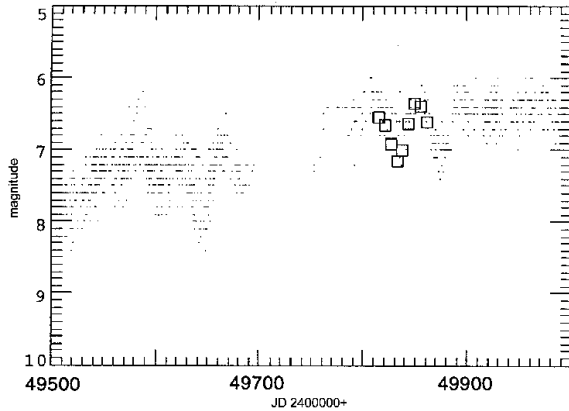
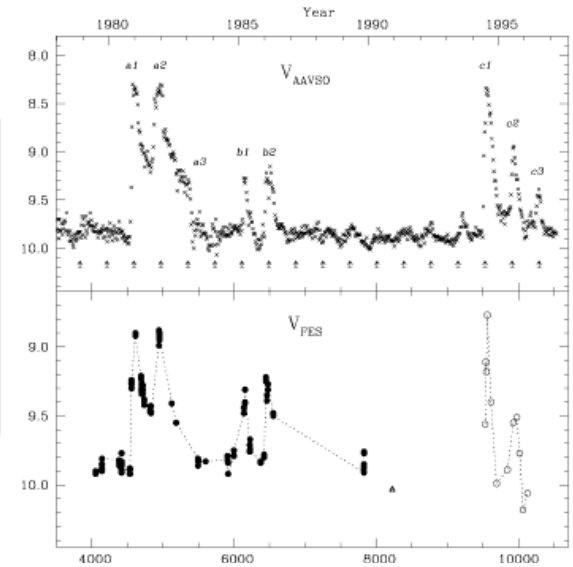
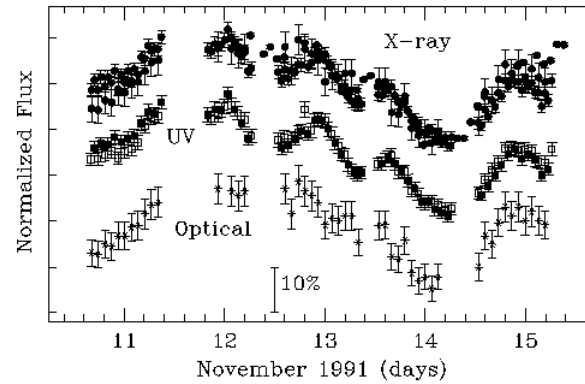


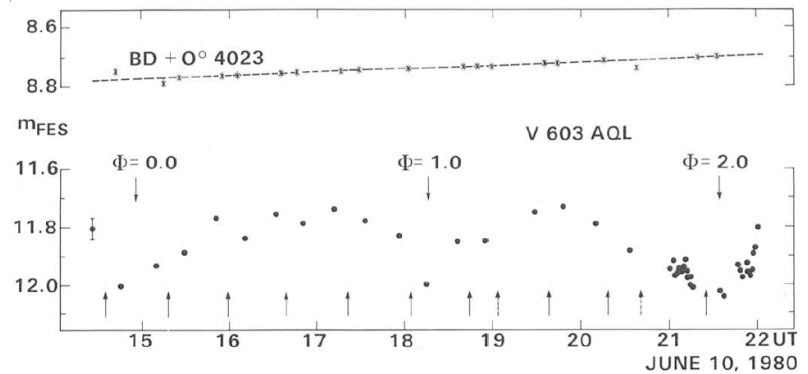
Figure 1. RY Sgr light curve from AAVSO visual observations (dots) and IUE's fine error sensor (squares). At the time of the IUE observations, the star appears to be almost fully recovered from its deep minimum of JD 2449160 to JD 24492270.



IUE (1978–1995): FES (helyzetérzékelő), de nem volt kalibrálva a fotometriai rendszer, és nem volt stabil, viszont jól mutatta az űrfotometriában rejlő lehetőséget.

IUE-vel 300 fedési kettősről van fénygörbe (de az időbeli mintavételezés nem jó)

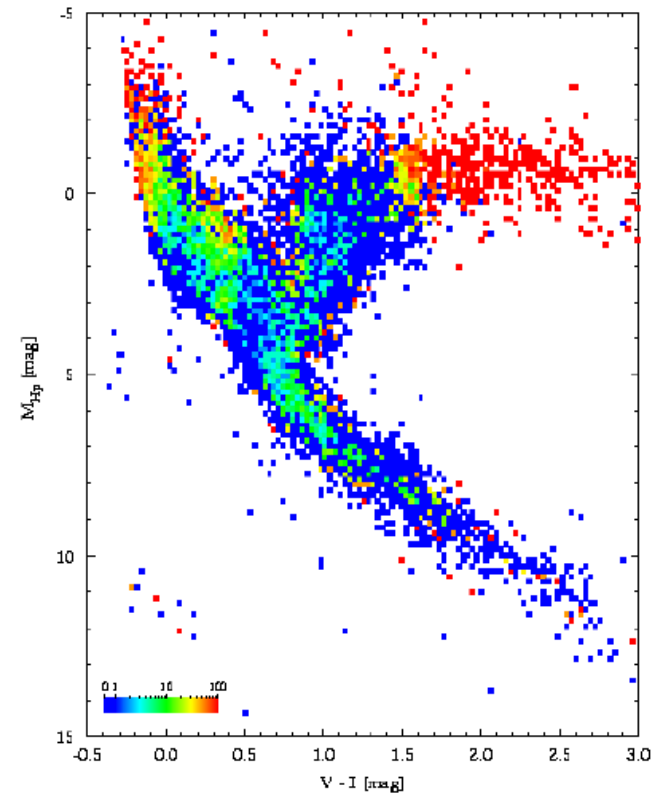
Fent: RY Sgr, kvazár, AG Dra (szimbiotikus, K3III); jobbra: V603 Aql (nóva+EB)



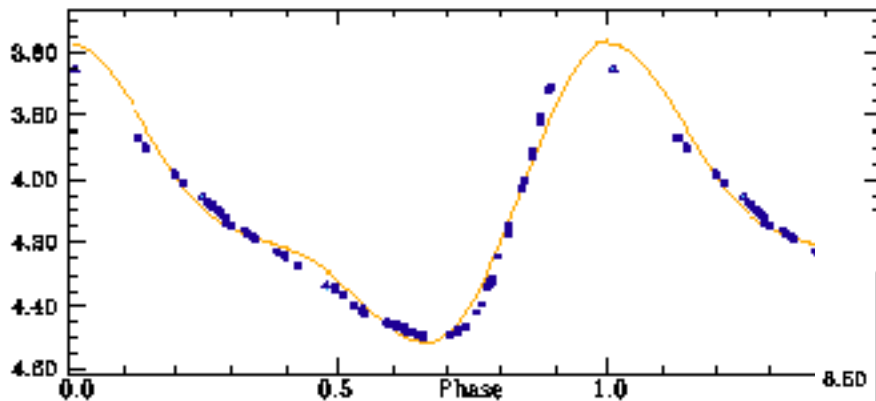
Hipparcos

1989–1993 között működött, de az idősor mintavételezése az asztrometria céljaihoz volt igazítva. 11597 változócsillag (>8000 új) a 118218 programcsillag között. Még fényes cefeidákat is talált és rengeteg SPB-csillagot (periódus 1 naphoz közeli).

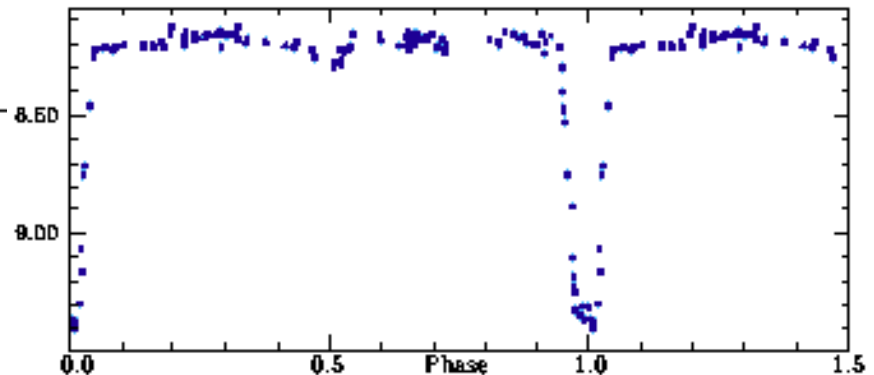
Tycho projekt: B-V adatok is, az újraredukálás után 2,5 millió csillagra.



HIP 110991



HIP 64293



Hipparcos

Waelkens et al. (1998):

267 újonnan felfedezett B-csillag:

- 4 β Cep,
- 72 SPB,
- 34 változó CP,
- 32 szuperóriás α Cyg,
- 7 változó Be,
- 7 fedési,
- 17 nem klasszifikálható.

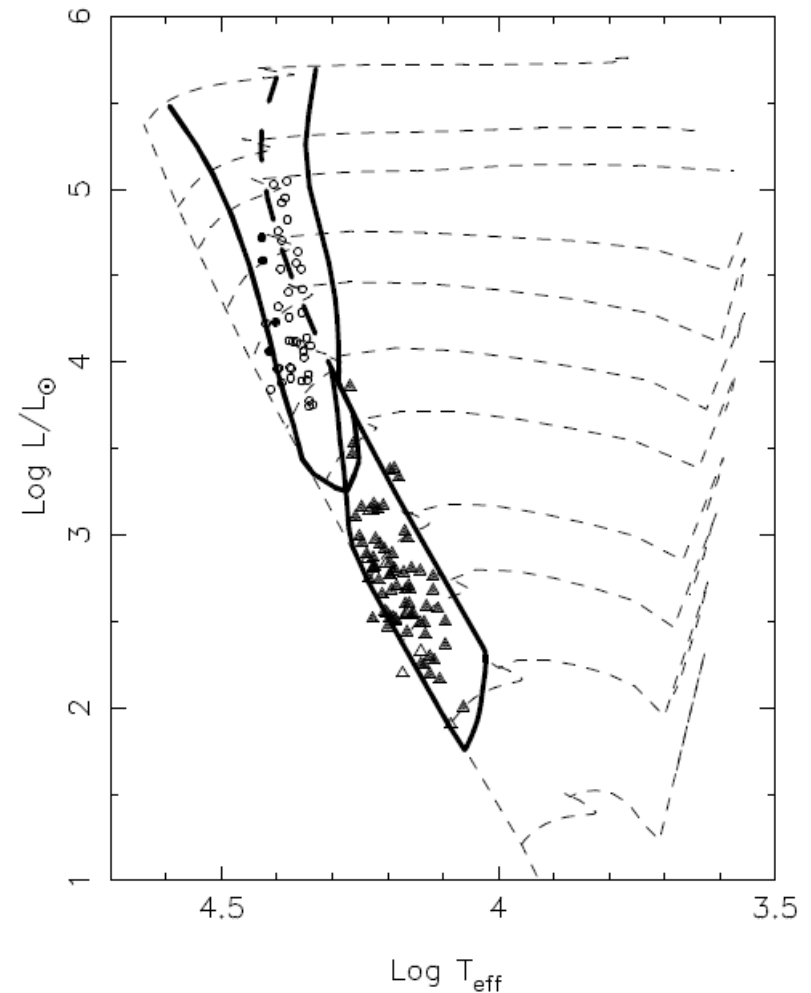


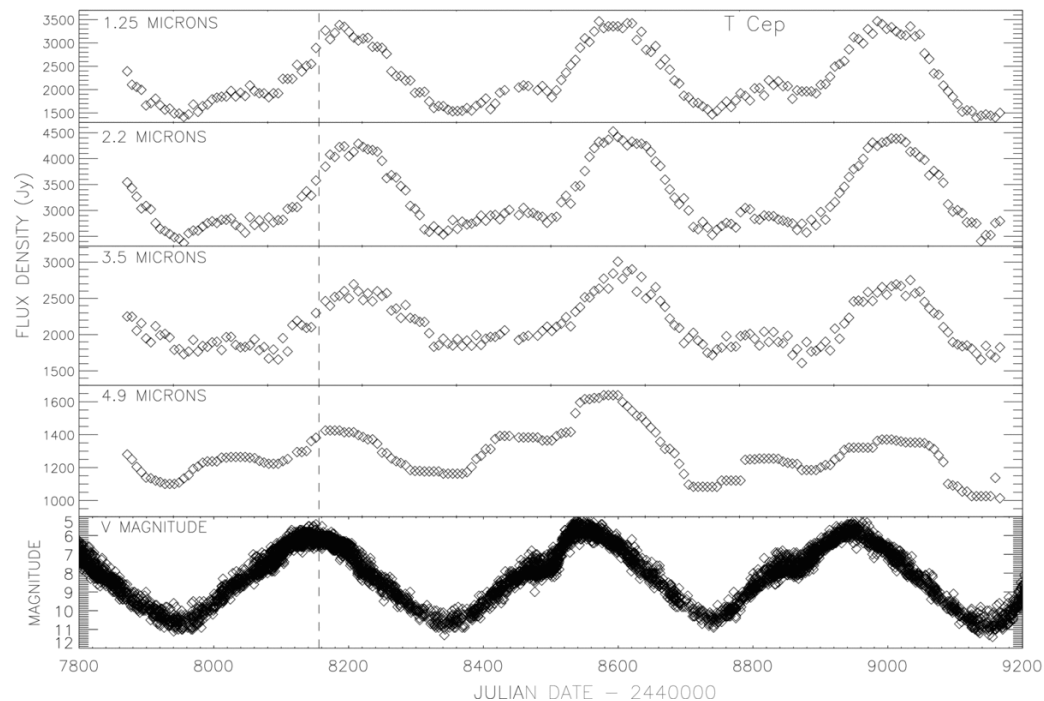
Fig. 1. Position of the β Cephei stars and SPBs in the HR diagram (circles: β Cephei stars, triangles: SPBs). The previously known variables are indicated by the open symbols while the variables discovered by Hipparcos are denoted by the filled symbols. The instability strips were

Fotometria a COBE szondával

COBE (1989-ben indították): 10 hónapig mért hűtött műszerekkel
+ 2,75 év meleg üzemmód = 3,6 éves idősor az archivált adatokban.

2652 csillag közeli-IR fluxusát mérték ki a DIRBE (Diffuse Infrared Background Experiment) adataiból. Vörös óriás és AGB-csillagok körüli burok viselkedése, fáziskülönbség az optikai és az infravörös fénygörbe között.

Példa: T Cephei (2010-ben, azaz két évtizeddel a mérés után megjelent cikk).



Fotometria a HST-vel

Hubble-űrtávcső (1990–): volt rajta gyorsfotométer (HSP) optikai és UV fotometriára, de a COSTAR miatt feláldozták.

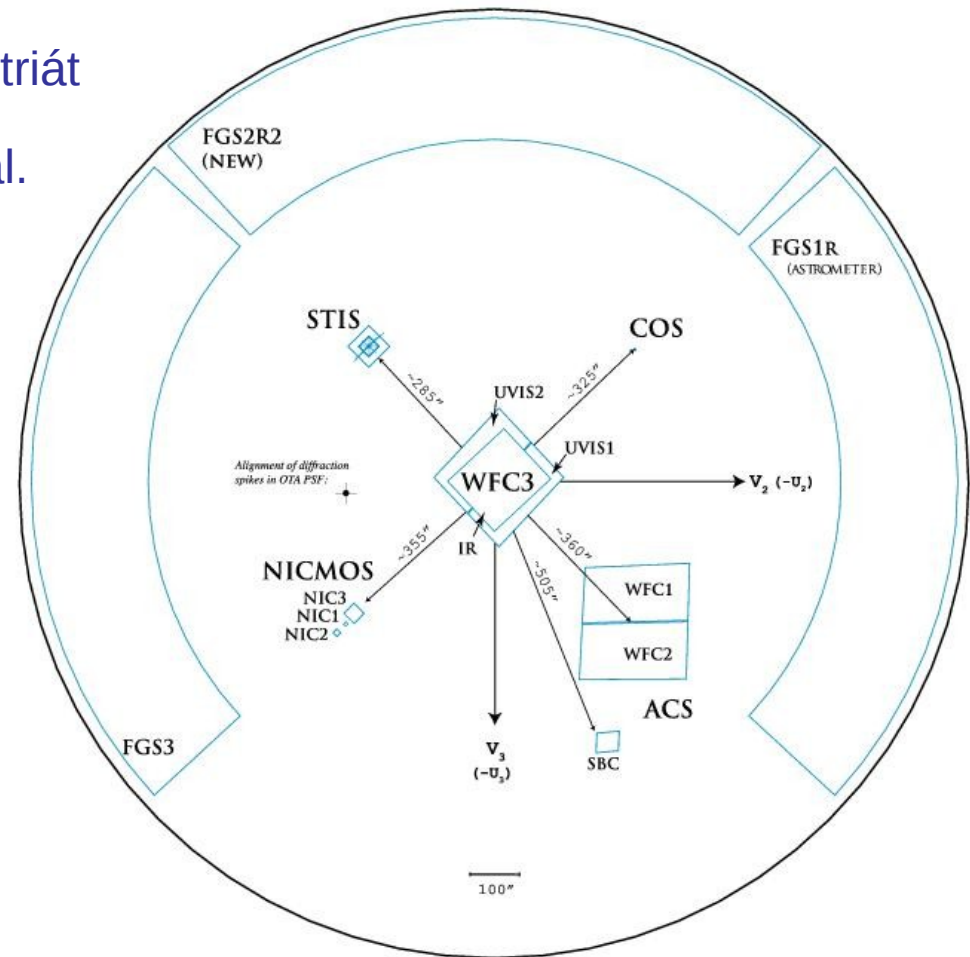
Az FGS lényegében gyorsfotometriát végez a GSC kiválasztott csillagairól 25 ms integrálással. A 3 FGS-ből legalább kettő folyamatosan működik.

A pontosság jobb 0,001 magnitúdónál.

Minden adat archiválva van.

Adatbányászattal új változócsillagok, de a GSC-ben nincs asztrofizikai információ (színindex, spektráltípus). A fénygörbe nem mindig elég a típusba soroláshoz.

Sőt a képek fotometriai célból is kiértékelhetők .



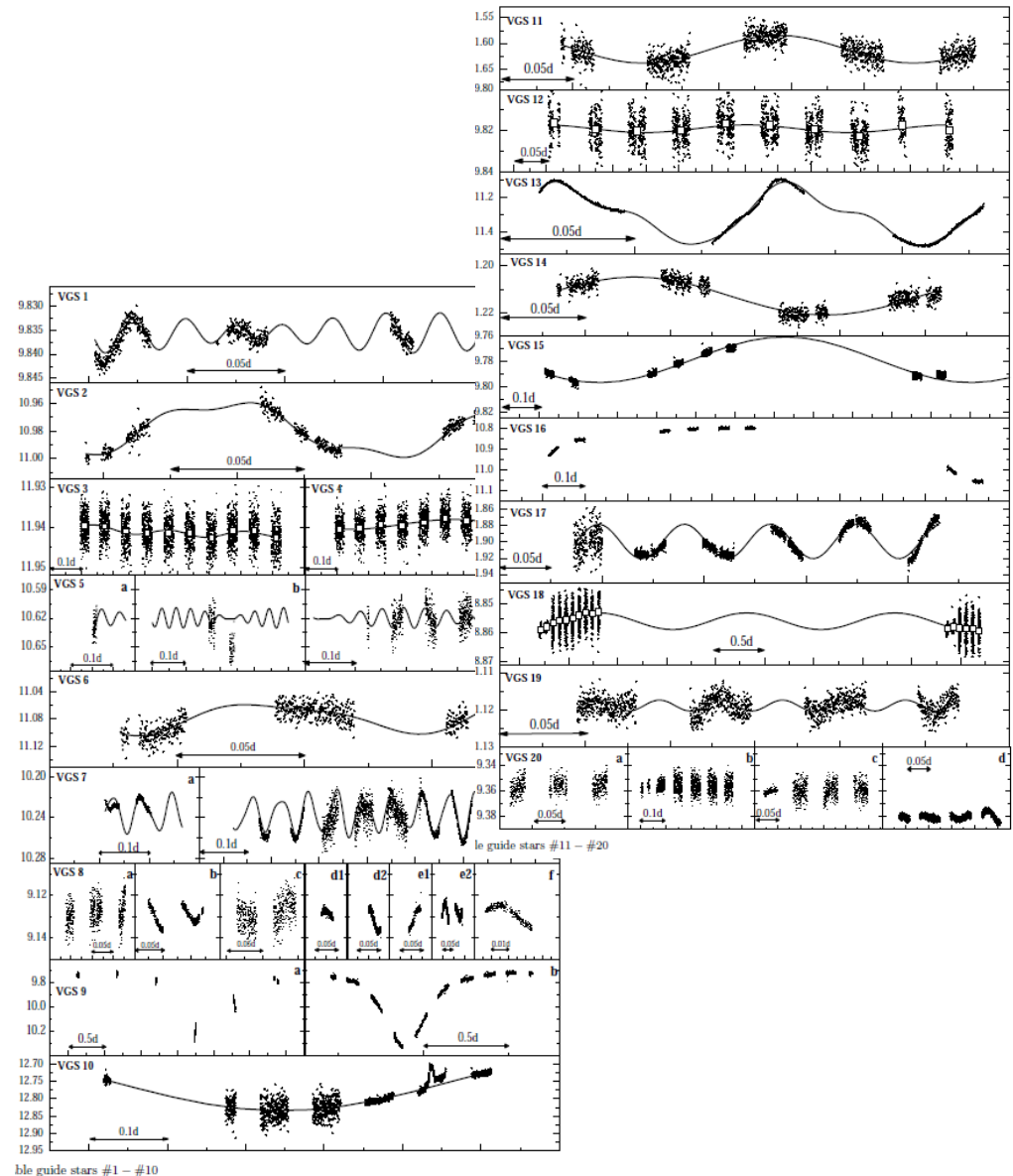
Fotometria a HST-vel

Találomra választott 5000 csillag 18%-a változik. Sok δ Sct és fedési változó, és a K-óriások között is sok változócsillag (nem a forgási periódussal).

A fotometriát meghamisító tényezőket ki kell szűrni:

- A műszert zavarja a dél-atlanti anomália (az idő 15%-ában);
- A Föld szórt fénye (600 km-re a felszíntől!).

Ezek hatását a HDF-N 10 napos folyamatos észlelése alapján mérték ki.



Fotometria a HST műszereivel

Exobolygó-fedési fénygörbe: HD 189733b: $P=2,218583$ nap; az ACS-sel észlelt fénygörbe finomszerkezete alapján hold és gyűrű léte kizárható; az átlagos fedési fénygörbétől való eltérést csillagfoltok okozzák.

Aktív változócsillag

V452 Vul néven,

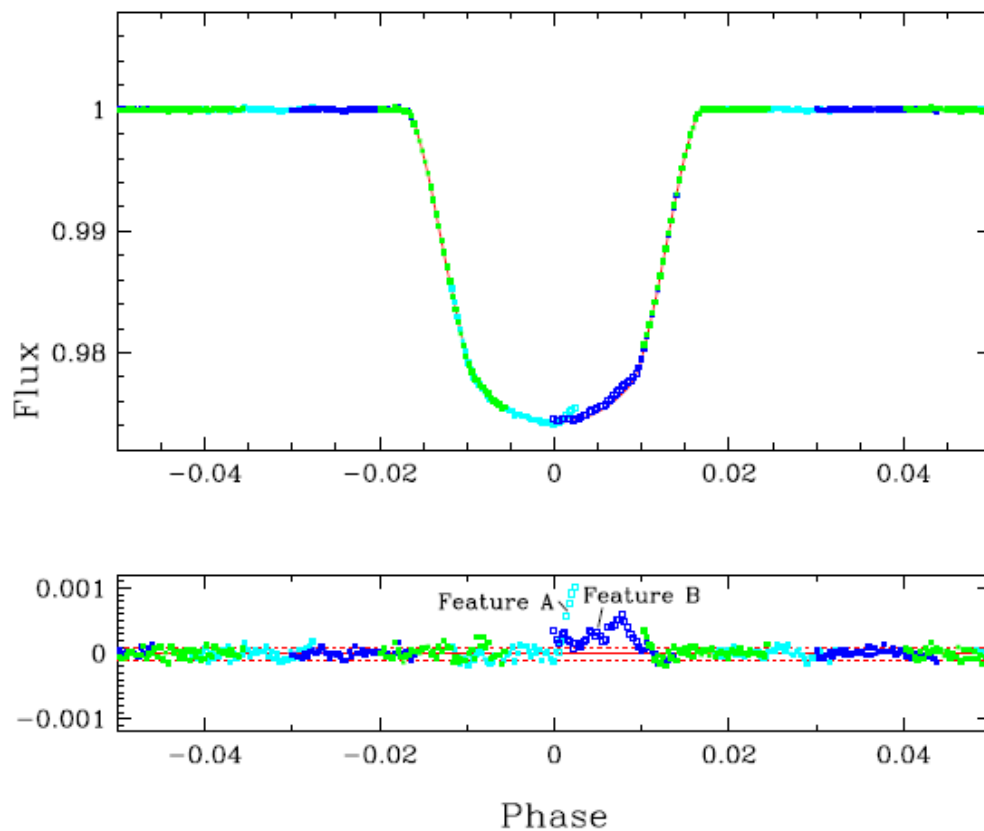
röntgenaktivitását

az Exosat és a ROSAT is észlelte.

Korábban észlelt foltok alapján $P_{\text{rot}}=13,4$ nap.

Az újabban végzett MOST-fotometria alapján viszont 11,8 nap.

Az eltérés a foltok migrációjának hatása lehet.



Fotometria a HST műszereivel

Kétféle fotometriai program:

- idősor-fotometria egy vagy több objektumra,
- a teljes látómező pontos fotometriája.

Csillagok tömeges fotometriája alapján (főleg az ACS-sel):

- szín-fényesség diagram finomszerkezete;
- populációk eloszlása gömbhalmazokban és extragalaxisokban (eltérő fémtartalmú csillagnemzedékek; előtér- és háttércsillagok megbízható kizárása); a gömbhalmazok csillagpopulációiban nemcsak a fémtartalom eltérő, hanem a He-tartalom is (meglepő).

Az ω Cen fősorozata 2 párhuzamos sávra hasad: 2 csillagképződési epizód volt;

NGC 2808: fősorozata 3 párhuzamos sáv;

NGC 1851: szubóriás ága kettős (0,12 magnitúdó különbséggel). A horizontális ágon kék és vörös populáció lesz majd. A fényesebbikből lesz a vörös (normális kémiai összetétel), a halványabbakban C- és N-többlet, s-folyamat során kialakuló elemek többlete (10-100 millió évvel fiatalabbak).

A felbontható galaxisokban vizsgálható a csillagkeletkezés története és a halmazok kezdeti tömegfüggvénye (pl. Magellán-felhők).

Az eddigiek tanulsága + a véletlen szerepe

Érdemes megfelelő tervezésű (távcső, detektor, pálya) fotometriai űrszondákat készíteni. MOST, MONS, CoRoT egy időben indult projektek, később az Eddington, de részben elbuktak. Ezek előtt a véletlen és Derek Buzasi ötlete segített.

WIRE (Wide Field Infrared Explorer):

1999. III. 4: infravörös-szonda csillagontó galaxisok vizsgálatára. A kamerát hűtő cseppfolyós hidrogén napok alatt elillant. 1999 májusától a csillagkövetővel (52 mm \varnothing + 512×512 [27 μ m] pixel) fényes csillagok fotometriája (V+R sávra érzékeny, 1 pixel \approx 1 ívperc). Földi távcsővel ráadásul nem is észlelnék ilyen fényes csillagokat.

Napszinkron pálya, 96 perces keringési periódussal. (2006-ra 93 perc lett). (2011. V.: a légkörbe érve megsemmisült, de csak 250 kg volt.)

A napelemek helyzete miatt a Nap–Föld irányra merőleges kb. 30 fokos sáv volt észlelhető. Az idő 30-40%-át használták ki (szoftvermódosítás után).

1999–2000-ben észleltek, majd támogatás híján szünet, és csak 2003. decembertől folytatták, pedig kezdettől rengeteg érdekes eredmény született (kooperációban más földi és űrtávcsövekkel).

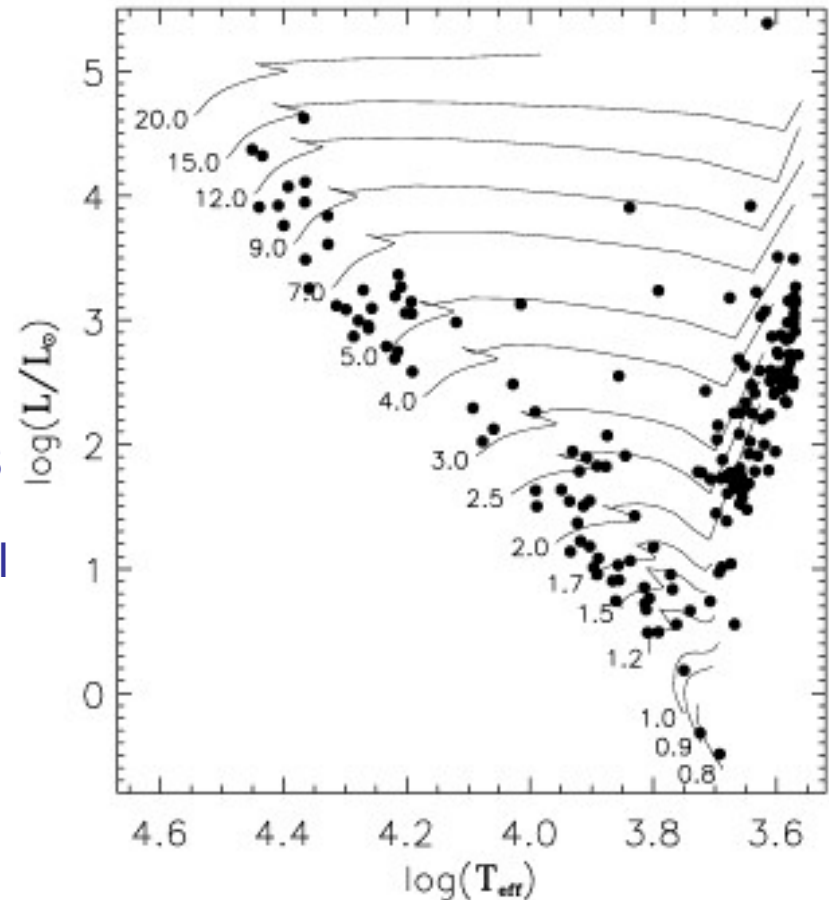
WIRE

Az első két évben a látómező elfordult a CCD-képen, nehezítve a másodlagos forrásokról kapott adatok kiértékelését (flat-field képet nem lehetett készíteni).

2003. XI.-tól más észlelési mód, a másodlagos célpontok is mozdulatlanok a CCD-képen. A látómezőben 4 másodlagos célpont észlelhető, a fő programcsillaghoz kell igazodni. A fedélzeti számítógép választott a látszó fényesség alapján (8 négyzetfokos látómező). A pontosan vizsgált források száma néhány tucatról 200 fölé nőtt.

A jobb frekvenciafelbontás (hegyesebb csúcsok) érdekében néhány többmódusú pulzátort fél év elteltével újra mértek.

IR-holdként 4 hónapig működött volna. Így 2 ciklusban majdnem 8 évig mértek vele. (1999. V.–2000. IX., 2003. XII.–2006. X.)



re 2: Hertzsprung-Russell diagram of about 200 stars observed with WIRE.

A WIRE eredményeiből

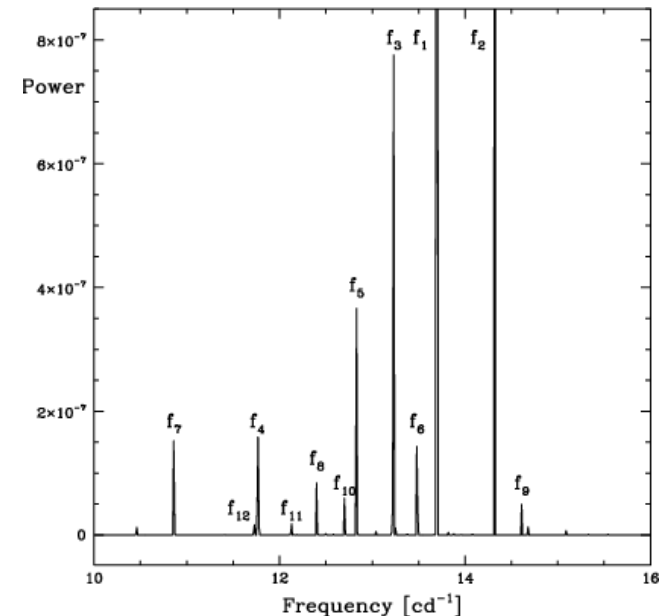
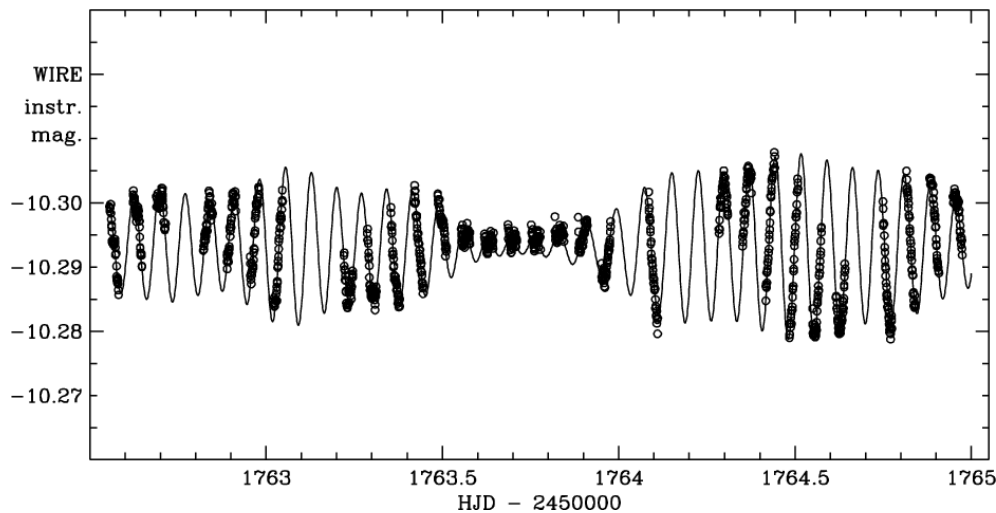
Nap-típusú csillagok oszcillációi (jellemzői: kis amplitúdó, rövid élettartam, módusfrekvenciák fésűfogszerű eloszlása állandó értékű felhasadással)

α Cen (Rigel Kentaurus, G2V): 50 napos adatsor, fésűszerű teljesítmény-színkép, p-módusú oszcillációk (v_{rad} -észlelésekkel utóbb megerősítve, 40 módus); a módusok élettartama kb. 2,5 nap.

β Hyi (G2IV): már elfejlődött a fősorozatról, de fésűfogas a teljesítményszínképe, kb. 4 napos módusélettartammal.

δ Scuti típusú változócsillagok: radiális + több nem radiális módus kis amplitúdóval, jellemzően mikrováltozók.

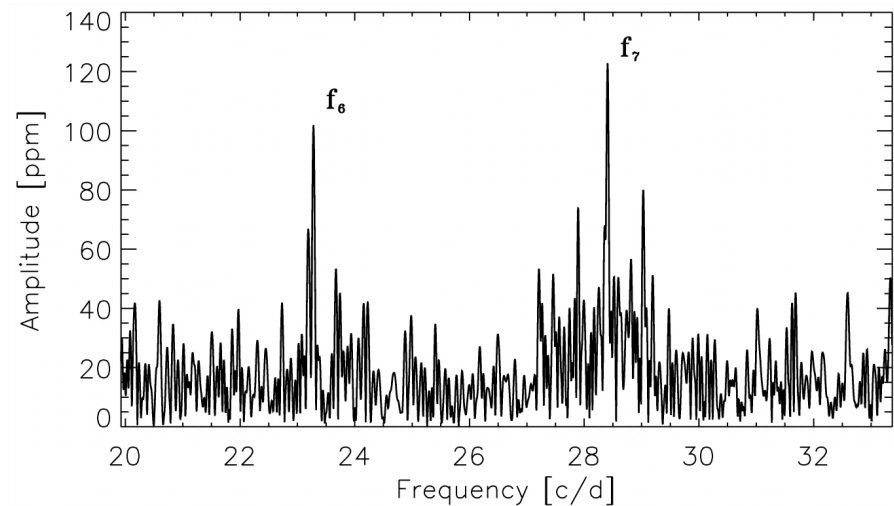
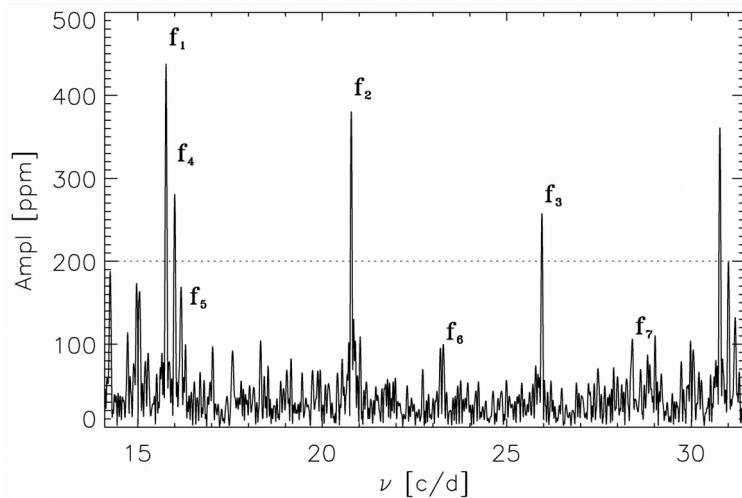
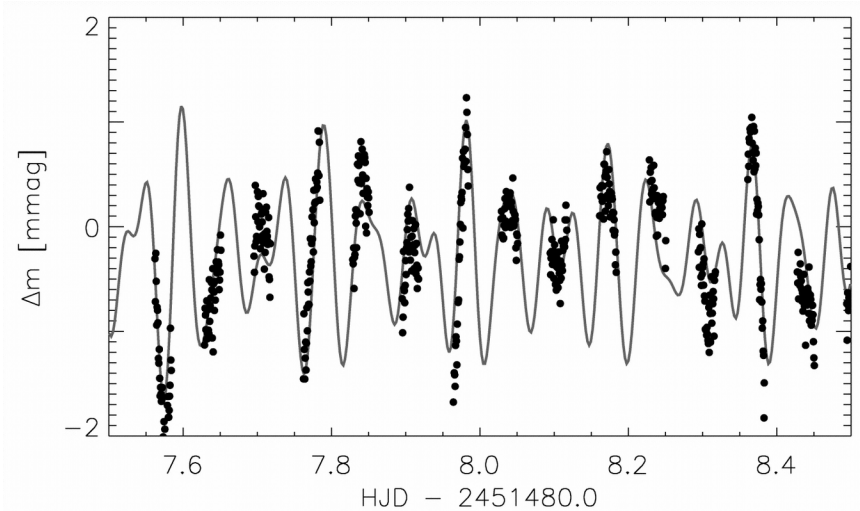
θ^2 Tauri (A7III + kísérő): 2000-ben 20 napon át 1 millió adat; 12 frekvencia, összhangban a földi kampány eredményeivel, spektroszkópai kettős, keringési periódusa 140,7 nap.



A WIRE eredményeiből

A nagyon fényes csillagok földi távcsövekkel nehezen vagy nem észlelhetők (fotometrálni 40–100 cm-es távcsövekkel szoktak).

Altair (A7IV-V) a legfényesebb DSCT-csillag lett ($V=0,75$, a 12. legfényesebb csillag). 1999-ben 1 hónapig mérték, és 7 frekvenciát találtak 0,1–0,5 mmag közötti amplitúdóval.



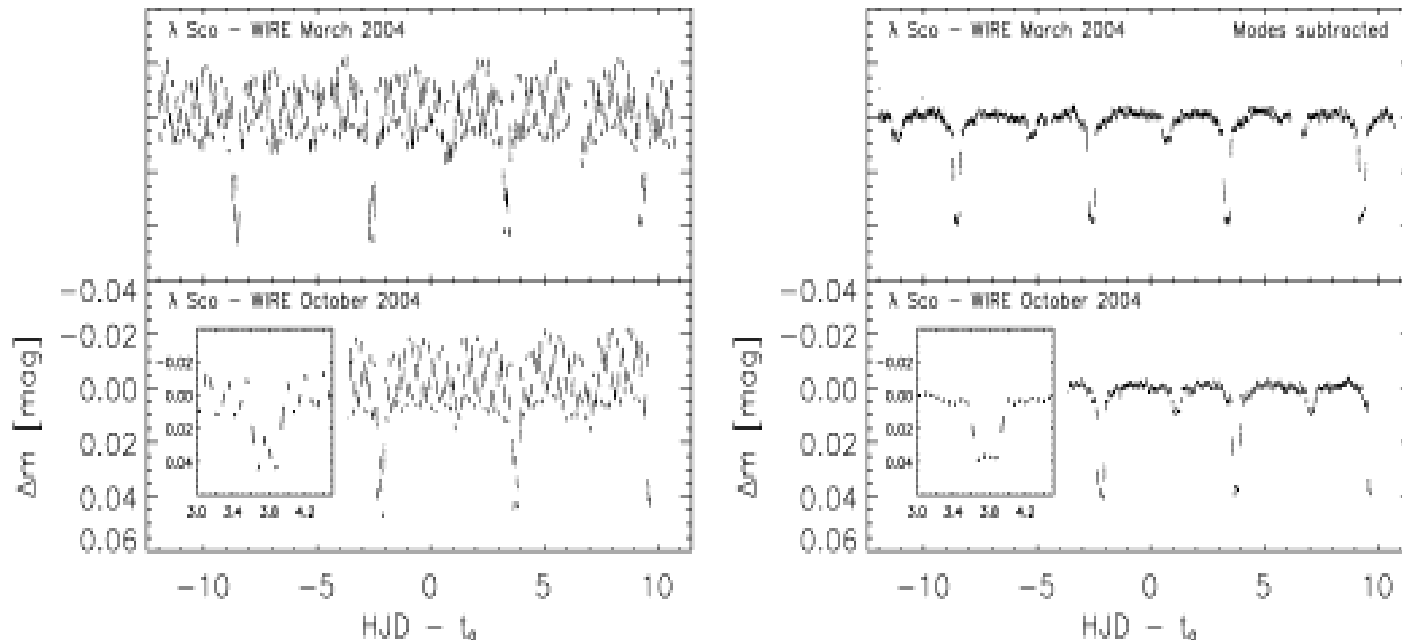
A WIRE eredményeiből

B típusú csillagok: 30-nál több B CEP és SPB-csillagot észleltek a WIRE-rel.

β Cru (Mimosa, B0,5IV): a spektrum alapján talált változását fotometriával megerősítették + 4 további módust találtak 0,2-0,3 mmag amplitúdóval.

κ Sco (Girtab, B1,5III): ismert többperiódusos B CEP volt, de újabb kis amplitúdójú módusokat fedeztek fel.

λ Sco (Shaula, B2IV): az 1083 napos SB egyik komponense B CEP csillag. A pulzációt levonva fedési változás is előtűnt, tehát hármas rendszer. A komponensek tömege és sugara is kiszámítható.



A WIRE eredményeiből

Fedési fénygöréből a komponensek fizikai tulajdonságainak meghatározása
 ψ Cen (A0IV): fedések felfedezése + SMEI 2 évnyi adatsora a periódus-
meghatározáshoz; B9+A2, $P=38,813$ nap; a relatív sugarak 0,1% pontosak.
A főcsillagban g-módusú oszcillációt is találtak, pedig kissé hidegebb, mint
az SPB-csillagok instabilitási sávjának jobb széle.

β Aur (Menkalinan, A2IV): az addig kapott legpontosabb fénygörbe
szétválasztott kettőscsillagra; a szélsőtétedési törvényt is vizsgálni tudták.

$$R_1 = 2,762 \pm 0,017 R_{\text{Nap}} ; M_1 = 2,376 \pm 0,027 M_{\text{Nap}}$$

$$R_2 = 2,568 \pm 0,017 R_{\text{Nap}} ; M_2 = 2,291 \pm 0,027 M_{\text{Nap}}$$

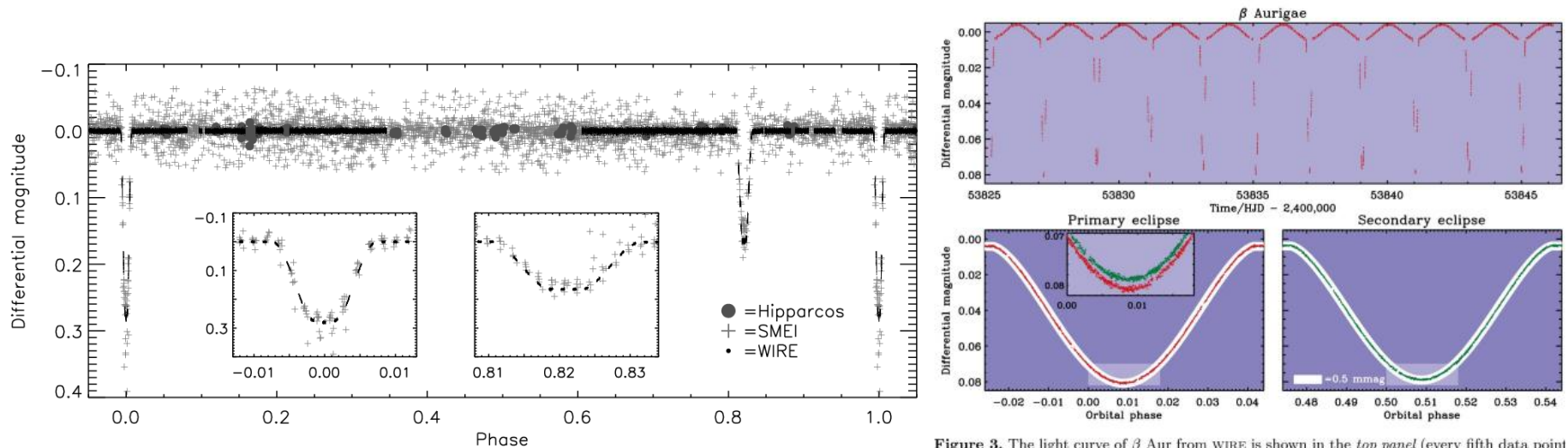


Figure 3. The light curve of β Aur from WIRE is shown in the *top panel* (every fifth data point is plotted). The *bottom panels* show the phased light curve around the primary and secondary eclipses. The slight difference in the depths of the primary and secondary eclipses is seen in the inset in the *bottom left panel*.

Az INTEGRAL OMC mérési adatai

INTEGRAL: ESA-szonda
2002-től.

OMC: Optical Monitoring
Camera.

V=18 magnitúdónál
fényesebb 70000
pontforrás fénygörbéje;
5263 forrás bizonyult
változónak (sok ismert
változócsillag, de eddig
téves periódussal).

J. Alfonso-Garzón et al.: The first INTEGRAL-OMC catalogue of optically variable sources

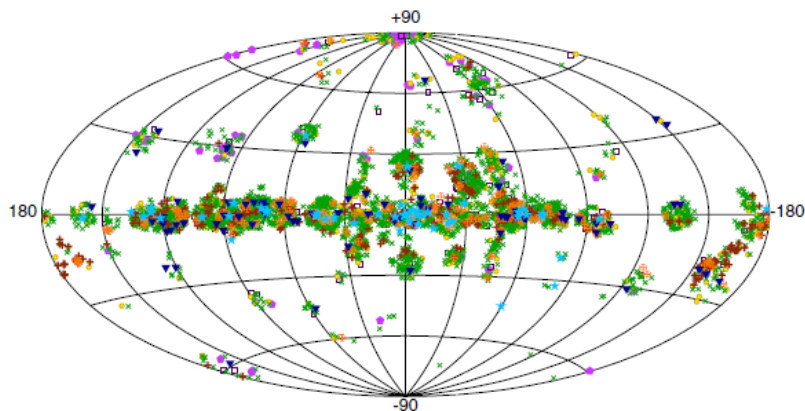
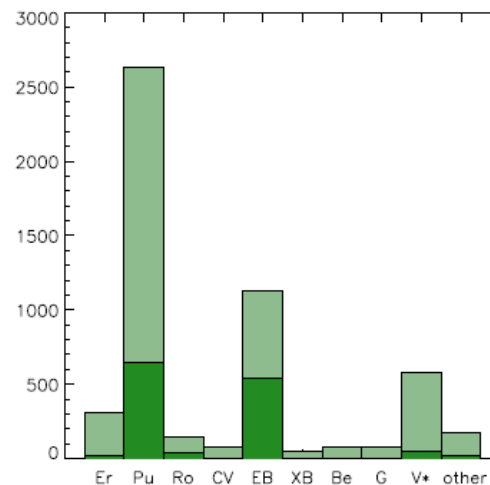
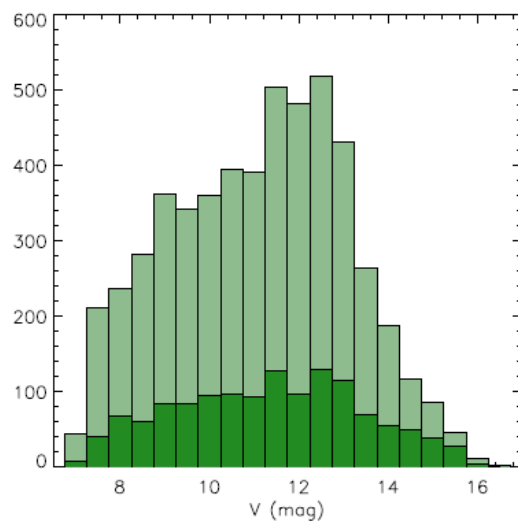
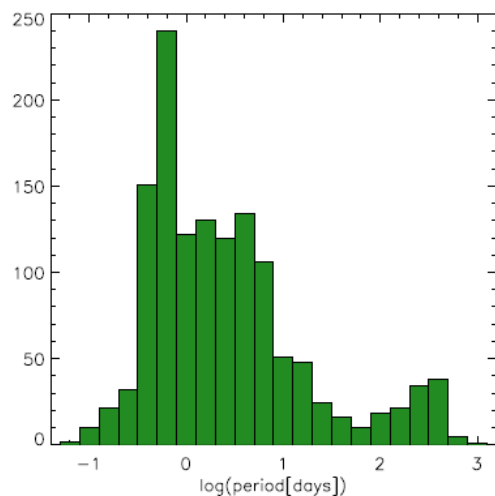


Fig. 6. Distribution in galactic coordinates of all the sources in the catalogue. The green crosses represent pulsating stars, the red filled points correspond to eclipsing binaries, the brown pluses are eruptive stars, the orange complex pluses represent rotating stars, the inverted dark blue filled triangles represent cataclysmic variables, the light blue filled stars are X-ray binaries, the yellow filled points correspond to objects simply classified as variable stars, the purple filled pentagons represent extragalactic objects and the empty purple squares are other types of objects.

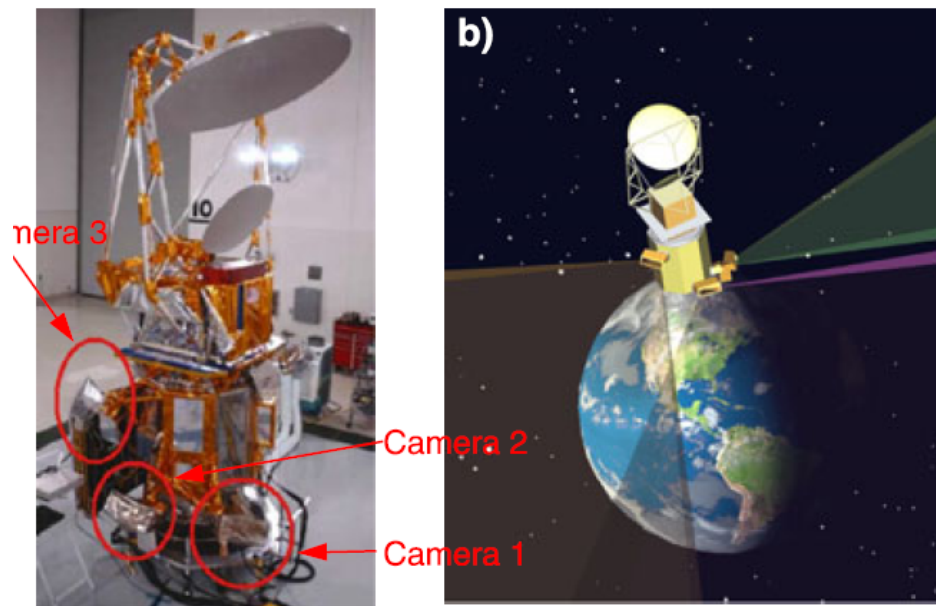


SMEI a Coriolis szondán

SMEI: Solar Mass Ejection Imager, koronakitörések gázanyagának követése képalkotással. A US Air Force által 2003. jan. 2-án felbocsátott Coriolis légkörkutató szondán Titan-2 rakétával 830 km magasra juttatott, poláris napszinkron pályán, 101 perces periódussal keringő szonda. 2011 őszén deaktiválták.

A SMEI-n 3 kamera volt, egyenként 60×3 fokos látómezővel. 170×3 fokos csíkot észlelt. Minden keringés alatt végigészlelte a teljes eget. A fényes csillagokról 0,01-0,001 magnitúdó pontosságú fotometriai adat.

A változócsillagászat számára előnye a több év hosszú adatsor (a WIRE adatai rövid időszakot fognak át).



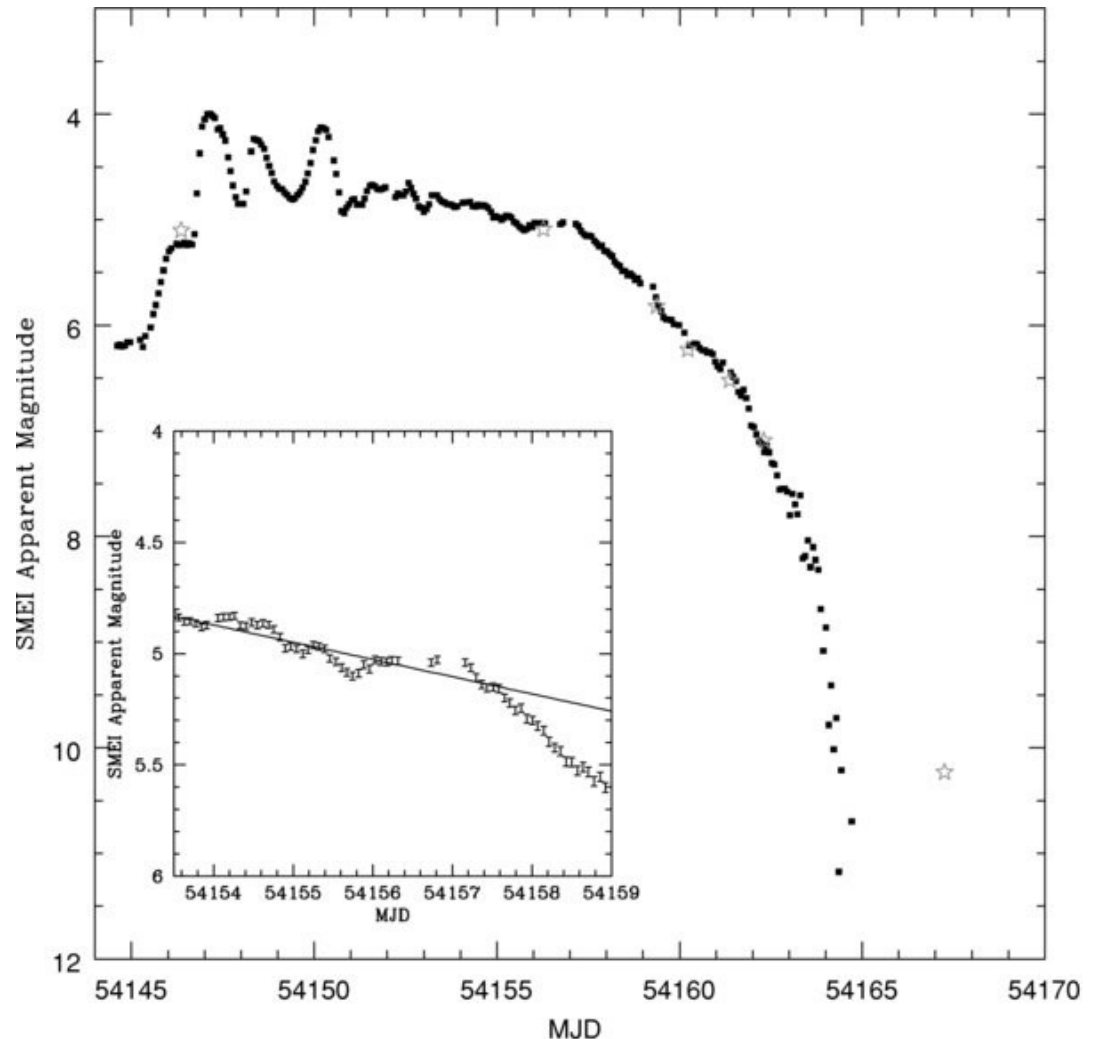
SMEI a Coriolis szondán

Példák a SMEI fotometriai adatai alapján elért eredményekre:

Arcturus (K1.5III): G-K óriásokra jellemzőek a konvekció által sztochasztikusan gerjesztett oszcillációk. Radiális p-módusú rezgés, $3,45 \pm 0,03 \mu\text{Hz}$ erős módus $21,7 \pm 0,5$ napos csillapodási idővel.

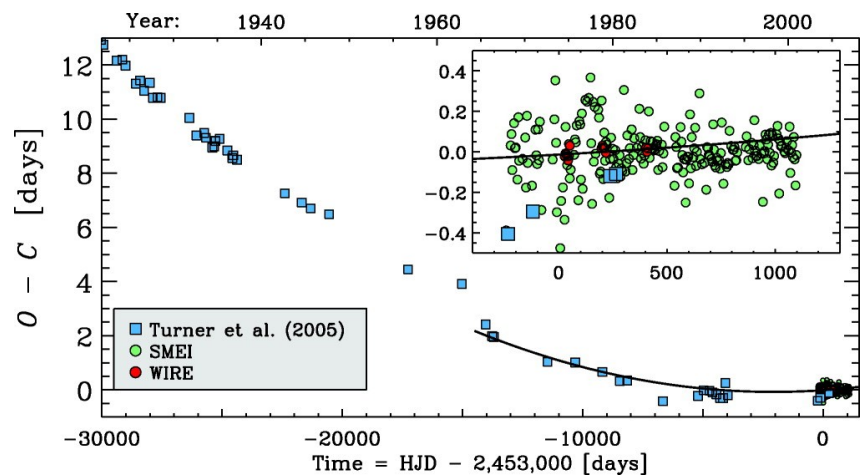
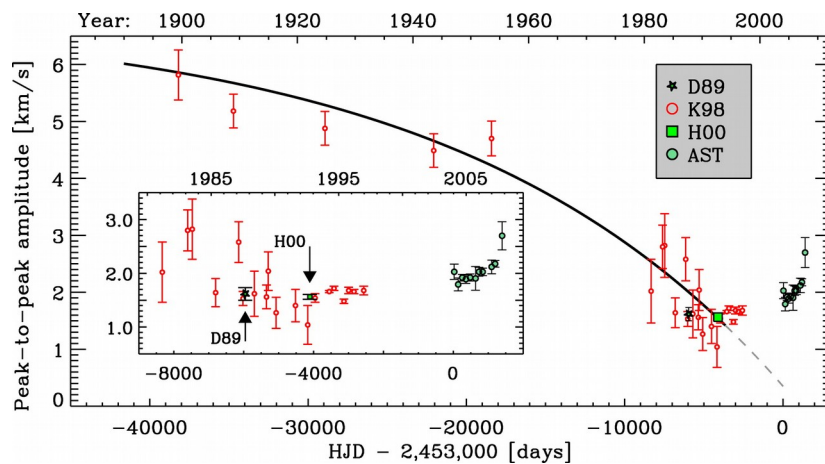
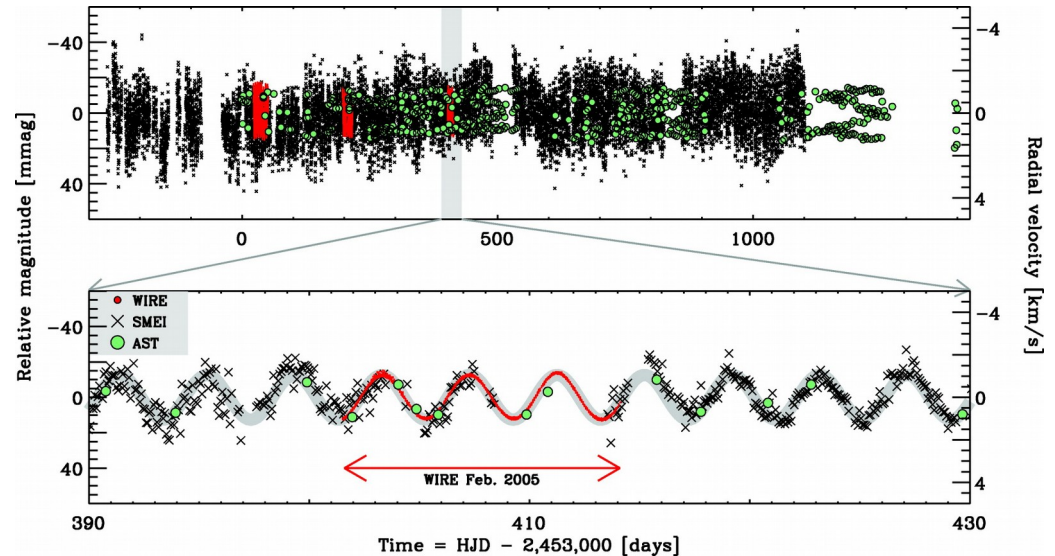
β UMi (Kochab, 2,2 m): K-óriás, 4,6 napos oszcilláció, 3 hetes módusélettartammal.

A **V1280 Sco** nóvakitörése 2007-ben.



SMEI a Coriolis szondán

Polaris: cefeida
 különleges
 amplitúdó- és periódus-
 változással.
 Spektroszkópiai
 kettős, a HST látja a
 kísérőcsillagot is.



MOST, az első fotometriai űrszonda

Microvariability & Oscillations of STars: kanadai mikroszonda, 2013-ig a legkisebb űrtávcső (most a BRITE). Összköltsége (terv, elkészítés, felbocsátás, működés): kb. 7 millió EUR.

Indítás: 2003. jún. 30. (Pleszeck), 825 km magas, poláris napszinkron LEO pálya. Egyéves működést terveztek, de 2014. szeptemberig támogatta a Kanadai Űrügynökség. Utána is működésképes volt: aki fizetett, annak észleltek. A napelemek kora miatt 2019. áprilisban szűnt meg az észlelés.

53 kg tömegű, 65×30 cm (bőrönd, Humble Space Telescope), 101 perces periódusú poláris pályán: 15 cm-es Makszutow-távcső, 1024×1024 pixeles CCD, széles sávú (350–700 nm) szűrő; 38 W teljesítmény. A CCD-kamera egyik fele mért, a másik fele irányzásra kellett. 2006-tól az irányzást is a mérő CCD-vel végezték részecskebecsapódás miatt.

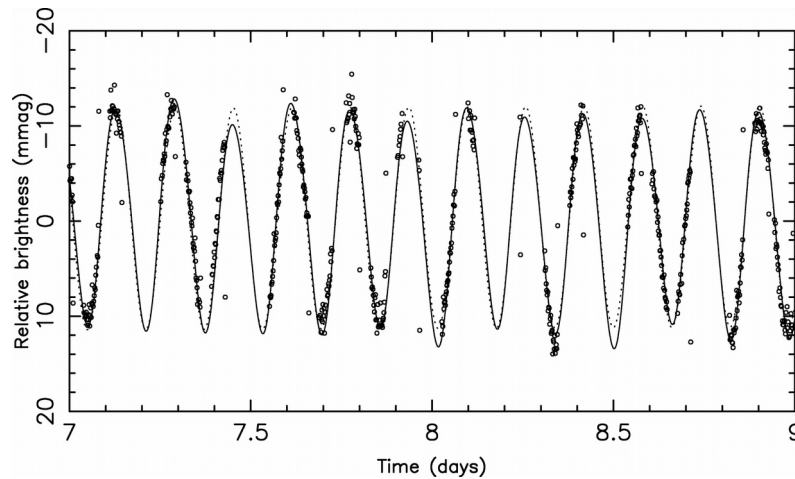
Az égbolt 54° széles sávjában (CVZ) megszakítás nélkül 8 hétig észlelhetett 6 magnitúdónál fényesebb csillagokat. Mozgó alkatrész híján stabil fókusz. Reakciókerekekkel (4 db) 1 ívperces irányzási pontosság.

Program (eredetileg):

- Nap-típusú csillagok akusztikus oszcillációi (utóbb más változócsillagok pulzációja is, pl. fémszegény szubtörpék);
- Mágneses csillagok (roAp);
- Exobolygókról reflektált csillagfény;
- Wolf–Rayet-csillagok turbulens változásai (nagy tömegű csillagok fősorozat után; kölcsönhatás az intersztelláris anyaggal).

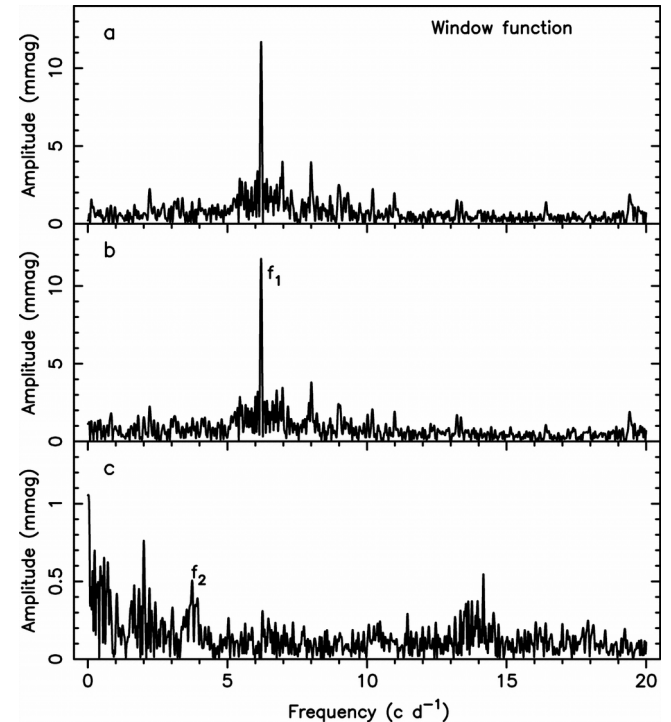
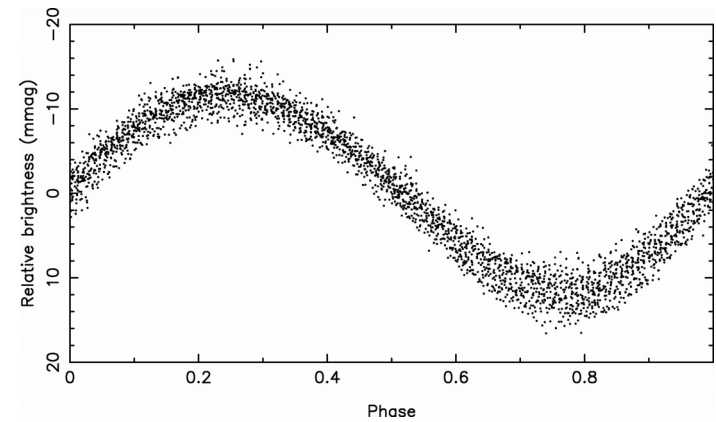
A MOST-fotometria eredményeiből

δ Ceti (B2IV, V=4,07): egyperiódusos BCEP változócsillagként volt ismert (prototípusnak tartották).



FINAL LIGHT-CURVE SOLUTION OF δ CETI

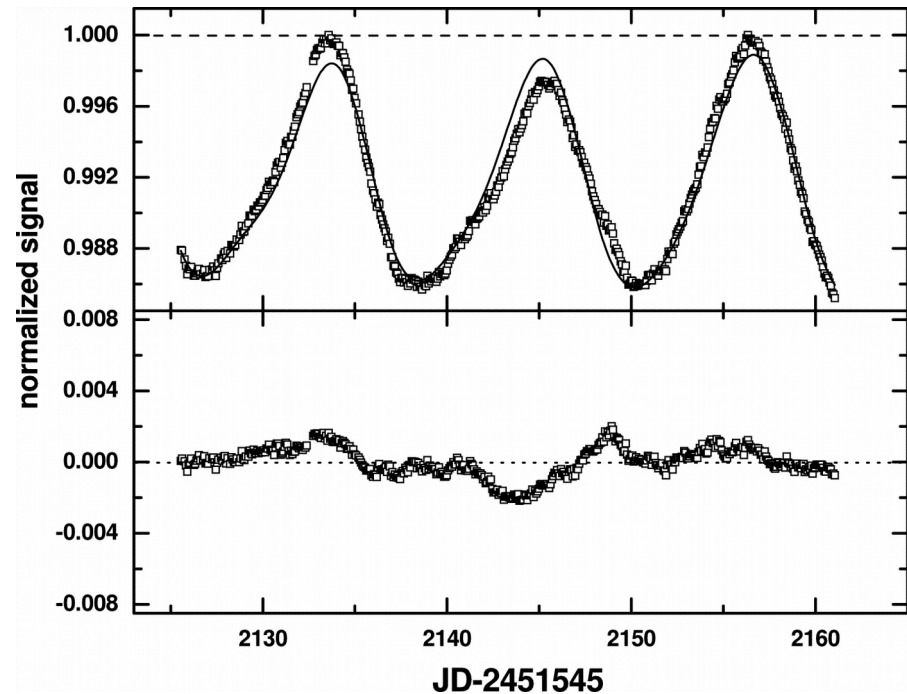
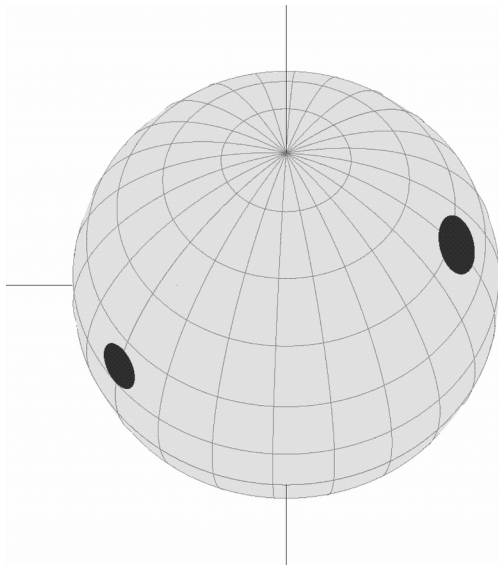
f_j (day^{-1})	f_j (μHz)	c_j (mmag)	ϕ_j	S/N
$f_1 = 6.20589(8)$	71.8274(9)	11.62(3)	0.4958(4)	121.4
$2f_1$	$2f_1$	0.72(3)	0.619(7)	7.5
$2.003(1)$	23.18(1)	0.65(3)	0.292(7)	6.8
$f_2 = 3.737(2)$	43.25(2)	0.53(3)	0.454(9)	5.5
$f_3 = 3.673(2)$	42.51(2)	0.39(4)	0.82(1)	4.0
$f_4 = 0.318(2)$	3.68(2)	0.43(4)	0.55(2)	4.5



A MOST-fotometria eredményeiből

ϵ Eri (K2V, $V=3,72$): Nap típusú és egészen közeli csillag, bolygója is ismert.

2005-ben észlelt fénygörbe elemzéséből: 2 folt volt a felszínen. A modellezés alapján a differenciális rotáció paraméterei, a tengelyhajlás és az egyenlítői forgási sebesség is meghatározható volt.

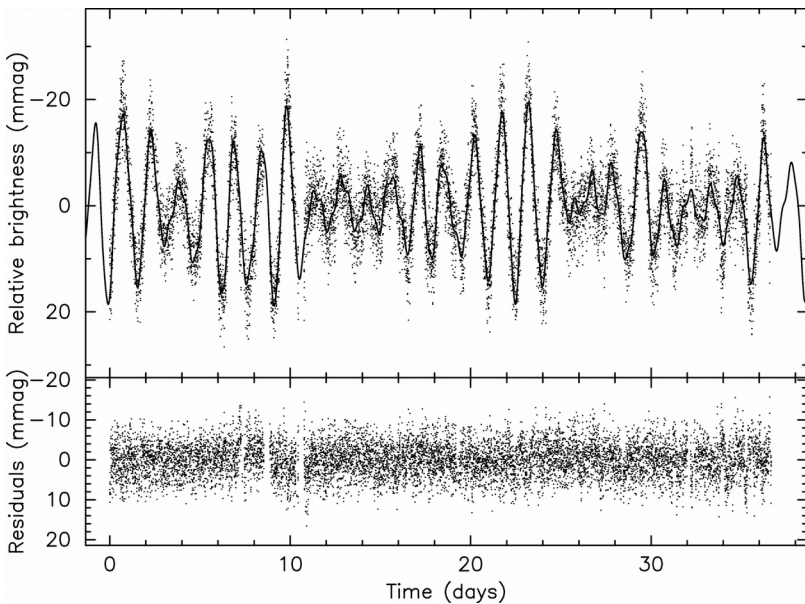


A MOST-fotometria eredményeiből

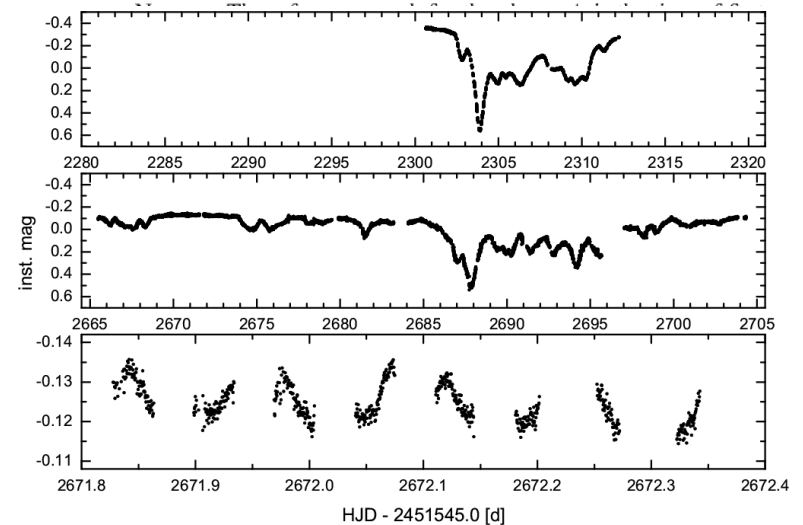
Főszorozat előtti csillag pulzációja:

Az NGC 2264-ben **V1026 Sco** (HD 14266): szabálytalan fénygörbe a cirkumsztelláris korongbeli por mozgása miatt. Erre rakódik a periodikus pulzáció jele.

Rengeteg SPB-csillagot fedezett fel a vezető-csillagok között (vö. Hipparcos): g-módusú nemradiális pulzáció. Példa: **HD163830**: illesztés 21 frekvenciával.



Frequency	f_j (day ⁻¹)	f_j (μHz)	b_j (mmag)	ϕ_j	S/N
f_1	0.6744(5)	7.806(5)	7.6(2)	0.125(8)	41.4
f_2	0.621(2)	7.19(2)	5.5(5)	0.34(3)	30.0
f_3	0.647(4)	7.48(4)	2.8(4)	0.46(5)	15.3
f_4	0.756(1)	8.75(1)	2.38(9)	0.37(3)	13.0
f_5	0.8007(9)	9.27(1)	2.2(1)	0.15(2)	12.0
f_6	0.412(1)	4.77(2)	1.64(8)	0.50(2)	8.9
f_7	0.949(1)	10.980(7)	1.40(6)	0.45(2)	7.6
f_8	0.576(2)	6.67(3)	1.4(6)	0.17(4)	7.6
f_9	1.0546(7)	12.206(9)	1.37(6)	0.53(2)	7.5
f_{10}	0.521(2)	6.03(2)	1.31(7)	0.53(3)	7.1
f_{11}	0.0350(8)	0.405(9)	1.18(7)	0.92(2)	6.4
f_{12}	0.448(2)	5.18(3)	1.17(7)	0.44(4)	6.4
f_{13}	2.0018(8)	23.17(1)	1.11(6)	0.21(2)	6.0
f_{14}	0.718(4)	8.31(5)	0.9(1)	0.61(8)	4.9
f_{15}	0.257(2)	2.98(3)	0.9(1)	0.25(5)	4.9
f_{16}	0.832(2)	9.63(3)	0.87(8)	0.49(5)	4.5
f_{17}	0.285(3)	3.30(3)	0.83(9)	0.20(5)	4.5
f_{18}	0.494(3)	5.72(3)	0.80(7)	0.25(4)	4.4
f_{19}	0.343(1)	3.97(2)	0.77(6)	0.49(3)	4.2
f_{20}	0.079(2)	0.91(2)	0.72(6)	0.71(3)	3.9
f_{21}	0.921(2)	10.66(2)	0.72(7)	0.66(4)	3.9



A MOST-fotometria eredményeiből

Meglepő felfedezés:

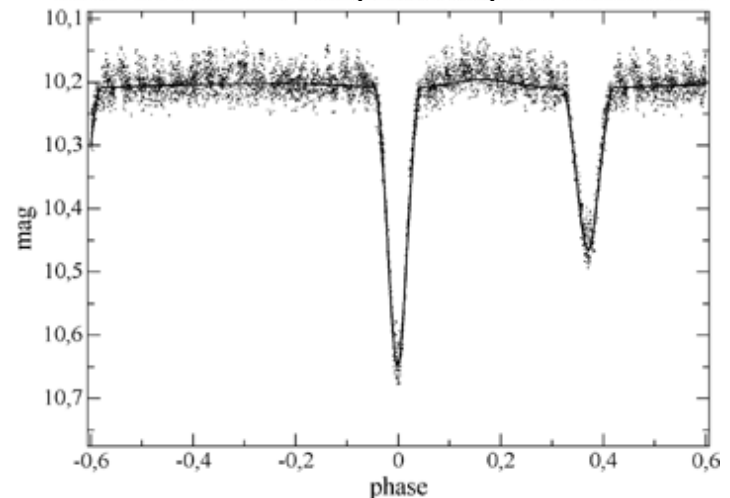
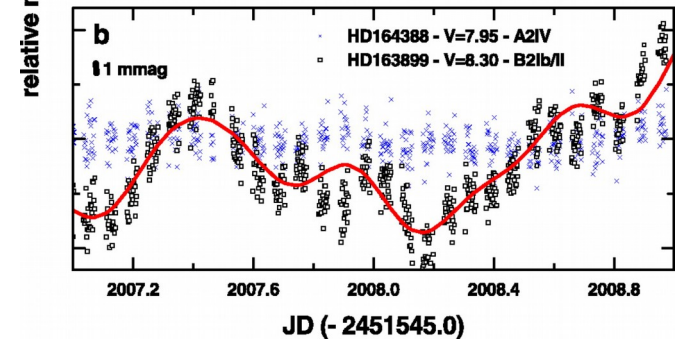
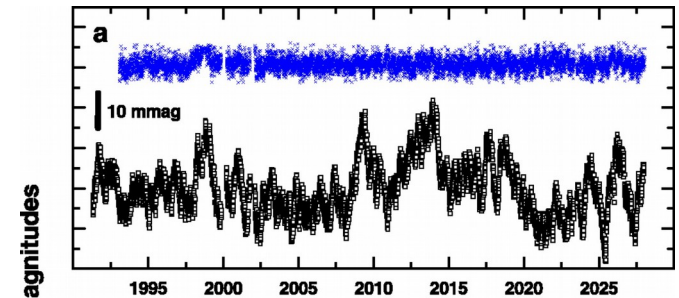
Új típusú pulzáció: **HD 163899**

(B2Ib/II), lassan pulzáló szuperóriás (SPBsg).

Véletlen felfedezés:

HD 313926 fedési változó (a WR 111-nél használták vezetőcsillagként). B3 + B7 komponensek 2,27038 napos periódussal; $e=0,20$, ez a legexcentrikusabb pálya a forró kettősök között; még nem volt ideje cirkularizálódni (még a B típusú csillagok között is fiatalnak számít).

Egyéb érdekességek: pl. *cefeidák* (majd a Kepler kapcsán tárgyaljuk részletesebben).



CoRoT

Convection & **R**otation & Planetary **T**ransit:
Franciaország + ESA (az Eddington törlése hatására)

Indítás: 2006. dec. 27., Bajkonur, 897 km magas poláris LEO pálya, 103 perc keringési periódus.

27 cm-es átmérőnek megfelelő tükörfelület;
3°×2,7°-os látómező, afokális távcső
4×2000×4000 pixeles CCD -40°C-ra hűtve.

Pontosság: 6 μmag (6^m), 0,1 mmag (15^m).

2 CCD-egység asztroszeizmológiára (erősen defokuszálva a telítődés miatt, fényes csillagokra – szeizmo-mező, A1, A2);

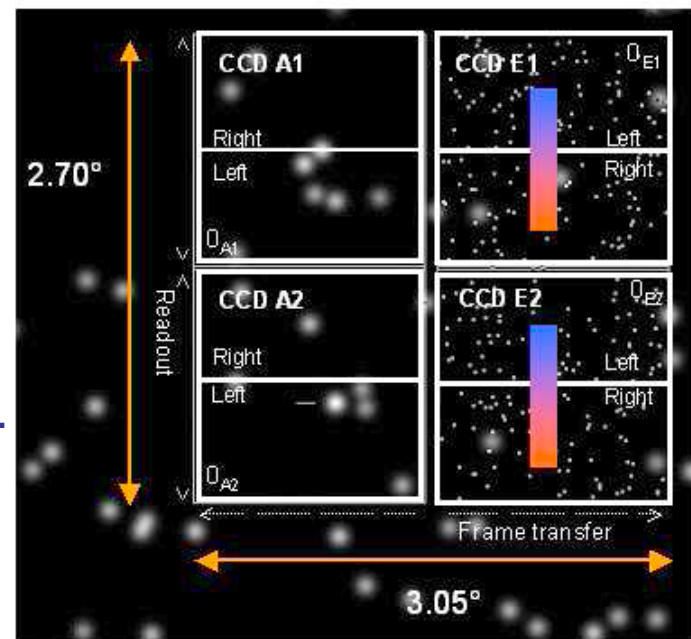
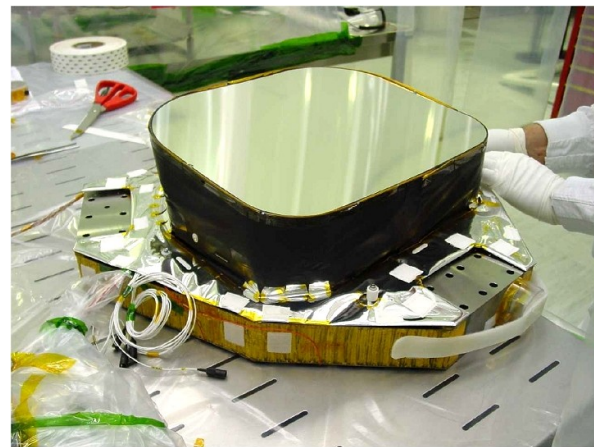
2 CCD-egység exobolygótranzitok keresésére (exo-mező, E1, E2).

152 napig folyamatos fotometria azonos látómezőről (a földfelszínről lehetetlen).

Öt ilyen ciklust terveztek, de 12 ciklust fedtek le.

2012. novemberig mért (2009-től felére csökkent teljesítménnyel), amikor is a fedélzeti számítógép romlott el.

Adatsor: 163000 csillagról.



CoRoT

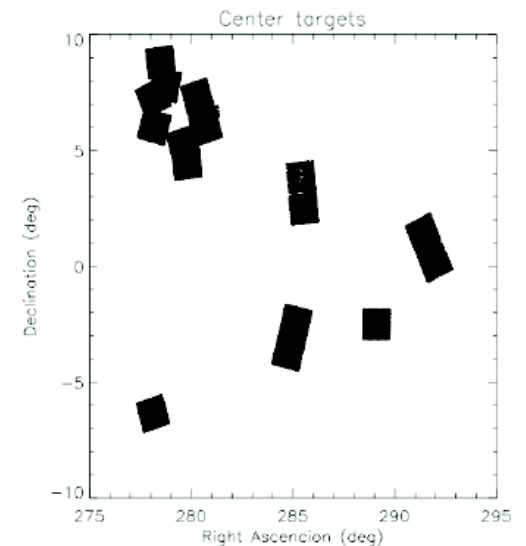
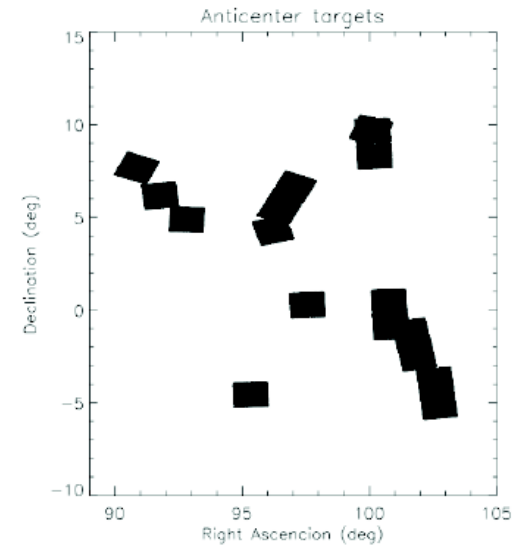
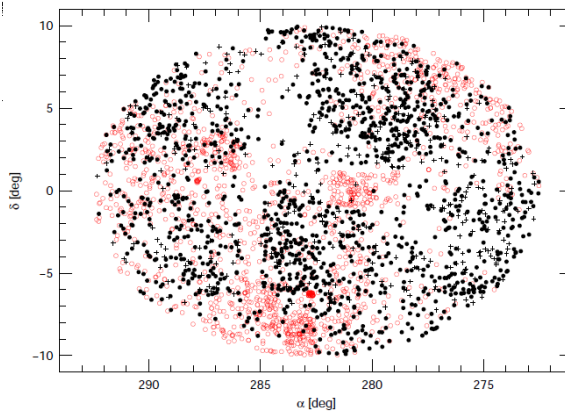
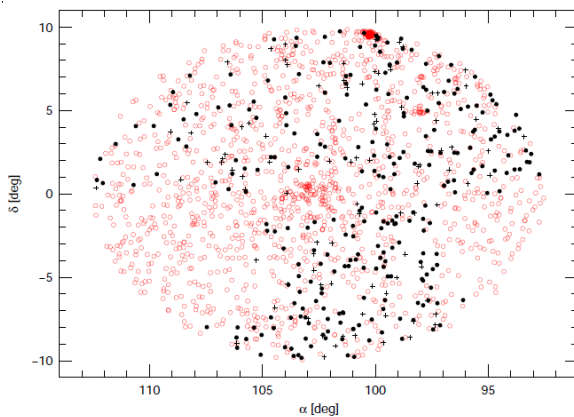
A szeizmo-mezőben 1 programcsillag + max. 9 további célpont, az exo-mezőben kb. 10000 kiválasztott csillag: törpék 11–16 magnitúdó között (a fényesebbek szaturálódnak, az óriásoknál kicsi a bolygótranszit hatása).

Fotometriai pontosság: 10^{-5} magnitúdó.

Két fő irány: a galaktikus centrum (Serpens Cauda) és az anticentrum (Monoceros) környéke – az észlelt mezők a CoRoT-szemek.

152 nap után 21 napos észlelés a félévenkénti váltásig.

A misszió indításakor 4925 változócsillag volt ismert (ebből 1396 új felfedezés az NSVS adataiból).

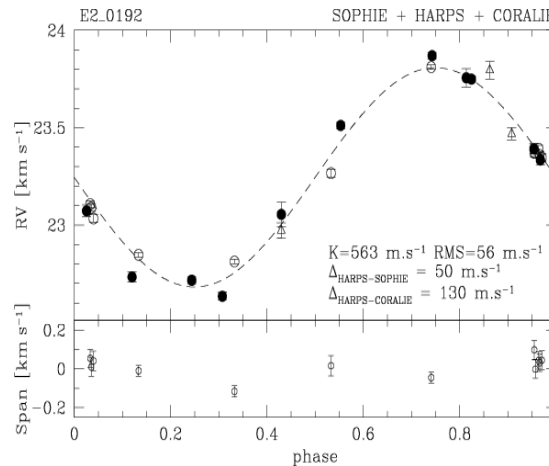
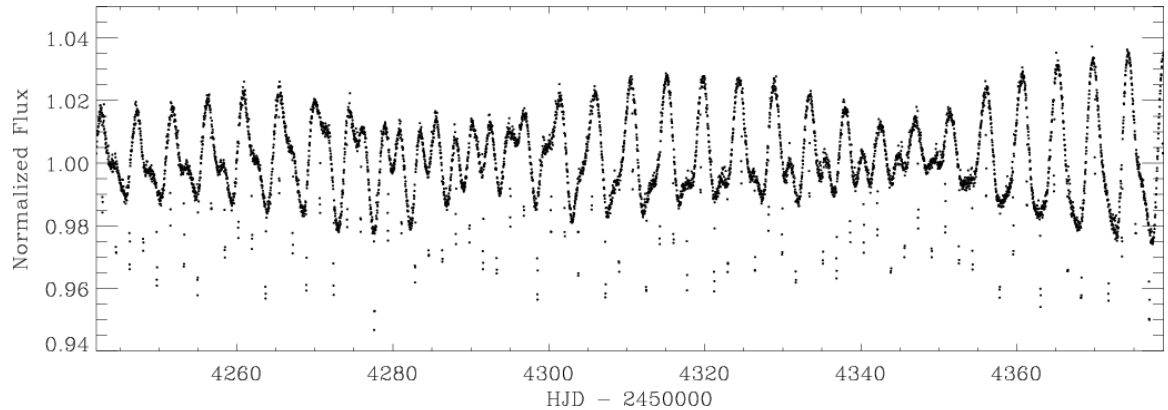
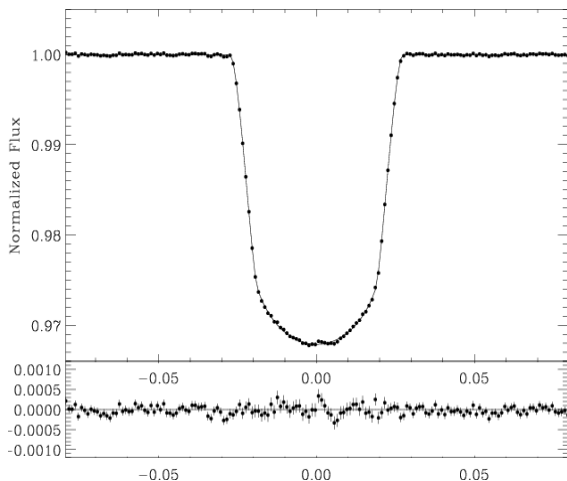


A CoRoT eredményeiből

26 exobolygót jelentettek be, és további 600 tranzitot vizsgálnak.

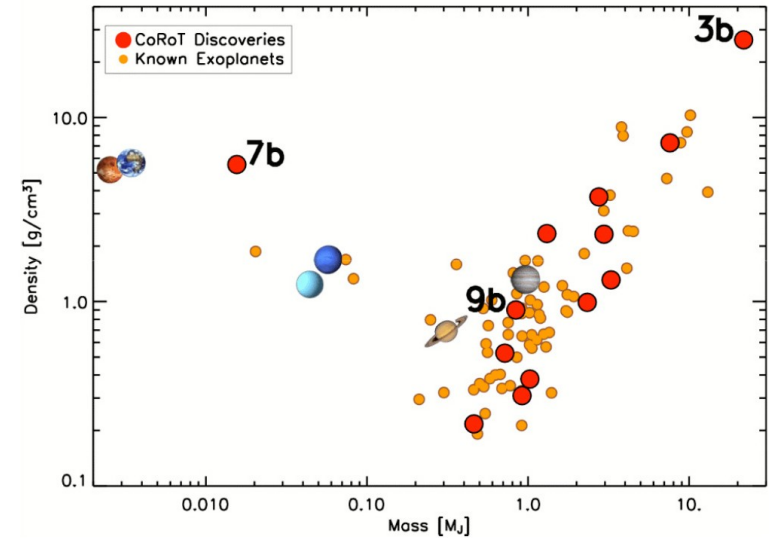
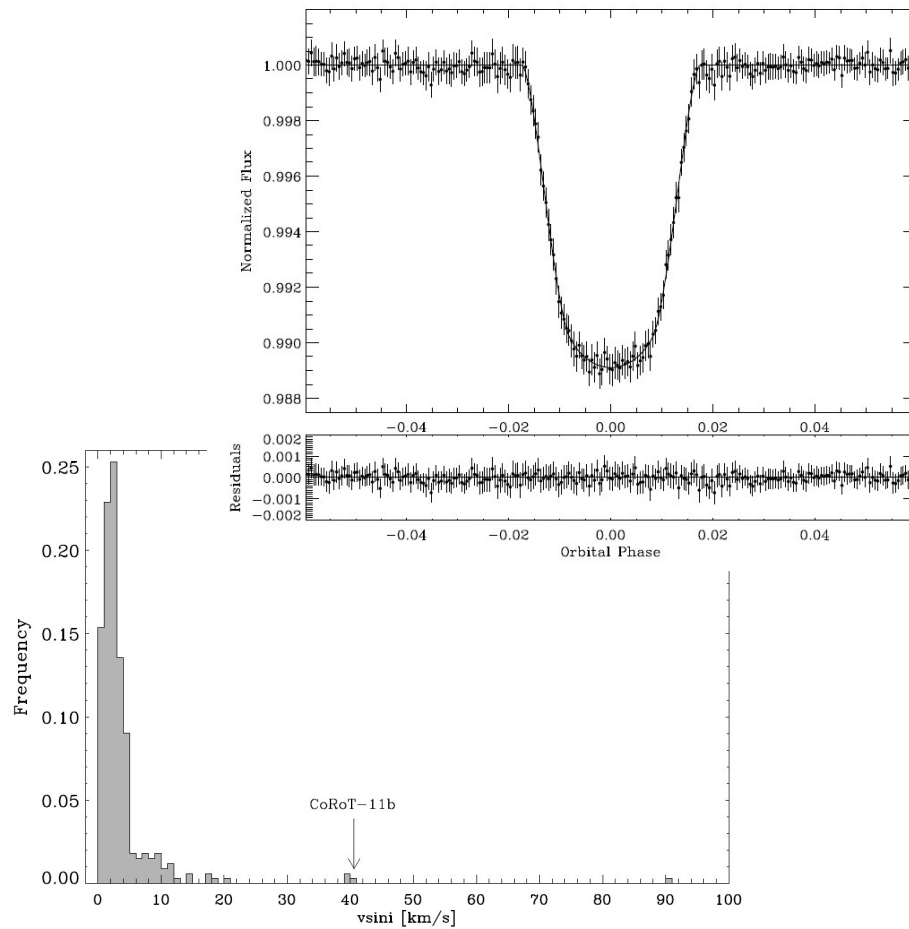
A bejelentés előtt az exobolygót alapos vizsgálat alá vetik földi műszerekkel (radiális sebességet is mérnek).

Példa: CoRoT-2



Star CorotID	0101206560	
RA (J2000)	19 ^h 27 ^m 06.5 ^s	
Dec (J2000)	1°23'01.5''	
V _{mag}	12.57	
<i>Obtained from the CoRoT photometry</i>		
	Value	Error
P [d]	1.7429964	0.0000017
T _c [BJD]	2 454 237.53562	0.00014
<i>Fitted</i>		
θ ₁	0.02715	0.00008
k = R _p /R _s	0.1667	0.0006
i [deg]	87.84	0.10
u ₊	0.471	0.019
u ₋	0.34	0.04
<i>Deduced</i>		
u _a	0.41	0.03
u _b	0.06	0.03
a/R _s	6.70	0.03
a/R _p	40.3	0.3
M _s ^(1/3) /R _s	1.099	0.005
<i>Photometry, spectroscopy and radial velocity combined</i>		
V ₀ [km s ⁻¹]	23.245	0.010
K [km s ⁻¹]	0.563	0.014
e	0	(fixed)
M _s [M _⊙]	0.97	0.06
R _s [R _⊙]	0.902	0.018
v sin i [km s ⁻¹] ^a	11.85	0.50
T _{eff} [K] ^a	5625	120
M _p [M _{Jup}]	3.31	0.16
R _p [R _{Jup}]	1.465	0.029
ρ _p [g/cm ³]	1.31	0.04
T _{eq} [K] ^b	1537	35

A CoRoT eredményeiből



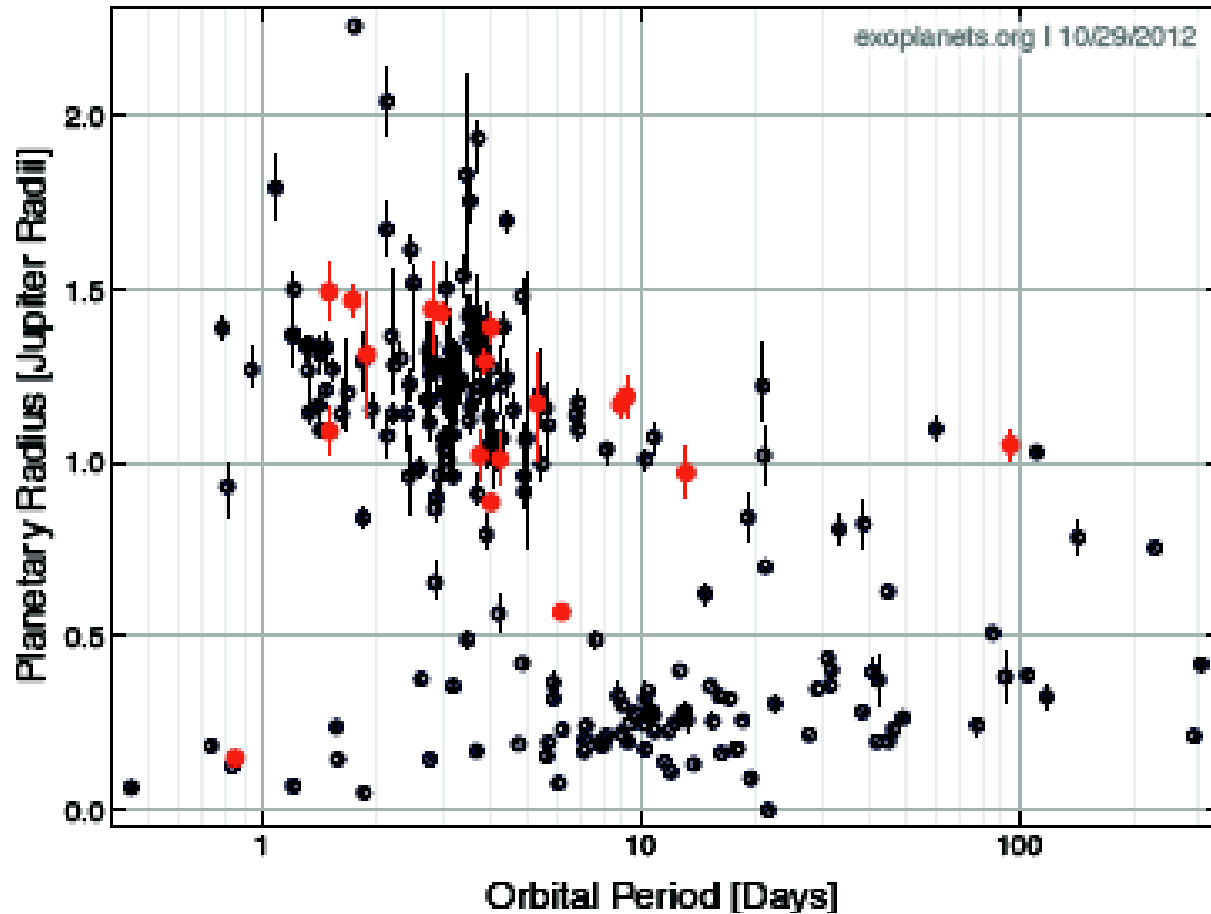
Density versus mass of known transiting planets.

Másik példa: CoRoT-11b.
A CoRoT-7 volt az első
ismert fedési kőzetbolygó.

$v \sin i_*$ distribution of the known extrasolar planets. The position of CoRoT-11b is highlighted with an arrow.

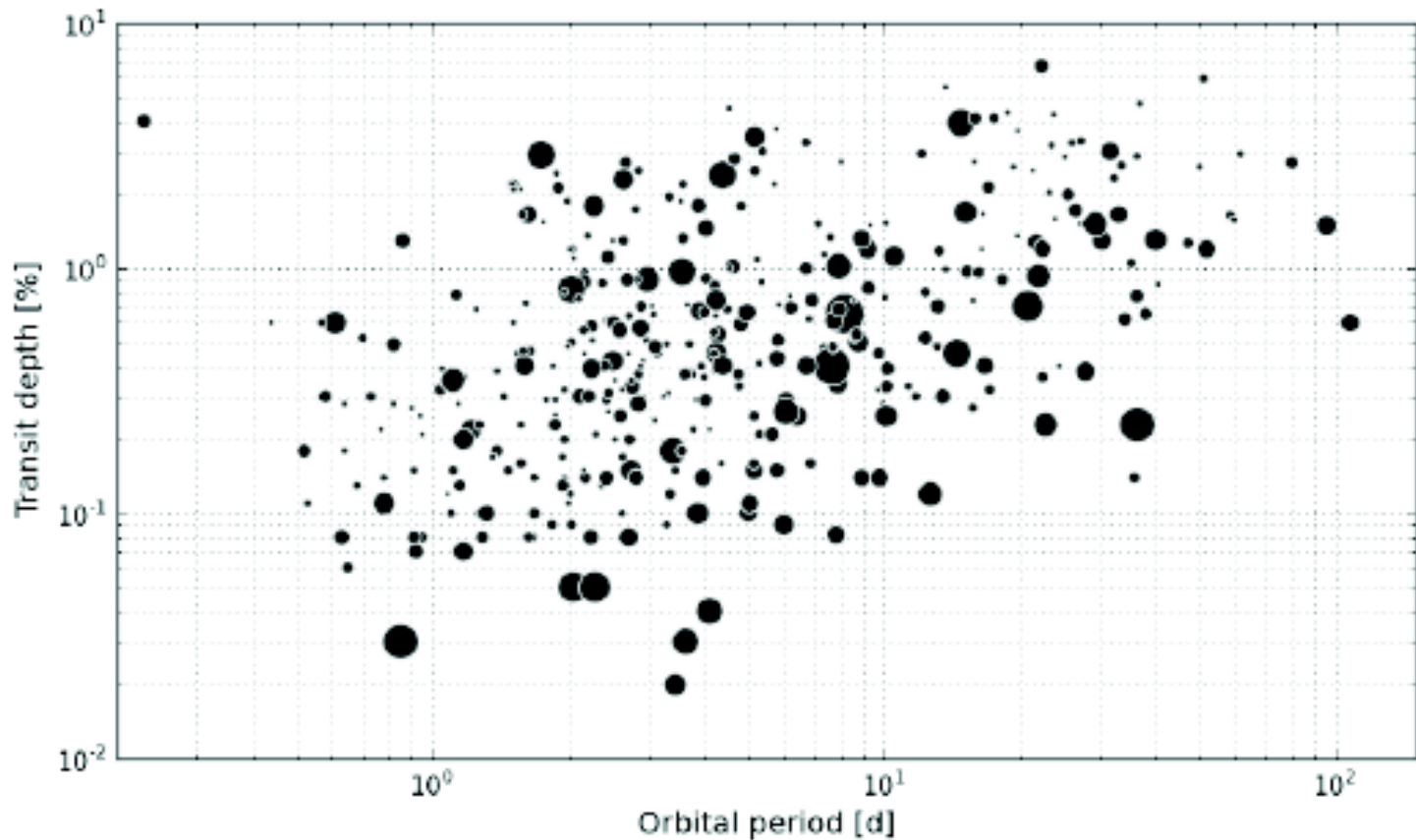
A CoRoT eredményeiből

A keringési periódus és a bolygósugár közötti összefüggés (piros jelek a CoRoT által felfedezett exobolygók)

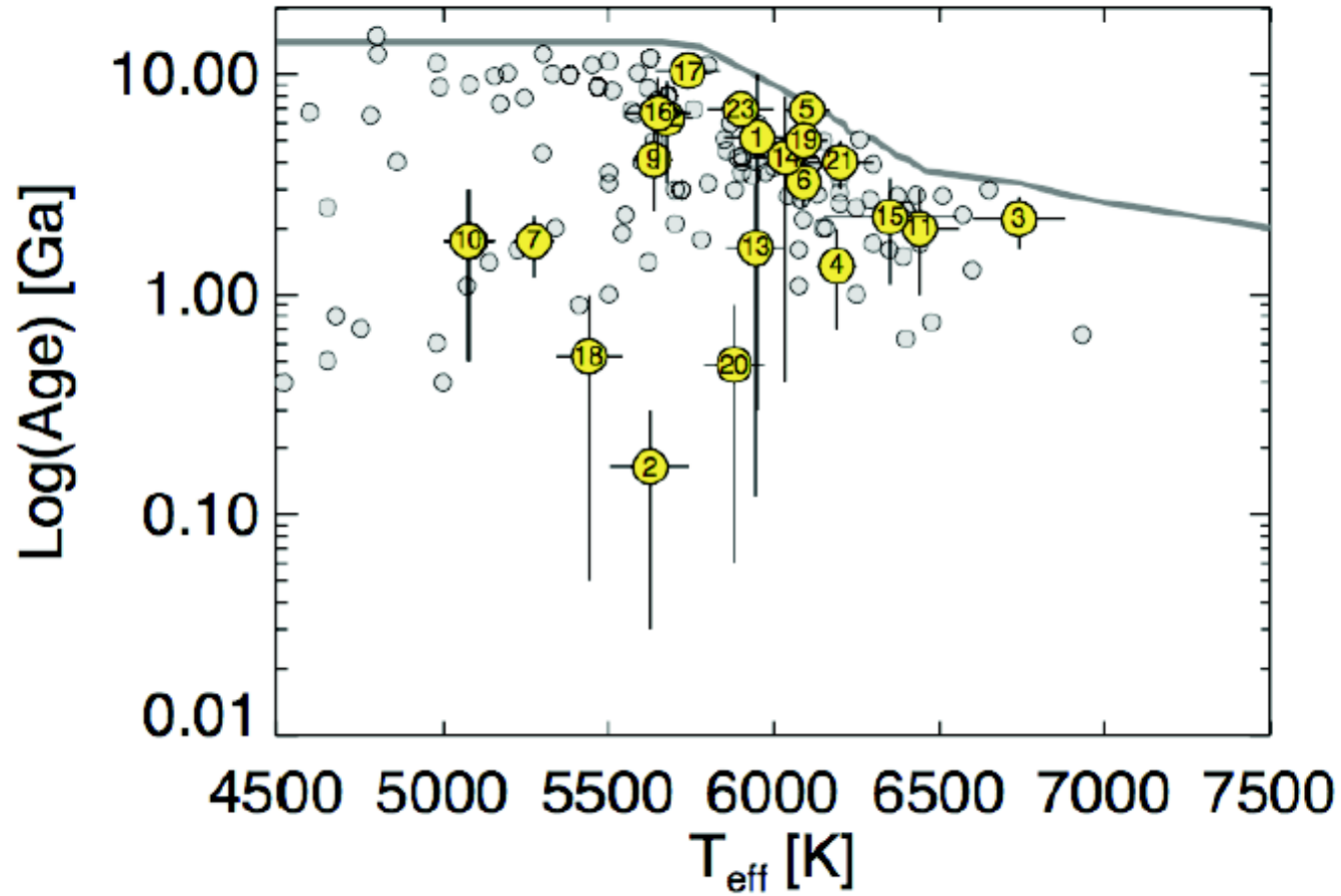


A CoRoT eredményeiből

A tranzit mélysége a gyanított exobolygókra (a pont mérete a csillag látszó fényességére utal)

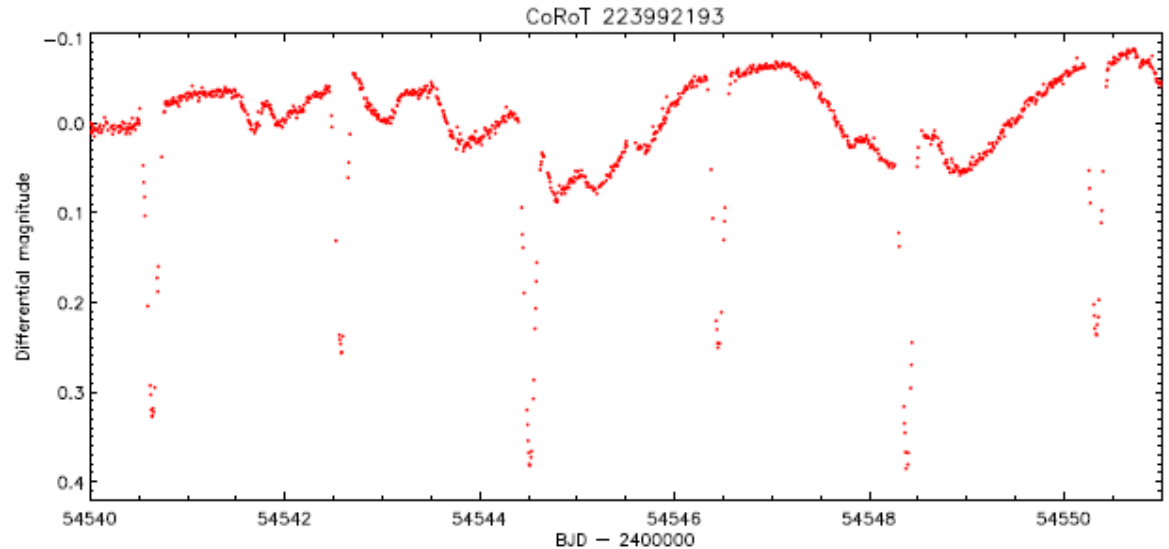


A CoRoT eredményeiből

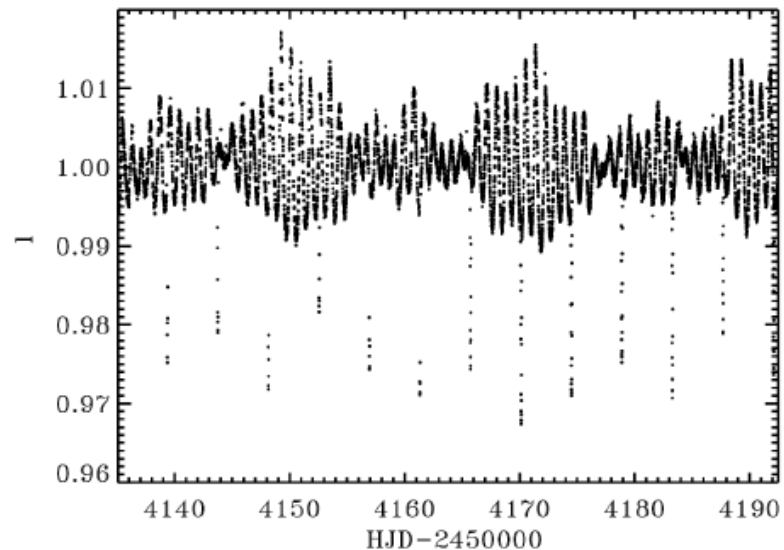


A CoRoT eredményeiből

CoRoT 223992193:
fősorozat előtti fedési
kettős. A fedéseken kívül
sztochasztikus változások
láthatók a kettős körüli
anyagkorong belső
peremének fedése
következtében. (fent)



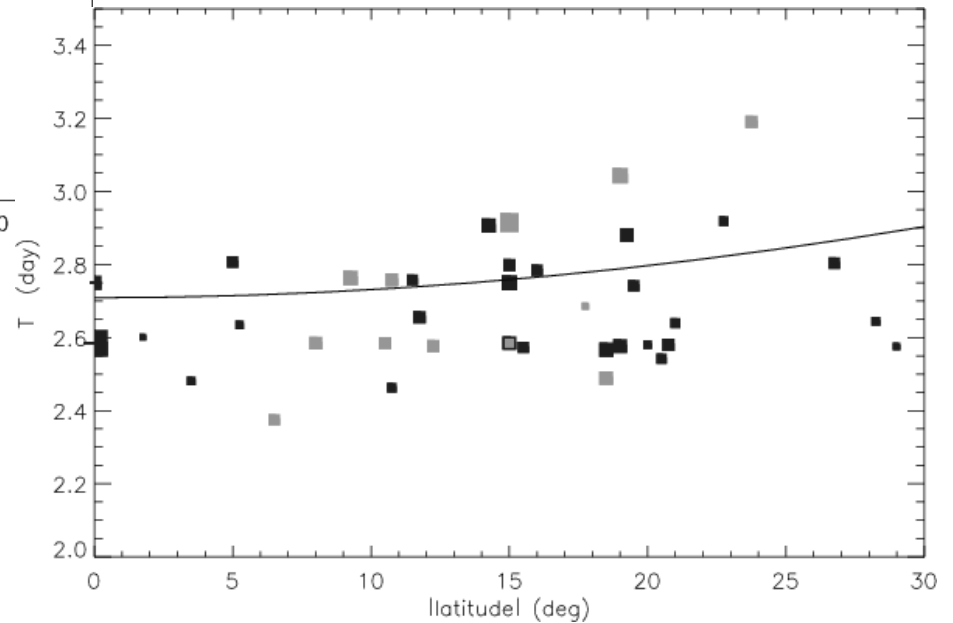
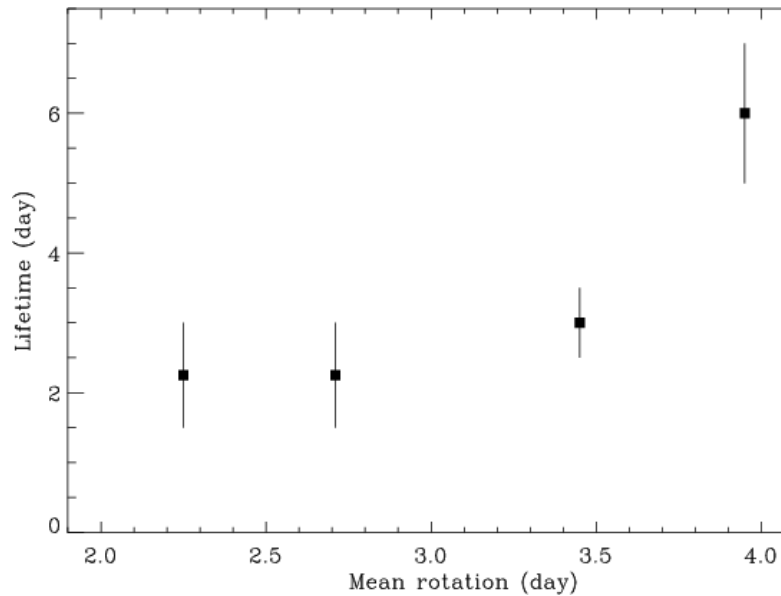
CoRoT 102918586:
GDOR + EB; a
komponensek tömege és
sugara 1% pontosan
meghatározható. (lent)



3000 fedési kettős rendszer
van a CoRoT által észlelt
163000 fénygörbe között.

A CoRoT eredményeiből

A CoRoT-mezőkben talált foltos csillagok vizsgálata alapján a foltok élettartama és differenciális rotációja.



A CoRoT-adatok archívuma

A CoRoT-adatok elérhetősége:

http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/datasethelp/ETSS_CoRoT.html

Summary of CoRoT Runs

IRa01	Astero-seismology Channel	Exoplanet Channel
Number of Stars	10	9880
Summary File	IPAC ASCII format table	IPAC ASCII format table
Light curves	Download scripts	Download scripts
LRa01	Astero-seismology Channel	Exoplanet Channel
Number of Stars	10	11408
Summary File	IPAC ASCII format table	IPAC ASCII format table
Light curves	Download scripts	Download scripts
LRa02	Astero-seismology Channel	Exoplanet Channel
Number of Stars	10	11408
Summary File	IPAC ASCII format table	IPAC ASCII format table
Light curves	Download scripts	Download scripts
LRa03	Astero-seismology Channel	Exoplanet Channel
Number of Stars	5	5289
Summary File	IPAC ASCII format table	IPAC ASCII format table
Light curves	Download scripts	Download scripts
LRa04	Astero-seismology Channel	Exoplanet Channel
Number of Stars	5	4216
Summary File	IPAC ASCII format table	IPAC ASCII format table
Light curves	Download scripts	Download scripts
LRa05	Astero-seismology Channel	Exoplanet Channel
Number of Stars	5	4602
Summary File	IPAC ASCII format table	IPAC ASCII format table
Light curves	Download scripts	Download scripts

Kepler

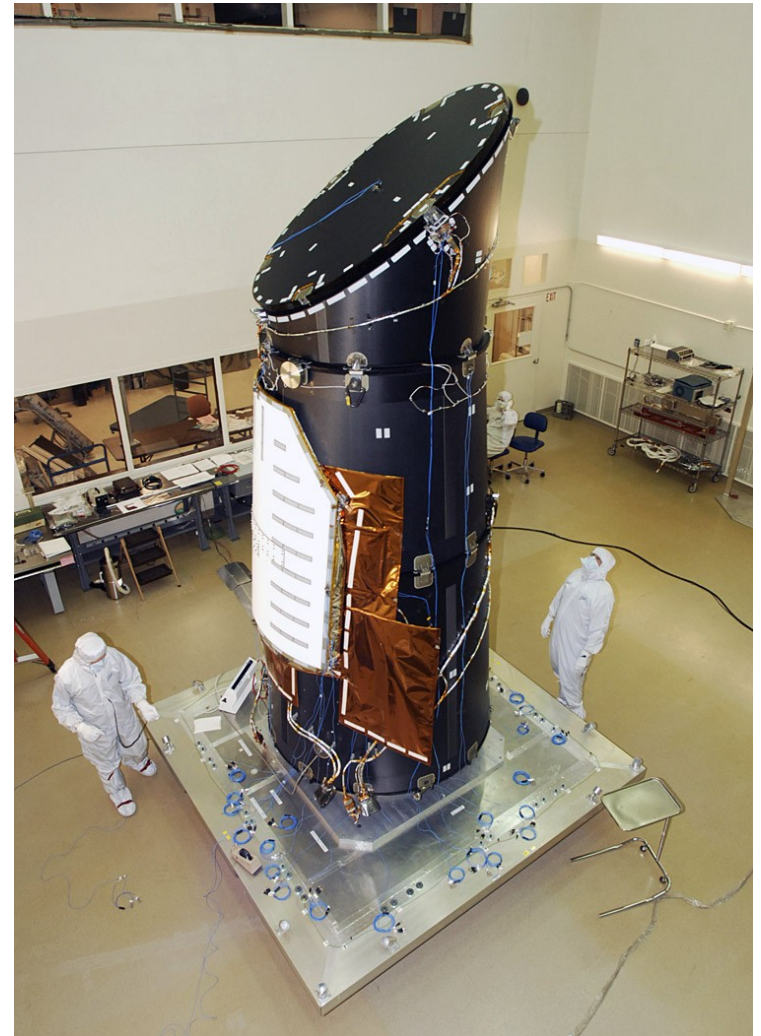
2001-ben hagyták jóvá, és hosszú az előtörténete.

10^{-5} pontosságú fotometria exobolygók átvonulásának keresésére és asztroszeizmológiai célokra. Az exo-Föld 84 milliomod magnitúdós halványodást okozna egy 12 magnitúdós exo-Napon.

Ennek detektálásához 20 mikromagnitúdós pontosság kell, három egymás utáni fedés észleléséhez pedig 3 évnél hosszabb mérési sorozat.

A jóváhagyáshoz a tervezett mérési pontosságot előbb a földfelszínen kellett megmutatni.

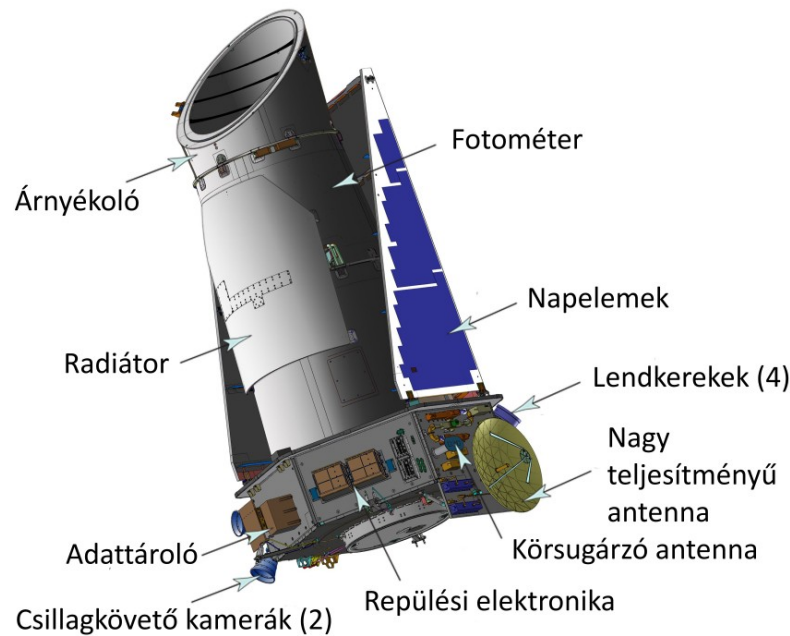
Jó összefoglaló cikk: Plachy – Molnár: Ég veled, Kepler! Meteor Csillagászati Évkönyv 2020



Kepler

A NASA Discovery-programjának részeként indítás: 2009. márc. 7., a Földet követő pályára (az L2 pont helyett), miként a Spitzer (372,5 napos periódus). 1,4 m-es Schmidt-távcső 95 cm-es korrekciós lencsével (ez a 9. legnagyobb Schmidt-teleszkóp).

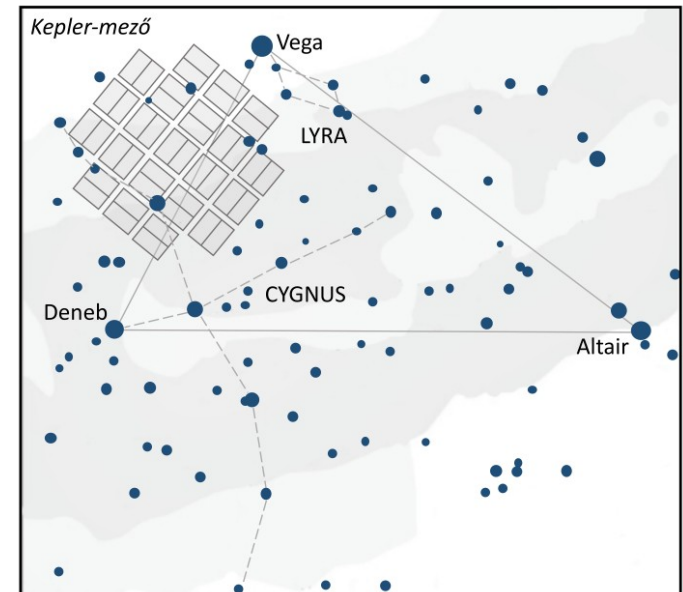
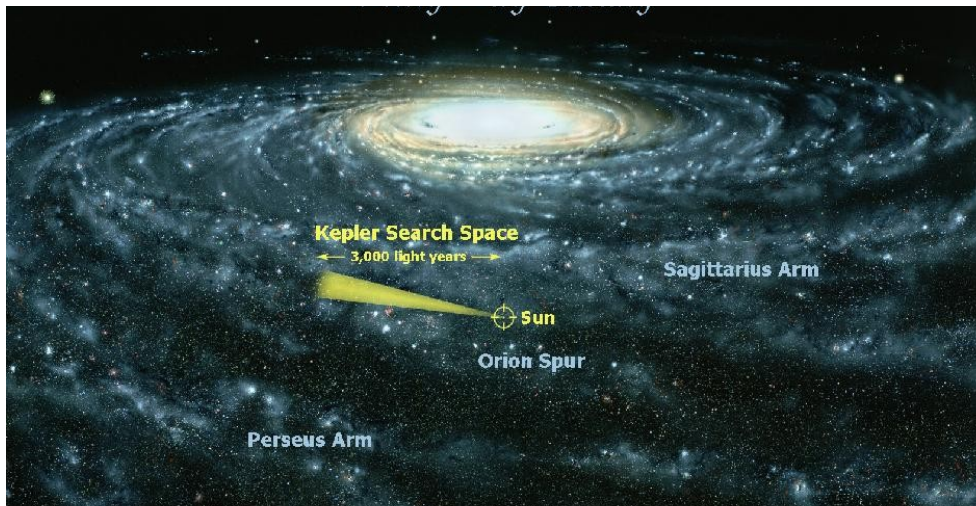
3,5 éves üzemidőt terveztek, de 4 évet bírt ki. A lendkerekek hibája miatt az eredeti program helyett új látómezőt és kutatási célt kerestek (K2).



Kepler

Állandó látómező (115 négyzetfok, az égbolt 1/400 része) folyamatos észlelése éveken át: Cyg–Lyr (arra mozog a Nap, egész évben mérhető). A földi kiegészítő mérések érdekében az északi félgömbön.

Negyedéves idősorok (forgatás a Nap helyzete miatt): Q1, Q2, ... A fényes csillagok essenek a CCD-modul detektorai közé



Kepler

A fő cél: megtudni, milyen gyakoriak a (Föld típusú) bolygók a (Nap típusú) csillagok lakható zónájában, a bolygórendszerek gyakoriságának meghatározása, a gazdacsillagok jellemzői, esetenként a bolygók sűrűsége, összetétele.

Előre kiválasztott célpontcsillagok fotometriája rövid (short cadence) és hosszú (long cadence) mintavételezéssel: SC: 1 perc, LC: 29,4 perc.

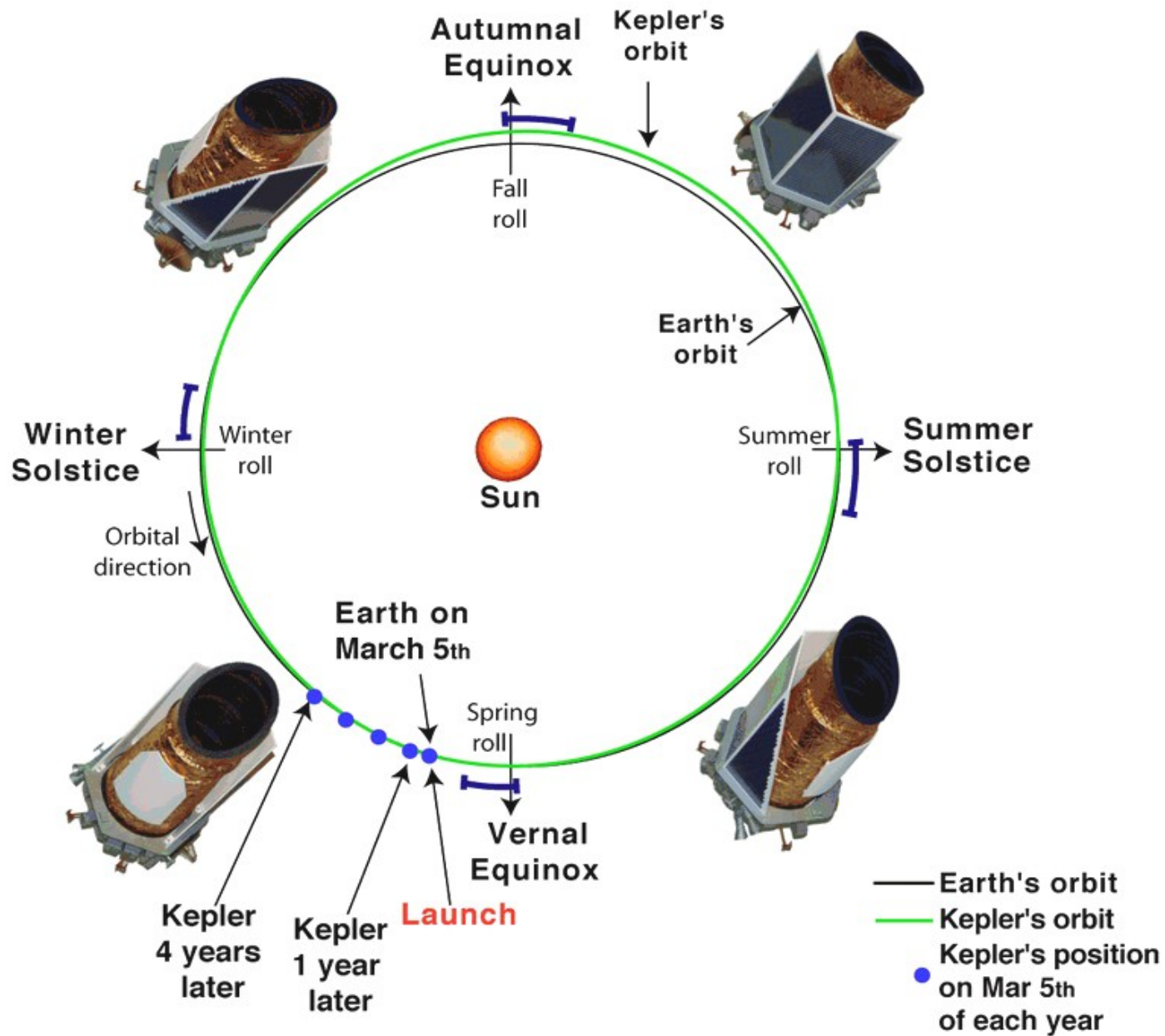
Asztroszeizmológiai céllal is választottak célpontokat. Ebben is közreműködött a KASC (Kepler Astroseismic Science Consortium – hoppá, ez helytelen név: nem szeizmika, hanem szeizmológia!).

A megfigyelt 170 ezer csillagot a Kepler Input Catalog (KIC) tartalmazza, 7-8 számjegyből álló (lehetetlen) azonosítóval. A célcsillagokra a fényességüktől függően különböző méretű pixelmaszkokat definiáltak (bélyegképek, postage stamps).

A telemetriai korlátok miatt csak a bélyegképek területén mért adatok kerültek a Földre (NASA Ames Research Center). A teljes látómezőre vonatkozó fotometriai adatokat csak havonta egyszer juttatták a földi központba. Így 52 FFI (Full Frame Image) áll rendelkezésre.

Adatletöltés havonta egyszer, ekkor rövid ideig szünetelt a mérés.

A detektor negyedévenkénti elfordítása ennél nagyobb gondokat okozott.



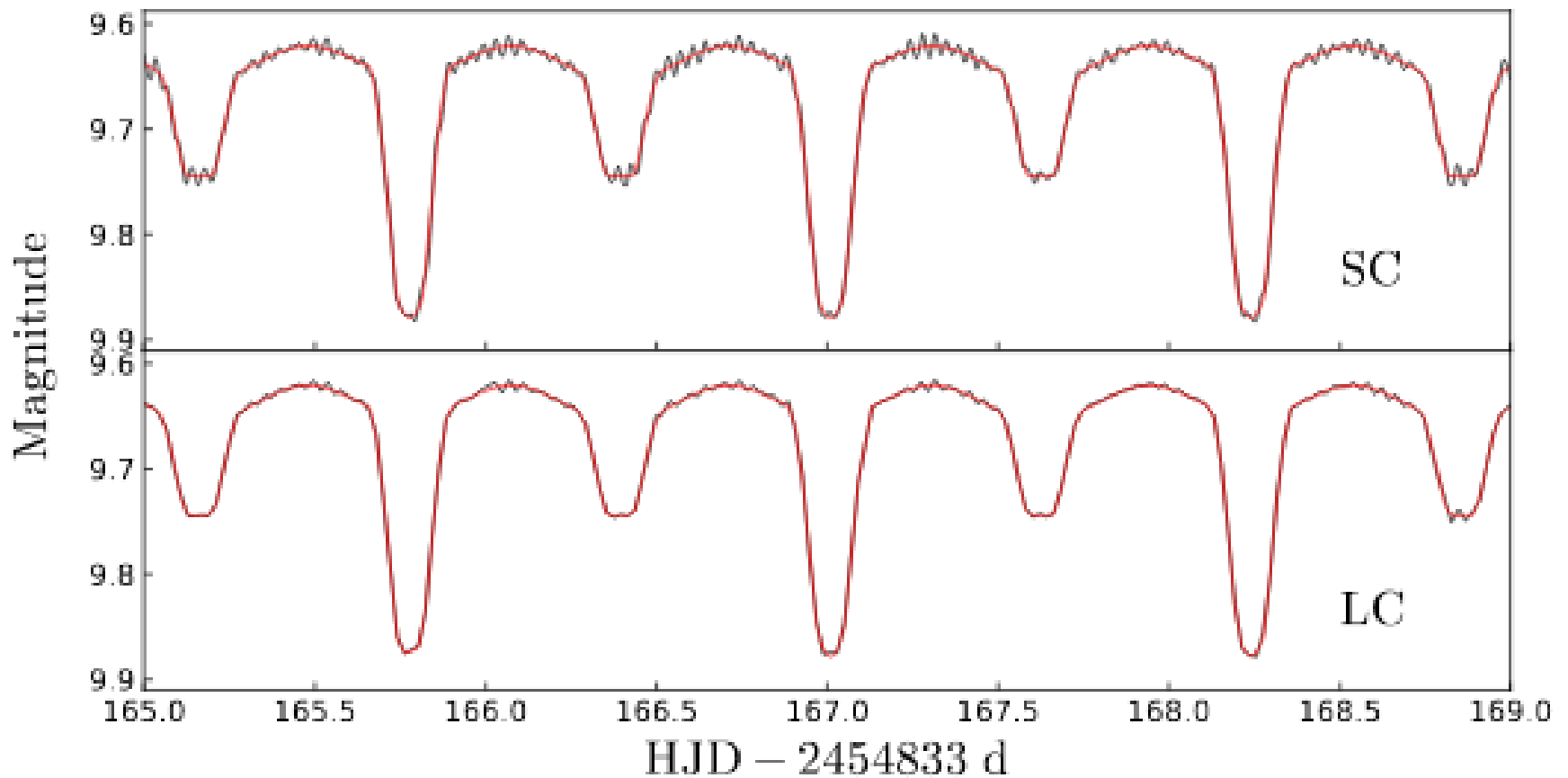
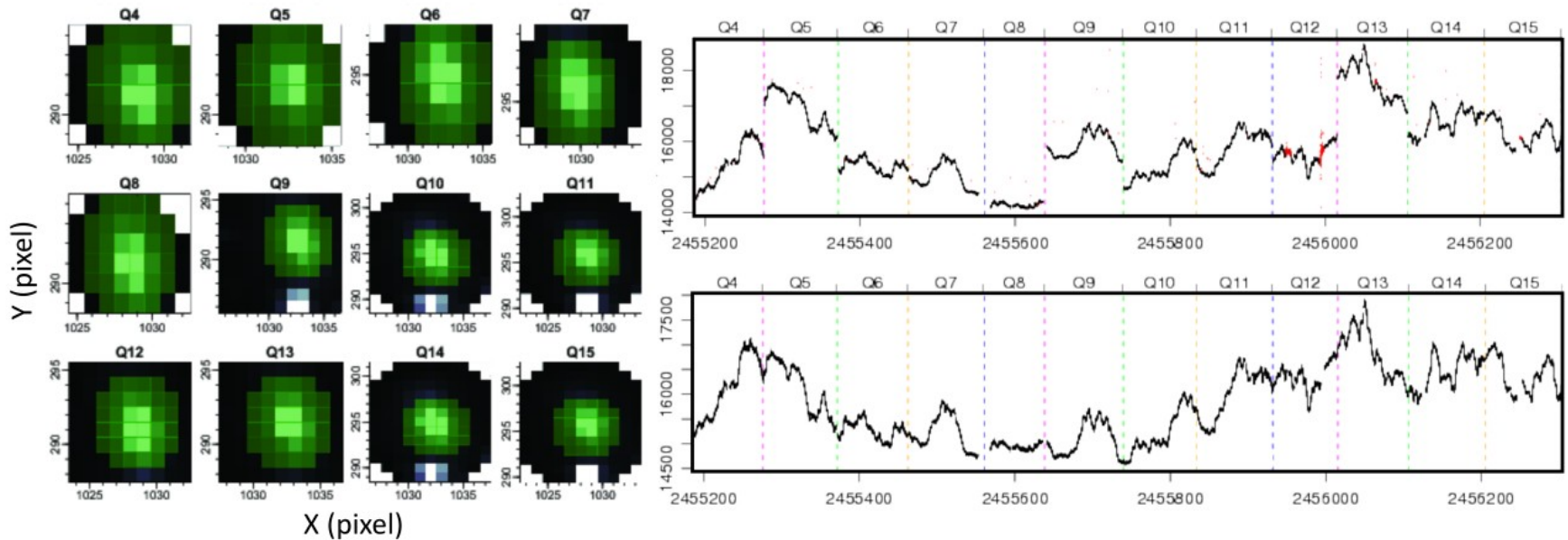


Fig. 1: The comparison between *Kepler* short cadence (top panel) and long cadence (bottom panel) light curve of KIC 10661783. In order to visualize both binary and pulsation variability only four days of observations are shown. The calculated WD model is marked with red lines.

KIC 10661783 – újra előkerül az asztroszeizmológiai eredményeknél

Kepler

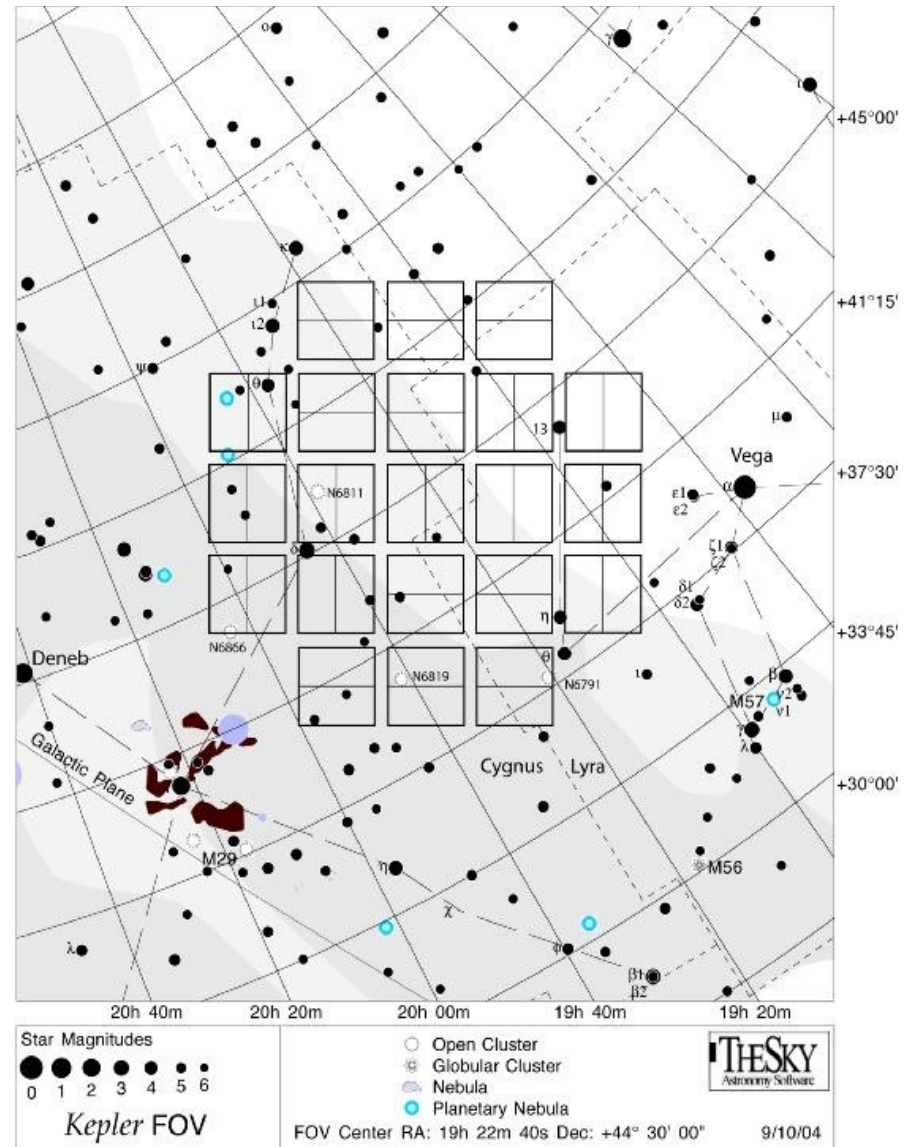
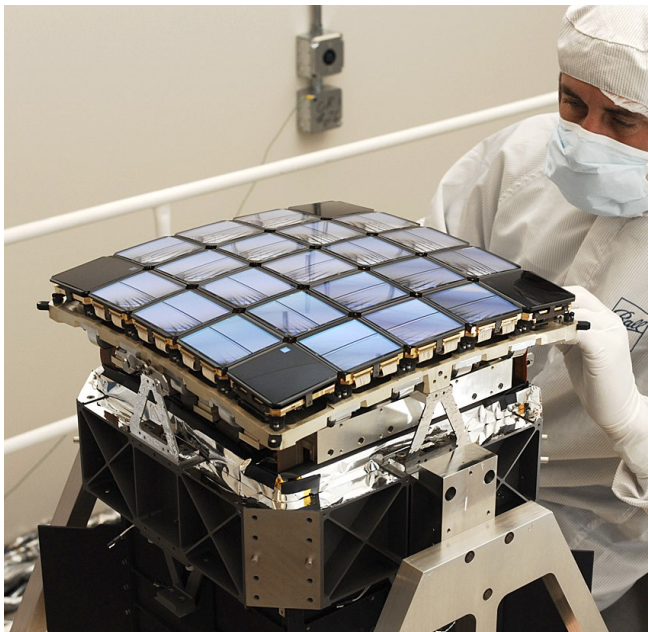


A negyedévenkénti 90 fokos elfordításra a Kepler energiaellátása miatt volt szükség (a napelemeket a Nap felé kell fordítani). A forgatás során egy adott csillag képe a detektor más részére került. Minden pixelnek egyedi az érzékenysége.

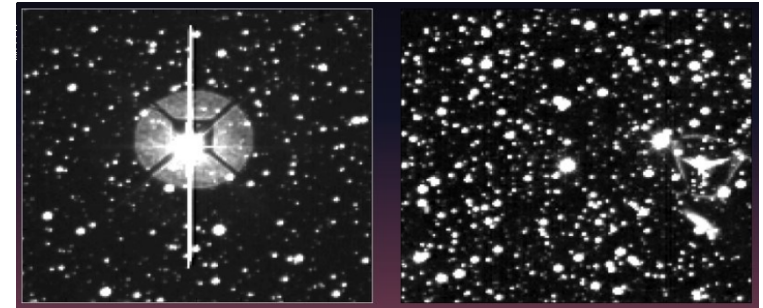
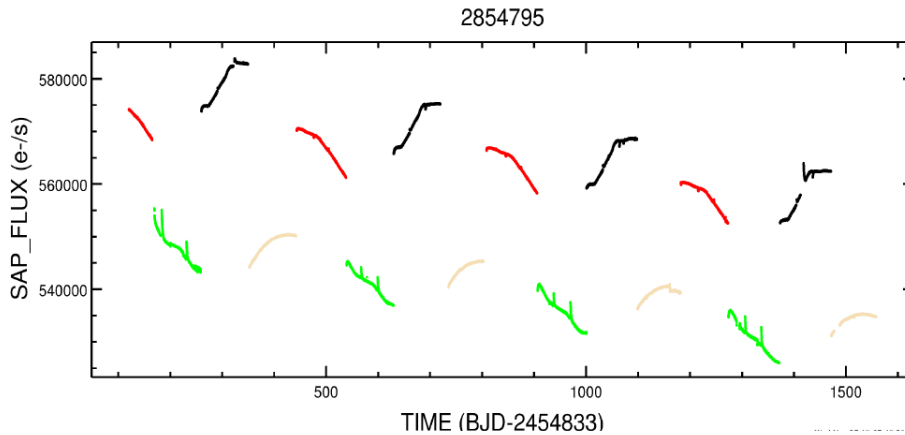
A negyedévi adatsorok összeillesztése nem triviális feladat. A fénygörbék diszkontinuitásait korrigálni kell.

Kepler

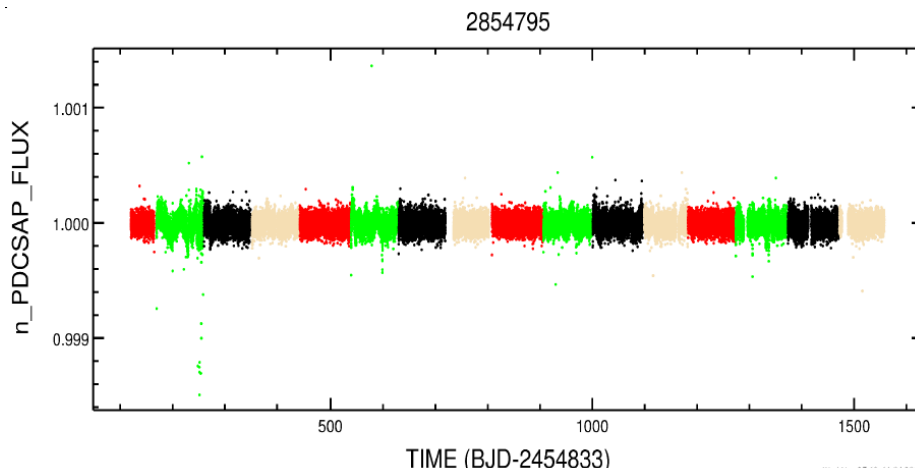
42 db 50x25 mm-es CCD-csip,
egyenként 2200x1024 pixellel.
Összesen 94,6 megapixel (indításkor
az addigi legnagyobb CCD-kamera
volt az űrben).
6,5 s után kiolvasás, majd fedélzeti
összeadás az SC és LC időtartamára.
A misszió végén már 3 csip volt rossz.



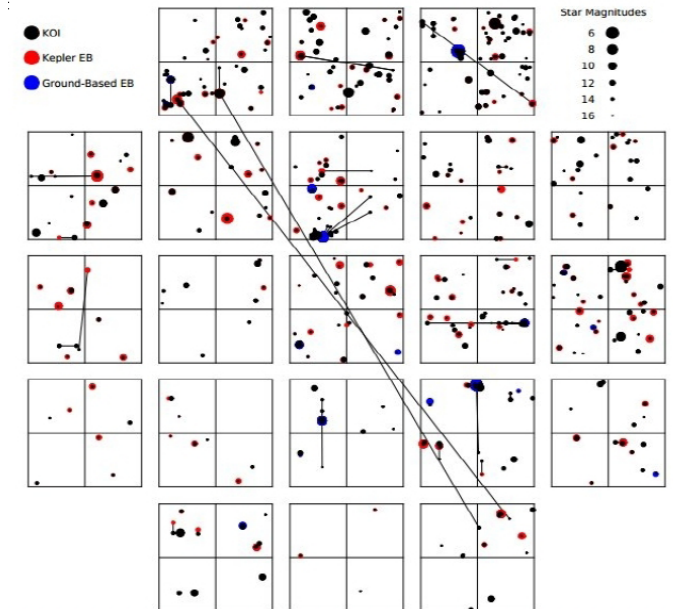
A fotometriai feldolgozás nehézségei



reflexió



CCD-csipek eltérő érzékenysége

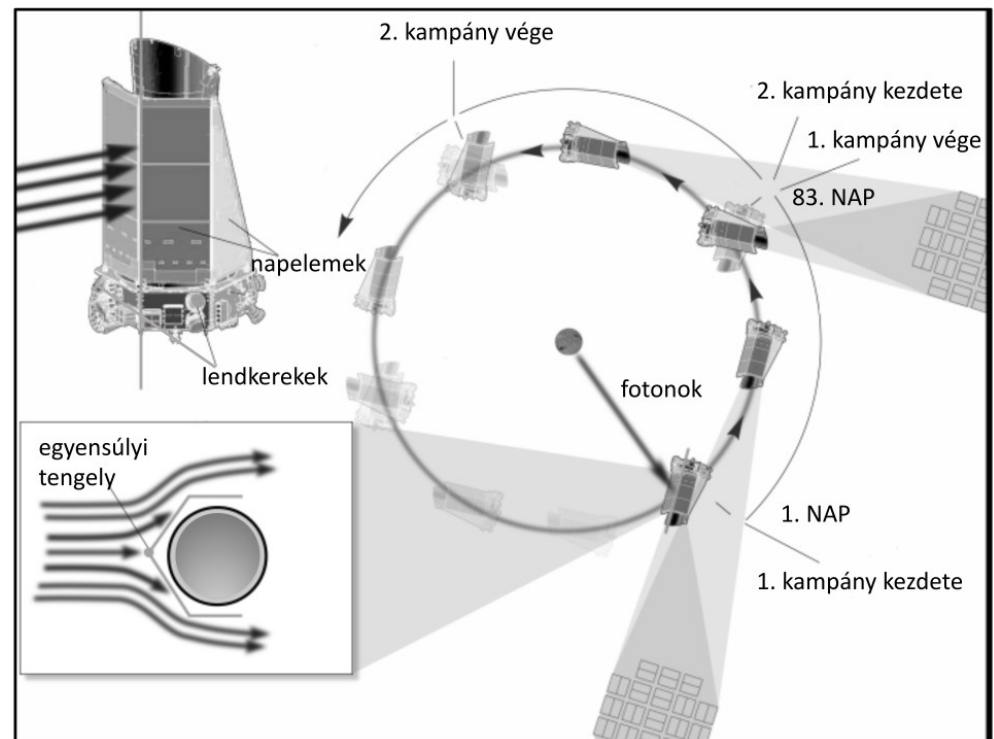


A Kepler átalakulása K2-vé

A Kepler sikere miatt a NASA 2012-ben 2+2 évre meghosszabbította a küldetést. A 17. negyedévben (2013. május) azonban a második giroszkóp is elromlott. Két működő lendkerékkel viszont csak két tengely mentén lehet stabilan tartani a szondát, a harmadik tengely mentén magától mozog. Nyilvános pályázatot hirdettek a tudományos program megmentésére, folytatására. A 42 javaslatból a K2 névre keresztelt program győzött.

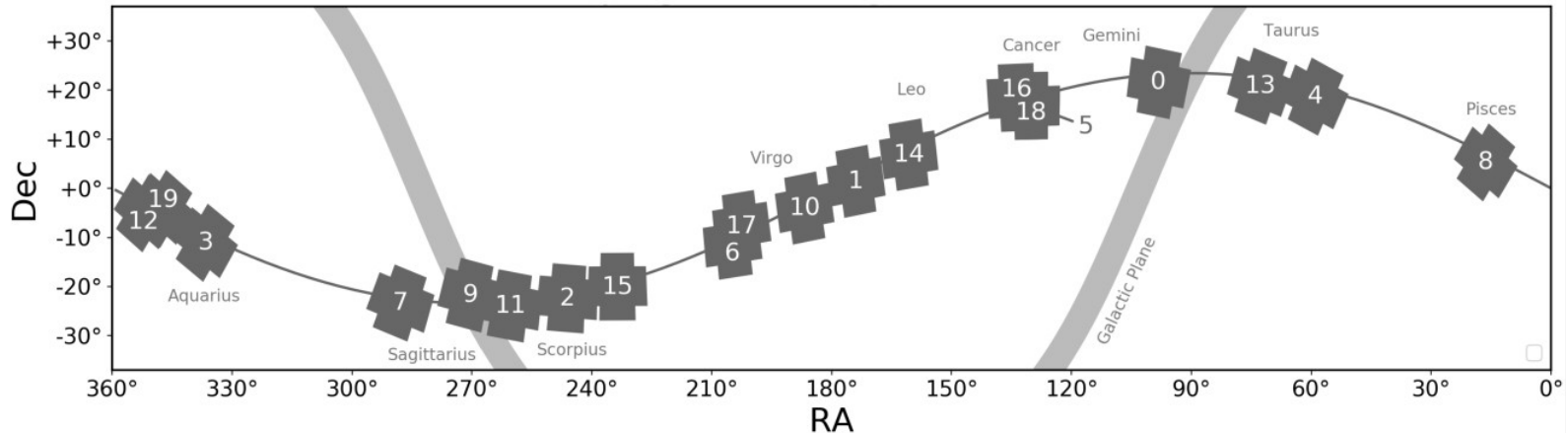
A harmadik irány stabilitását a napszél nyomás biztosítja, ha a távcső látóiránya az ekliptikába esik. A 75-80 napos megfigyelési sorozatok (kampányok) 2014. márciusban kezdődtek (a 0. kampány rövidebb volt). A küldetés a 19. kampány közepén ért véget (2018. szept. 26.).

A K2-ben minden csillag észlelésére pályázni lehetett (Guest Observer), és a kapott adatok a kampány végén azonnal nyilvánossá váltak.

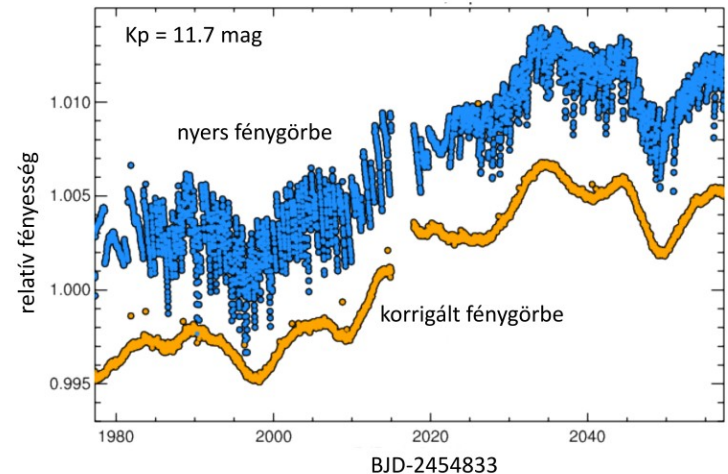
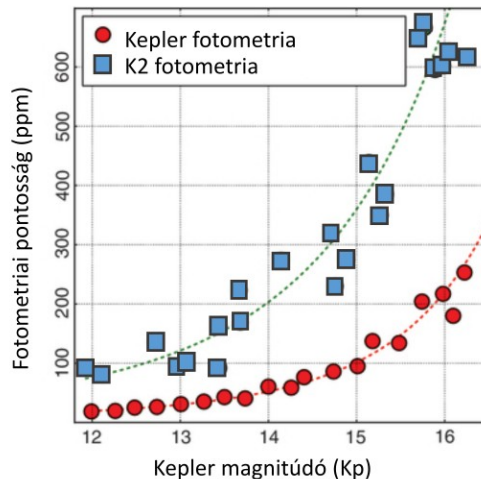


A Kepler átalakulása K2-vé

A K2 egyes kampányai során kb. 20 ezer csillagot mértek, és a két lendkerekes üzemmód miatt kissé lecsökkent a fotometriai pontosság.



A forgatónyomaték miatt 6 óránként kiigazító manőverek, az 1-2 pixelnyi elmozdulás korigálására

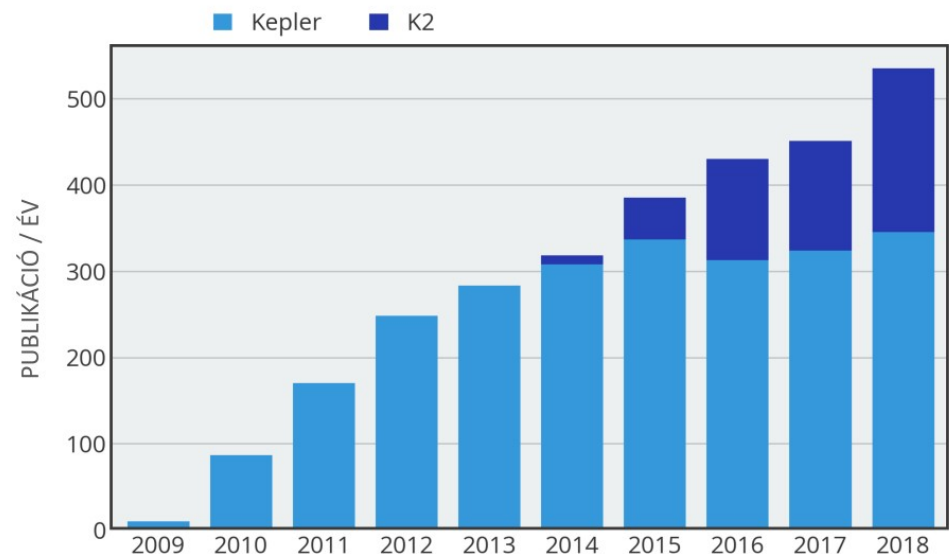
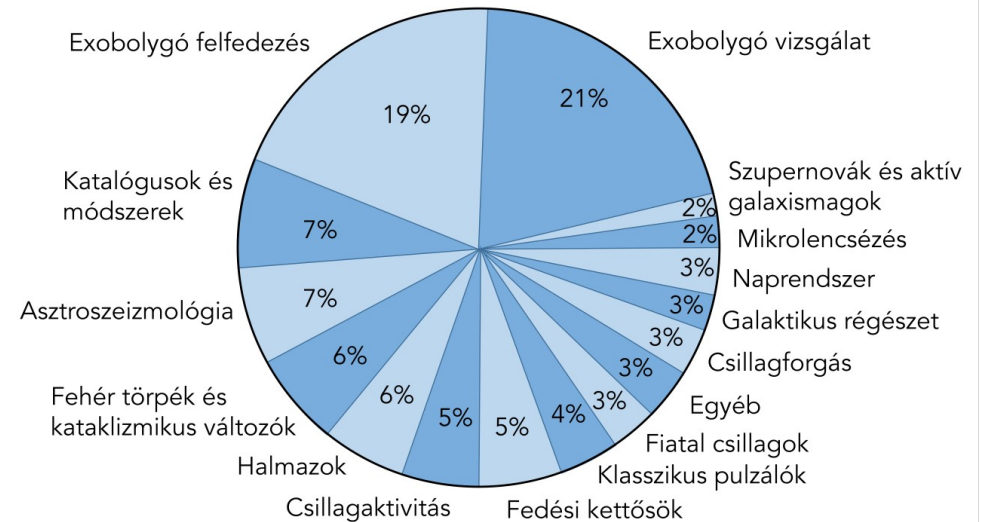


A Kepler + K2 átütő sikere

A csillagászati fotometriában paradigmaváltást jelentett a megnőtt pontosság hatására elért, meglepő, új tudományos eredményei következtében (részletesen később), és nem csupán az exobolygók kutatása terén.

Nemcsak hagyományos értelmű változócsillagászati kutatásokat végeztek a Kepler és K2 adatait használva.

A magyar csillagászok részvétele és eredményessége megalapozta közreműködésünket a későbbi úrfotometriai projekteken is (TESS, Cheops stb.)



A Kepler exobolygó-kutatásairól

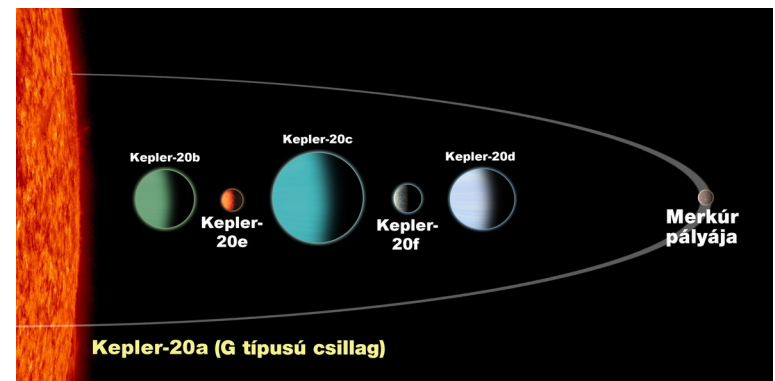
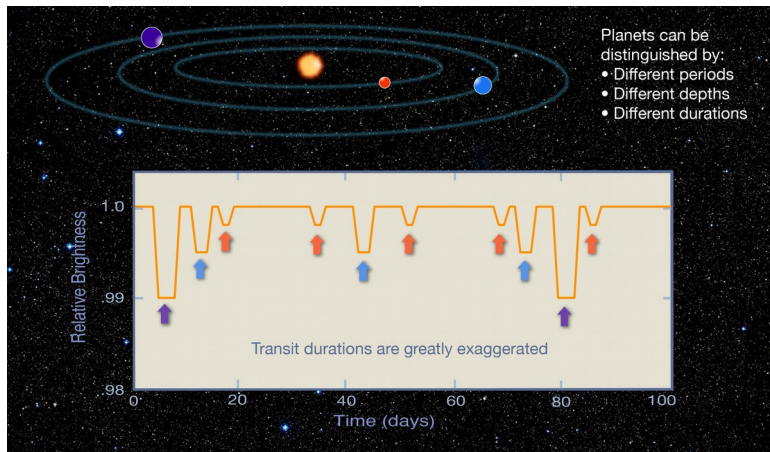
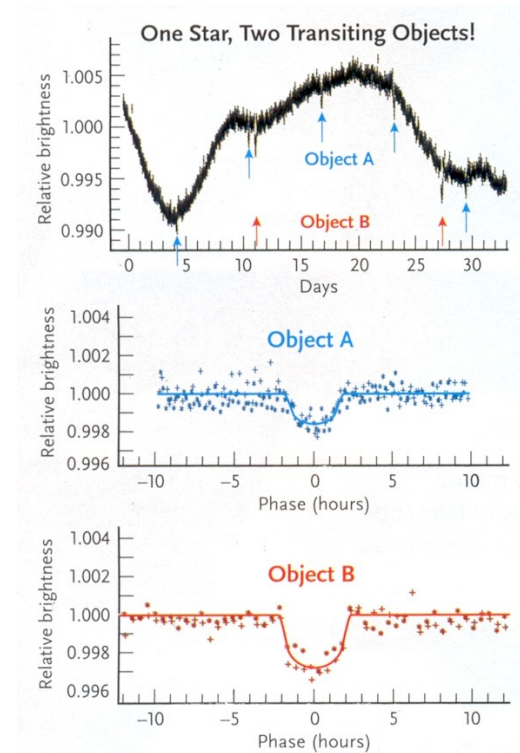
Egy bolygó biztos kimutatásához legalább 3 tranzit észlelése kell (bolygórendszereknél gravitációs perturbáció is bizonyíték lehet).

Kepler-20 körül 5 bolygó: Kepler-20e: 6,1 nap, 760°C, 0,87 Föld-átmérő; Kepler-20f: 19,6 nap, 430°C, 1,03 Föld-átmérő; dinamikailag telített rendszer; kijebb még lehetnek bolygók (hosszabb idő kell).

Kepler-37b: alig nagyobb a Holdnál (13 nap, 500 °C), két másik bolygója is van a csillagnak.

KOI-351: 7 bolygós rendszer.

KOI-1422: 5 bolygója közül 3 a lakható zónában kering.

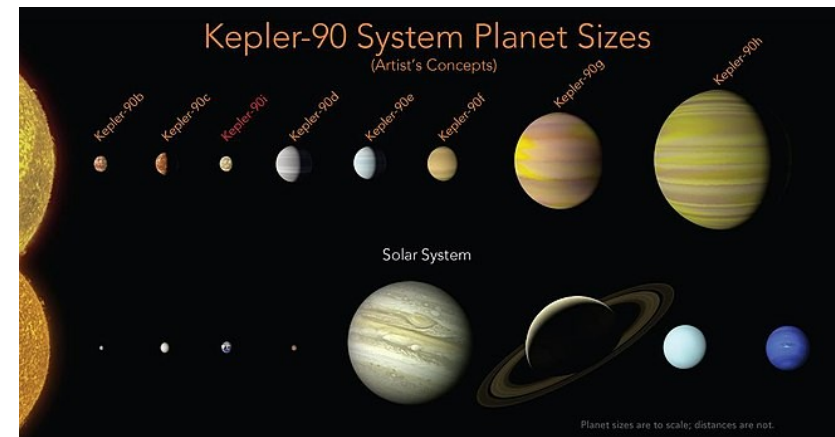
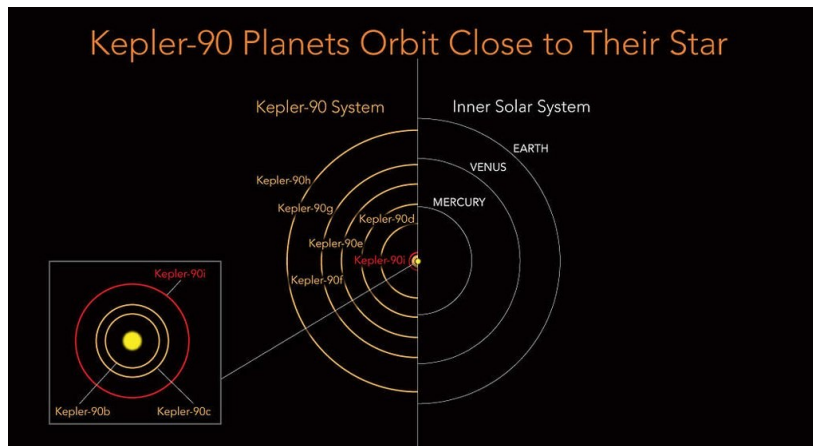


A Kepler exobolygó-kutatásairól

A Kepler-90 körül viszont 8 bolygó kering.

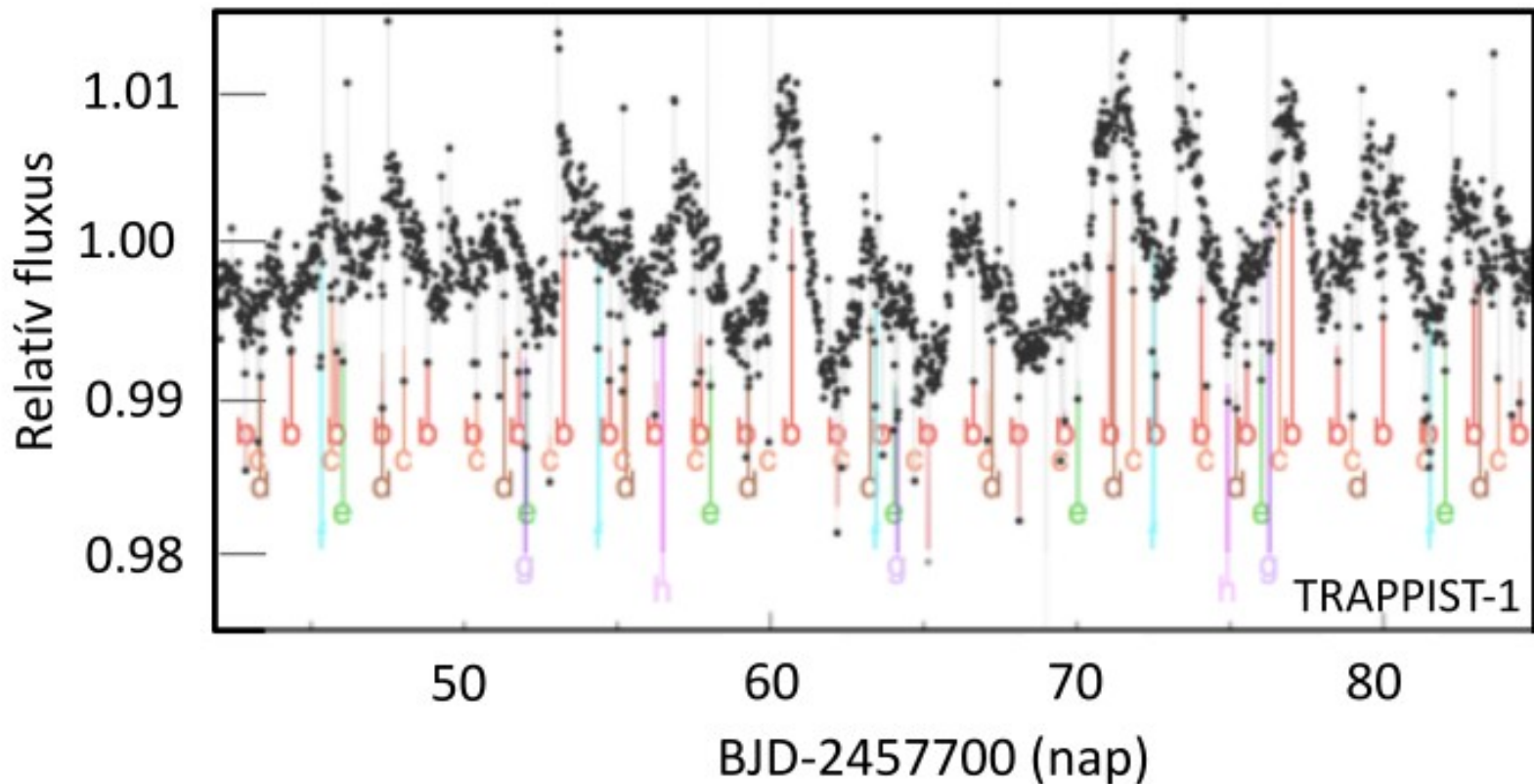
The Kepler-90 planetary system^{[12][13][4]}

Companion (in order from star)	Mass	Semimajor axis (AU)	Orbital period (days)	Eccentricity	Inclination	Radius
b	—	0.074 ± 0.016	7.008151	—	89.4°	$1.31 R_\oplus$
c	—	0.089 ± 0.012	8.719375	—	89.68°	$1.18 R_\oplus$
i	—	0.107 ± 0.03	14.44912	—	89.2°	$1.32 R_\oplus$
d	—	0.32 ± 0.05	59.73667	—	89.71°	$2.88 R_\oplus$
e	—	0.42 ± 0.06	91.93913	—	89.79°	$2.67 R_\oplus$
f	—	0.48 ± 0.09	124.9144	0.01	89.77°	$2.89 R_\oplus$
g	$<0.8 M_J$	0.71 ± 0.08	210.60697	—	89.8°	$8.13 R_\oplus$
h	$<1.2 M_J$	1.01 ± 0.11	331.60059	—	89.6°	$11.32 R_\oplus$



A Kepler exobolygó-kutatásairól

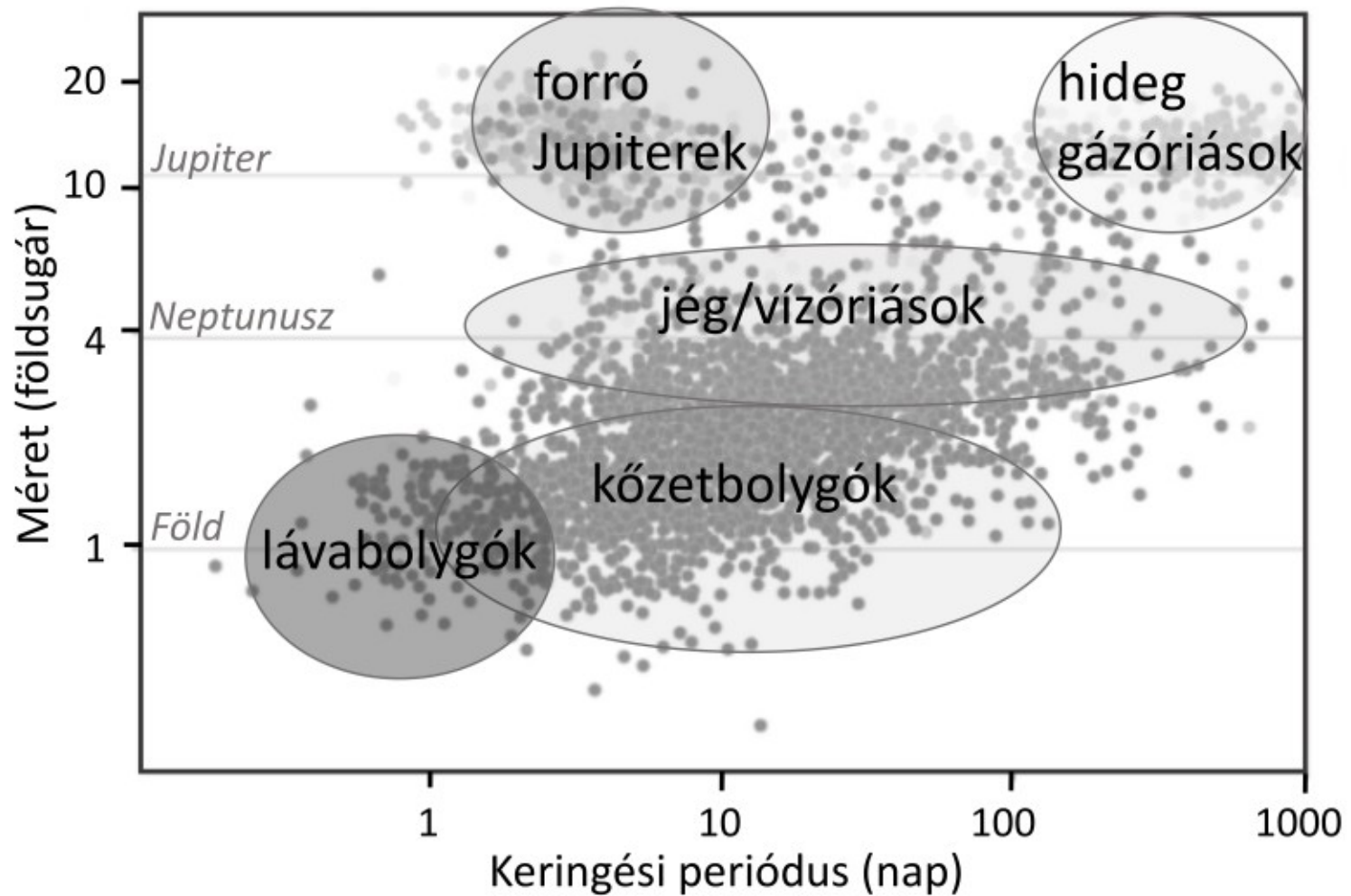
A TRAPPIST-1 rendszer: egy 39 fényévre levő ultrahideg M8V csillag körül. Mind a 7 ismert bolygója kőzetbolygó.



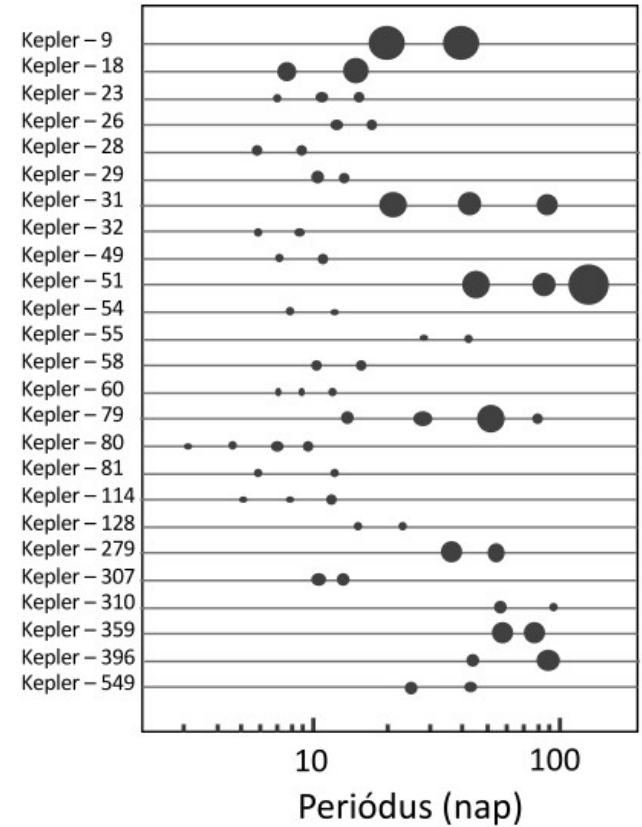
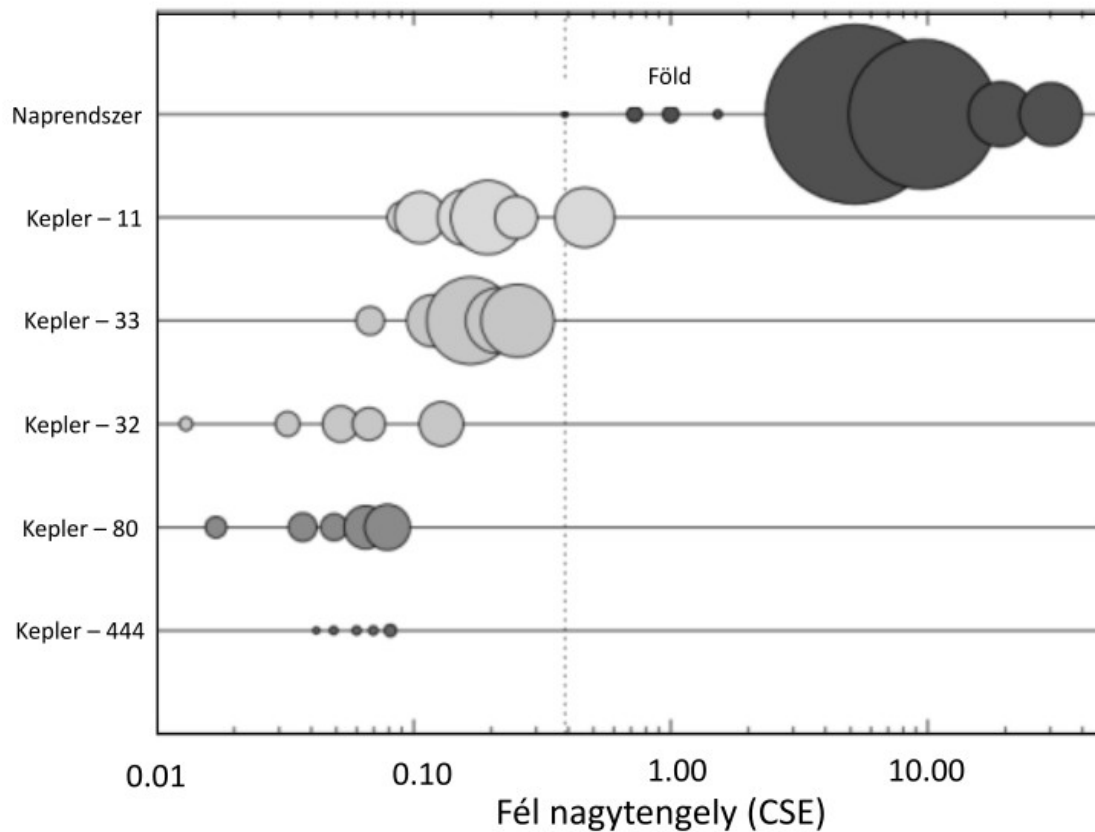
A Kepler exobolygó-kutatásairól

A TRAPPIST-1 bolygórendszere^{[2][3]}

Jelölés (a csillagtól való távolság szerint)	Tömeg	Fél nagy tengely (CsE)	Keringési idő (nap)	Pálya excentricitása	Inklináció
b	0,85 ± 0,72 M _⊕	0,01111	1,51087081 ± 0,00000060	<0,081	89,65 ± 0,25°
c	1,38 ± 0,61 M _⊕	0,01522	2,4218233 ± 0,0000017	<0,083	89,67 ± 0,17°
d	0,41 ± 0,27 M _⊕	0,021 ± 0,006	4,049610 ± 0,000063	<0,070	89,75 ± 0,16°
e	0,62 ± 0,58 M _⊕	0,028	6,099615 ± 0,000011	<0,085	89,86 ± 0,11°
f	0,68 ± 0,18 M _⊕	0,037	9,206690 ± 0,000015	<0,063	89,680 ± 0,034°
g	1,34 ± 0,88 M _⊕	0,045	12,35294 ± 0,00012	<0,061	89,710 ± 0,025°
h	n. a.	0,063 ± 0,027	20 ± 15	n. a.	89,80 ± 0,07°



A forró jupiterek és/vagy a rövid keringési periódusú (óriás)bolygók igen ritkák. A gazdacsillaghoz közeli bolygók között a szuperföldek és minineptunuszok dominálnak (épp ilyenek nincsenek a Naprendszerben). Új típus a lávabolygó is.

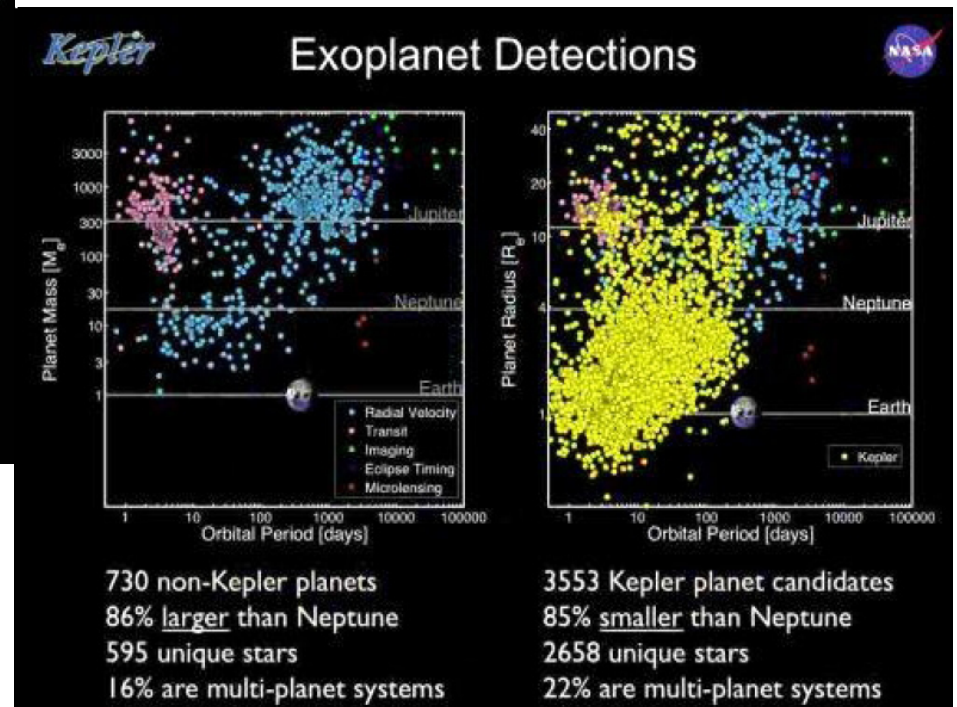
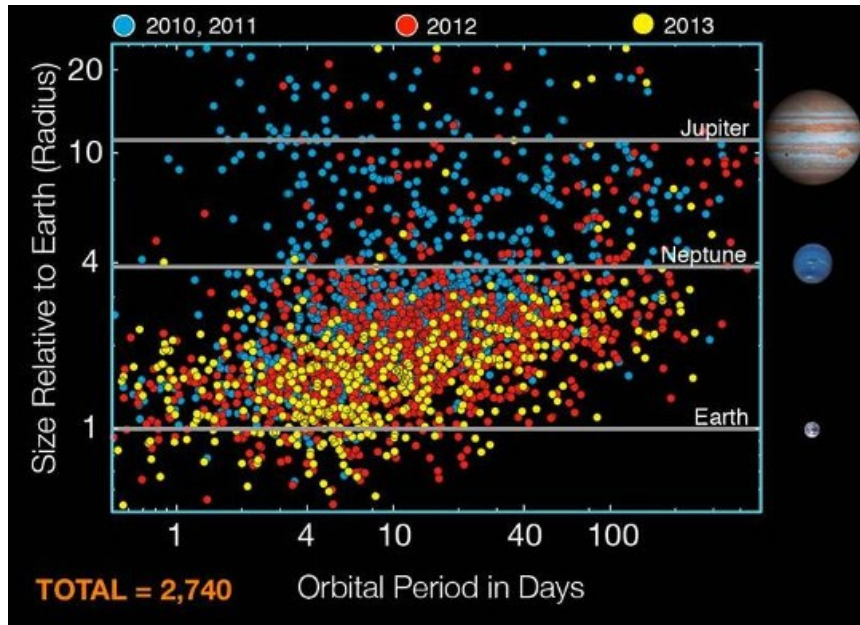


A bolygórendszereknél biztosan kizárhatók a hamis pozitív detektálások, sőt a bolygók tömege is meghatározható a tranzitidőpont-változások (TTV) alapján. A bolygókereső algoritmust is módosítani kellett, mert egy csillag körüli több bolygó esetén a fedések nem teljesen szabályosan következnek be.

Exobolygóstatisztika a Kepler alapján

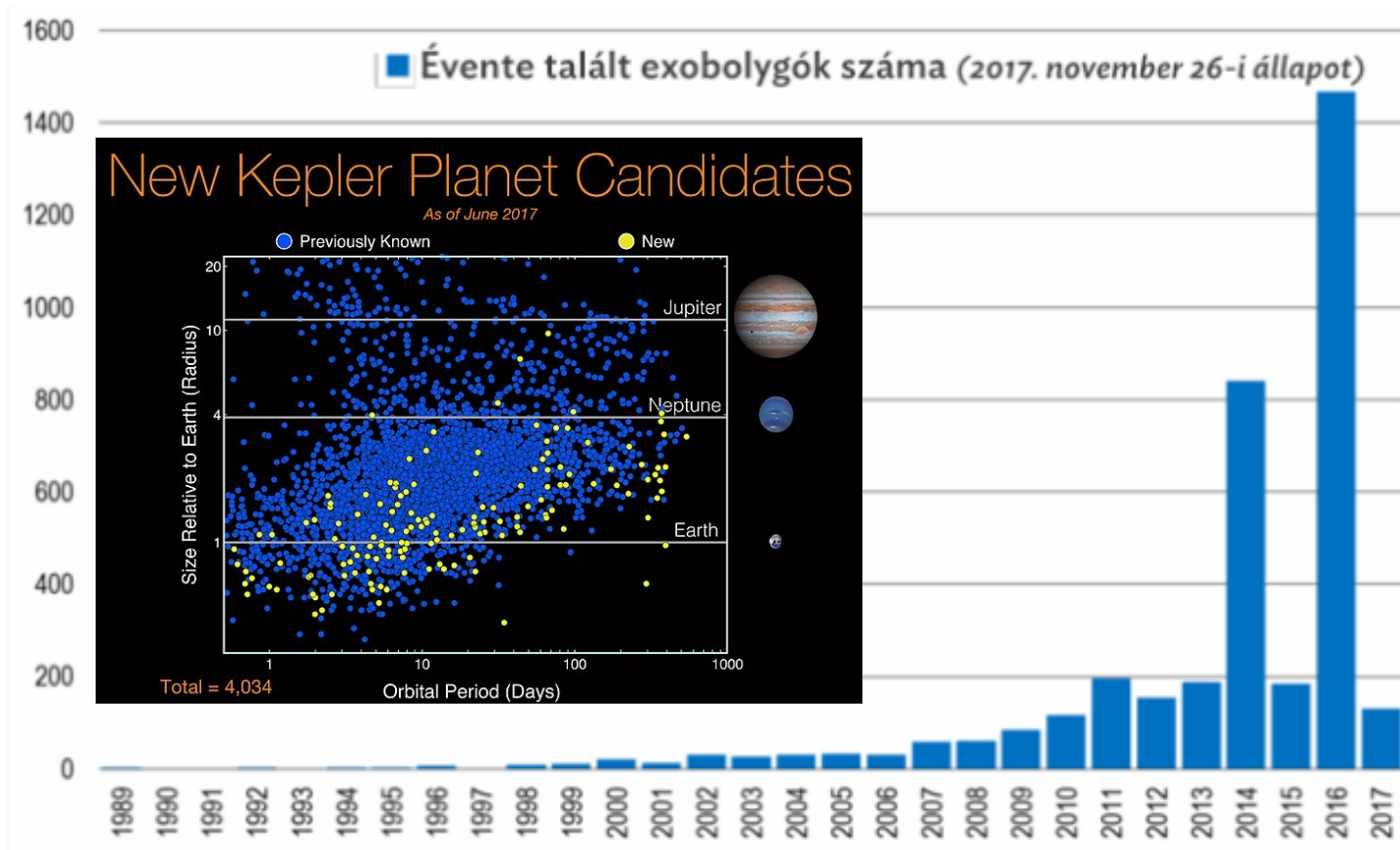
2013 elején 2740 gyanított exobolygó; 114 megerősítve (radiális sebesség vagy gravitációs perturbáció alapján); 467 csillag körül van több bolygó. A gázóriások ritkák, de könnyebben felfedezhetők.

A 2014-es bejelentések a jobb oldali képen láthatók (3553 bolygójelölt).



Exobolygóstatisztika a Kepler alapján

A teljes Kepler-adatsor alapján 4034 bolygójelöltet katalogizáltak, de csupán 48 esik a gazdacsillag lakható zónájába. Becslések szerint a Naphoz hasonló (G-K V színképtípusú) minden harmadik-tizedik csillag körül kering legalább egy bolygó (2-6%-uk körül több is).

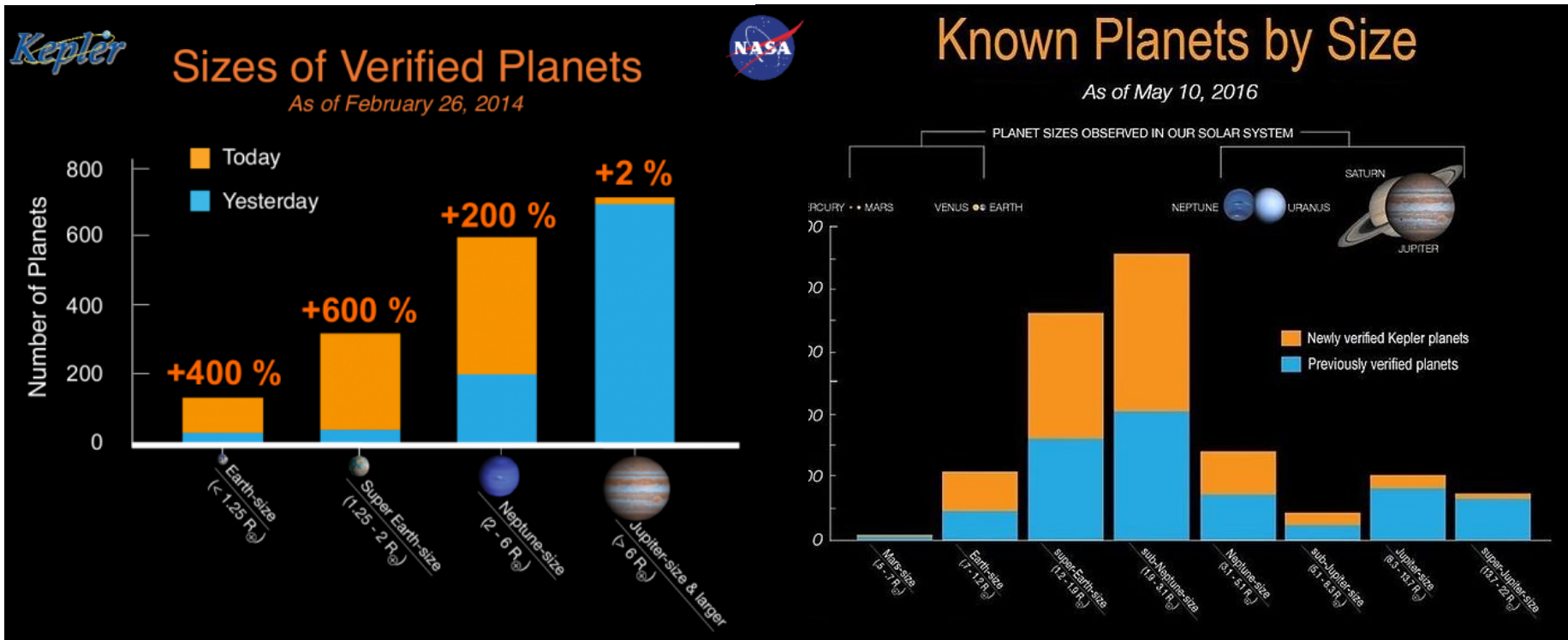


Egyre kisebb bolygóból egyre többet

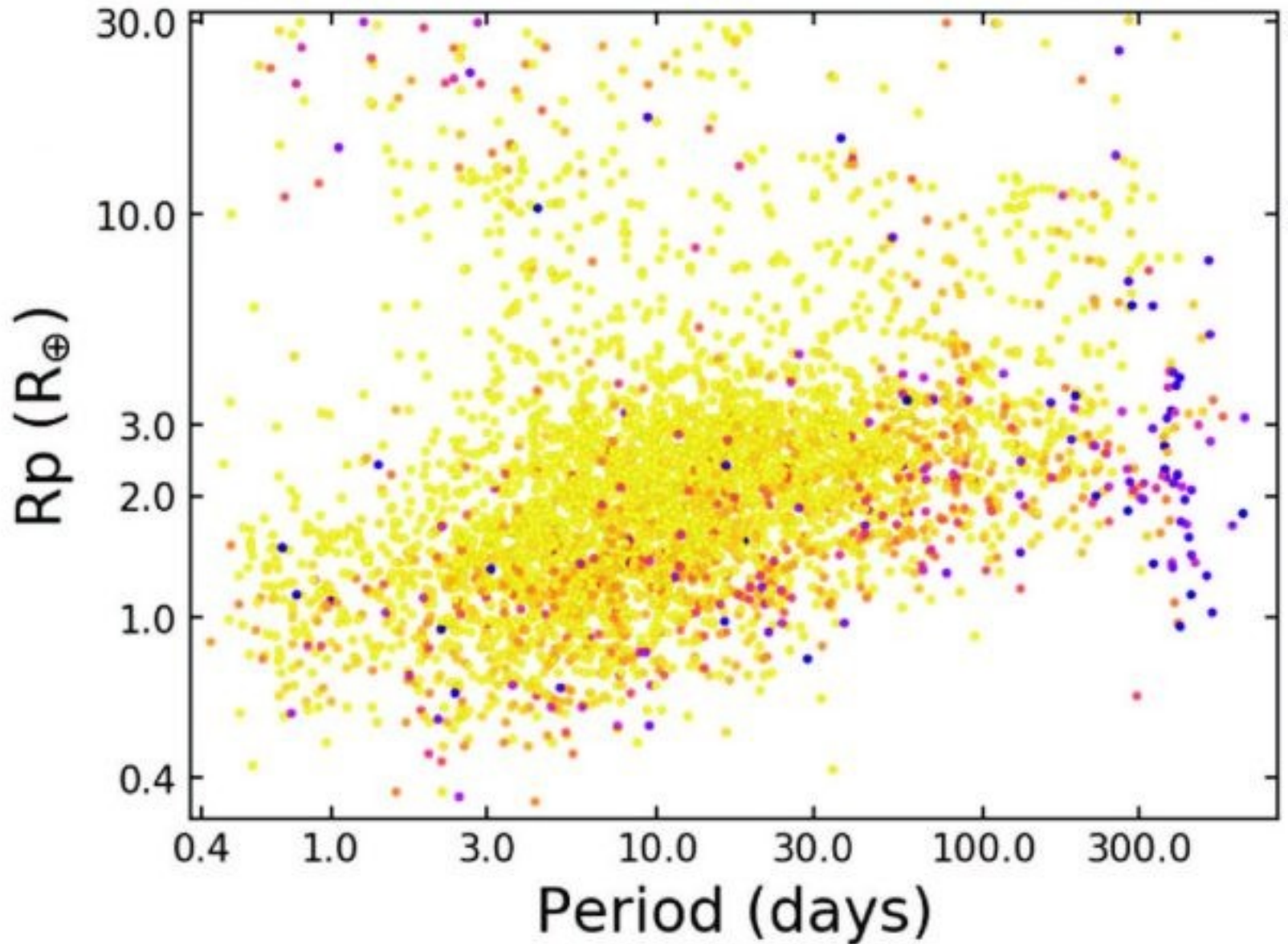
A Tejútrendszerben (100 milliárd csillagot véve) 17 milliárd Föld méretű bolygó lehet (és a hosszabb keringési idejű bolygókról még hiányos a kép).

Főleg a Naphoz hasonló csillagok körül lehetnek bolygók. Az M törpék körül érdemes keresni. A legkisebb ismert exobolygó alig nagyobb a Holdnál.

A lenti két képen szembetűnő a 2014 és 2016 közötti fejlődés.



Ismert exobolygók 2018-ban



Exobolygók kettős rendszerekben

Kettőscsillag körül keringő bolygót először a Kepler adataiból találtak.

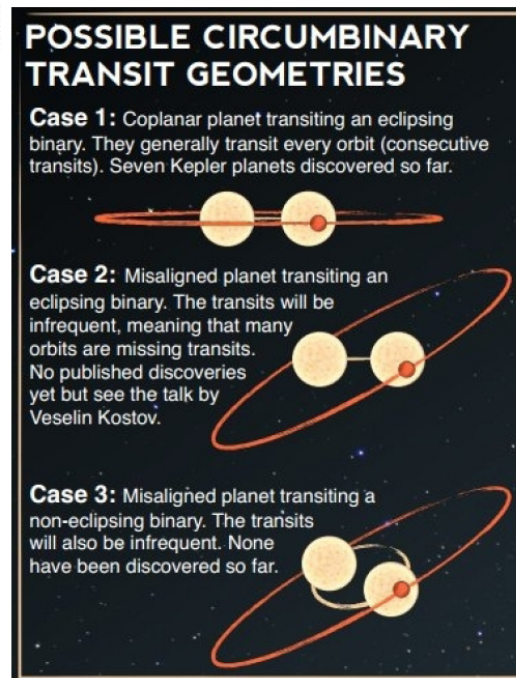
Cirkumbináris pályájú exobolygók

1-es típus: Kepler-16, -34, -35, ... (24 rendszer ismert már);

2-es típus: nem esik egybe a két pálya, a bolygó csak az egyik csillag előtt vonul át;

3-as típus: nem fedési a kettős, átvonulás csak az egyik csillag előtt.

2-es és 3-as típushoz tartozó bolygót még nem észleltek.



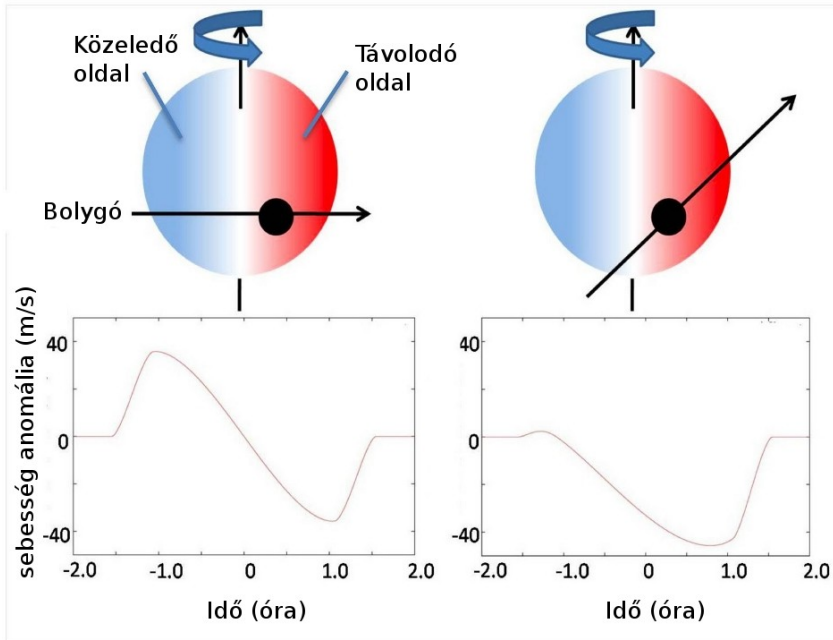
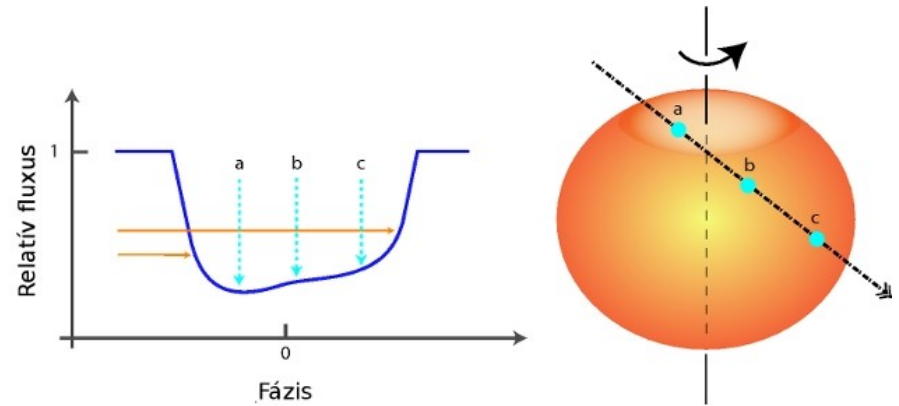
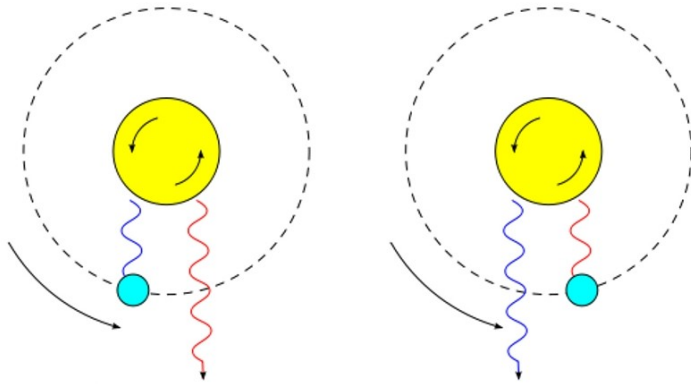
David Martin (Univ. of Geneve) & Amory Triaud (MIT)

Kepler-16,-34,-35,...
14 rendszer
mind 1-es típusú

2: nem esik egybe a két pálya, csak az egyiket fedi

3: nem fed a kettőscsillag, csak az egyiket fedi

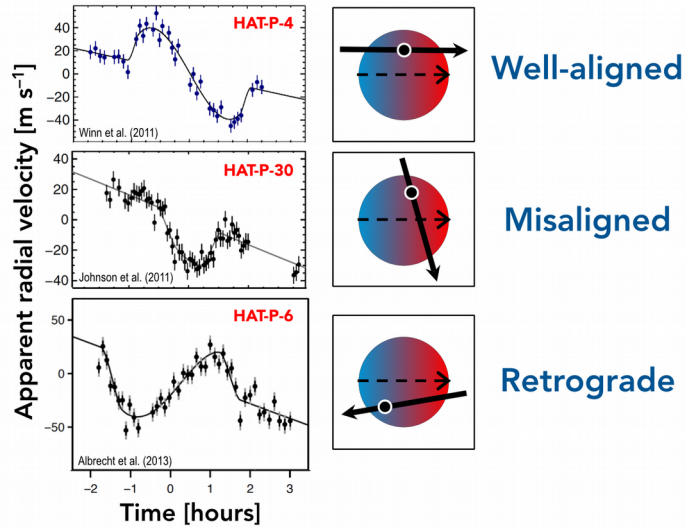
Fontos effektusok



Rossiter–McLaughlin-effektus: fedési kettősöknél, illetve exobolygó keringése esetén az átvonulás alatt a színekvonal profilja változik (radiális seb.).

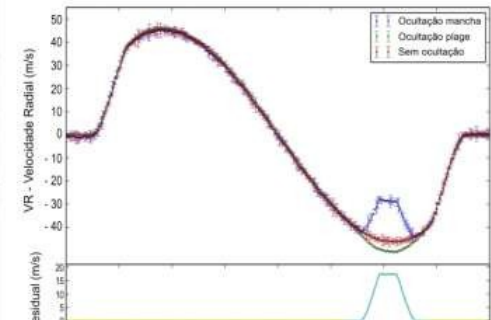
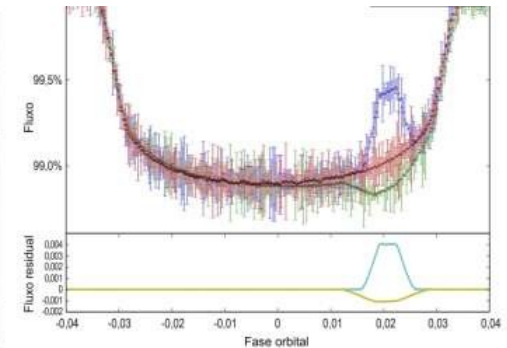
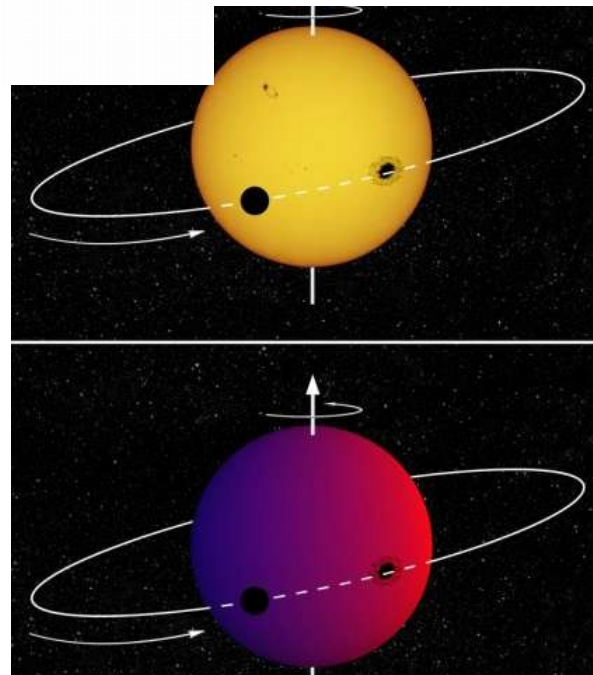
De a fedési fénygörbe alakjából fel lehet térképezni pl. a csillagfoltok eloszlását, és látszik a bolygóról visszavert csillagfény is. Ennek ciklusonkénti változása a vizsgált bolygó időjárására utal.

A Rossiter–McLaughlin-efektus



A forró jupiterek 25%-a a csillag forgásával ellentétes irányban kering.

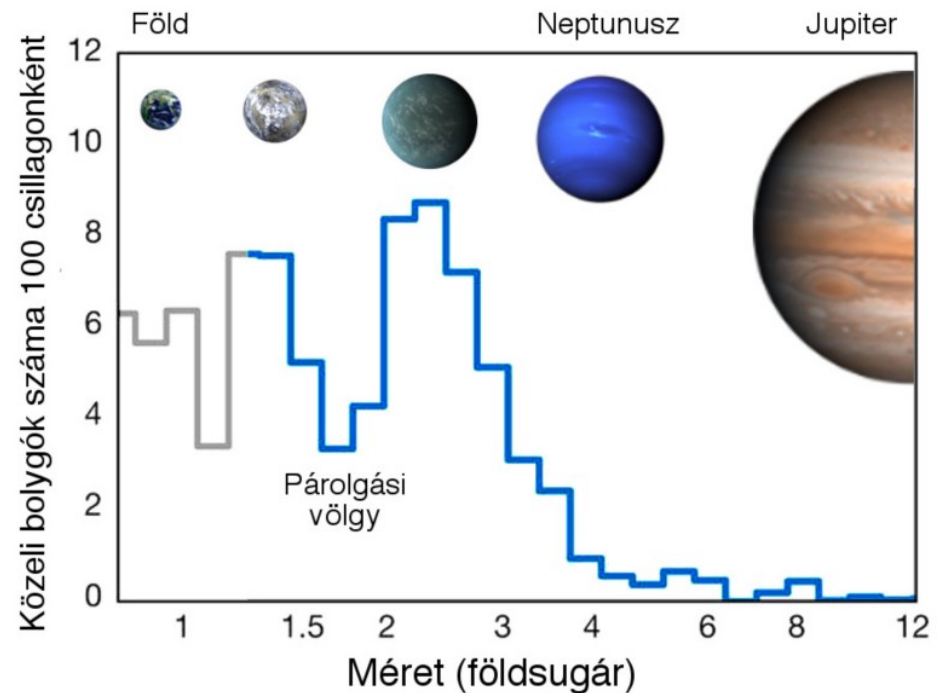
Késői típusú csillagoknál a foltok hatása zavaró lehet.



A bolygók tulajdonságainak meghatározása

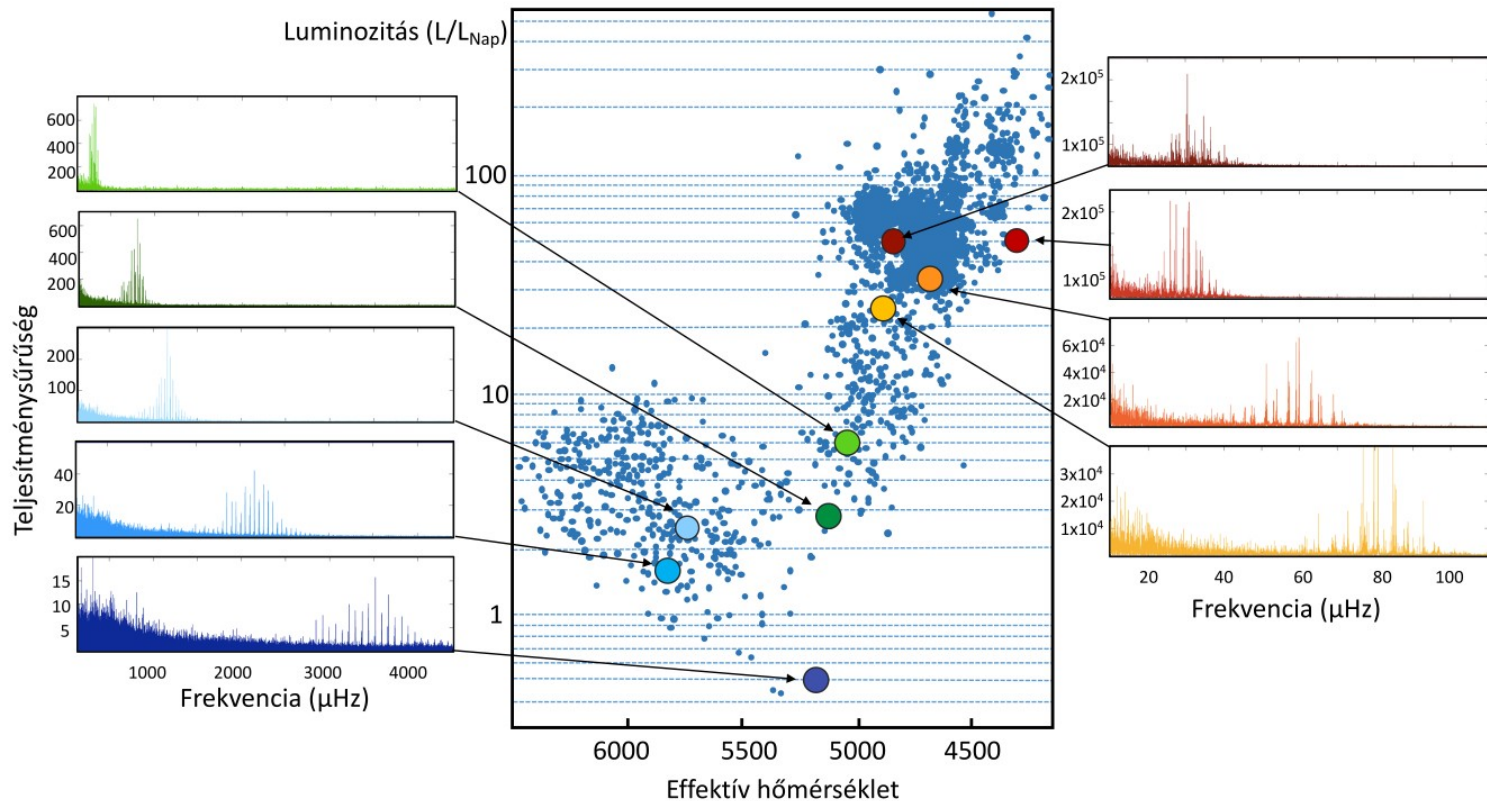
A fedés mélységéből a bolygó és a csillag méretaránya jön ki, az abszolút mérethez fontos a csillagszeizmológia (Nap típusú oszcillációk – 1 milliárd módus a Napban). Jó lenne tudni továbbá a bolygók tömegét és kémiai összetételét is. Ehhez ismerni kell a gazdacsillag fizikai jellemzőit. Asztroszeizmológia nélkül a Gaia DR2 adatbázisa segít, illetve dedikált spektroszkópai felmérések földi nagytávcsövekkel.

Kiderült, hogy a szuperföldeket éles határ (a párolgási völgy) választja el a minineptunuszoktól (1,5-2,5 földszugár között). Bizonyos tömegérték alatt a bolygó légköre teljesen elillan, csak a kőzetmag marad vissza. A bolygófejlődésre utal az üstököscsóvaként párolgó bolygóatmoszféra megfigyelése is. De maga a bolygó is képes elpárologni (Kepler-1520b: a porcsóva által okozott fedések)



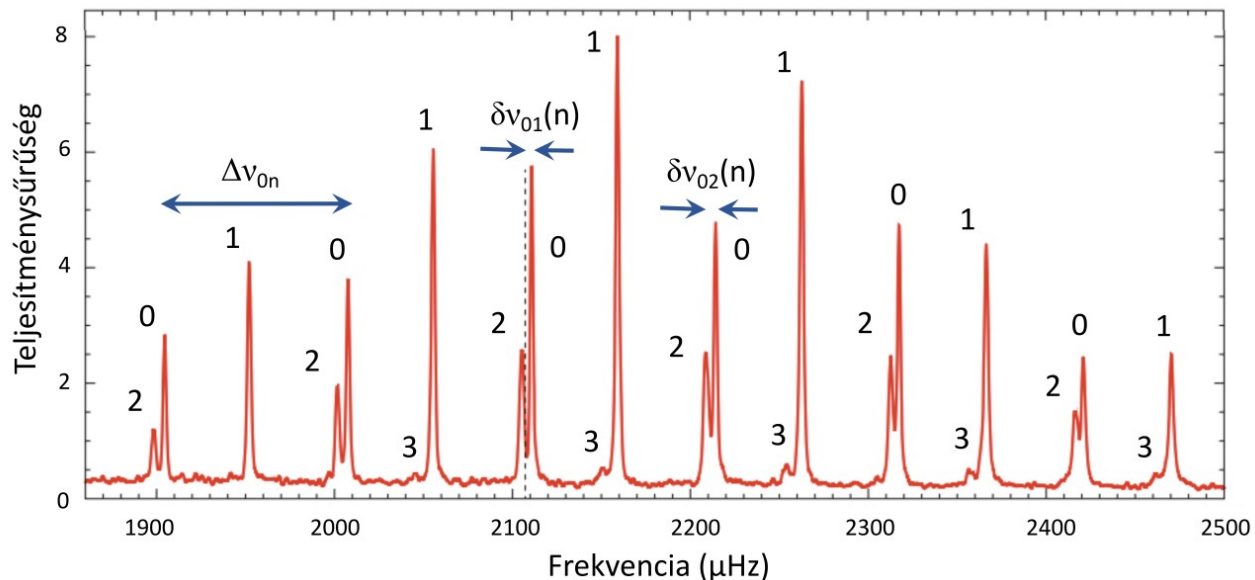
Asztroszeizmológia a Keplerrel

A Napéhoz hasonló tömegű, de a Napnál idősebb vörös óriáscsillagok a felszínükhöz közeli konvektív zóna miatt nem pulzálnak, de a konvekció folyamatosan gerjeszt kis amplitúdójú oszcillációkat. A CoRoT ezer vörös óriást észlelt, a Kepler viszont több tízezernyi és több száz fősorozati csillagot. A fősorozaton az akusztikus hullámok rezgési periódusa néhány perc, a vörös óriásoknál a periódusok hosszabbak, az amplitúdók nagyobbak. A nemradiális oszcillációk leírása gömbfüggvényekkel történik.



Asztroszeizmológia a Keplerrel

A Nap típusú oszcillációk jellegzetessége a frekvenciaspektrumban megjelenő ismétlődő sorozatok. E frekvenciasorozatok alapján becsülhetők a csillag fizikai jellemzői. A különböző módusok eltérő mélységig hatolnak be a csillag belsejébe. A csillag így rétegenként vizsgálható. Az egymást követő felhangok közötti nagy frekvenciaszeparáció mértéke a csillag sűrűségére utal. Az eloszlás csúcsát jelentő frekvencia a felszíni hőmérséklet és gravitációs gyorsulás függvénye. A különböző felszíni rezgések frekvenciái közötti kis szeparáció a csillag korával függ össze. A képen egy G típusú fősorozati csillag (16 Cyg A) teljesítményszínképe látható.

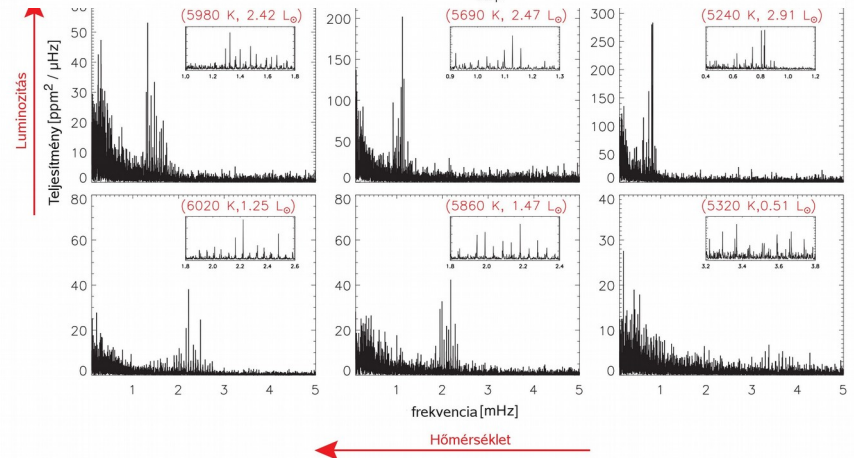
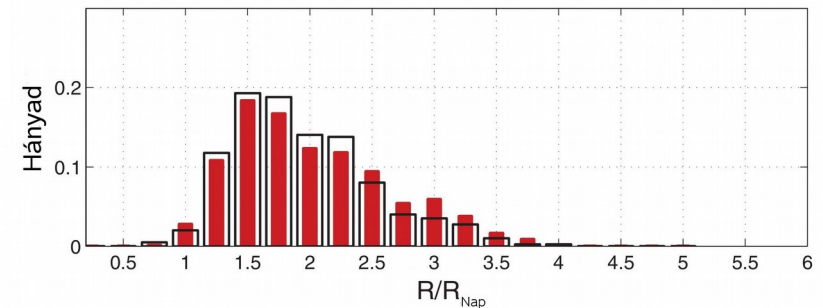
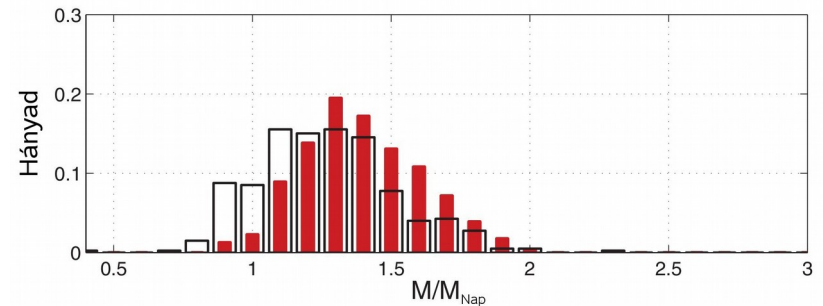


Asztroszeizmológia a Keplerrel

Az exobolygók gazdacsillagai fizikai tulajdonságainak meghatározásán kívül sok más asztroszeizmológiai eredmény is született.

A csillagok sugarának eloszlása megfelel a vártnak, viszont a tömegeloszlás szélesebb, és a nagyobb tömegek felé tolódott. A kezdeti tömegfüggvényt újra meg kell állapítani a csillagkeletkezési modellekre.

500 különböző korú csillag Nap típusú rezgéseiből a csillagok tömegének és sugarának meghatározása a nagy szeparáció alapján (a szeparáció az átlagsűrűségtől függ, a maximális amplitúdóhoz tartozó frekvencia a felszíni g -től, és a színképből ismert T_{eff} -től).

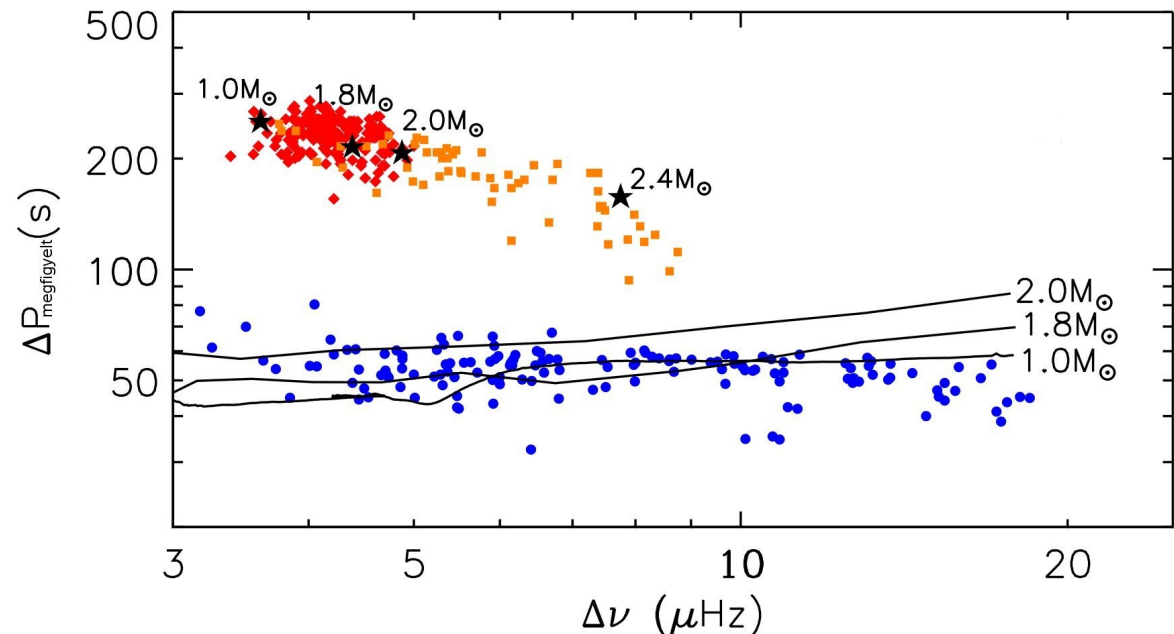


Asztroszeizmológia a Keplerrel

A hanghullámok (p-módusok) a csillag külső részeiről informálnak, beljebb nehézségi hullámok alakulnak ki (a nyomás helyett a gravitáció a visszatérítő erő, g-módus). A csillagfejlődés során a módusfrekvenciák eltolódnak (hasonló értéket is felvehetnek), és kölcsönhatnak egymással, kevert módusokat gerjesztve. A kevert módusok alapján elkülöníthetők a vörös óriáscsillagok fejlődési fázisai (energiatermelés H-égéssel a mag körüli héjban, ill. He-égéssel a magban). A kevert módusok perióduskülönbsége 50, ill. 100-300 s. (A Napban nem gerjesztődnek kevert módusok).

He-égés a magban

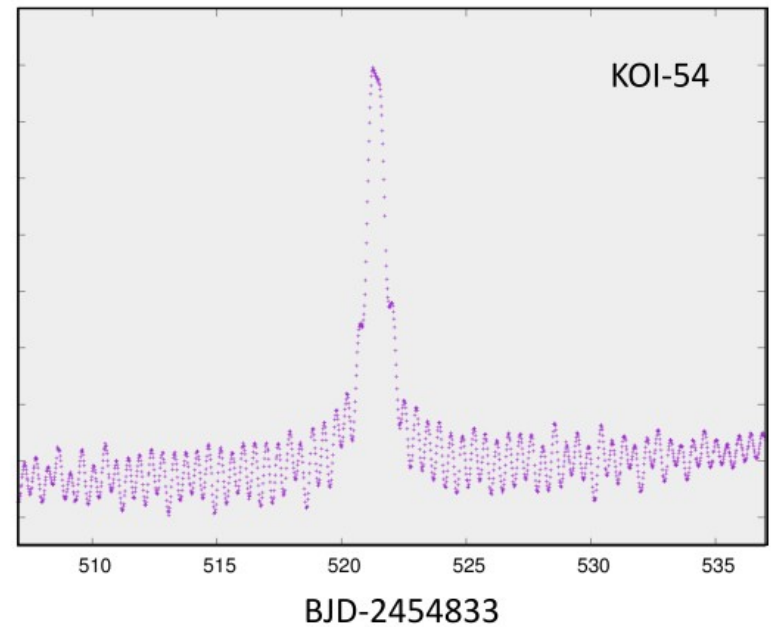
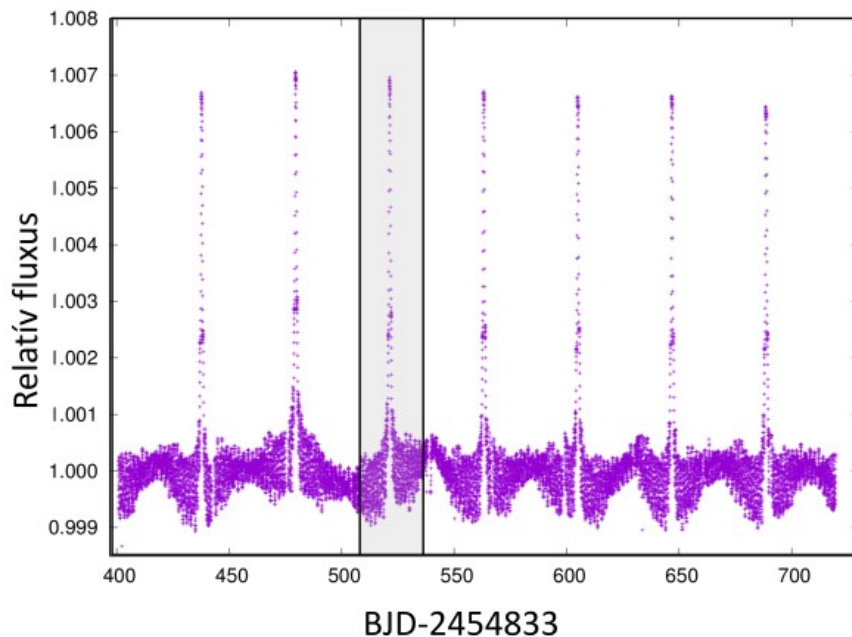
H-égés a mag körüli héjban



Asztroszeizmológia a Keplerrel

A kettőscillagok extrém fajtája, egyben a kettőscillagok és a pulzáló változócsillagok új típusa a szívdobbanás-csillag.

KOI-54 = HD187091: 42-naponként 0,6% felfényesedés, közben oszcilláció (fekete lyuk nem lehet, mert nem röntgensugárzó). Két csillag nagy excentricitású pályán keringve, az árapályhatás pulzációt kelt (a keringési idő a pulzációs periódus egész számú többszöröse, 23 és 91 közötti rezonancia). Felfényesedés periasztronnál a felfűtés miatt. 100-nál több ilyen csillagpárt is találtak, vannak köztük fedési kettősök is.



Asztroszeizmológia a Keplerrel

Tipikus példa: KIC 10661783, fedési kettőscsillag DSCT komponenssel.
A kettősség hatására korrigálva 750 frekvenciacsúcsot azonosítottak (p- és g-
módusok is). A fedési fénygörbe alapján pedig a komponensek tömege és
sugara 1% pontossággal meghatározható (Miszuda et al. 2020).

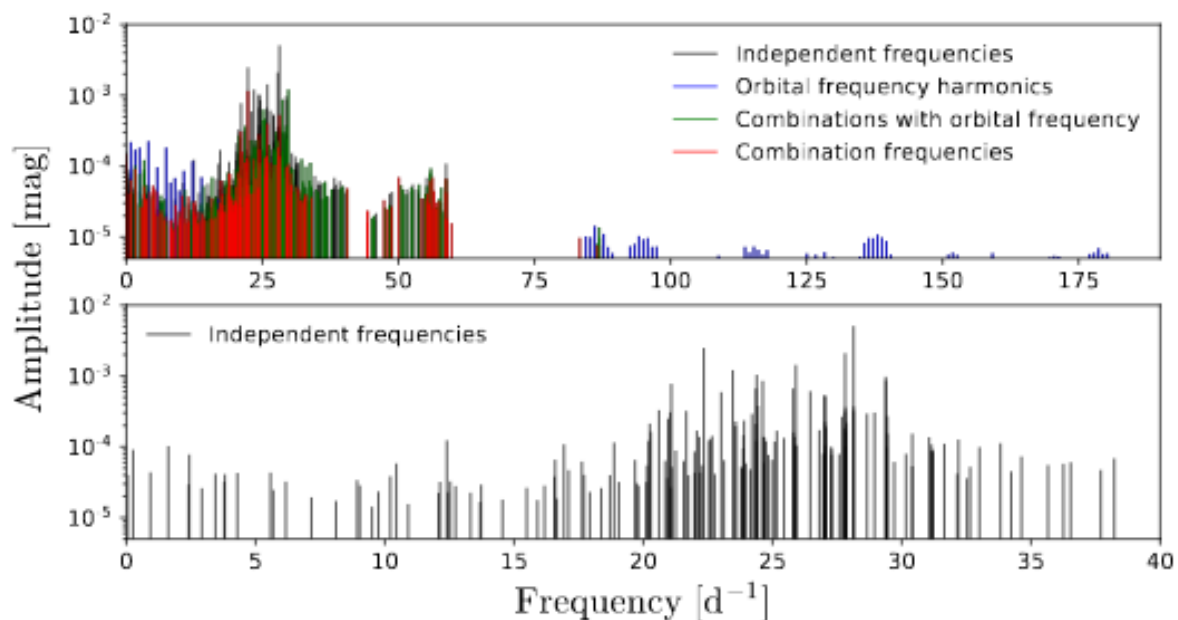


Fig. 2: Results of the frequency analysis of the SC data after subtraction of the orbital model. In the top panel, we plotted all frequencies found from SC data. Blue lines mark orbital frequency harmonics, green lines mark combinations with orbital frequency, red lines mark other combinations and black lines independent frequencies and those with no equivalent in LC data. The bottom panel shows only independent frequencies that have their equivalents in the LC data. Note that x-axis scales differ between panels.

Fedési kettősök a Kepler-mezőben

A Kepler-adatokból 3000-nél több fedési kettőst azonosítottak, ezek nagyrészt még feldolgozatlanok.

KIC 9472174: fedési kettős (sdB + M törpe), erős reflexiós effektus, sdB komponens több (g és p módusú) frekvencián pulzál (fent).

KIC 11285625: 0,1 magnitúdós GDOR pulzáció + 0,15 magnitúdós fedés 10,8 naponként. A frekvencia-felhasadásból a forgási periódus is meghatározható (középen).

KIC 4544587: a főkomponens DSCT típusú, a másodkomponens GDOR típusú (nincs ábra).

KIC 10661783: fedési kettős DSCT főkomponenssel (lent).

Az A-F csillagoknál a p- és g-módusok mellett Rossby-módusok is gerjesztődnek gyors forgás esetén (a Coriolis-erő a visszatérítő erő)

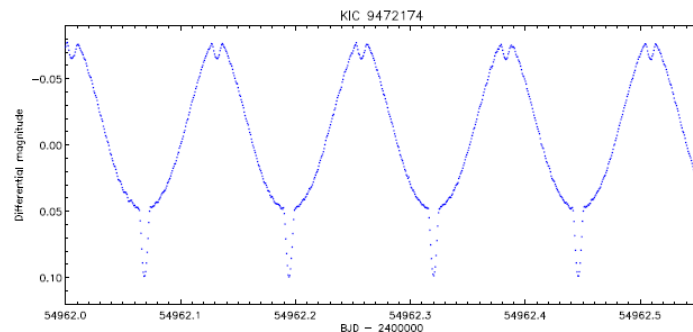


Fig. 6. Excerpt from the *Kepler* short-cadence light curve of the sdB plus M-dwarf eclipsing binary KIC 9472174.

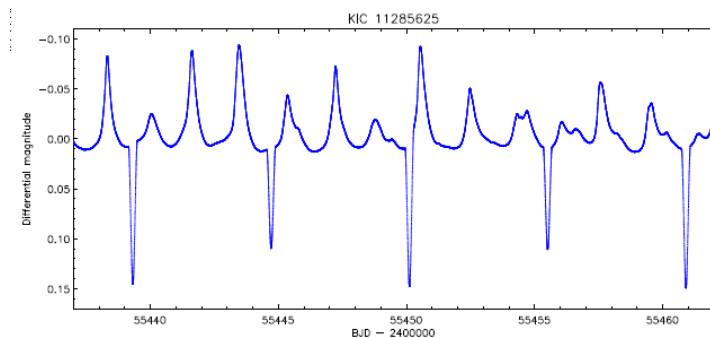


Fig. 4. Excerpt from the *Kepler* long-cadence light curve of the γ Doradus eclipsing system KIC 11285625.

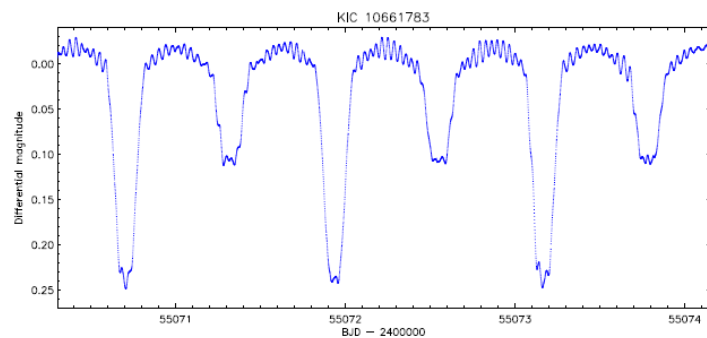


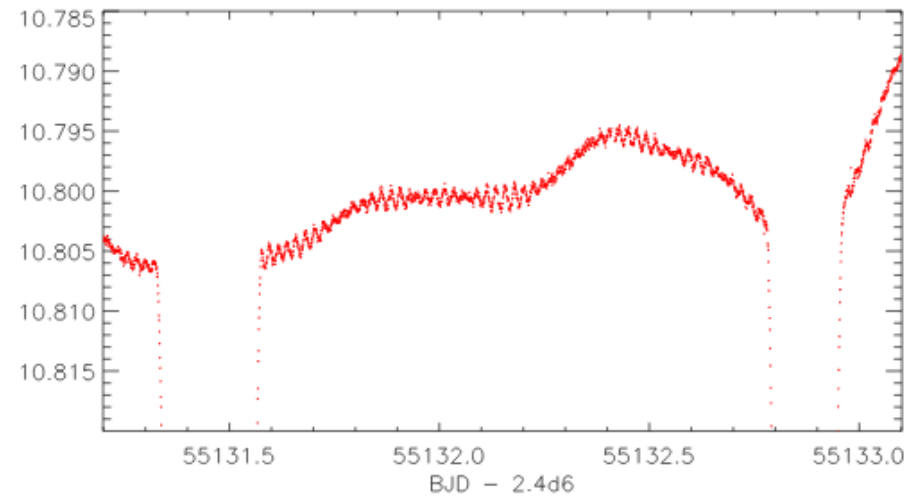
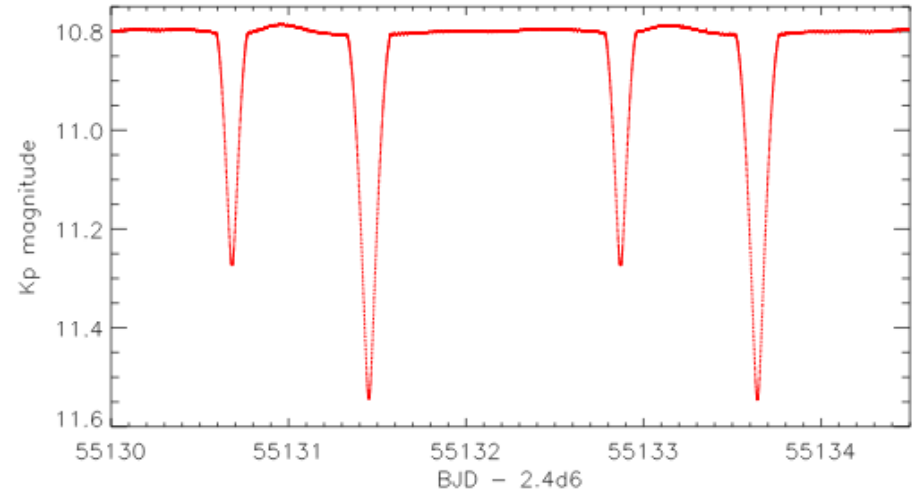
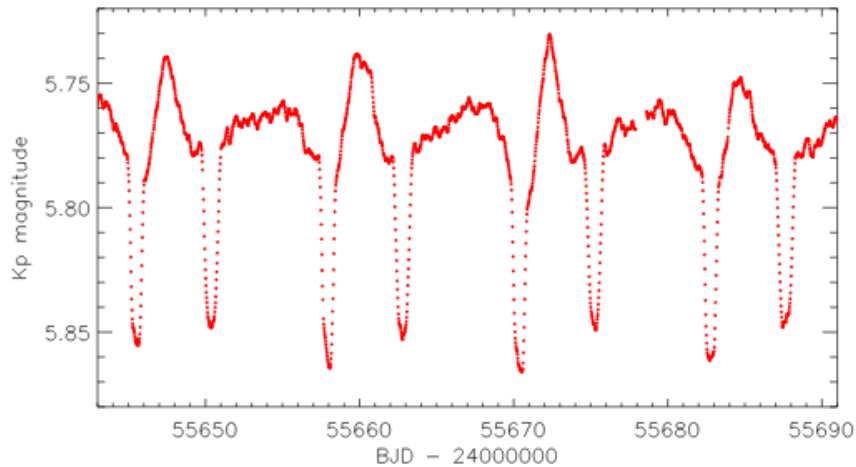
Fig. 3. Excerpt from the *Kepler* short-cadence light curve of the δ Scuti eclipsing system KIC 10661783.

Fedési kettősök a Kepler-mezőben

KIC 4544587: a főkomponens DSCT típusú, a másodkomponens pedig GDOR típusú (jobbra), fent: SC-adatok, lent: a fedések közötti fénygörbe.

V380 Cygni: stochasztikus oszcilláció B1,5 óriás + B2 törpe kettősében (balra lent).

A Nap-típusú csillagot tartalmazó kettősök vizsgálata ígéretes az oszcillációk miatt.



Fedési rendszerek a Kepler-mezőben

Kepler-47: csillagfolt fedése, a folt migrál a csillag felszínén az egymás utáni fedések között (O-C diagram jobbra)

A relativisztikus Doppler-nyalábolás kimutatása pl. a **KOI-74** fénygörbéjén (közeledve fényesedik, távolodva halványodik a csillag: mértékéből a radiális sebességre is

lehet következtetni spektroszkópia nélkül (nincs ábra).

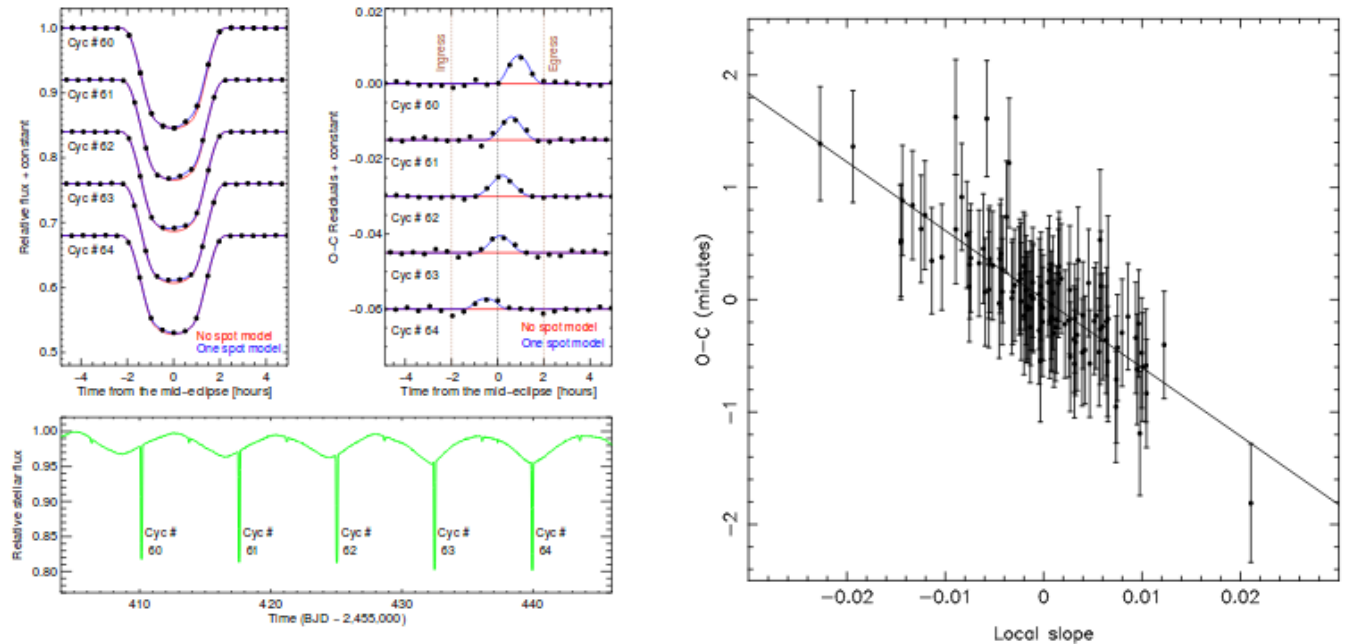
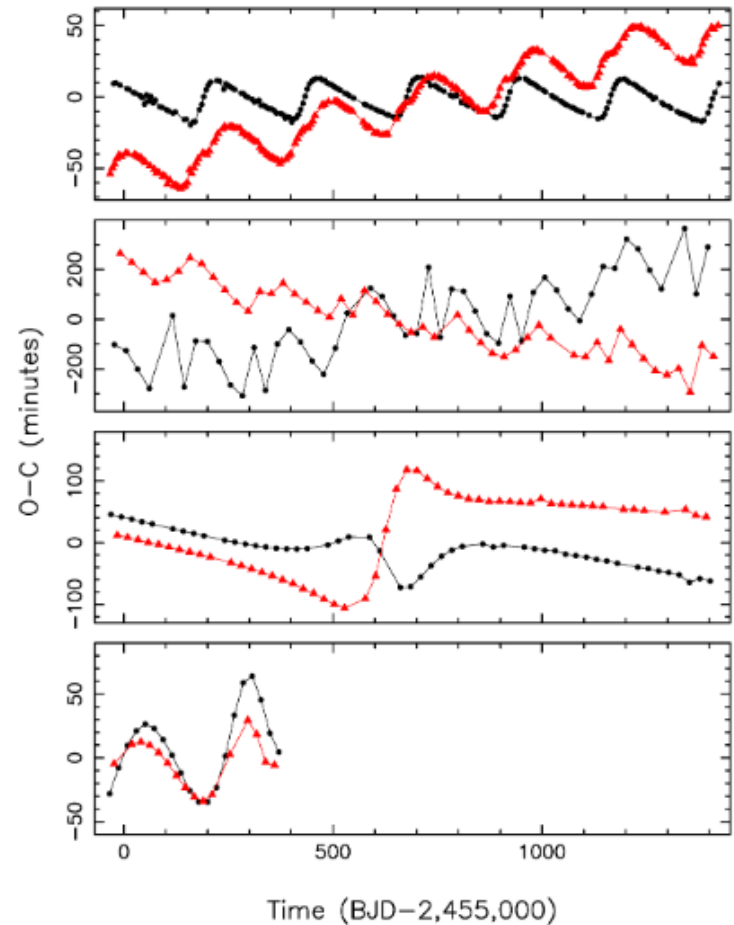
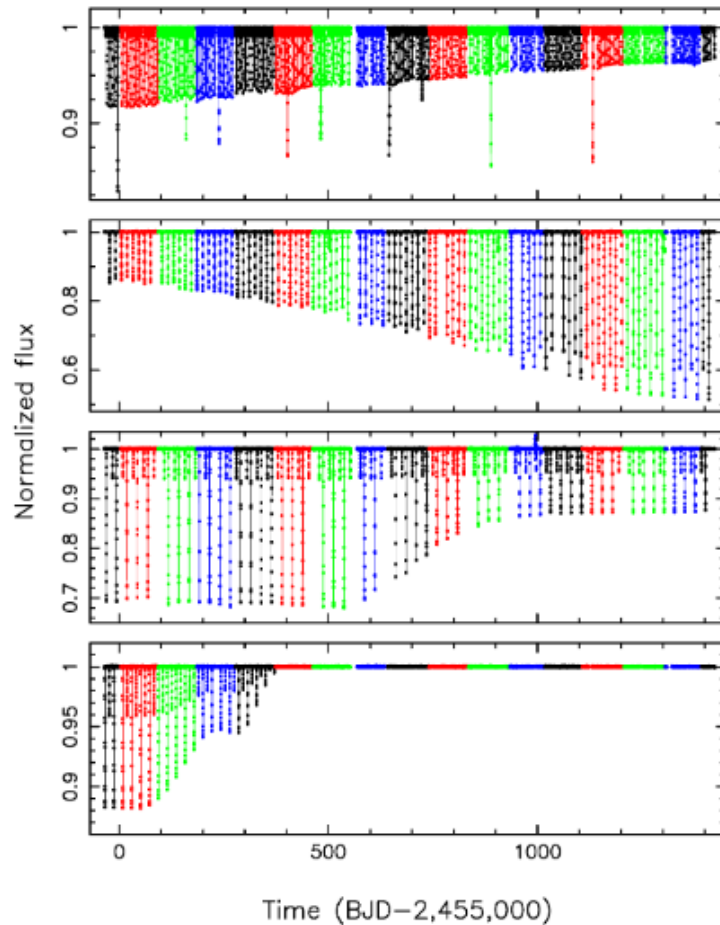


Figure 2. *Left:* Eclipses of a star spot in Kepler-47. A dark spot on the primary star rotates in and out of view, leading to the variable flux in the out-of-eclipse regions as shown at the bottom. This star spot was partially eclipsed by the secondary star during five consecutive primary eclipses. When the eclipse is modeled with a

Hármas rendszerek a Kepler-mezőben

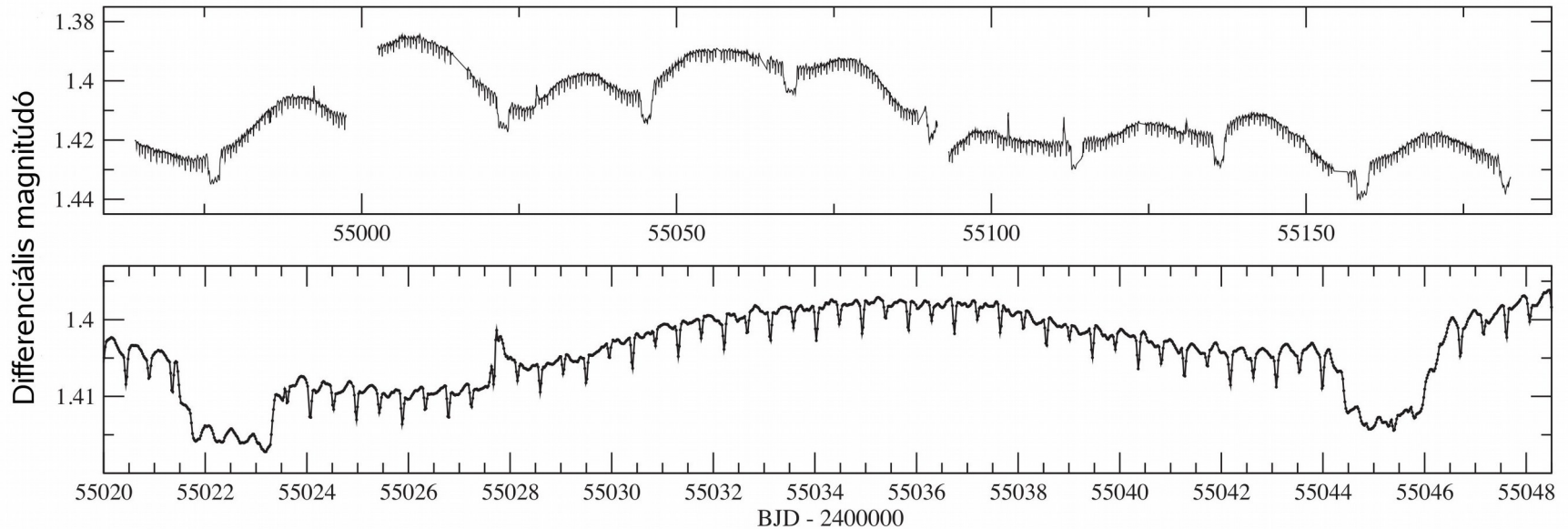
A Kepler-mezőben azonosított 3000 fedési kettős kb. 9%-a harmadik csillagot is tartalmaz. A fedés mélysége változhat a harmadik komponens dinamikai hatására (pályasíkok elfordulnak).

Jobbra: az O-C diagramok (fekete a főminimumoké, piros a mellékminimumoké)



Triplán fedő hármascsillag

Magyar felfedezés: **HD 181068** (Trinity) spektroszkópai kettősként volt ismert. Valójában 3 csillag: 1 vörös óriás + egy vörös törpe csillagpár. A pár 45,5 naponként fedésbe kerül, miközben 0,9 napos periódussal maga is fedési kettős. Meglepő, hogy nincsenek gerjesztve Nap típusú oszcillációk a vörös óriásban. Mi nyomja el vagy csökkenti az ilyen rezgéseket? Más (részben a műszertől eredő) effektusok is látszanak a fénygörbén.



B-csillagok a Kepler-mezőben

115 B-csillag négyéves Kepler-adatsorának vizsgálata.

Kétharmaduk rotációs modulációt mutat (ellipszoidális és/vagy foltos csillag). A foltok megjelenése mágneses mező léteire utal a csillagburokban.

5 BCEP csillag van, mindegyikük hosszú periódusú modulációt is mutat (de mitől?).

A BCEP instabilitási sávon kívül is vannak pulzáló csillagok. Ezek a régóta gyanított Maia-változók.

A K2 0. mezőjében is találtak ilyeneket.

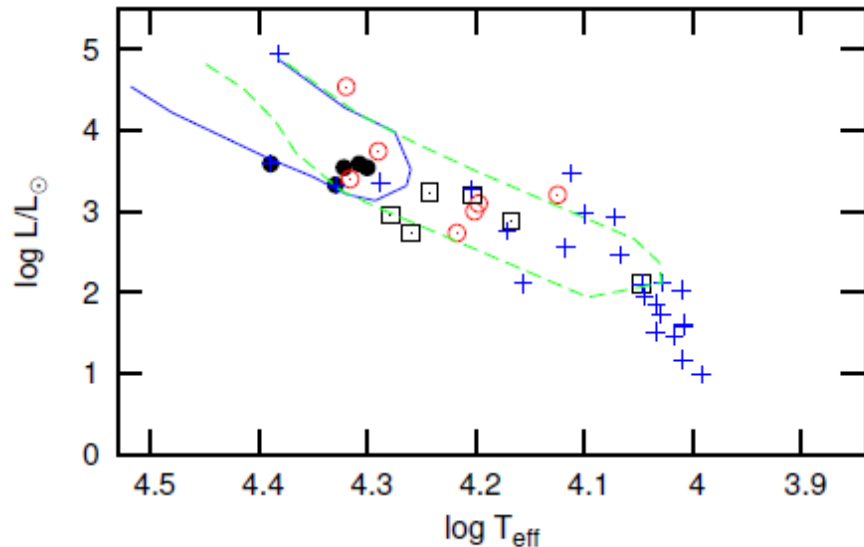


Figure 9. The location of SPB/ β Cep hybrids with spectroscopic parameters in the theoretical H-R diagram are shown as (black) filled circles. SPB stars with spectroscopic parameters are shown as (red) open circles. The (black) open squares are anomalous stars with high frequencies which we call MAIA variables. Stars which do not pulsate (i.e. are classified as neither SPB, B-CEP or MAIA) are shown by (blue) plus signs. The region enclosed by the solid line is the theoretical instability strip for β Cep variables. The dashed region is the theoretical instability strip for SPB variables.

A Kepler-cefeida

V1154 Cyg – egyetlen cefeida a Kepler-mezőben: 9,1 magnitúdós, 4,9 napos pulzációs periódus. Az első igazán pontos cefeida-fénygörbe

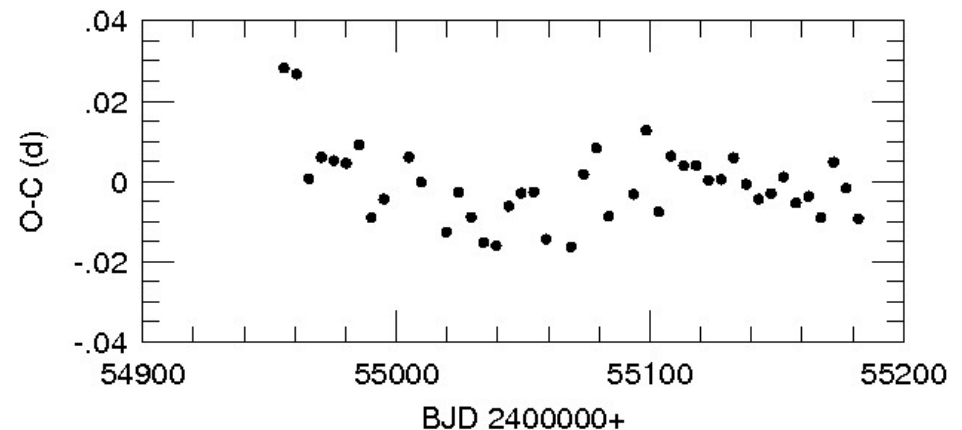
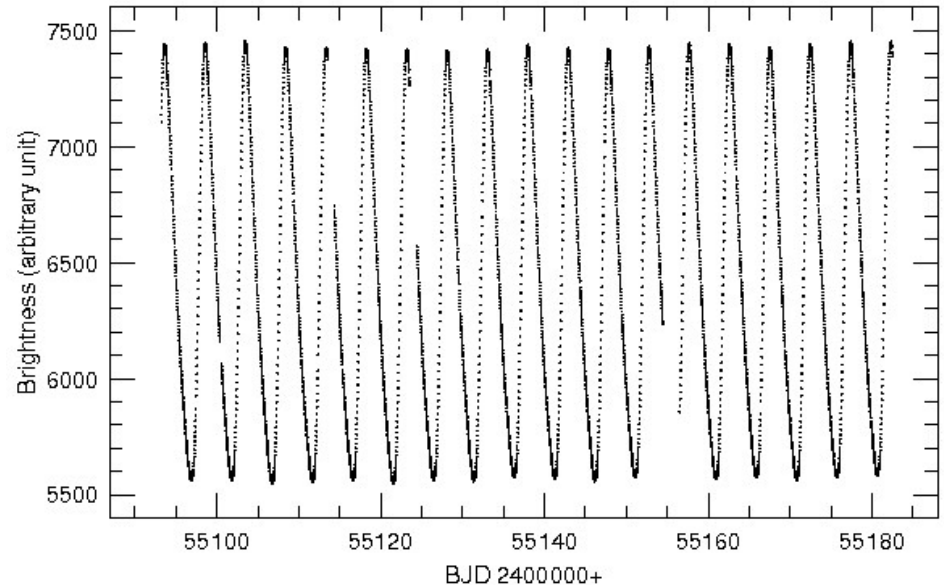
Az első év mérései alapján: instabil a fénygörbe (alak, amplitúdó, fázis) rövid időskálán.

O-C diagram: a periódus csak hosszú időskálán állandó, ciklusról ciklusra ingadozik.

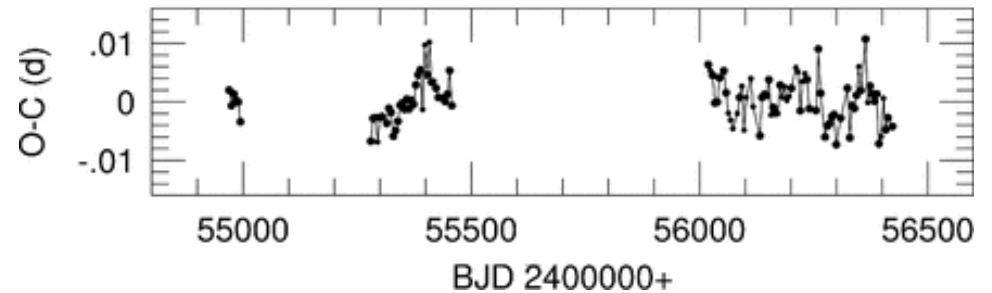
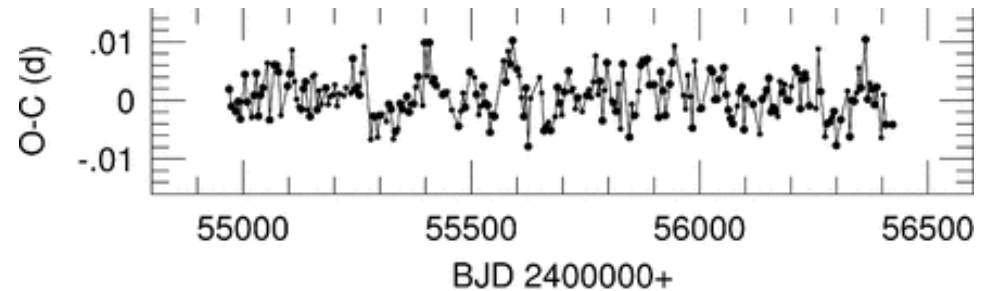
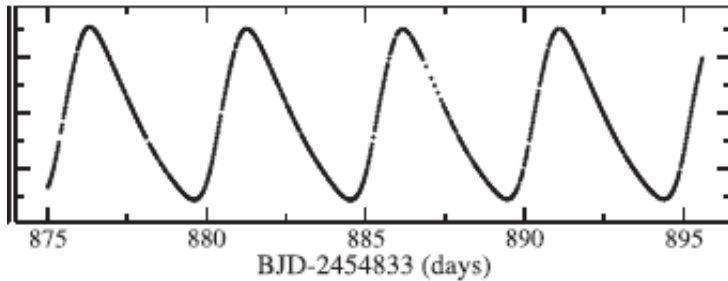
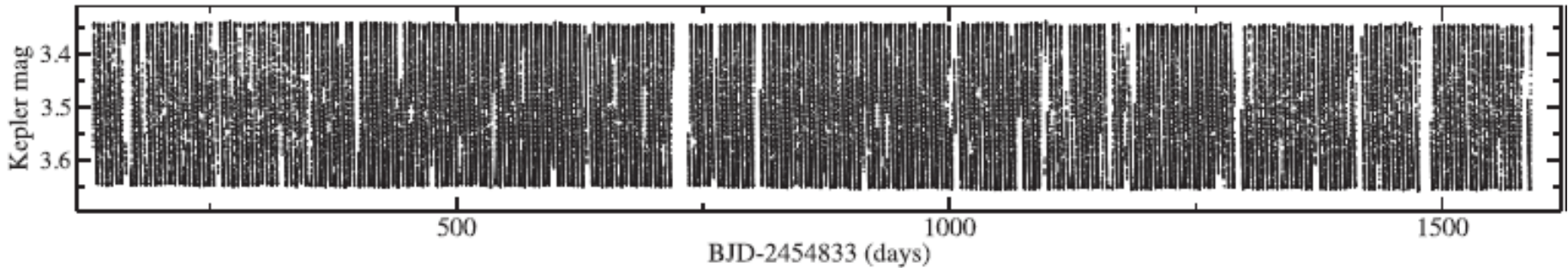
Pulzációs modell nincs még erre a jelenségre.

A teljes mérési sorozat analízise a következő két dián.

A K2 mezőbe már sok (és különféle típusú) cefeida esik.

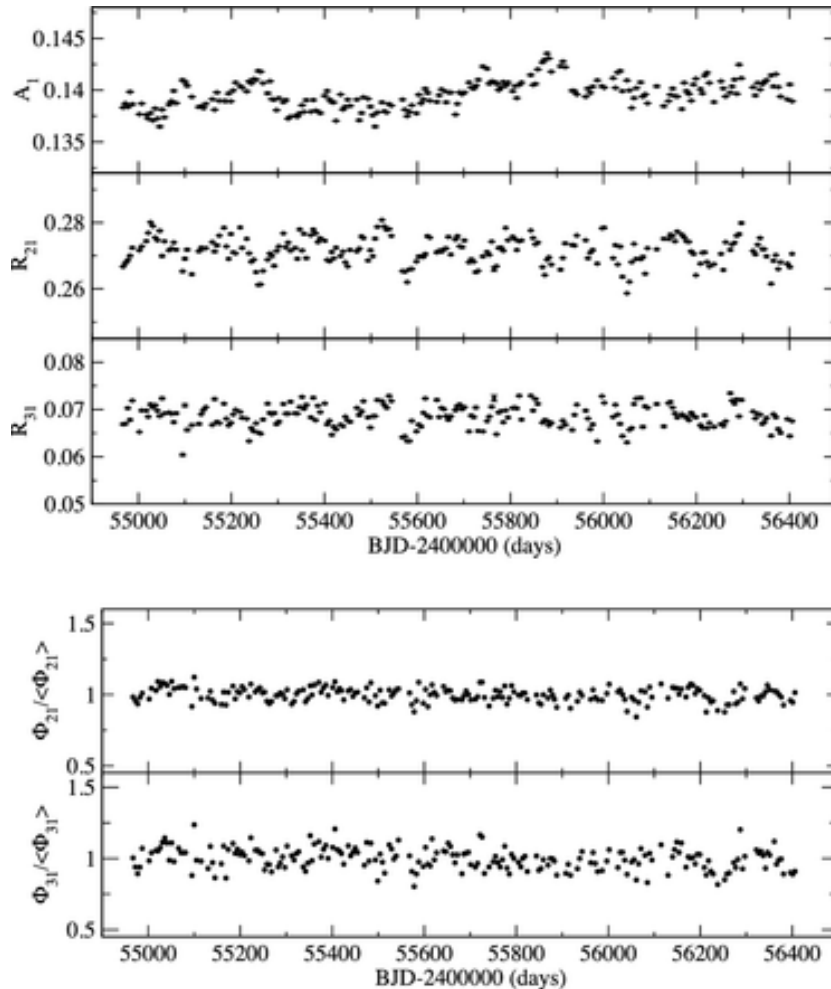


A Kepler-cefeida (V1154 Cygni)

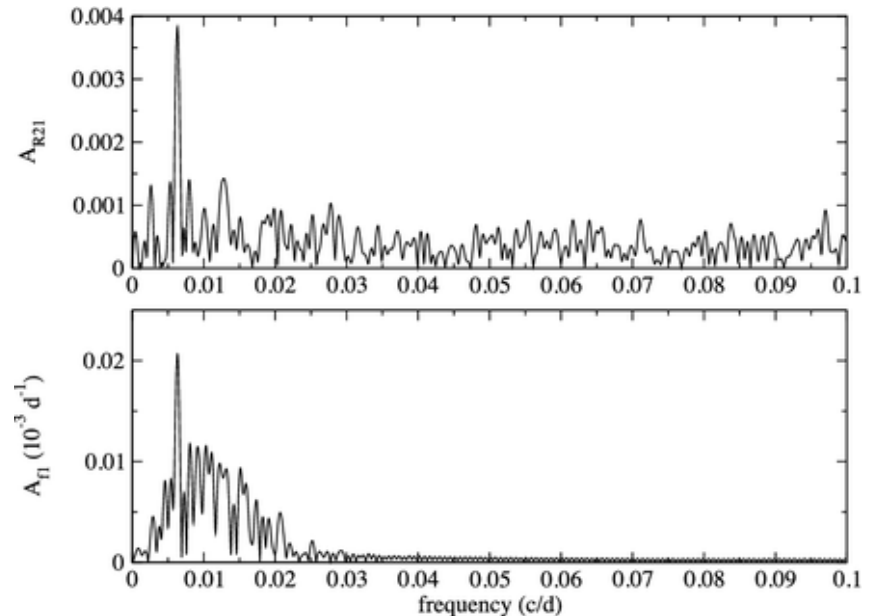


Derekas et al. (2017) új elemzés a teljes, négyéves adatsor alapján. 28 harmonikus a fénygörbében. A korábbi megállapítások továbbra is igazak.

A Kepler-cefeida (V1154 Cygni)



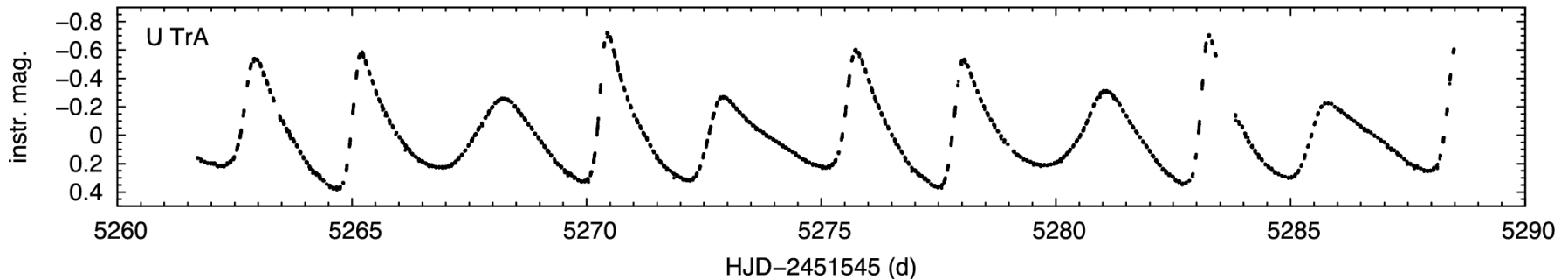
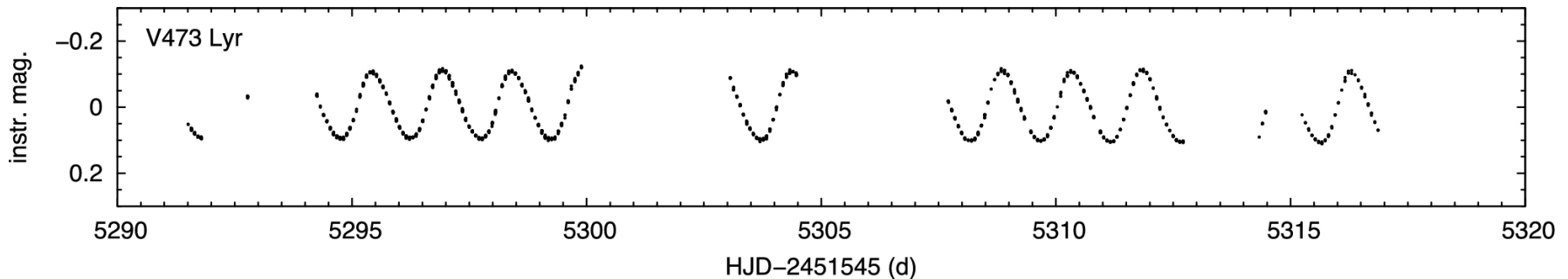
Moduláció is jelen van a pulzációban: 159 (és 1160) napos periódussal. A Fourier-spektrumban alacsony frekvenciánál pedig a granulációs zaj látszik.



Cefeidaészlelések a MOST-tal

Az **RT Aur** (alaplómodusban pulzáló cefeida) és az **SZ Tauri** (első felhangú cefeida) fénygörbéjének elemzése megerősíti a V1154 Cyg esetében tapasztalt viselkedést.

2014-ben a MOST két további érdekes cefeidát is észlelt: **V473 Lyrae** (hosszú periódussal modulált fénygörbe), **U TrA** (kétmódusú cefeida).

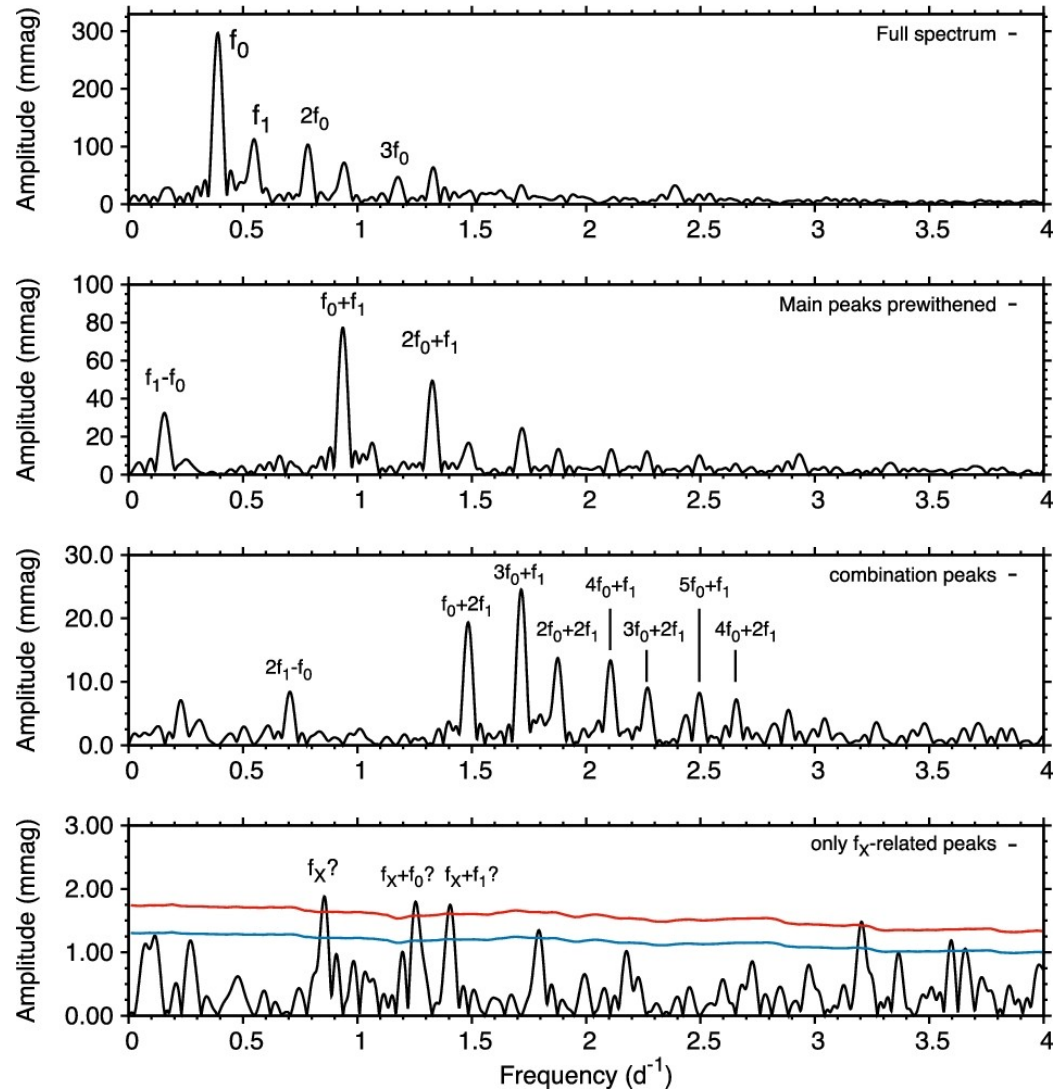


Cefeidaészlelések a MOST-tal

Az **U TrA** esetében a két módus frekvenciáinak lineáris kombinációi feltűnően megjelennek a Fourier-spektrumban.

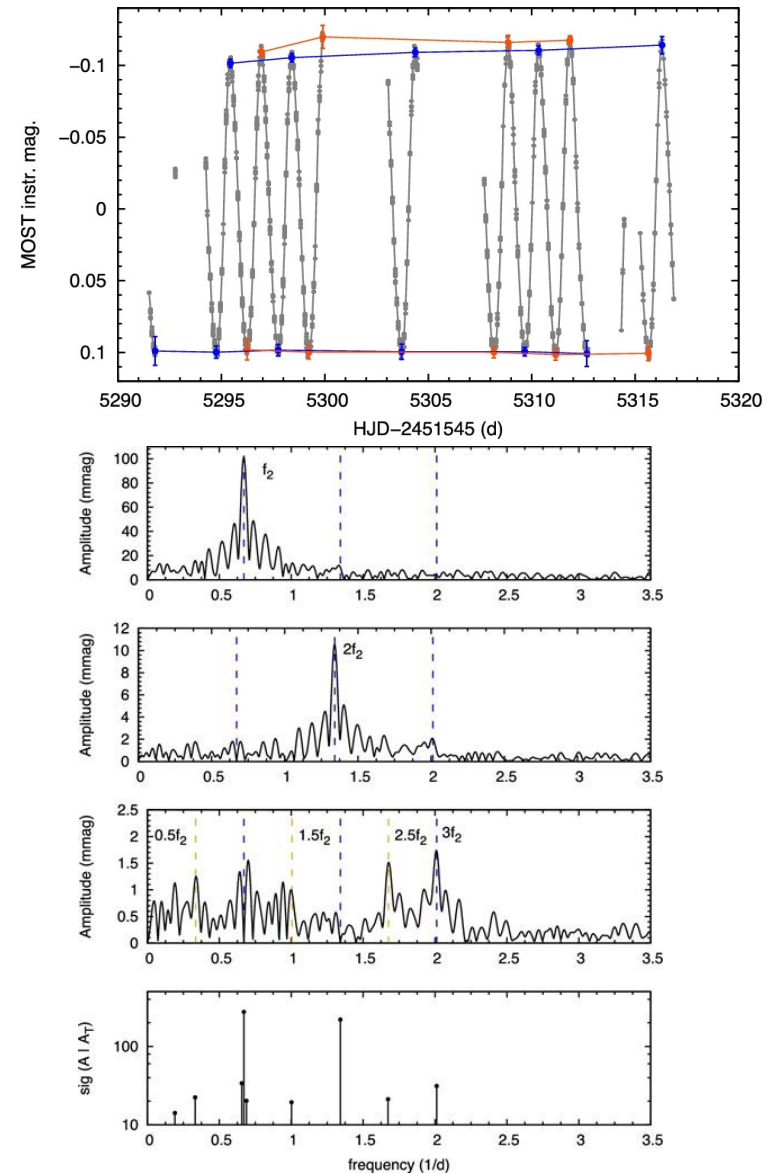
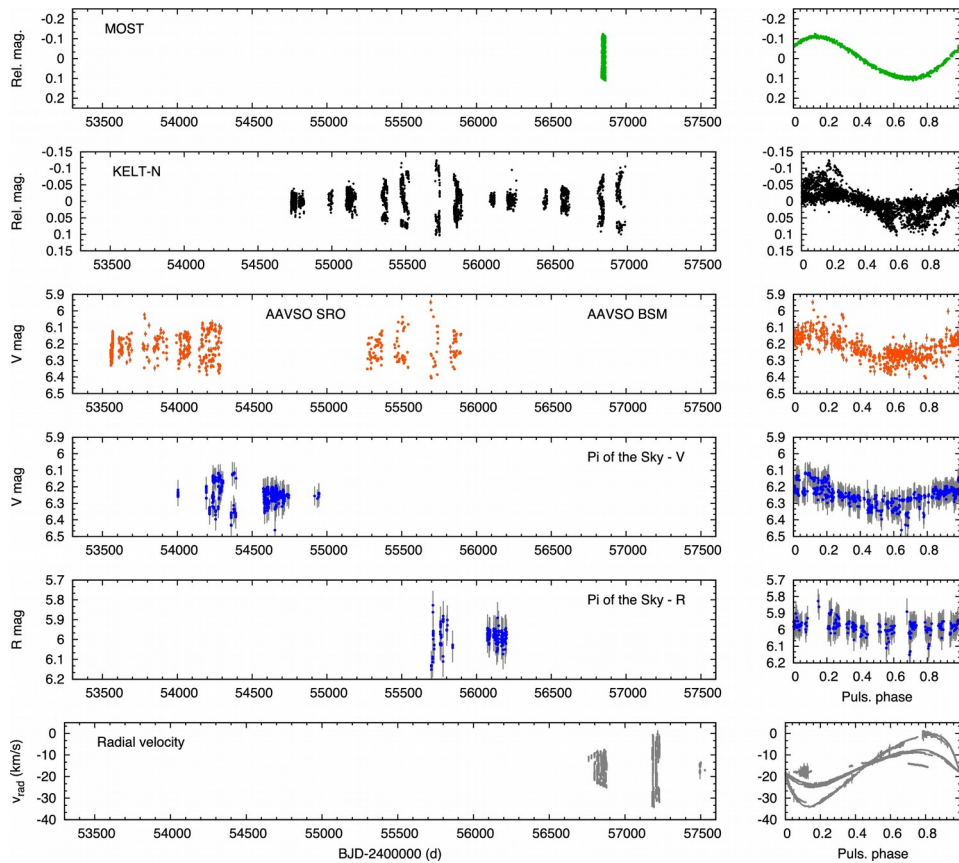
Az esetlegesen nemradiális módusra utaló f_x frekvencia nem választható szét a kombinációs csúcsoktól.

A korábbi fotometriai észlelésekkel összehasonlítva a két módus periódusa és amplitúdója fél évszázadon át stabil.



Cefeidaészlelések a MOST-tal

A **V473 Lyr** pulzációs periódusa 1,4909 nap.
 Első eset klasszikus cefeidánál fellépő
 perióduskettőződésre. A moduláció a
 Blazskó-effektusra hasonlít.



RR Lyrae-csillagok a Kepler-mezőben

A Blazskó-effektus
évszázados rejtély. Több
modell, pl. ferde
mágneses rotátor – de
egyik sem jó.

Perióduskétszereződés
(**jobbra**);

Ígéretes magyarázat: az
alaprezgés és az első
felhang mellett enyhén
gerjesztett 9. felhang.

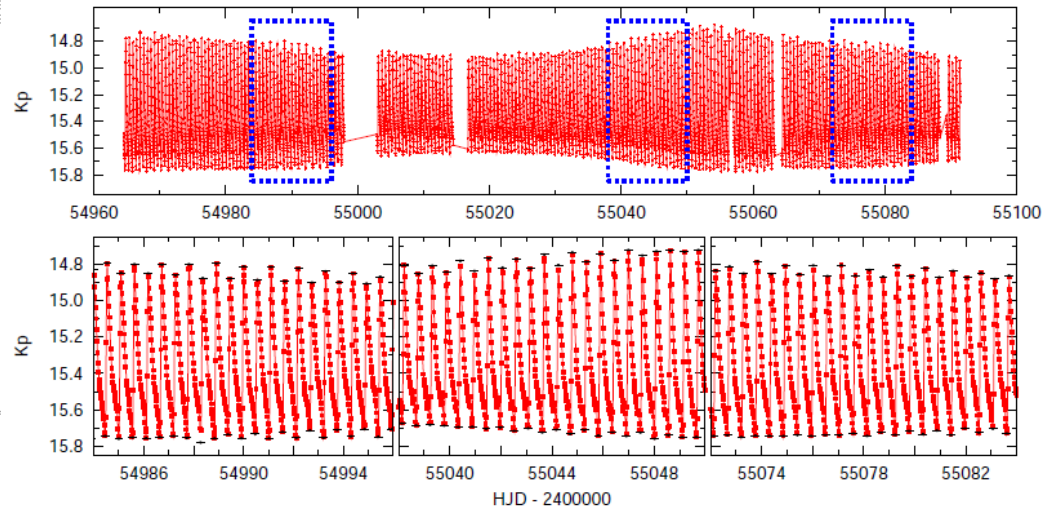
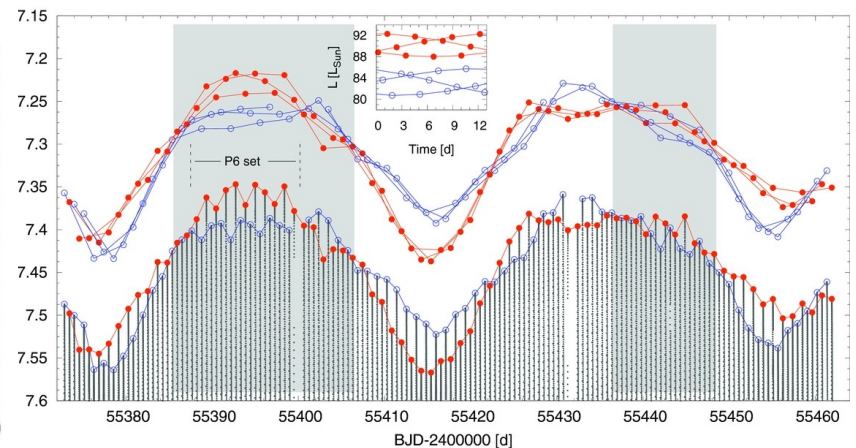
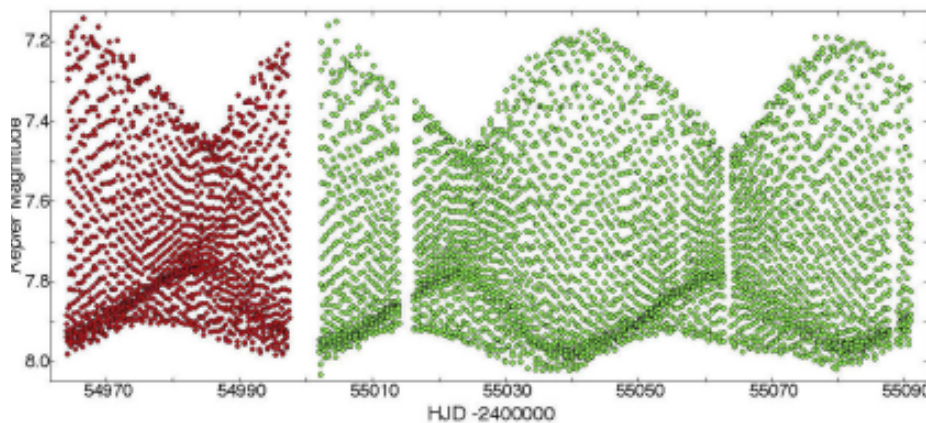


Fig. 1 Top: A *Kepler* light curve of the Blazhko star V808 Cygni (KIC 4484128) in quarters Q1 and Q2 showing 133 d of observations. Gaps in the data are due to safe mode events of the spacecraft and planned data download periods. The Blazhko cycle is around 90 d. Bottom: Magnification

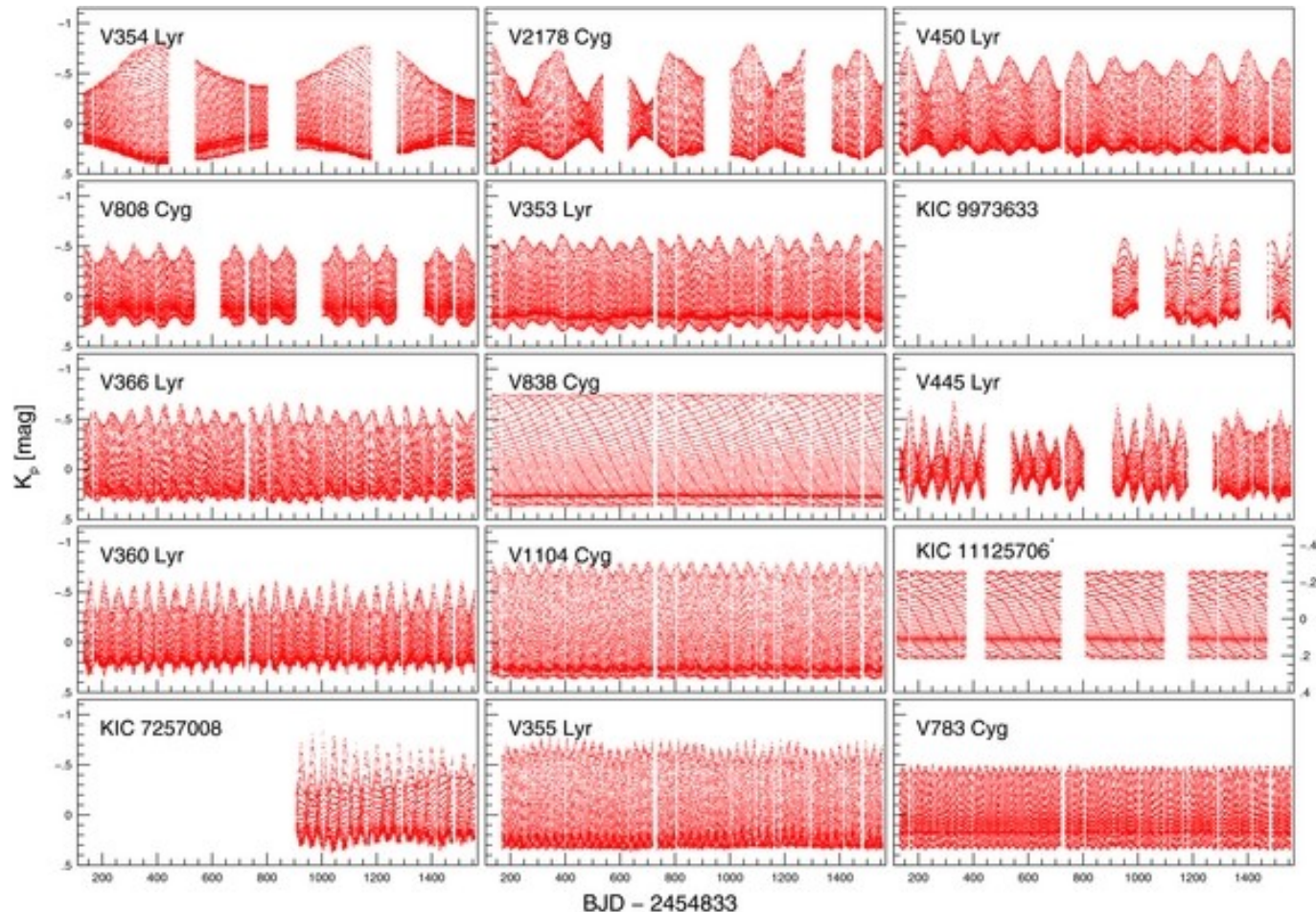
RR Lyr *Kepler* Q1+Q2 data (2009)



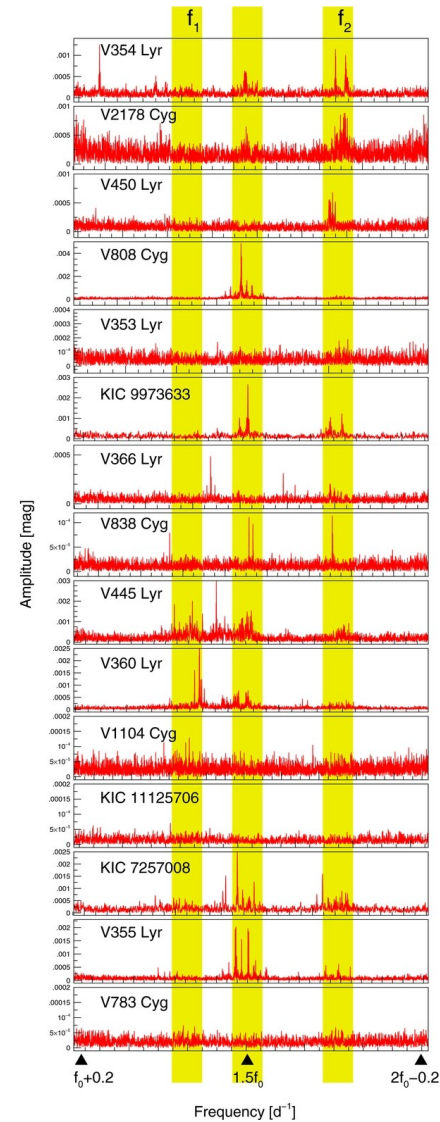
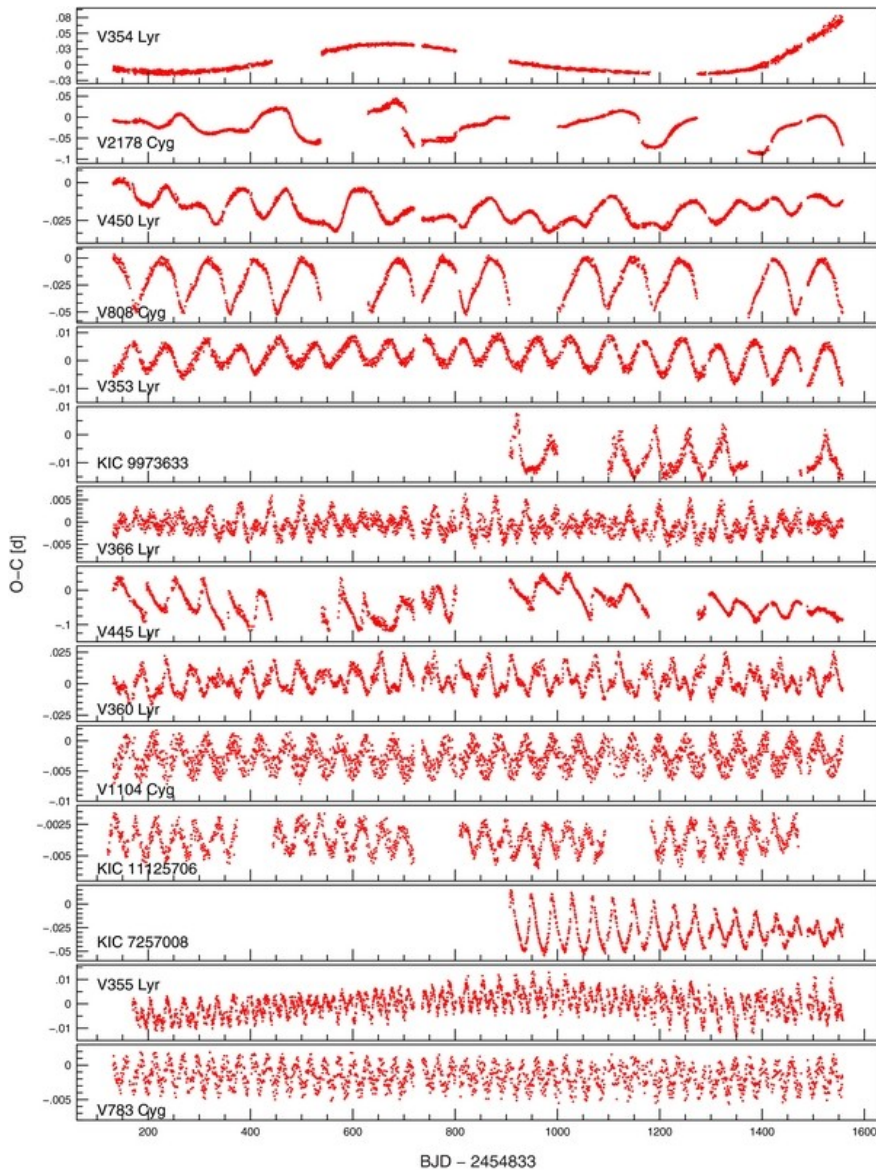
RR Lyrae-csillagok a Kepler-mezőben

Új Blazskó-effektusos RR Lyrae csillagok (kis amplitúdójú moduláció), de nem minden RR Lyrae esetében lép fel a Blazskó-effektus.

Több modulációs periódus egyidejű léte jellemző (Benkő et al., 2014).

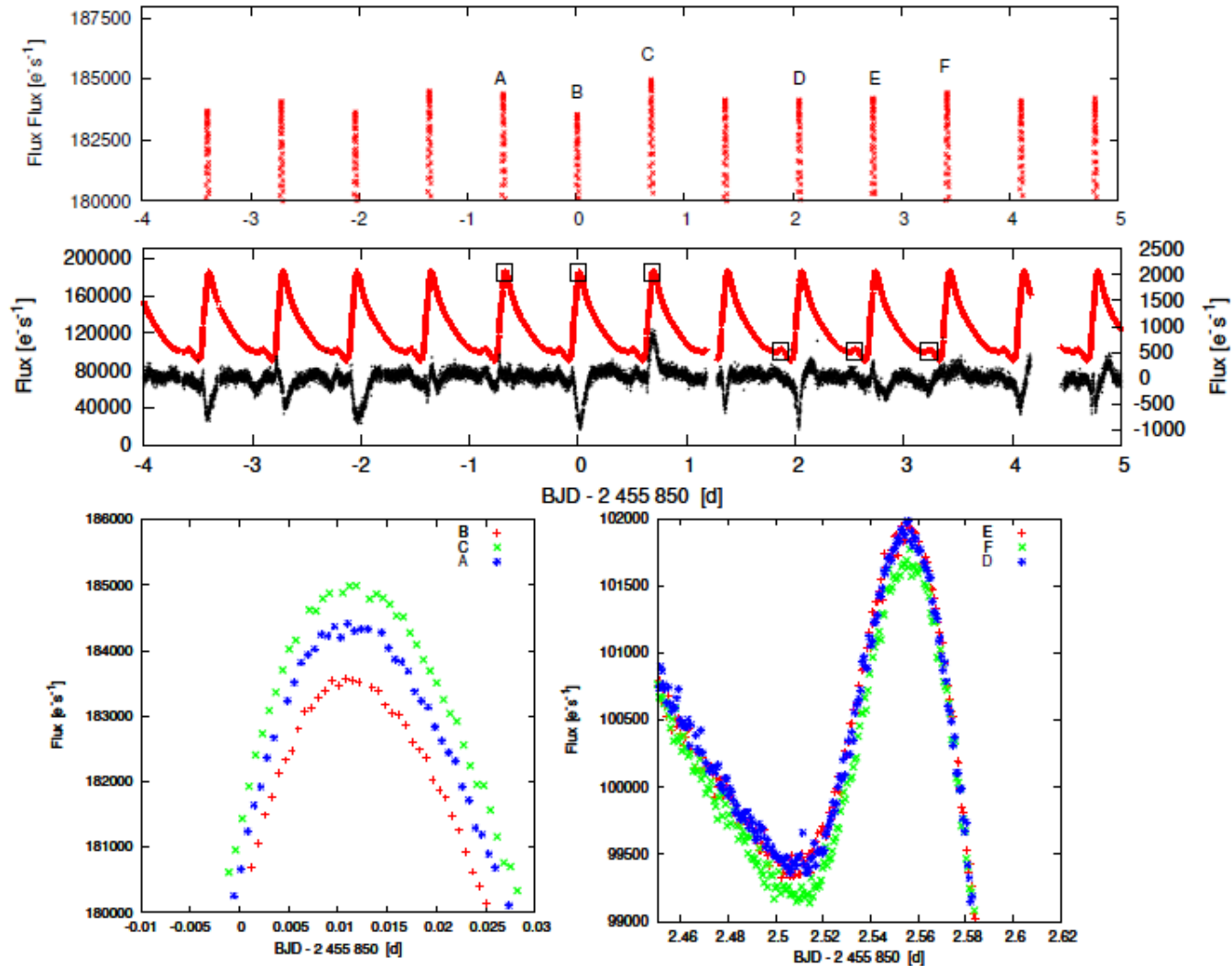


RR Lyrae-csillagok a Kepler-mezőben



RR Lyrae-csillagok a Kepler-mezőben

A nem modulált RR Lyrae csillagok fénygörbéje sem stabil: ciklusról ciklusra változás tapasztalható, mint a klasszikus cefeidák esetében (Benkő et al., 2019).

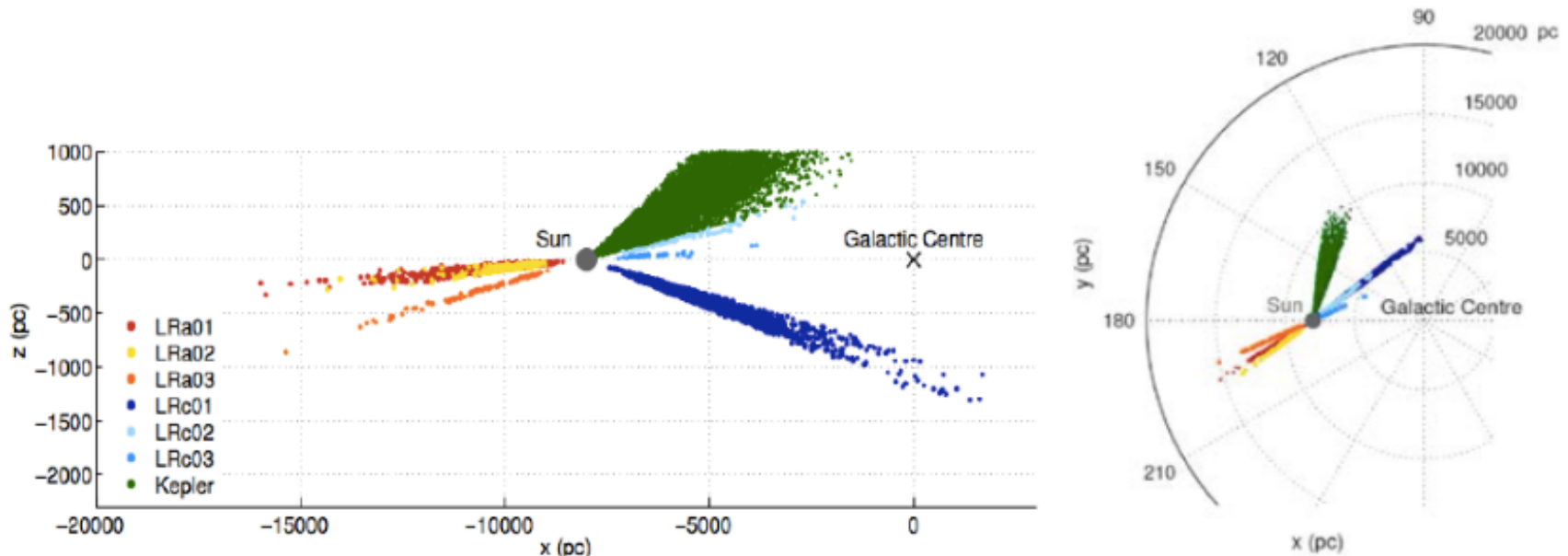


Vörös óriások – Kepler és CoRoT

Asztroszeizmológiával vizsgált vörös óriáscsillagok galaktikus eloszlása.
Több száz csillag fénygörbéjét elemezték asztroszeizmológiai módszerekkel.

Kepler: zöld, CoRoT: 6 féléves adatsor színekódolással.

Balra a fősíkra merőleges eloszlás, jobbra a fősíkra vetített eloszlás.



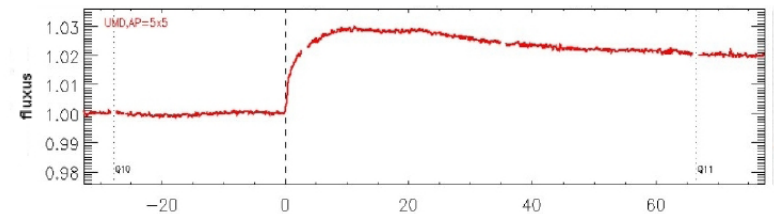
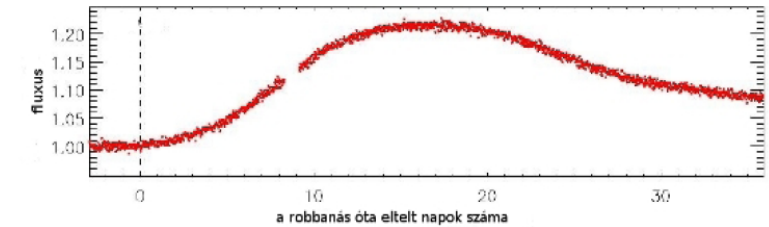
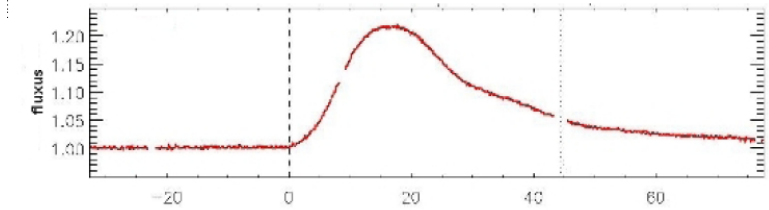
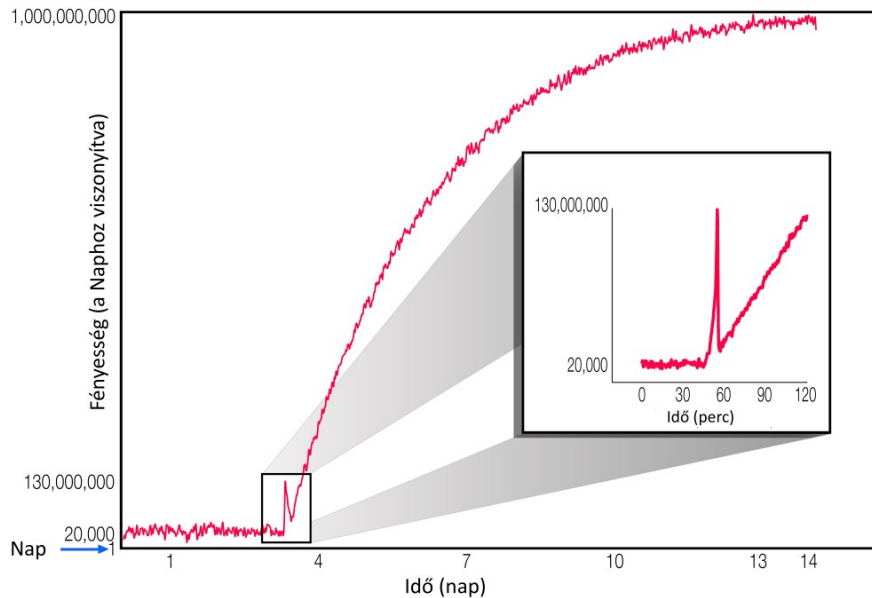
Szupernóva-kitörések a Kepler-adatbázisból

Hat szupernóvát fedeztek fel a Kepler-adatokból. SNIa és SNIi is van köztük. Egyedülálló a folyamatos fénygörbe, és a kitörés kezdetének megfigyelése.

A KSN 2011d fénygörbéjén (balra lent)

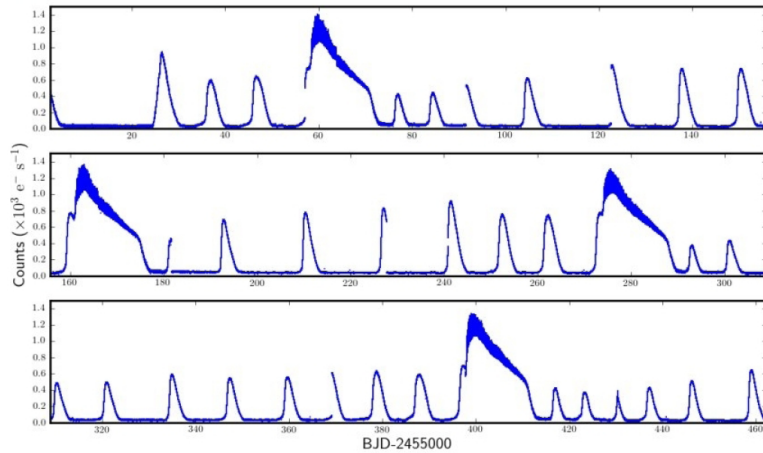
látszik a robbanást megelőző kezdeti lökéshullám. A K2 adatsoraiban aztán

ötvennél több szupernóvát találtak. A 16–17. kampányok fő célja kifejezetten a szupernóva-keresés volt.

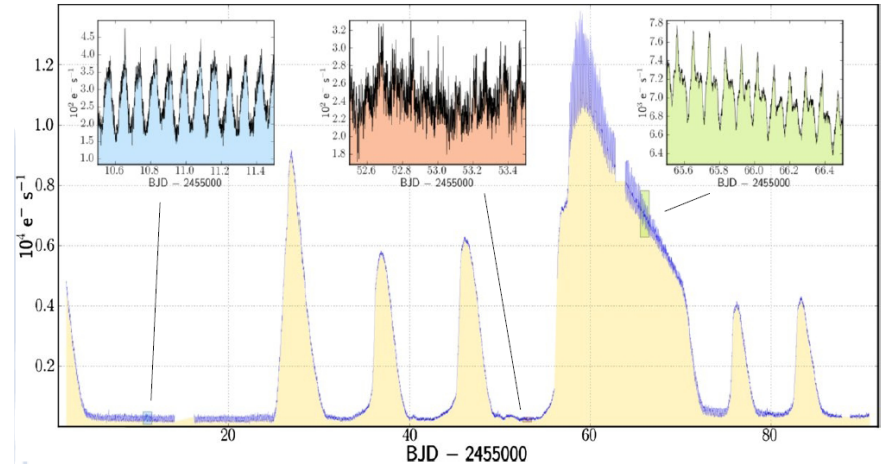


Más típusú változócsillagok a Keplerrel

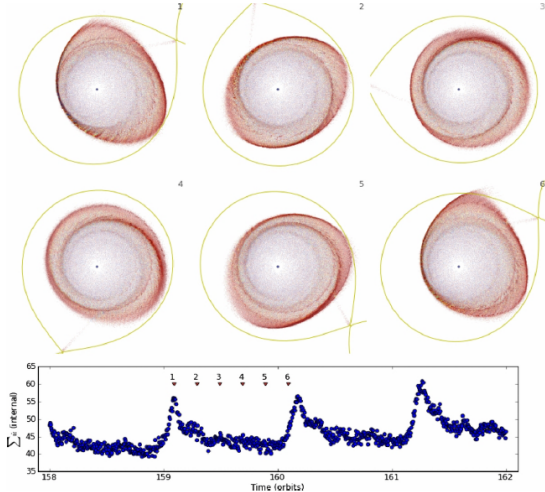
V344 Lyr SU UMa



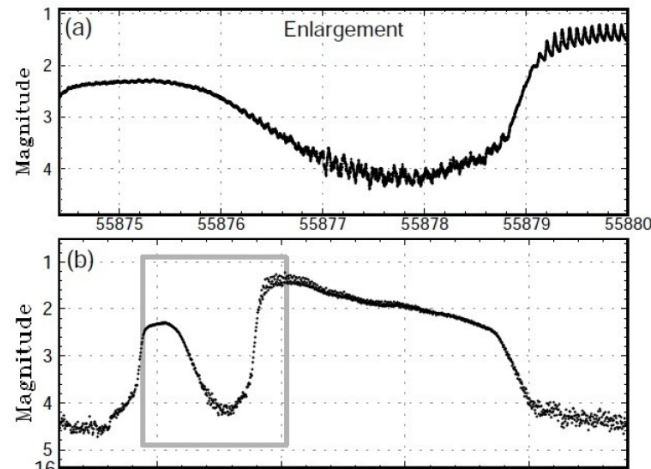
V344 Lyr SU UMa



V344 Lyr SU UMa - superhumps



V344 Lyr SU UMa - superhumps



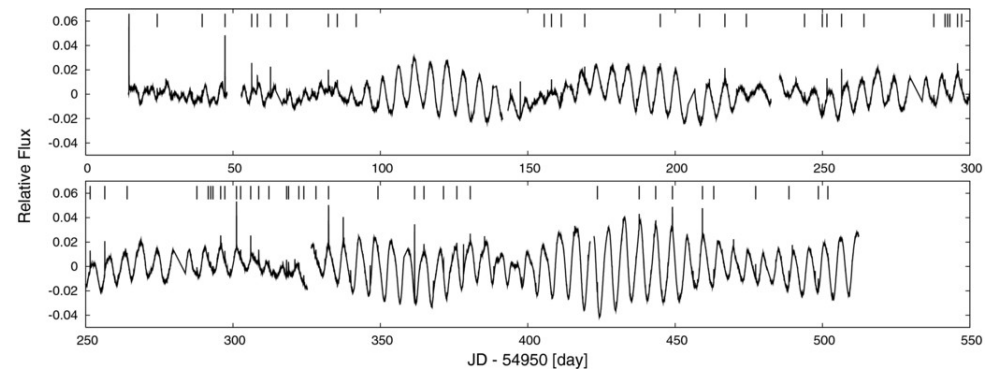
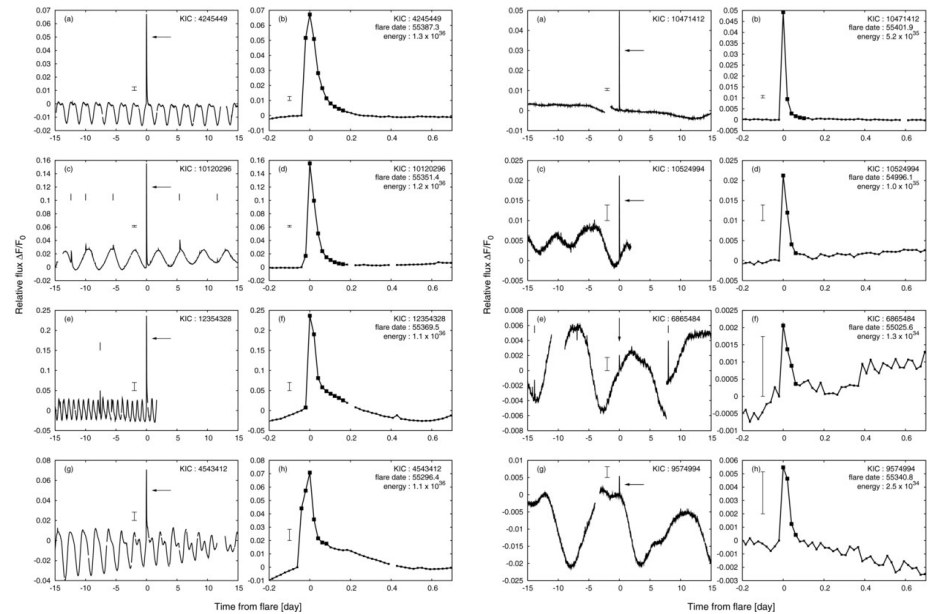
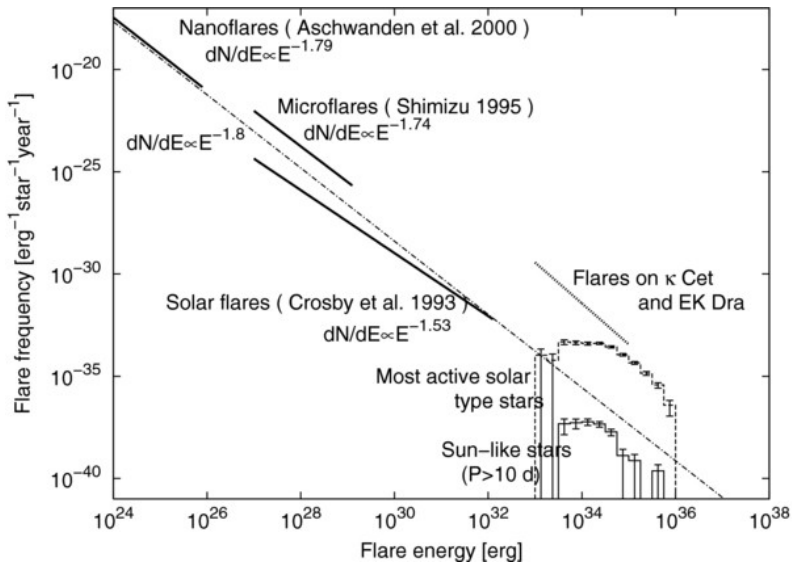
Találtak még 16
katakizmikus
változócsillagot
(SU UMa, WZ Sge,
U Gem, AM Her
típushoz tartozót
és nóvaszerűt is).
Példa: V344 Lyrae

Más típusú változócsillagok a Keplerrel

Szuperflerek (10^{34} - 10^{35} erg energiával) Nap-típusú csillagokon

Példa: KIC10422252

500 nap alatt 365 szuperfler 148 csillagon. A Napon észlelteknél tízszer nagyobb foltok okozhatják.



Más típusú változócsillagok a Keplerrel

Közönséges flerek előfordulási statisztikája a Kepler-fénygörbék alapján. Katalógust állítottak össze 3420 flercsillag 162262 flereseményéről.

A napciklus analógiáit is megfigyelték a havonta egyszer leküldött FFI-képek (52 adatpont) alapján: több tucat gyorsan forgó foltos csillag átlagfényessége 600-900 napos ciklussal enyhén változik.

TABLE 3
INCIDENCE OF FLARE STARS ACROSS H-R DIAGRAM

Type	T_{eff} (K)	N_{star}	N_{fs}	Incidence	Ba2015 (LC)
A	>7500	3190	37	1.16% \pm 0.19%	2.78%
F	6000–7500	66522	459	0.69% \pm 0.03%	0.94%
G	5000–6000	93973	1372	1.46% \pm 0.04%	3.29%
K	4000–5000	29730	880	2.96% \pm 0.10%	12.75%
M	<4000	6898	672	9.74% \pm 0.38%	–
Giant	$\log g < 3.5$	23030	76	0.33% \pm 0.04%	–

Notes: The incidence of flare stars grouped by spectral type. The result also listed. N_{star} is the total star number, and N_{fs} is the number of flare stars. Balona (2015). Van2017 represents Van Doorsselaere et al. (2017). The

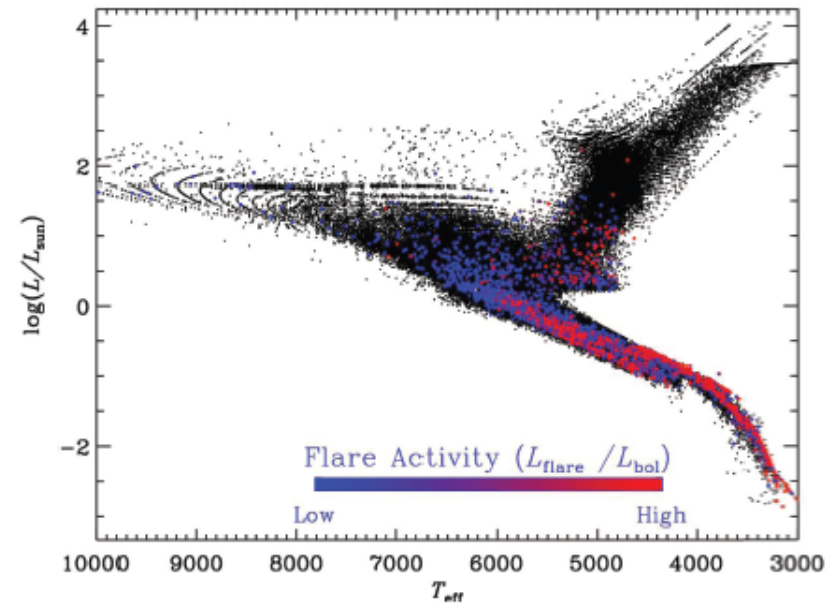


FIG. 4.— The flare activity across the H-R diagram. Black dots denote over 200,000 Kepler stars. Colorful dots are the 3420 flaring stars. The color changes from blue to red along with the increase of the flare activity. The luminosity of stars are estimated by tem-

Planetáris ködök központi csillagai a Keplerrel

Table 1. Available literature data and results for the sample of PN in the *Kepler* field of view

	A61	J19311	Kn 61	NGC 6742	NGC 6826	Pa 5
<i>Kepler</i> Input Catalogue	9583158	7755741	3231337	10963135	12071221	8619526
RA	19 19 10.22	19 31 08.89	19 21 38.93	18 59 20.03	19 44 48.15	19 19 30.52
Dec	+46 14 52.03	+43 24 57.74	+38 18 57.36	+48 27 55.24	+50 31 30.26	+44 45 43.08
Distance (kpc)	1.38 ^c	1.82 ^e	4::	4.86 ^e	1.3 ^e	1.4
PN diameter (arcsec)	200 ^d	~300 ^f	104	27 ^g	27×24 ^e	120 ⁱ
PN morphology	Circular	Bipolar/elliptical	~Circular	Circular	Elliptical/jets	Bipolar/torus
V-band magnitude ^a	17.389	13.697	18.416	16.567 ^h	10.41 ^g	15.670 ^j
<i>Kepler</i> magnitude	17.321	13.752	18.283	16.255 ^h	10.757	15.839
Central star spectral type ^b	DAO	O(H)	PG1159	?	O3f(H)	O(He)
No. of <i>Kepler</i> ‘quarters’	10	7	4	1	7	8
Light-curve period (d)	–	2.928	2–12	–	0.619, 1.236	1.12
Light-curve amplitude (mmag)	<2	0.729	~80–140	–	~2–8	0.5

Hat planetáris köd esett a Kepler látómezejébe, közülük egy újonnan felfedezett (Kn 61, **jobbra** a képen).

Négy esetben kimutatható a periodikus fényességváltozás, feltehetőleg a kettősség okozza. Jóval nagyobb a kettőscsillagok gyakorisága a planetáris ködök centrális csillagainál, mint azt korábban gondolták.



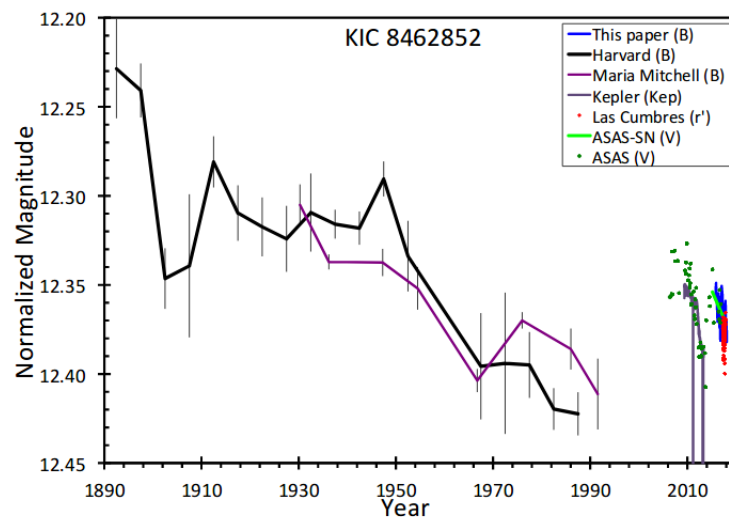
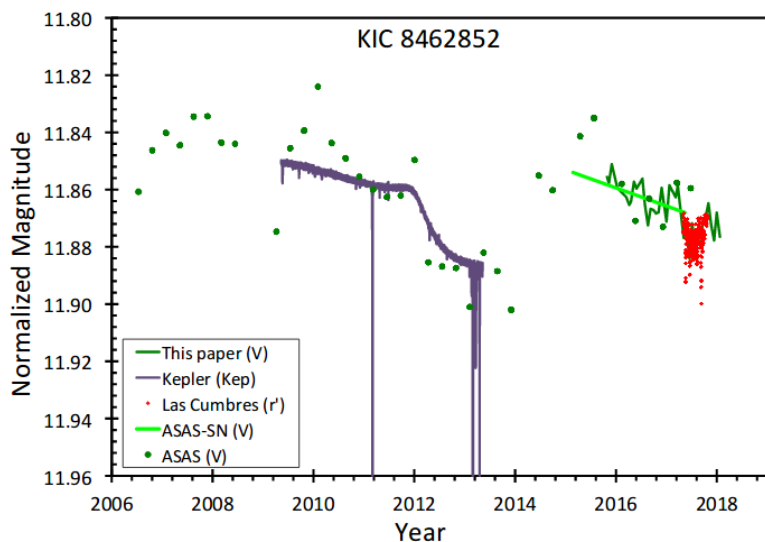
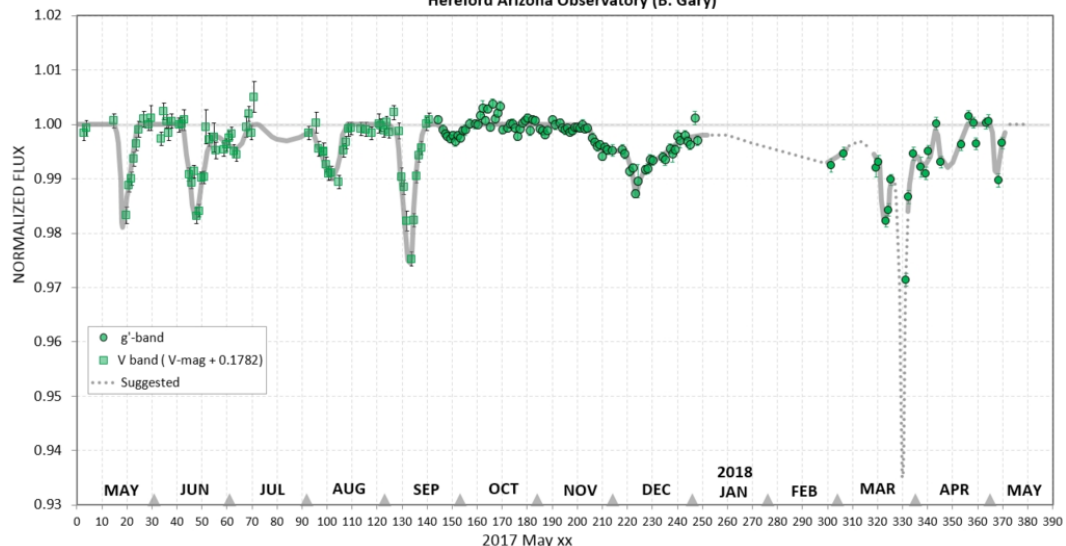
A Boyaijan-csillag

KIC 8462852: főszorozati F3
színképtípusú csillag.

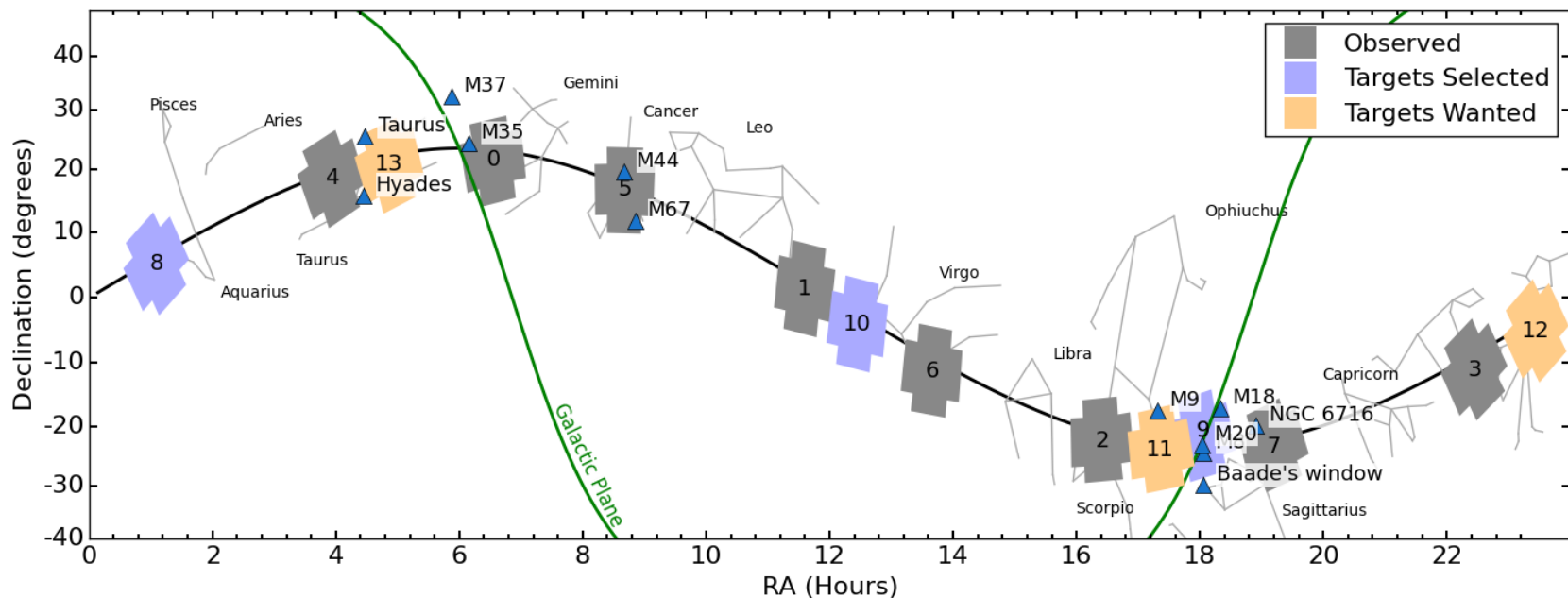
2015-ben amatőrök
szabálytalan időközönként
bekövetkező
elhalványodásokat vettek
észre a Kepler-fénygörbén.

Porszemcsékből álló felhők
okozhatják, nem civilizációs
üzenet.

KIC 8462852 Daily Normalized Flux, V- and g'-Band, 2017 May 02 - 2018 May 04
Hereford Arizona Observatory (B. Gary)



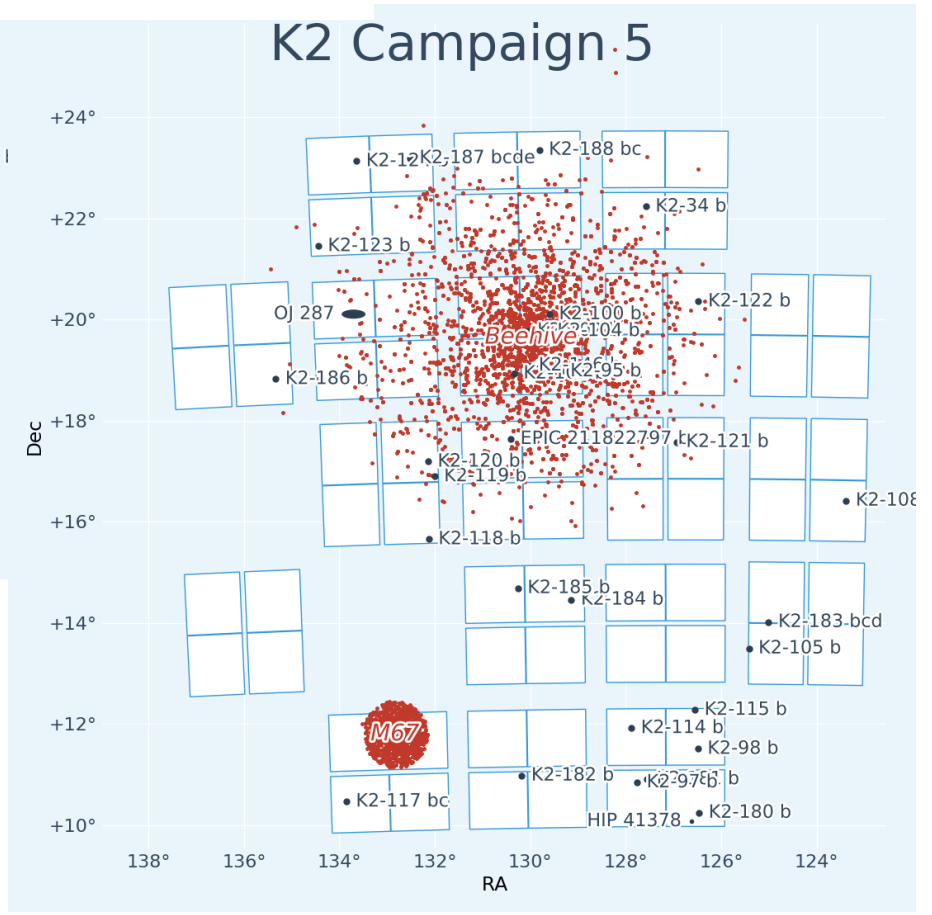
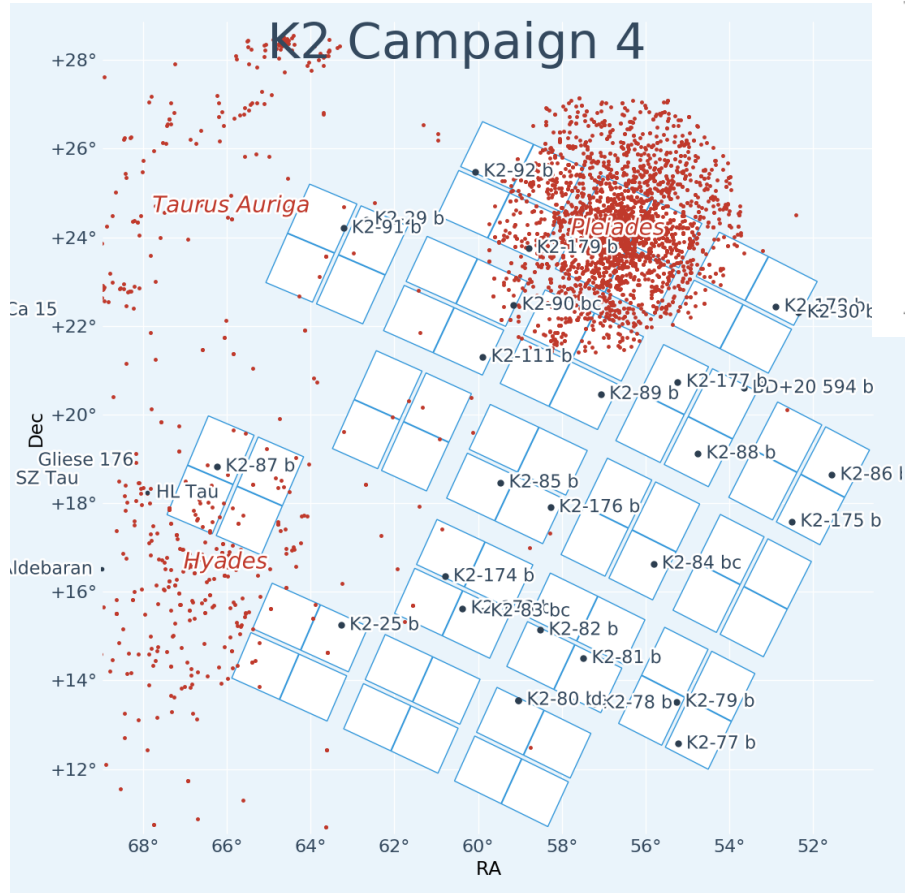
A Kepler folytatása: K2



K2: ekliptika menti észlelések 300 ppm pontossággal 2018. októberig. A mérendő csillagokat pályázatok alapján választották ki. A tudományos potenciál sokkal gazdagabb, mint az eredeti Kepler-programé. Minden jellegű terület sorra került: fiatal csillaghalmazok (Pleiadok, Hyadok, Praesepe), csillagkeletkezési területek (a Skorpióban 11 millió éves), extragalaxisokban gazdag mezők. Az 1. kampány adataiból 2500 változócsillagot katalogizáltak. Az adatok kezdettől nyilvánosak.

V.3.1. Open Clusters in the K2

Cluster	Age
Messier 21	4–8 Myr
Messier 18	32 Myr
NGC 6716	100 Myr
Pleiades	125 Myr
Messier 35	110 Myr
Messier 37	520 Myr
Hyades	625 Myr
Praesepe	625 Myr
Messier 67	4 Gyr



Field dates and positions

Field	Start	Stop	Data available	RA	Dec	Comments
E	2014 Feb 04	2014 Feb 13	2014 Mar 25	23:54:36	-02:09:09	Two-wheel Concept Engineering Test
<u>0</u>	2014 Mar 08	2014 May 27	2014 Sep 08	06:33:11	+21:35:16	Near Gal. Anti-center, M35, NGC 2158
<u>1</u>	2014 May 30	2014 Aug 21	2014 Dec 23	11:35:46	+01:25:02	North Galactic Cap
<u>2</u>	2014 Aug 23	2014 Nov 13	2015 Mar 16	16:24:30	-22:26:50	Near Gal. Center, M4, M80, Upper Sco, ρ Oph
<u>3</u>	2014 Nov 14	2015 Feb 03	2015 Jul 17	22:26:40	-11:05:48	South Galactic Cap, Neptune
<u>4</u>	2015 Feb 07	2015 Apr 23	2015 Sep 04	03:56:18	+18:39:38	M45 (Pleiades), NGC1647, Hyades
<u>5</u>	2015 Apr 27	2015 Jul 10	2015 Oct 31	08:40:38	+16:49:47	M44 (Beehive), M67
<u>6</u>	2015 Jul 14	2015 Sep 30	2016 Feb 12	13:39:28	-11:17:43	North Galactic Cap
<u>7</u>	2015 Oct 04	2015 Dec 26	2016 Apr 20	19:11:19	-23:21:36	Near Galactic Center, NGC 6717, Pluto
<u>8</u>	2016 Jan 03	2016 Mar 23	2016 Jul 04	01:05:21	+05:15:44	Uranus, IC1613
<u>9</u> [†]	2016 Apr 21	2016 Jul 01	2016 Sep 30	18:01:25	-21:46:47	Gal. Center, M21, M18, M25, M8, Mars
<u>10</u>	2016 Jul 06	2016 Sep 20	2016 Dec 20	12:27:07	-04:01:38	North Galactic Cap
<u>11</u>	2016 Sep 24	2016 Dec 08	2017 Jun 30	17:21:33	-23:58:33	Galactic Center, Saturn
<u>12</u>	2016 Dec 15	2017 Mar 04	2017 Jul 31	23:26:38	-05:06:08	South Galactic Cap, Chiron, Mars
<u>13</u>	2017 Mar 08	2017 May 27	2017 Aug 28	04:51:11	+20:47:11	Hyades, Taurus-Auriga
<u>14</u>	2017 May 31	2017 Aug 19	2017 Nov 20	10:42:44	+06:51:06	North Galactic Cap, Wolf 359, WASP-104
<u>15</u>	2017 Aug 23	2017 Nov 20	2018 Mar 14	15:34:28	-20:04:44	Upper Sco, GW Lib, HP Lib
<u>16</u> [†]	2017 Dec 07	2018 Feb 25	2018 May 30	08:54:50	+18:31:31	M44 (Beehive), M67
<u>17</u> [†]	2018 Mar 01	2018 May 08	2018 Aug 16	13:30:12	-07:43:16	Galaxies.
<u>18</u>	2018 May 12	2018 Jul 02	2018 Oct 24	08:40:39	+16:49:40	M44 (Beehive), M67

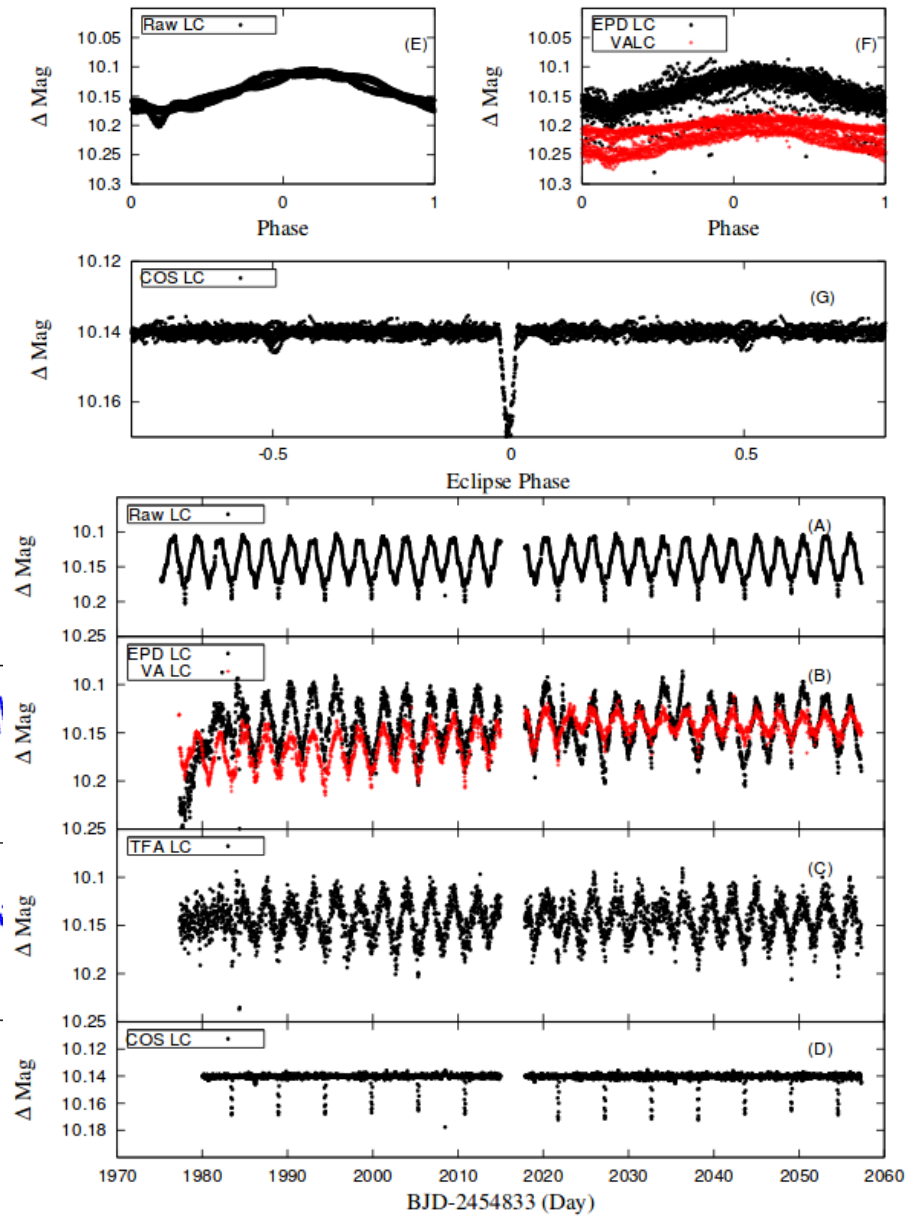
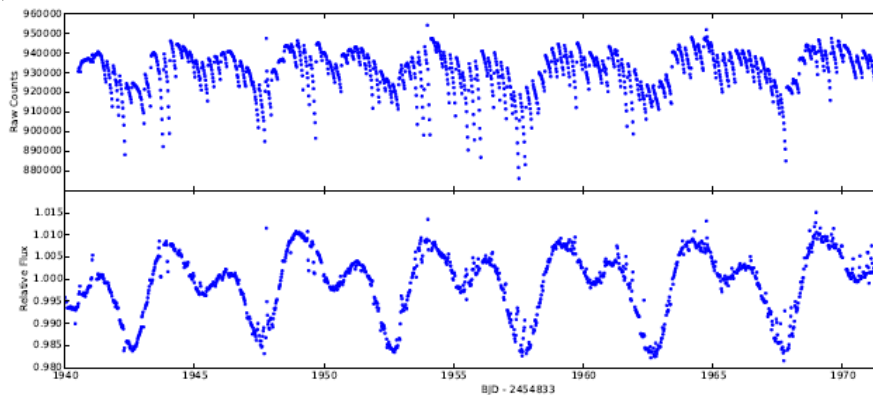
[†]**Note:** fields 9, 16, and 17 are forward-facing campaigns, for which simultaneous observations from the ground are possible throughout the duration of the campaign.

A K2 adatainak kezelése

A nyers fénygörbéből több lépéssel lehet megkapni az objektum valódi viselkedésére jellemző adatsort.

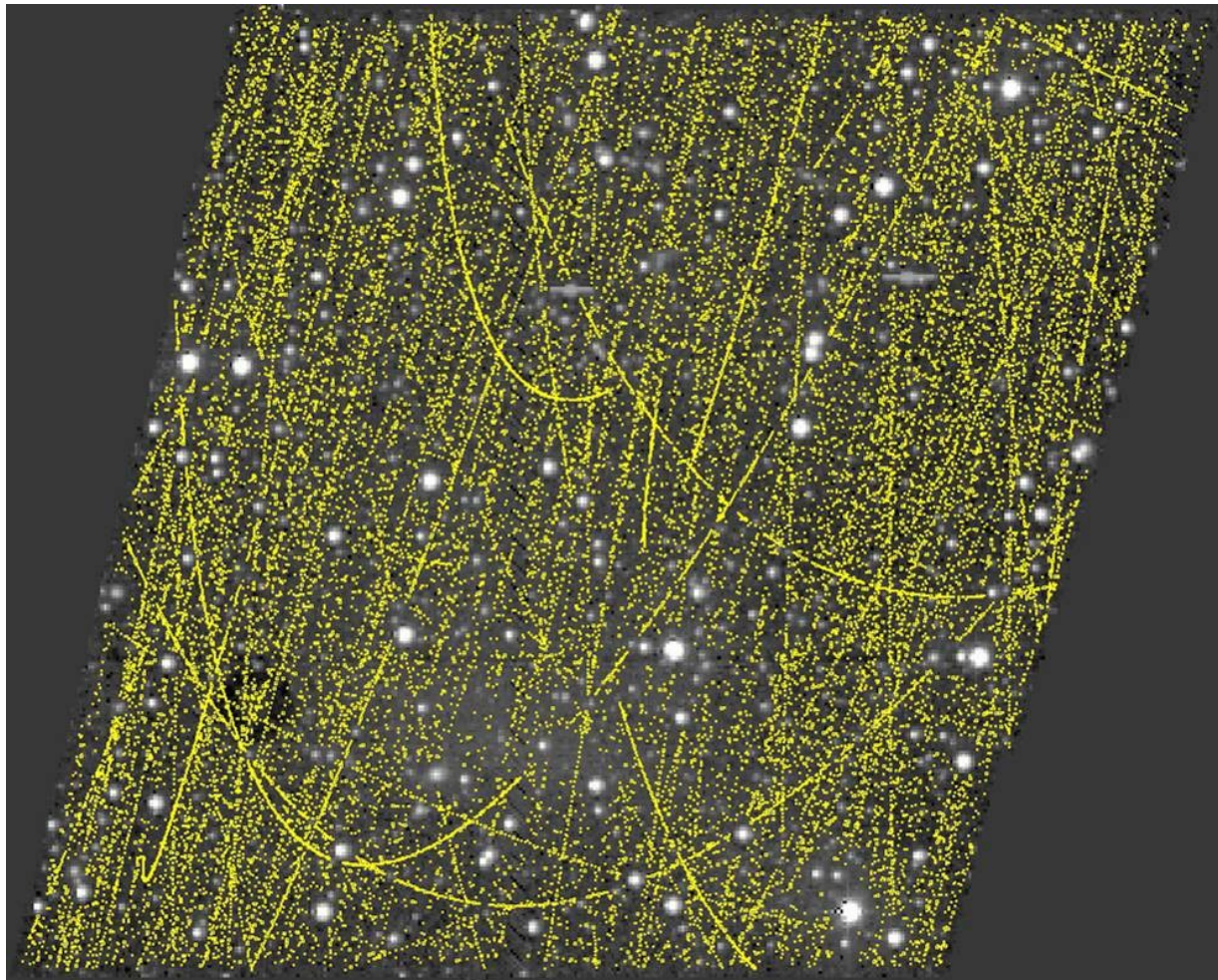
Fontos a trendszűrés (bal alsó ábra).

Apertúrafotometriával RAWLC, utána EPD (external parameter decorrelation), TFA (trend filtering), COS (cosinus filtering)



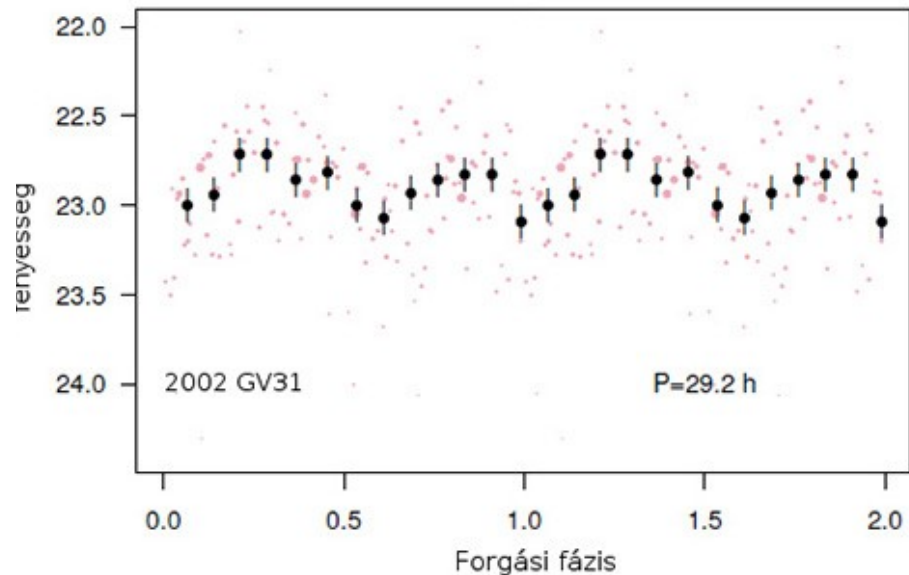
Érdekes eredmények a K2 méréseiből

Magyar kutatók kisbolygók és Kuiper-övbeli objektumok fotometriai adatait is ki tudták nyerni és feldolgozni. A képen 600 kisbolygó pályarészlete látszik.

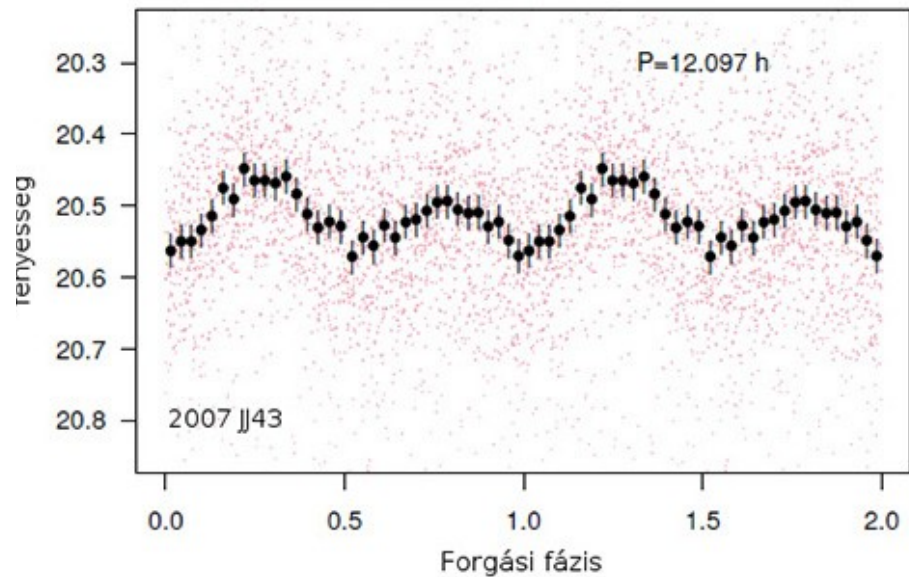


Érdekes eredmények a K2 méréseiből

A 2002 GV31 jelű égitest 40 CSE-re kering a Naptól és 22,5 magnitúdós. A fényességváltozásból sikerült meghatározni a tengelyforgási idejét (22,9 óra).

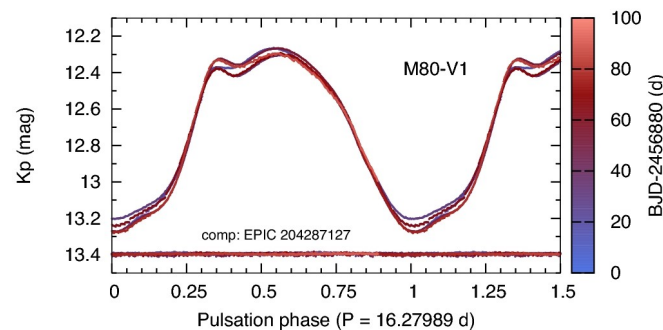
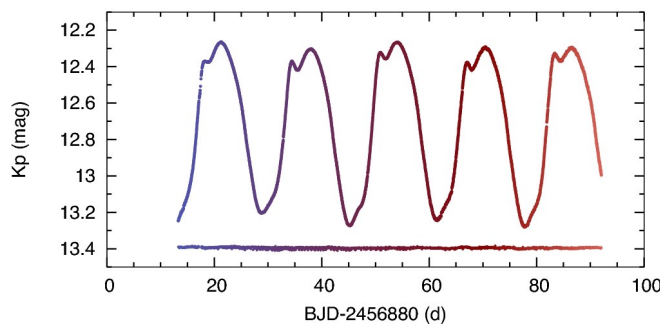
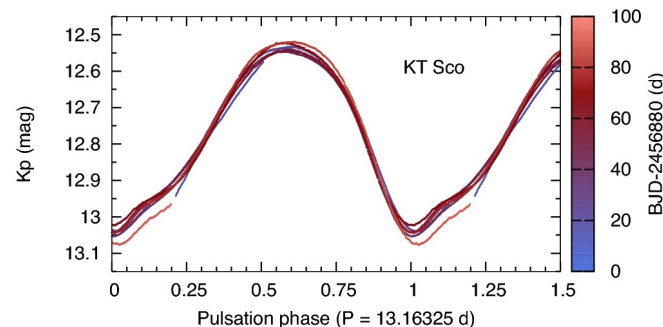
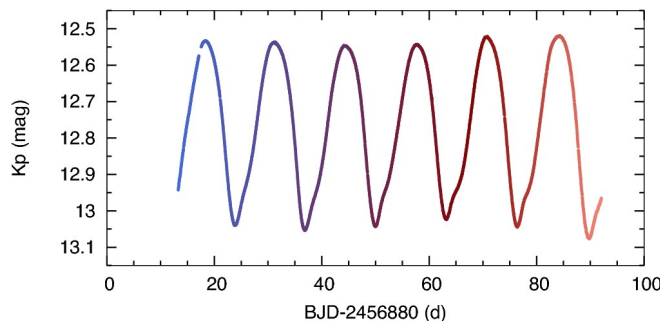
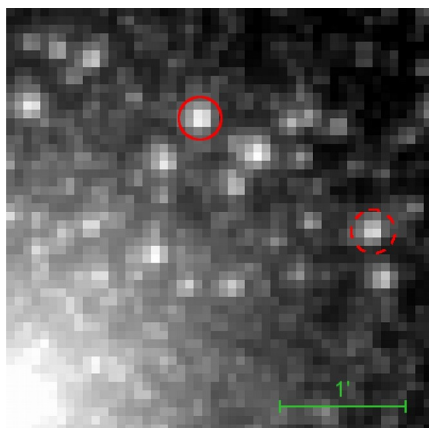
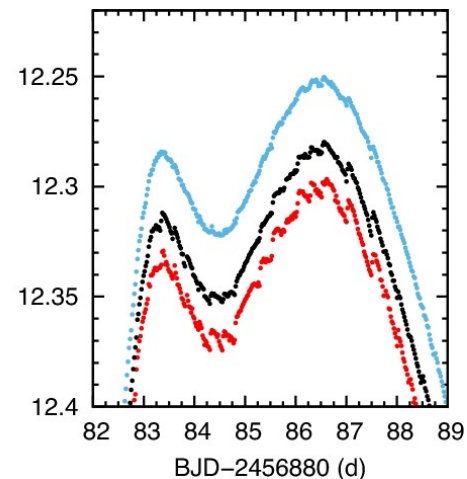
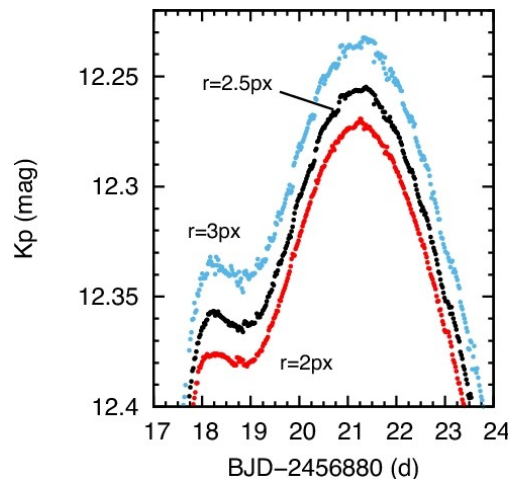


A (278361) 2007 JJ43 fényesebb (20,5 magnitúdós), és 41 CSE-re kering a Naptól. Majdnem 0,5 napos a forgási periódusa, ezért a Földről nemigen lehet meghatározni.



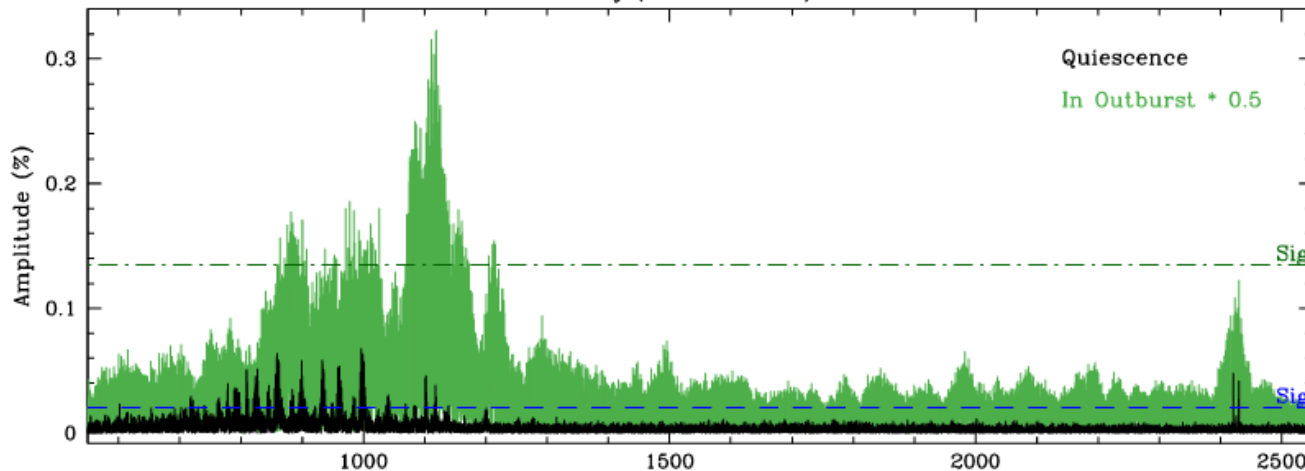
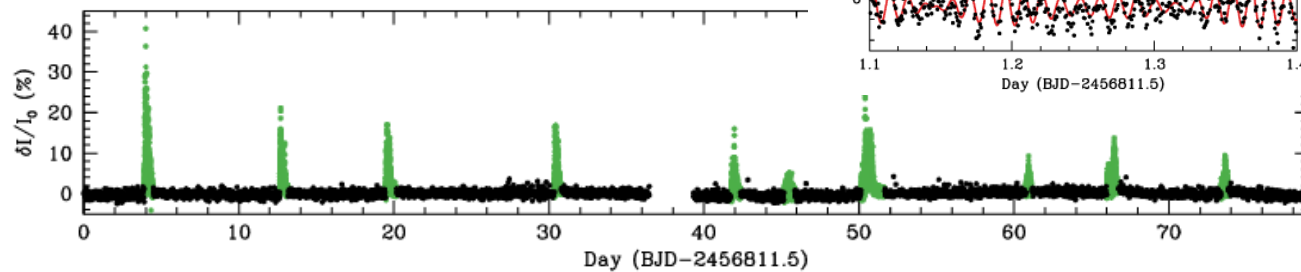
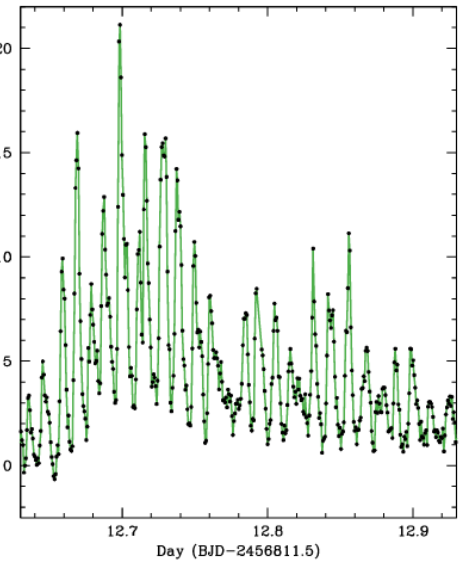
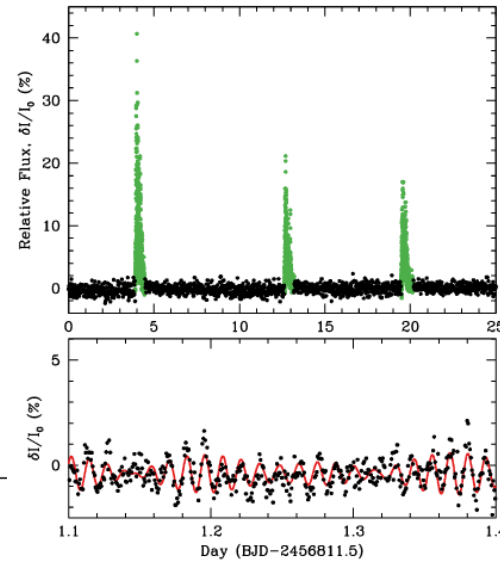
Érdekes eredmények a K2 méréseiből

II. típusú cefeidák (KT Sco és M80-V1): A fénygörbe alakja kissé függ az apertúrától.
 A KT Sco fénygörbéje erratikusan változik, a gömbhalmazbeli cefeida esetében perióduskétszereződés lépett fel. (Plachy et al., 2017)



Érdekes eredmények a K2 méréseiből

Kitörések „hideg” fehér törpén. A 11600 K hőmérsékletű PG 1149+057 a második eset (a KIC4552982 után). Kb. 8-naponta több órán át tartó kitörések. A pulzáció amplitúdója is megnő ilyenkor. Rezonáns móduscsatolás okozhatja.



A DAV instabilitási sáv vörös szélén jellemző.

Kis kitérő – a fehér törpék világába

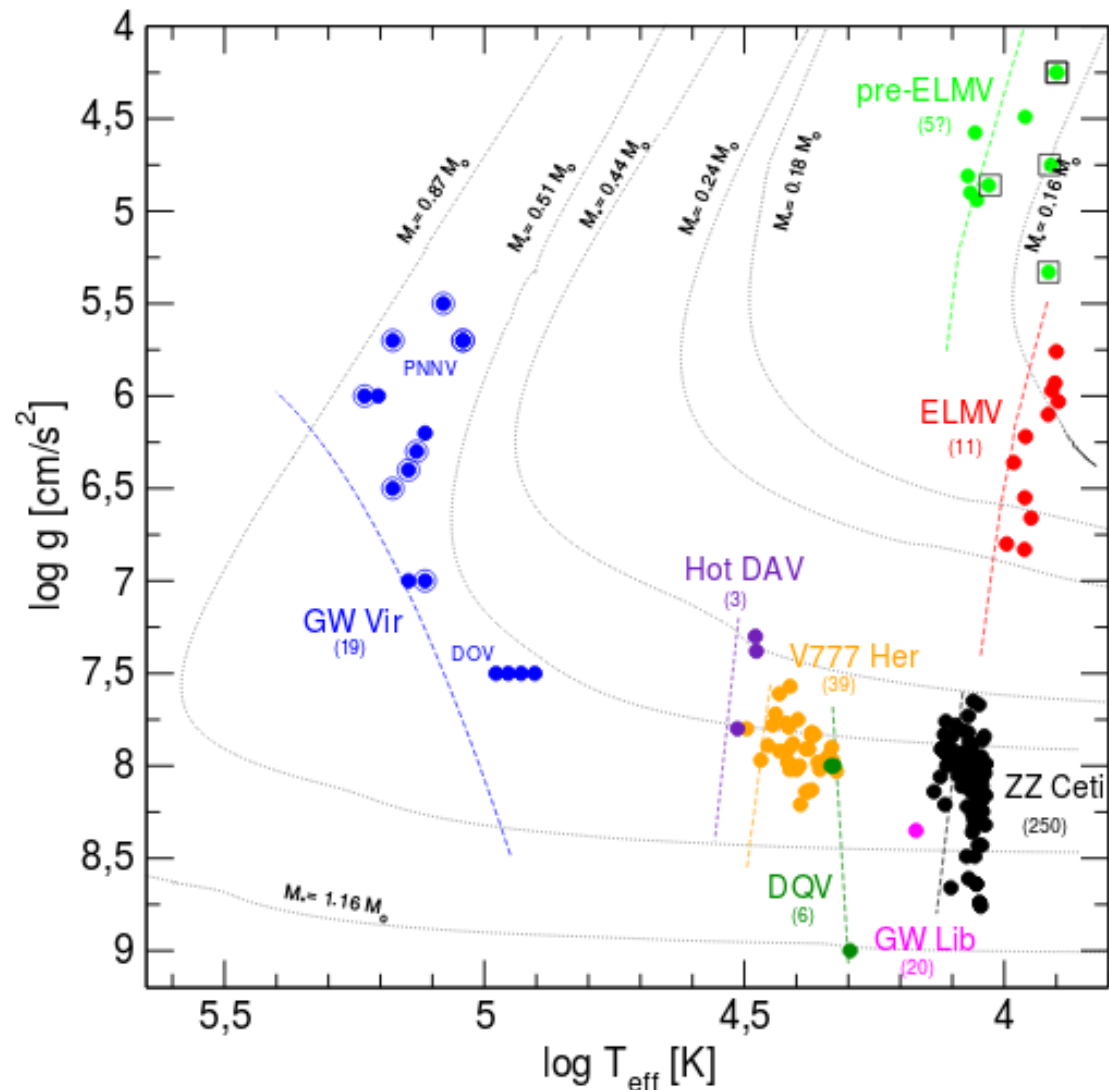
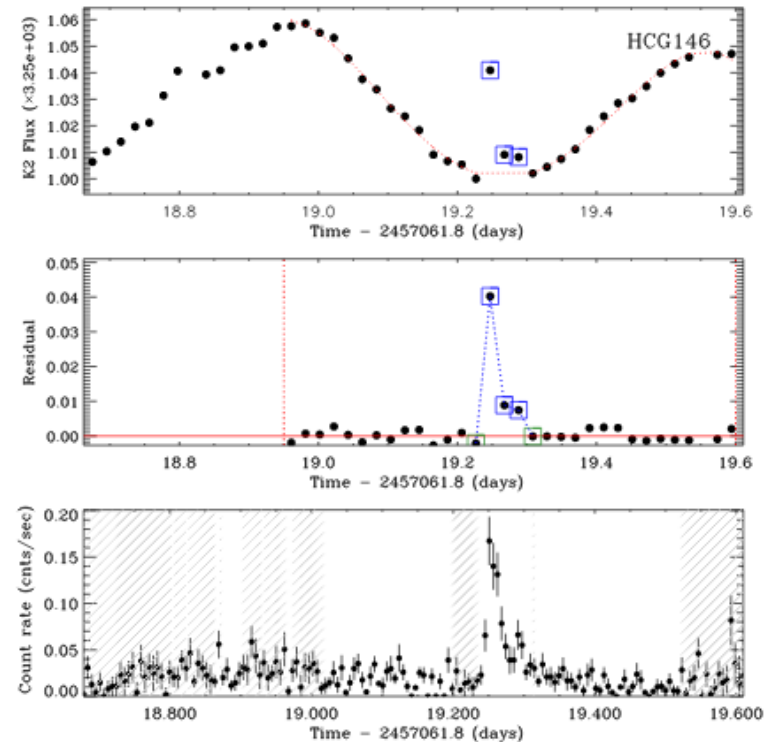
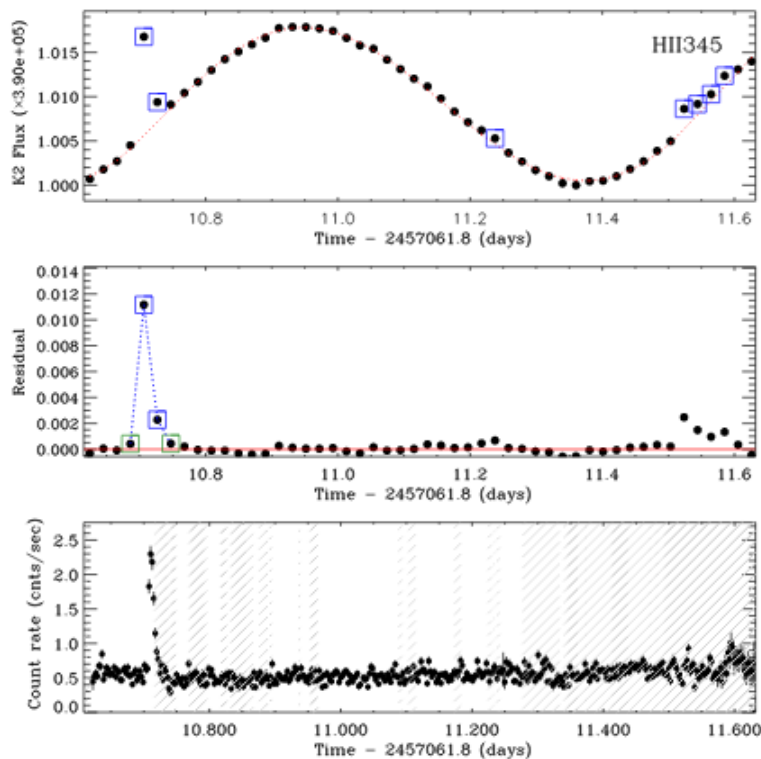


Figure 2. Confirmed and tentative sub-classes of pulsating white-dwarf and pre-white-dwarf stars (circles of different colors) in the $\log T_{\text{eff}} - \log g$ diagram (adapted from [Córscico et al. 2015](#)).

Érdekes eredmények a K2 méréseiből

Flercsillagok a Pleiadokban, az XMM-Newton röntgenméréseivel együttműködve. 125 millió éves halmazban K-M típusú csillagok, továbbá egy G8 és egy F9 típusú. Ezek szuperflerek a napflerekkel összehasonlítva.

A gyorsan forgó csillagoknál rövidebb ideig tartanak a flerek. Az optikai sugárzás dominál a röntgensugárzáshoz képest, mint a napflereknél.



Érdekes eredmények a K2 méréseiből

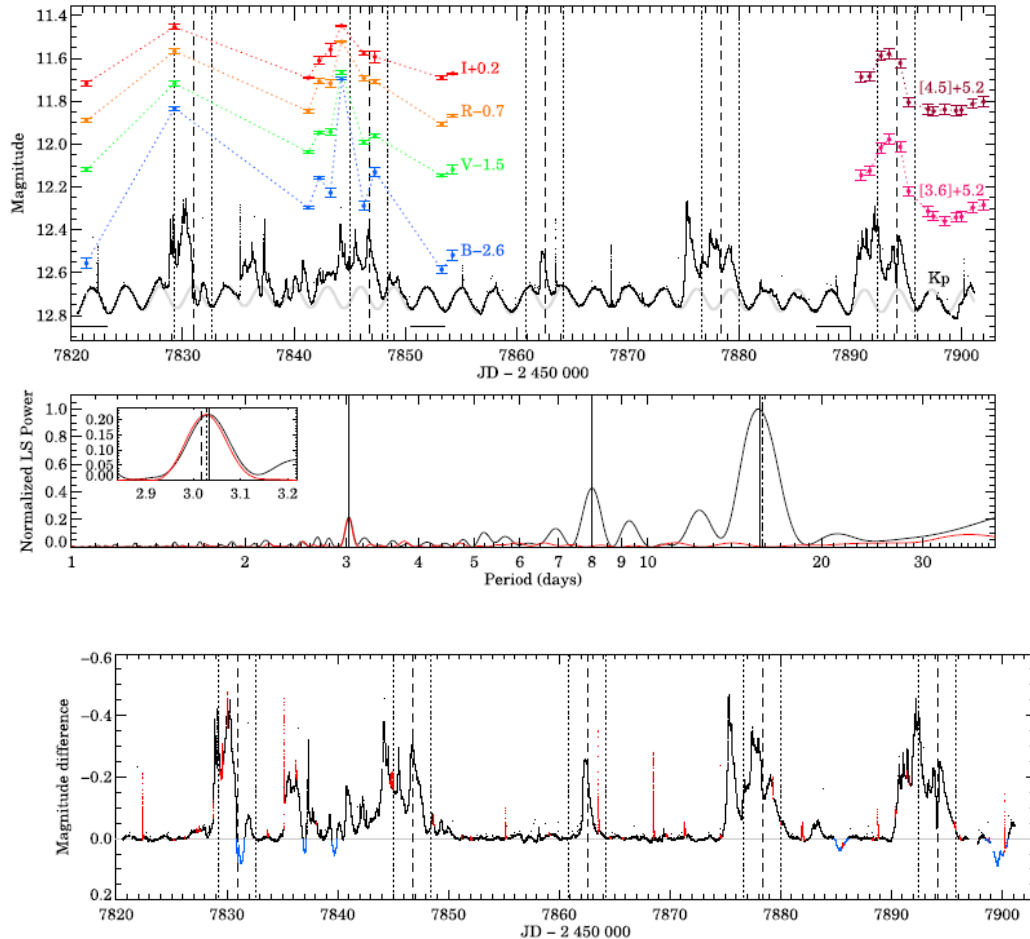


Figure 4. K2 light curve of DQ Tau after removing the sinusoidal variation due to rotational modulation. Points highlighted in red color indicate the identified flares (Section 4.3), while the blue points mark possible “dipper” events (Section 5.5). As in Figure 2, dashed lines mark the periastrons and dotted lines indicate their uncertainties.

Foltok, flerek, akkréció a DQ Taurin (fősorozat előtti spektroszkópai kettőscsillag) Spitzer-mérésekkel kiegészítve – Kóspál et al. (2018)

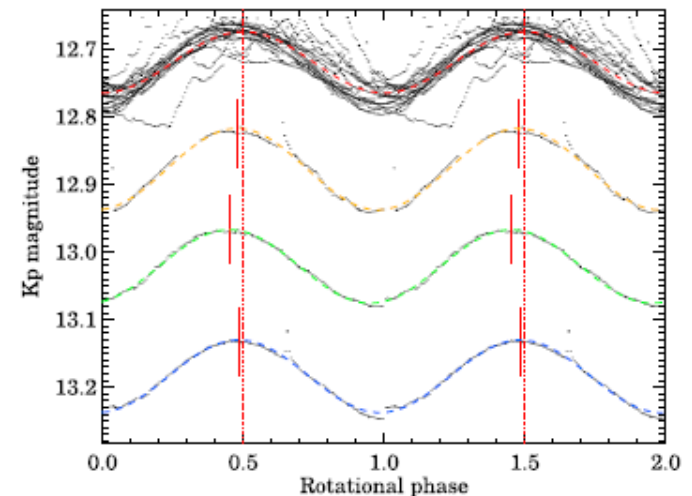


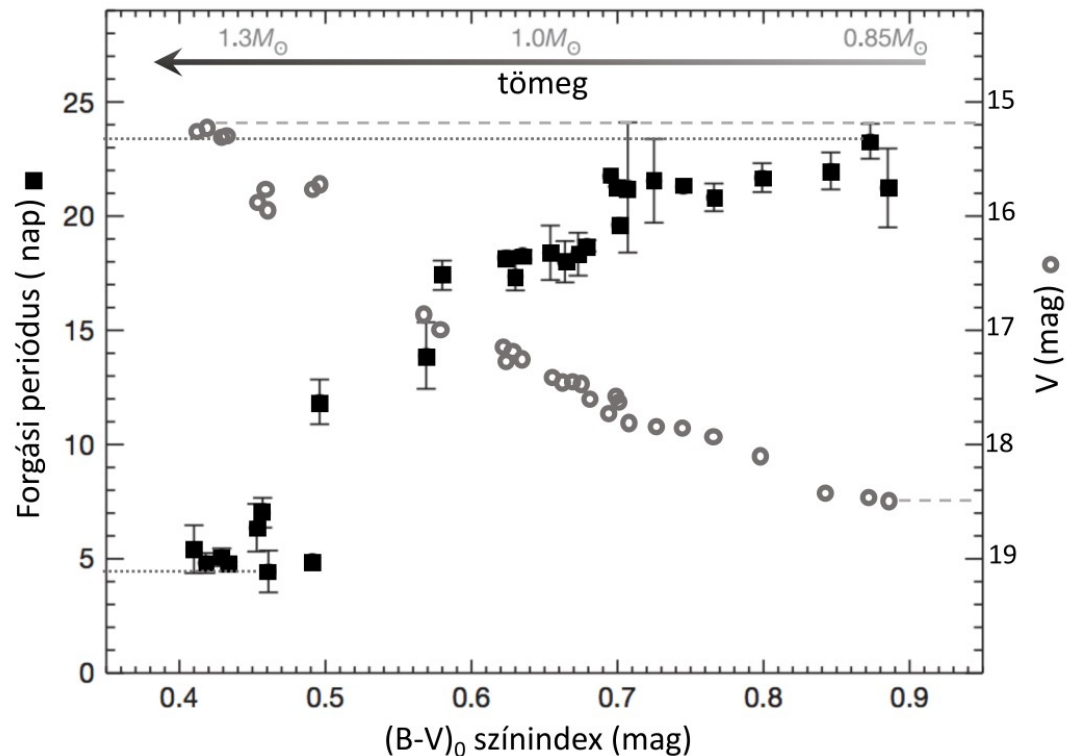
Figure 3. Phase-folded long cadence K2 light curve of DQ Tau using $P = 3.017$ days, together with a sine function fitted for the full data set (red dashed curve). The data points and sine fits below display three single cycles, between JD-2 450 000 = 7820.23-7823.26, 7850.56-7853.59, and 7886.95-7889.99. For clarity, these have been shifted along the y axis.

Girokronológia halmazok K2-méréseiből

A csillagok forgási sebessége korfüggő (csillagszél + mágneses fékeződés). Korbecslés a forgási periódus alapján. A csillaghalmazok jó tesztobjektumok. 29 halmazra vannak adatok: 2 csillagkeletkezési régió (kor < 1 millió év), 18 nyílthalmaz (1 millió éve és 8 milliárd év közötti kor), 9 gömbhalmaz (>11 milliárd év). A halmazbeli csillagok tengelyforgási periódusa tömegfüggő.

29860 csillag rotációs eredetű fényváltozása alapján meghatározott forgási periódusok eloszlása bimodális (a Kepler-mezőben is).

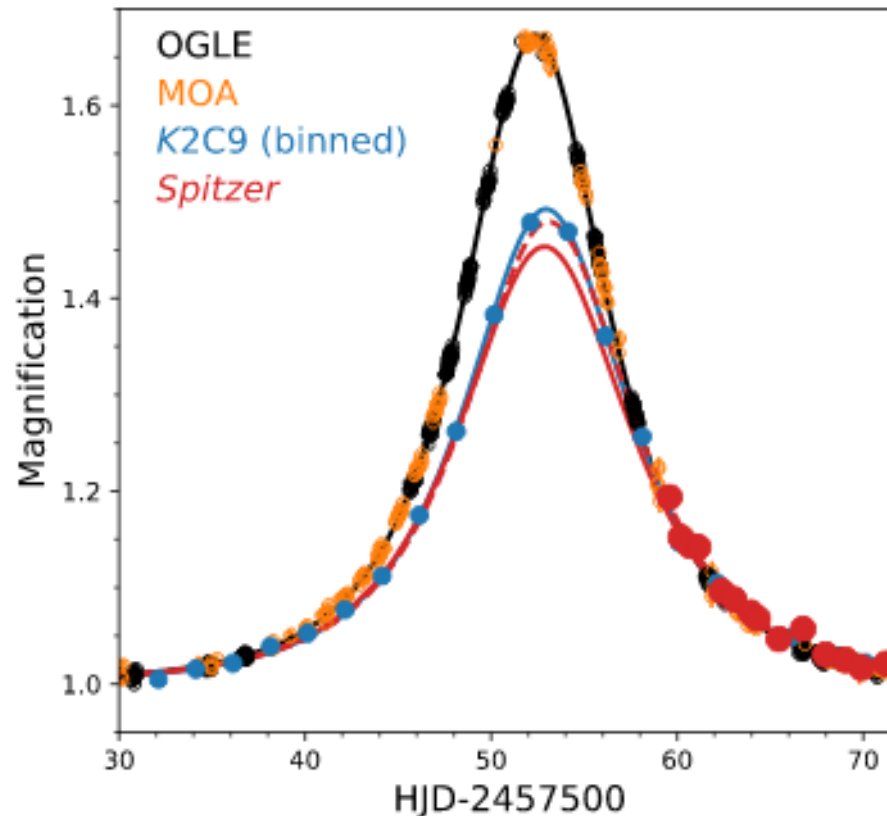
Lehetséges ok: a közbülső periódustartományban a fáklyák hatása kioltja a csillagfoltokét, ezért nincs észlelhető fényváltozás a forgás során (Reinhold & Hekker, 2020)



Érdekes eredmények a K2 méréseiből

MOA-2016-BLG-290: Gravitációs mikrolencse eredetű felfényesedés együttes vizsgálata földi és Spitzer-mérésekkel. A lencsező objektum egészen kis tömegű csillag volt.

A mérés idején a Spitzer már 1 CSE távol volt a Földtől. Ez elősegíti a lencse távolságmeghatározását, csökkenti annak bizonytalanságát.



Érdekes eredmények a K2 méréseiből

A Naprendszerből az extragalaxisokig:

Molnár et al. (2018) két cikke: az egyik kisbolygok fénygörbéje (forgási periódusa), a másik a Leo IV törpegalaxisban található RR Lyrae csillagok fénygörbéje, az egyiknél még a Blazskó-effektus is látszik.

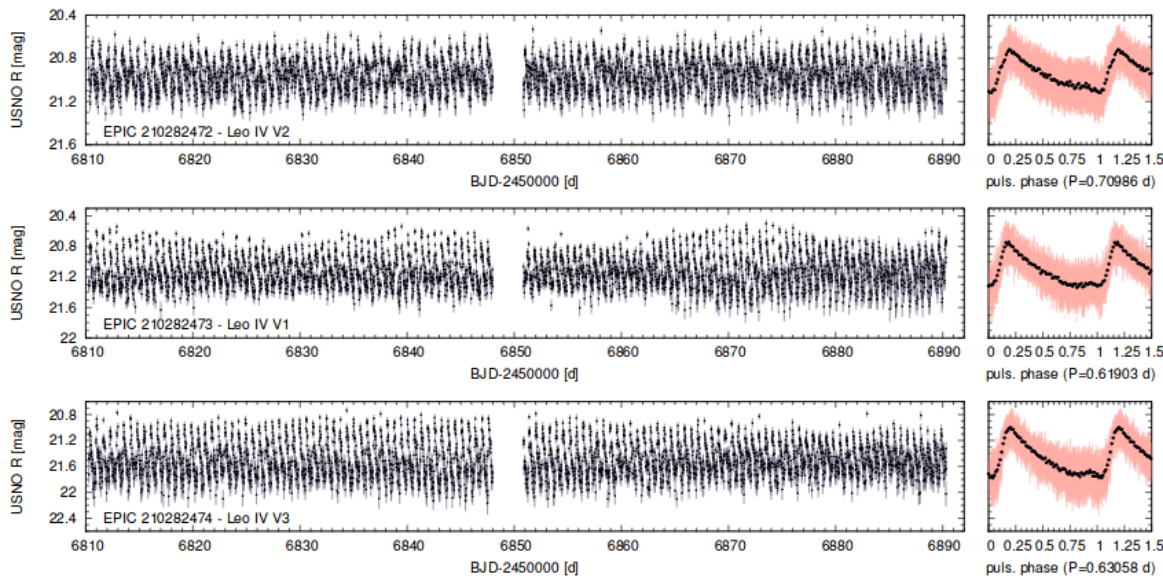


FIG. 3.— Light curves of the three RR Lyrae stars. Left panels: light curves after outlier removal and Fourier filtering. Note the variable amplitude of EPIC 210282473 in the middle panel. Designations from Moretti et al. (2009) are also indicated. The right panels show the folded light curves (pink dots and lines) and the binned phase curves (black points). We used 75 bins per pulsation period for each star.

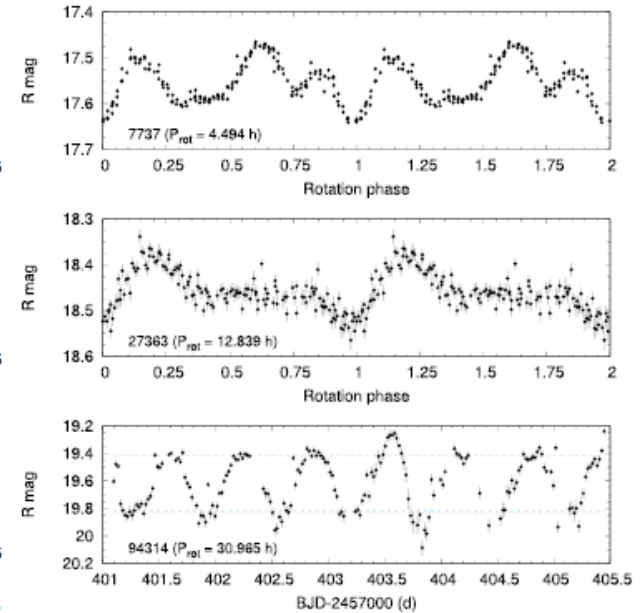
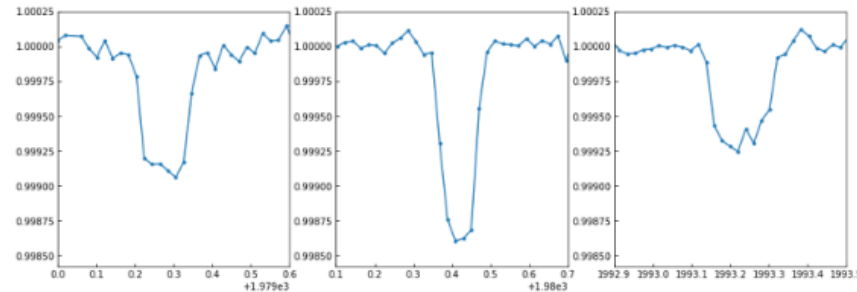
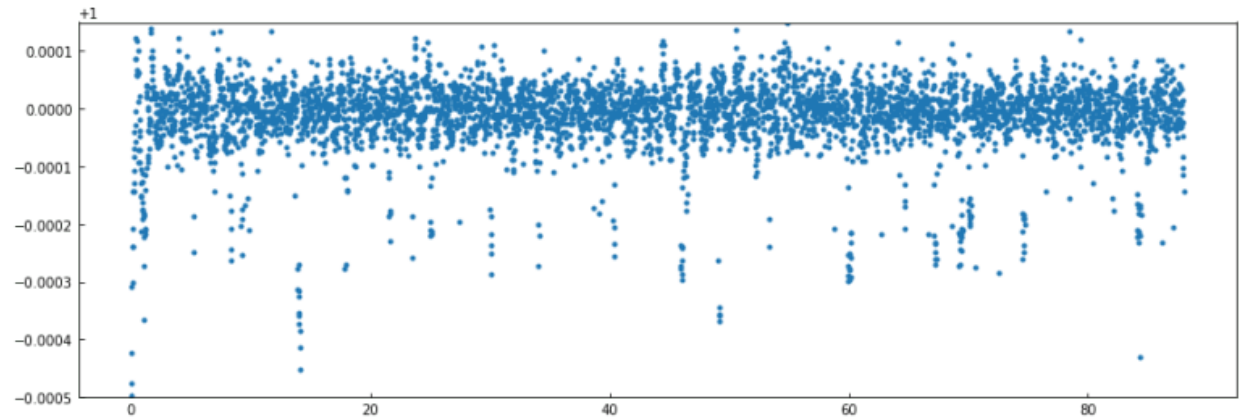


Figure 7. Top: phase curves of two asteroids with multi-peaked light curves. (7737) Sirrah features likely four different peaks per rotation. The light curve of (27363) Alvancark shows one dominant bright phase and a plateau-like feature that contains two smaller bumps. Bottom: the light curve (94314) 2000 AO₁₆₅, a possible tumbling or precessing asteroid that shows slightly changing cycles and one at BJD 2457403.5 with peculiarly large amplitude.

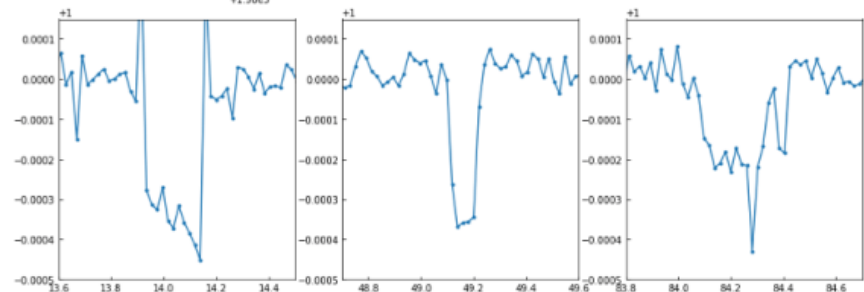
A K2 is észlelt rejtélyes viselkedést

Random Transiter (véletlenszerű fedések): a HD 139139 mutatja. A 87 napos mérési időszak során 28 egészen csekély (0,2 millimagnitúdós) halványodások néhány órás időtartamra. Az eddig publikált magyarázatokat mind elvetették.



K2-3b/c/d

HD 139139



A Keplerrel kapcsolatos statisztika

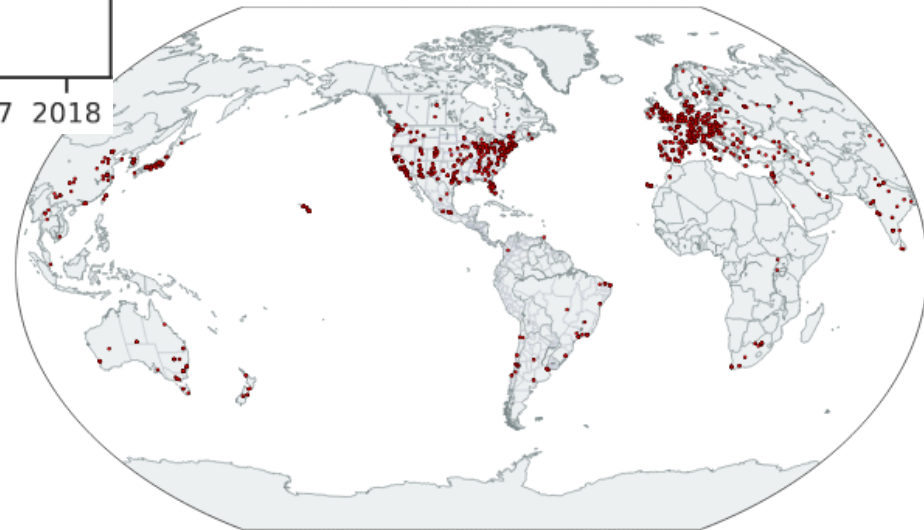
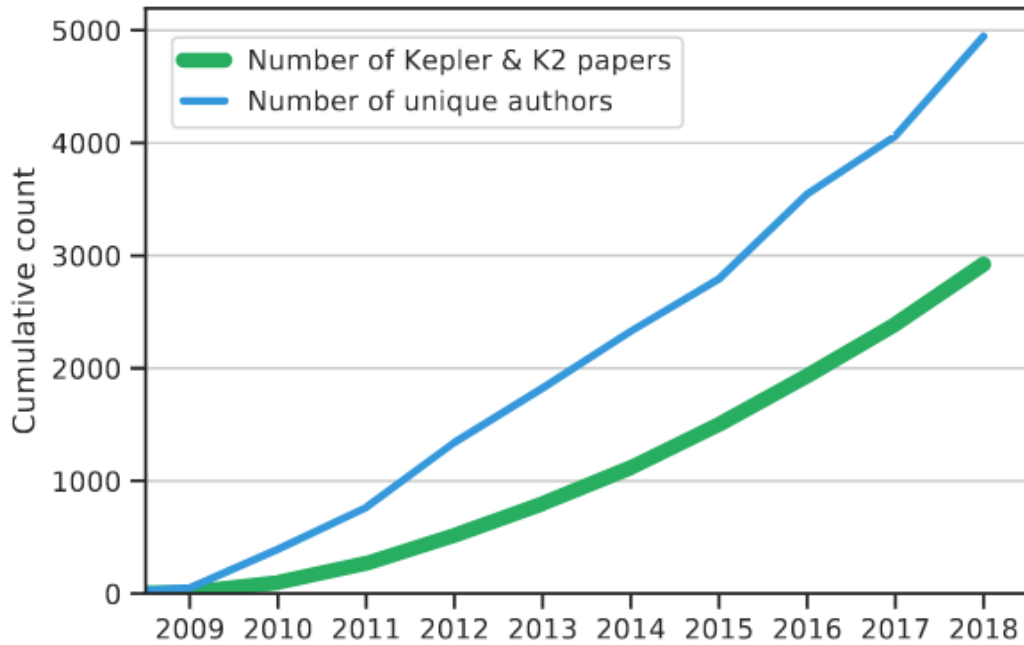


Figure 2. Map of the institutions of authors and co-authors of Kepler and K2 publications. To date, Kepler data have been used in 63 countries across 6 continents.

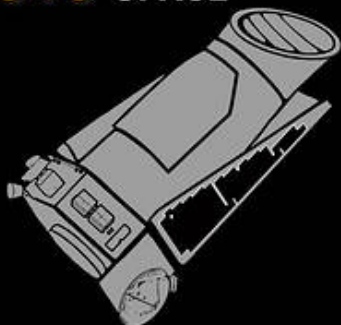
„Numerikus” összefoglalás a Keplerről

Kepler

BY THE NUMBERS

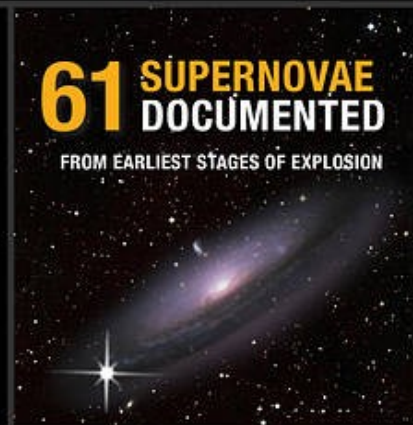


9.6 YEARS IN SPACE



61 SUPERNOVAE DOCUMENTED

FROM EARLIEST STAGES OF EXPLOSION



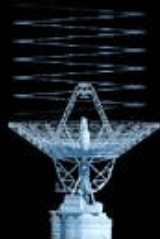
2 MISSIONS COMPLETED

678 GB SCIENCE DATA COLLECTED

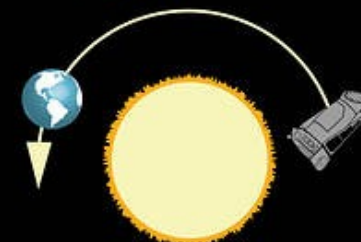
2,946 SCIENTIFIC PAPERS PUBLISHED

94 MILLION MILES AWAY

3.12 GALLONS FUEL USED



732,128 COMMANDS EXECUTED



www.nasa.gov/kepler

As of October 24, 2018

@NASAKepler

A Kepler és Gaia szinergiája

12

BERGER ET AL.

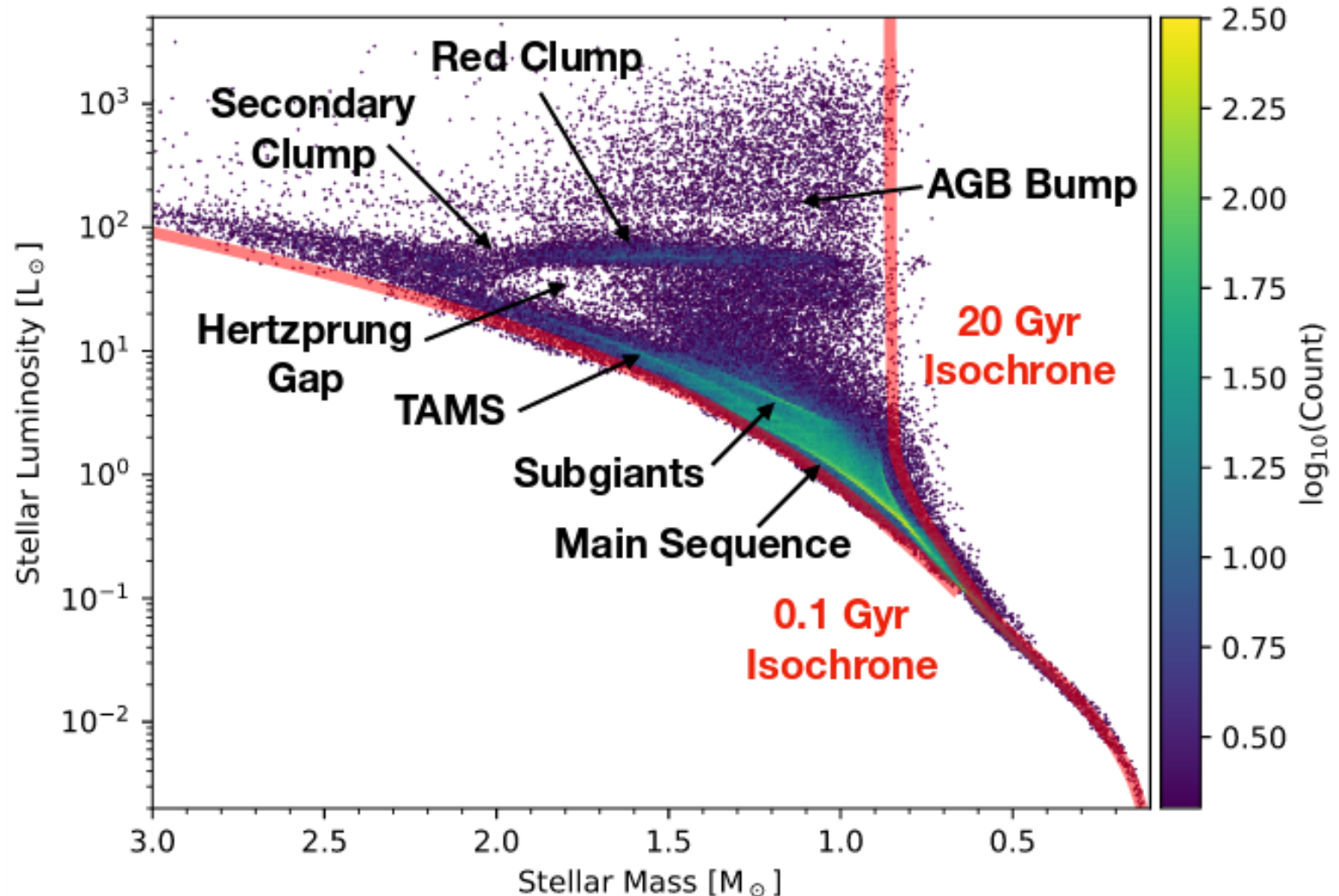
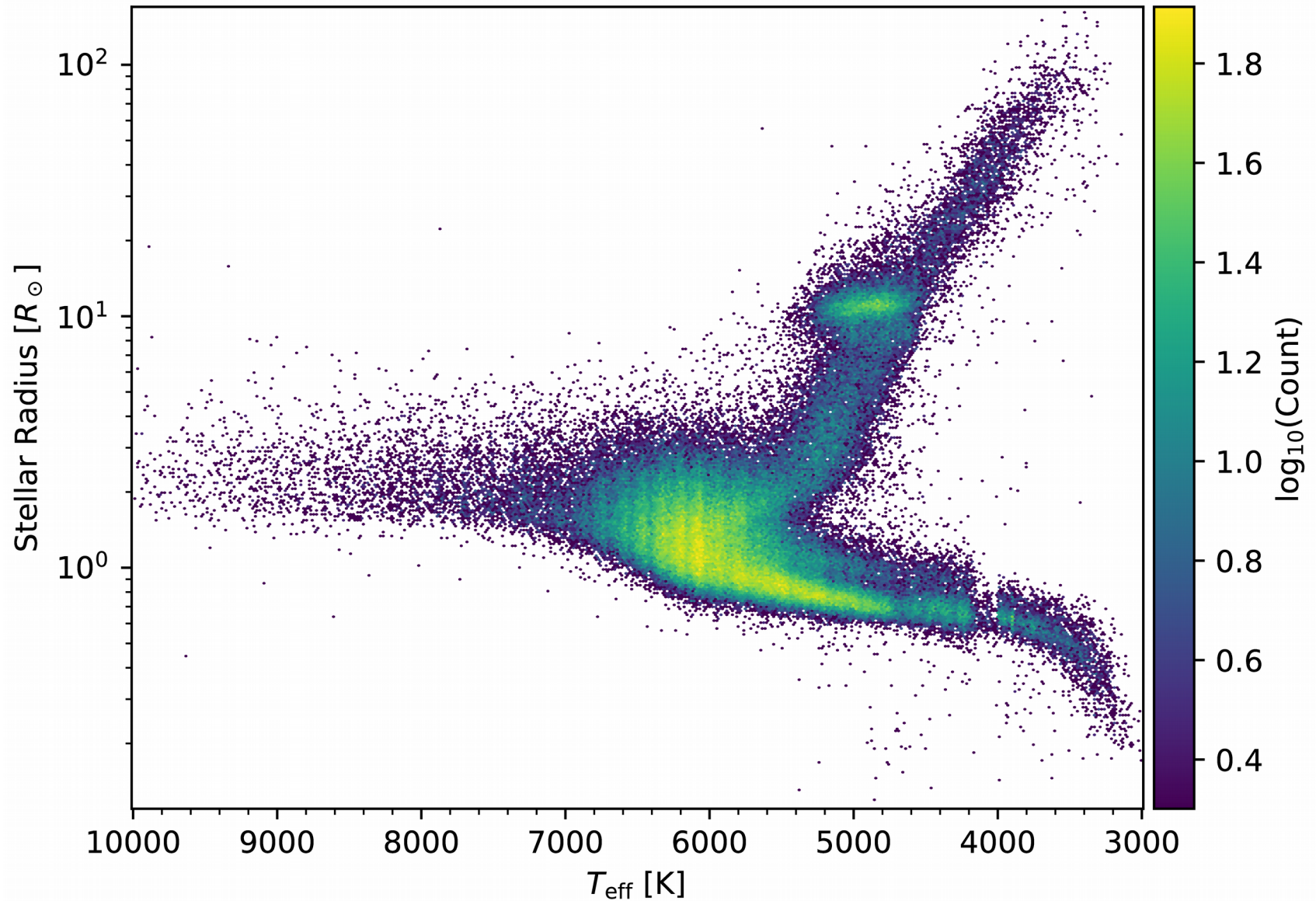


Figure 8. Luminosity versus mass for $\sim 186,000$ *Kepler* stars. Color-coding represents logarithmic number density. The red, translucent curves represent the 0.1 (left) and 20 Gyr (right), $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.0$ dex isochrones. We have labeled all features in the distribution accordingly.

A Kepler és Gaia szinergiája

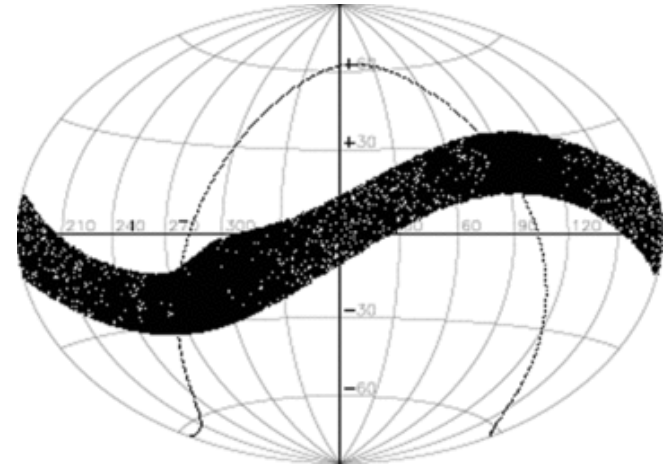


Fotometria a STEREO szondával

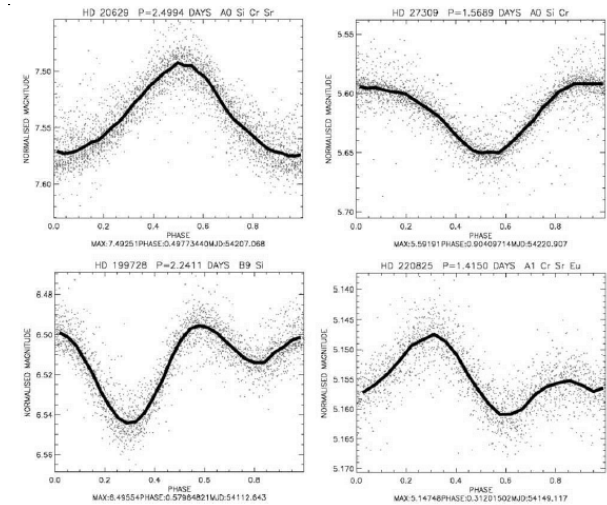
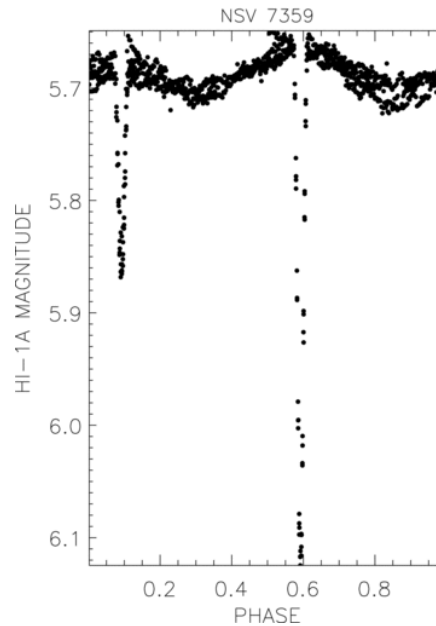
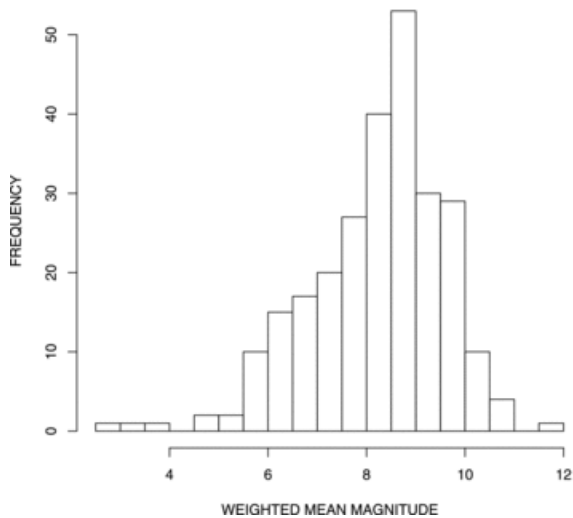
STEREO/H1-1A (1B) adataiból 263 fedési kettős fénygörbéje.

NSV 7359 mint példa: $P=9,1999$ nap.
Korábban B CEP típusúként volt ismert + 0,2872 napos SB. A fedést egy 3. komponens okozza.

Jobbra lent: CP-csillagok fénygörbéje.

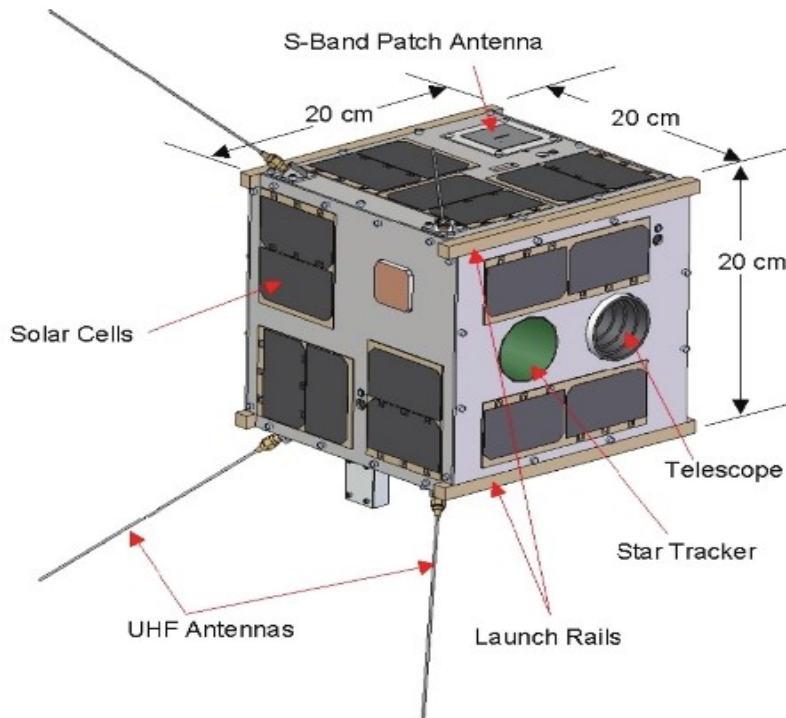


DISTRIBUTION OF MAGNITUDES OF ECLIPSING BINARIES



A BRITE szondacsalád

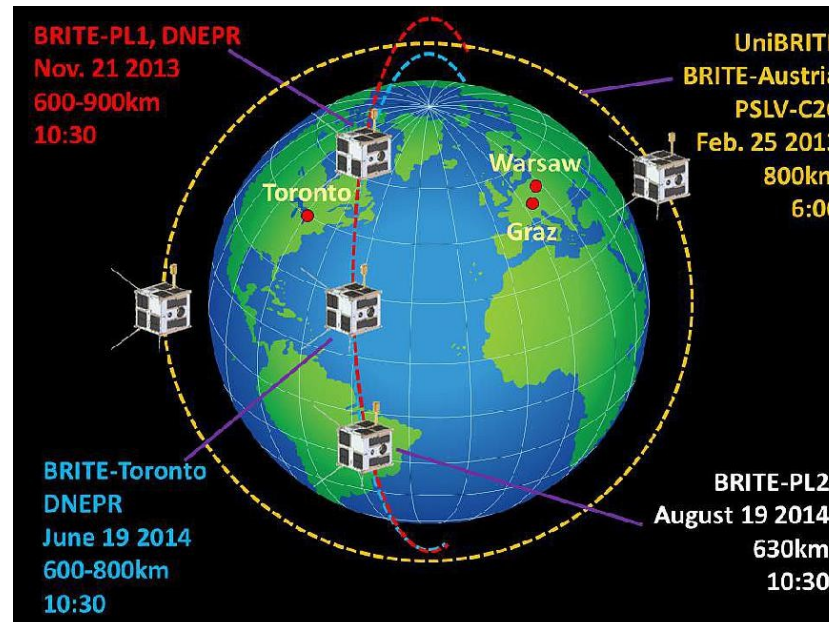
BRITE: BRiGht Target Explorer; Kanada, Lengyelország, Ausztria; BRITE-Constellation: 6 nanoszonda (20 cm oldalélű kocka), 3 cm-es távcsőátmérővel, 25 fok átmérőjű látómezővel, 4 magnitúdónál fényesebb csillagok körüli exobolygók felfedezésére. Országonként 1-1 szonda V-ben, illetve B-ben mér. Egyszerre 15 csillag észlelhető.



Name	F	Launcher	T0	Orbit km
<u>Austria:</u>				
TUGSAT-1	\tilde{B}	PSLV-C20	Feb. 2013	781 × 766
UniBRITE	\tilde{R}	PSLV-C20	Feb. 2013	781 × 766
<u>Poland:</u>				
B-Lem	\tilde{B}	DNEPR	Nov. 2013	600 × 900
B-Heweliusz	\tilde{R}	LM-4B	Aug. 2014	600 × 630
<u>Canada:</u>				
B-Toronto	\tilde{R}	DNEPR	Jun. 2014	620 × 770
B-Montréal	\tilde{B}	DNEPR	Jun. 2014	620 × 1450 [†]

Notes. F – filter; Launcher (PSLV-C20 from India, DNEPR from Russia, and LM-4B from China); T0 – launch date; Orbit – km above ground; ^(†) for reasons unknown, BRITE-Montréal did not release from the upper stage of DNEPR.

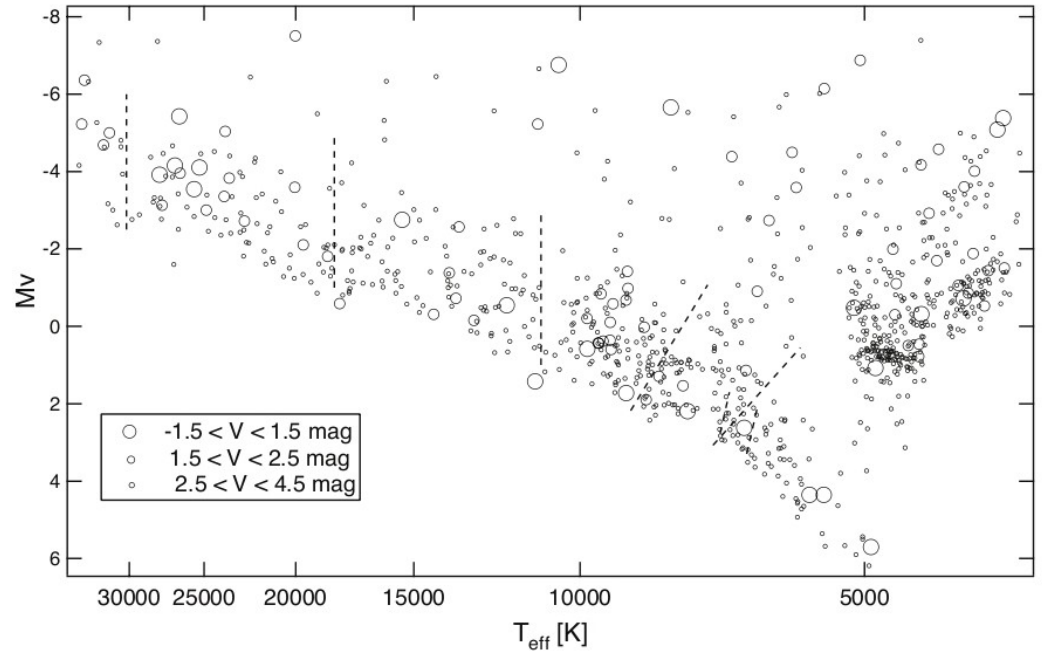
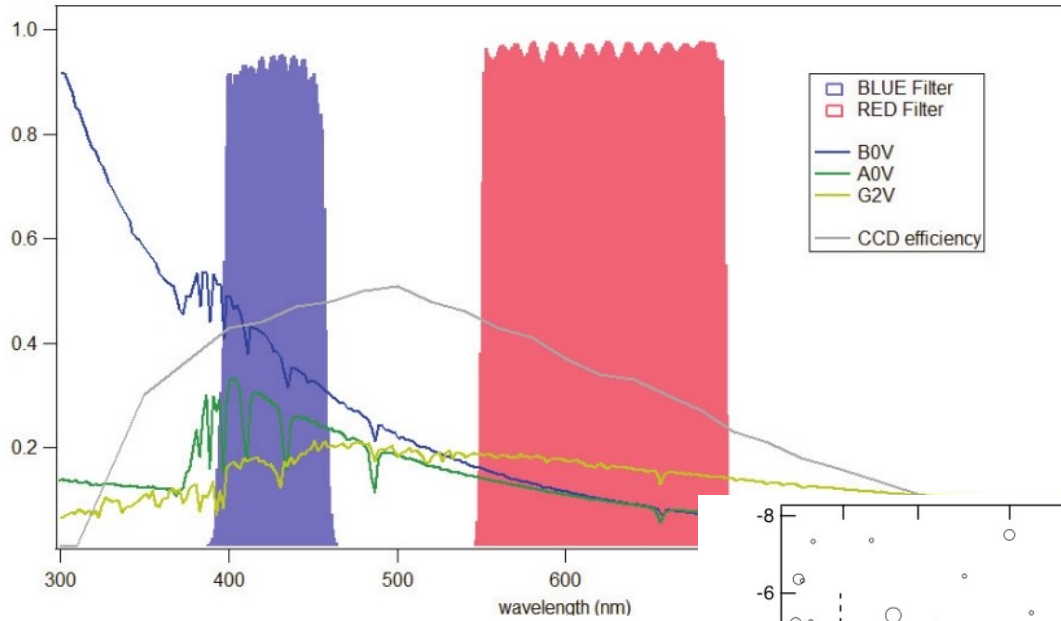
A BRITE szondacsalád



ID	Full name	Launch date	Operating station	Altitude (km)	Inclination	Period (min)
UBr	UniBRITE	25 Feb 2013	Toronto (SFL)	775 – 790	98.6°	100.4
BAb	BRITE-Austria	25 Feb 2013	Graz (TUG)	775 – 790	98.6°	100.4
BLb	Lem	21 Nov 2013	Warsaw (CAMK)	600 – 890	97.7°	99.6
BTr	BRITE-Toronto	19 Jun 2014	Toronto (SFL)	620 – 643	97.9°	98.2
BMb	BRITE-Montréal	19 Jun 2014	Toronto (SFL)	—	—	—
BHr	Heweliusz	19 Aug 2014	Warsaw (CAMK)	612 – 640	98.0°	97.1

A BRITE szondacsalád

BRITE Filters and CCD response



A BRITE korlátozott pontossága

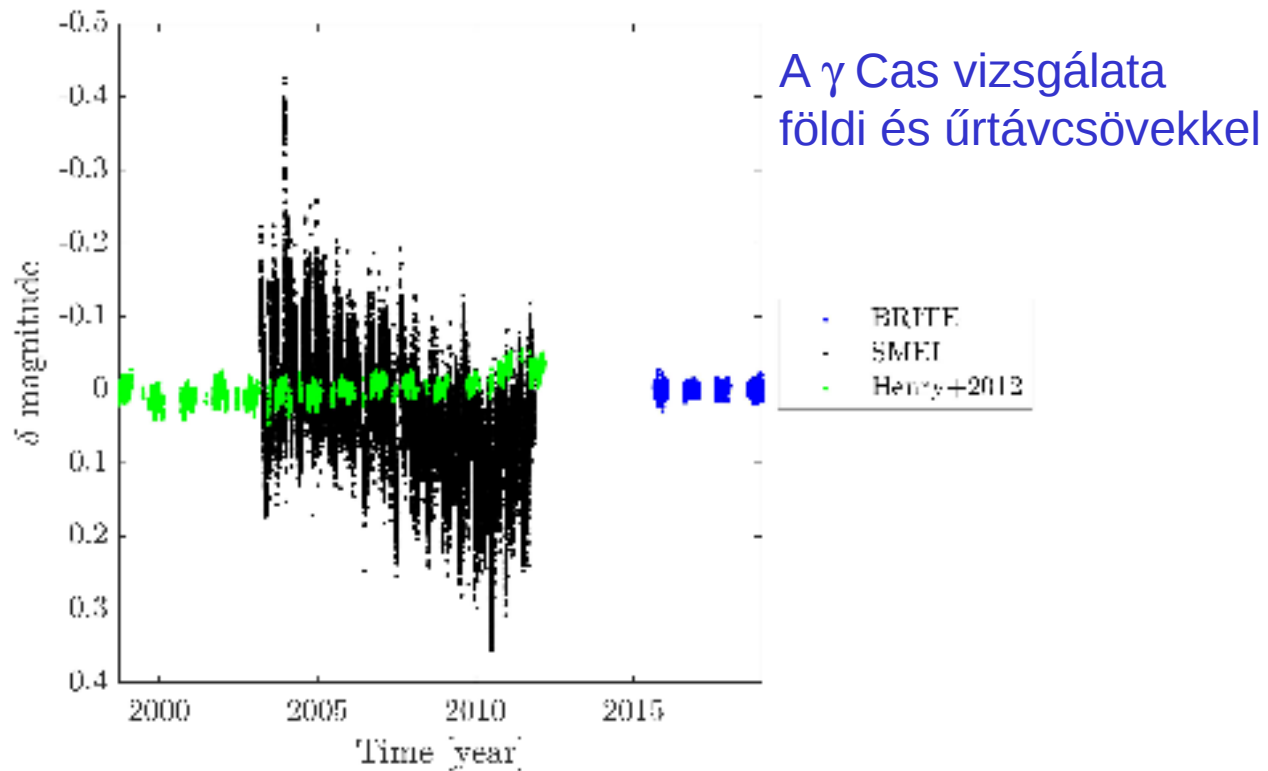


Fig. 3: Time series of BRITE (blue), SMEI (black) and APT (green) photometry. The mean magnitude of SMEI and BRITE is 0 by construct. The mean magnitude of the APT data has been shifted to zero compared to the data provided on the web. The APT data were analysed in detail by [Henry & Smith \(2012\)](#). The figure shows that the noise in the SMEI satellite data is significantly higher than in the APT and BRITE measurements.

A BRITE eddigi mérési programja

- 01-Ori-I-2013 (released)
- 02-Cen-I-2014 (released)
- 03-Sgr-I-2014 (released)
- **04-Cyg-I-2014 (released)**
- 05-Per-I-2014 (released)
- 06-Ori-II-2014 (released)
- 07-VelPup-I-2014 (released)
- 08-VelPic-I-2015 (released)
- 09-Sco-I-2015 (released)
- 10-Cyg-II-2015 (released)
- 11-CasCep-I-2015 (released)
- 12-CMaPup-I-2015 (released)
- 13-Ori-III-2015 (released)
- 14-VelPup-II-2015 (released)
- 15-CruCar-I-2016 (released)
- 16-Sgr-II-2016 (released)
- 17-CygLyr-I-2016 (released)
- 18-AraSco-I-2016 (completed)
- 19-Cas-I-2016 (released)
- 20-AurPer-I-2016 (released)
- 21-CetEri-I-2016 (released)
- 22-Ori-IV-2016 (released)
- 23-VelPic-II-2016 (released)
- 24-Car-I-2017 (released)
- 25-VelPup-III-2017 (released)
- 26-AraSco-II-2017 (completed)
- 27-Sgr-III-2017 (QCT review)
- 28-Peg-I-2017 (released)
- 29-LacCyg-I-2017 (released)
- 30-Cas-II-2017 (completed)
- 31-Tau-I-2017 (completed)
- 32-Ori-V-2017 (completed)
- 33-VelPic-III-2017 (completed)
- 34-VelPup-IV-2017 (QCT review)
- 35-Cen-II-2018 (QCT review)
- 36-Car-II-2018 (QCT review)
- 37-Sgr-IV-2018 (QCT review)
- 38-Cyg-III-2018 (QCT review)
- 39-Cas-III-2018 (ongoing)
- 40-OriTau-I-2018 (ongoing)
- 41-CMaCol-I-2018 (planned)
- 42-CMaPup-II-2018 (planned)
- 43-VelPup-V-2019 (planned)
- 44-Car-III-2019 (planned)
- 45-Sgr-V-2019 (planned)
- 46-CygLyr-II-2019 (planned)
- 47-Cas-IV-2019 (planned)

A BRITE mérési programja

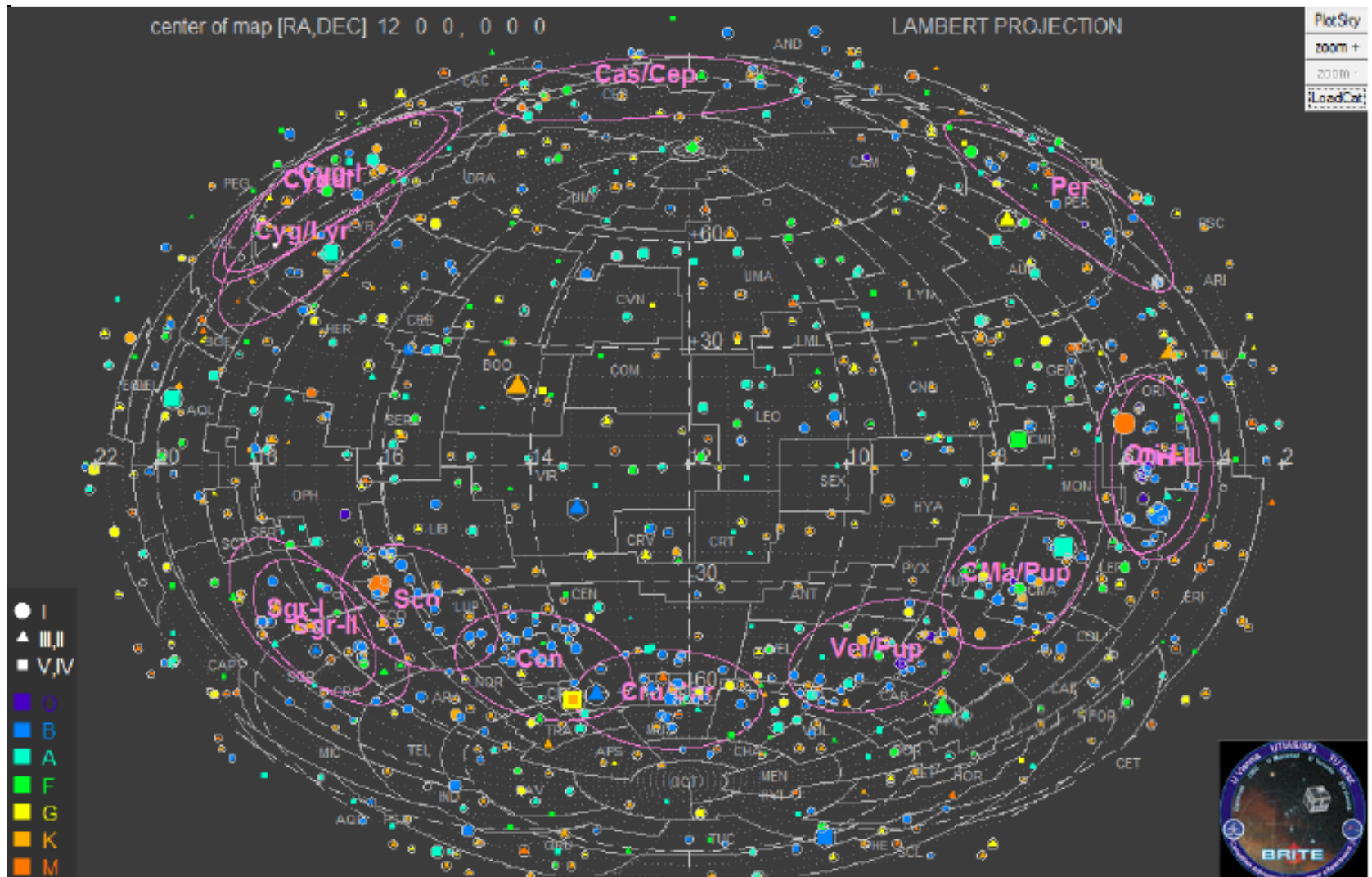
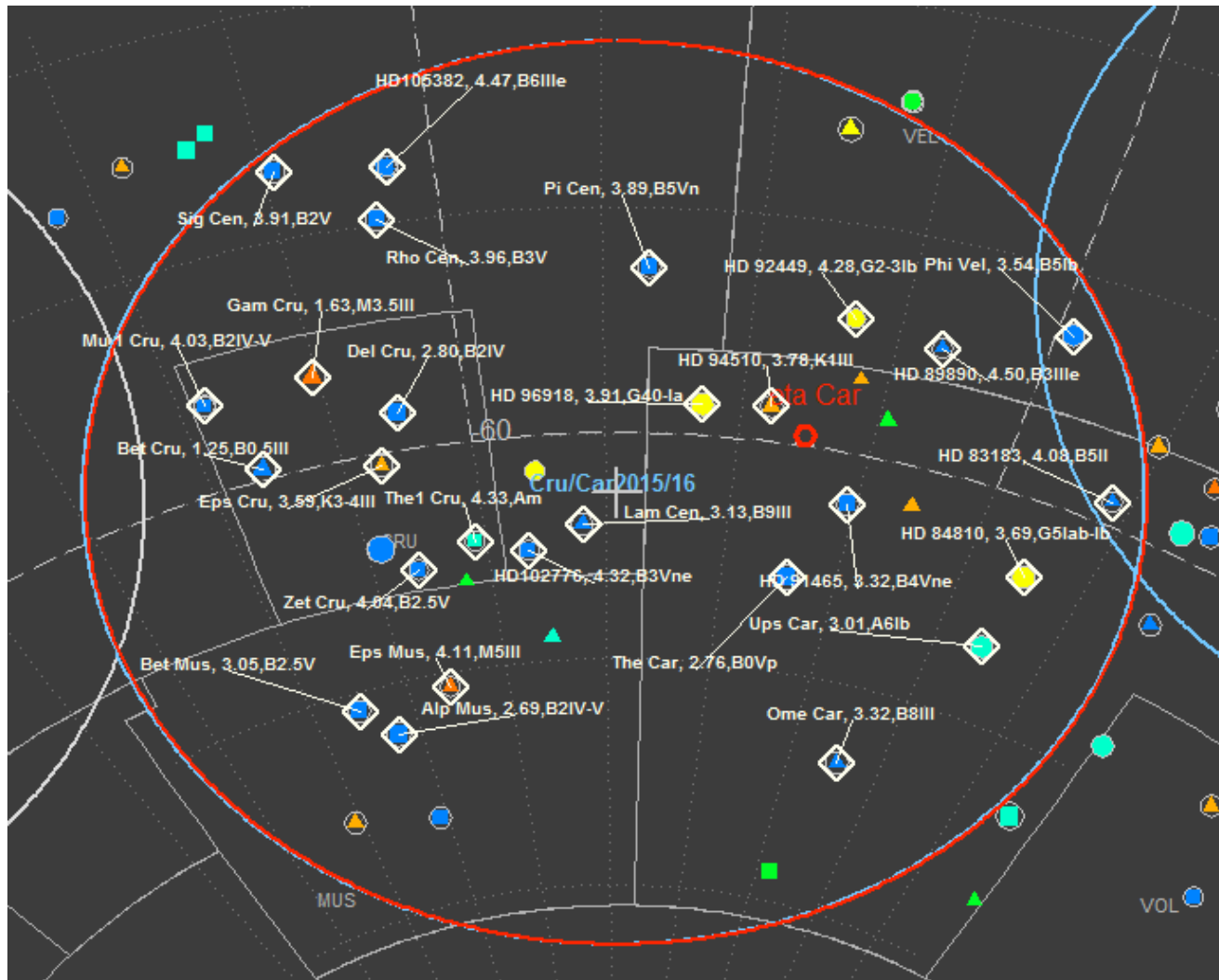


Figure 1. A sky map containing all stars brighter than $V = 4.5$. The colour code refers to spectral type, the symbols to luminosity class. Encircled stars have been proposed for BRITE observations. The sky areas labeled and encircled in pink have been observed by BRITE to date (cf. Table 1). Almost the whole galactic plane has been sampled.

A BRITE mérési programja



A BRITE által észlelt csillagok a Cru–Car mezőben

A BRITE mérési programja

#	HD	Star	V	Sp. type	Contact-PI	TNDP*	Field	Status**					
1	432	β Cas	2.27	F2 III-IV	Zwintz	52707 52277	CasCep I Cas I	PP PP					
2	2905	κ Cas	4.16	B1 Ia	Handler	33212 56312	CasCep I Cas I	PP PP					
3	3360	ζ Cas	3.66	B2 IV	Pigulski	52607 20688	CasCep I Cas I	PP PP					
4	3712	α Cas	2.23	K0 IIIa	Kallinger	37078 28415	CasCep I Cas I	PP PP					
5	3901	ξ Cas	4.81	B2 V	Pigulski	18148	CasCep I	public					
6	4614	η Cas	3.44	F9 V + dM0	Huber	23084 2444	CasCep I Cas I	public PP					
7	5394	γ Cas	2.47	B0 IVe	Baade	49596 54771	CasCep I Cas I	public PP					
8	6811	φ And	4.25	B5 IIIe	Baade	18725	CasCep I	public					
9	6961	θ Cas	4.33	A7 V	Lüftinger	19619	CasCep I	public					
10	8538	δ Cas	2.68	A5 III-IV	449	210129	25 Peg	5.78	B7 Vne	Pigulski	14579	Peg I	PP
					450	210418	θ Peg	3.53	A2 V	Garrido	12397	Peg I	PP
					451	210745	ζ Cep	3.35	K1.5 Ib	Moffat	5187	CasCep I	public
11	11415	ε Cas	3.37	B3 III	452	210839	λ Cep	5.05	O6 In(f)p	Moffat	69725	LacCyg I	PP
					453	211336	ε Cep	4.19	F0 IV	Zwintz	35074	CasCep I	PP
					454	211924	30 Peg	5.37	B5 IV	Pigulski	26324	Peg I	PP
12	12111	48 Cas	4.54	A4 V									
13	12216	50 Cas	3.94	A1 V									
14	14386	ο Cet	var	M5-9e	454	211924	30 Peg	5.37	B5 IV	Pigulski	26324	Peg I	PP
15	14690	70 Cet	5.42	F1 V	455	212075		6.94	A7 V	Zwintz	7614	Peg I	PP
16	15633		5.99	A3 V	456	212076	31 (IN) Peg	5.01	B2 IV-Ve	Baade	28576	Peg I	PP
17	16212	80 Cet	5.54	M0 III	457	212593	4 Lac	4.58	B9 lab	Handler	63766	LacCyg I	PP
18	16582	δ Cet	4.07	B2 IV	458	213306	δ Cep	3.75	F5 lab	Smolec	39324	CasCep I	public
19	16620	ε Cet	4.87	F5 V							63766	LacCyg I	PP
20	16908	35 Ari	4.66	B3 V	459	213420	6 Lac	4.51	B2 IV	Pigulski	36303	LacCyg I	PP
21	16970	ν Cet	3.47	A2 Vn + F4 V	460	213617	39 Peg	6.44	F1 V	Zwintz	21026	Peg I	PP
					461	214167/8	8 Lac A/B	5.67/ 5.73	B2 V + B2 Ve	Pigulski	46446	LacCyg I	PP
					462	214680	10 Lac	4.88	O9 V	Handler	46127	LacCyg I	PP
463	214698	41 Peg	6.32	A2 V	Zwintz	6885	Peg I	PP					
464	214923	ζ Peg	3.40	B8 V	Paunzen	12526	Peg I	PP					
465	214993	12 (DD) Lac	5.25	B2 III	Handler	71194	LacCyg I	PP					
466	215664		5.84	F0 III-IV	Zwintz	40259	LacCyg I	PP					
467	216228	ι Cep	3.52	K0 III	Kallinger	4385	CasCep I	PP					
468	216489	IM Peg	5.64	K2 III	Kallinger	26687	Peg I	PP					
469	216672	HR Peg	6.36	S4.5	Kerschbaum	26443	Peg I	PP					
470	216916	16 (EN) Lac	5.59	B2 IV	Pigulski	67668	LacCyg I	PP					
471	217014	51 Peg	5.46	G2 IV	Hatzes	26570	Peg I	PP					
472	217675	ο And	3.62	B6 IIIpe + A2p	Pigulski	67668	LacCyg I	PP					
473	217891	β Psc	4.53	B6 Ve	Pigulski	28515	Peg I	PP					
474	218045	α Pea	2.49	B9 V	Huber	26447	Pea I	PP					

Eredmények a BRITE mérései alapján

η Centauri: Be-csillag, amelynek fényváltozása jórészt cirkumsztelláris eredetű (korong van a gyorsan forgó csillag körül) + a csillag nem radiális pulzációs módusai.

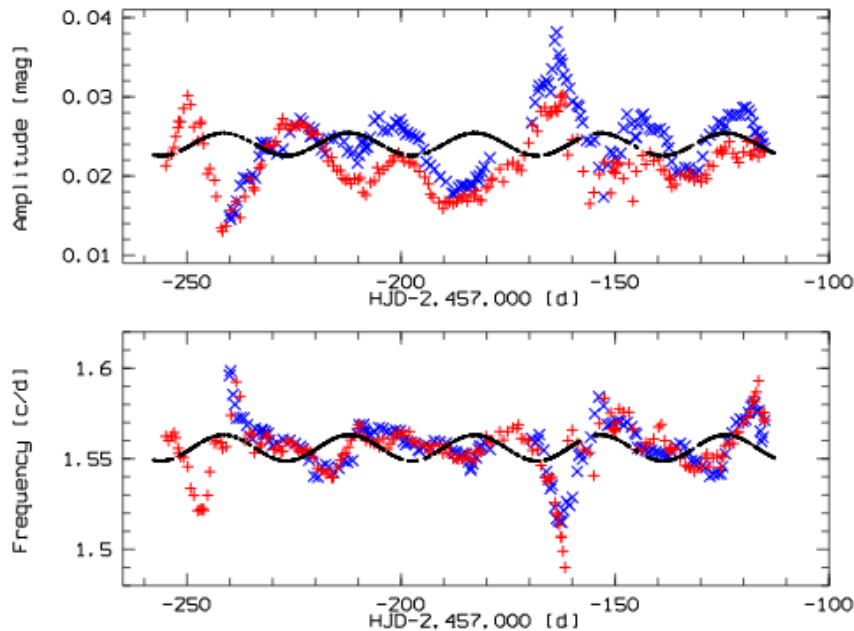


Fig. 8. Time dependence of the frequency (lower panel) and amplitude (upper panel) of the 1.5562-c/d variability in η Cen (red passband: +; blue passband: x). Frequencies and amplitudes were determined as sliding averages over 3-day intervals from sine fits. For comparison, the sine curve fitted to the light curve in Fig. 4 is overplotted with arbitrary

Table 5. Frequencies in η Cen. ‘Blue’ and ‘Red’ denote the blue and red passband. The errors are about 0.001 c/d and 0.7 mmag; ‘:’ denotes uncertain detections.

ID	Blue		Red	
	Frequency [c/d]	Amplitude [mmag]	Frequency [c/d]	Amplitude [mmag]
f_1	0.0338	16.1	0.0341	14.3
f_2+	1.2242	4.6	1.2850	4.7
f_3+	1.5000	7.6	1.5230	6.3
f_4+	1.5562	22.8	1.5562	20.6
f_5	1.7314	2.4	1.7333	2.1:
f_6	1.7672	3.9	1.7554	1.7:
f_7+	2.8184	3.9		
f_8+	3.1015	6.9	3.1076	6.8

Notes. A ‘+’ in a frequency ID indicates that the frequency is the one with the highest amplitude in a group (Sect. 5.3, after prewhitening for f_4+). As the example of f_4+ shows, such frequencies may not be constant with time (Sect. 5.1 and Paper II).

Eredmények a BRITE mérései alapján

- θ Ophiuchi:** β Cep típusú változócsillag hierarchikus hármas rendszerben. A két keringési periódus 56,71 nap és 5070 nap.
 A korábbról ismert 7 frekvencia mellett 19 új frekvenciacsúcsot azonosítottak. SPB-csillagokra jellemző g-módusok. A 7 évet átfogó SMEI-fénygörbét is figyelembe vették.

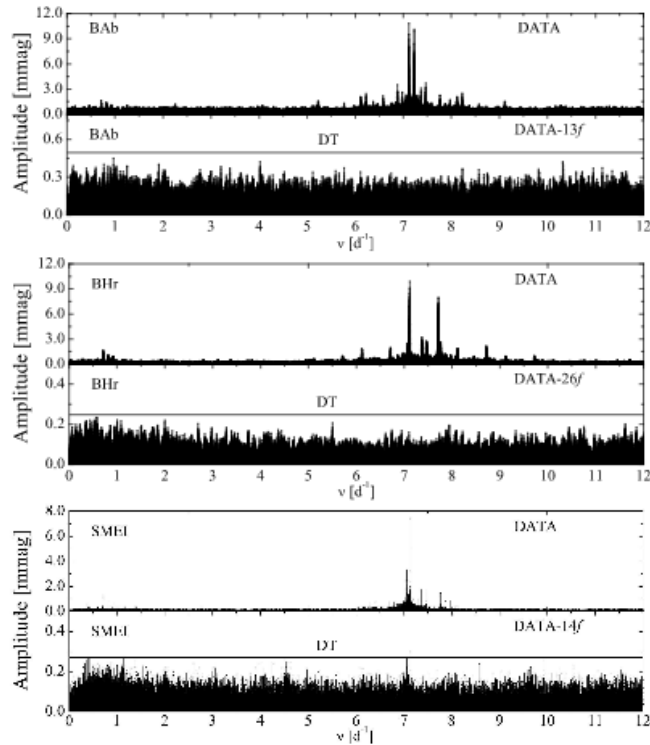


Figure 2. Top panels show the first run periodogram obtained from all BAb data and periodogram calculated from residuals after removing the variability with all significant frequencies. Middle and bottom panels — the same for all BHR and SMEI data, respectively. Horizontal lines in each panel indicate the detection

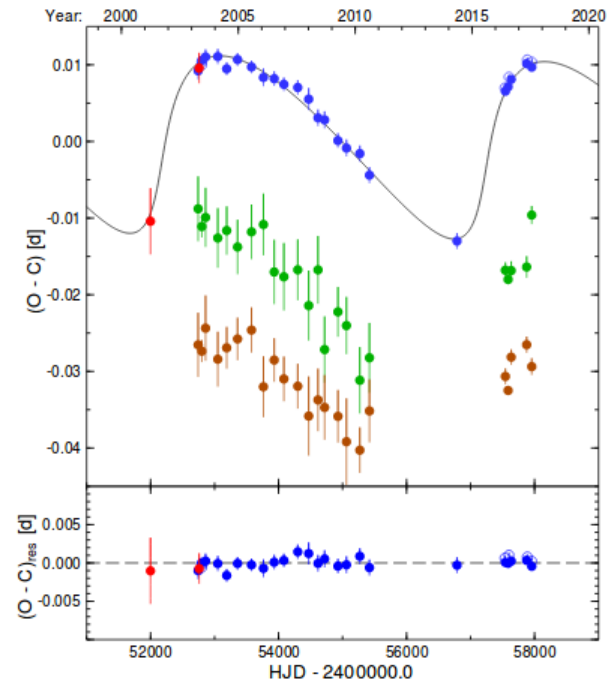


Figure 3. Top: The $O - C$ diagram for the dominant mode (ν_1) in θ Oph based on the photometric (blue dots) and RV (red dots) times of maximum. The $O - C$ values were calculated with respect to the ephemeris (1). A constant phase shift of $+0.0340$ d was applied to the values of $O - C$ derived from the RV data. The continuous line shows the fit of Eq. (2) to the $O - C$ data. The open circles correspond to data in passbands other than BRITE.

Eredmények a BRITE mérései alapján

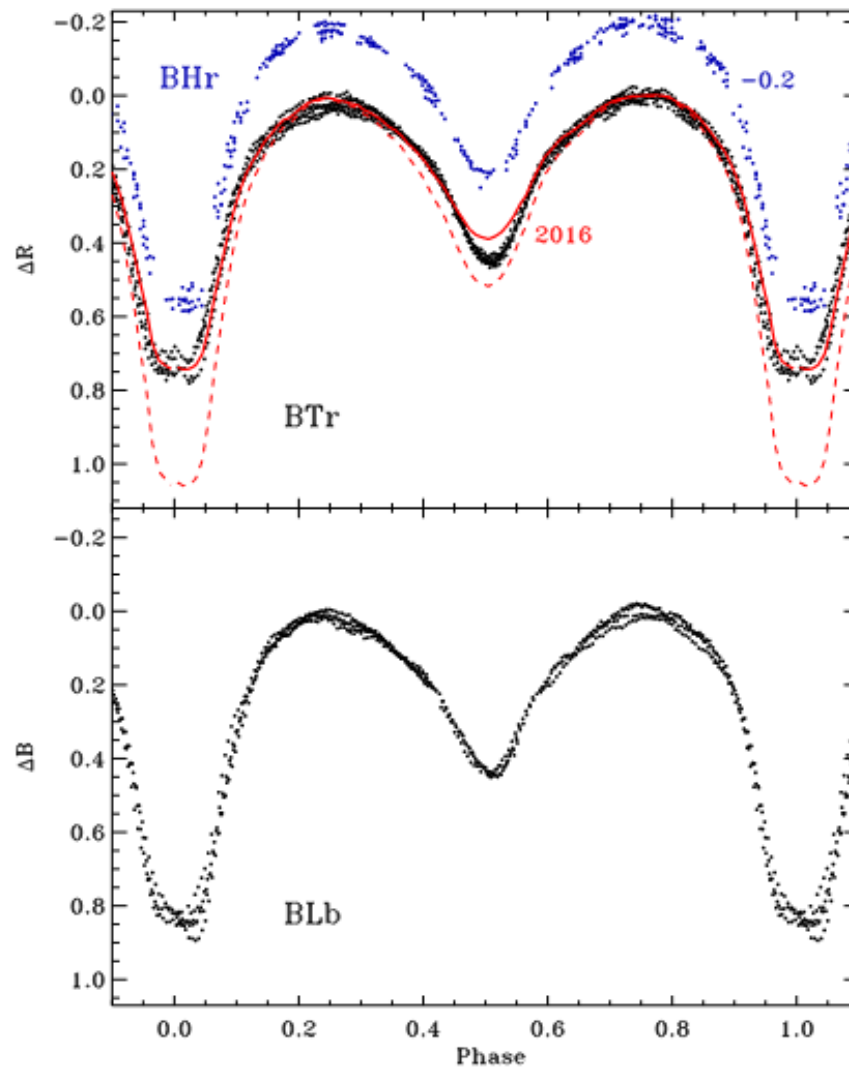
β Lyrae: a fedési változócsillagok egyik archetípusa. 2016-ban és 2018-ban észlelte a BRITE.

$V = 3,4$ magnitúdó a fedésen kívül,
 $B-V = 0,0$.

A 3 naptömegű főcsillag B6-8II típusú, a láthatatlan kísérő nagyobb tömegű.

A kettős keringési periódusa 12,915 nap.

A másodkomponensre nem egyenletesen hullik az anyag a főcsillagról, ezért a fénygörbe alakja változik



Fotometria a Gaia asztrometriai űrszondával

551538 változócsillagra elérhető fotometriai idősorok a Gaia DR2-ben.

Változócsillagok száma:

228904 RRL (a GCVS-ben kb. 8000)

11438 cefeida (a GCVS-ben <1000)

8862 DSCT+SXPHE (a GCVS-ben kb. 500)

147535 forgási változó (BYDRA)

(a GCVS-ben kb. 1200)

Science Alert

Évente kb. 2500 riasztás

(az első években kevesebb)

Jelölés: Gaia után

az évszám utolsó

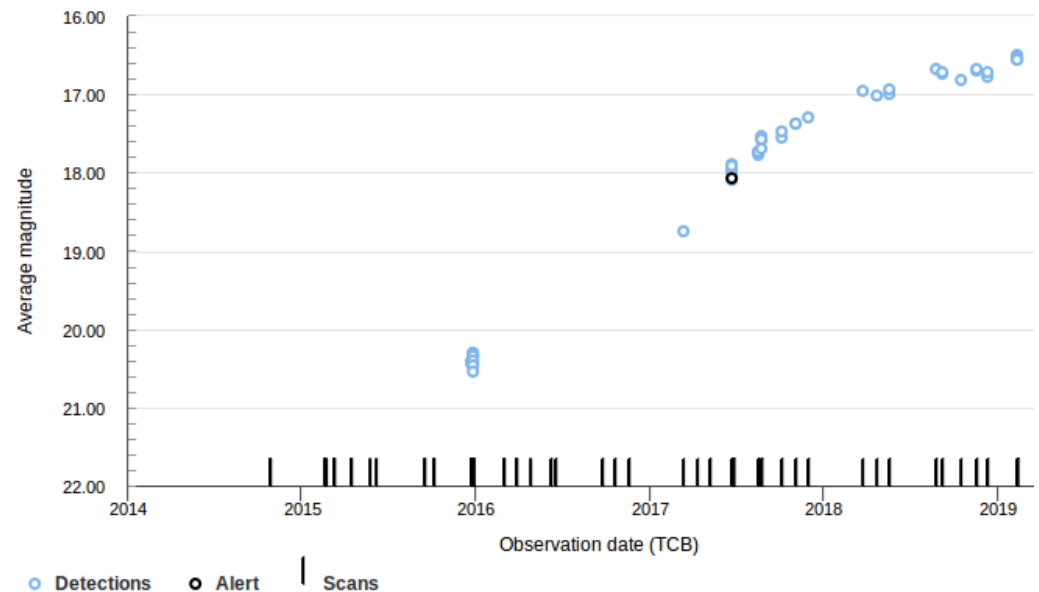
két számjegye és

hárombetűs kód

aaa-tól kezdve.

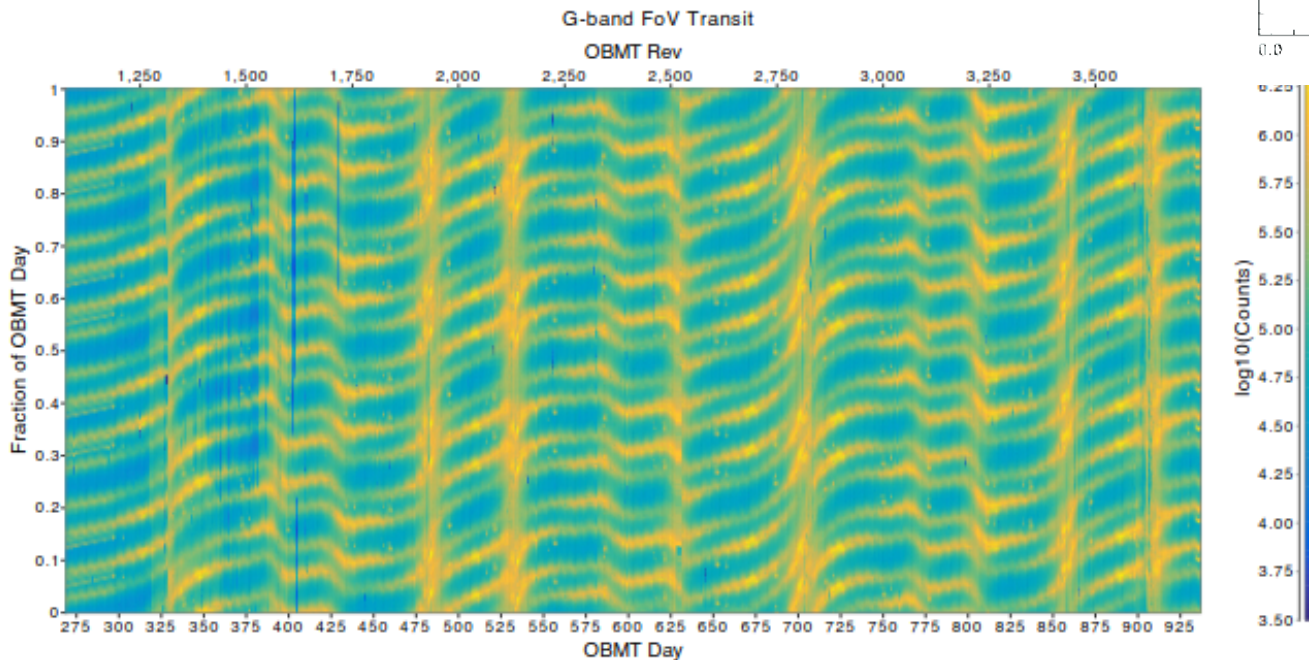
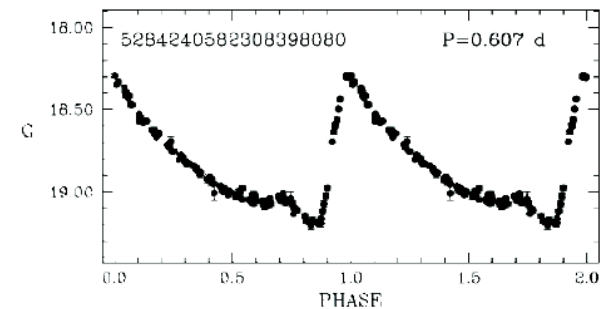
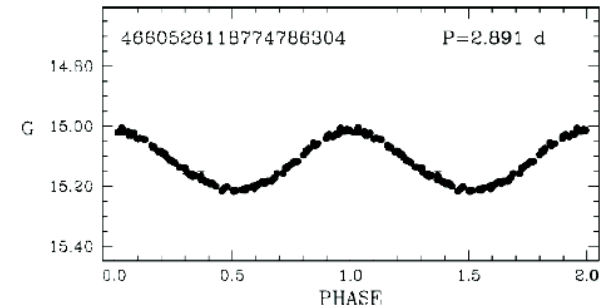
Példa: a Gaia17bpi

fuor fénygörbéje (**lent**).

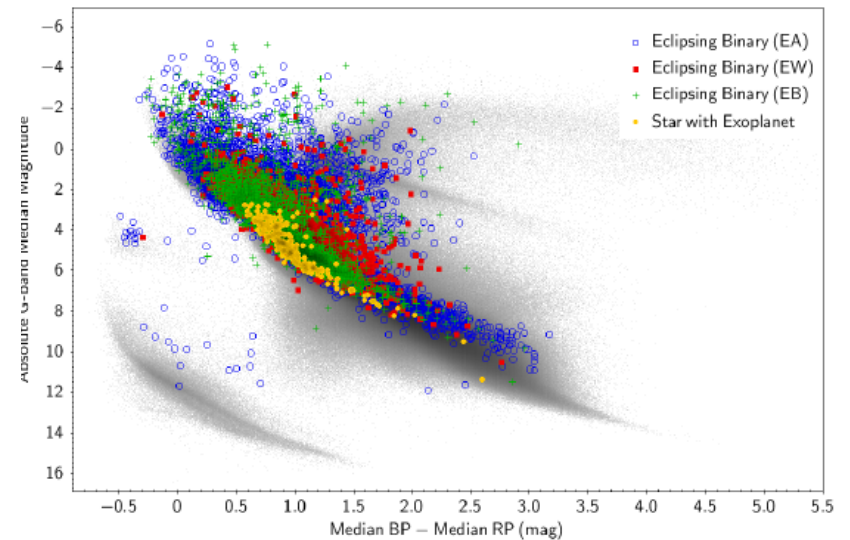
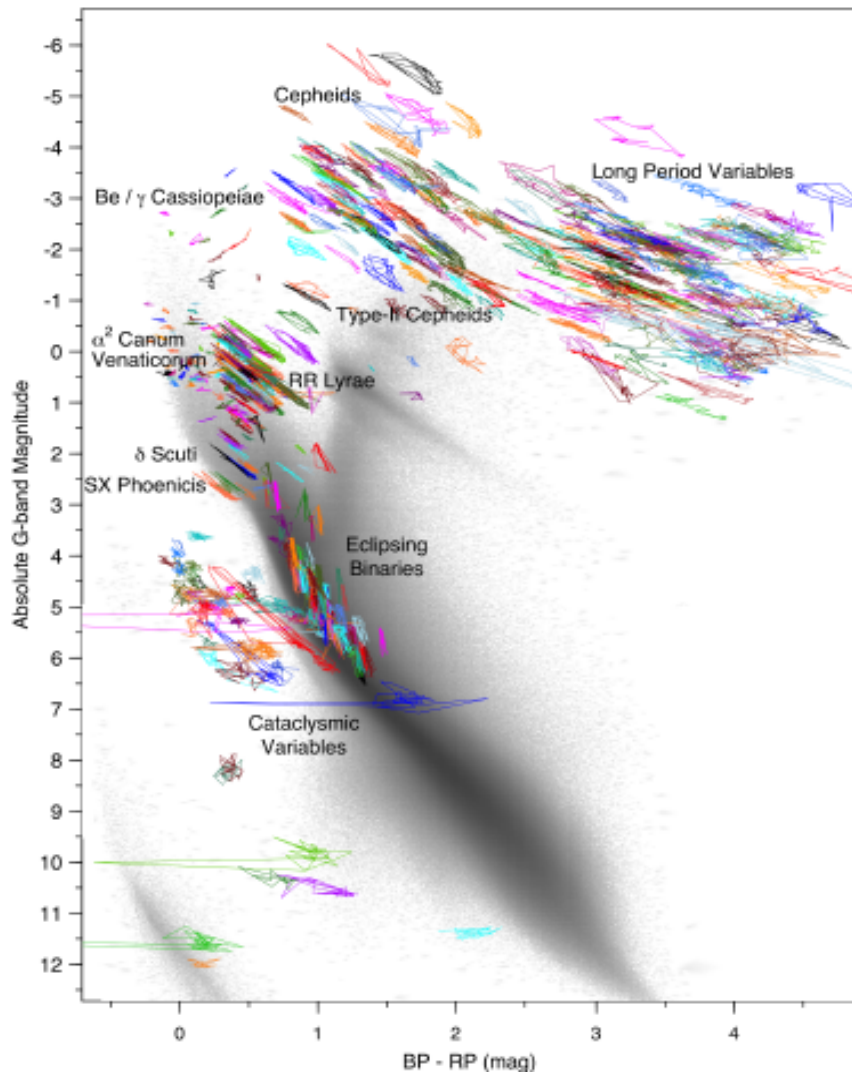


Fotometria a Gaia asztrometriai űrszondával

Az első hónapban folyamatosan mérte a déli ekliptikai pólus környékét, azóta főkörök mentén szkenneli az eget, az időbeli mintavételezés kedvezőtlen a változócsillagok vizsgálatára. De 1,7 milliárd csillagról egyenként kb. 100 fényességmérés páratlan adatbázis.



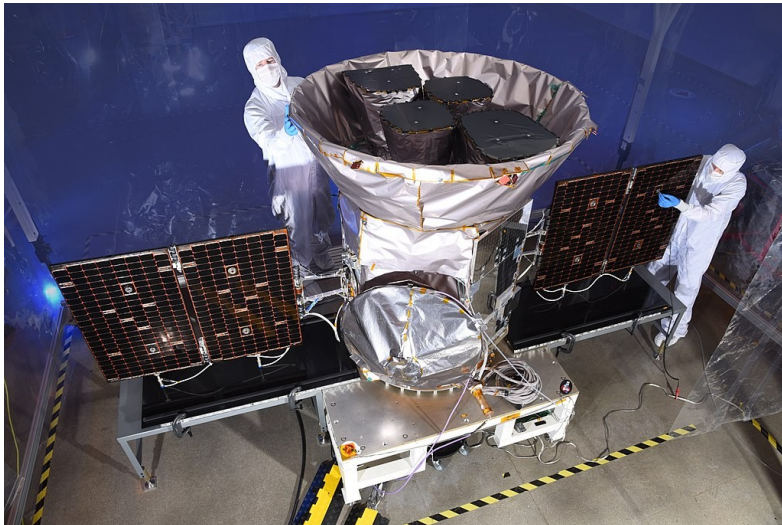
Fotometria a Gaia asztrometriai űrszondával



. Same as Fig. 1 but for eclipsing binaries (of types EA, EB, EW) and known host-stars exhibiting exoplanet transits. As expected, eclipsing binaries can be anywhere in the CaMD, that explains why they are a main source of contamination for instance of pulsating stars.

TESS

TESS: Transiting Exoplanet Survey Satellite; Eredetileg az MIT javasolta 2006-ban, és a Google támogatta anyagilag.
A NASA 11 javasolt űrmisszió közül választotta ki. Indítás: 2018. ápr. 18.
Indítási tömeg: 350 kg. Keringési periódus kb. 13,7 nap, a Holddal 2:1 arányú rezonáns pályán (de mindig távol a Holdtól). Így hosszú ideig van a magnetoszférán kívül, és az egész égboltot észlelni tudja.
A mérési programot két évre tervezték, de már a harmadik évre is megvan a támogatás. A fő cél: exobolygók keresése 200000 csillag körül, közte a Földhöz hasonló méretűek is.

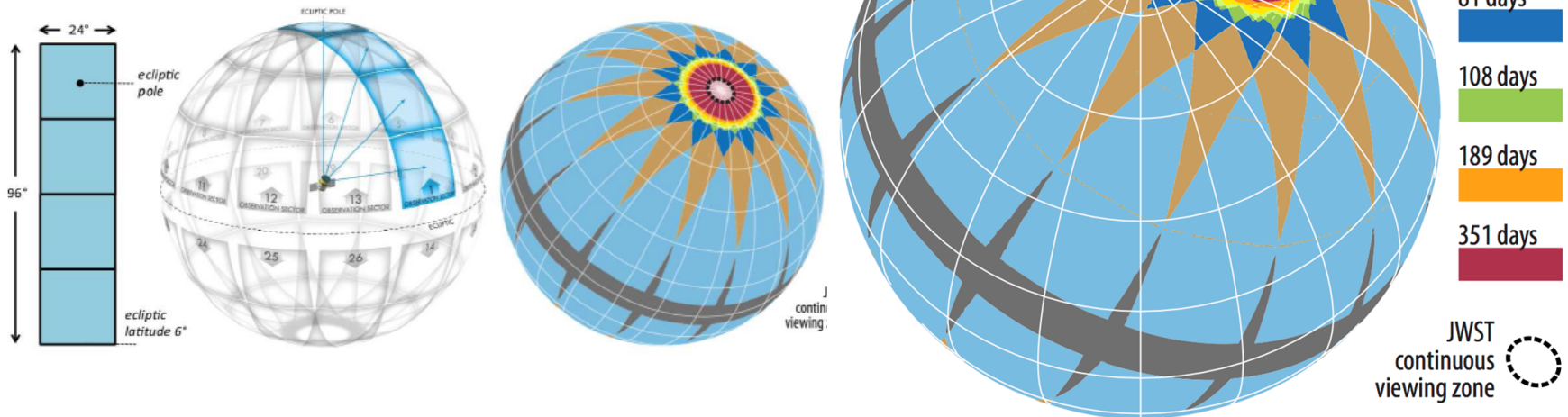


TESS

Négy nagy látószögű kamera mindegyikéhez CCD-kamera csatlakoztatva. A 4 távcső egymással szomszédos ($24^\circ \times 24^\circ$ -os) területet észlel (együtt 400-szor nagyobb, mint a Kepler által vizsgált égboltrész).

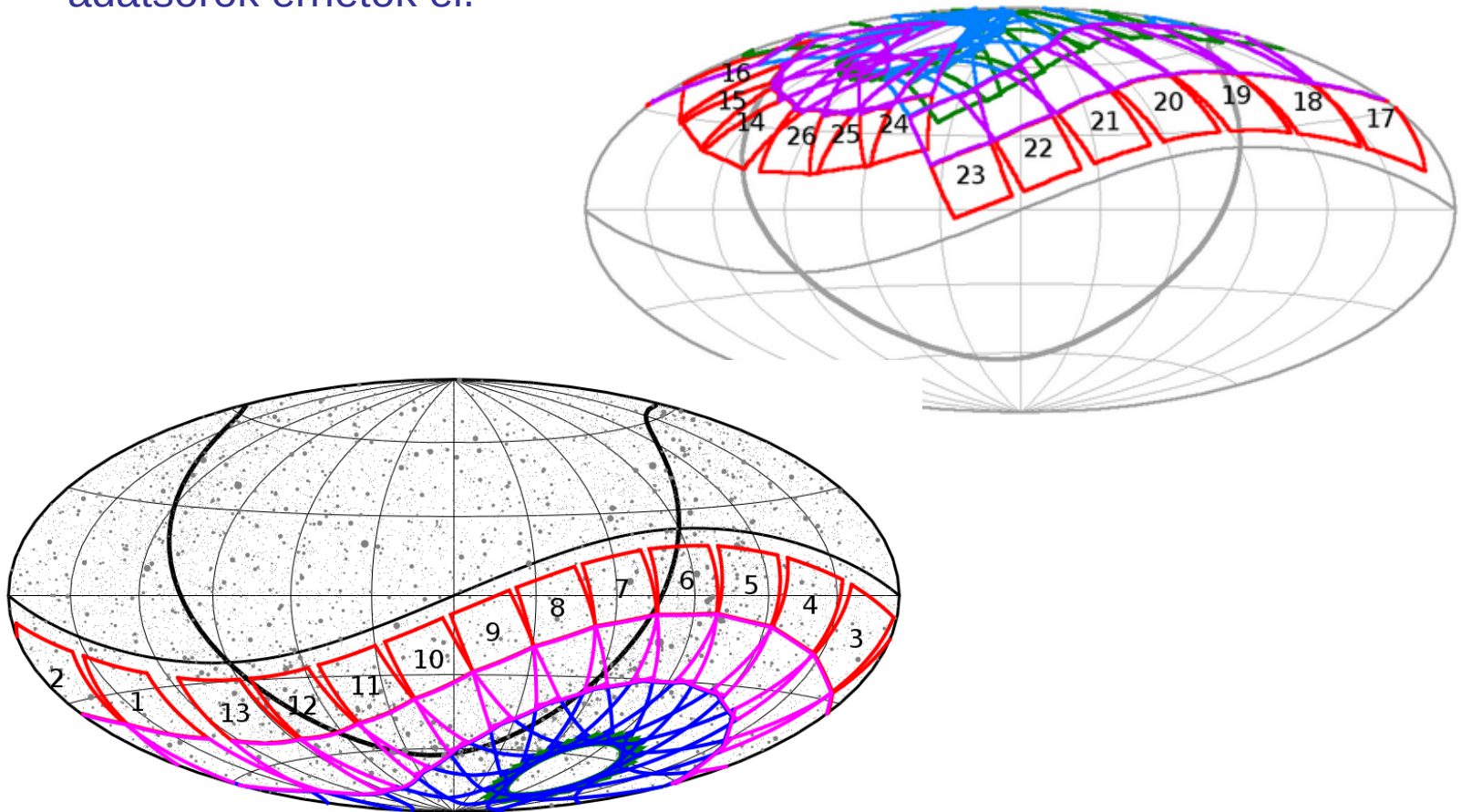
A teljes égbolt 26 szektorra van felosztva, mindegyik szektor $24^\circ \times 96^\circ$ méretű. Egy-egy szektor megfigyelése 27 napon át. A szektorok magasabb szélesség felé egyre jobban átfednek.

A program fényes csillagok mérése (az egyenlítő körül csak 27 napig, de az égi pólushoz közel egy évig). Az első évben a déli félgömböt mérte végig, a második évben az északit.



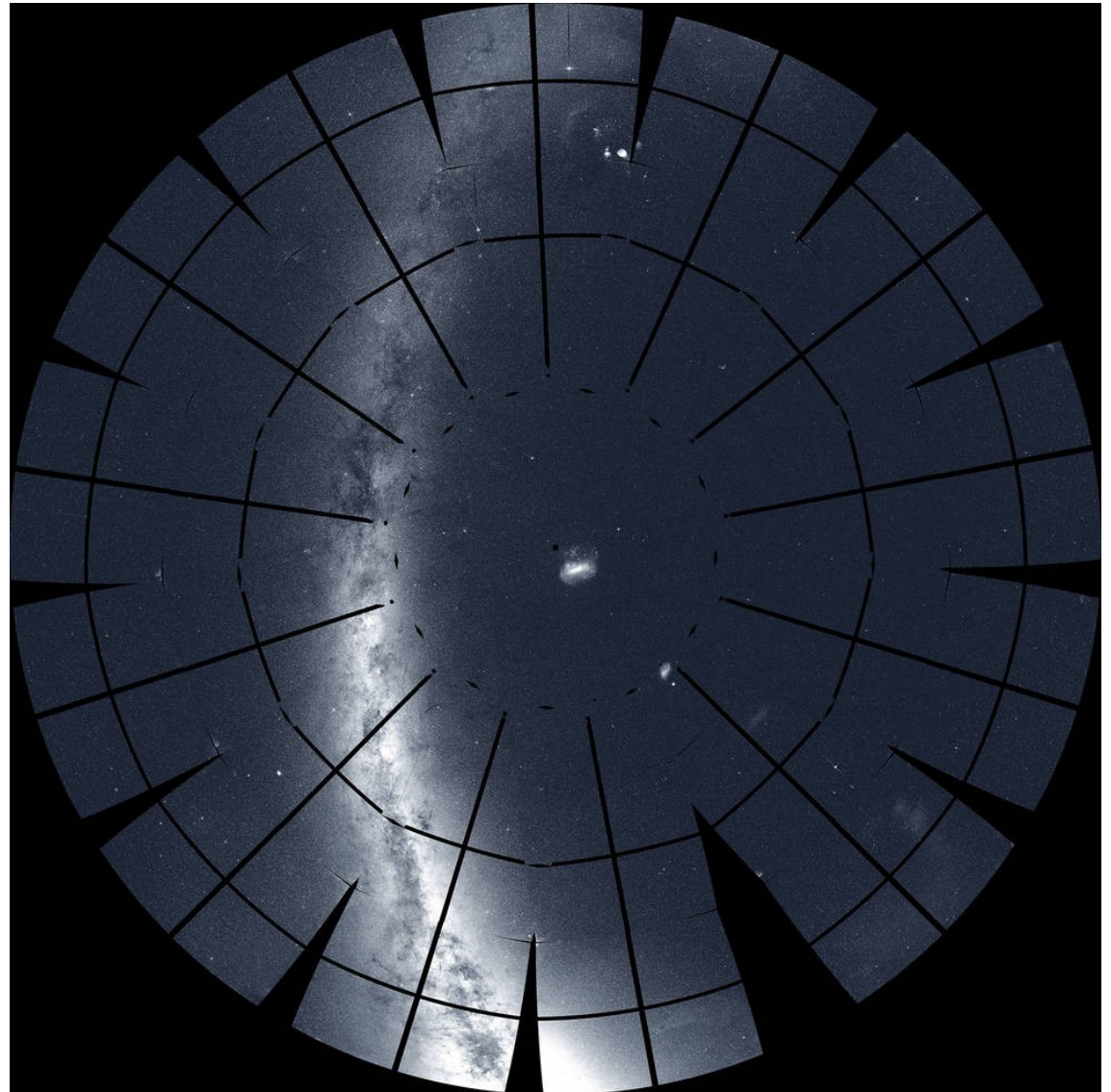
TESS

Széles sávú fotometria, az optikaiból a közeli infravörösbe is belenyúlik.
A fényes csillagokról 2 perces mintavételezésű adatsorok, a teljes megfigyelt
égterületről (full frame image, FFI) pedig 30 perces mintavételezésű
adatsorok érhetőek el.



TESS

Montázs az égbolt déli
félgömbjének
lefedéséről 20 Tbyte
adat alapján
(NASA/MIT/TESS,
Ethan Kruse
[USRA]).

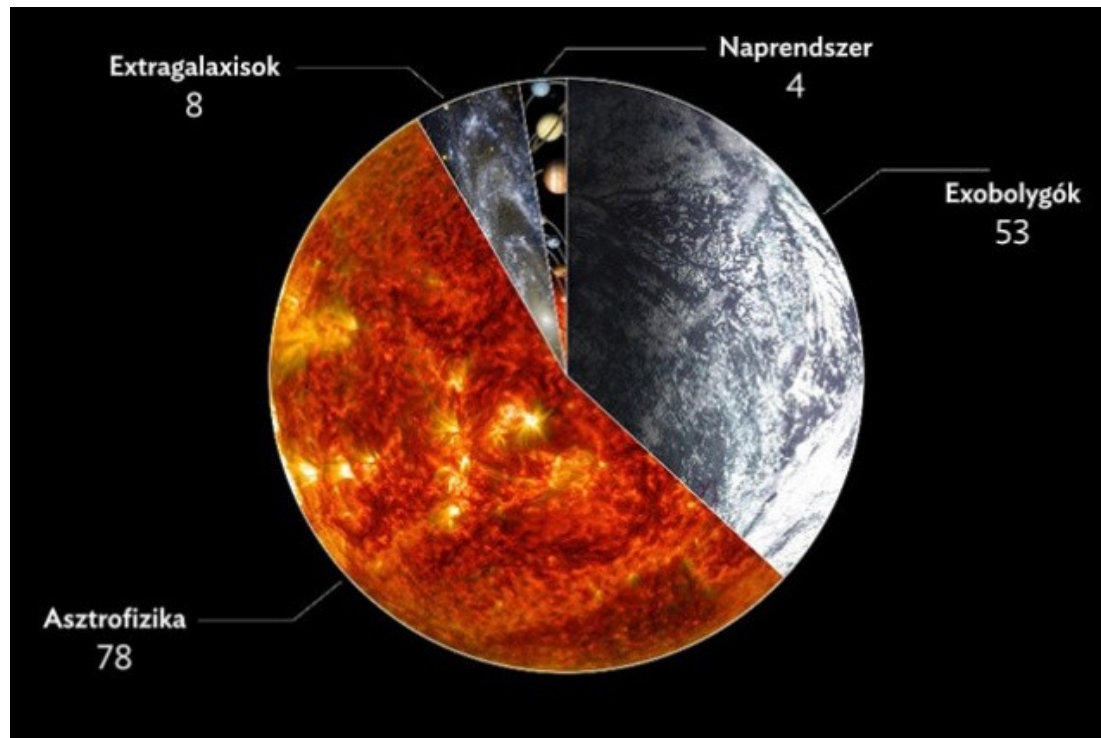


TESS

A TESS esetében a más jellegű tudományos programok legalább olyan súlyúak, miként a Kepler és a K2 esetében. A magyarok részvétele a TESS-ben (TASC) ugyancsak domináns.

Statisztika (2020. márciusi helyzet):

- 20 szektor már észlelve (az eredeti program befejezése: 2020. július)
- 1737 objektumnak van TOI azonosítója
- 41 megerősített exobolygó-felfedezés



A TESS eredményeiből

Pál et al.: az adatfeldolgozás lépései. Naprendszerbeli égitestek fotometriája is feldolgozható, majdnem 10000 fénygörbe. Kisbolygók forgási periódusa a fényváltozás alapján.

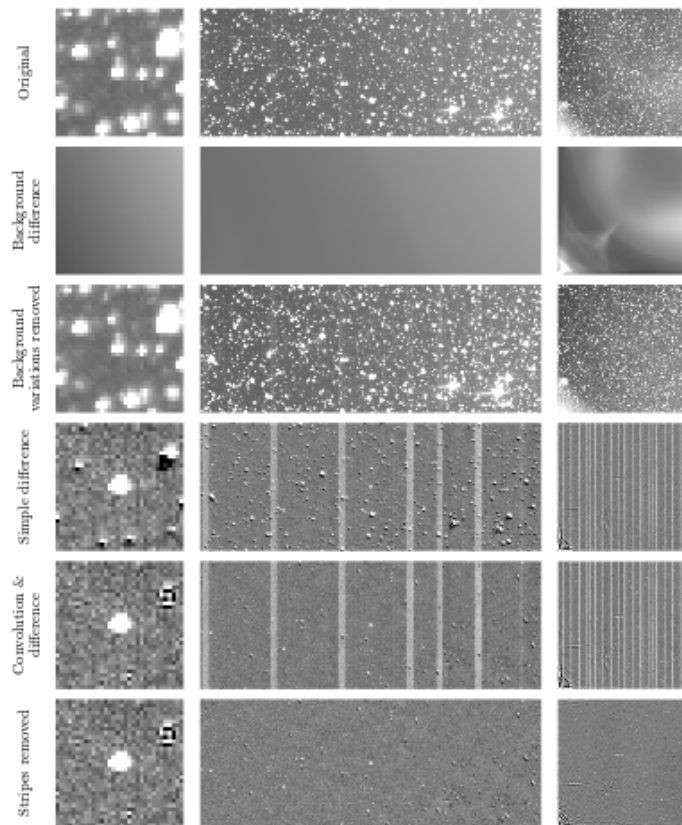


Figure 1. Panels showing the various stages of the image-level data processing using asteroid (2429) Schurer as an example, observed during Sector 2, by Camera #1, CCD #3. The *left* column shows the $10' \times 10'$ vicinity of the target, the *middle* column shows the neighbourhood ($3.7' \times 1.4'$) area while the *right* column is the full CCD frame, all at the TESS FFI cadence 2018247095941 (JD 2458365.92767). Images in the *first* row show the original unprocessed data.

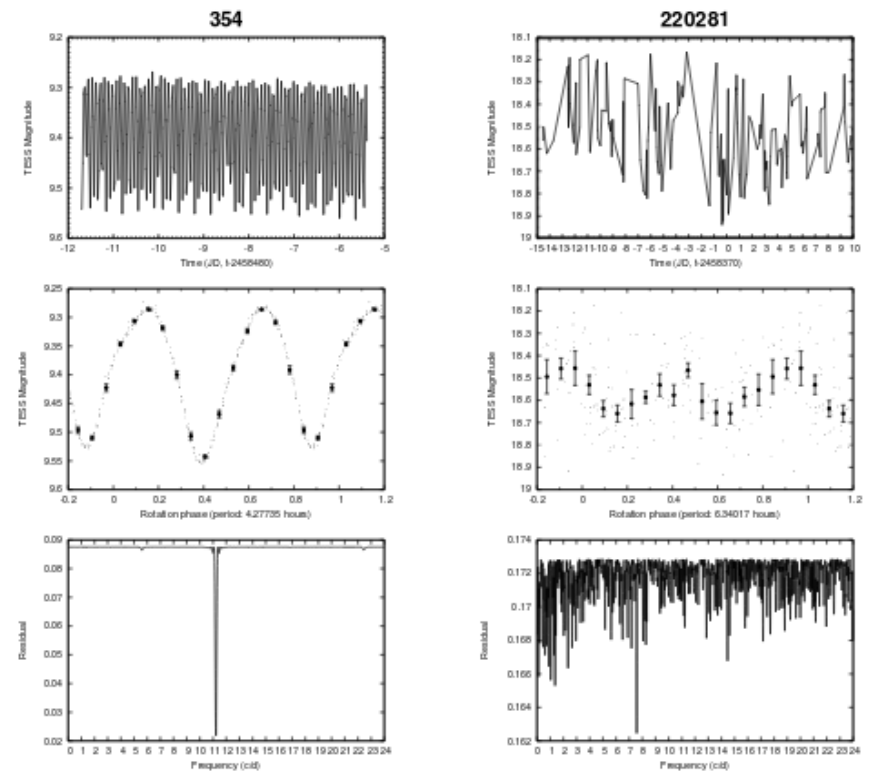


figure 3. Object light curve plots for (354) Eleonora (left column of 3 individual plots) and (220281) 2003 BA₄₇ (column of 3 individual plots). These plots are available for all of the 9912 objects presented in this study.

A TESS eredményeiből

U Gruis

(Bowman et al. 2019):
árapályerők által keltett
oszillációk félig
szétválasztott (semi-
detached) kettős
rendszerben.

A kettősség 1980 óta
ismert. A
főkomponens A5
típusú, a keringési
periódus 1,88 nap.
A TESS az első két
szektorban észlelte.

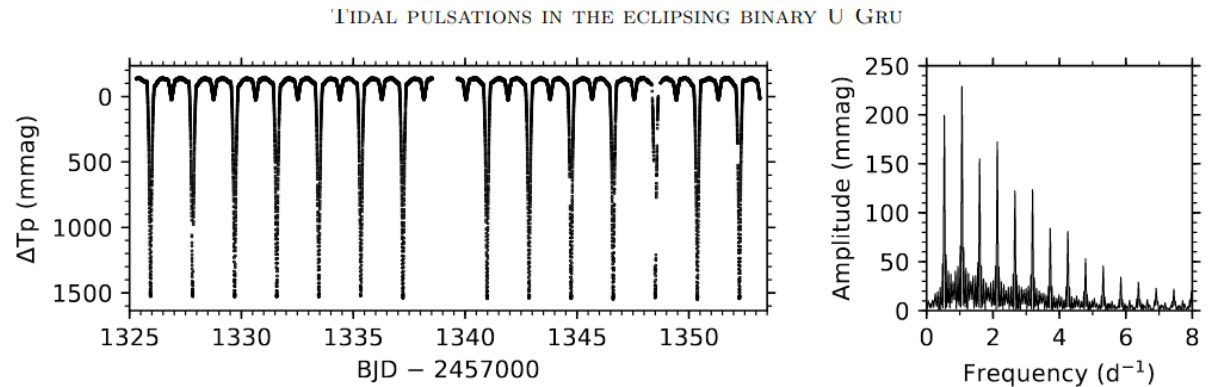


Figure 1. *Left*: TESS light curve of the pulsating Algol system U Gru (TIC 147201138). *Right*: amplitude spectrum showing the low-frequency orbital harmonic series associated with the eclipses in the light curve.

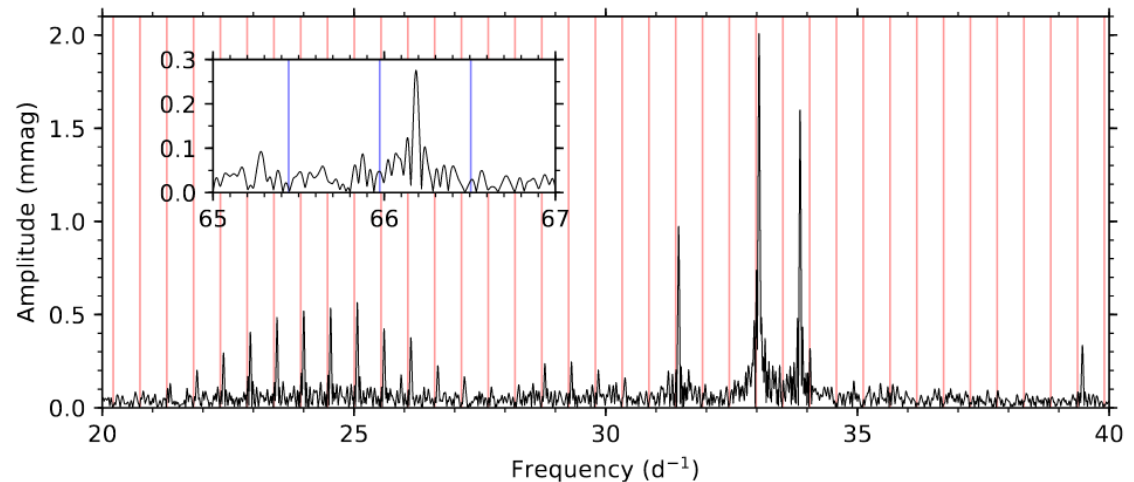


Figure 2. Residual amplitude spectrum after pre-whitening the orbital harmonics (denoted as vertical red lines in main plot and blue lines in sub-panel for clarity) in the TESS light curve of U Gru revealing pulsation mode frequencies.

A TESS eredményeiből

DSCT (jobbra) és GDOR (lent) típusú változócsillagok (Antoci et al. 2019): 117 csillag 2 perces mintavételezésű adatsorának elemzése az 1-2. szektorból.

A Keplerrel ellentétben vannak fiatal, forró DSCT csillagok is.

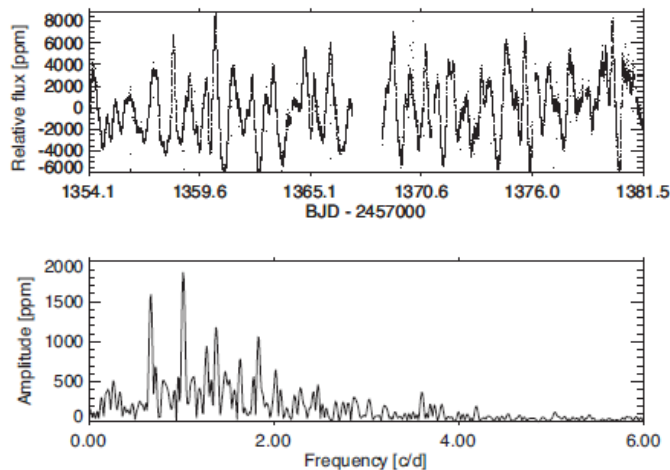


Figure 17. π PsA. Upper panel: here we show the light curve that clearly resembles the variability of a typical γ Dor star. Lower panel: Fourier spectrum of the *TESS* light curve. Here we find six statistically significant

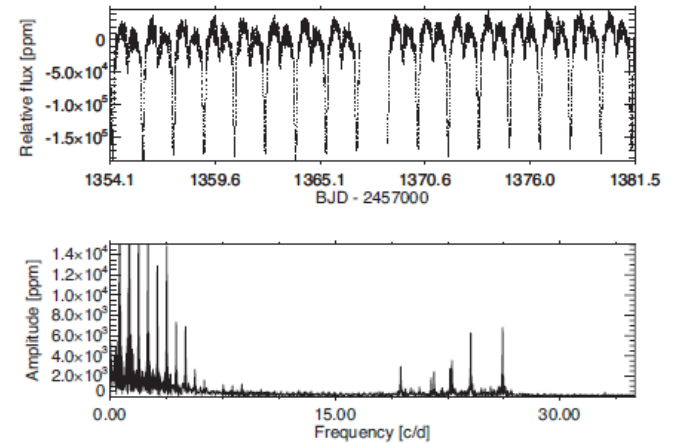


Figure 12. HD 220687. Upper panel: light curve. Lower panel: amplitude spectrum. The equally spaced peaks at low frequencies are due to the eclipses clearly visible in the light curve displayed in the upper panel.

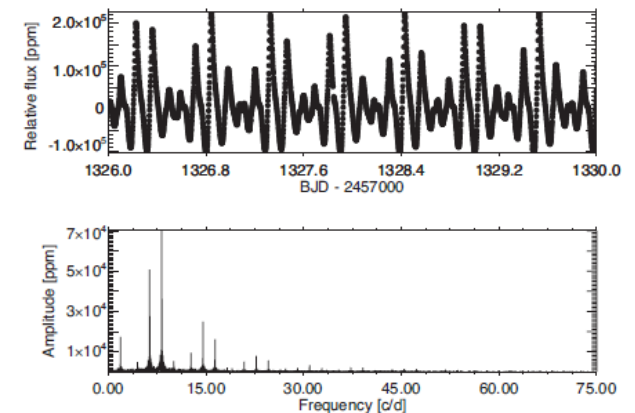


Figure 14. Upper panel: A 4-d section of the *TESS* light curve of HD 224852. The highly non-sinusoidal light curve and the beating between the two dominant modes are clearly visible. Lower panel: amplitude spectrum. The large majority of these peaks are combination frequencies and harmonics of the four independent modes. Although there are statistically

A TESS eredményeiből

A és B színképtípusú változócsillagok vizsgálata (Balona & Ozuyar, 2020). A déli ég szektorainak adataiból 5000 DSCT, 2300 GDOR, 114 roAp jelölt. A B-csillagok harmada pulzál. A rotációs moduláció is észlelhető.

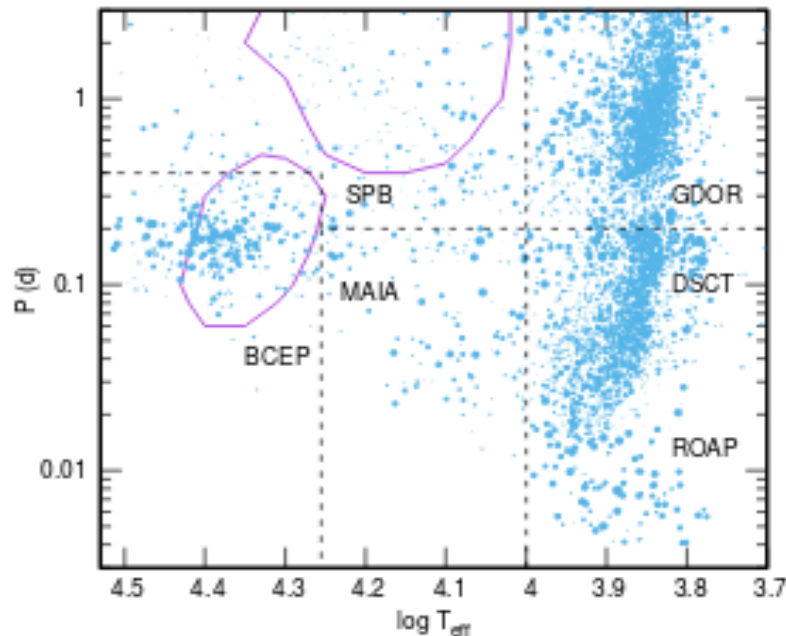


Figure 2. Location of *TESS* pulsating stars in the period/effective temperature diagram. For each star, the frequency of maximum amplitude is plotted with size proportional to logarithm of the amplitude. The two oval regions show the location of unstable modes of low degree calculated by Miglio et al. (2007b). The regions demarcated by the dashed lines are the adopted locations of the β Cep, SPB, Maia, δ Sct and γ Dor stars.

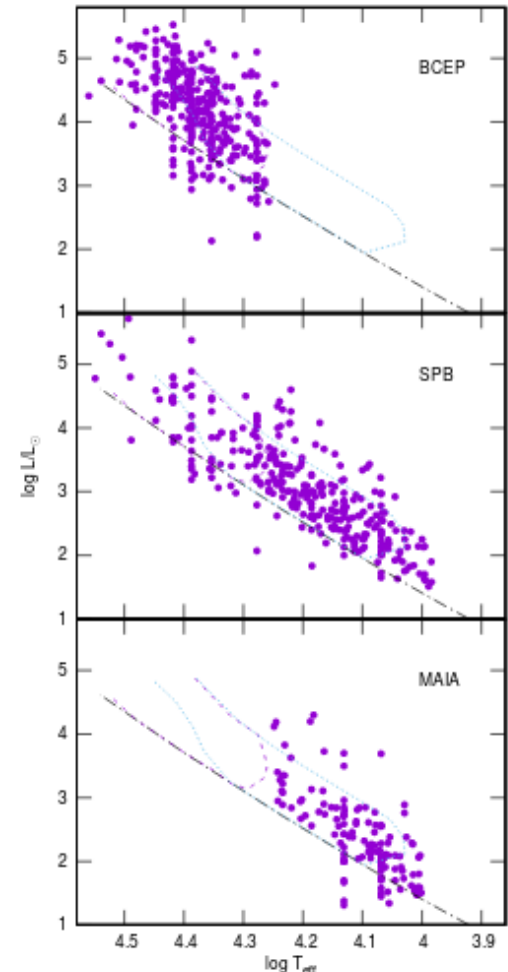


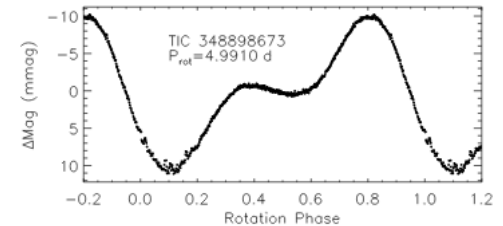
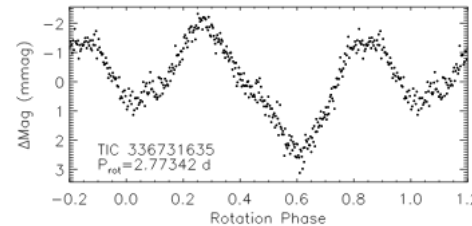
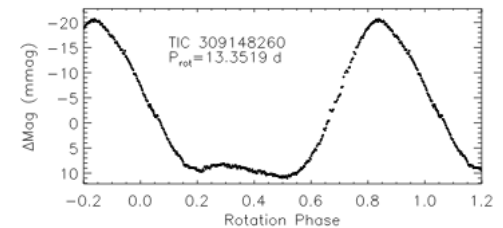
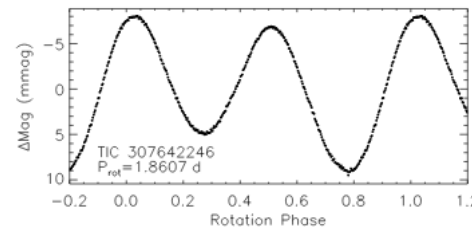
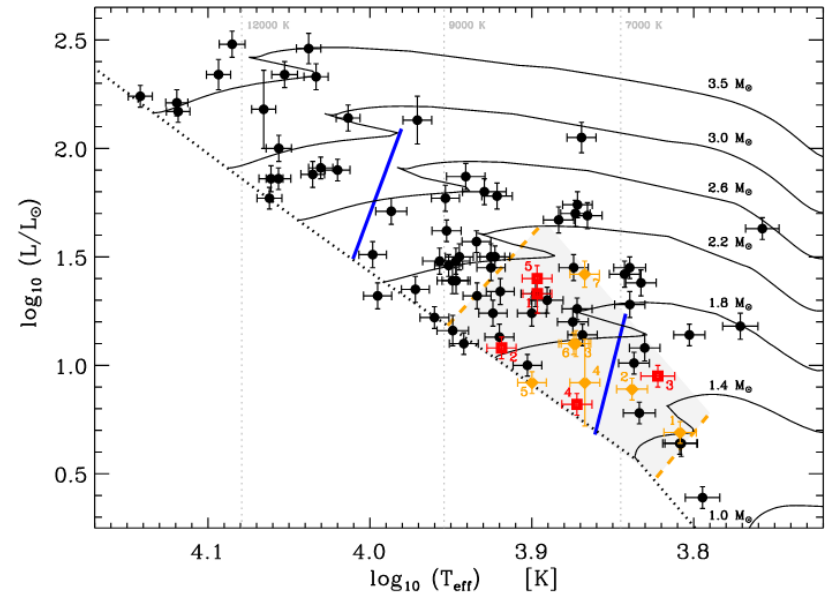
Figure 1. The H-R diagram showing the β Cep, SPB and Maia stars observed by *TESS*. Also shown is the theoretical zero-age main sequence (solid line) and the instability regions of the β Cep and SPB pulsating stars for $Z = 0.02$ and spherical harmonic degree $l \leq 3$ from Miglio et al. (2007b).

A TESS eredményeiből

Ap csillagok pulzációja és rotációja (Cunha et al. 2020).

Pirossal jelölve a felső ábrán az újonnan talált gyorsan pulzáló Ap (roAp) csillagok, köztük az eddig ismert legrövidebb periódusú ilyen csillag is (4,7 perces periódussal oszcillál). Narancsszínű pontok: az 1. és 2. szektorban észlelt, már korábban is ismert roAp csillagok.

A nem pulzáló Ap (noAp) csillagok fényessége 10 mikromagnitúdós határig állandó (a forgás miatti változástól eltekintve). Lent: példák Ap csillagok forgási eredetű fényváltozására



A TESS eredményeiből

CO Cam: kettős rendszer, a főkomponens pulzáló (DSCT) Am csillag, a kísérő G típusú csillag. De a pulzáció egyoldalú! Korábban egyetlen ilyen csillagot ismertek (HD 74423).

A ferde pulzátor modellel próbálják leírni a viselkedést: a pulzációs tengely egybeesik a mágneses tengellyel, de nem azonos a forgástengellyel. (Kurtz et al. 2020)

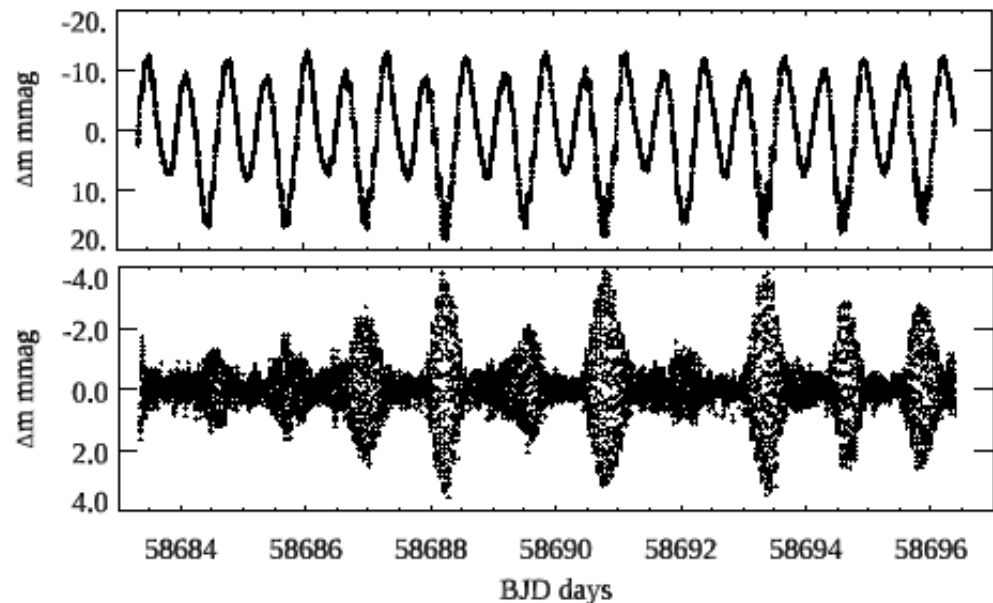
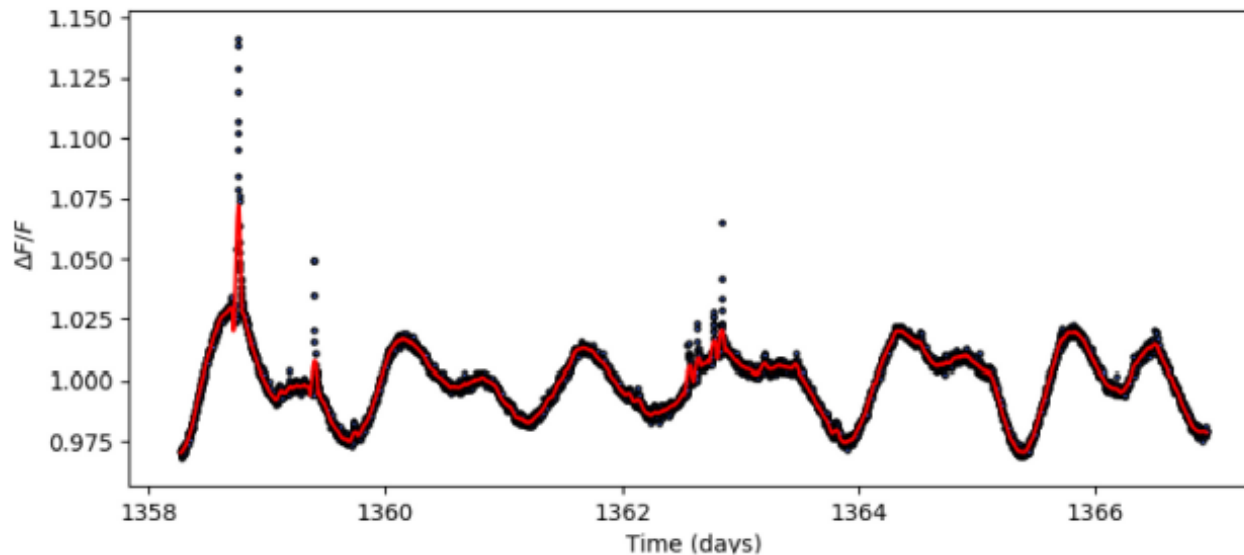


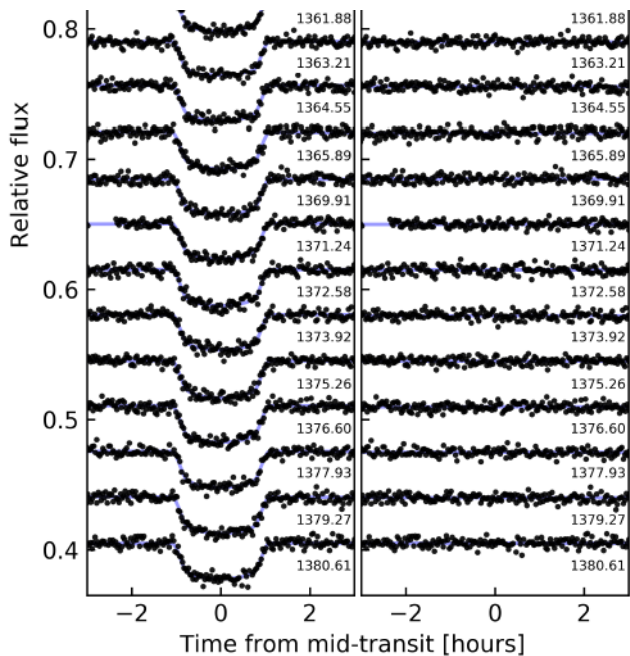
Figure 3. Top: A section of the initial light curve showing the clear ellipsoidal variations. The section of the light curve not shown is similar. Bottom: The same section of the light curve after pre-whitening the orbital variations, g mode frequencies and low frequency artefacts. The amplitude modulation of the pulsational variations with the orbital period is striking and clear, as is the beating among the four principal mode frequencies.

A TESS eredményeiből

Az 1-3. szektorban észlelt csillagok alapján flerstatisztika (Doyle et al. 2019). 167 kis tömegű csillag 90%-ának fényessége rotációs modulációt mutat a csillagfoltok hatására (**lenti ábra**). Szinte mindegyik ilyen csillagon zajlik flertevékenység. A Gaia DR2 parallaxisait használva becsülhető a flerek energiája. Az 1834 észlelt flerre az energiatartomány $6,0 \cdot 10^{29} - 2,4 \cdot 10^{35}$ erg. A Proxima Cen-t külön is vizsgálták (Vida et al. 2019): 72 fler kb. 50 nap alatt (két szektorban észlelte a TESS). Az összidő 7,2%-ában flertevékenység zajlik a Proximán. A flerek energiaeloszlása alapján szuperflerek (legalább 10^{33} erg energiával) évente háromszor várhatók. Ez nem engedi a bolygó lakhatóságát.

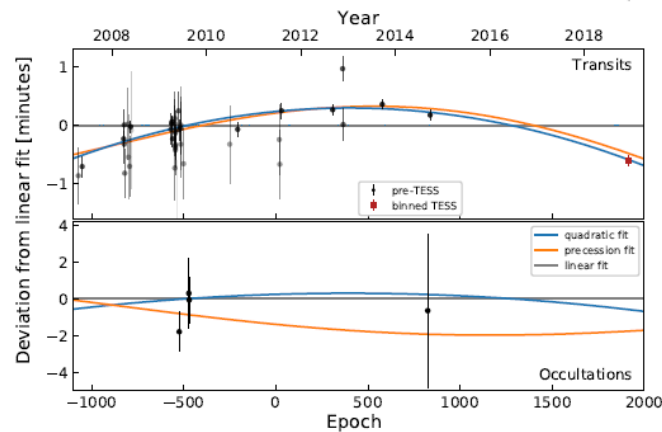
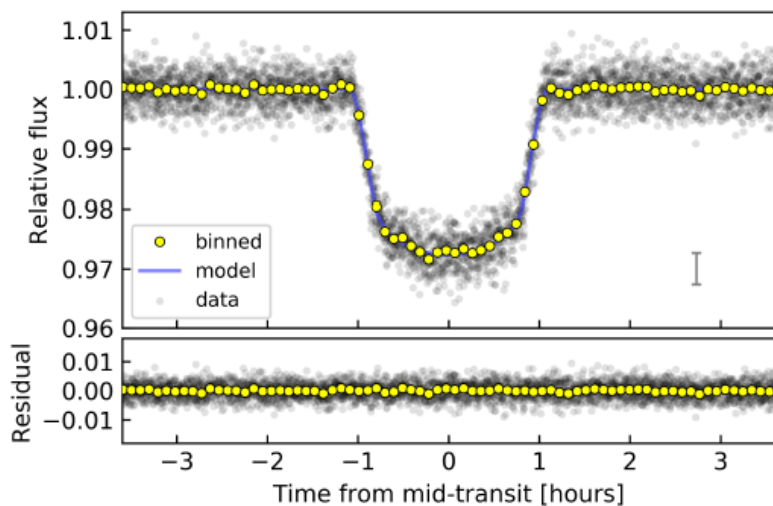
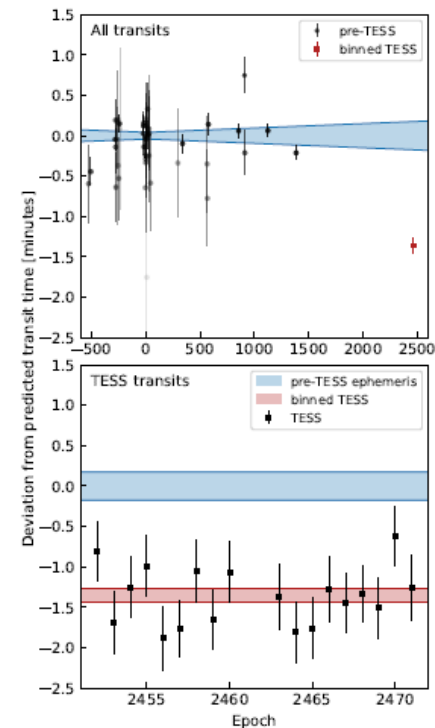


A TESS-fotometria eredményeiből



WASP-4 (forró jupiter)
1,3 napos keringési
periódussal. A keringési
periódus 12,6 ms/év
ütemben csökken.

WASP: Wide-Angle
Search for Planets



A TESS-fotometria eredményeiből

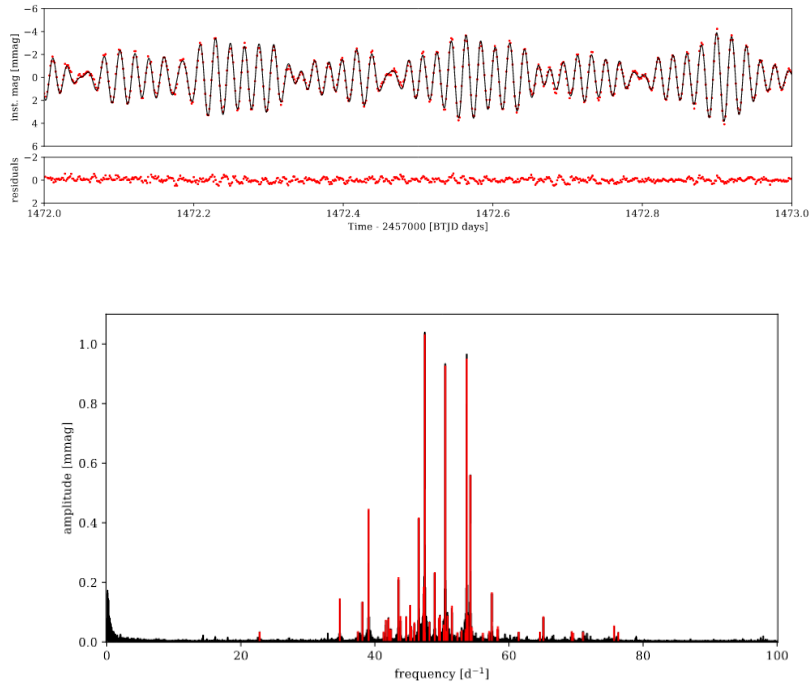
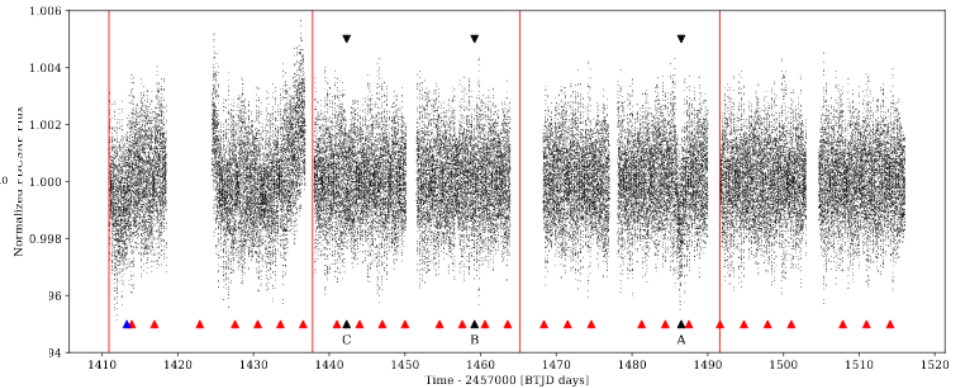


Fig. B.1. Pulsation frequency analysis of β Pictoris: The original amplitude spectrum is in black and the 54 identified δ Scuti pulsations are marked in red.



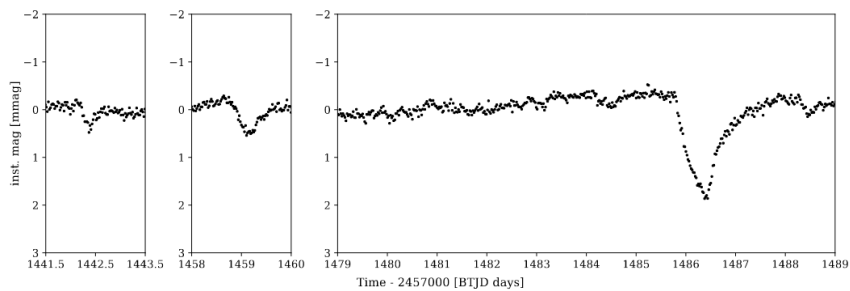
1 PDCSAP light curve of β Pictoris used in this analysis. The red vertical lines mark the starts of the Sectors 4 through 7. The black triangles mark the three identified decreases in flux, labelled A,B,C in decreasing signal to noise. The time of momentum dumps are marked with red triangles, and a small change in spacecraft pointing at the beginning of Sector 4 (due to an updated guide star table) with a blue triangle.

Beta Pictoris

(Zieba et al., 2019)

DSCT típusú pulzáció +
porkorong a csillag körül:

üstökösök hullanak a csillagba

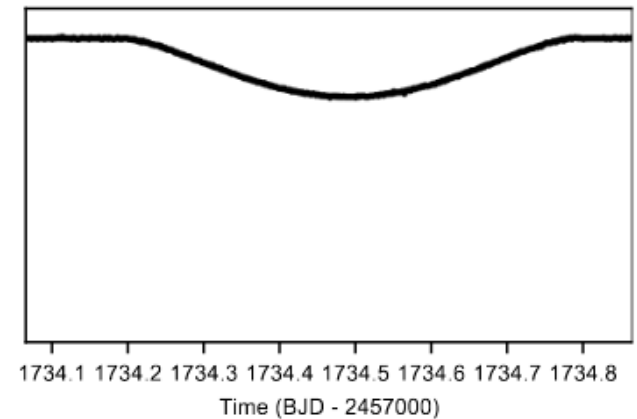
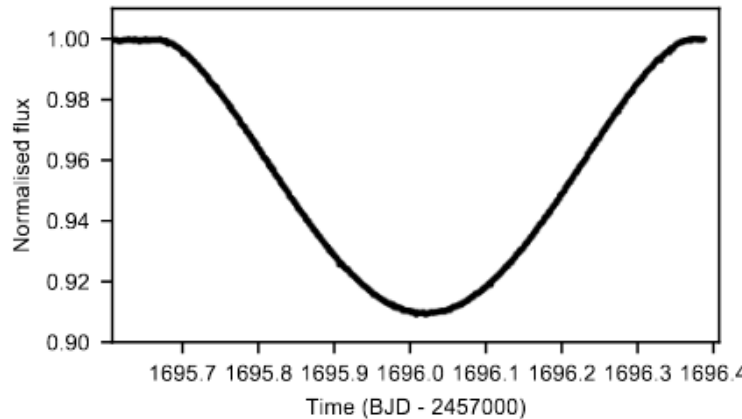
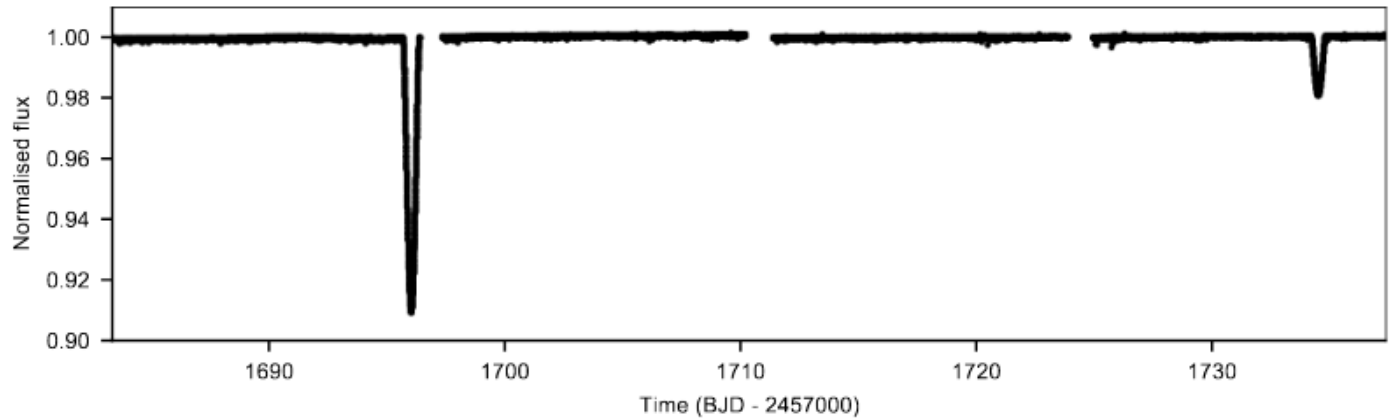


A TESS-fotometria eredményeiből

α Draconis (Thuban): Algol típusú fedési változás felfedezése.

3,68 magnitúdós, egyvonalas SB-ként egy évszázada ismert. A főcsillag A0III, a keringési periódus 51,5 nap, a pálya excentricitása 0,43. Szétválasztott

(detached) rendszer. Csak két ennél fényesebb ilyen rendszer ismert: a γ Per és a δ Vel A. A csillagok tömegét és sugarát meg lehet határozni az ilyen kettősök tagjaira.



A TESS-fotometria eredményeiből

atic error in these estimates. We use several different methods to model the TESS light curve of AI Phe combined with spectroscopic orbits from multiple sources to estimate precisely the stellar masses and radii together with robust error estimates. We find that the agreement between different methods for the light curve analysis is very good but some methods underestimate the errors on the model parameters. The semi-amplitudes of the spectroscopic orbits derived from spectra obtained with modern échelle spectrographs are consistent to within 0.1%. The masses of the stars in AI Phe are $M_1 = 1.1938 \pm 0.0008 M_\odot$ and $M_2 = 1.2438 \pm 0.0008 M_\odot$, and the radii are $R_1 = 1.8050 \pm 0.0022 R_\odot$ and $R_2 = 2.9332 \pm 0.0023 R_\odot$. We conclude that it is possible to measure accurate masses and radii for stars in bright eclipsing binary stars to a precision of 0.2% or better using photometry from TESS and spectroscopy obtained with modern échelle spectrographs. We provide recommendations for publishing masses and

Példa a csillagok tömegének és sugarának nagyon pontos meghatározására fedési kettős rendszer űrtávcsővel végzett fotometriája alapján.
AI Phoenicis (Maxted et al., 2020)

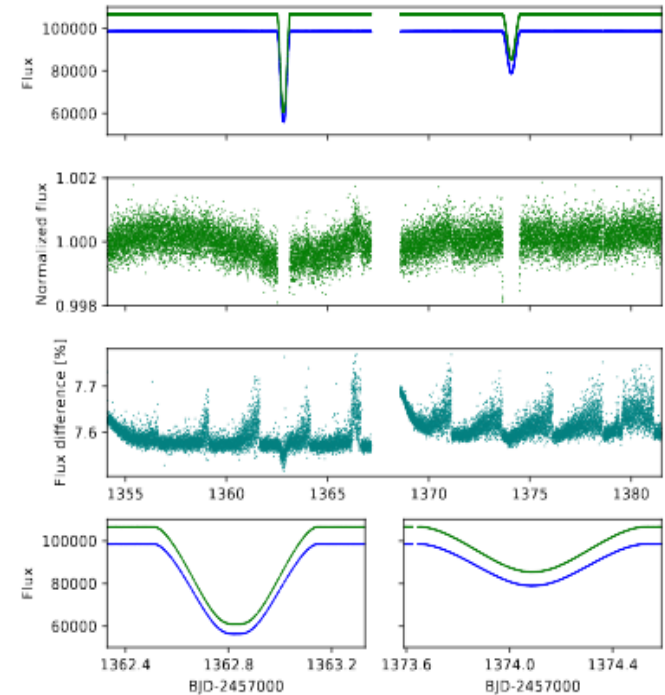


Figure 2. The TESS light curve of AI Phe. The lower (blue) curves show the SAP_FLUX values and the upper (green) curves shows the PDC_SAPFLUX values from the MAST archive data file. Only the PDCSAP_FLUX values are shown in the second panel down from the top. The flux difference value shown in the third panel down are $1 - \text{SAP_FLUX}/\text{PDC_SAPFLUX}$. Only data with a QUALITY flag value of 0 are shown in this figure.

A TESS-fotometria eredményeiből

Z Cha: fedési törpenóva; a TESS a normális és a szuperkitörés fénygörbéjét is észlelte. A keringési periódus: 0,0771892 nap. A szuperkitörések ismétlődési periódusának korábbról ismert csökkenése megerősítve (O-C diagram balra lent). Harmadik csillag gyanítható 37,5 éves keringési periódussal. (Court et al. 2019)

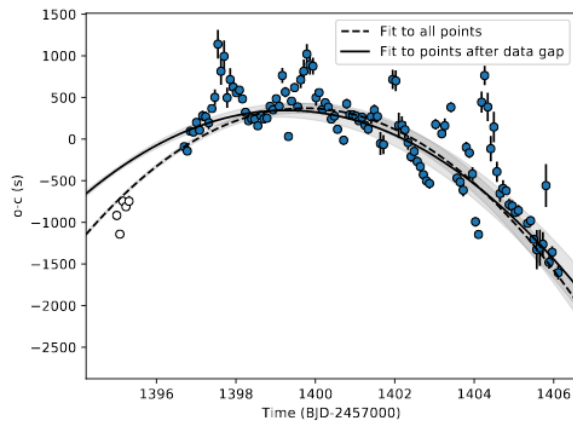
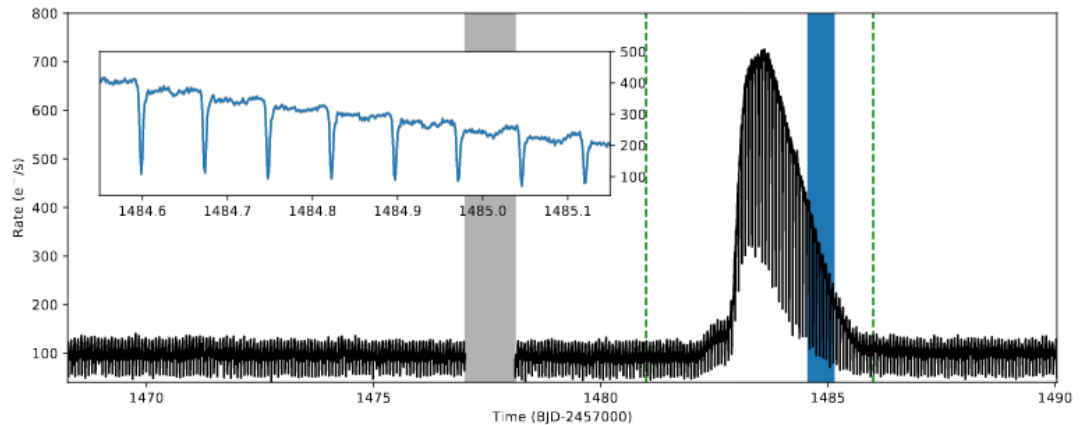
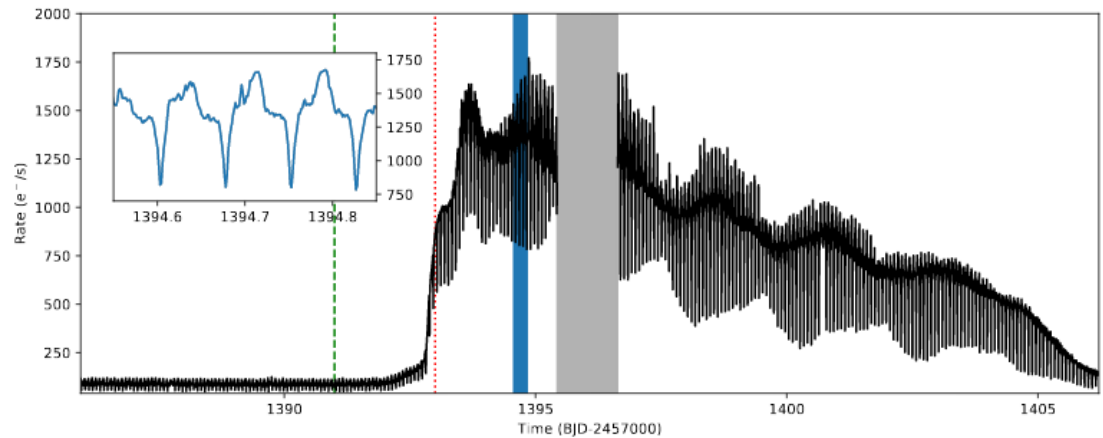
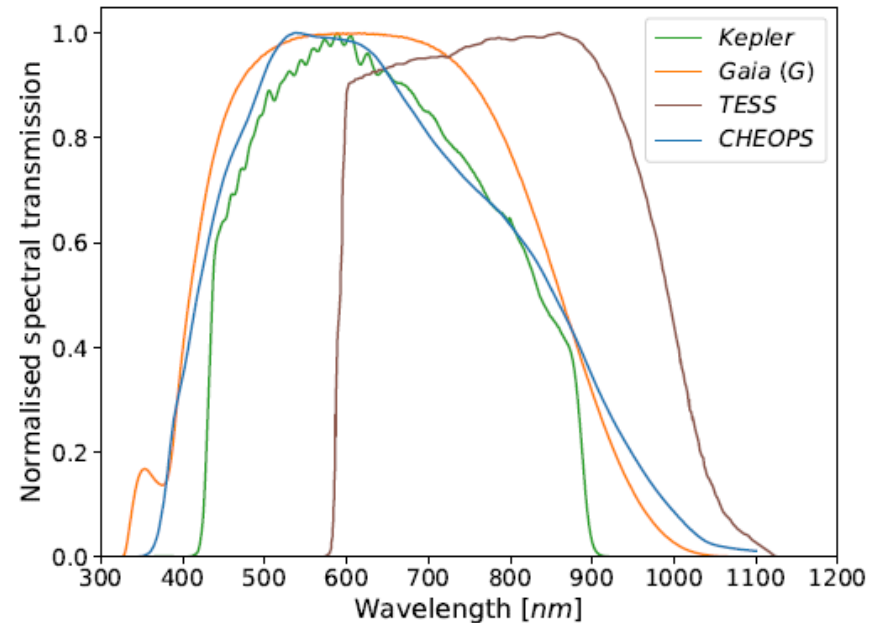
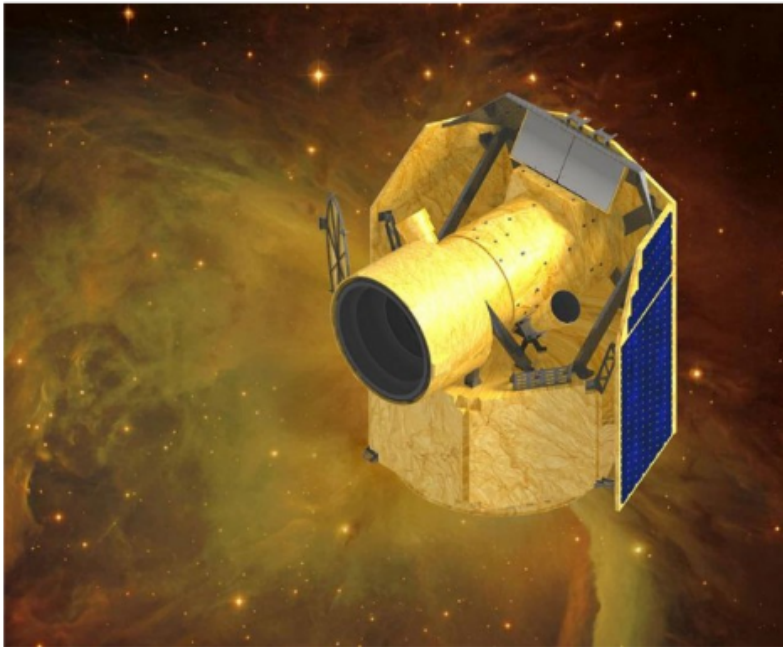


Figure 16. An O-C diagram of superhump arrival times against a linear ephemeris with a period of 0.0771892 d and arbitrary phase. The dashed line is a quadratic ephemeris fit to all su-



Cheops

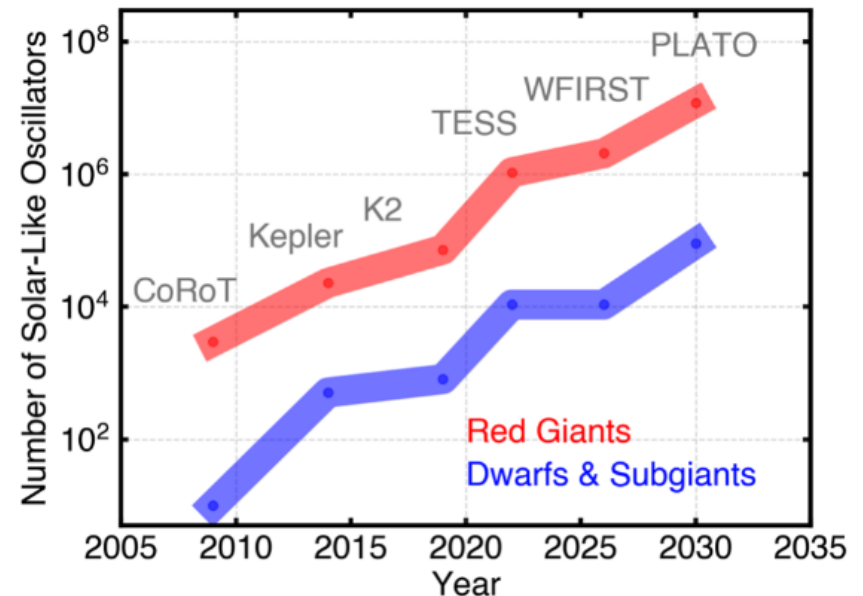
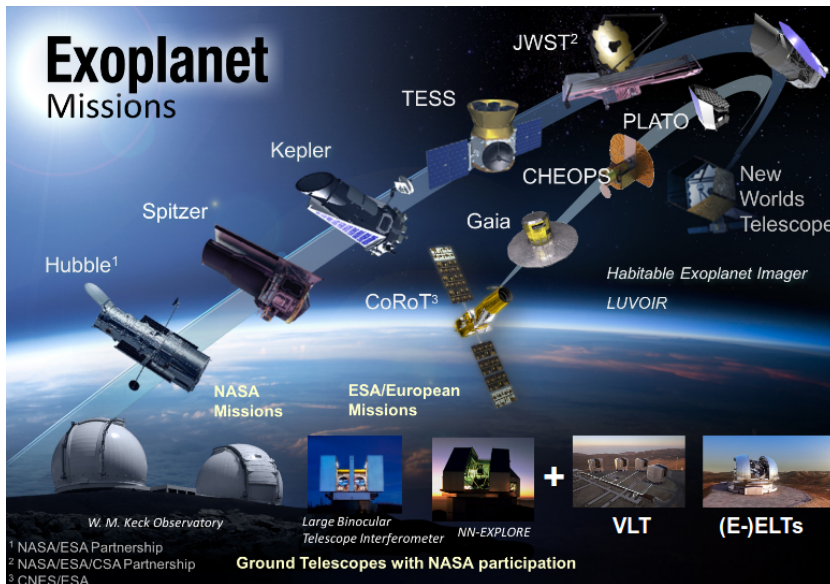
Cheops: **CH**aracterizing **EXO**Planet **S**atellite (Svájc+ESA – az ESA első S-missziója); 33 cm-es RC-távcsővel 1}20 földtömeg közötti exobolygók keresése 3,5 évig. Indítás: 2019. december, első fény 2020. január vége. A tudományos program mostanában indul. Magyar közreműködés (hardver és tudomány is).



Az űrfotometria jelene

Jelenleg is működik a HST, a Gaia, a BRIDE, a TESS és a Cheops (+ az INTEGRAL OMC és a Swift UVOT).

A Gaia szerepe kiemelendő a források száma és a határmagnitúdó miatt. Rengeteg a feldolgozásra váró Kepler-, K2-, CoRoT- és TESS-adat van. Az exobolygókra hivatkozva könnyebb támogatást szerezni, de az űrfotometria feladata sokrétűbb, mint pusztán exobolygókeresés.



PLATO

PLATO: **PL**Anetary **T**ransits and **O**scillation of stars

ESA-misszió, elsőre nem fogadták el, 2014-ben viszont igen. Tervezett indítás: 2026. Éveken át méri a fényes csillagokat.

32 kis távcső közös platformon. Adatredukálás a fedélzeten, 25 másodperces időfelbontású észlelés a látómező minden pontforrására.

