ŰRCSILLAGÁSZAT

ŰRFOTOMETRIA

Összeállította: Szabados László

Szegedi Tudományegyetem

2023

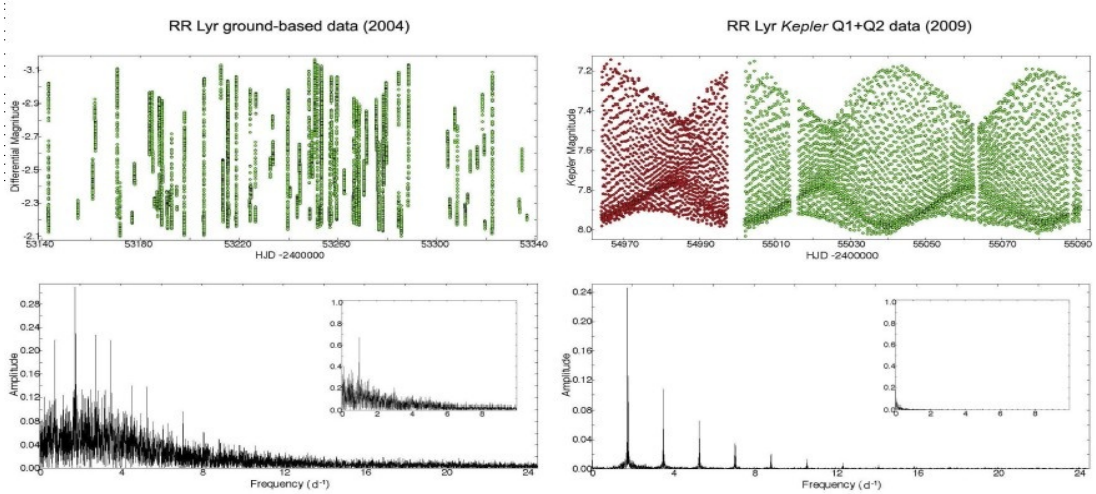
Az űrfotometria jelentősége

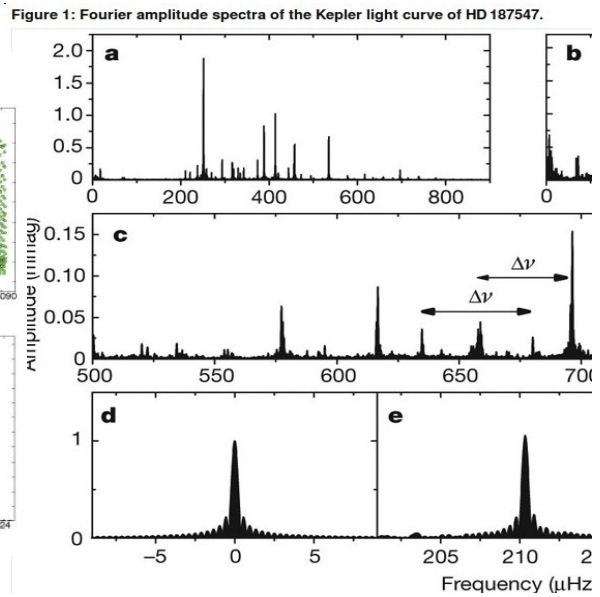
A fotometriai változások kimutatása időigényes, de kis átmérőjű távcső is elegendő. Ezért olcsóbb más űrcsillagászati projekteknél. Kis országok önálló projektje: MOST, CoRoT, de „sérülékeny” (MONS, Eddington).

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

Az űrfotometria hatalmas előnyei:

- mikrováltozások kimutatása: pontosság milli- és mikromagnitúdó között;
- megszakítás nélküli, hosszú adatsor: asztroszeizmológia (tömeg, belső szerkezet, összetétel);
- bolygókeresés fedéssel. Föld-típusú bolygók keresése.





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 színkép készítése során
Hipparcos (1989–1993)	29	400–800 (Hp)	Tycho B_T: 350–500 nm; V_T: 460–600 nm
			0,2; 30–380; 3 év; 118 000 (Tycho: $2{,}5\times10^6$)
HST (1990–)	240	460-700	Fine Guidance Sensor
			0,001; vált.; vált.; több millió
WIRE (1999–2011)	5,2	$V + R_J$	csillagkövető
			0,005; $> 10^3$; 21 nap; 200 fényes csillag
INTEGRAL (2002–)	5	Johnson V	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	5 űrszonda: 3 kék, 2 vörös sávban
		vagy 390–460	0,001; $> 10^3$; 30–180 nap; ∼1000 fényes csillag
Gaia (2013–)	68	330–1050 (G)	G_{BP}: 330–680 nm; G_{RP}: 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), az XMM-Newton (1999–), a Swift (2004–) és a STEREO (2006–) mérései alapján is.

Fotometriai űrprojektek összehasonlítása

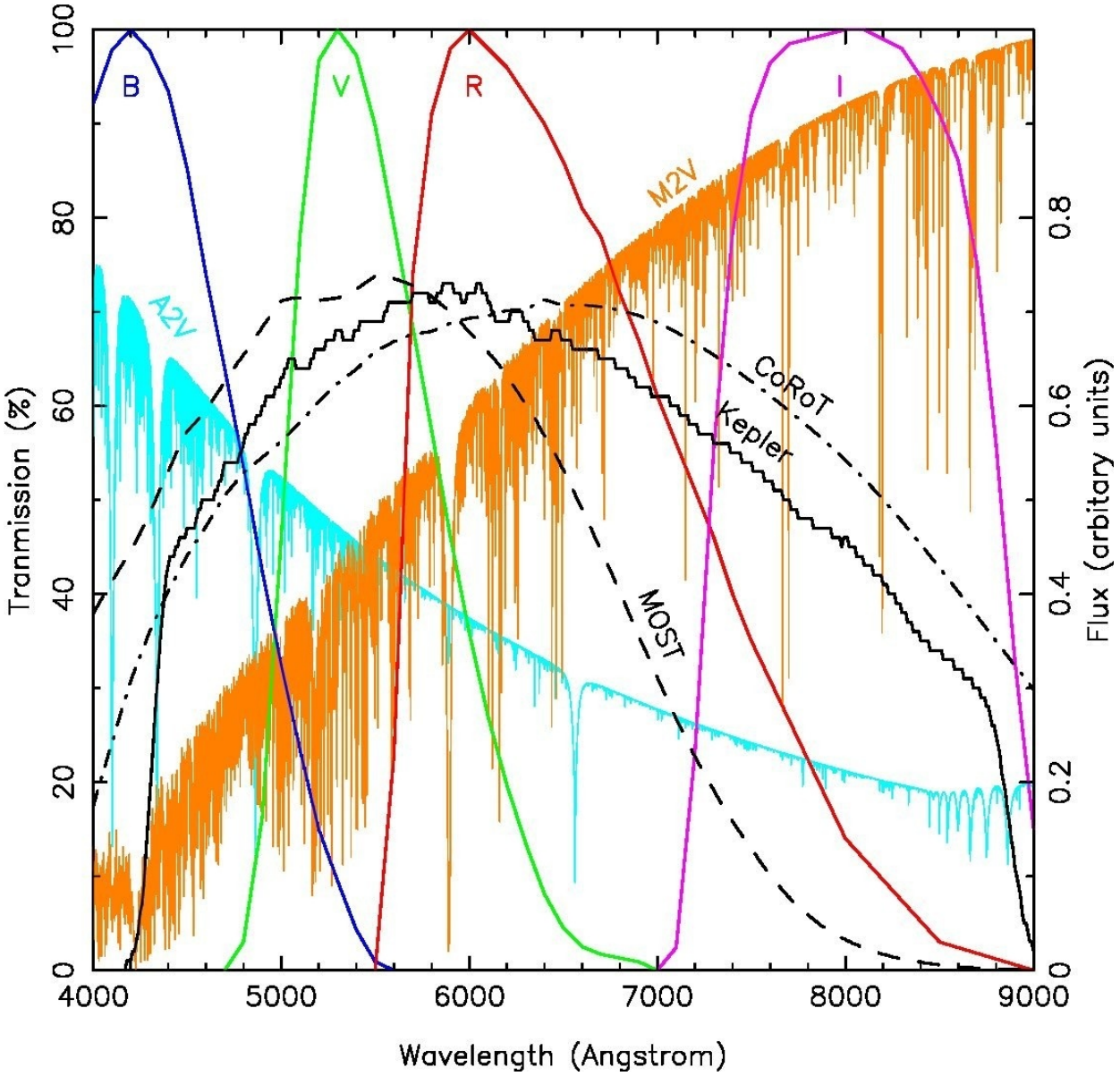
Table 1. Comparison among different past, current, and future space missions with asteroseismi

	MOST	CoRoT	*Kepler*	
			Kepler	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	≈ 80% ecliptic plane

Notes. [(a)]Weak coverage for Dec in the range [−6°,6°]. [(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.)

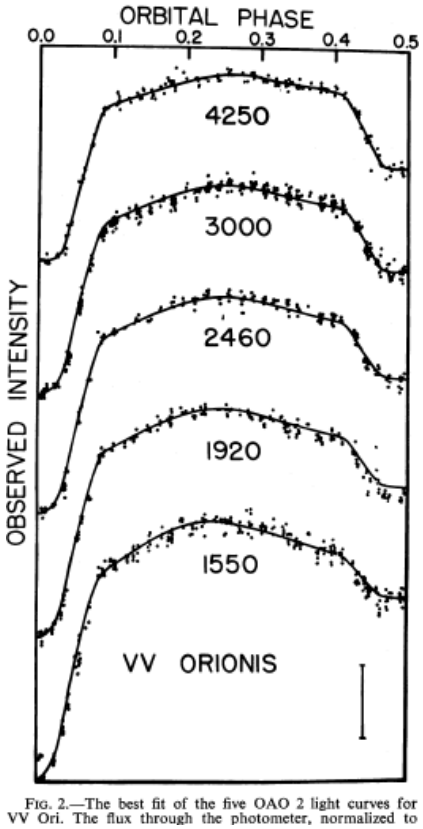
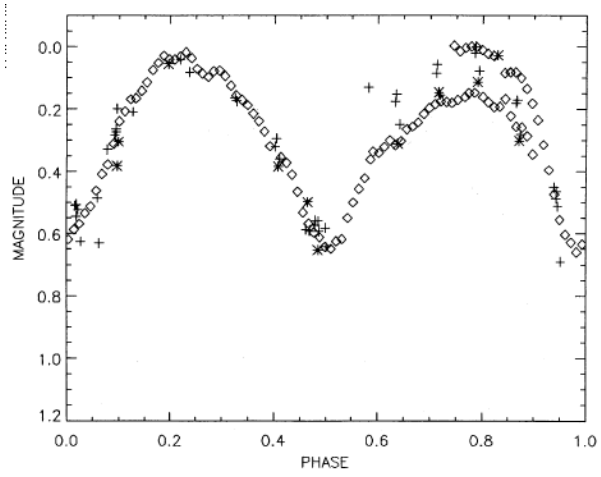
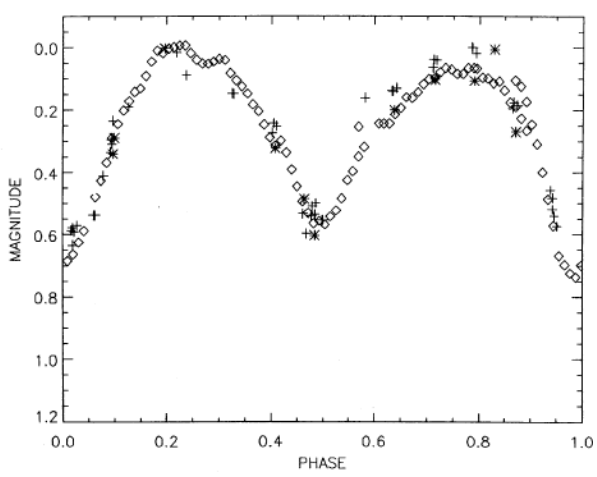


FIG. 2.—The best fit of the five OAO 2 light curves for VV Ori. The flux through the photometer, normalized to





Az űrfotometria kezdetei

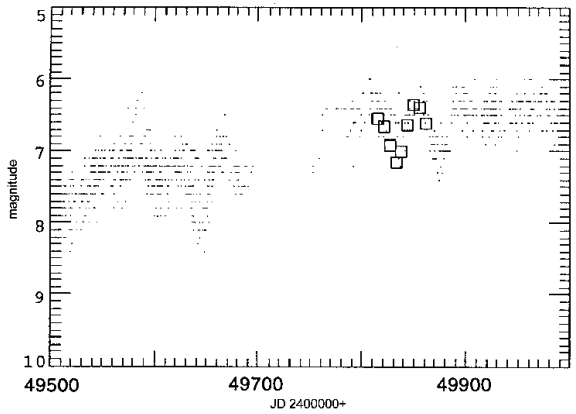
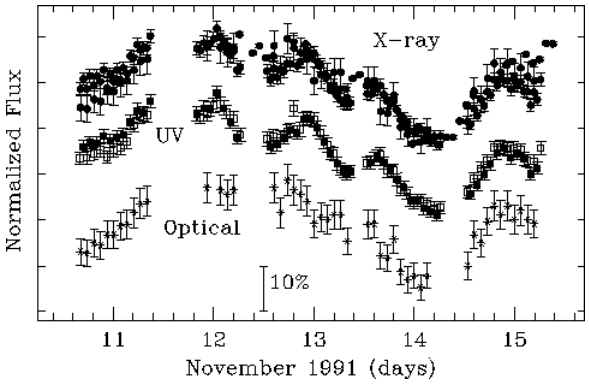
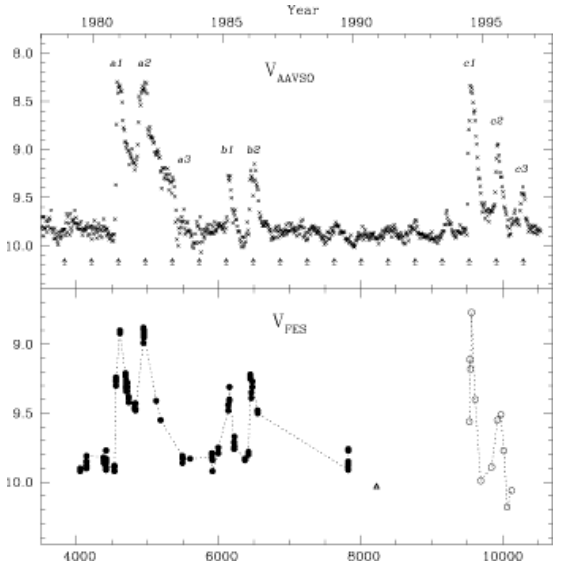


Figure 1. RY Sgr light curve from AAVSO visual observations (dots) and IUE's fine error sensor (squares). At the time of the IUE observations, the star appears to be almost fully recovered from its deep minimum of JD 2449160 to JD 24492270.

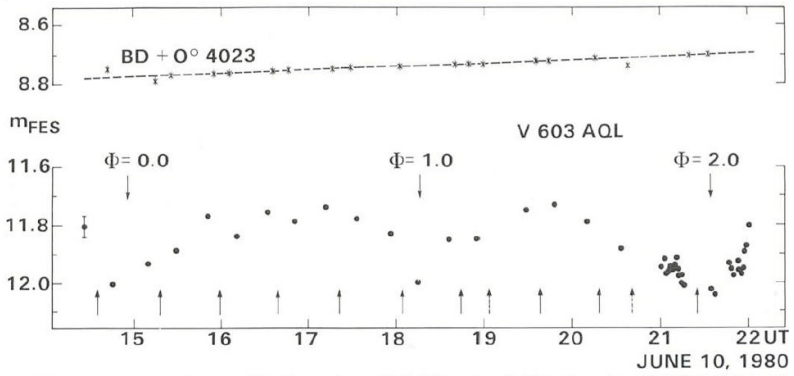




IUE (1978–1995): FES (helyzetérzékelő), de nem volt kalibrálva a fotometriai rendszer, és nem volt stabil, viszont jól mutatta az űrfotometriában rejlő lehetőséget.

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

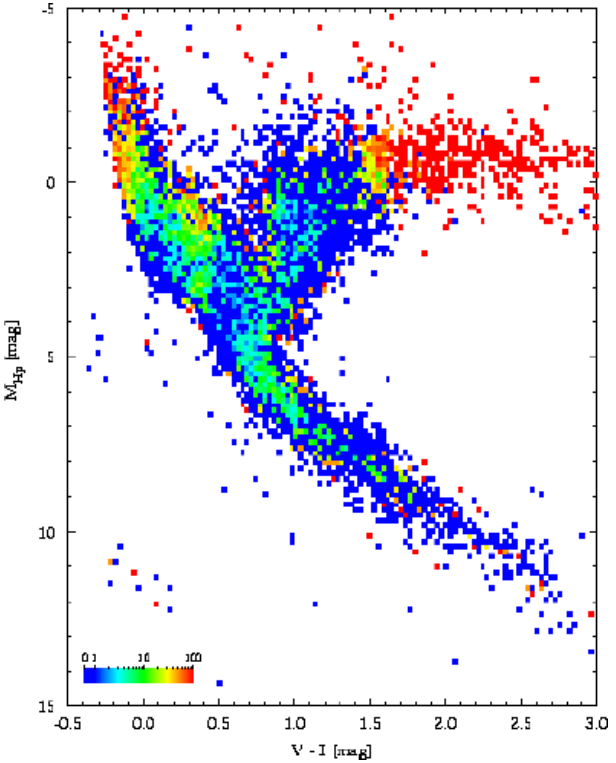
Fent: RY Sgr, kvazár, AG Dra (szimbiotikus, K3III); jobbra: V603 Aql (nóva+EB)

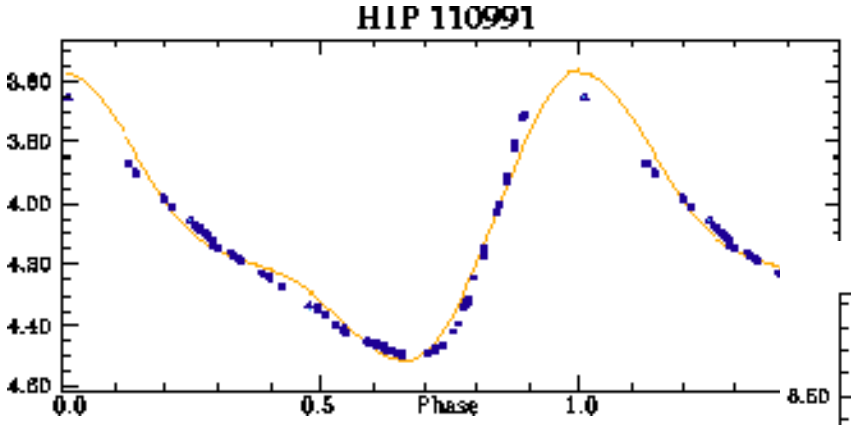


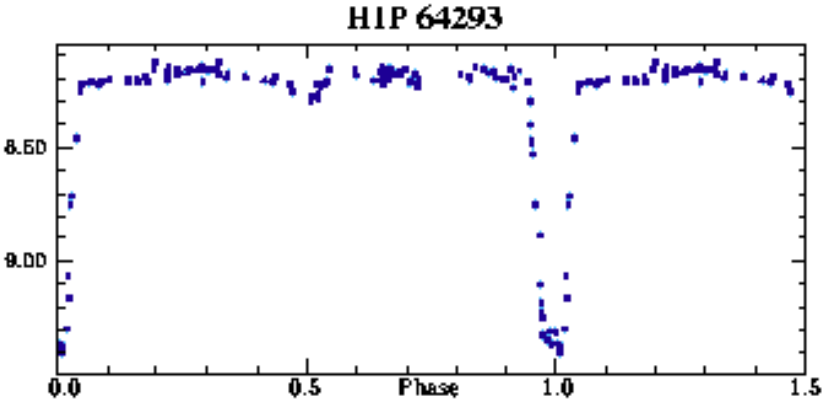
Hipparcos

1989–1993 között működött, de az idősor mintavételezését az asztrometriai célokhoz igazították. 11597 változócsillag (>8000 új) a 118218 programcsillag között. Még fényes cefeidákat is talált és rengeteg SPB-csillagot (periódusuk 1 naphoz közeli).

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







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.

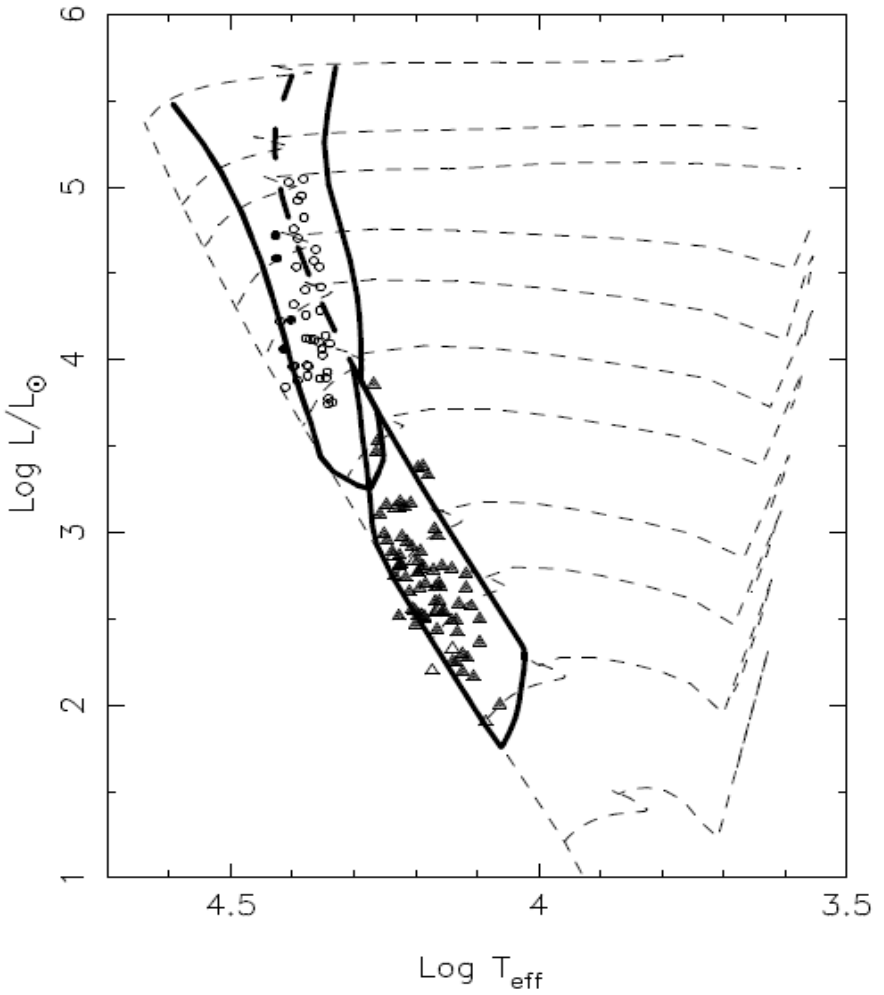
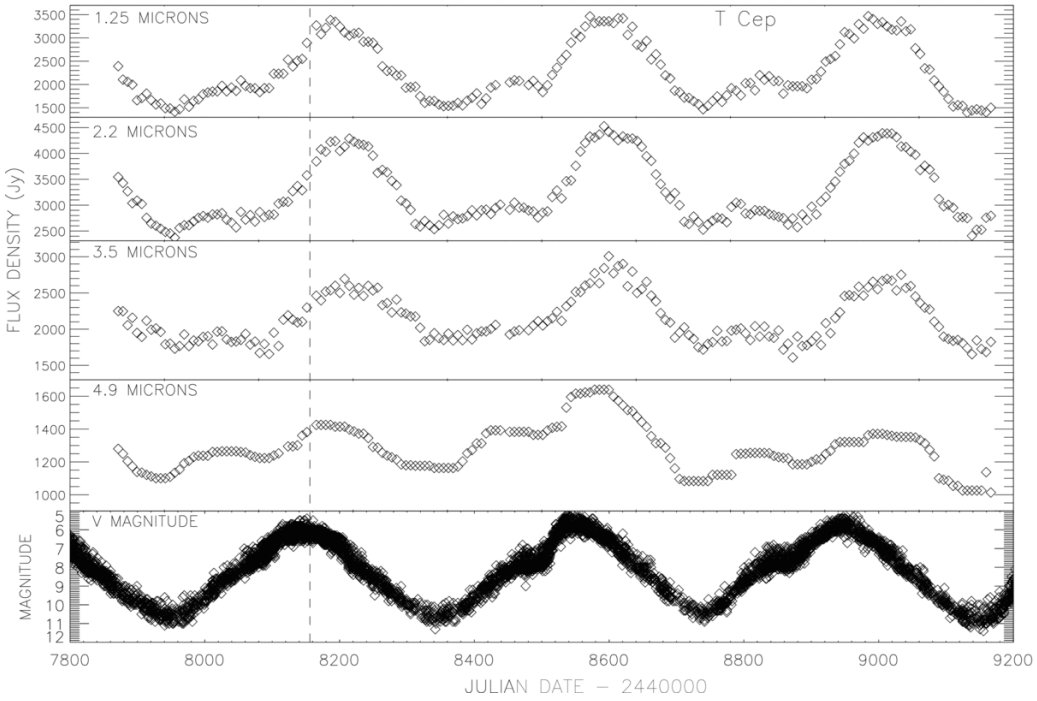


Fig. 1. Position of the β Cephei stars and SPBs in the HR diagram (circles: β Cephei stars, triangles: SPBs). The previously known variables are indicated by the open symbols while the variables discovered by Hipparcos are denoted by the filled symbols. The instability strips were

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, 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.

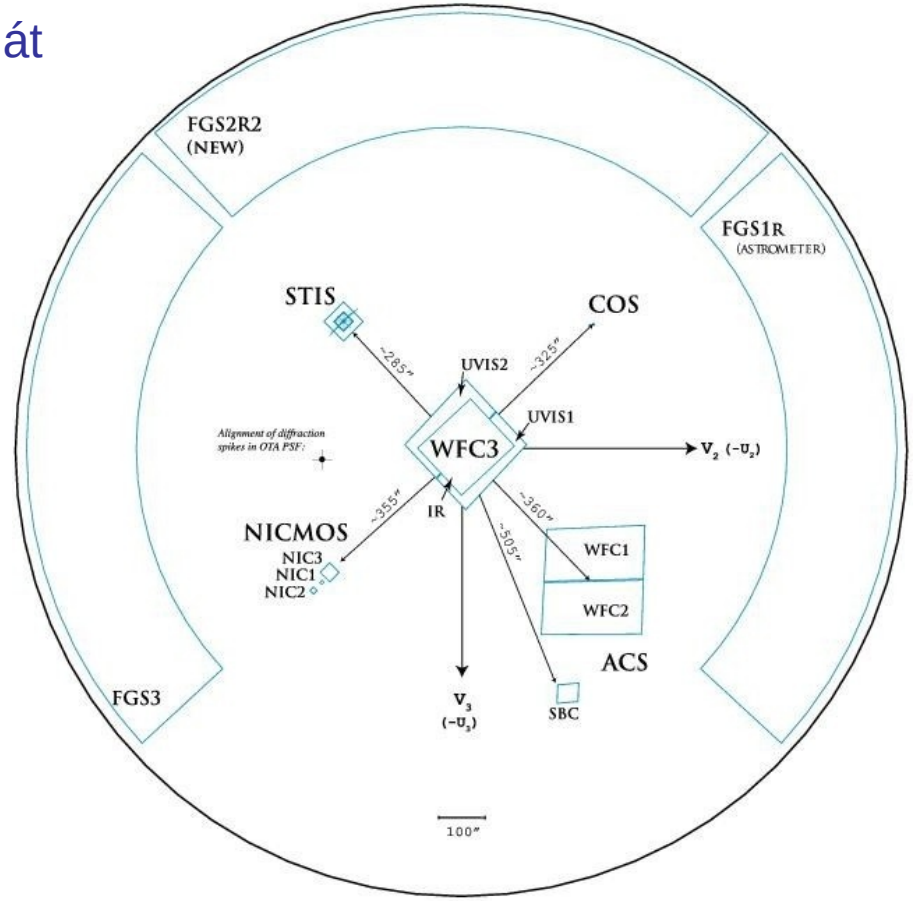
Az FGS lényegében gyorsfotometriát végez a GSC kiválasztott csillagairól 25 ms integrálással. A 3 FGS-ből legalább kettő folyamatosan működik.

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.

A képek is kiértékelhetők fotometriai célból.



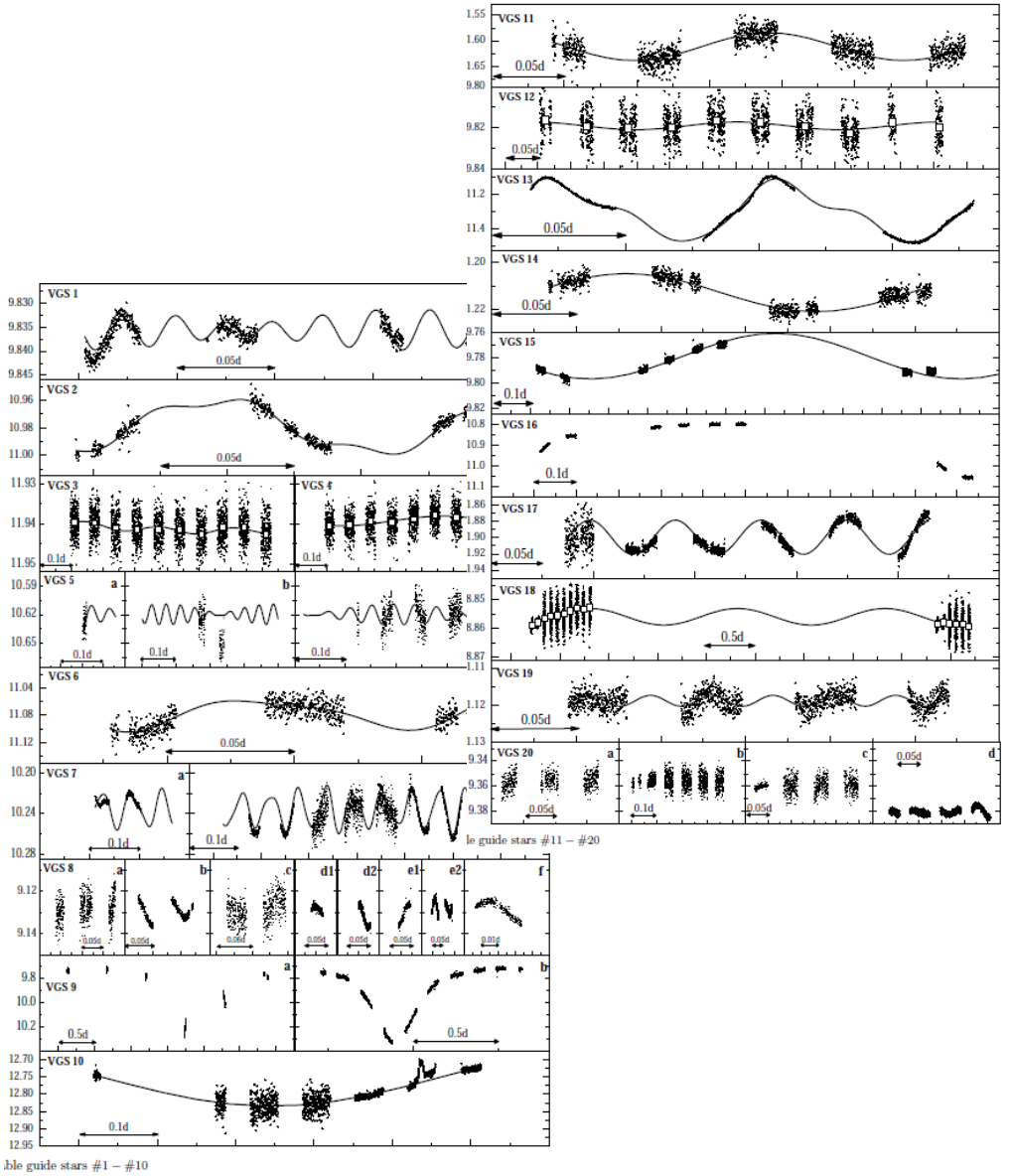
Fotometria a HST-vel

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

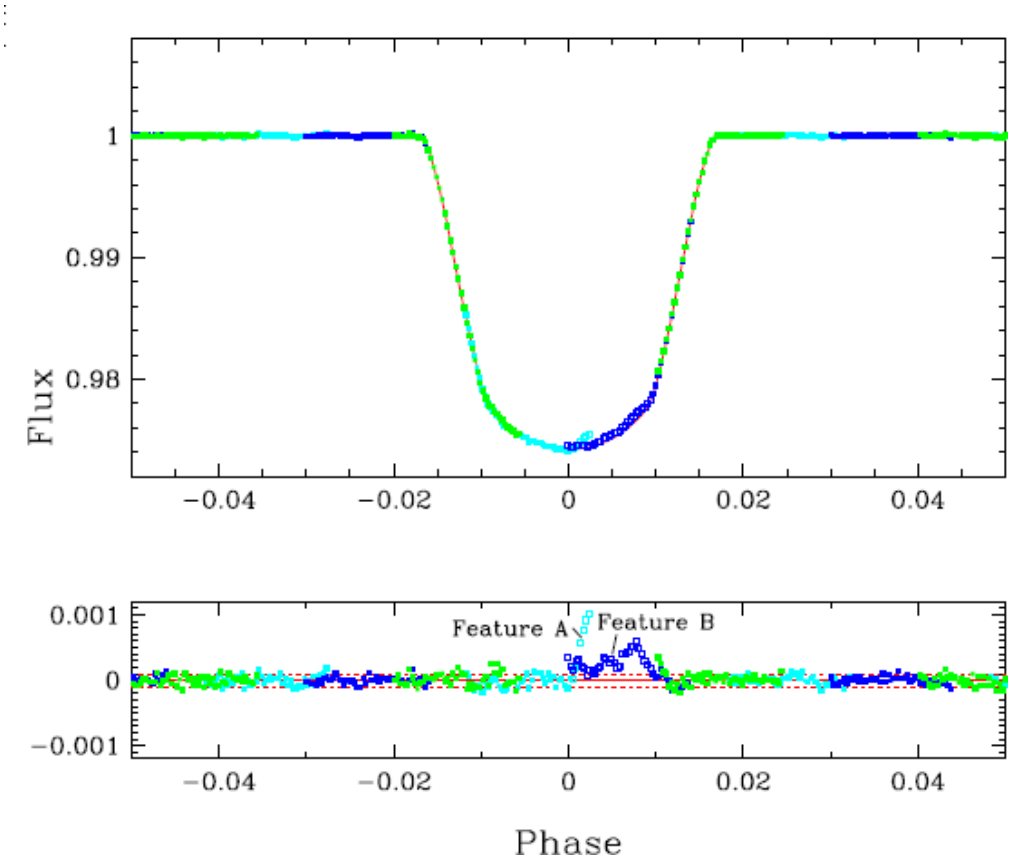
Exobolygó-fedési fénygörbe: HD 189733b: *P*=2,218583 nap; az ACS-sel észlelt fénygörbe finomszerkezete alapján hold és gyűrű léte kizárható; az átlagos fedési fénygörbétől való eltérést csillagfoltok okozzák.

Aktív változócsillag V452 Vul néven, röntgenaktivitását az Exosat és a ROSAT is észlelte.

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

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

Az eltérés oka a foltok migrációja 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 átmérő + 512×512 [27 μm] pixel) fényes csillagok fotometriája (V+R sávra érzékeny, 1 pixel ≅ 1 ívperc). Földi távcsővel ráadásul nem is észlelnek ilyen fényes csillagokat.

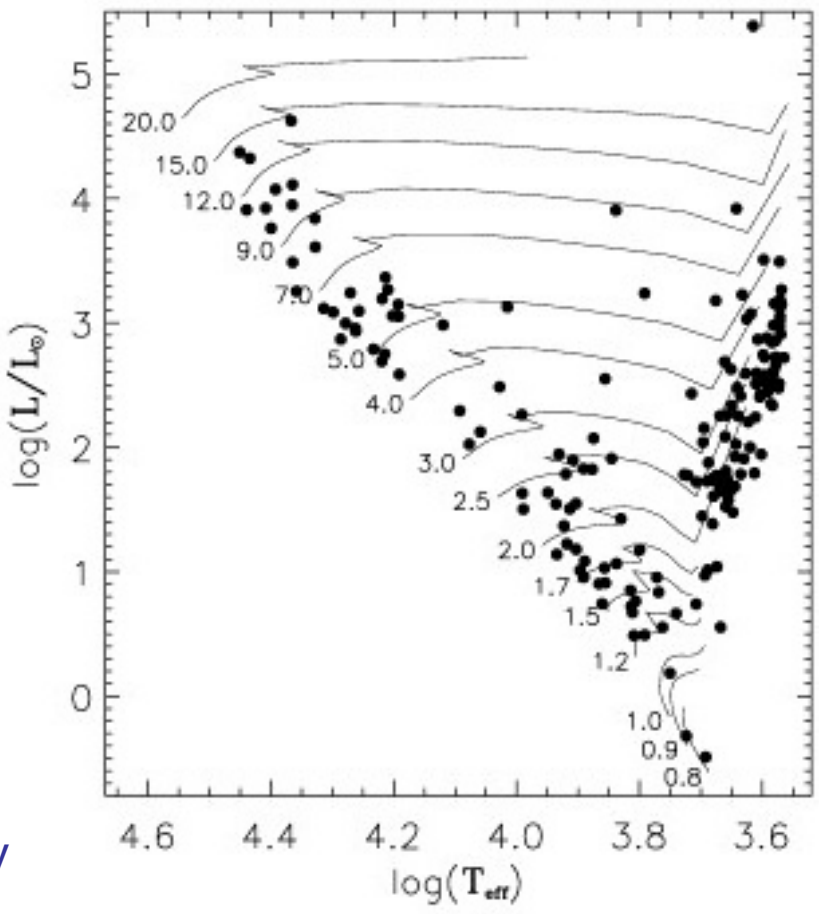
Napszinkron pálya, 96 perces keringési periódussal. (2006-ra 93 perc lett). (2011. V.: a légkörbe érve megsemmisült, de csak 250 kg volt.)

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

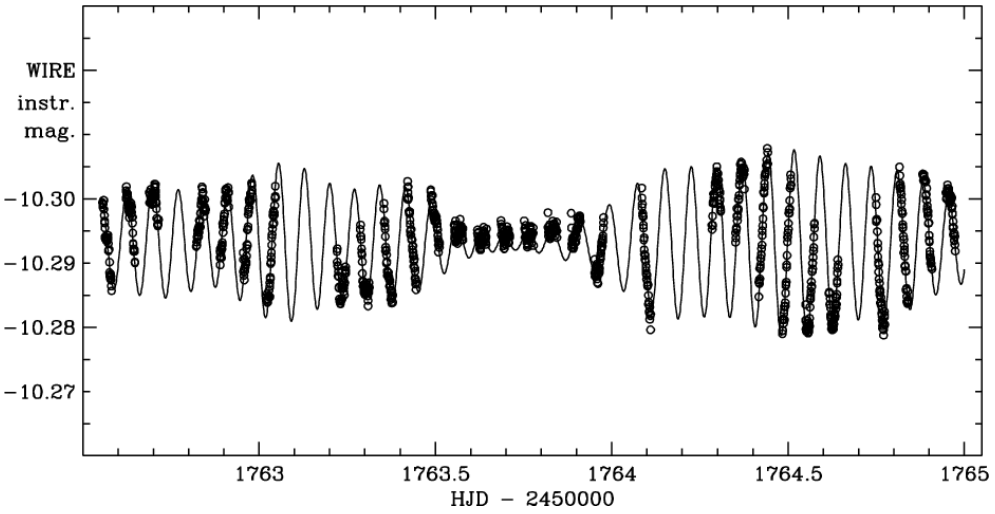
Nap-típusú csillagok oszcillációi (jellemzői: kis amplitúdó, rövid élettartam, módusfrekvenciák fésűfogszerű eloszlása állandó értékű felhasadással)

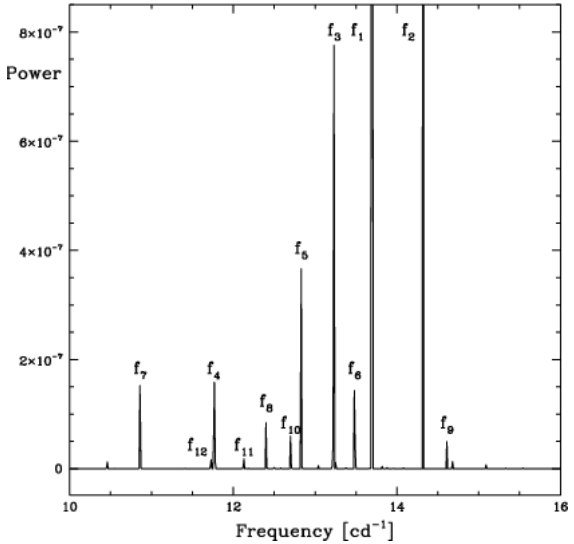
α Cen (Rigil Kentaurus, G2V): 50 napos adatsor, fésűszerű teljesítmény-színkép, p-módusú oszcillációk (v_{rad}-észlelésekkel utóbb megerősítve, 40 módus); a módusok élettartama kb. 2,5 nap.

β Hyi (G2IV): már elfejlődött a fősorozatról, de fésűfogas a teljesítmény-színképe, 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 (jobbra, a képen), összhangban a földi kampány eredményeivel, spektroszkópiai kettős, keringési periódusa 140,7 nap.

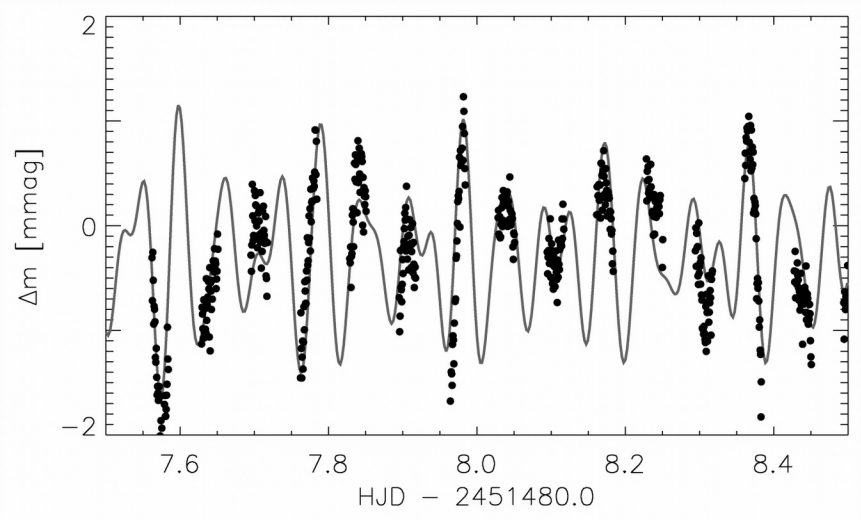


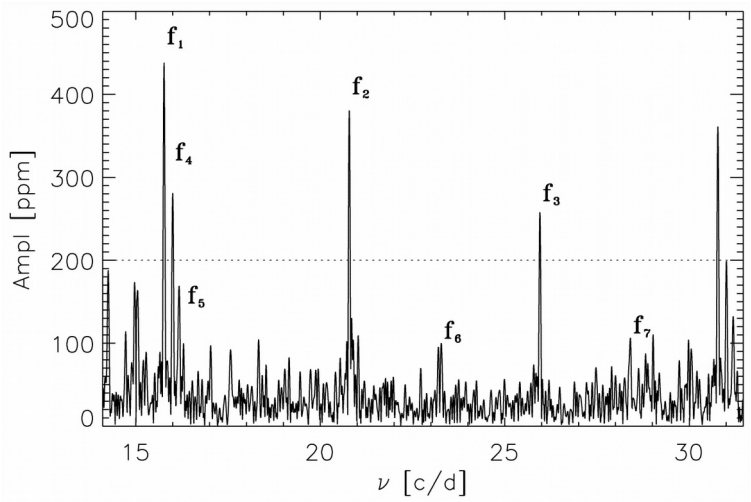


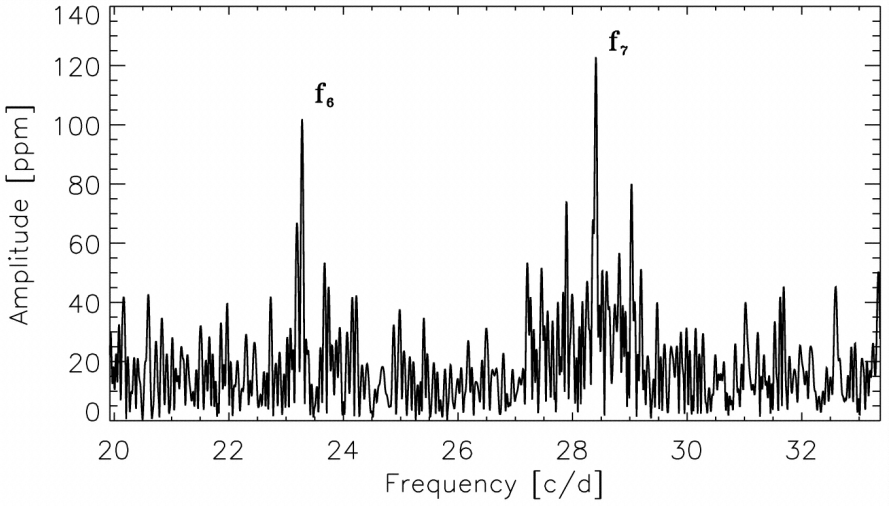
A WIRE eredményeiből

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.







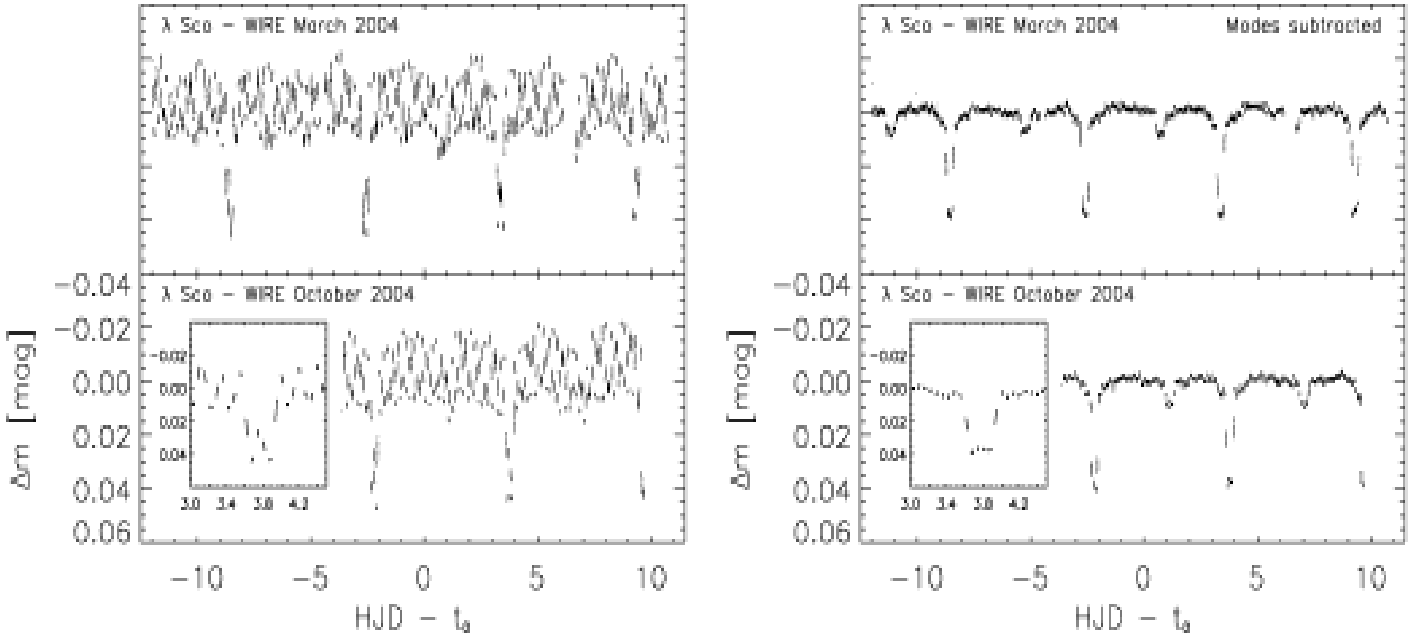
A WIRE eredményeiből

B típusú csillagok: 30-nál több BCEP 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 BCEP volt, de újabb kis amplitúdójú módusokat fedeztek fel.

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



A WIRE eredményeiből

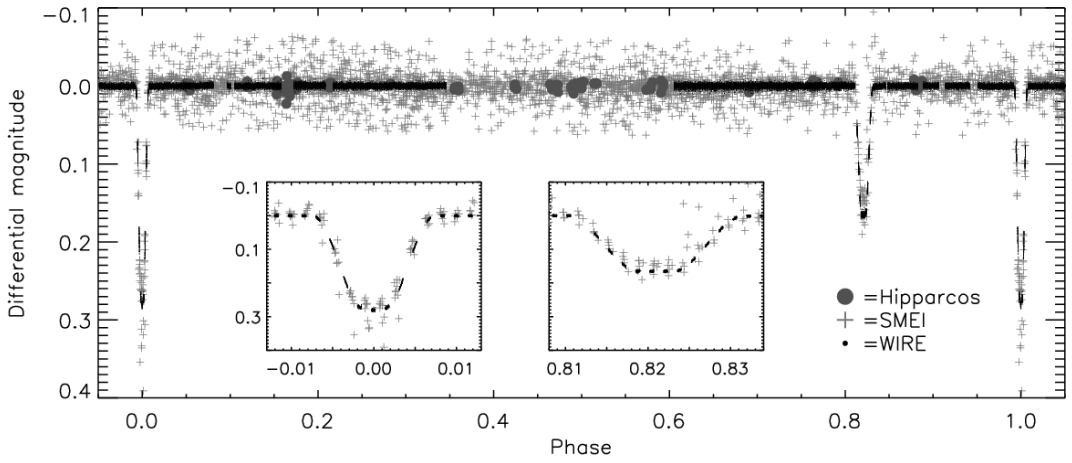
Fedési fénygörbéből a komponensek fizikai tulajdonságainak meghatározása.

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 (ábra balra lent).

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

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

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



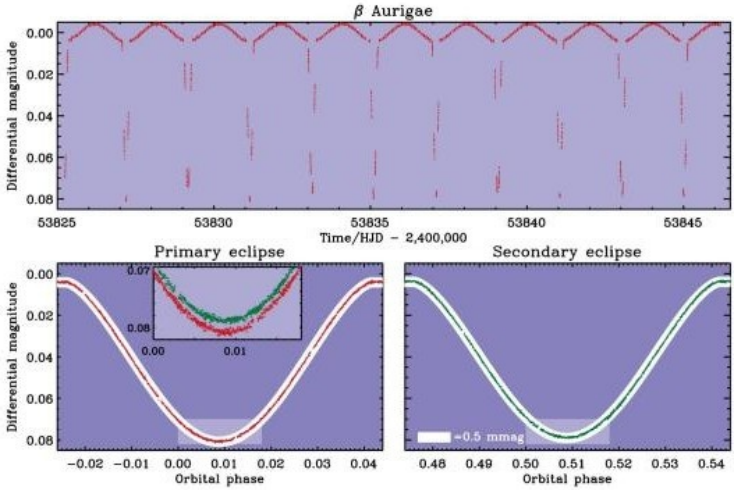


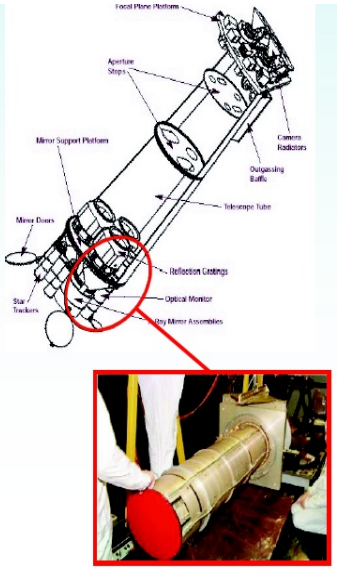
Figure 3. The light curve of β Aur from WIRE is shown in the *top panel* (every fifth data point is plotted). The *bottom panels* show the phased light curve around the primary and secondary eclipses. The slight difference in the depths of the primary and secondary eclipses is seen in the inset in the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

XMM-OM

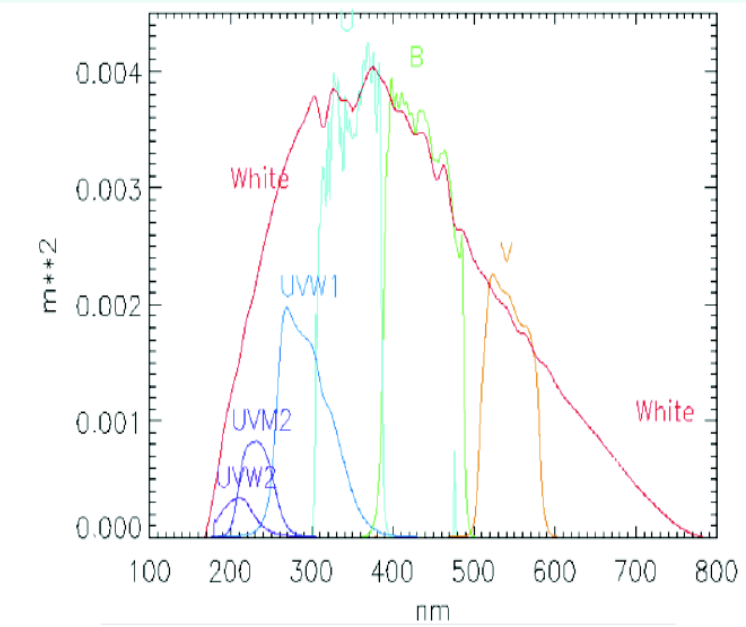
XMM-Newton: az ESA röntgenszondája, 1999 végétől működik. Egyik műszere az Optical Monitor (OM). Az ezzel kapcsolatos ábrák forrása: M. Page.

XMM-OM basics

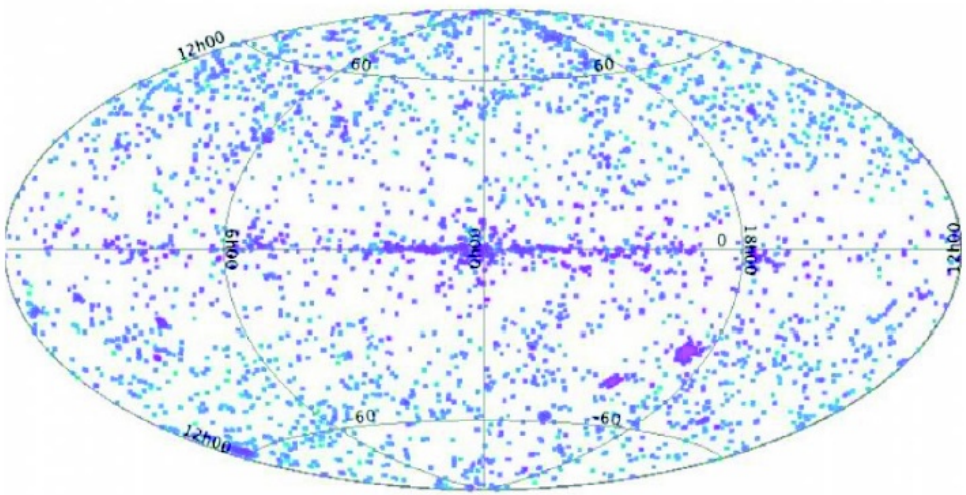
- 30cm telescope
- Co-aligned with X-ray instruments
- Microchannel-plate-intensified CCD detector
- Photon counting.
- On-board image tracking
- 6 broad band filters u,b,v,uvw1, uvm2, uvw2
- UV and optical grisms
- PSF is about 2" FWHM in the UV, about 1.5" in the optical.



XMM-OM imaging passbands



XMM-OC



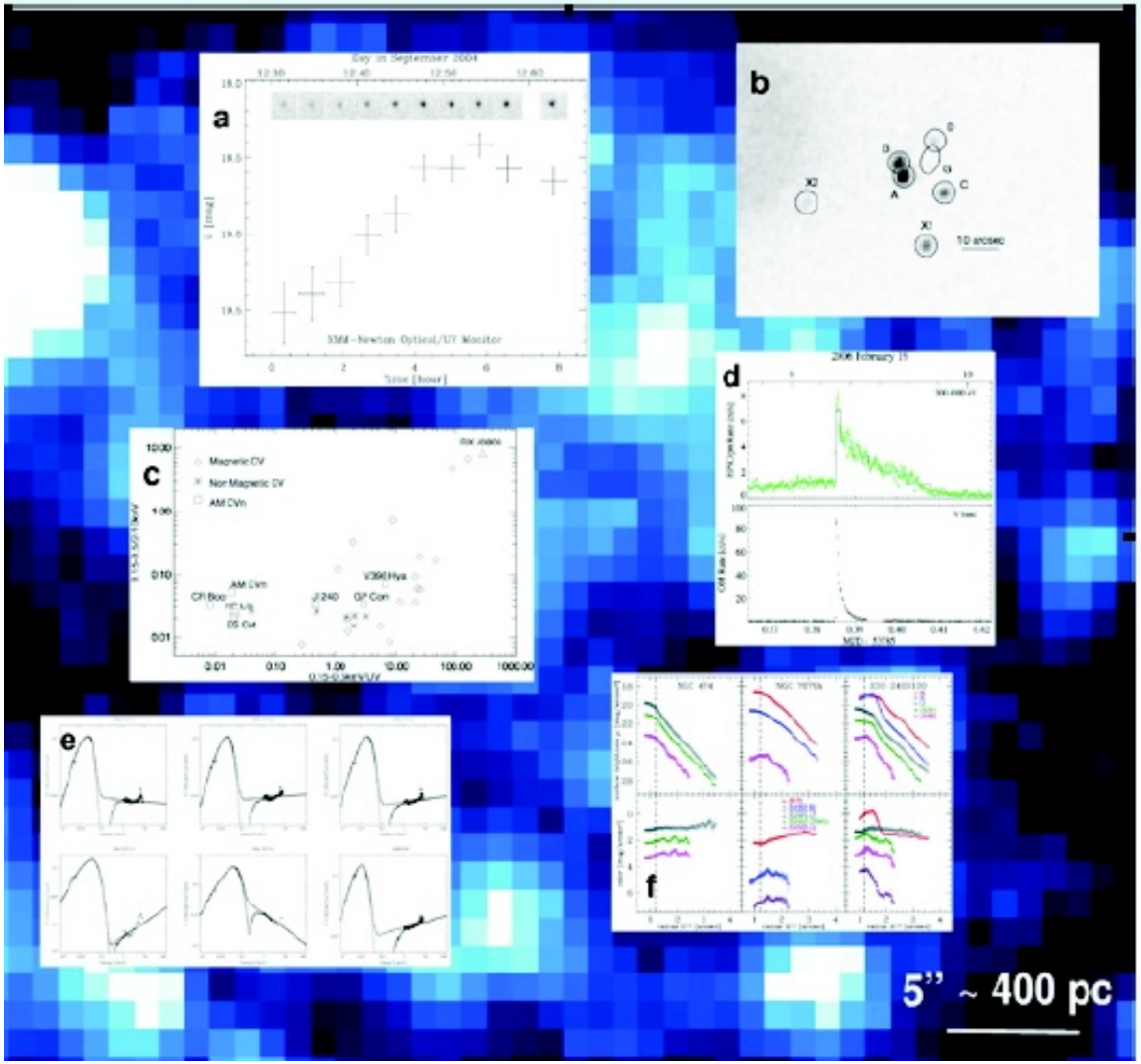
What has XMM-OM been used for?

- Measurement of water molecules in Comets
- First gamma-ray burst UV afterglow
- Instantaneous SEDs of AGN
- Reverberation mapping of AGN
- Eclipse measurements of X-ray binaries
- Accretion patterns in magnetic CVs
- Star formation in galaxy clusters
- Impulsive emission in stellar flares
- Star formation in active and normal galaxies
- UV galaxy surveys
- Accretion onto T-Tauri stars
- Quasar cosmology
- Identifying millisecond pulsars

What <u>hasn't</u> XMM-OM been used for?

XMM-OC

A flavor of XMM-OM diverse uses



a) OM lightcurve of the brown dwarf 2MASS J0414 showing a 1 magnitude change in U-band brightness, likely due to an accretion event from a circumstellar disk,' (Grosso et al. 2007, A&A 468, 557). b) XMM-OM image of the gravitationally lensed quasar SDSS J1004+4112 (Lamer et al. 2008, A&A 454, 493). c) UV/X-ray colours are used to diagnose the accretion disk dominance in CV stars (Ramsay et al. 2006, A&A 457, 623). d) fast mode XMM-OM observations record the rapid optical rise of a 6-magnitude stellar flare in the ultracool dwarf LP 412-31 (Stelzer et al. 2006 A&A 460, L35). e) UV observations from XMM-OM are used to determine Eddington ratios and bolometric corrections for AGN (Vasudevan & Fabian 2008, MNRAS 392, 1124). f) UV luminosity and colour profiles of shell galaxies (Trinchieri et al. 2008 A&A 489, 85). Underlying image: XMM-OM UVW2 image of the young star clusters surrounding the nucleus of M99 (Soria & Wong 2006, MNRAS 372, 1531).

Az INTEGRAL OMC mérési adatai

INTEGRAL: az ESA gamma- és röntgenszondája, 2002-től működik.
OMC: Optical Monitoring Camera.
V = 18 magnitúdónál fényesebb 70000 pontforrás fénygörbéje; 5263 forrás változó (sok ismert változócsillag eddig téves periódussal).

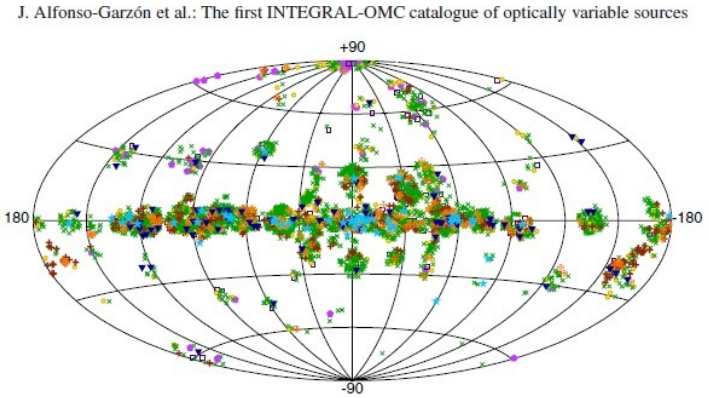
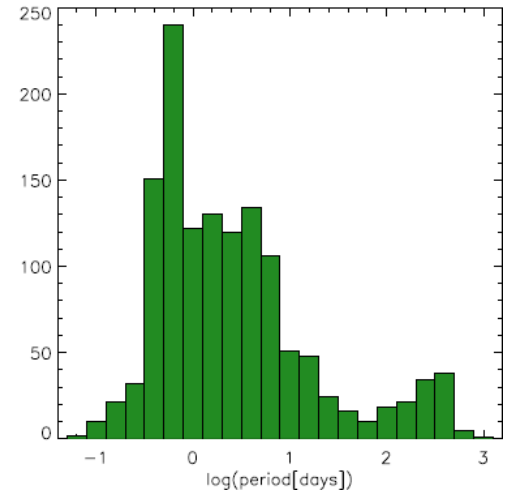
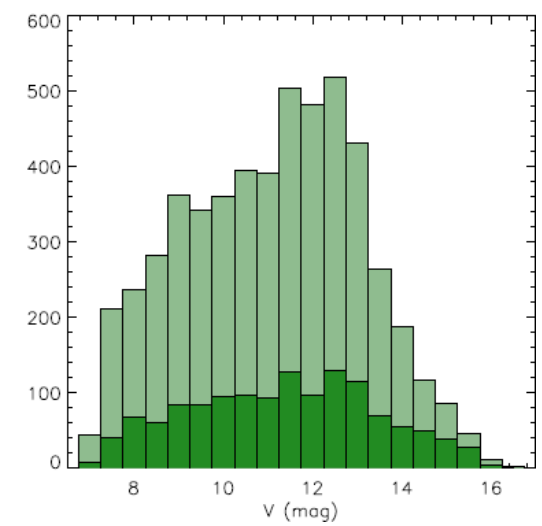
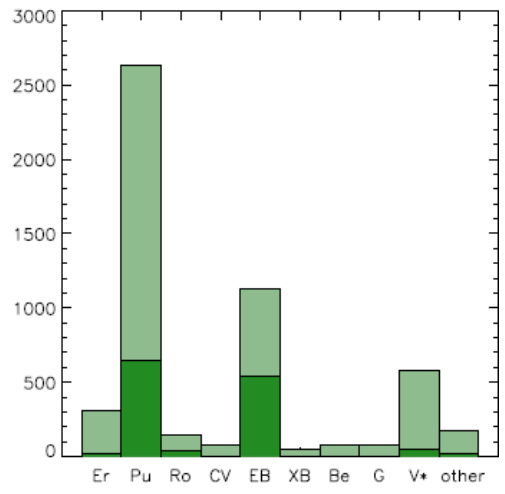


Fig. 6. Distribution in galactic coordinates of all the sources in the catalogue. The green crosses represent pulsating stars, the red filled points correspond to eclipsing binaries, the brown plusses are eruptive stars, the orange complex plusses represent rotating stars, the inverted dark blue filled 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.





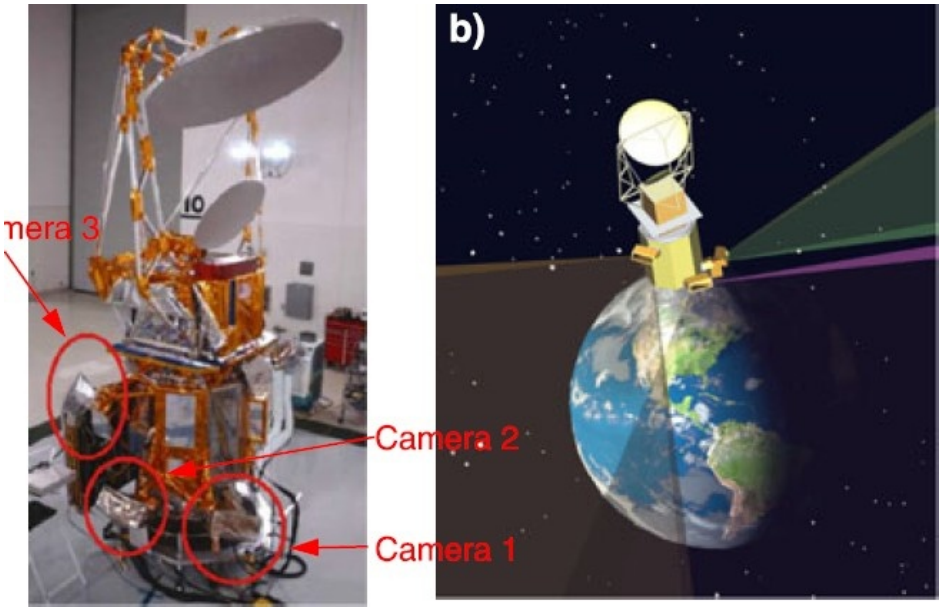


SMEI a Coriolis szondán

SMEI: Solar Mass Ejection Imager, a Nap koronakitöréseinek 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 adatok vannak.

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



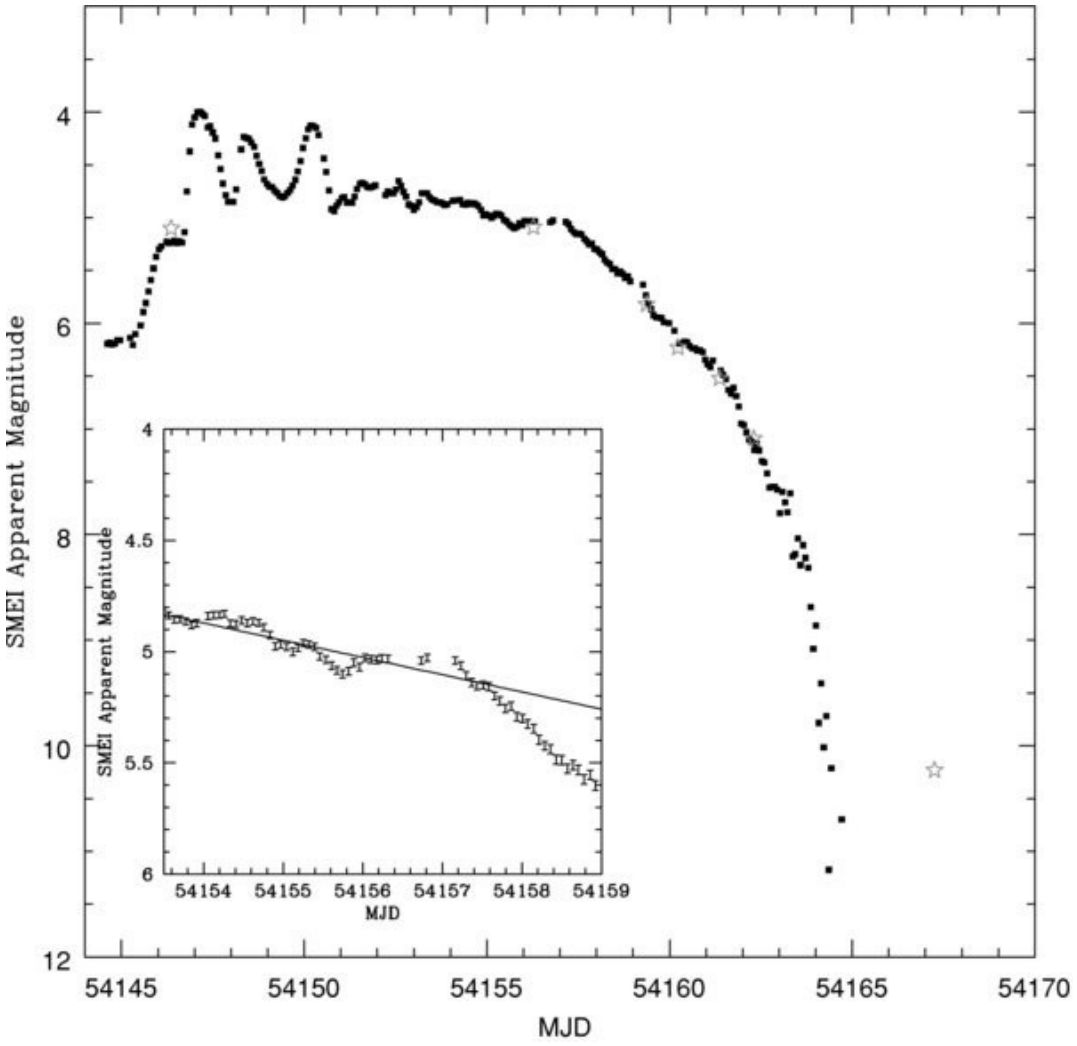
SMEI a Coriolis szondán

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±0,03 μHz erős módus 21,7±0,5 napos csillapodási idővel.

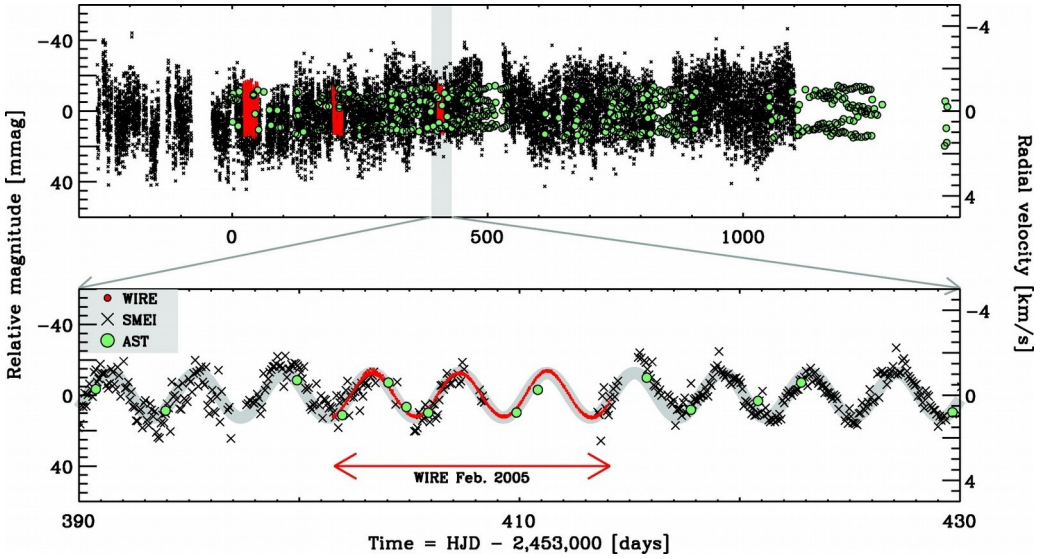
β UMi (Kochab, 2,2 m): K-óriás, 4,6 napos oszcilláció, 3 hetes módusélettartammal.

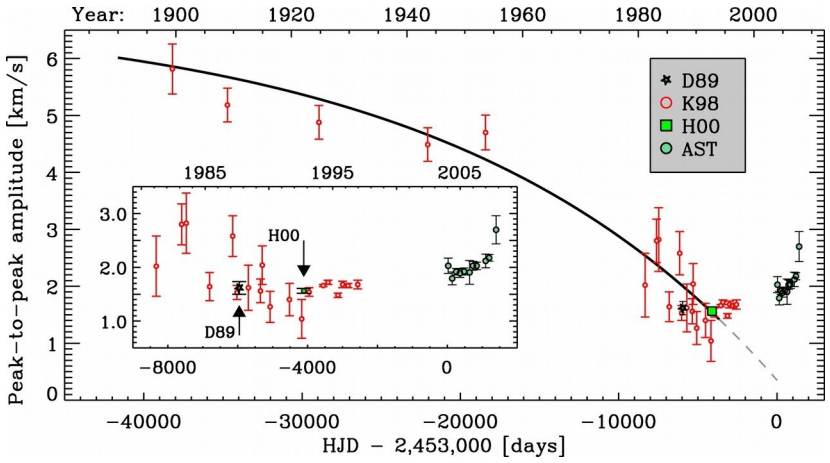
A V1280 Sco nóvakitörése 2007-ben (ábra jobbra).

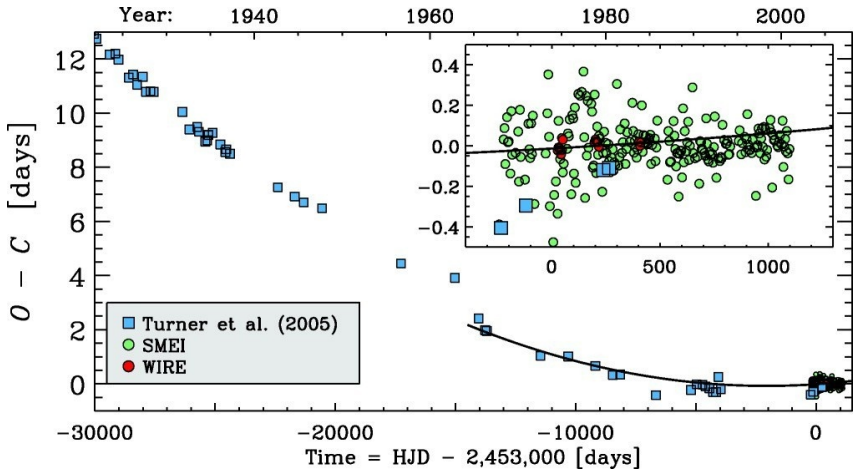


SMEI a Coriolis szondán

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







Fotometriai űrszonda szükségessége

A franciák (CNES) már 1982-ben próbálkoztak: az EVRIS műszer a szovjet Marsz–94 szondán fotometriai méréseket végzett volna a Mars felé vezető úton, de a Marsz–94 projekt sokat késett, végül az 1996-os indítás után a hordozórakéta még a Föld légkörében felrobbant. (EVRIS: **E**tude de la **V**ariabilité et de la **R**otation des **I**ntérieurs **S**tellaire)

Az EVRIS kifejlesztésére fordított idő, energia és pénz azonban nem veszett kárba, a később sikeres CoRoT misszió előkészítése és végrehajtása során felhasználták az addigi eredményeket és tapasztalatokat.

Az űrfotometria szükségességét fokozta az 1990-es években sikeressé vált exobolygókeresés (a radiális sebesség módszer mellett a fotometriai kimutatás lehetősége), továbbá az asztroszeizmológiai kutatások lehetősége: a csillag belső szerkezetének meghatározása egészen kis amplitúdójú rezgések alapján.

Mindehhez legalább tízezred magnítúdós fotometriai pontosság kell, amit a földfelszínen nem lehet elérni, csak a légkörön kívülre telepített (akár kis átmérőjű) távcsővel.

MOST, az első fotometriai űrszonda

Microvariability & Oscillations of STars: kanadai mikroszonda, 2013-ig a legkisebb űrtávcső (fotometriában 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 működőképes 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 Makszutov-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.

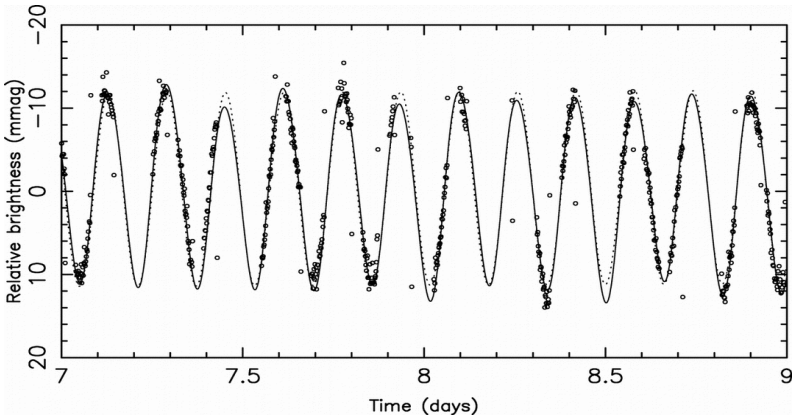
Az égbolt 54° széles sávjában (CVZ) megszakítás nélkül 8 hétig észlelhetett 6 magnitúdónál fényesebb csillagokat. Mozgó alkatrész híján stabil fókusz. Reakciókerekekkel (4 db) 1 ívperces irányzási pontosság.

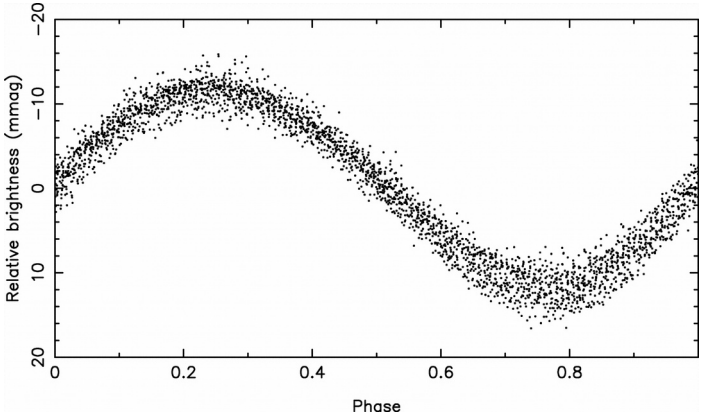
Program (eredetileg):

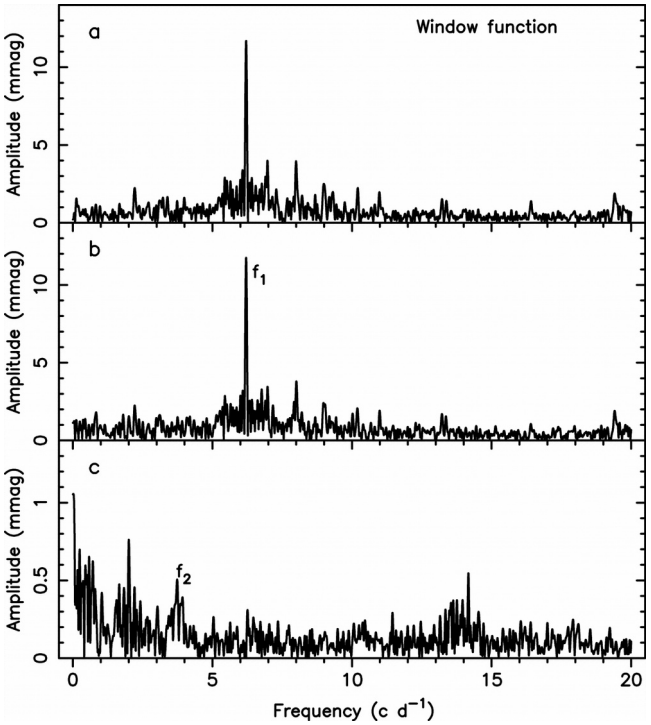
- Nap-típusú csillagok akusztikus oszcillációi (utóbb más változócsillagok
- pulzációja is, pl. fémszegény szubtörpék);
- Mágneses csillagok (roAp);
- Exobolygókról reflektált csillagfény;
- Wolf–Rayet-csillagok turbulens változásai (nagy tömegű csillagok fősorozat után; kölcsönhatás az intersztelláris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

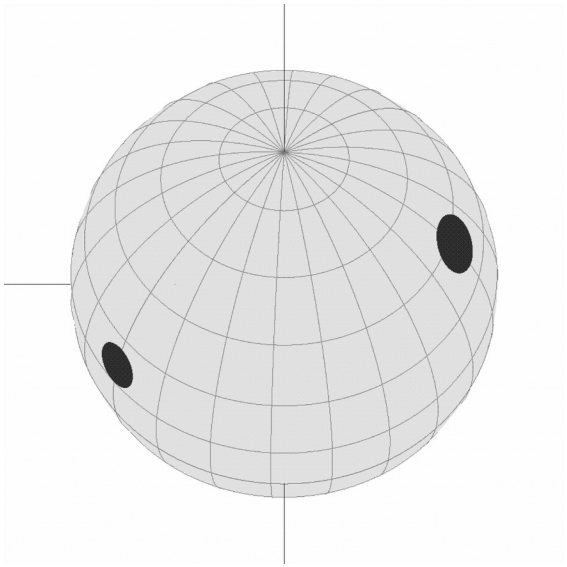
f_j (day^{-1})	f_j (μHz)	c_j (mmag)	ϕ_j	S/N
f_1 = 6.20589(8)	71.8274(9)	11.62(3)	0.4958(4)	121.4
$2f_1$	$2f_1$	0.72(3)	0.619(7)	7.5
2.003(1)	23.18(1)	0.65(3)	0.292(7)	6.8
f_2 = 3.737(2)	43.25(2)	0.53(3)	0.454(9)	5.5
f_3 = 3.673(2)	42.51(2)	0.39(4)	0.82(1)	4.0
f_4 = 0.318(2)	3.68(2)	0.43(4)	0.55(2)	4.5

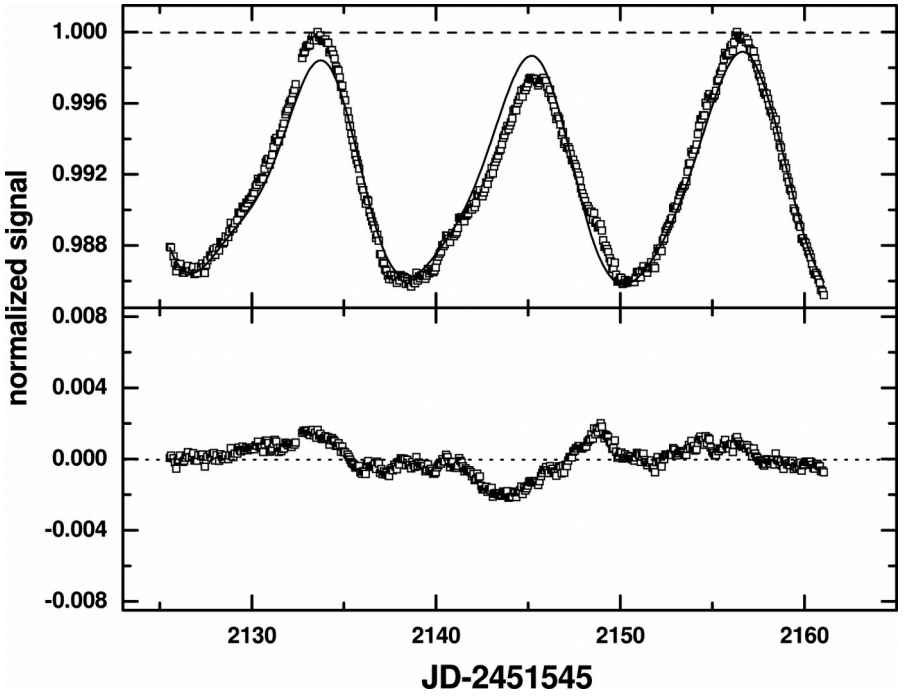
A MOST-fotometria eredményeiből

- 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.





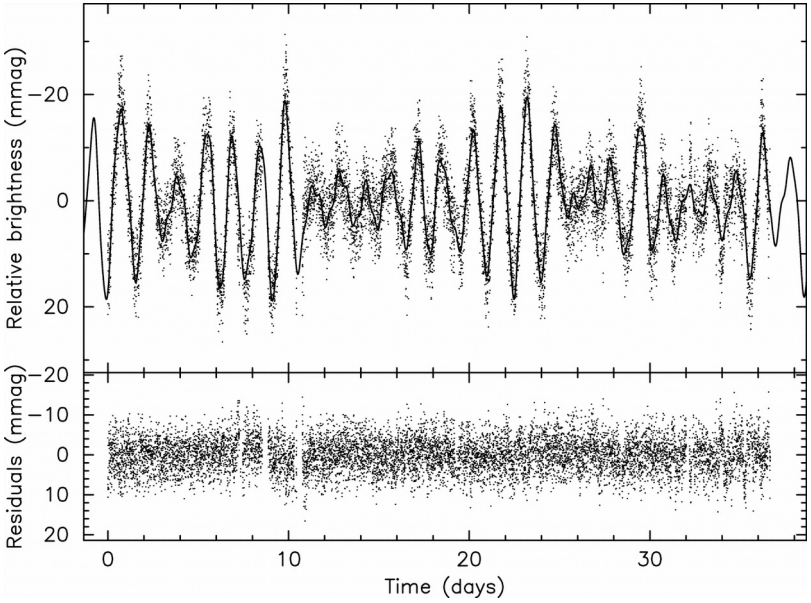
A MOST-fotometria eredményeiből

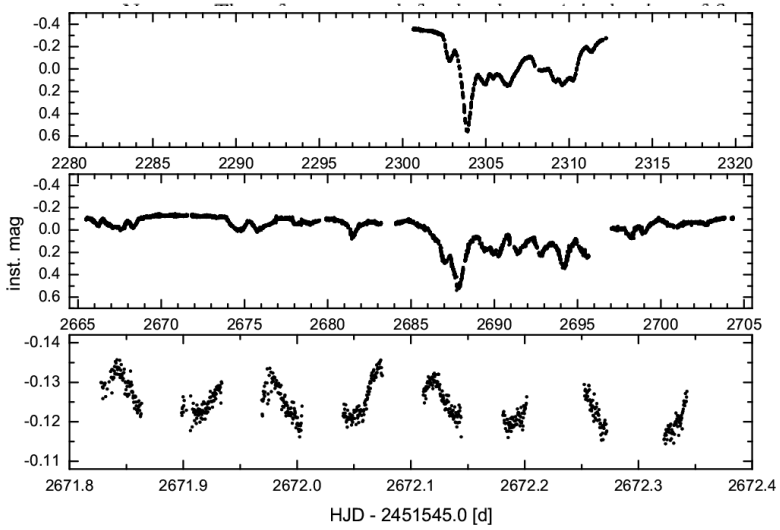
Fősorozat előtti csillag pulzációja:

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

Rengeteg SPB-csillagot fedezett fel a vezető-csillagok között (vö. Hipparcos): g-módusú nemradiális pulzáció. Példa: HD163830: illesztés 21 frekvenciával (másik 2 ábra).

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



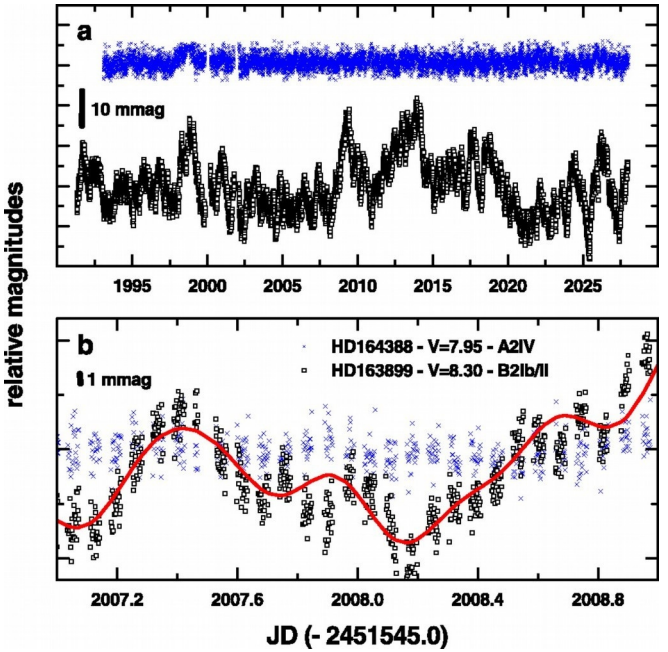


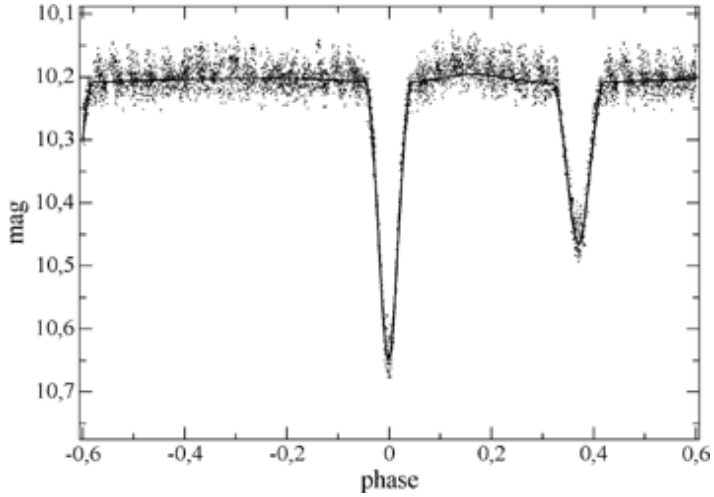
A MOST-fotometria eredményeiből

Meglepő felfedezés:
Új típusú pulzáció: HD 163899 (B2Ib/II), lassan pulzáló szuperóriás (SPBsg). (felső két ábra)

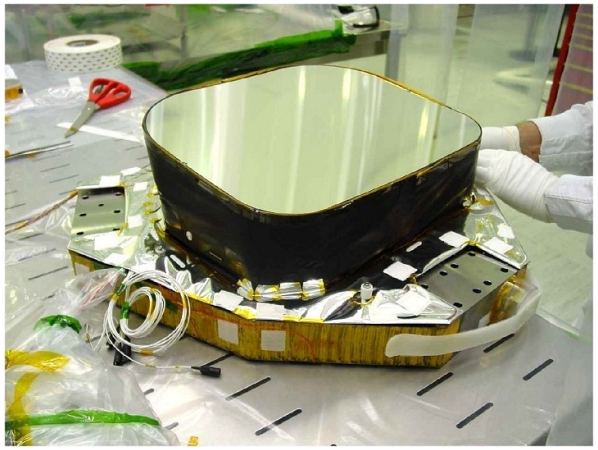
Véletlen felfedezés:
HD 313926 fedési változó (a WR 111-nél használták vezetőcsillagként). B3 + B7 komponensek 2,27038 napos periódussal; *e* = 0,20, ez a legexcentrikusabb pálya a forró kettősök között; még nem volt ideje cirkularizálódni (még a B típusú csillagok között is fiatalnak számít). (alsó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

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

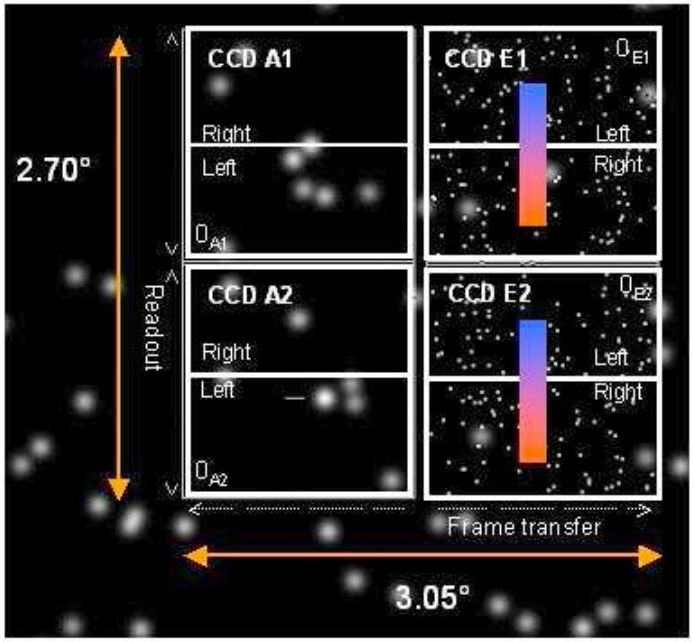




CoRoT



Convection, ***Ro***tation & Planetary ***T***ransit:
Franciaország (CNES) + 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; $3^{\circ}\times2{,}7^{\circ}$-os látómező, afokális távcső
$4\times2000\times4000$ pixeles CCD -40 $^{\circ}$C-ra hűtve.
Pontosság: 6 μmag (6^{m}), 0,1 mmag (15^{m}).
2 CCD-egység asztroszeizmológiára (erősen defókuszálva 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.



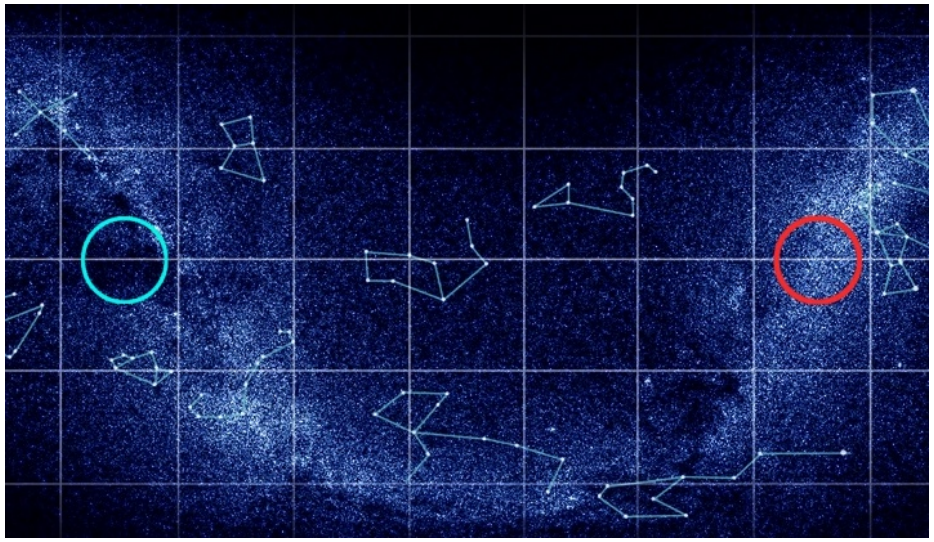
CoRoT

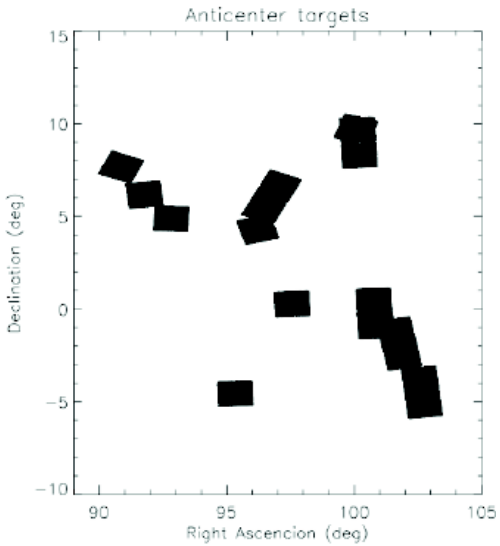
A szeizmo-mezőben 1 programcsillag + max. 9 további célpont, az exo-mezőben kb. 10000 kiválasztott csillag: törpék 11^m–16^m között (a fényesebbek szaturálódnak, az óriásoknál pedig kicsi a bolygótranzit hatása).

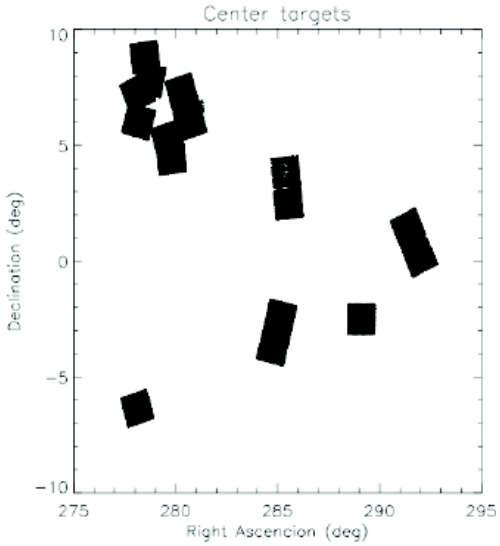
Fotometriai pontosság: 10^{-5} magnitúdó.

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.



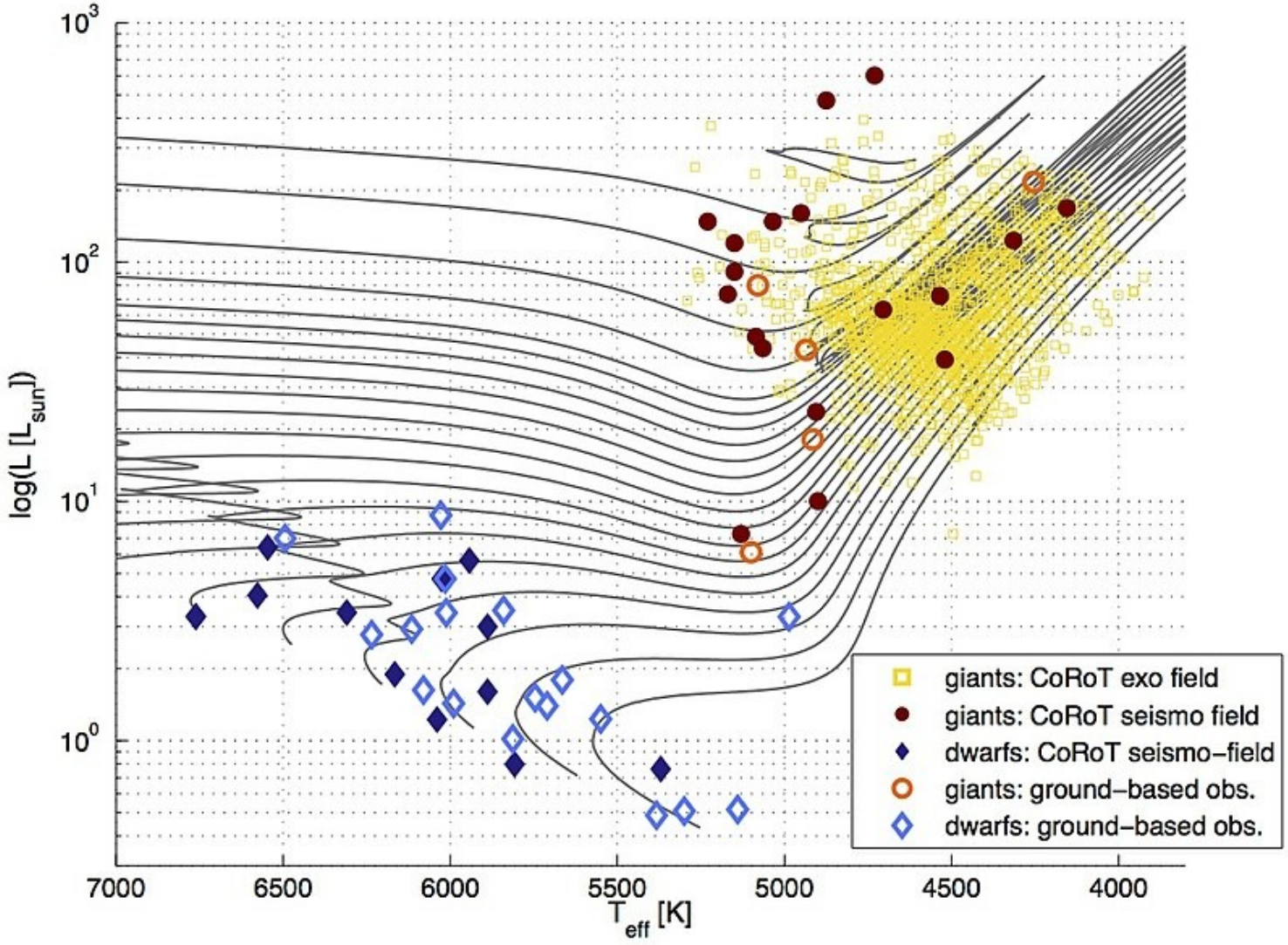




A CoRoT megfigyelési programja

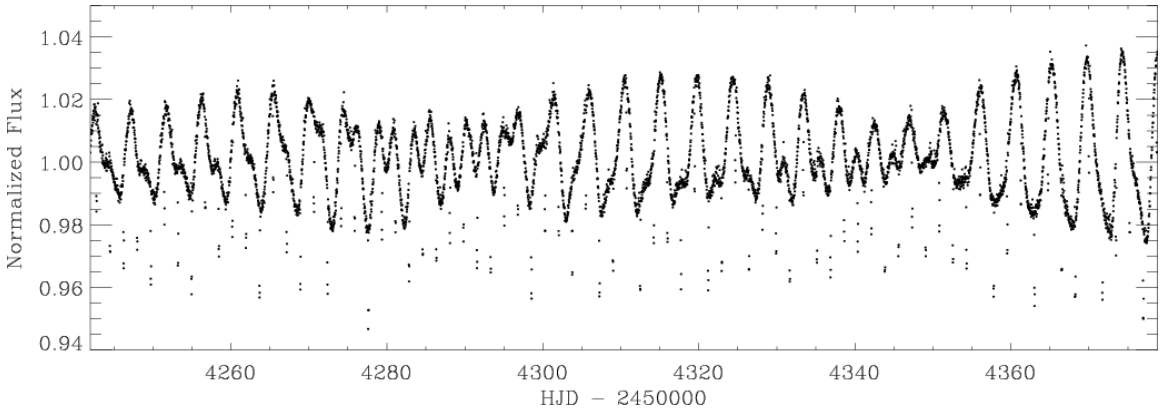
- **SRc01**, from 3 April 2007 to 9 May 2007 – 6,975 stars observed;
- **LRc01**, from 9 May 2007 to 15 October 2007 – 11,408 stars observed;
- **LRa01**, from 15 October 2007 to 3 March 2008 – 11,408 stars observed;
- **SRa01**, from 3 March 2008 to 31 March 2008 – 8,150 stars observed;
- **LRc02**, from 31 March 2008 to 8 September 2008 – 11,408 stars observed;
- **SRc02**, from 8 September 2008 to 6 October 2008 – 11,408 stars observed;
- **SRa02**, from 6 October 2008 to 12 November 2008 – 10,265 stars observed;
- **LRa02**, from 12 November 2008 to 30 March 2009 – 11,408 stars observed;
- **LRc03**, from 30 March 2009 to 2 July 2009 – 5,661 stars observed;
- **LRc04**, from 2 July 2009 to 30 September 2009 – 5,716 stars observed;
- **LRa03**, from 30 September 2009 to 1 March 2010 – 5,289 stars observed;
- **SRa03**, from 1 March 2010 to 2 April 2010;
- **LRc05**, from 2 April 2010 to 5 July 2010;
- **LRc06**, from 5 July 2010 to 27 September 2010;
- **LRa04**, from 27 September 2010 to 16 December 2010;
- **LRa05**, from 16 December 2010 to 5 April 2011;
- **LRc07**, from 5 April 2011 to 30 June 2011;
- **SRc03**, from 1 July 2011 to 5 July 2011 – a run made to reobserve the transit of CoRoT-9b;
- **LRc08**, from 6 July 2011 to 30 September 2011;
- **SRa04**, from 30 September 2011 to 28 November 2011;
- **SRa05**, from 29 November 2011 to 9 January 2012;
- **LRa06**, from 10 January 2012 to 29 March 2012 – a run dedicated to reobservation of CoRoT-7b;
- **LRc09**, from 10 April 2012 to 5 July 2012;
- **LRc10**, from 6 July 2012 to 1 November 2012 - interrupted by the fatal failure which ended the mission.

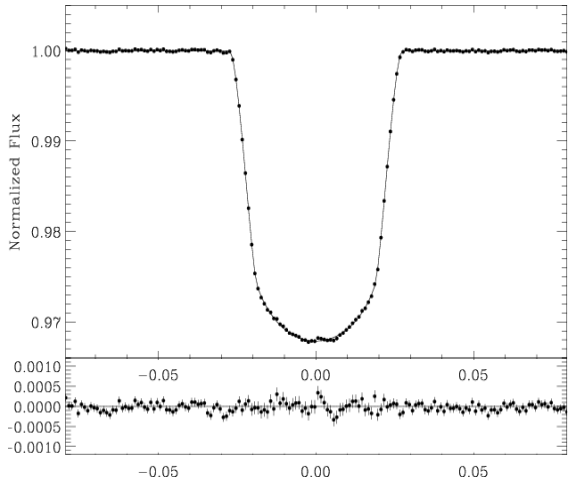
CoRoT-célpontok a HR-diagramon

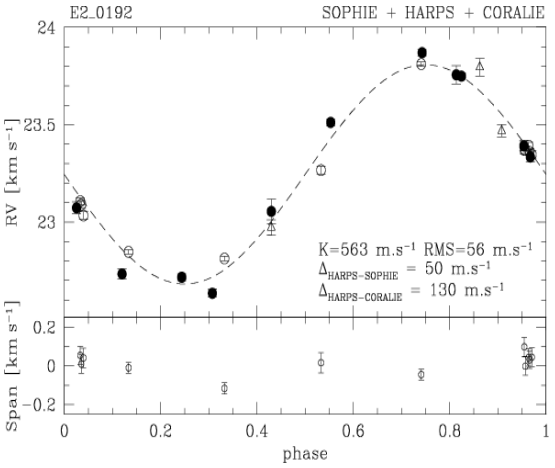


A CoRoT eredményeiből

31 exobolygót fedeztek fel, és további 600 tranzitot vizsgálnak.
A bejelentés előtt az exobolygót alapos vizsgálat alá vetik földi műszerekkel (radiális sebességet is mérnek).
Példa: CoRoT–2.

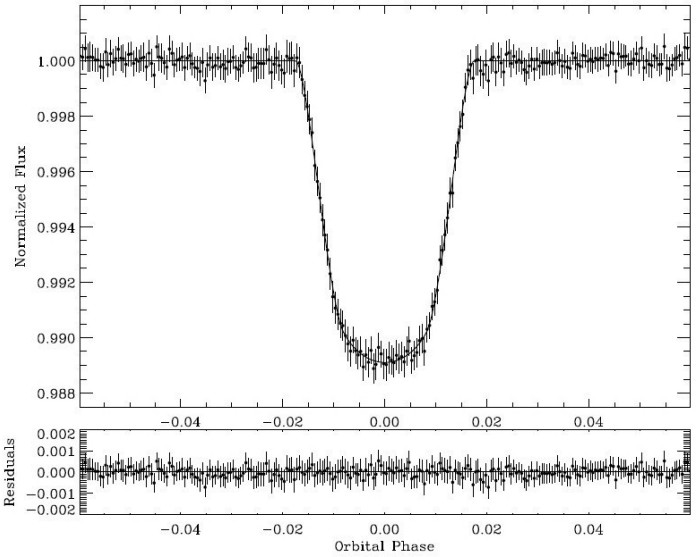


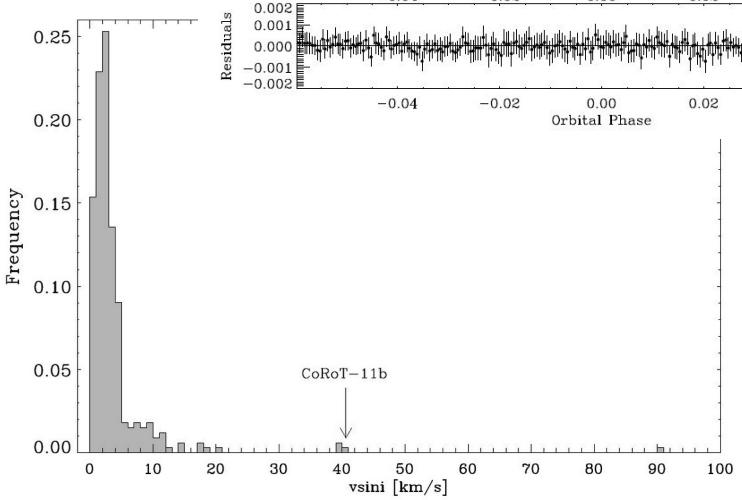




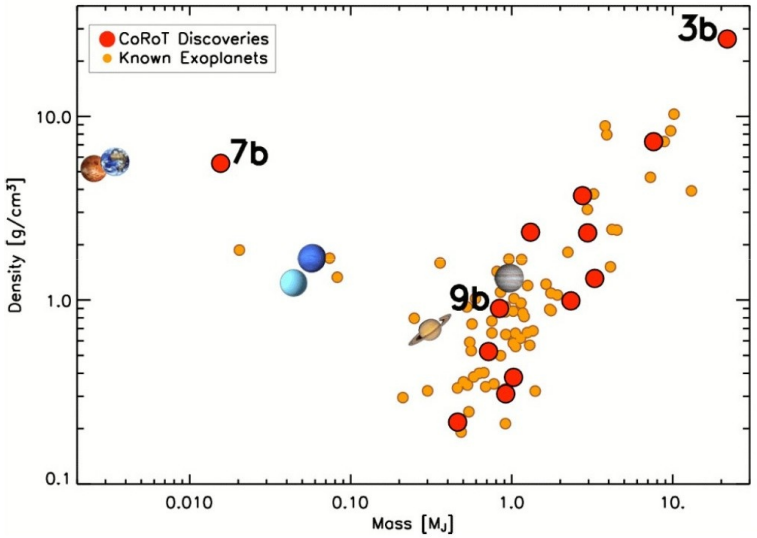
Star CorotID	0101206560	
RA (J2000)	$19^h27^m06.5^s$	
Dec (J2000)	1°23′01.5″	
V_{mag}	12.57	
Obtained from the CoRoT photometry		
	Value	Error
P [d]	1.7429964	0.0000017
T_c [BJD]	2 454 237.53562	0.00014
Fitted		
θ_1	0.02715	0.00008
$k = R_p/R_s$	0.1667	0.0006
i [deg]	87.84	0.10
u_+	0.471	0.019
u_-	0.34	0.04
Deduced		
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
Photometry, spectroscopy and radial velocity combined		
V_0 [km s^{-1}]	23.245	0.010
K [km s^{-1}]	0.563	0.014
e	0	(fixed)
M_s [$M_\odot$]	0.97	0.06
R_s [$R_\odot$]	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





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

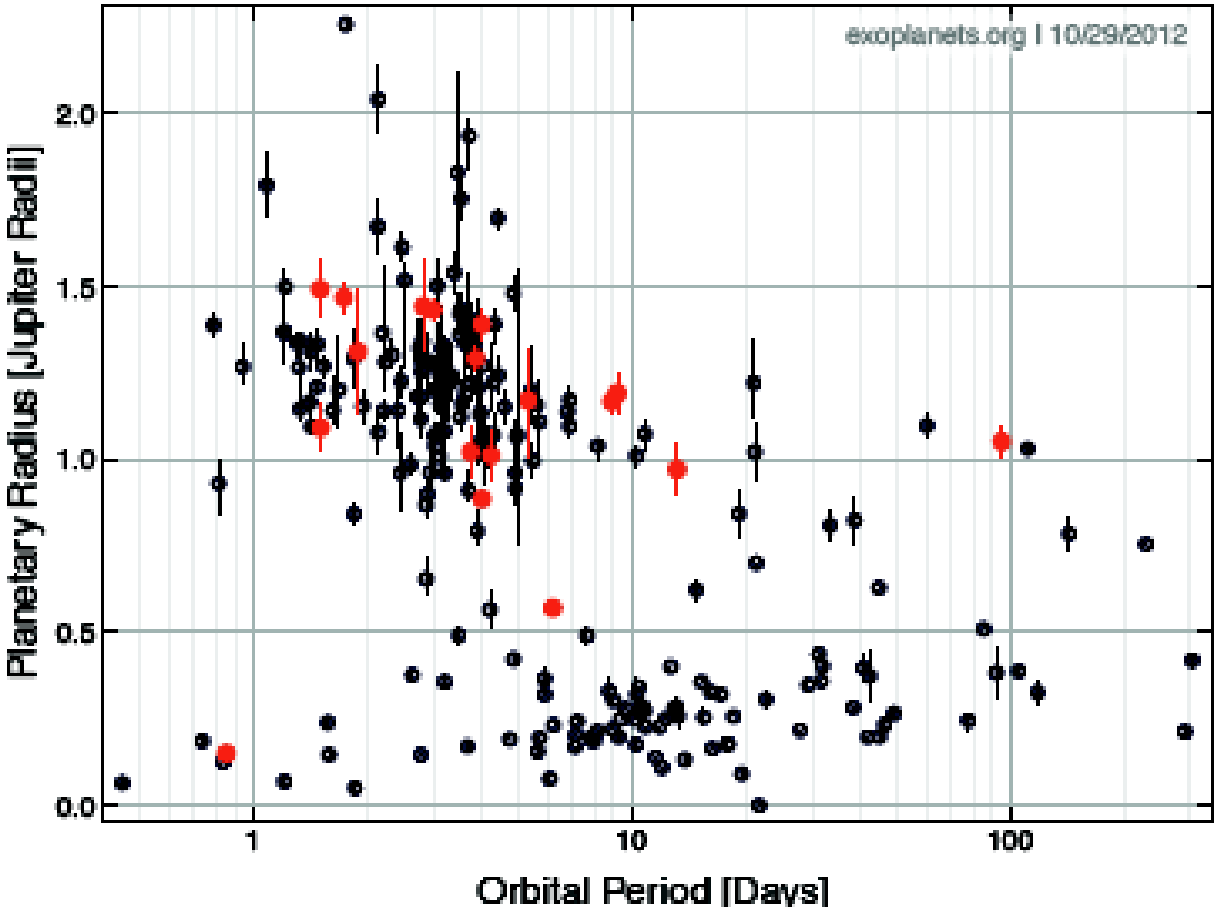


Density versus mass of known transiting planets.

Másik példa: CoRoT–11b (két ábra balra).
A CoRoT–7 volt az első ismert fedési kőzetbolygó (jobbra fent).

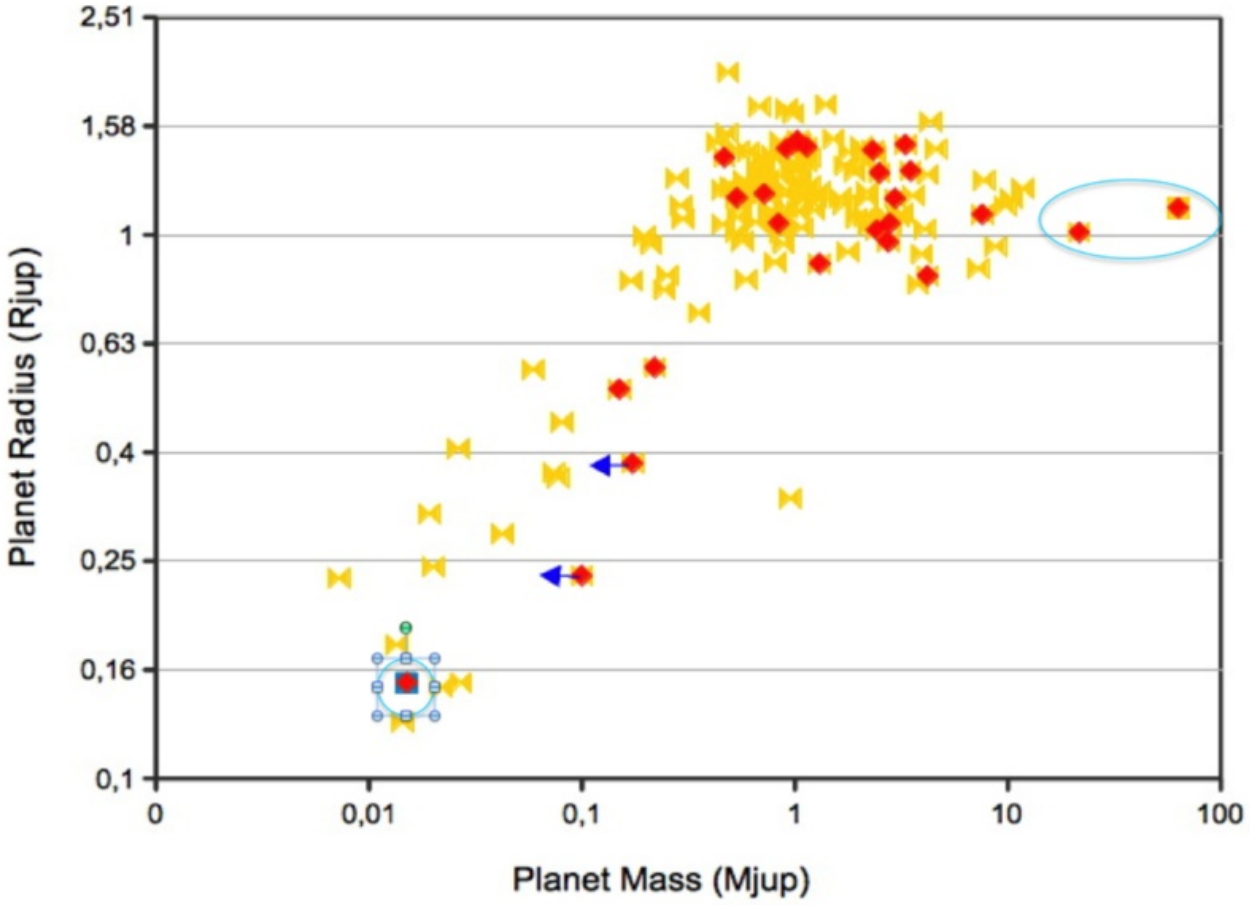
A CoRoT eredményeiből

A keringési periódus és a bolygósugár közötti összefüggés (pirossal a CoRoT által felfedezett exobolygók).



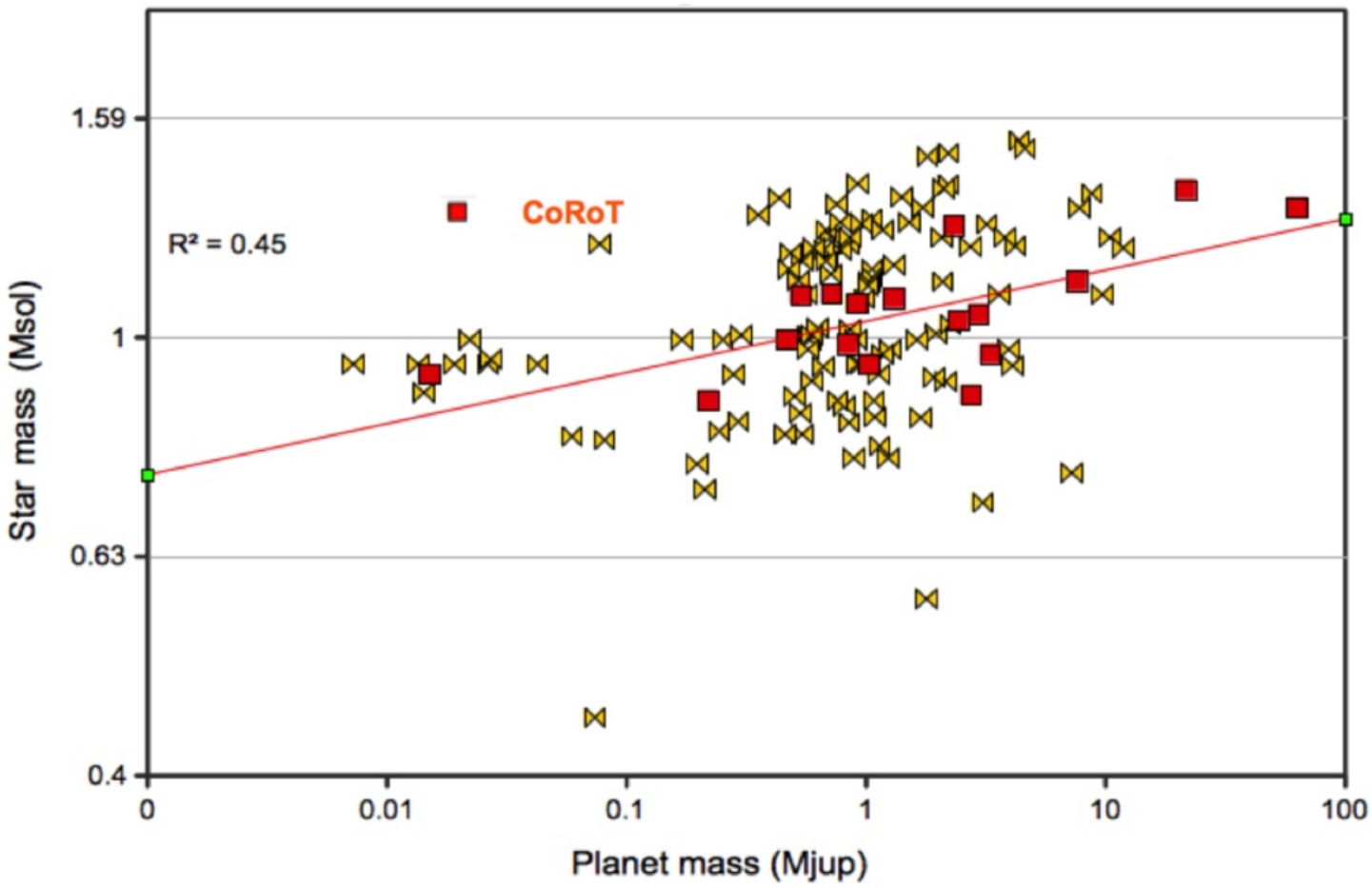
A CoRoT eredményeiből

Összefüggés az exobolygók sugara és tömege között (pirossal a CoRoT által felfedezett exobolygók).



A CoRoT eredményeiből

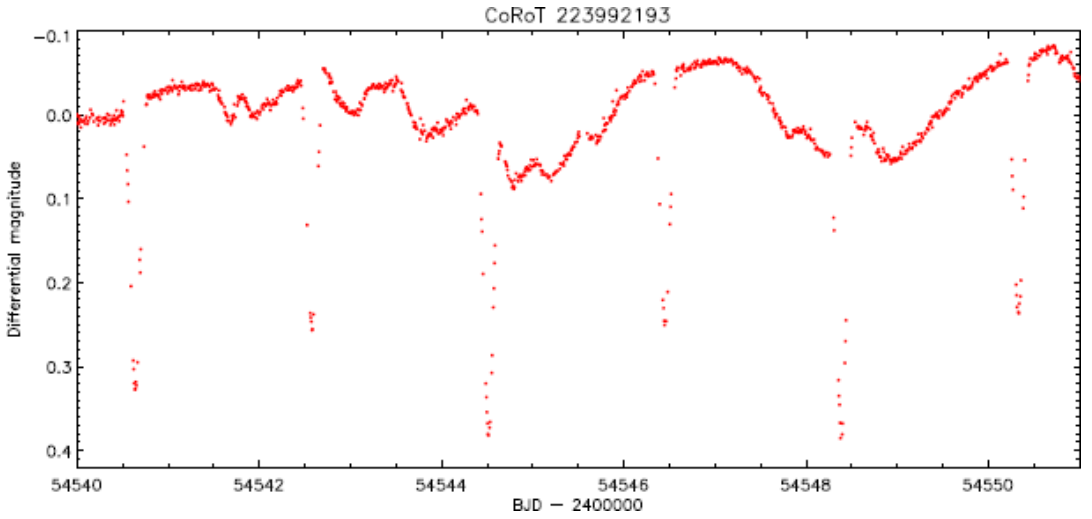
Összefüggés az exobolygók és gazdacsillaguk tömege között (pirossal a CoRoT által felfedezett exobolygók).

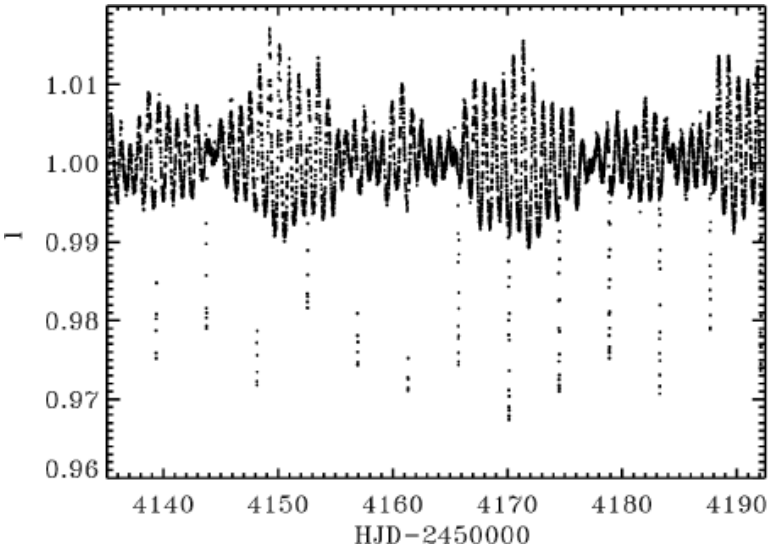


A CoRoT eredményeiből

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)

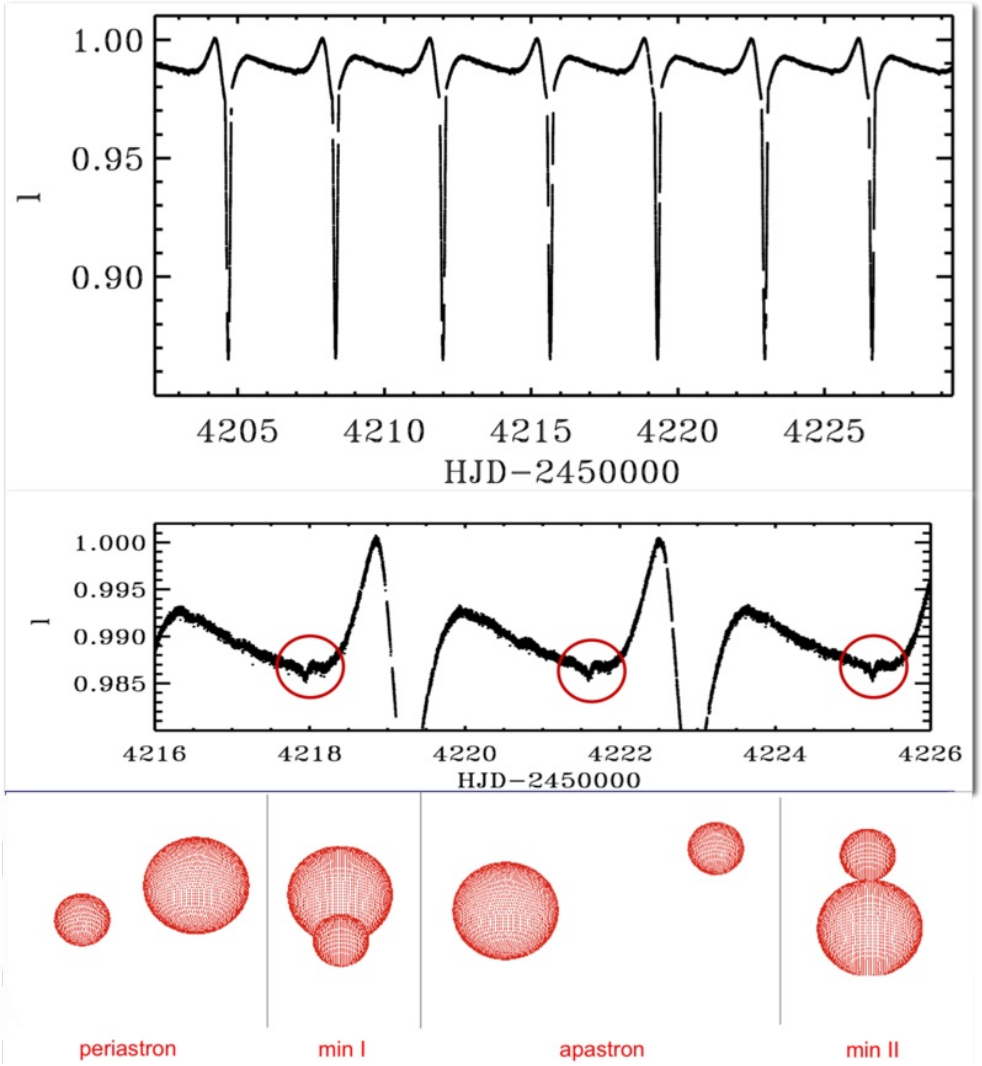




A CoRoT eredményeiből

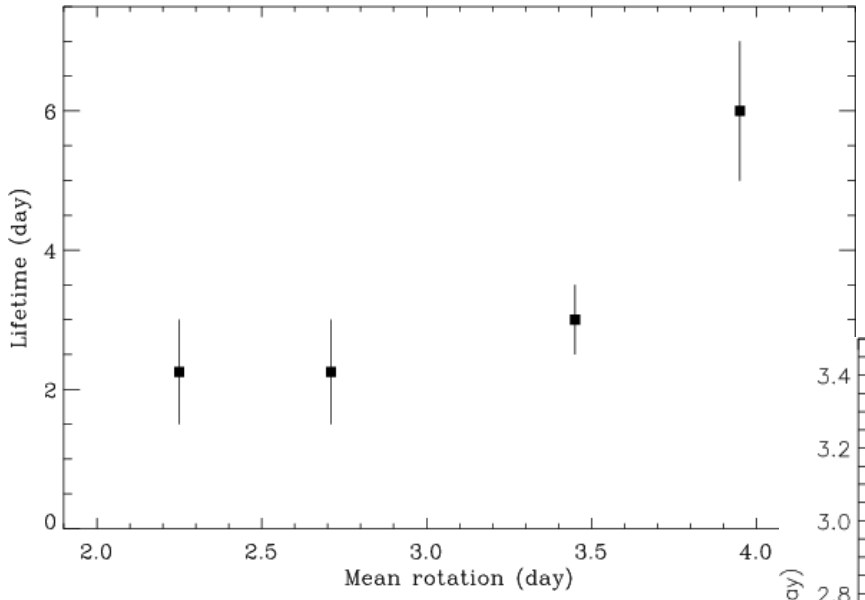
3000 fedési kettős rendszer van a CoRoT által észlelt 163000 fénygörbe között.

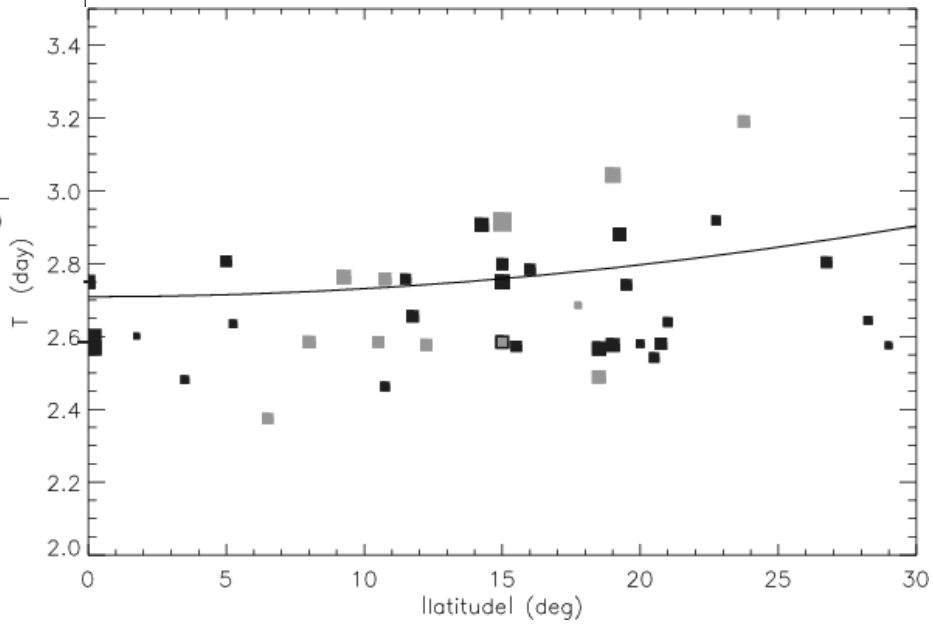
Az itt bemutatott példa a HD 174884 fénygörbéje és a kettős rendszer geometriája látszik



A CoRoT eredményeiből

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





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

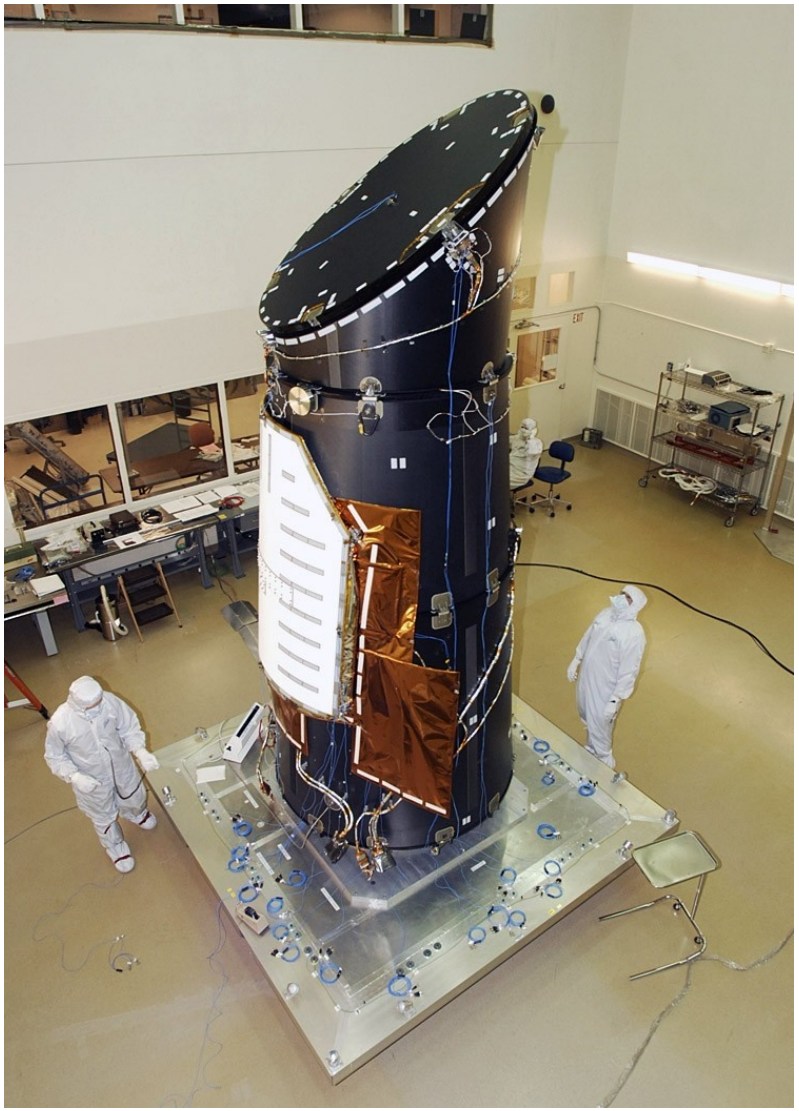
2001-ben hagyták jóvá, hosszú előtörténet után.

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.

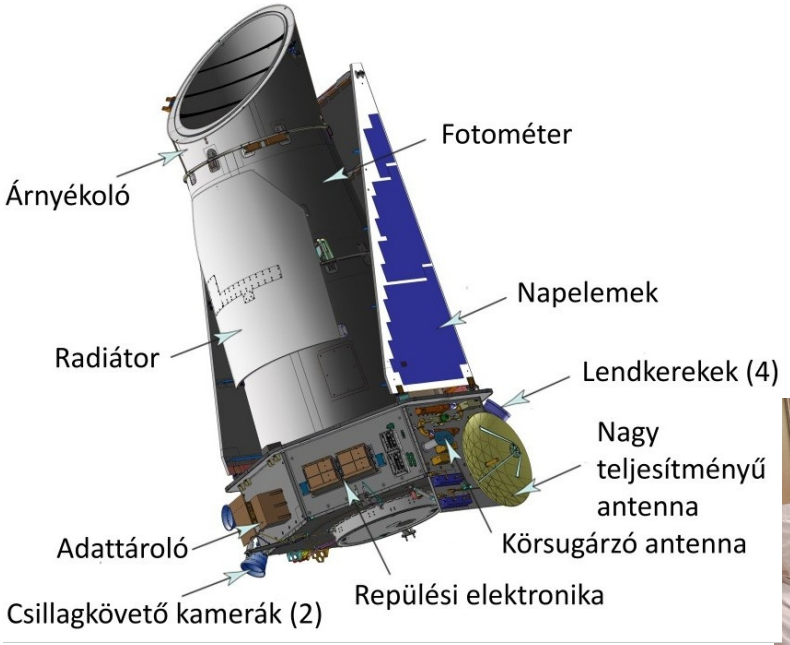
Kiváló összefoglaló cikk:
Plachy – Molnár: Ég veled, Kepler!
Meteor Csillagászati Évkönyv 2020

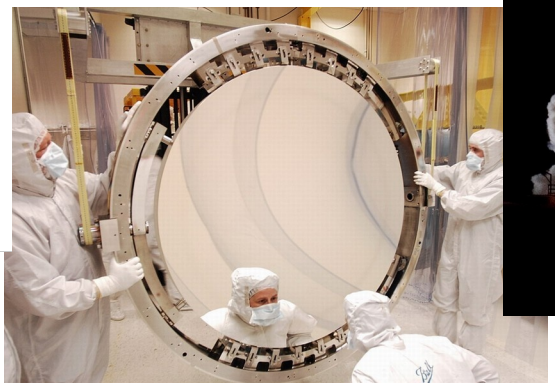


Kepler

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).

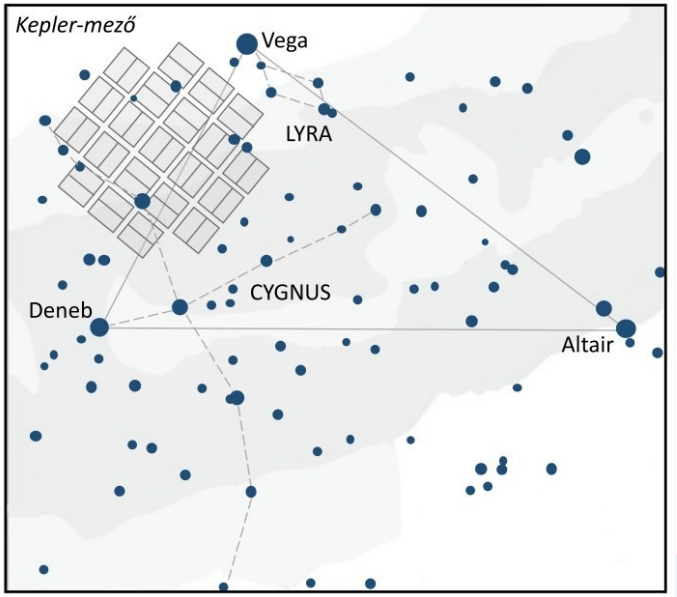


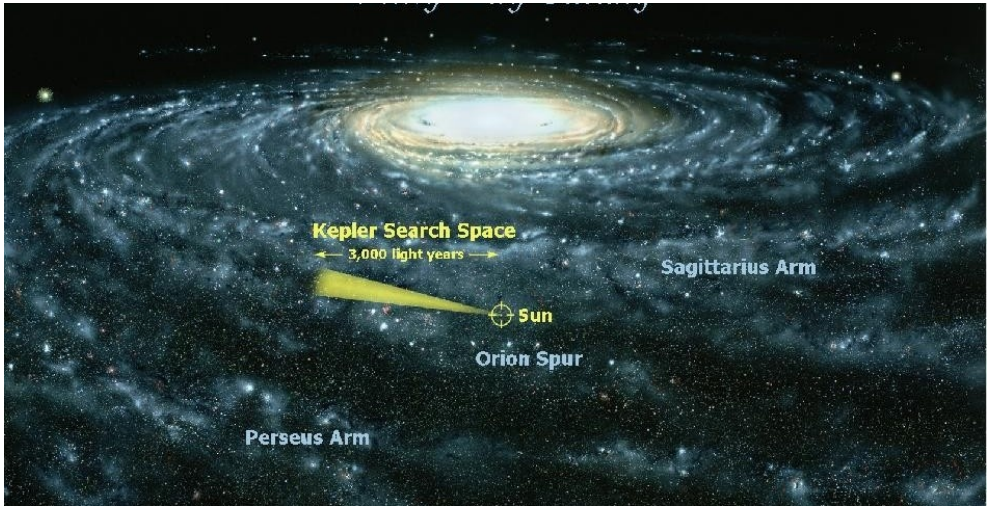


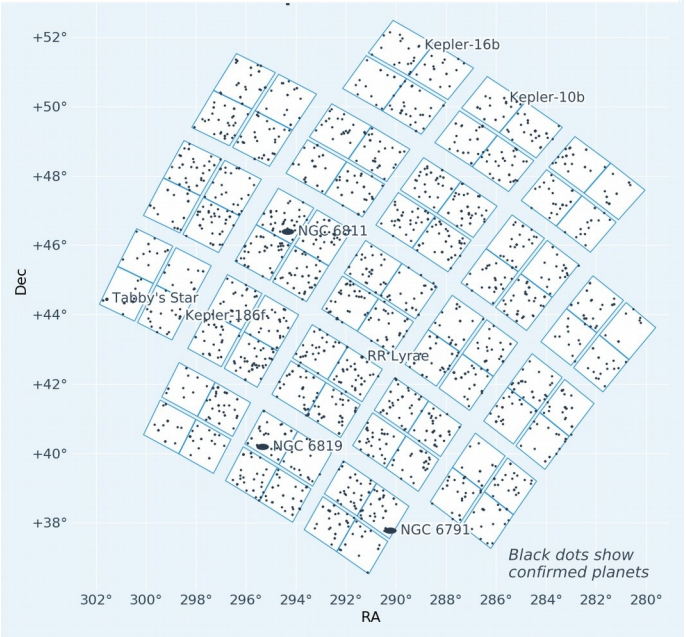
Kepler

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.

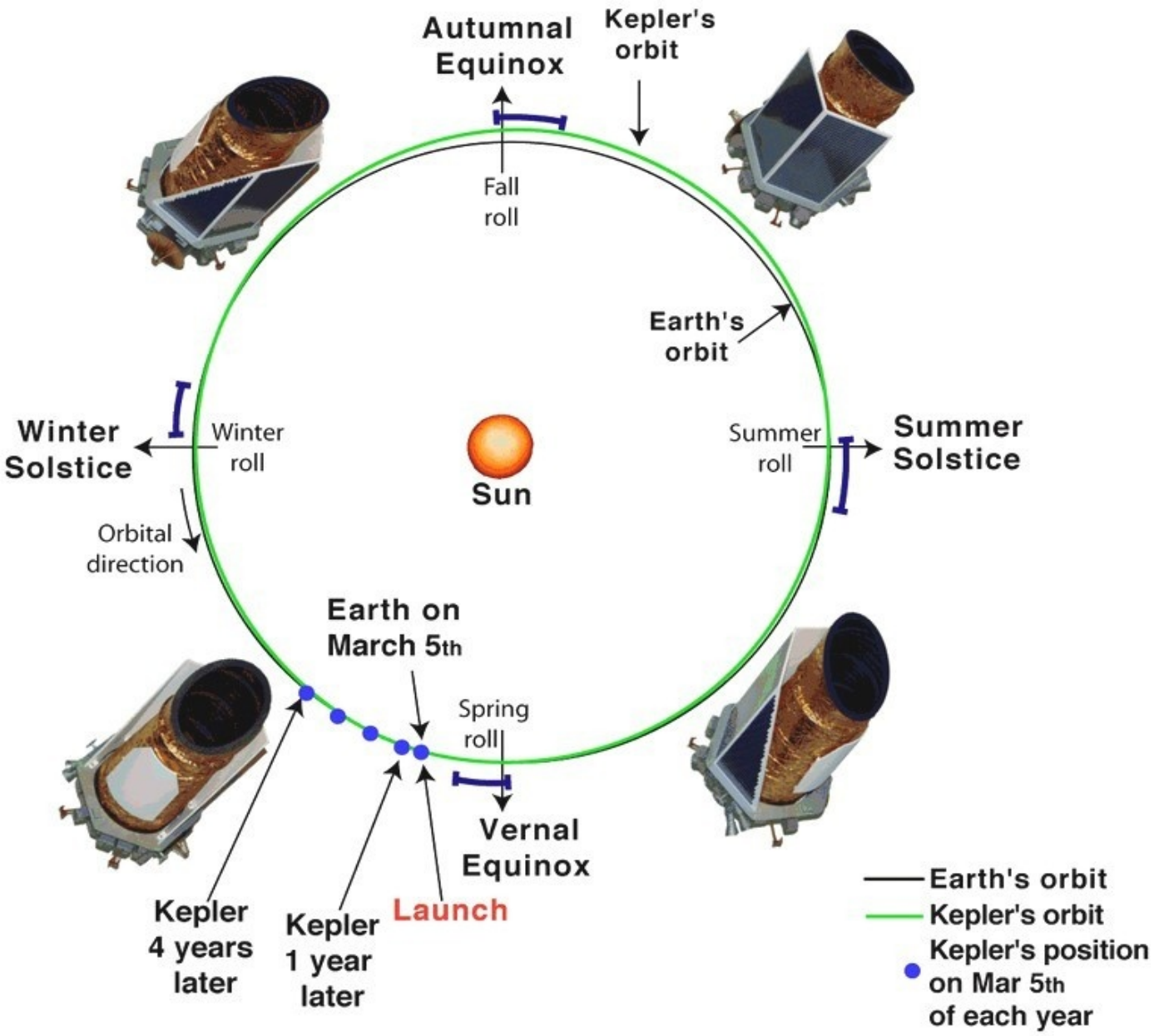
Asztroszeizmológiai céllal is választottak programcsillagokat. Ebben is közreműködött a KASC (Kepler Astroseismic Science Consortium – hoppá, ez helytelen név: nem szeizmika, hanem szeizmológia!).

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

A telemetriai korlátok miatt csak a bélyegképek területén mért adatokat továbbították 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.


Autumnal Equinox
Kepler's orbit
Fall roll
Earth's orbit
Winter Solstice
Winter roll
Sun
Summer roll
Summer Solstice
Orbital direction
Earth on March 5th
Spring roll
Vernal Equinox
Kepler 4 years later
Kepler 1 year later
Launch
Earth's orbit
Kepler's orbit
Kepler's position on Mar 5th of each year

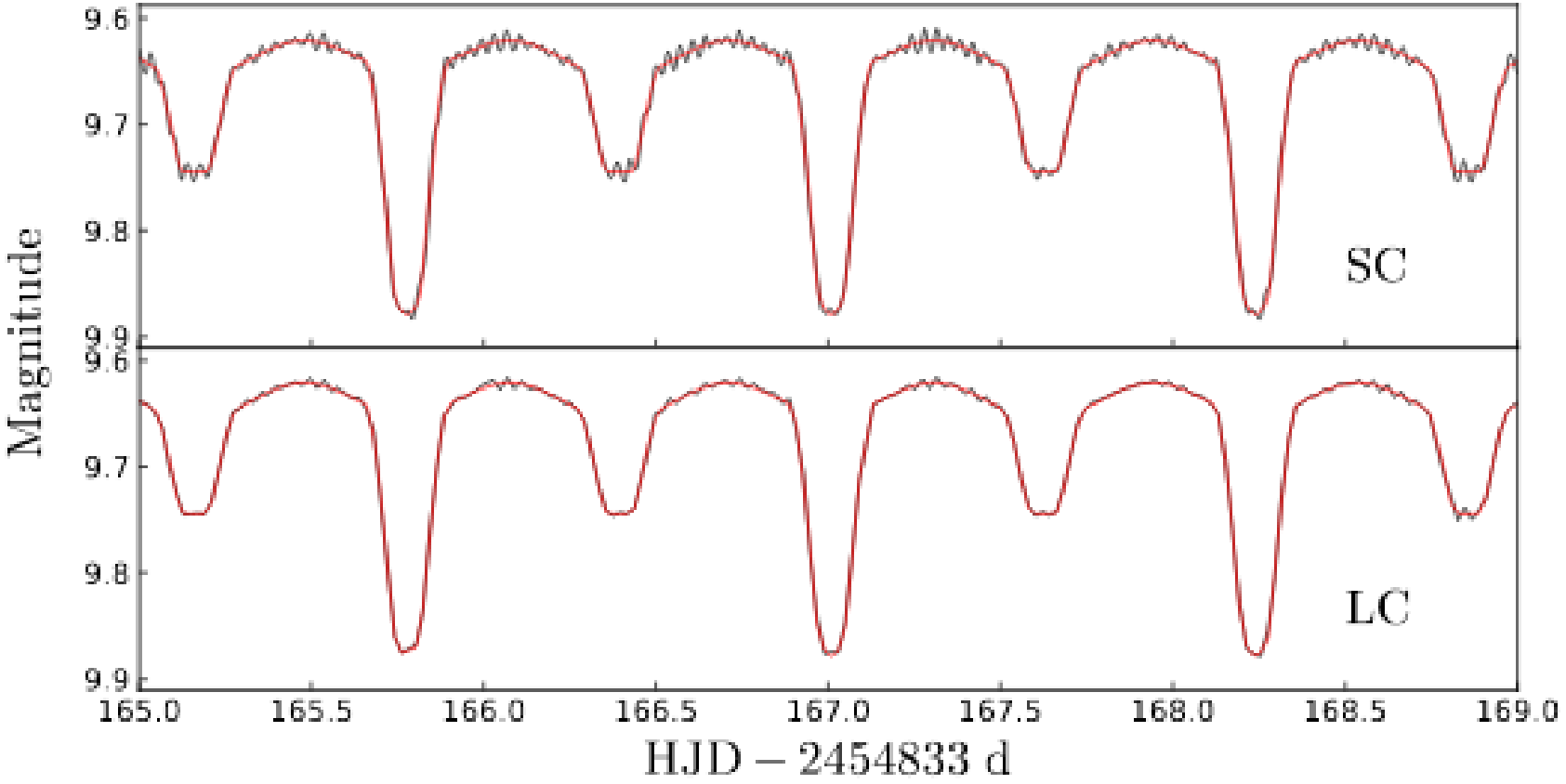
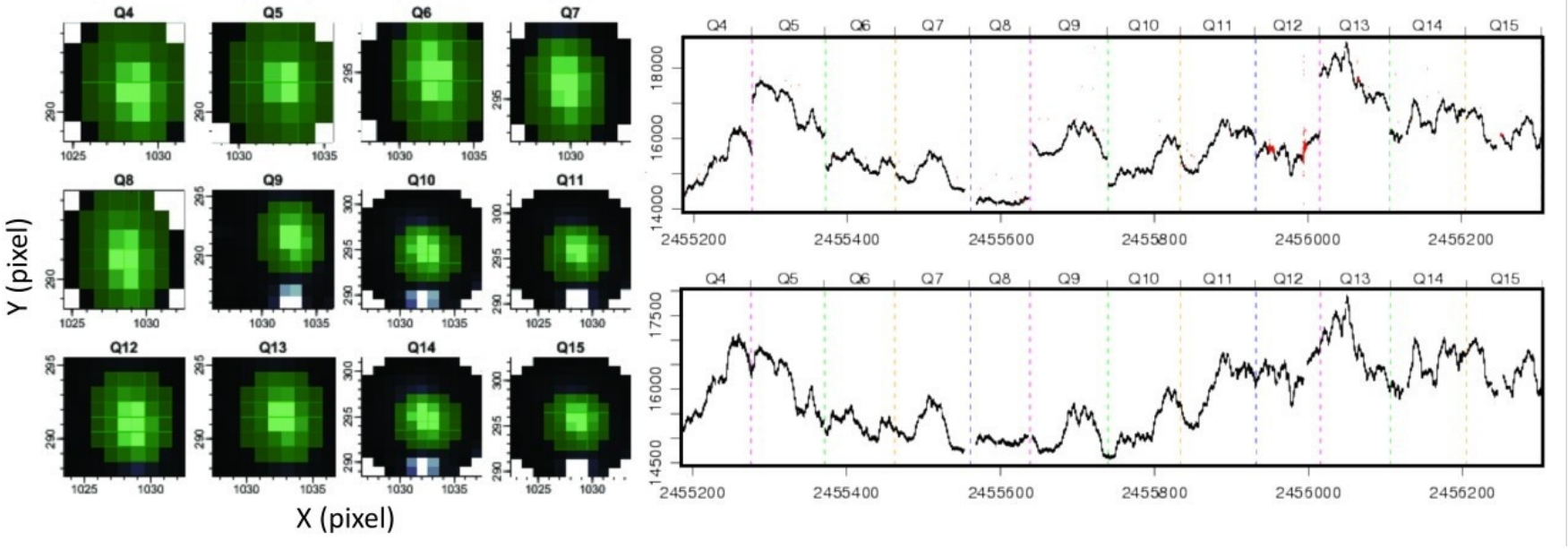


Fig. 1: The comparison between *Kepler* short cadence (top panel) and long cadence (bottom panel) light curve of KIC 10661783. In order to visualize both binary and pulsation variability only four days of observations are shown. The calculated `WD` model is marked with red lines.

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.

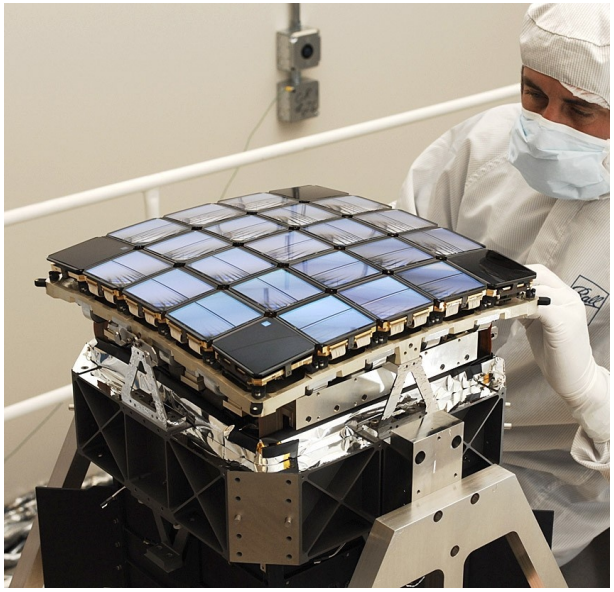
A negyedévi adatsorok összeillesztése nem triviális feladat. A fénygörbék diszkontinuitásait korrigálni kell.

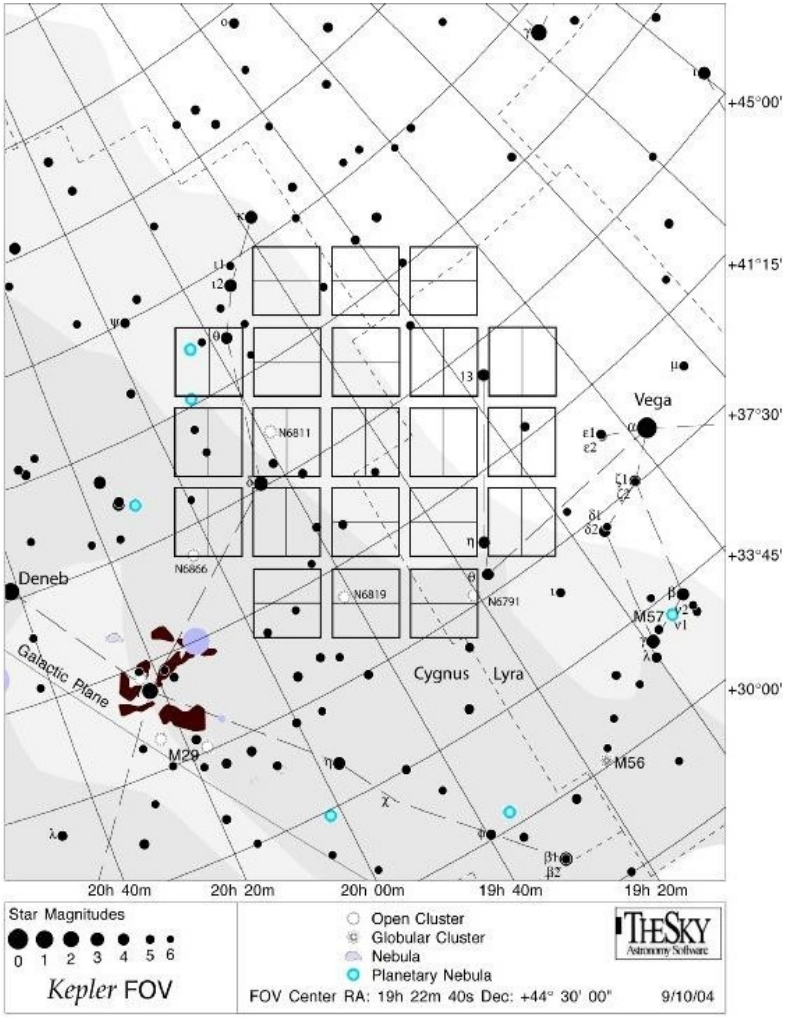
Kepler

42 db 50x25 mm-es CCD-csip, egyenként 2200x1024 pixellel. Összesen 94,6 megapixel (indításkor az addigi legnagyobb CCD-kamera volt az űrben, majd a Gaia lett a rekorder).

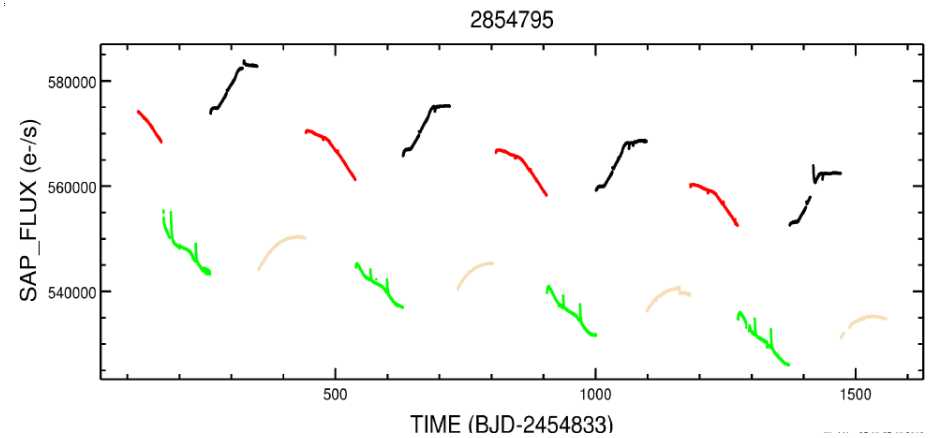
6,5 s után kiolvasás, majd fedélzeti összeadás az SC és LC időtartamára.

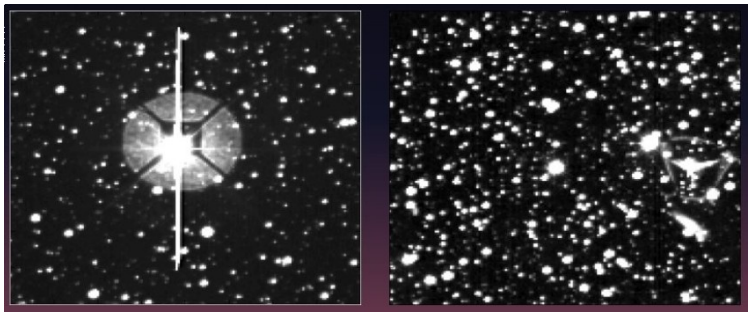
A misszió végén már 3 csip volt rossz.



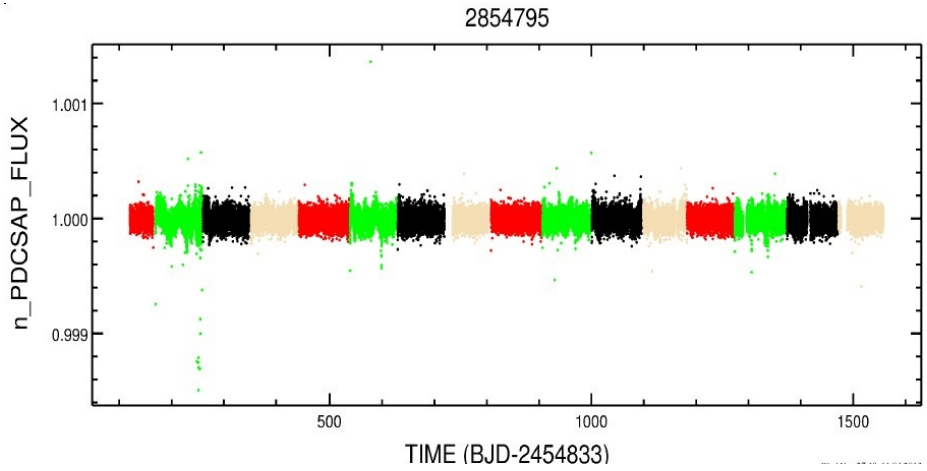


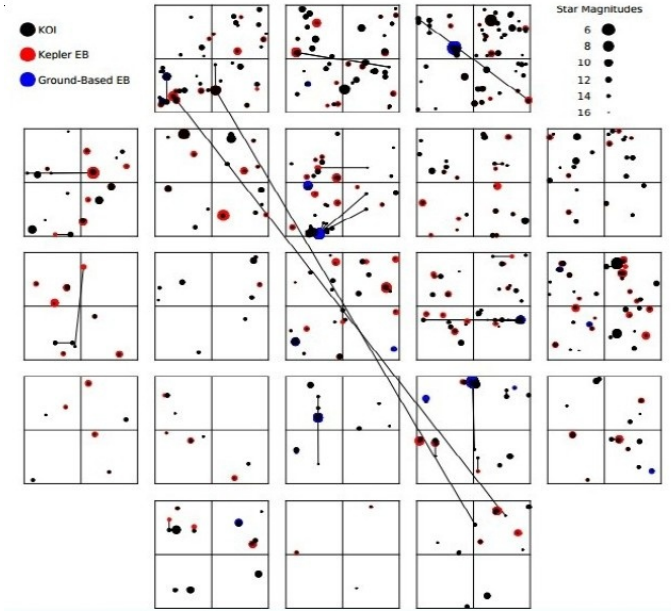
A fotometriai feldolgozás nehézségei





reflexió





a CCD-csipek eltérő érzékenysége

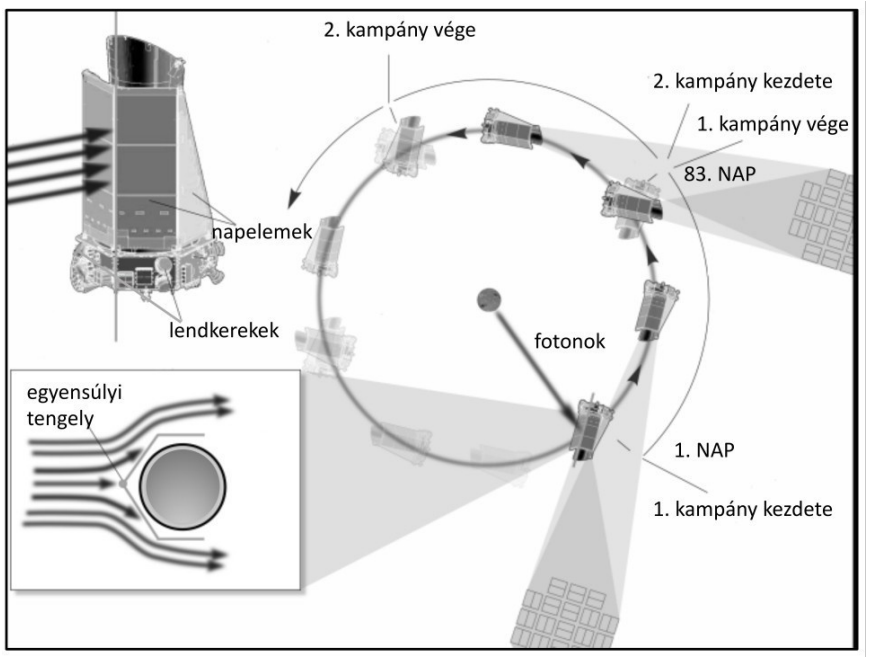
A Kepler átalakulása K2-vé

A Kepler sikere hatására 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.

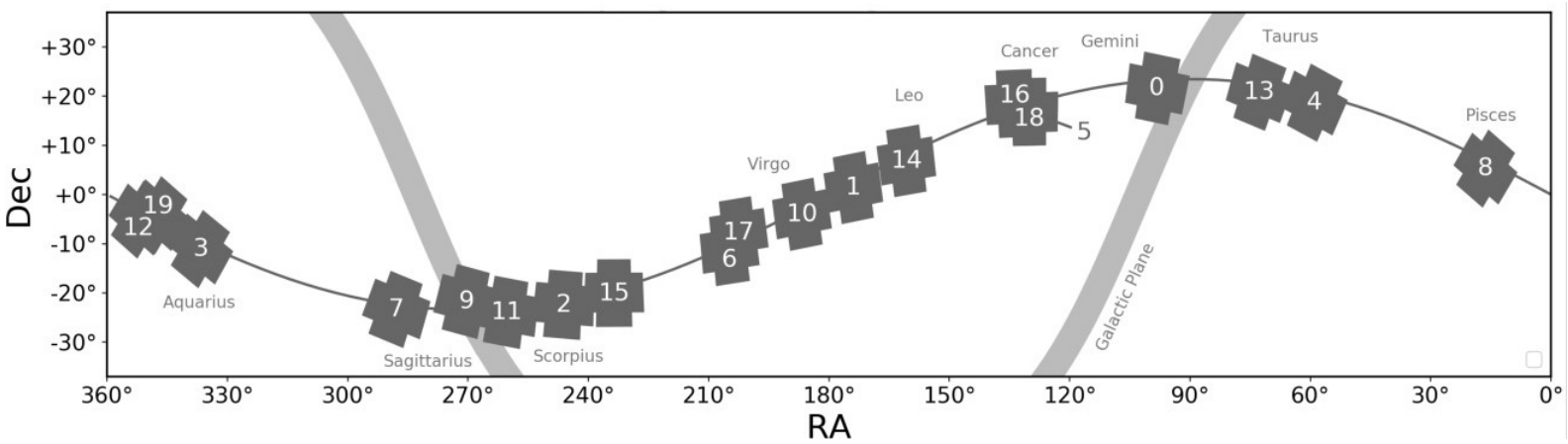
A harmadik irány stabilitását a napszél nyomása biztosítja, ha a távcső látóiránya az ekliptikába esik. A 75-80 napos megfigyelési sorozatok (kampányok) 2014. márciusban kezdődtek (a 0. kampány rövidebb volt). A küldetés a 19. kampány közepén ért véget (2018. szept.).

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

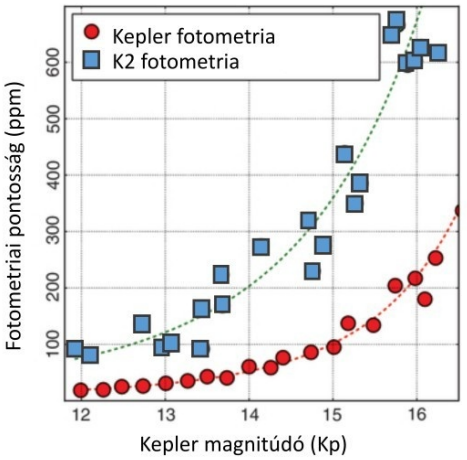


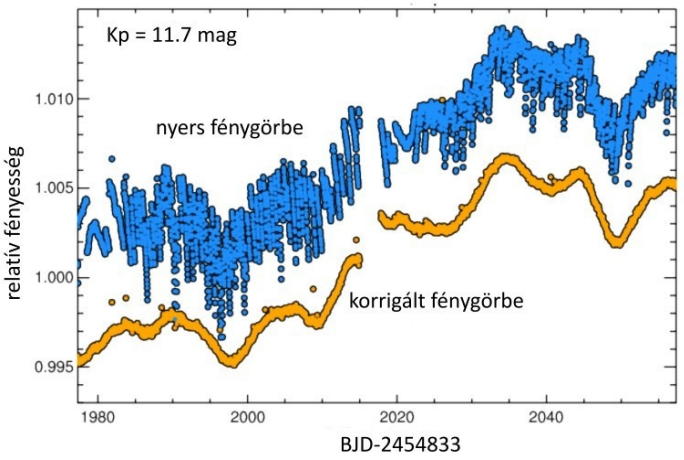
A Kepler átalakulása K2-vé

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



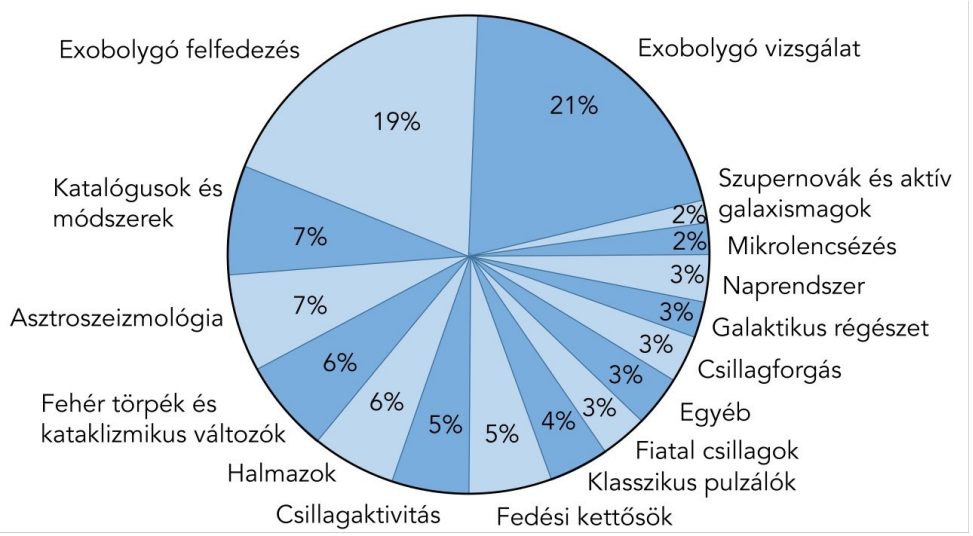
A forgatónyomaték miatt 6 óránként kiigazító manőverek, az 1-2 pixelnyi elmozdulás korrigálására

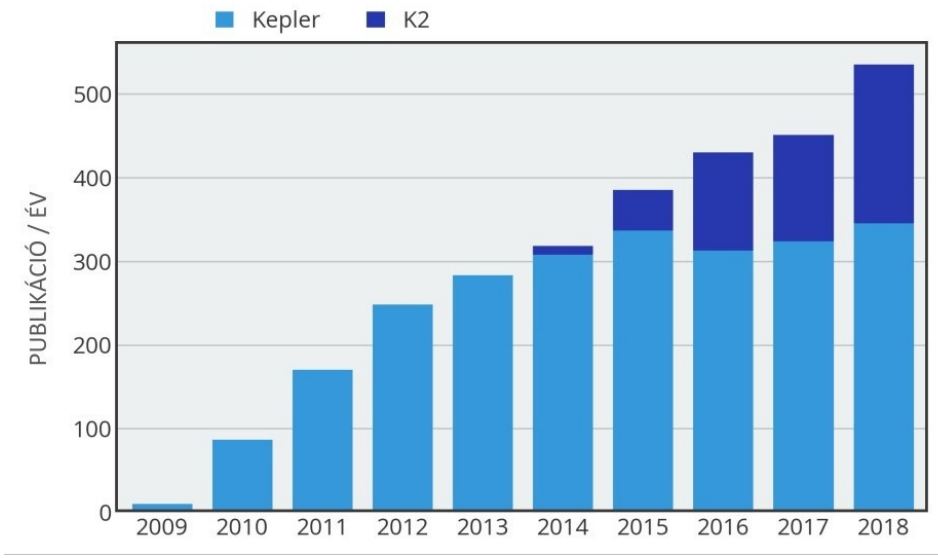




A Kepler + K2 átütő sikere

- 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 űrfotometriai projektekben is (TESS, CHEOPS stb.)





A Kepler exobolygókutatásairól

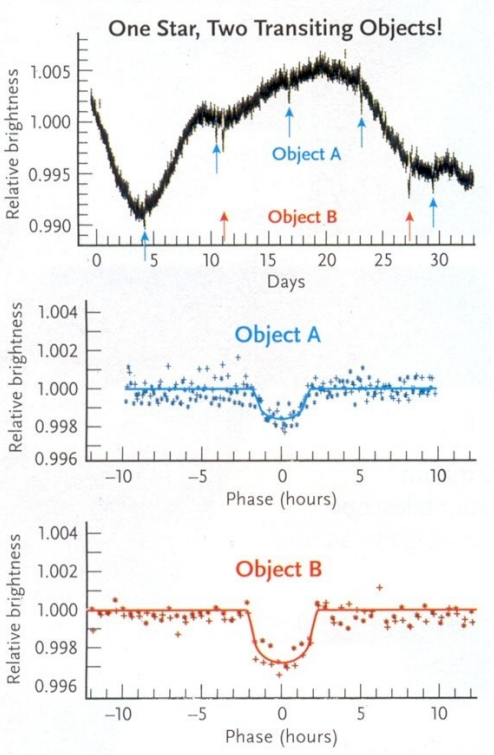
Egy bolygó biztos kimutatásához legalább 3 tranzit észlelése kell (bolygórendszereknél gravitációs perturbáció is bizonyíték lehet).

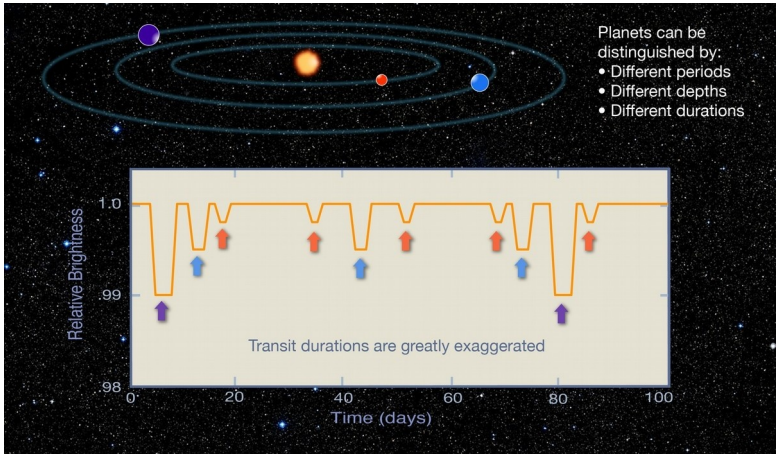
A Kepler-20 körül 5 bolygó: Kepler-20e: 6,1 nap, 760 °C, 0,87 Föld-átmérő; Kepler-20f: 19,6 nap, 430 °C, 1,03 Föld-átmérő; dinamikailag telített rendszer; kijjebb lehetnek bolygók (adatsor rövid).

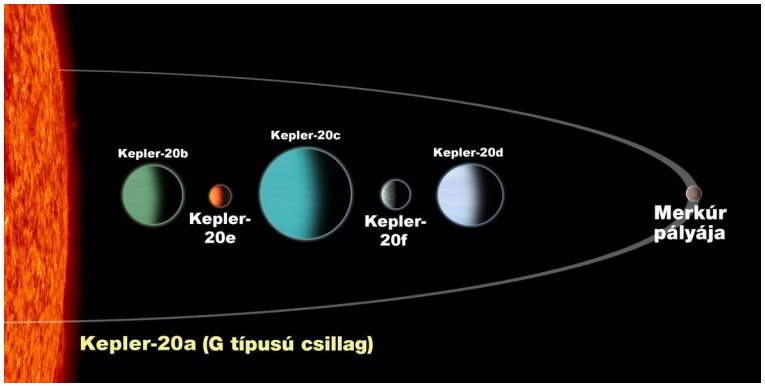
Kepler-37b: alig nagyobb a Holdnál (13 nap, 500 °C), két másik bolygója is van a csillagnak.

KOI-351: 7 bolygós rendszer.

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





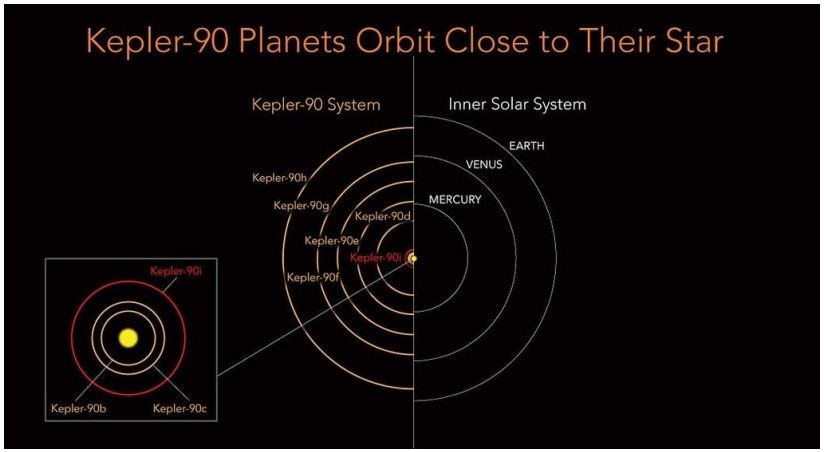


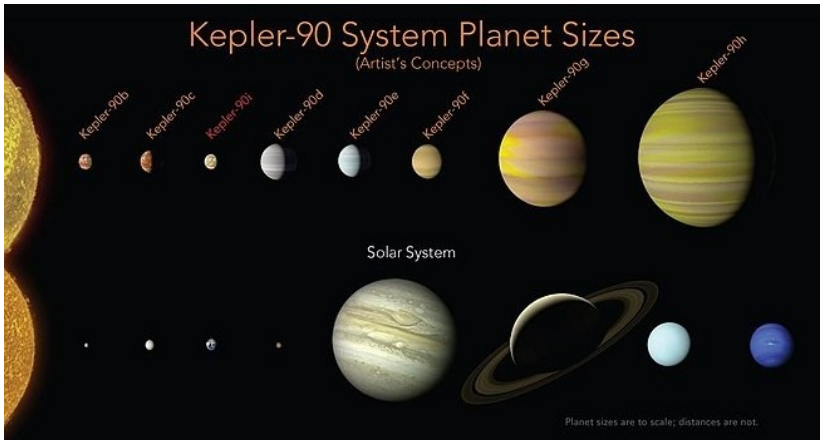
A Kepler exobolygókutatásairól

A Kepler-90 körül viszont 8 bolygó kering.

The Kepler-90 planetary system[12][13][4]

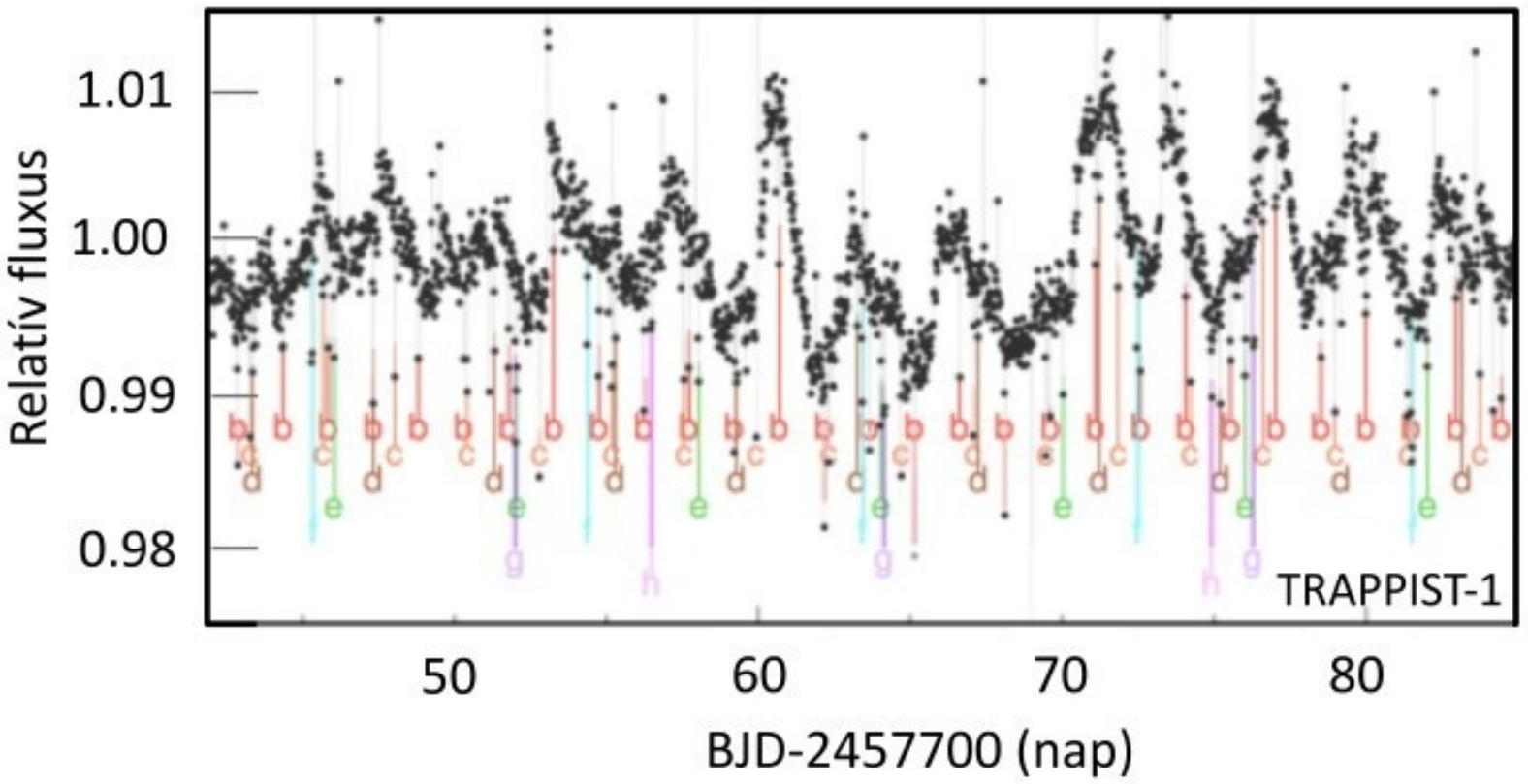
Companion (in order from star)	Mass	Semimajor axis (AU)	Orbital period (days)	Eccentricity	Inclination	Radius
b	—	0.074 ± 0.016	7.008151	—	89.4°	1.31 $R_\oplus$
c	—	0.089 ± 0.012	8.719375	—	89.68°	1.18 $R_\oplus$
i	—	0.107 ± 0.03	14.44912	—	89.2°	1.32 $R_\oplus$
d	—	0.32 ± 0.05	59.73667	—	89.71°	2.88 $R_\oplus$
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.

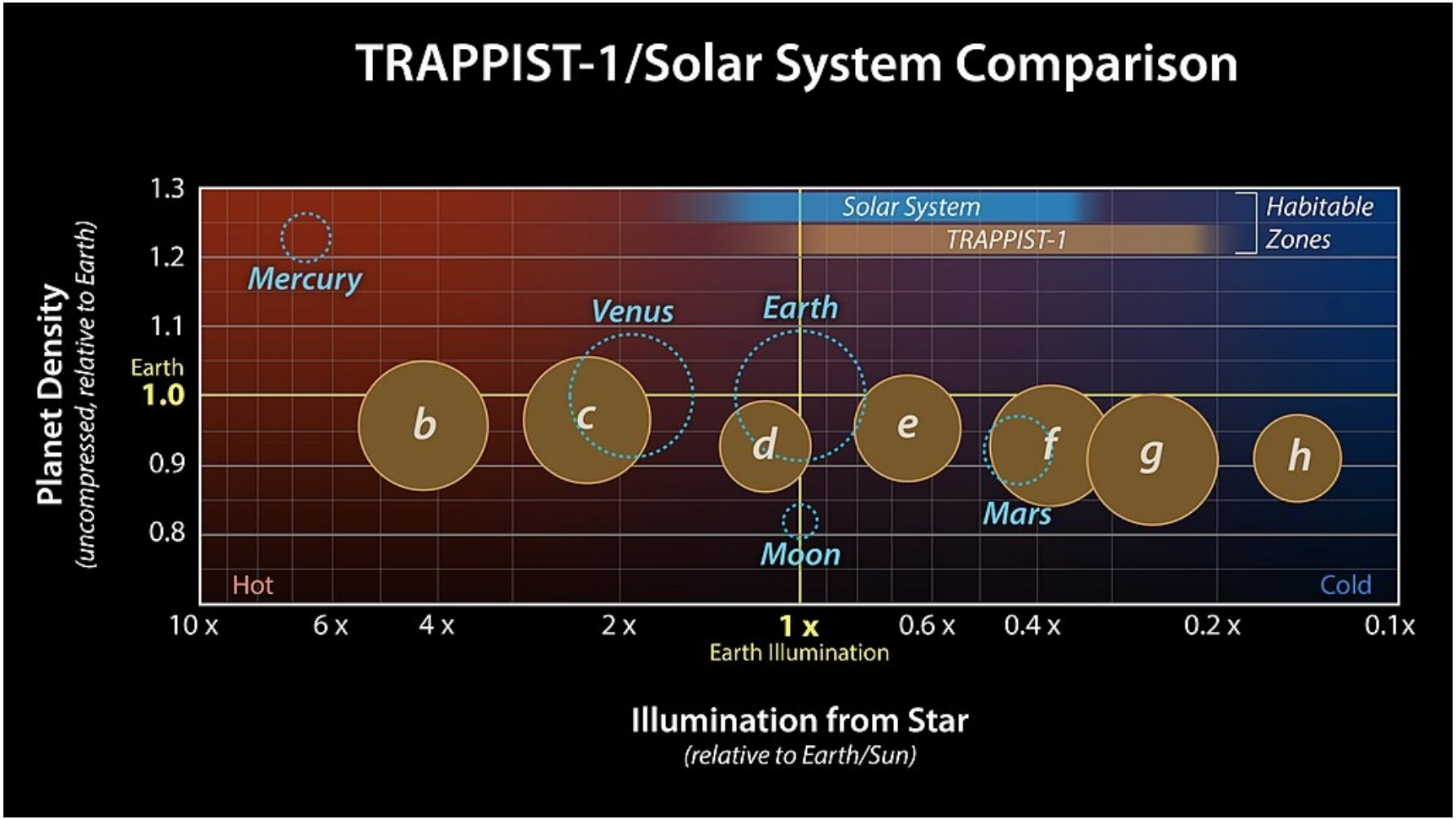


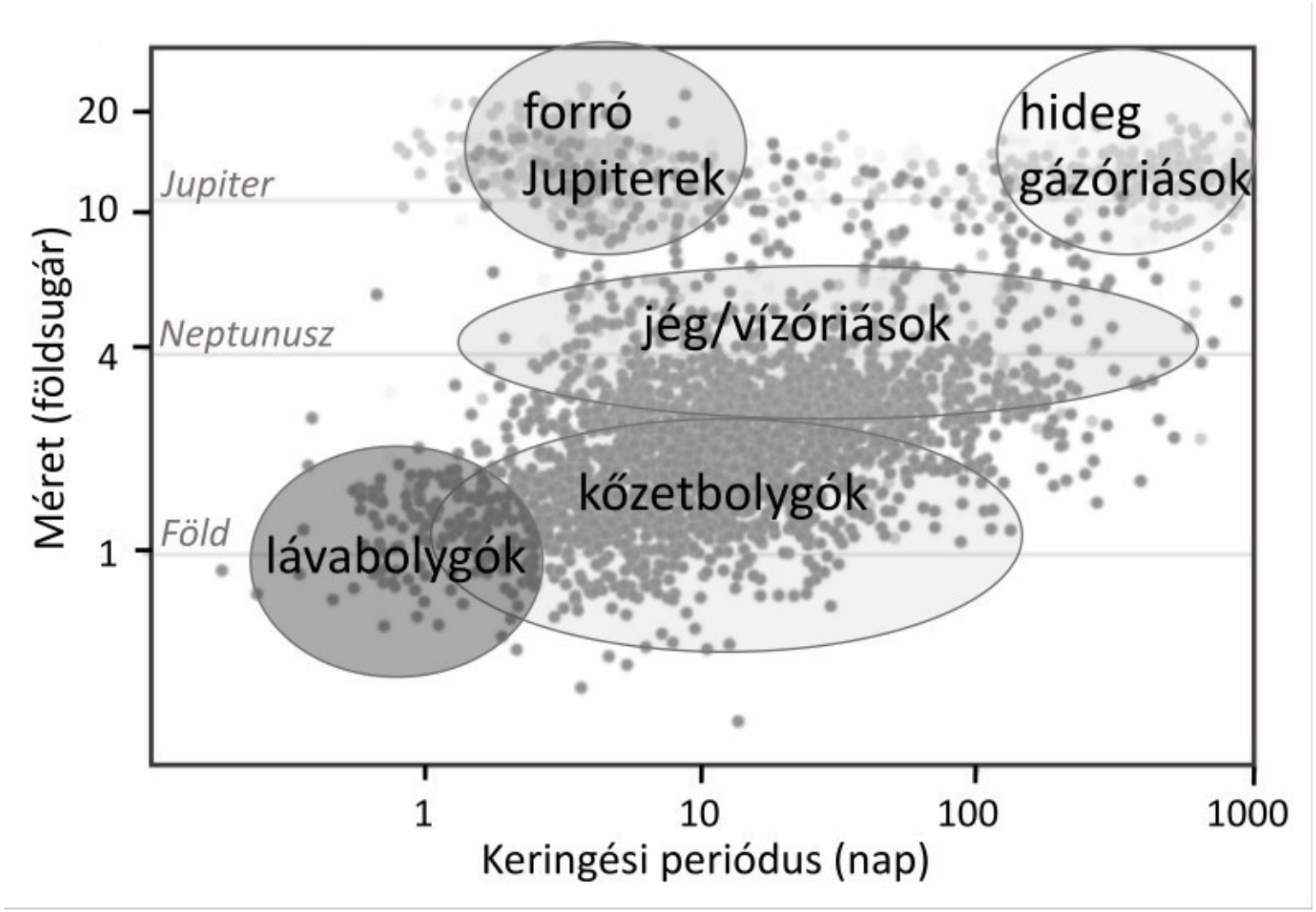
A Kepler exobolygó-kutatásairól

A TRAPPIST-1 bolygórendszere[2][3]

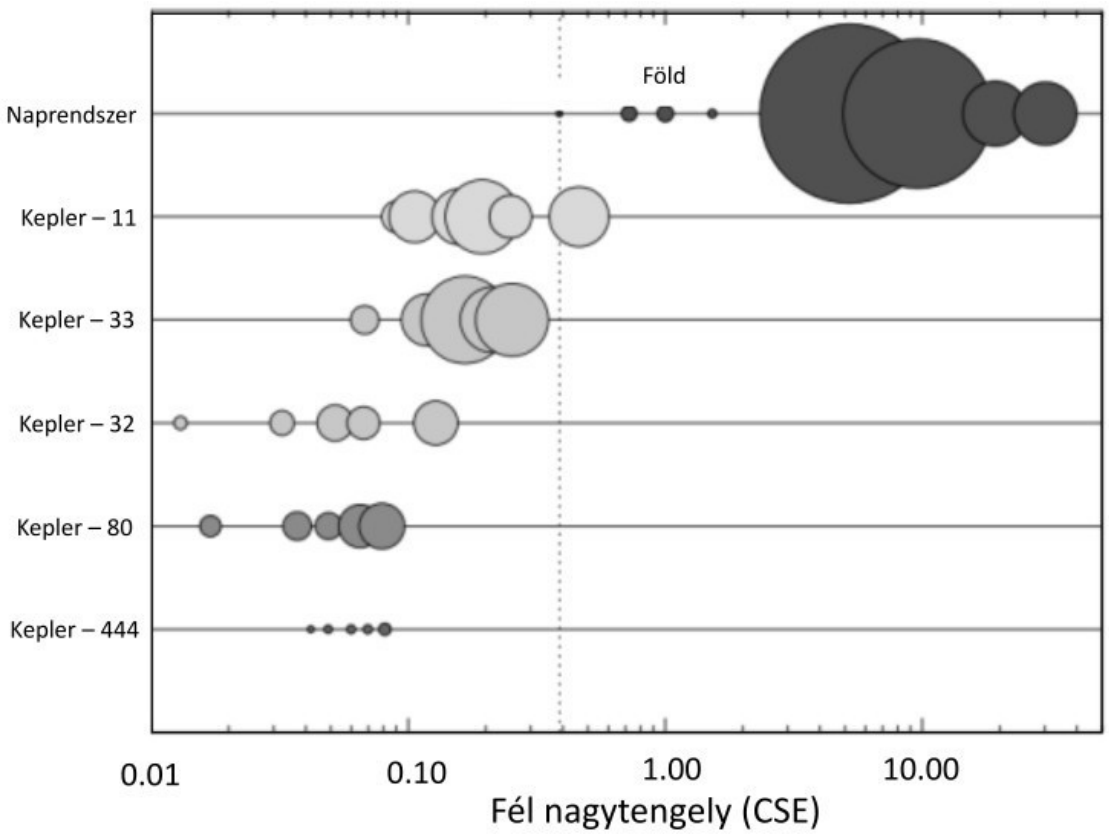
Jelölés (a csillagtól való távolság szerint)	Tömeg	Fél nagytengely (CsE)	Keringési idő (nap)	Pálya excentricitása	Inklináció
b	0,85 ± 0,72 $M_\oplus$	0,01111	1,51087081 ± 0,00000060	<0,081	89,65 ± 0,25°
c	1,38 ± 0,61 $M_\oplus$	0,01522	2,4218233 ± 0,0000017	<0,083	89,67 ± 0,17°
d	0,41 ± 0,27 $M_\oplus$	0,021 ± 0,006	4,049610 ± 0,000063	<0,070	89,75 ± 0,16°
e	0,62 ± 0,58 $M_\oplus$	0,028	6,099615 ± 0,000011	<0,085	89,86 ± 0,11°
f	0,68 ± 0,18 $M_\oplus$	0,037	9,206690 ± 0,000015	<0,063	89,680 ± 0,034°
g	1,34 ± 0,88 $M_\oplus$	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°

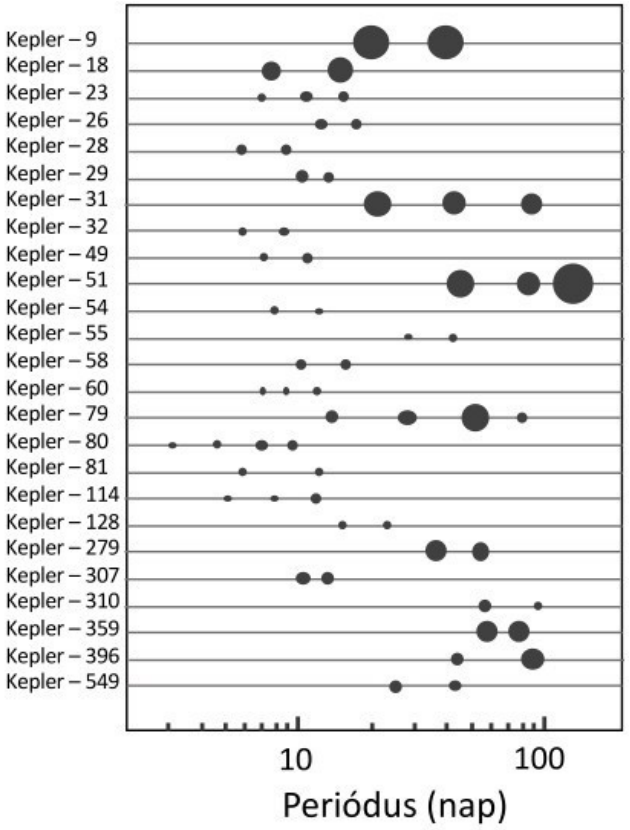
A Kepler exobolygó-kutatásairól





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.

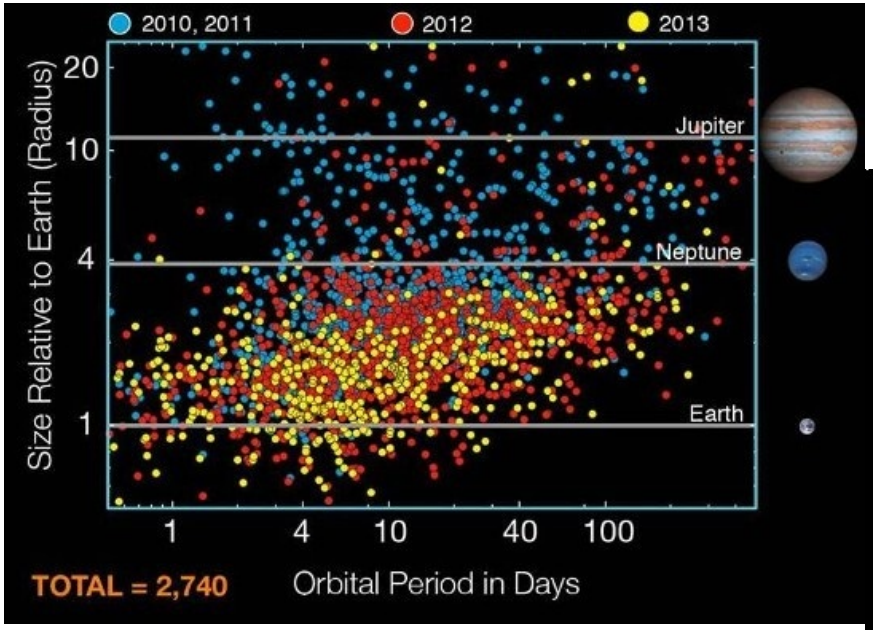


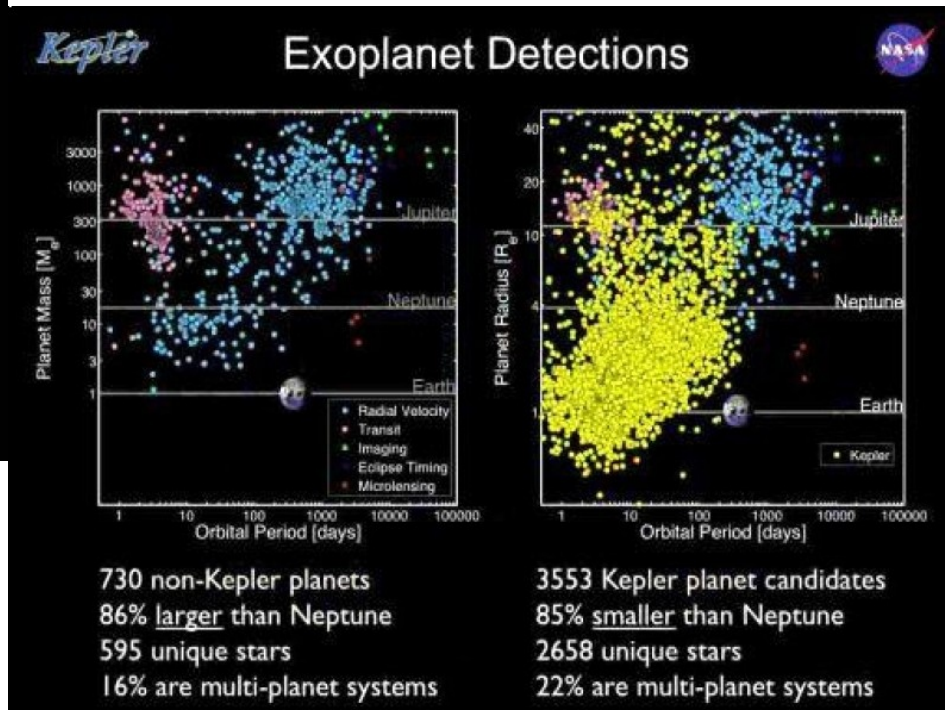


A bolygórendszereknél biztosan kizárhatók a hamis pozitív detektálások, sőt a bolygók tömege is meghatározható a tranzitidőpont-változások (TTV) alapján. A bolygókereső algoritmust is módosítani kellett, mert egy csillag körüli több bolygó esetén a fedések nem teljesen szabályosan következnek be.

Exobolygóstatisztika a Kepler alapján

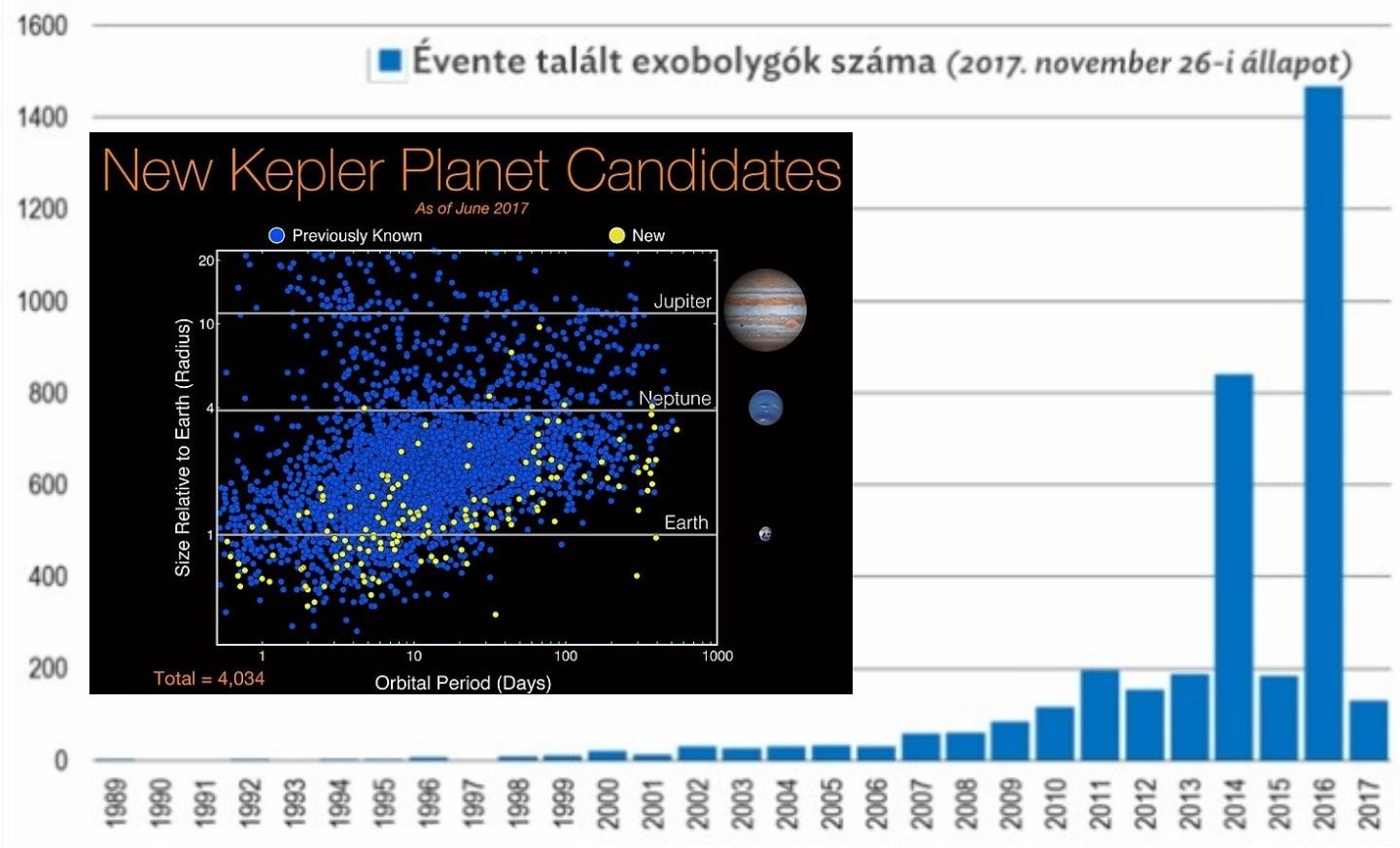
2013 elején 2740 gyanított exobolygó; 114 megerősítve (radiális sebesség vagy gravitációs perturbáció alapján); 467 csillag körül van több bolygó. A gázóriások ritkák, de könnyebben felfedezhetők.
A 2014-es bejelentések a jobb oldali képen láthatók (3553 bolygójelölt).





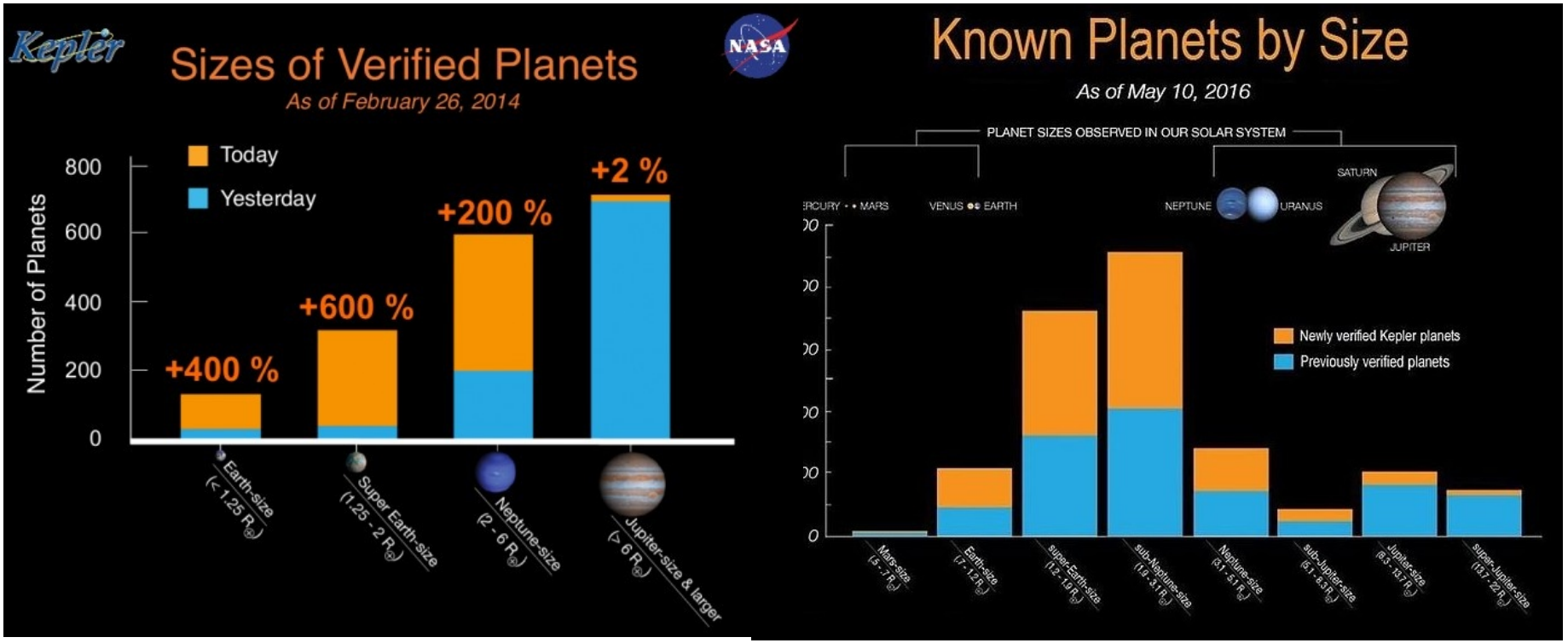
Exobolygóstatisztika a Kepler alapján

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).



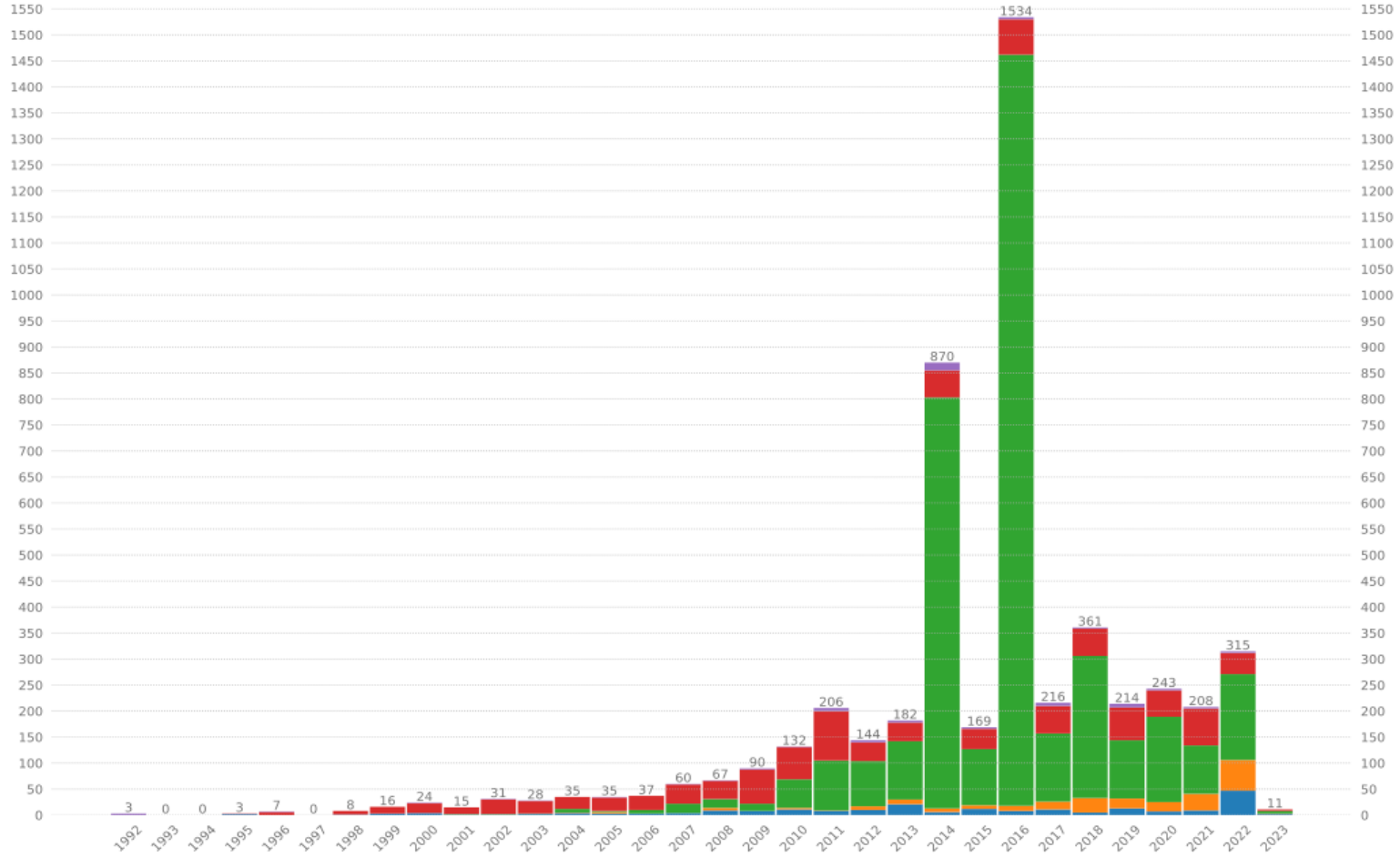
Egyre kisebb bolygóból egyre többet

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.

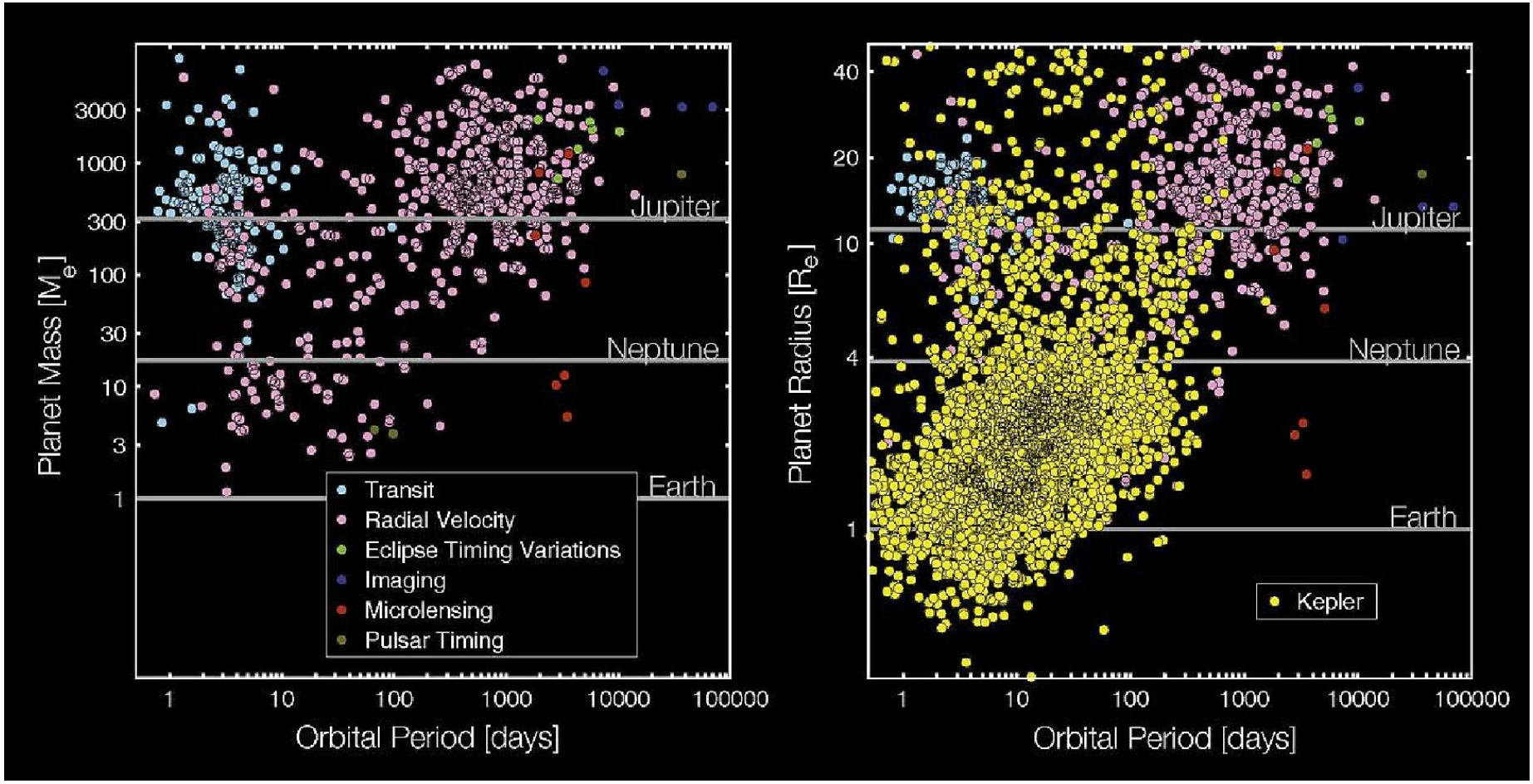


Friss exobolygóstatisztika

A kiugró csúcsok (2012-ben, 2014-ben) a Kepler bolygóbejelentései.
Zöld szín jelzi a tranzitmódszerrel történt felfedezéseket.

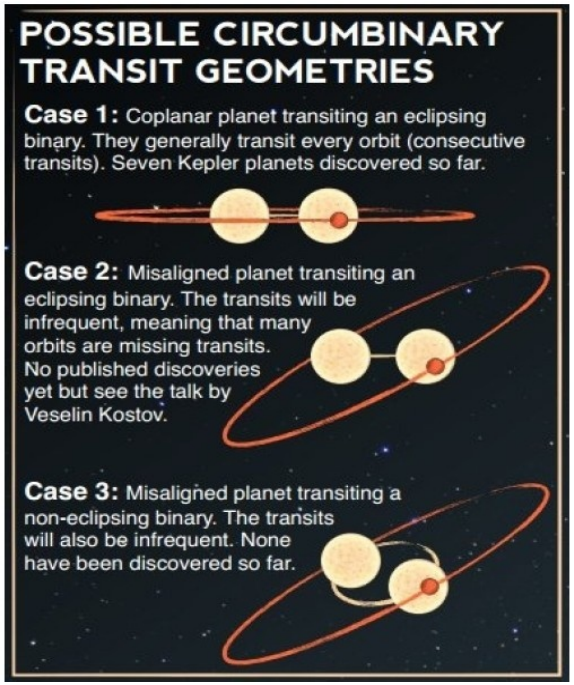


Exobolygók tömege és sugara – periódusfüggés



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.



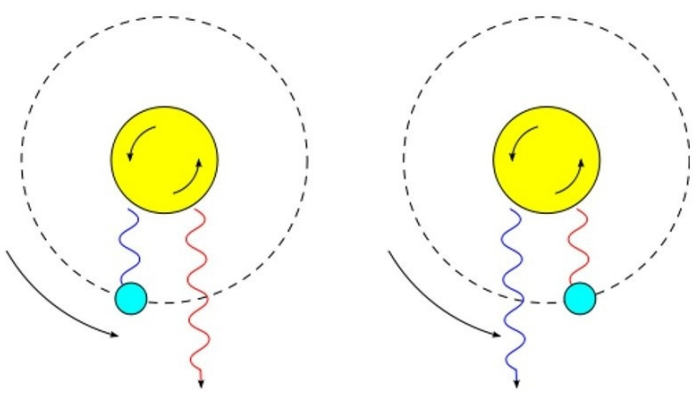
David Martin (Univ. of Geneve) & Amory Triaud (MIT)

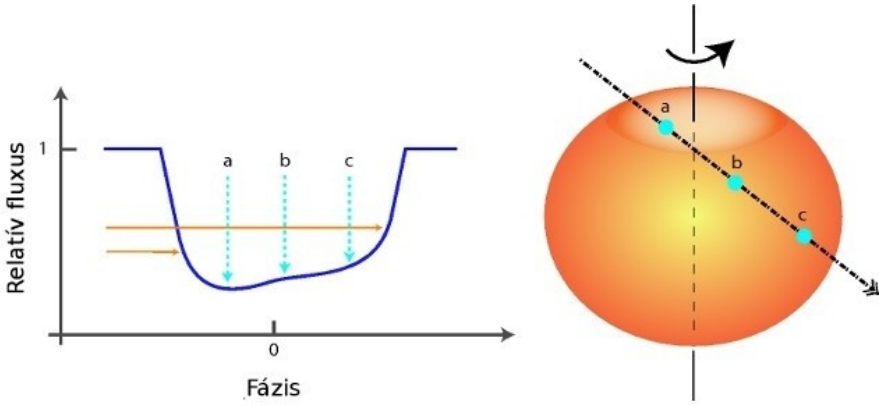
Kepler-16,-34,-35,...
14 rendszer
mind 1-es típusú

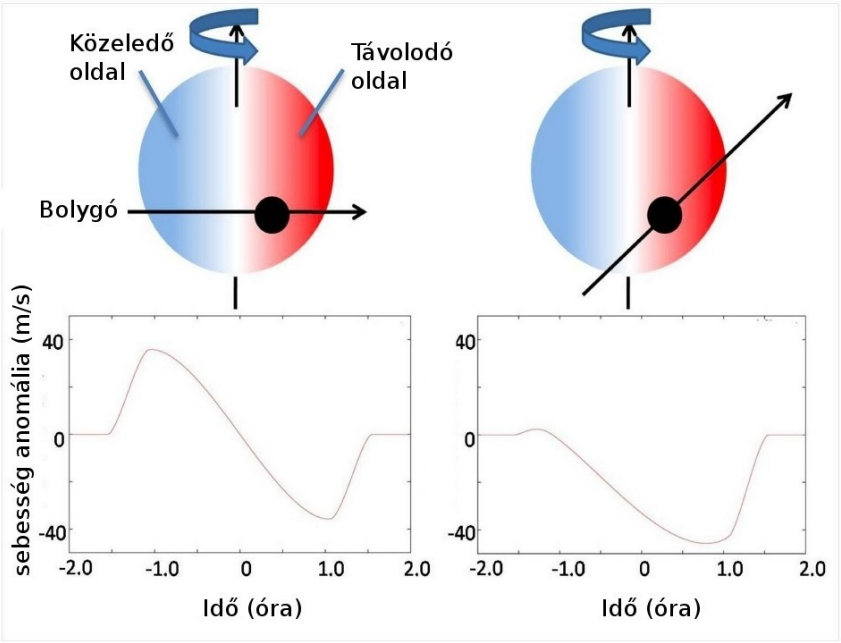
2: nem esik egybe a két pálya, csak az egyiket fedi

3: nem fed a kettőscsillag, csak az egyiket fedi

Fontos effektusok



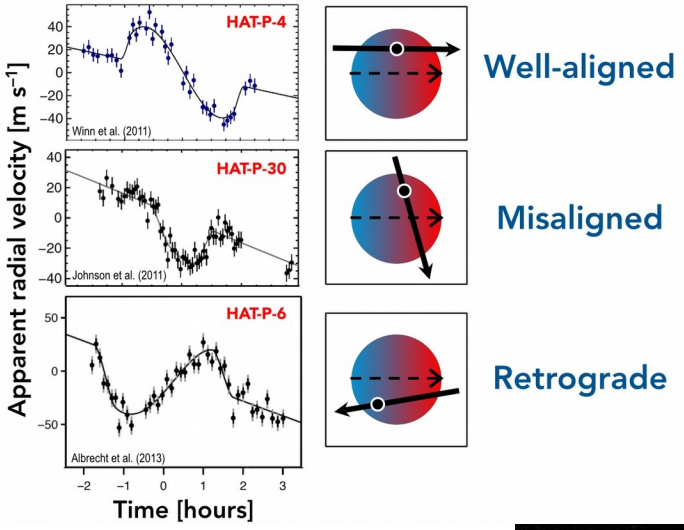




Rossiter–McLaughlin-effektus: fedési kettősöknél, illetve exobolygó keringése esetén az átvonulás alatt a színképvonal profilja változik (radiális seb.).

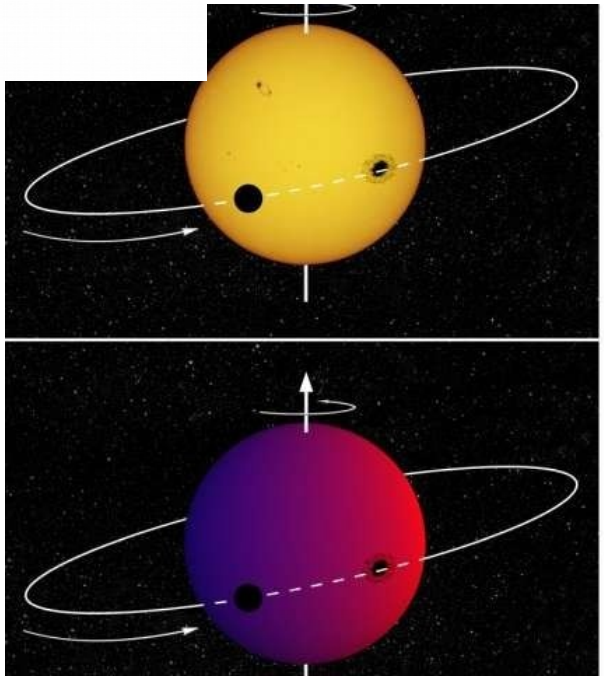
De a fedési fénygörbe alakjából fel lehet térképezni pl. a csillagfoltok eloszlását, és látszik a bolygóról visszavert csillagfény is. Ennek ciklusonkénti változása a vizsgált bolygó időjárására utal.

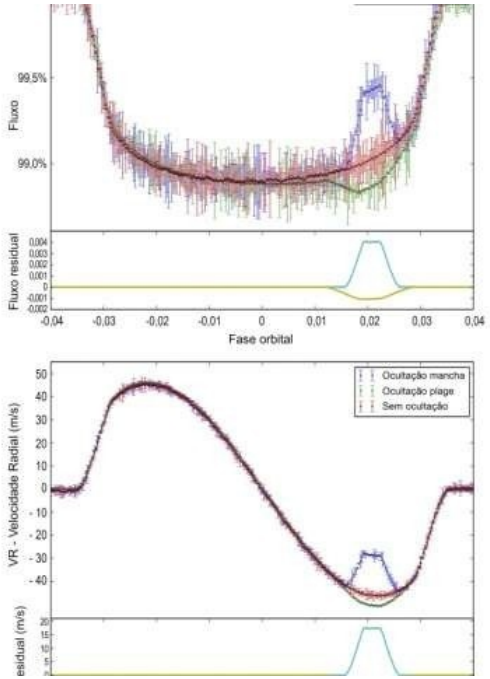
A Rossiter–McLaughlin-effektus



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

Késői típusú csillagoknál a foltok hatása zavaró lehet.



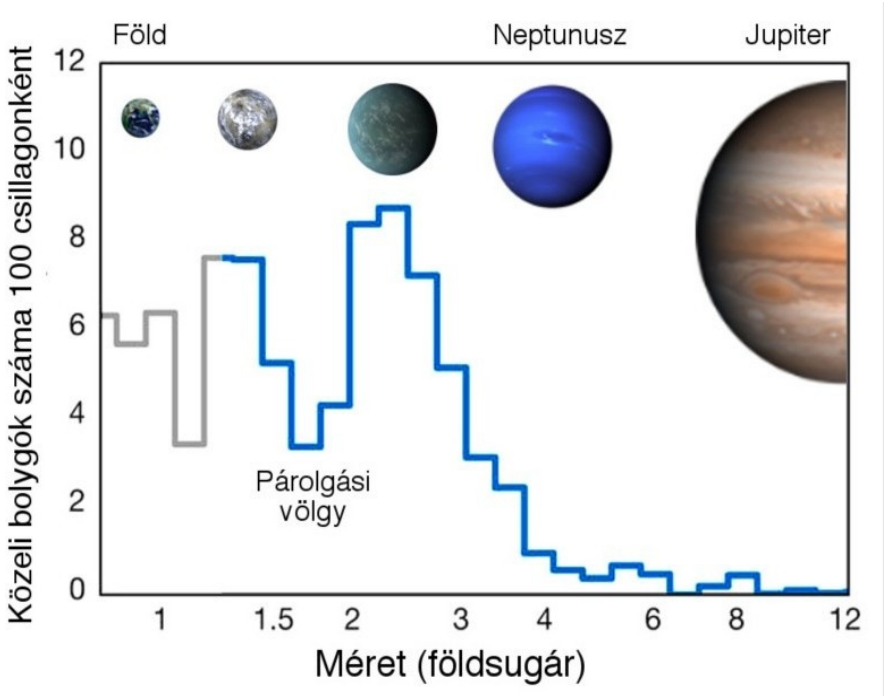


A bolygók tulajdonságainak meghatározása

A fedés mélységéből a bolygó és a csillag méretaránya jön ki, az abszolút mérethez fontos a csillagszeizmológia (Nap típusú oszcillációk – 1 millió módus a Napban). Jó lenne tudni továbbá a bolygók tömegét és kémiai összetételét is. Ehhez ismerni kell a gazdacsillag fizikai jellemzőit

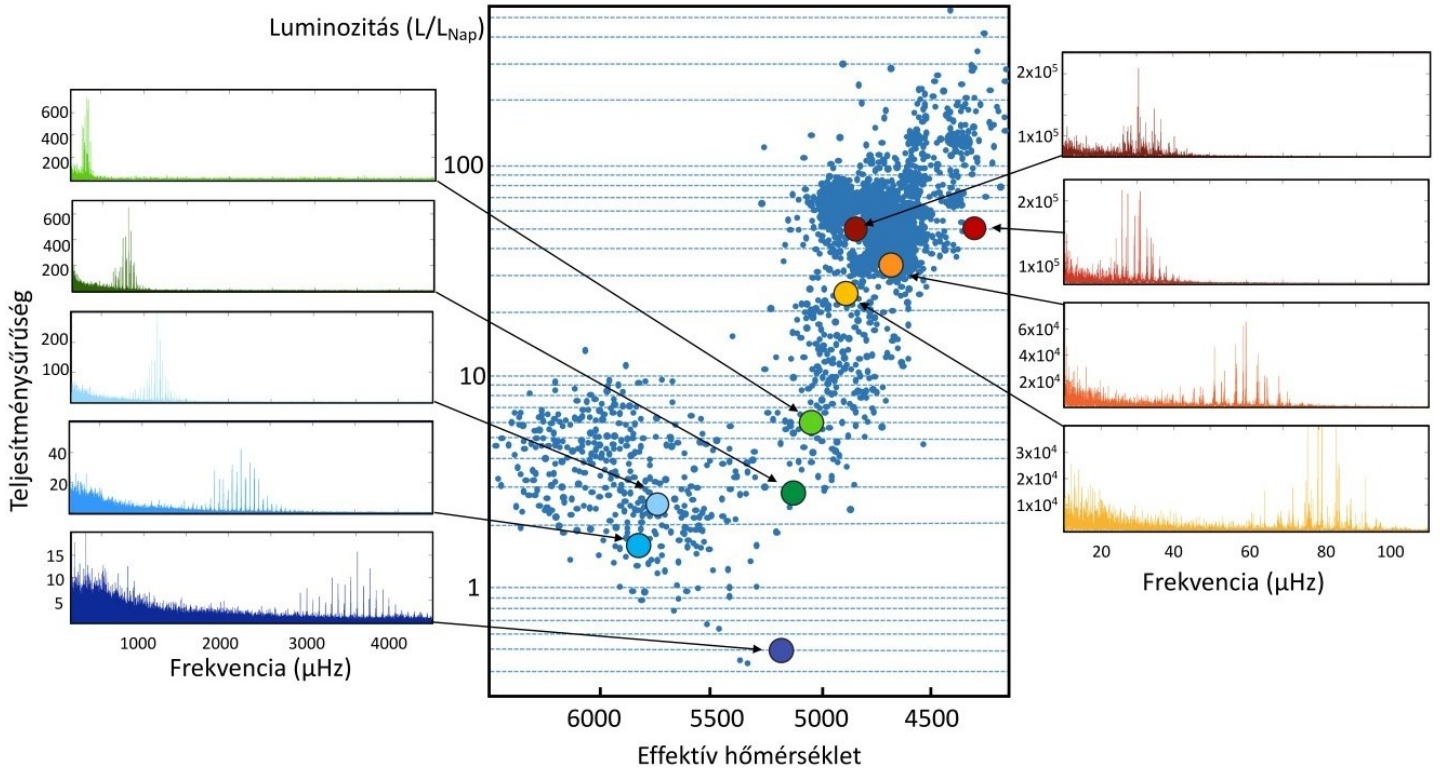
Asztroszeizmológia nélkül a Gaia DR3 adatbázisa segít, illetve dedikált spektroszkópiai felmérések földi nagytávcsövekkel.

Kiderült, hogy a szuperföldeket éles határ (a párolgási völgy) választja el a minineptunuszoktól (1,5-2,5 földsugár 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)



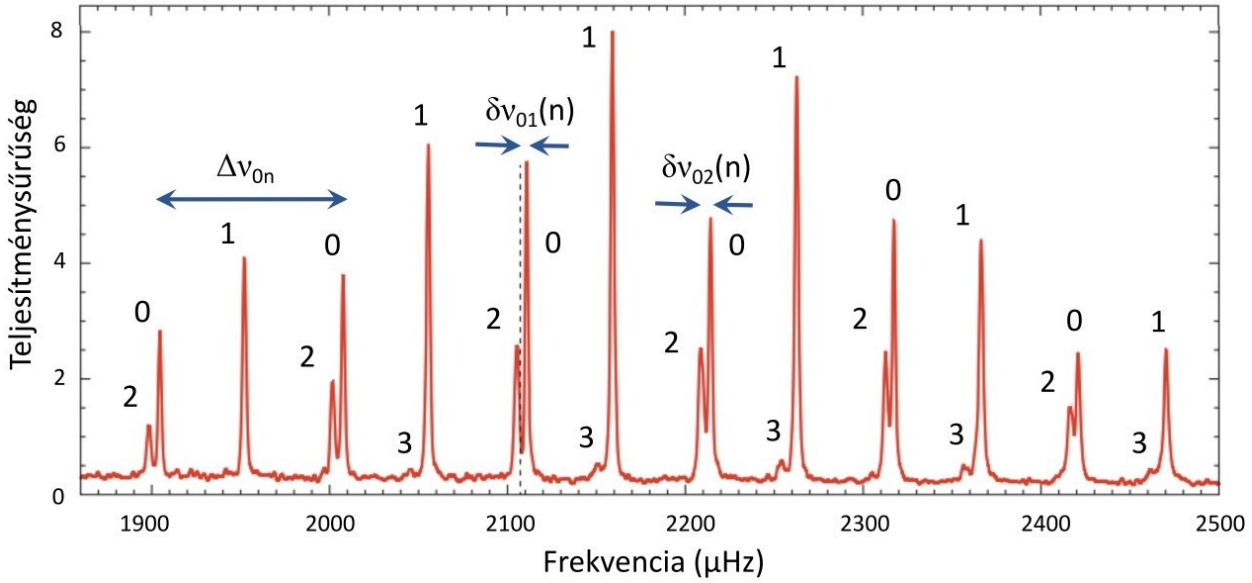
Asztroszeizmológia a Keplerrel

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 tízezernyit és több száz fősorozati csillagot. A fősorozaton az akusztikus hullámok rezgési periódusa néhány perc, a vörös óriások periódusa hosszabb, amplitúdója nagyobb.
A nemradiális oszcillációk leírása gömbfüggvényekkel történik.



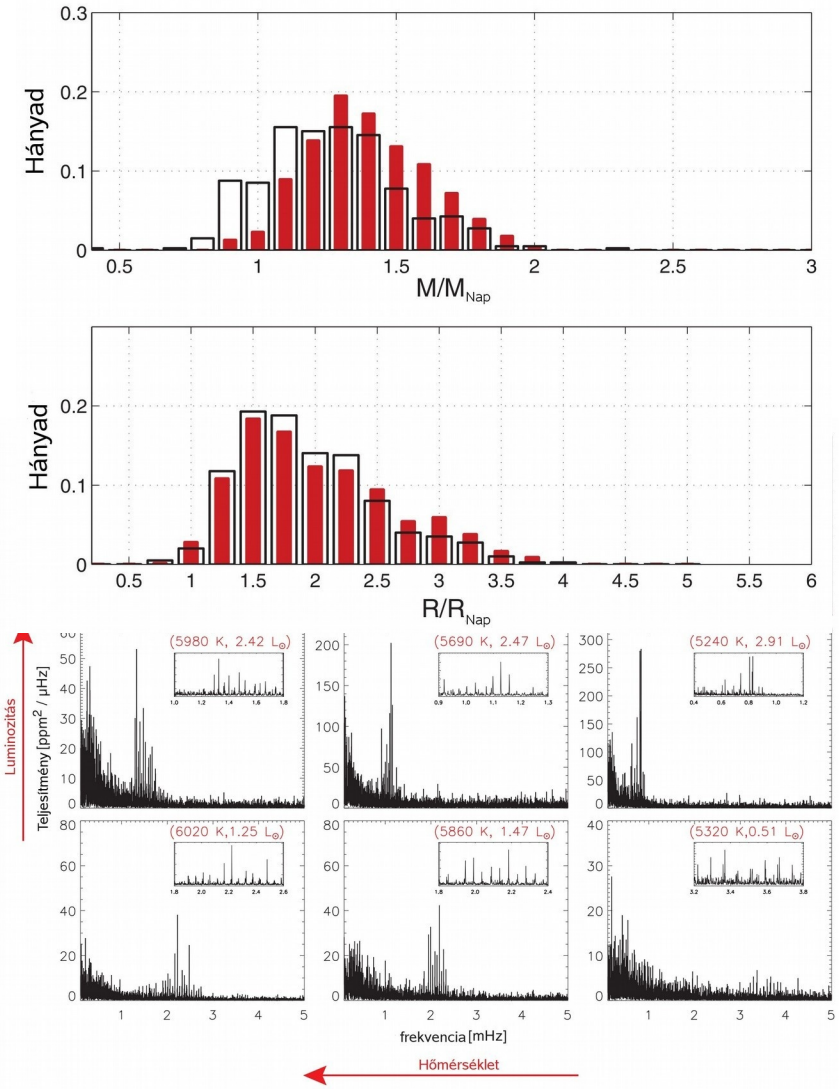
Asztroszeizmológia a Keplerrel

A Nap típusú oszcillációk jellegzetessége: ismétlődő frekvenciasorozatok a teljesítményspektrumban. E sorozatok 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 fősorozati G csillag (16 Cyg A) teljesítményszínképe látható.



Asztroszeizmológia a Keplerrel

- Az exobolygók gazdacsillagai fizikai tulajdonságainak meghatározása mellett 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).

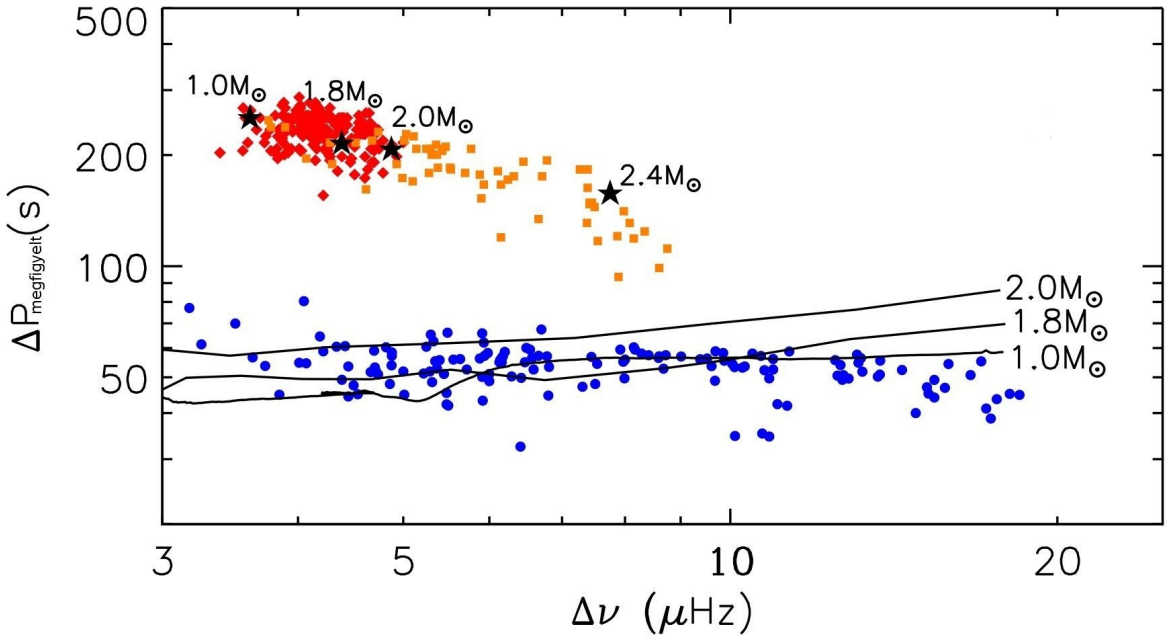


Asztroszeizmológia a Keplerrel

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

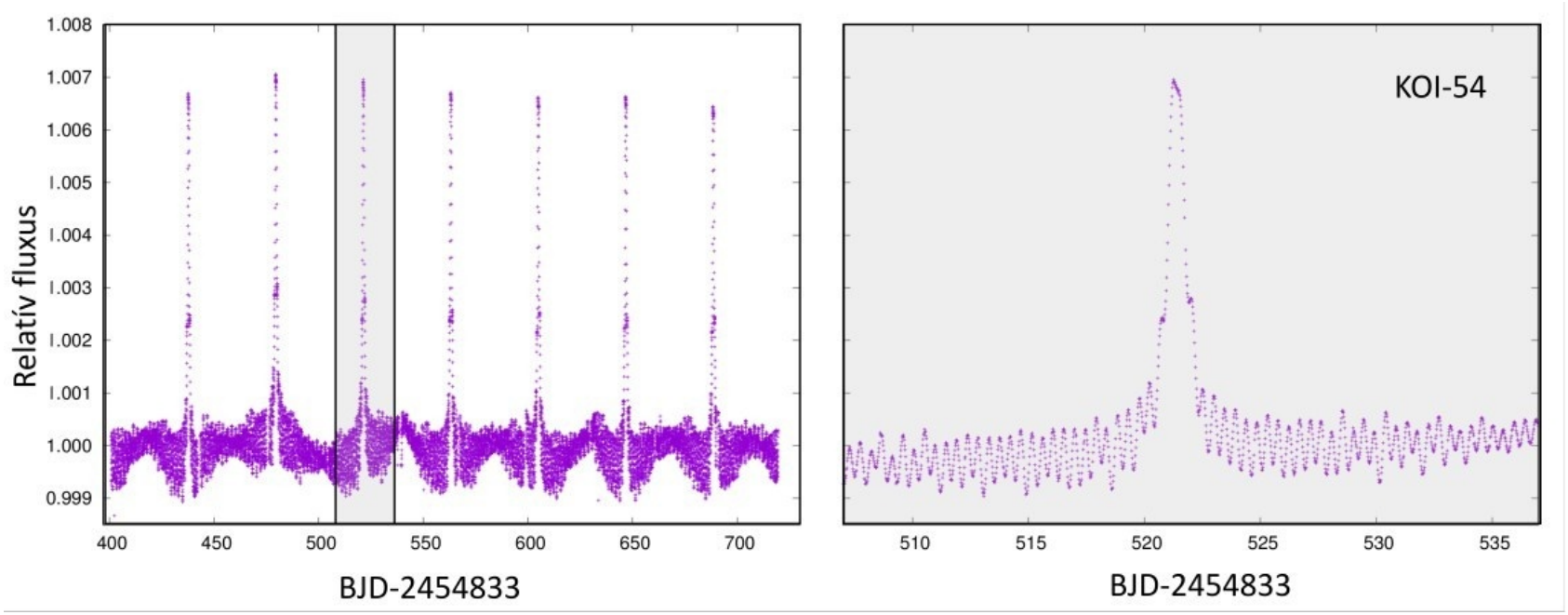
H-égés a mag körüli héjban



Asztroszeizmológia a Keplerrel

A kettőscsillagok extrém fajtája, egyben a kettőscsillagok 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%-os pontossággal meghatározható (Miszuda et al. 2020).

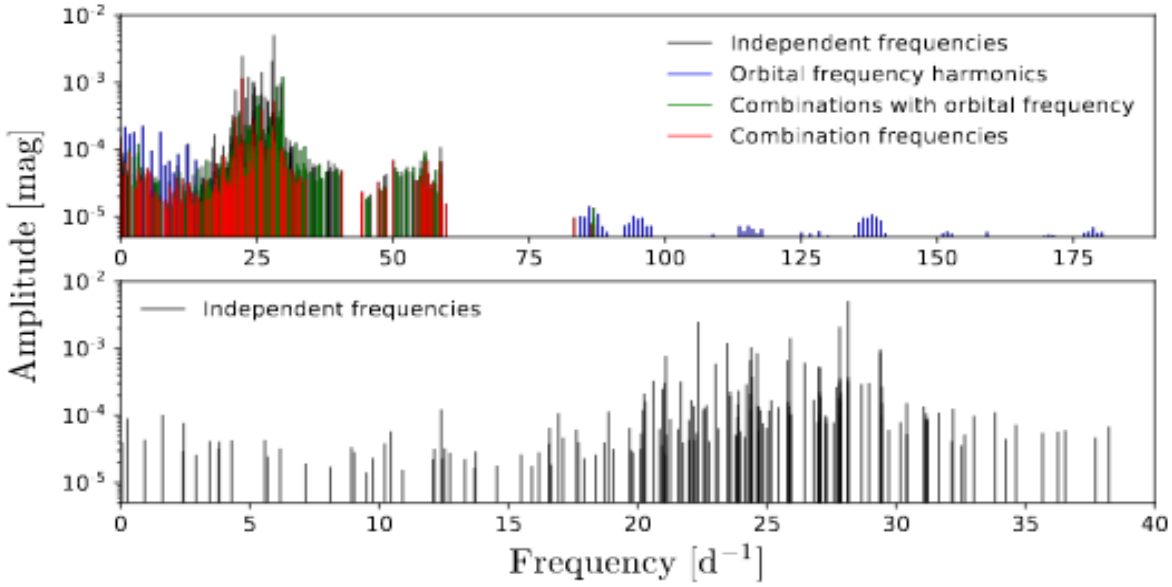


Fig. 2: Results of the frequency analysis of the SC data after subtraction of the orbital model. In the top panel, we plotted all frequencies found from SC data. Blue lines mark orbital frequency harmonics, green lines mark combinations with orbital frequency, red lines mark other combinations and black lines independent frequencies and those with no equivalent in LC data. The bottom panel shows only independent frequencies that have theirs 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 részben 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 frekvenciafelhasadásból 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)

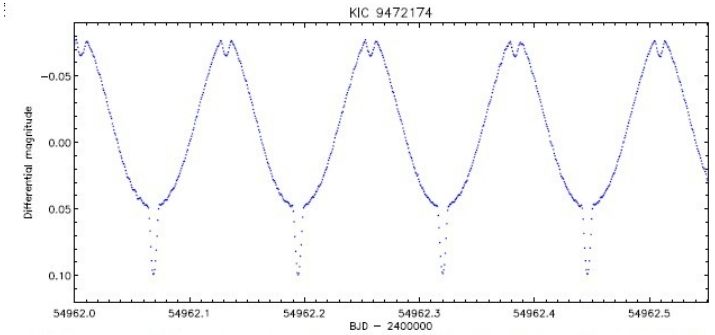


Fig. 6. Excerpt from the *Kepler* short-cadence light curve of the sdB plus M-dwarf eclipsing binary KIC 9472174.

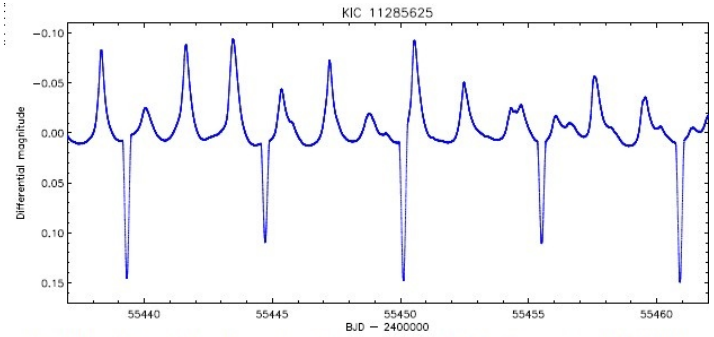


Fig. 4. Excerpt from the *Kepler* long-cadence light curve of the γ Doradus eclipsing system KIC 11285625.

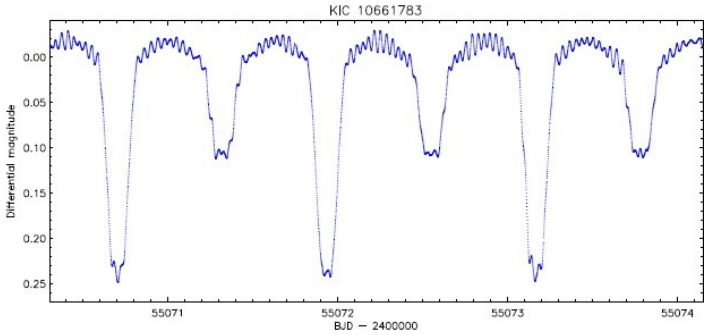


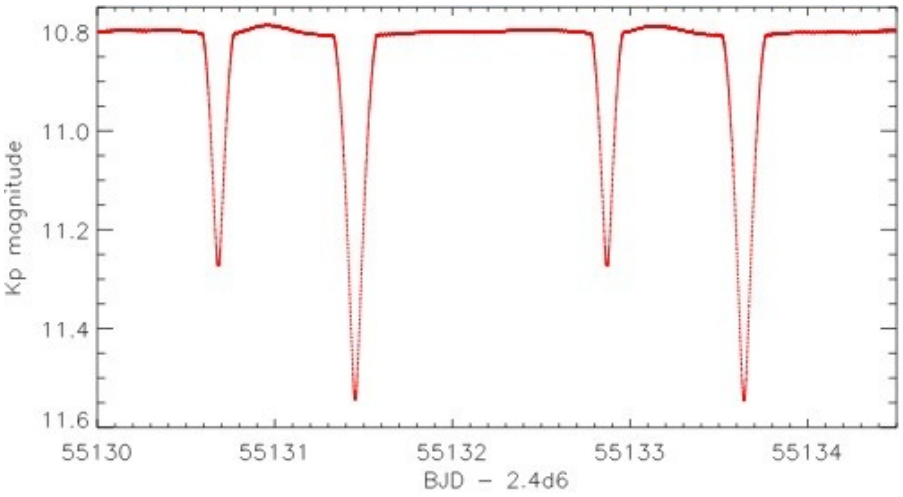
Fig. 3. Excerpt from the *Kepler* short-cadence light curve of the δ Scuti eclipsing system KIC 10661783.

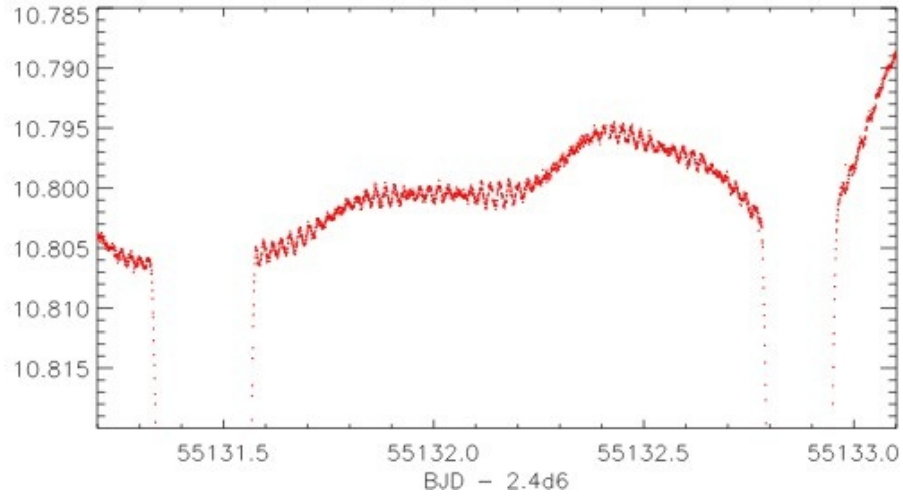
Fedési kettősök a Kepler-mezőben

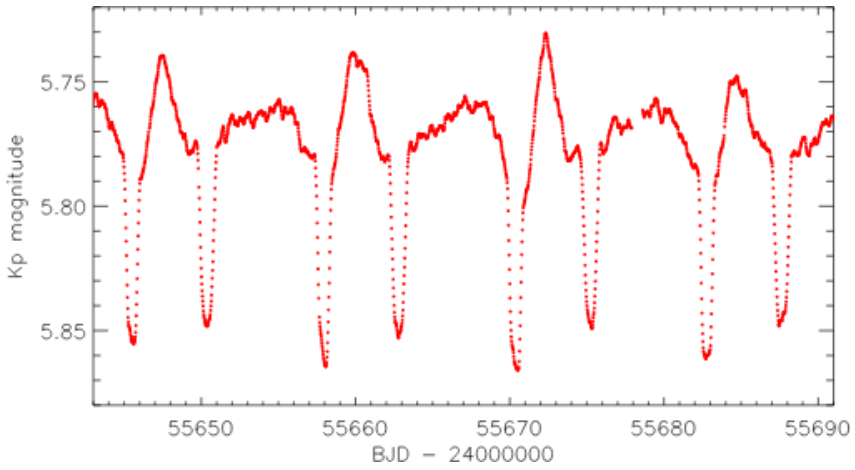
KIC 4544587: a főkomponens DSC típusú, a másodkomponens pedig GDOR típusú (jobbra), fent: SC-adatok, lent: a fedések közötti fénygörbe.

V380 Cygni: sztochasztikus 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 még a radiális sebességre is lehet következtetni spektroszkópia nélkül (nincs ábra).

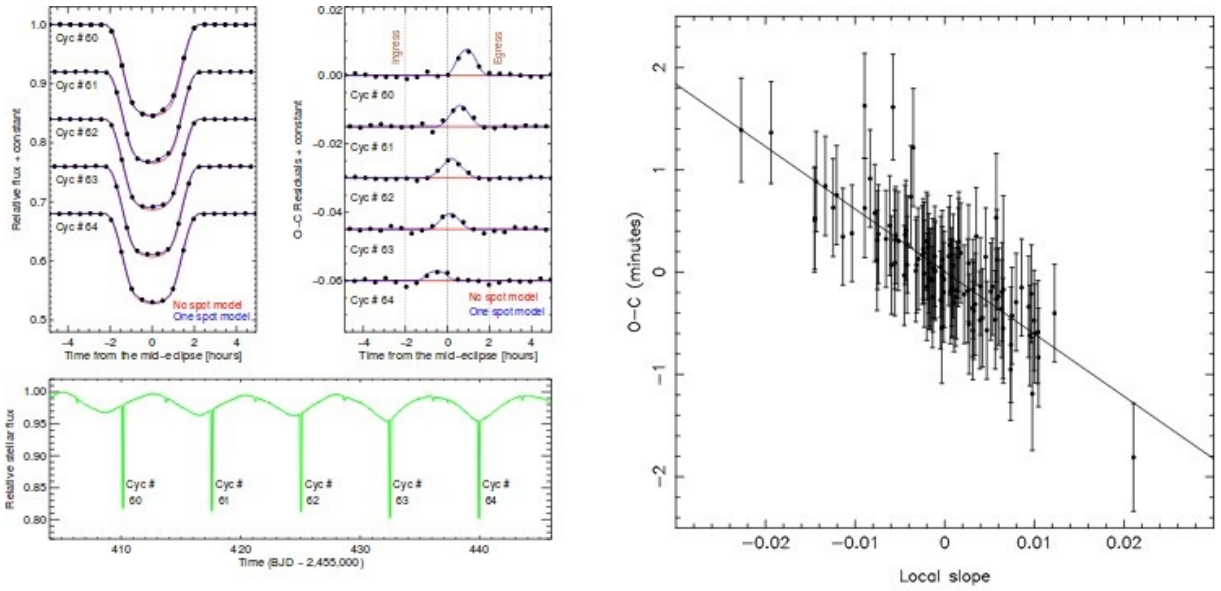
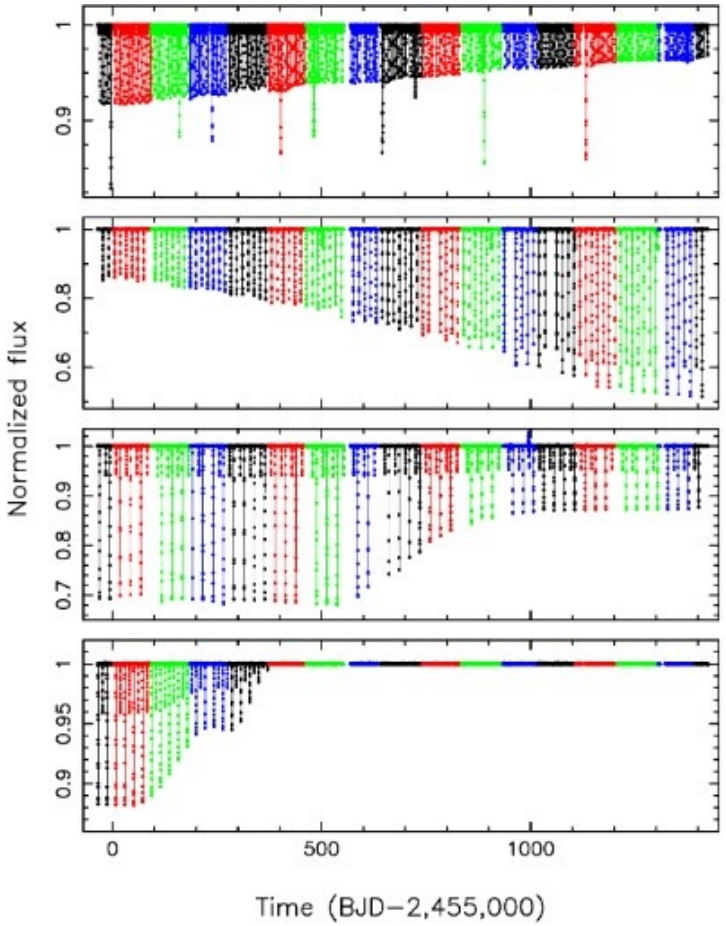
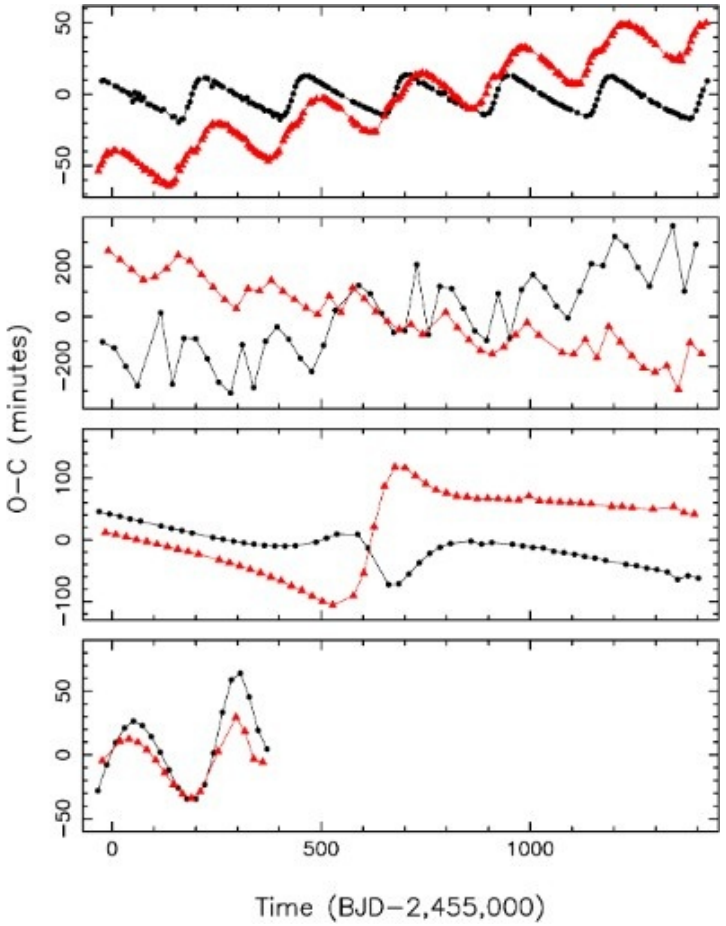


Figure 2. *Left:* Eclipses of a star spot in Kepler-47. A dark spot on the primary star rotates in and out of view, leading to the variable flux in the out-of-eclipse regions as shown at the bottom. This star spot was partially eclipsed by the secondary star during five consecutive primary eclipses.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

Hármas rendszerek a Kepler-mezőben

A Kepler-mezőben azonosított 3000 fedési kettős kb. 9%-ához harmadik csillag is tartozik. A fedés mélysége változhat a harmadik komponens dinamikai hatására (a pályasíkok elfordulnak, bal oldali ábra).
Jobbra: az O-C diagramok (fekete a főminimumoké, piros a mellékminimumoké)

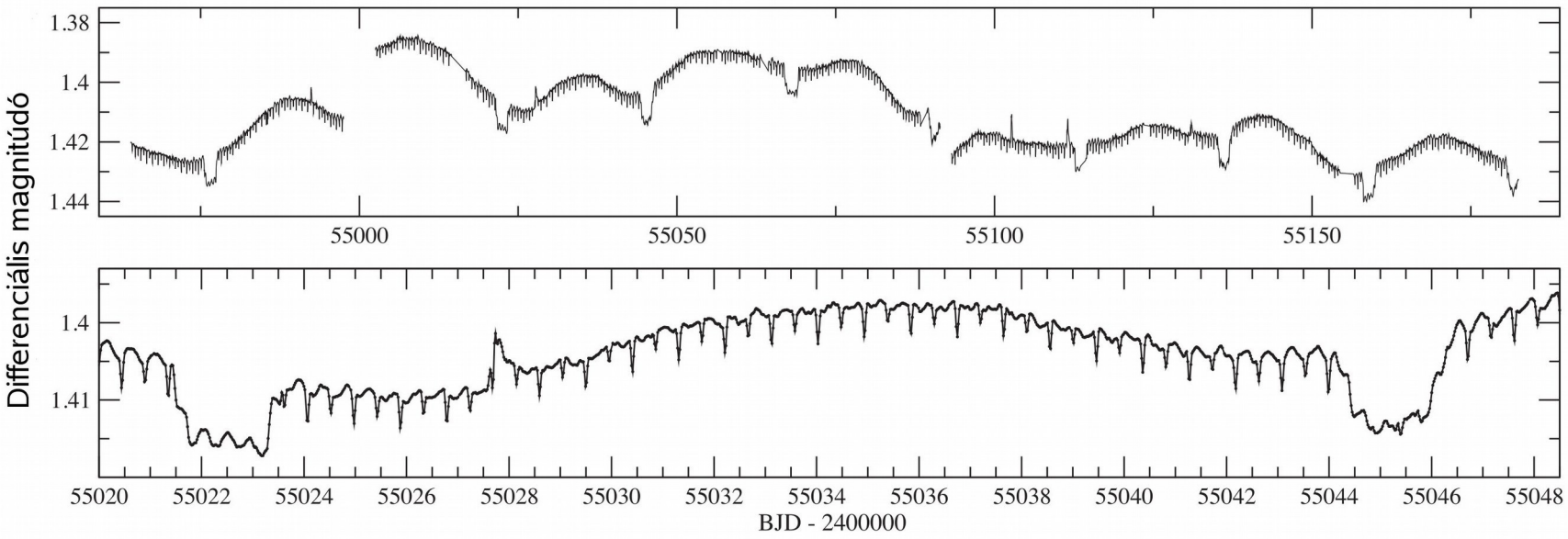




Triplán fedő hármascsillag

Magyar felfedezés: HD 181068 (Trinity) spektroszkópiai 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 létére 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.

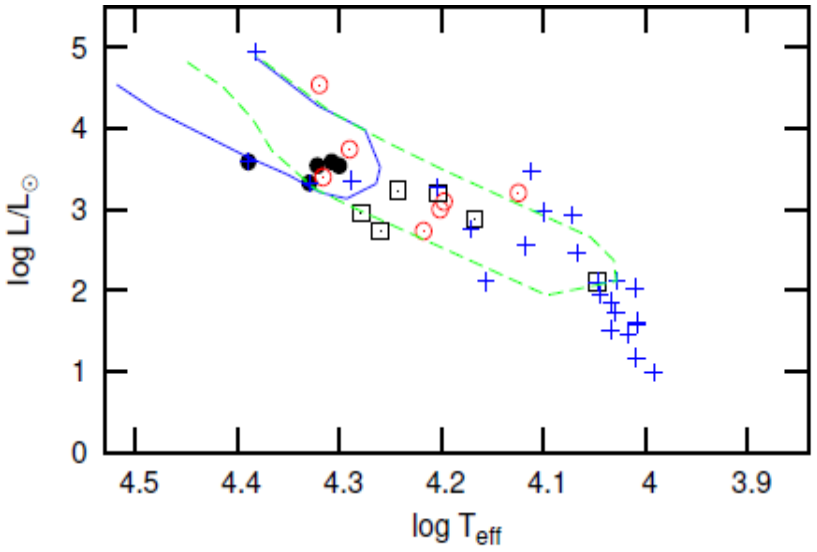


Figure 9. The location of SPB/β Cep hybrids with spectroscopic parameters in the theoretical H-R diagram are shown as (black) filled circles. SPB stars with spectroscopic parameters are shown as (red) open circles. The (black) open squares are anomalous stars with high frequencies which we call MAIA variables. Stars which do not pulsate (i.e. are classified as neither SPB, BCEP 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 fénygörbe cefeidáról.

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

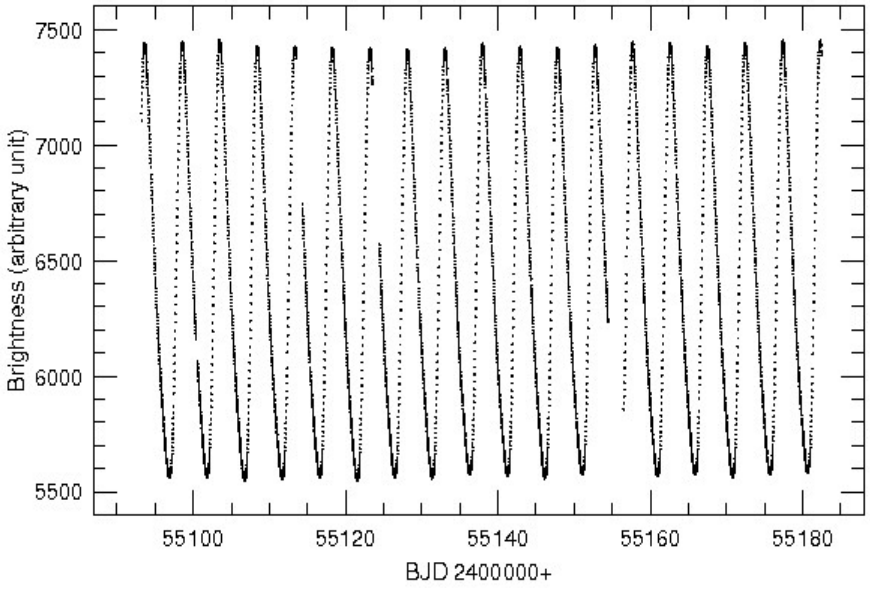
O-C diagram: a periódus csak hosszú időskálán állandó, ciklusról ciklusra ingadozik.

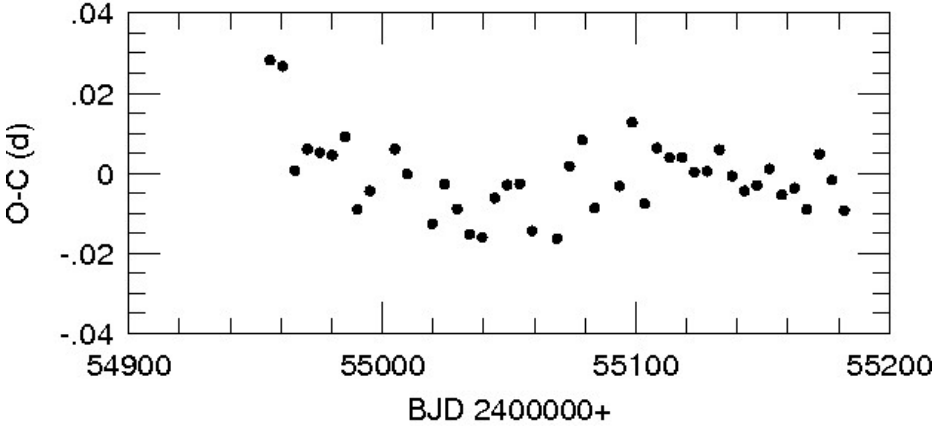
Pulzációs modell nincs még erre a jelenségre.

A teljes mérési sorozat analízise a következő két dián.

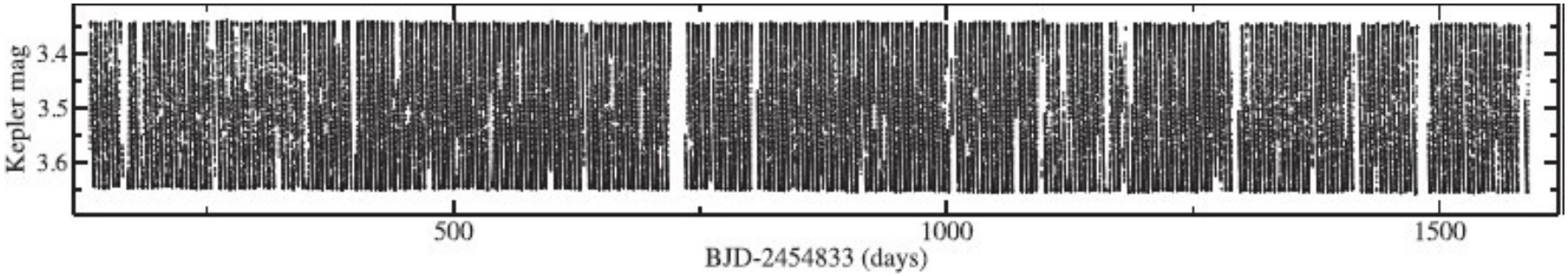
A K2 mezőibe már sok (és különféle típusú) cefeida esik.

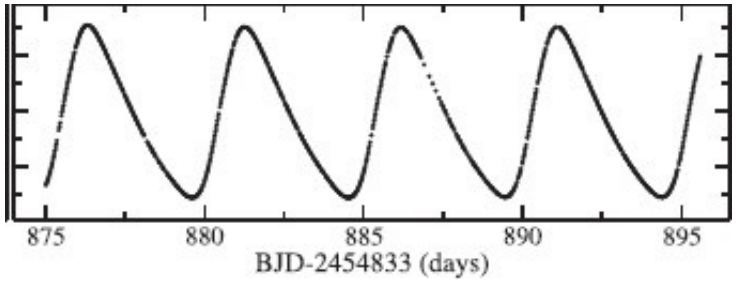
A TESS további áttörést hozott.

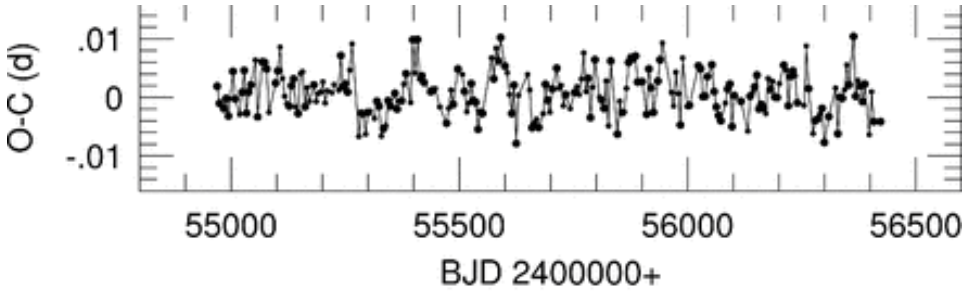




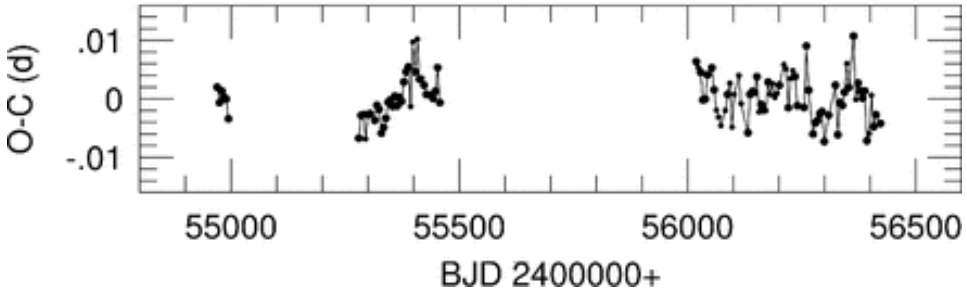
A Kepler-cefeida (V1154 Cygni)



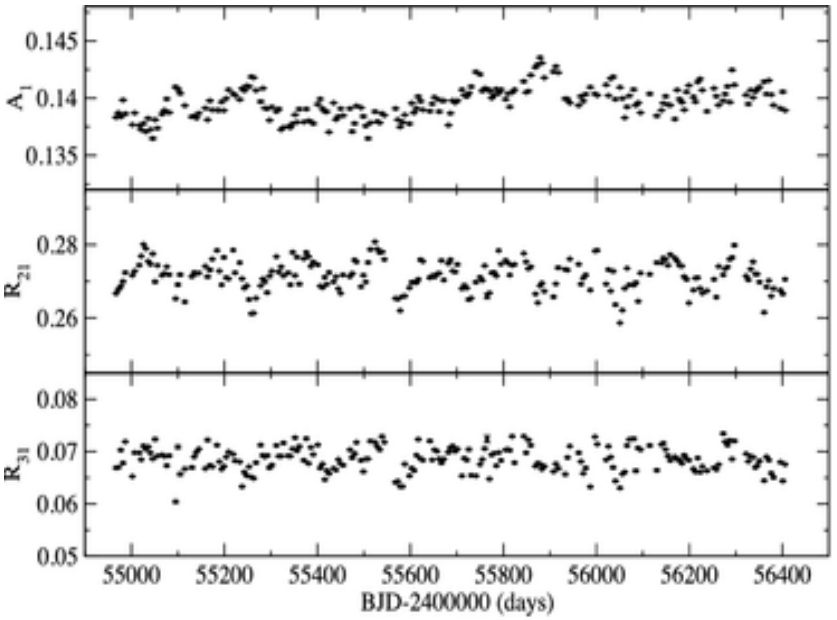


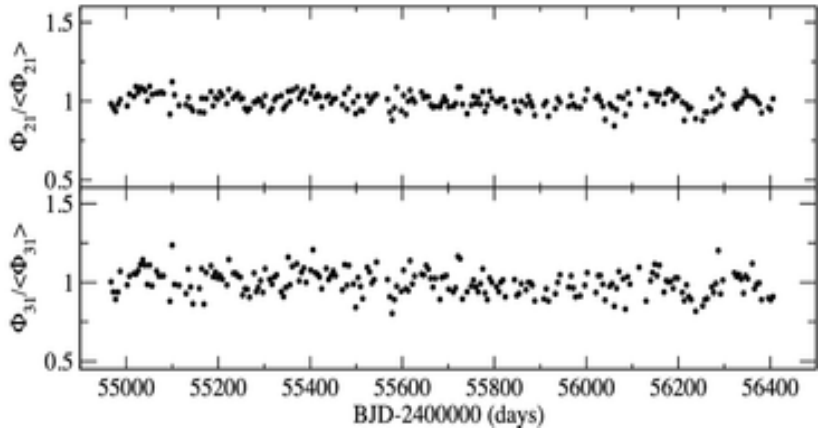


Derekas et al. (2017) új elemzés a teljes, négyéves adatsor alapján. 28 harmonikus a fénygörbében. A korábbi megállapítások továbbra is igazak.



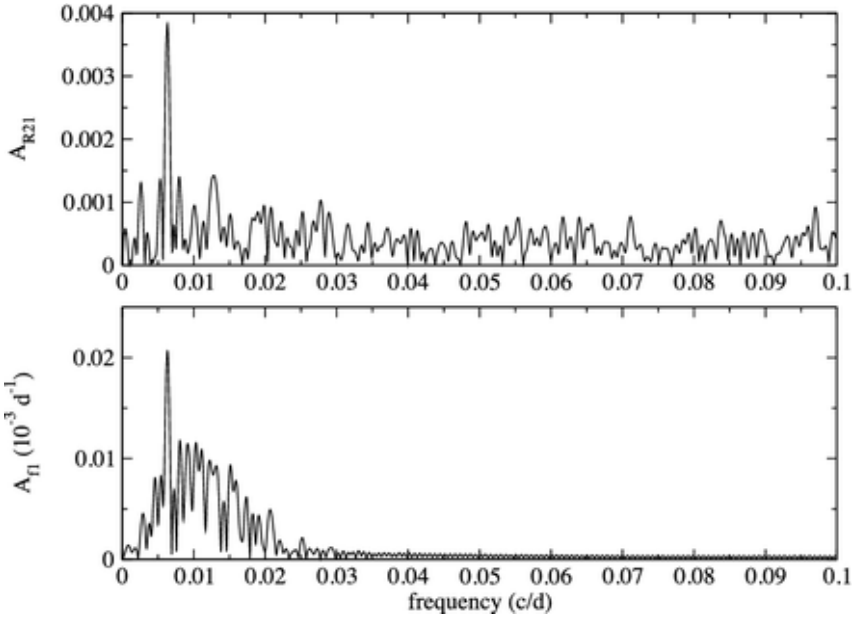
A Kepler-cefeida (V1154 Cygni)





Moduláció is jelen van a pulzációban: 159 (és 1160) napos periódussal.

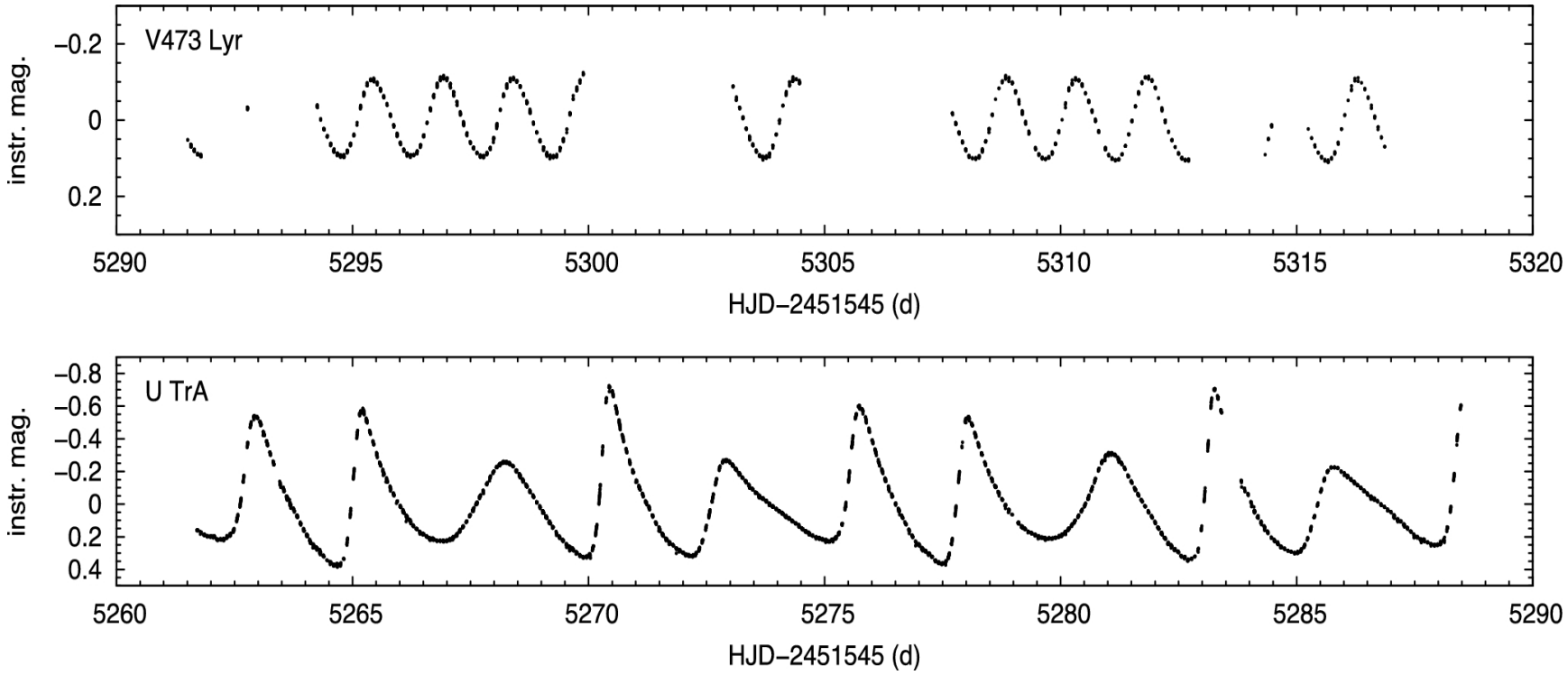
A Fourier-spektrumban alacsony frekvenciánál pedig a granulációs zaj látszik.



Cefeidaészlelések a MOST-tal

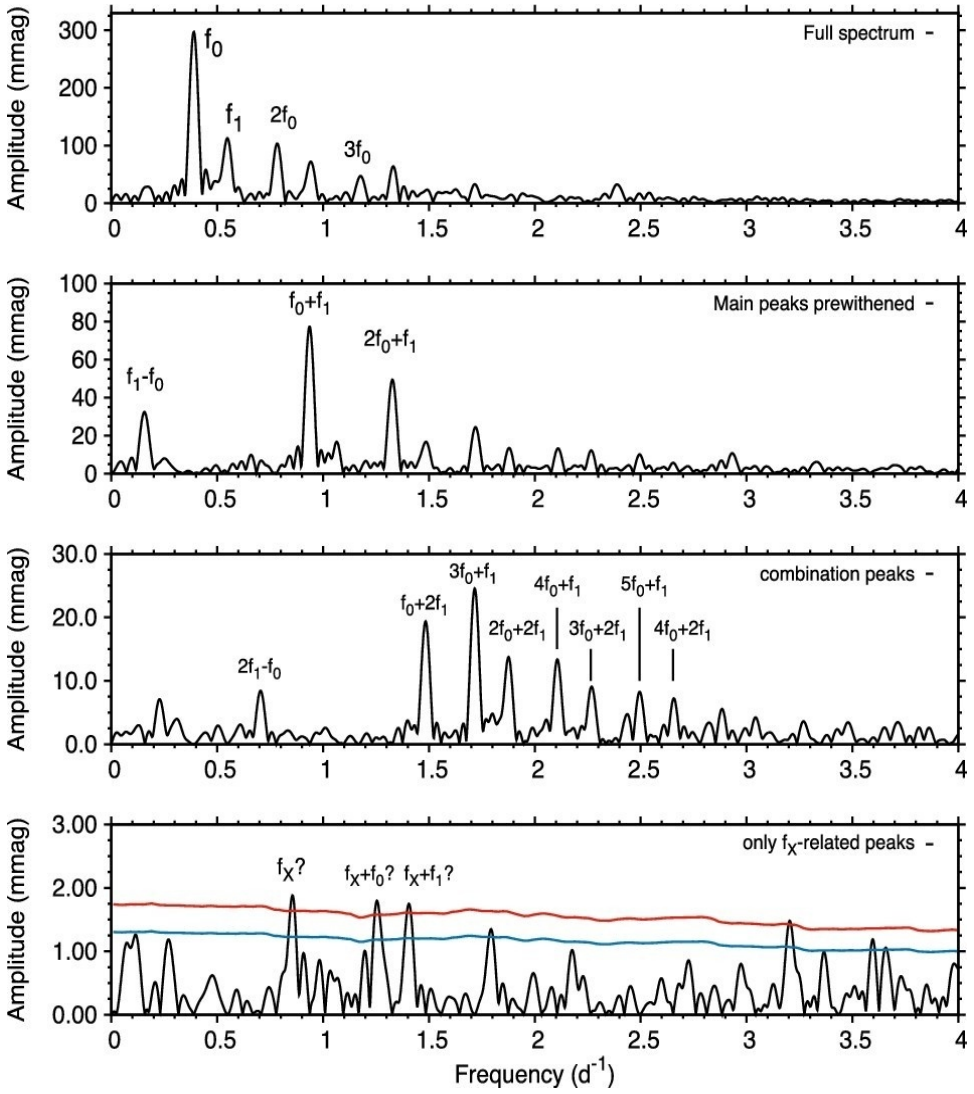
Az RT Aur (alapmódusban pulzáló cefeida) és az SZ Tauri (első felhangú cefeida) fénygörbéjének elemzése megerősíti a V1154 Cyg esetében tapasztalt viselkedést.

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



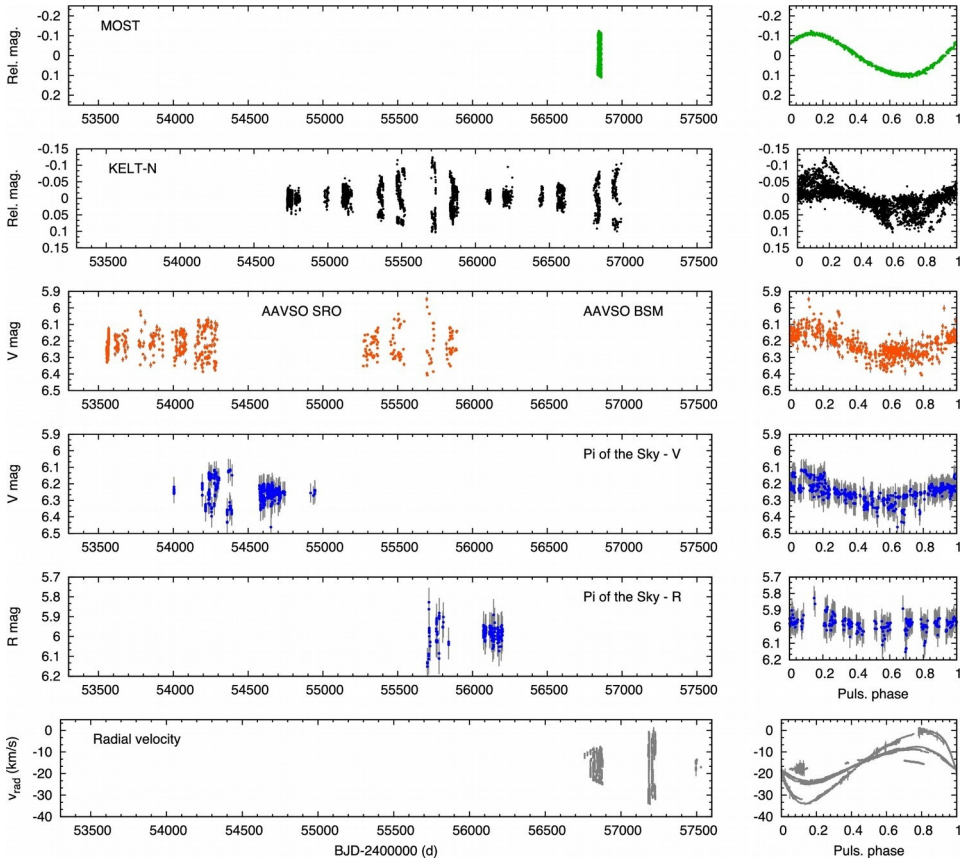
Cefeidaészlelések a MOST-tal

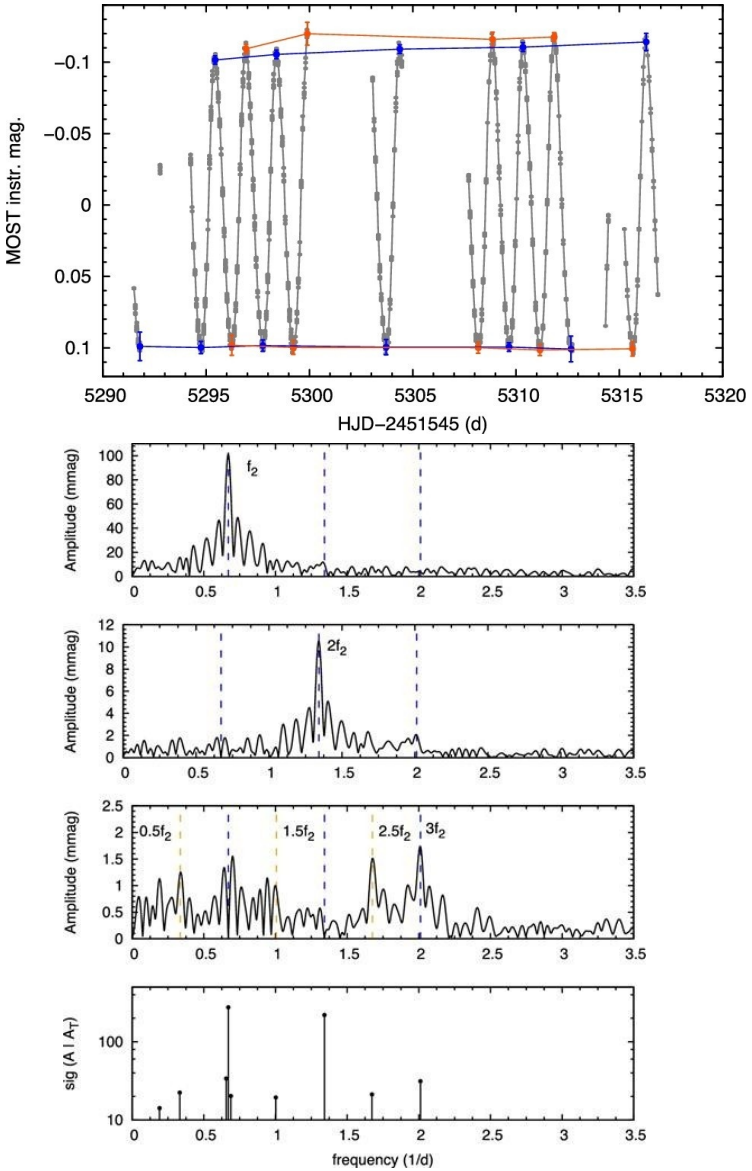
- Az U TrA esetében a két módus frekvenciáinak lineáris kombinációi feltűnően jelen vannak a Fourier-spektrumban.
- Az esetlegesen nemradiális módusra utaló *fx* frekvencia nem választható szét a kombinációs csúcsoktól.
- A korábbi fotometriai észlelésekkel összehasonlítva a két módus periódusa és amplitúdója fél évszázadon át stabil.



Cefeidaészlelések a MOST-tal

A V473 Lyr pulzációs periódusa 1,491 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.

Periódusketszereződés (jobbra);

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

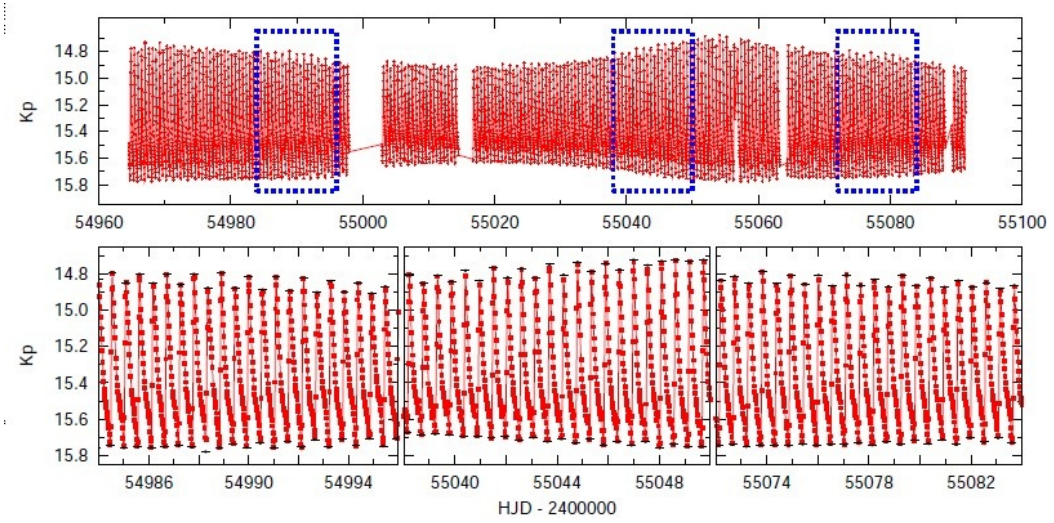
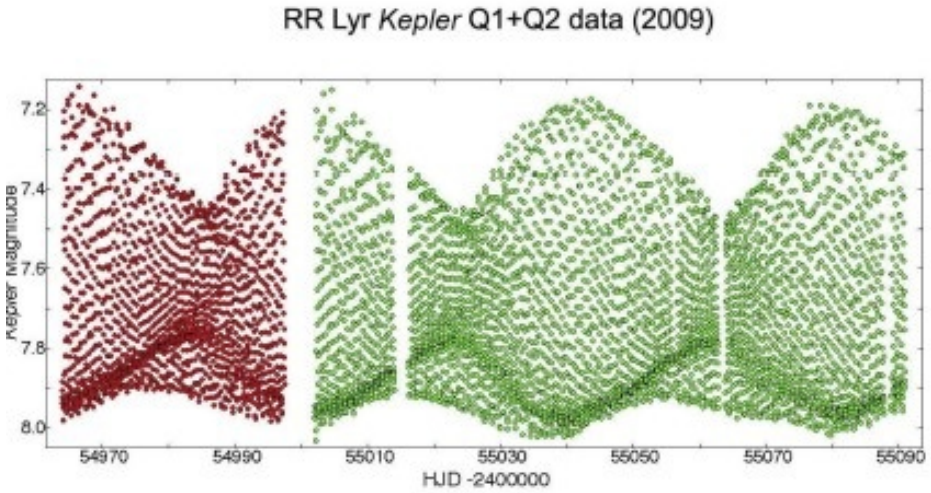
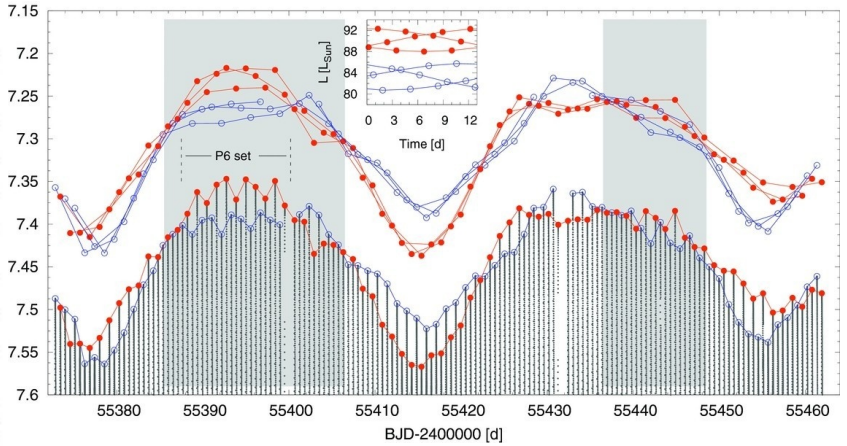


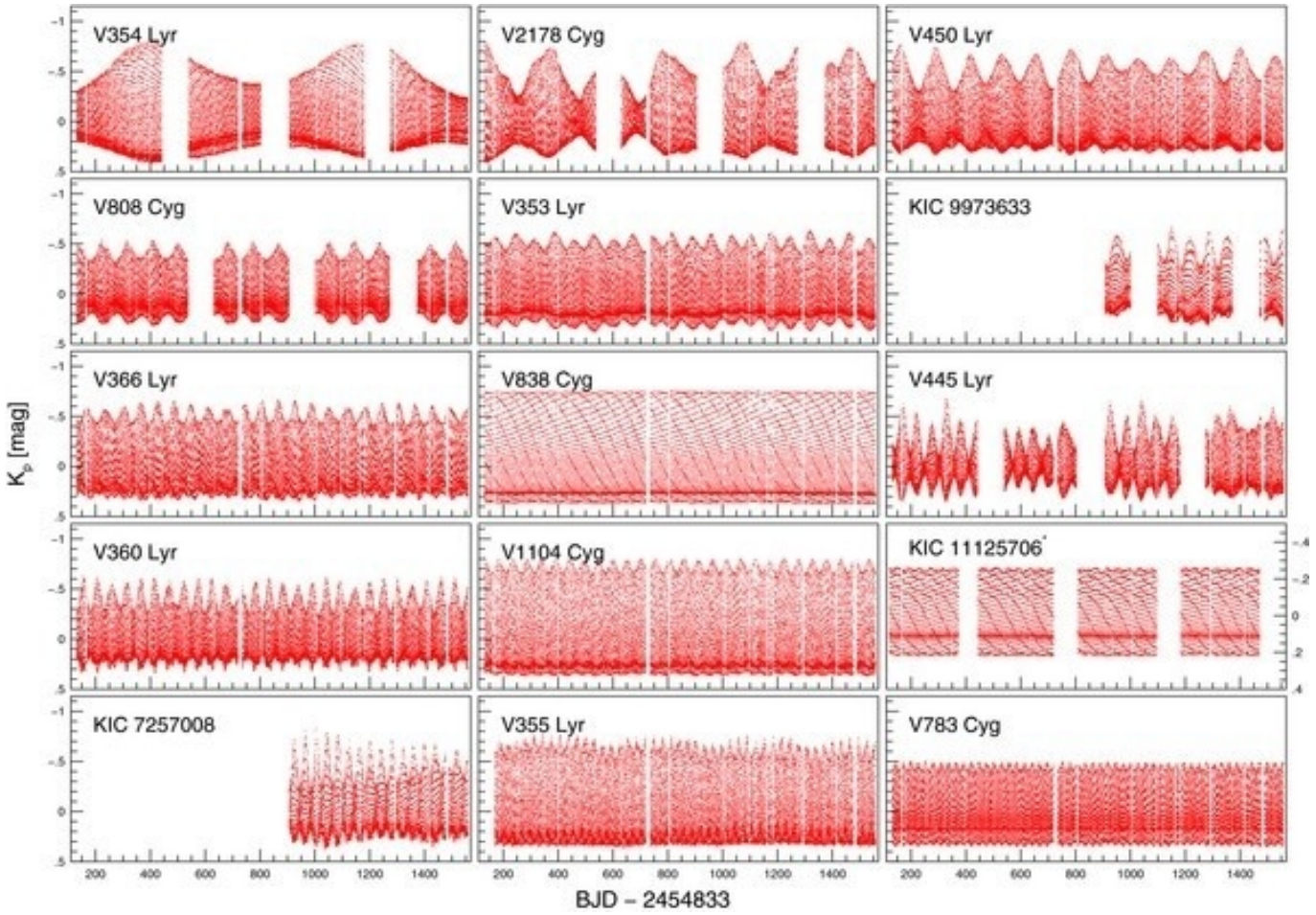
Fig. 1 Top: A *Kepler* light curve of the Blazhko star V808 Cygni (KIC 4484128) in quarters Q1 and Q2 showing 133 d of observations. Gaps in the data are due to safe mode events of the spacecraft and planned data download periods. The Blazhko cycle is around 90 d. **Bottom**: Magnification



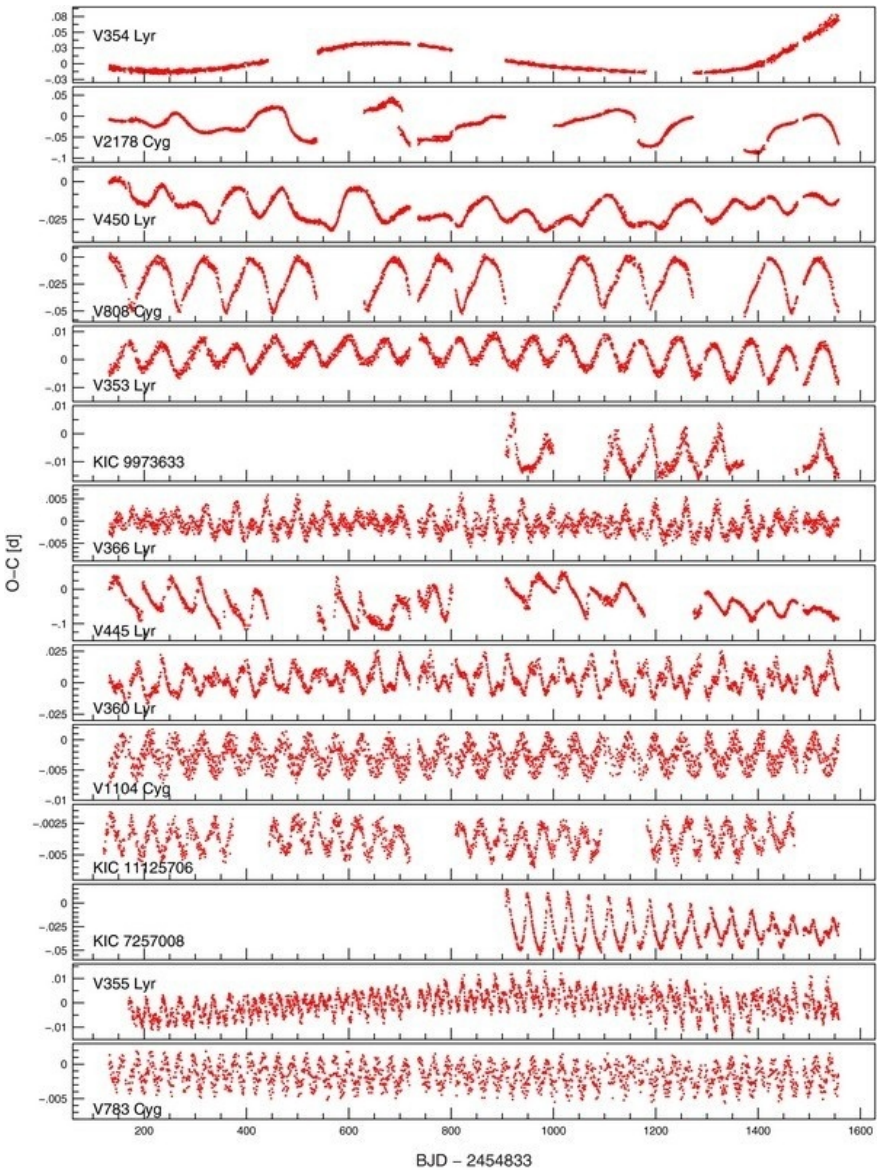


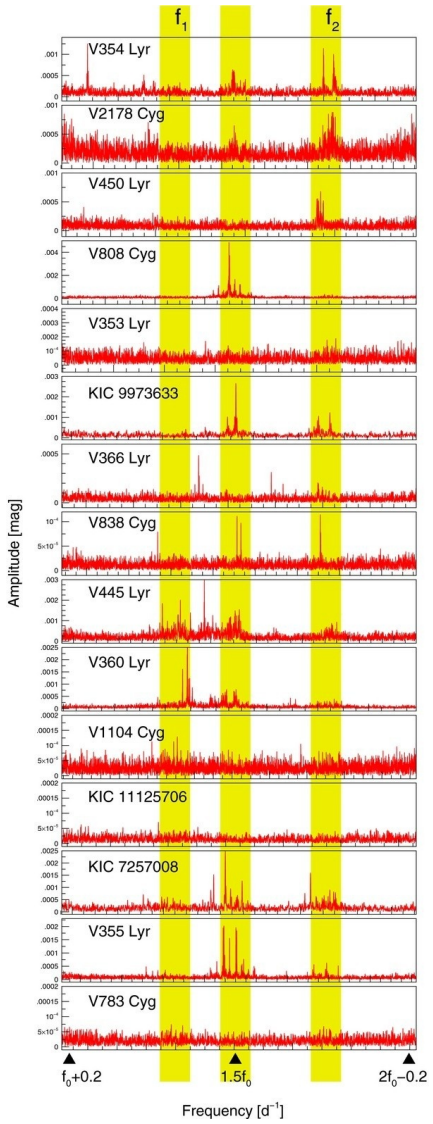
RR Lyrae-csillagok a Kepler-mezőben

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).



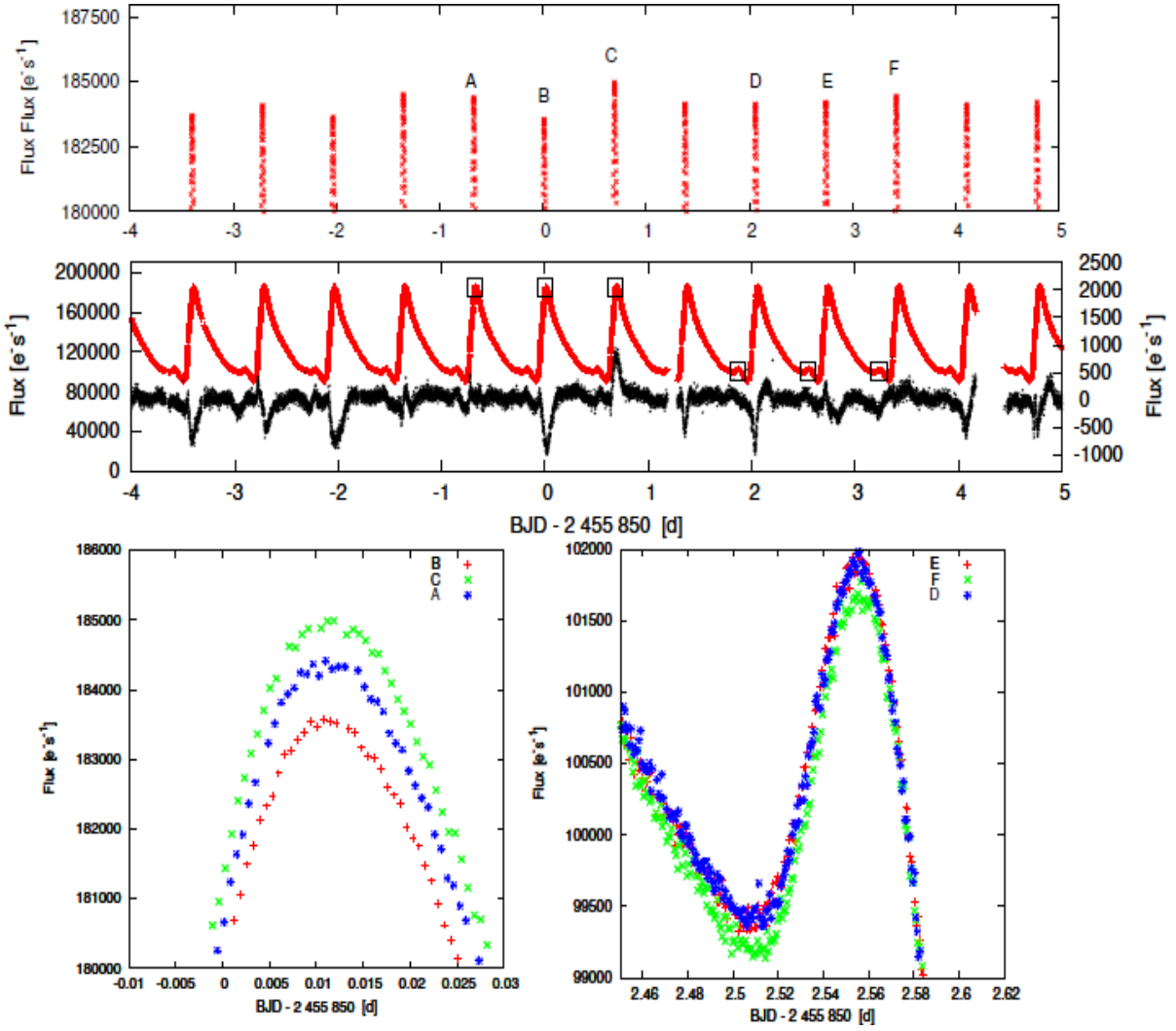
RR Lyrae-csillagok a Kepler-mezőben





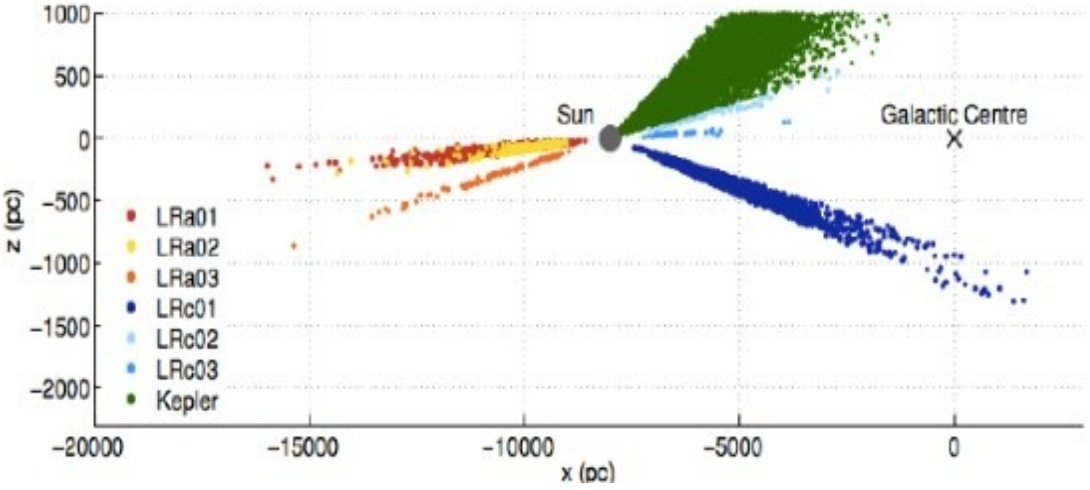
RR Lyrae-csillagok a Kepler-mezőben

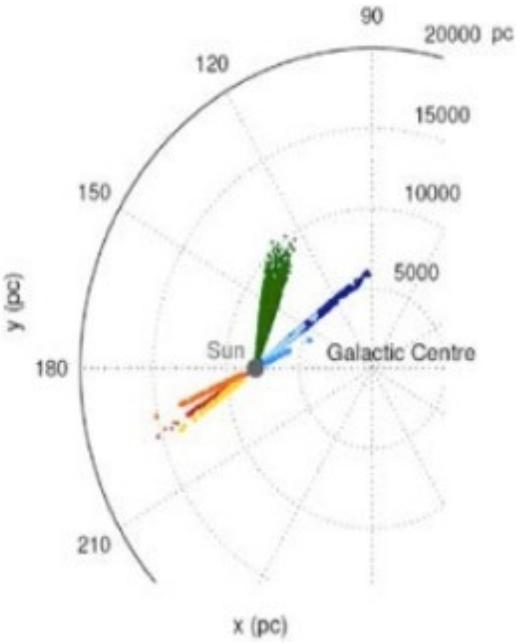
A nem modulált RR Lyrae csillagok fénygörbéje sem stabil: ciklusról ciklusra változás tapasztalható, mint a klasszikus cefeidák esetében (Benkő et al., 2019).



Vörös óriások – Kepler és CoRoT

Asztroszeizmológiával vizsgált vörös óriáscsillagok galaktikus eloszlása.
Több száz csillag fénygörbéjét elemezték asztroszeizmológiai módszerekkel.
Kepler: zöld, CoRoT: 6 féléves adatsor színkódolással.
Balra a fősíkra merőleges eloszlás, jobbra a fősíkra vetített eloszlás.



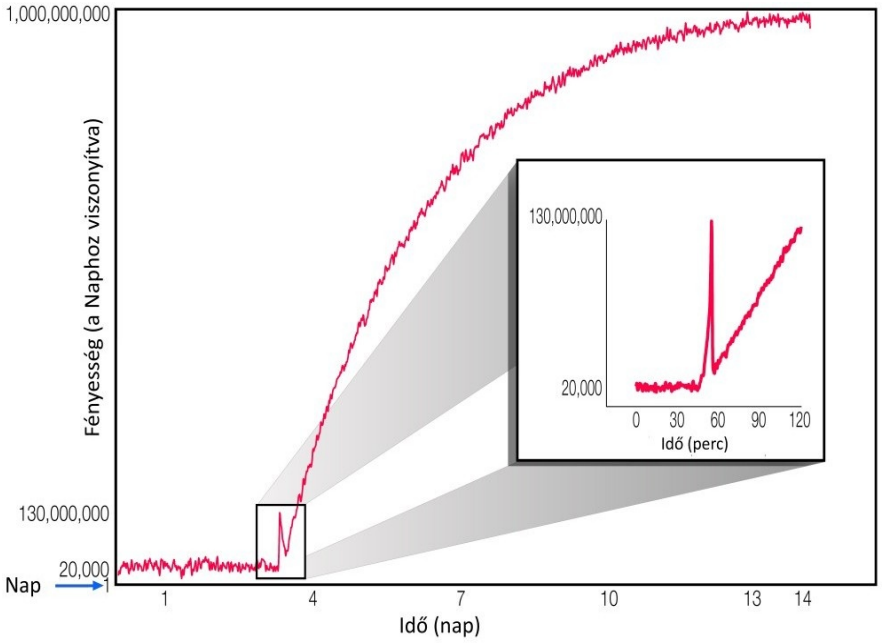


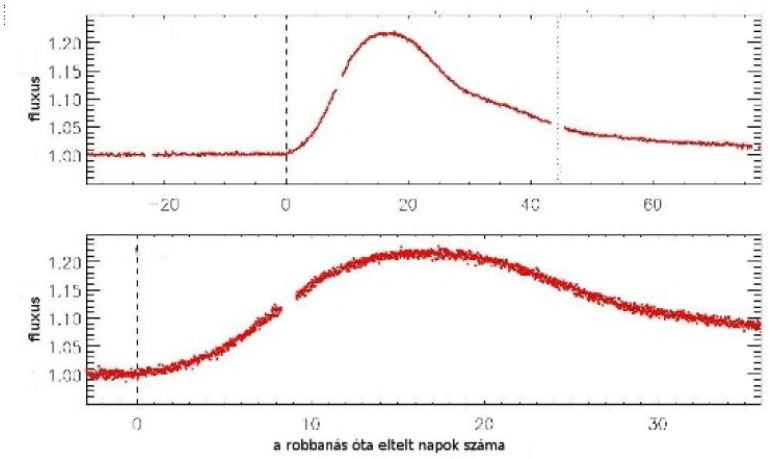
Szupernóva-robbanások Kepler-fotometriája

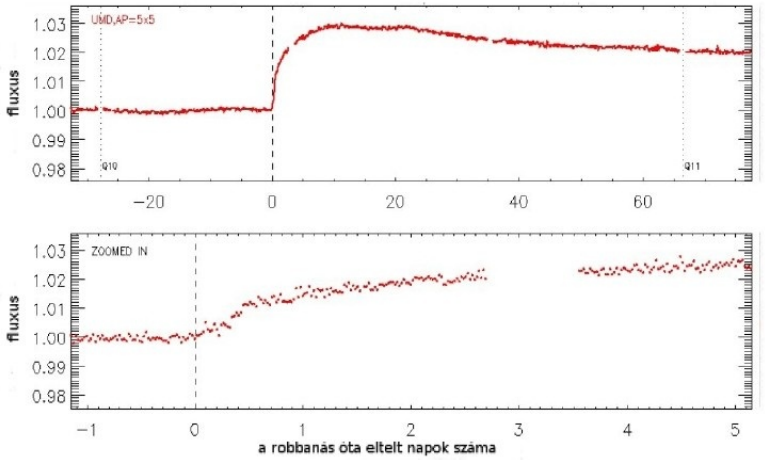
Hat szupernóvát fedeztek fel a Kepler-adatokból. SNIa és SNII is van köztük. Egyedülálló a folyamatos fénygörbe, és a kitörés kezdetének megfigyelése.

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.

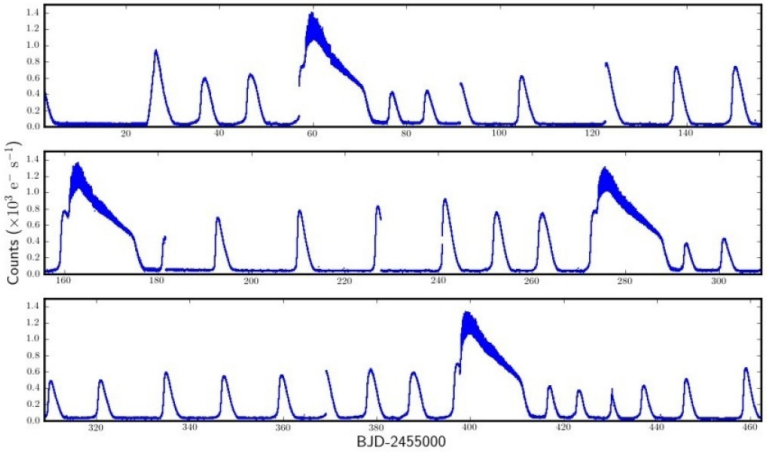




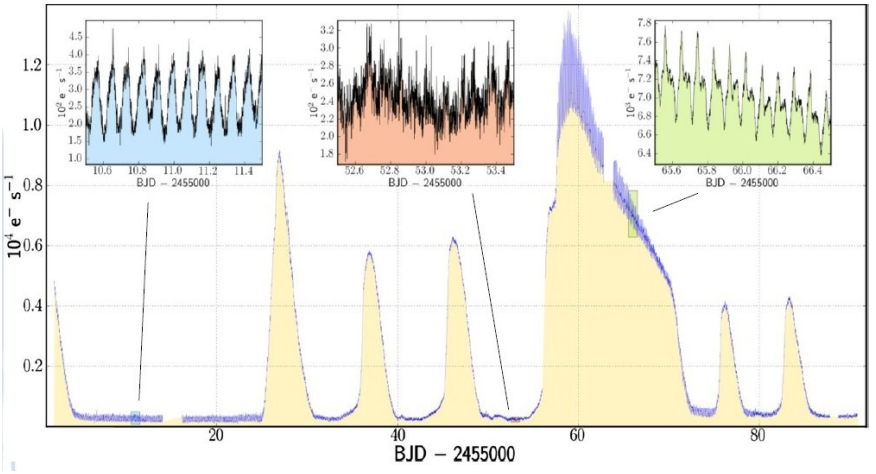


Más típusú változócsillagok a Keplerrel

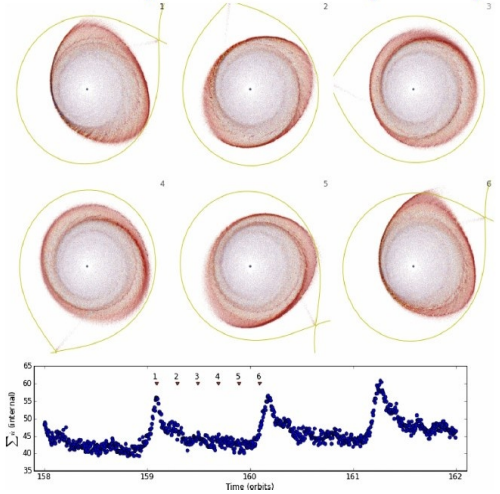
V344 Lyr SU UMa



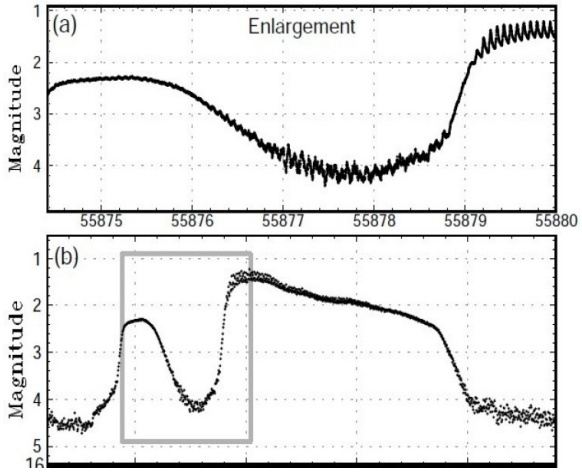
V344 Lyr SU UMa



V344 Lyr SU UMa - superhumps



V344 Lyr SU UMa - superhumps



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

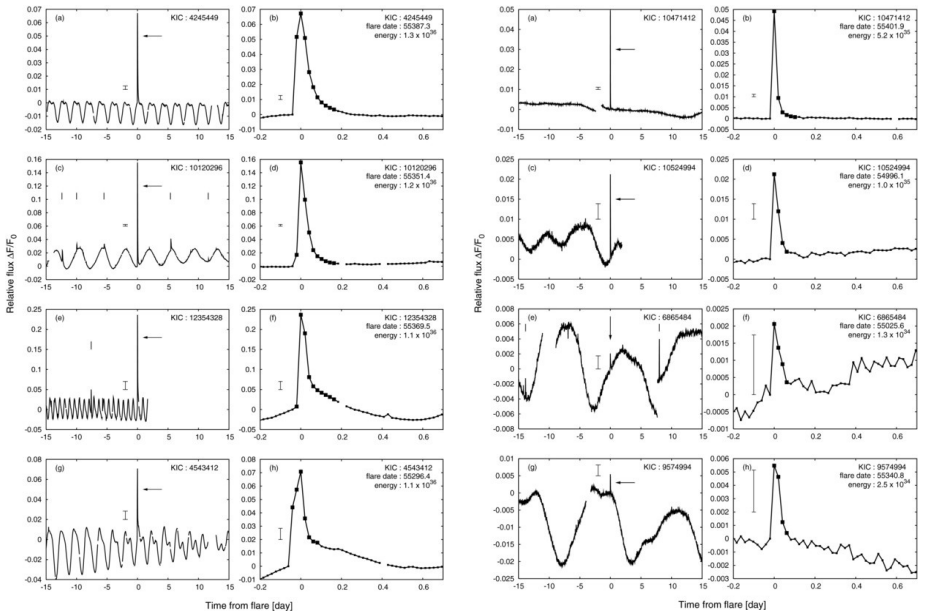
Más típusú változócsillagok a Keplerrel

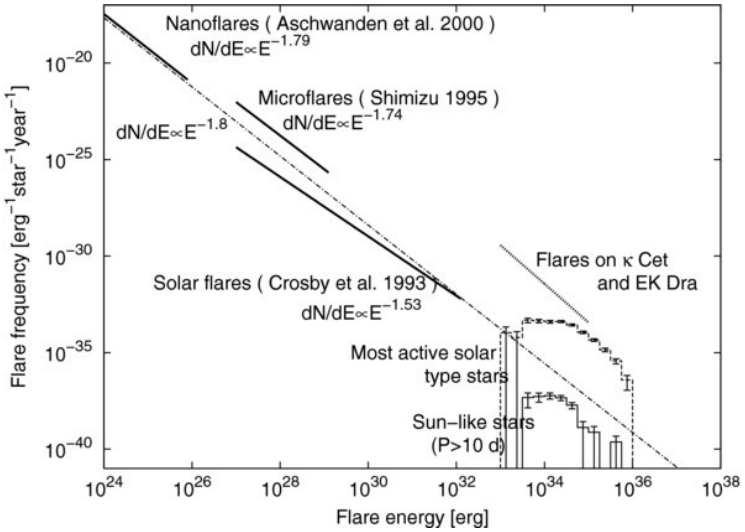
Szuperflerek (10^{34}-10^{35} erg energiával) Nap-típusú csillagokon

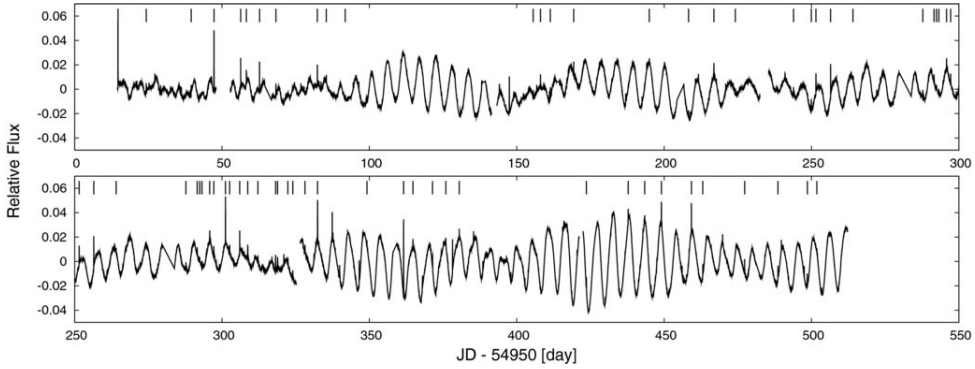
Példa: KIC10422252

500 nap alatt 365 szuperfler

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

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

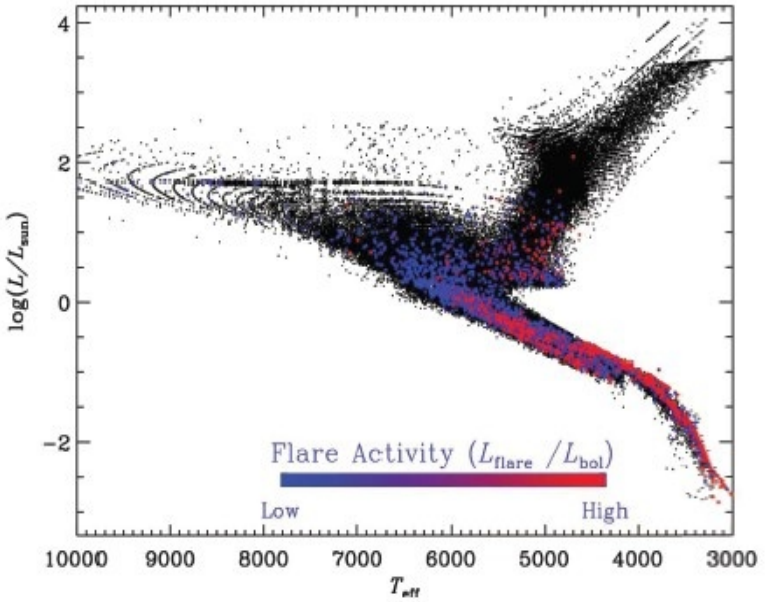


FIG. 4.— The flare activity across the H-R diagram. Black dots denote over 200,000 Kepler stars. Colorful dots are the 3420 flaring stars. The color changes from blue to red along with the increase of the flare activity. The luminosity of stars are estimated by tem-

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
Kepler 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]
Kepler 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 *Kepler* '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).

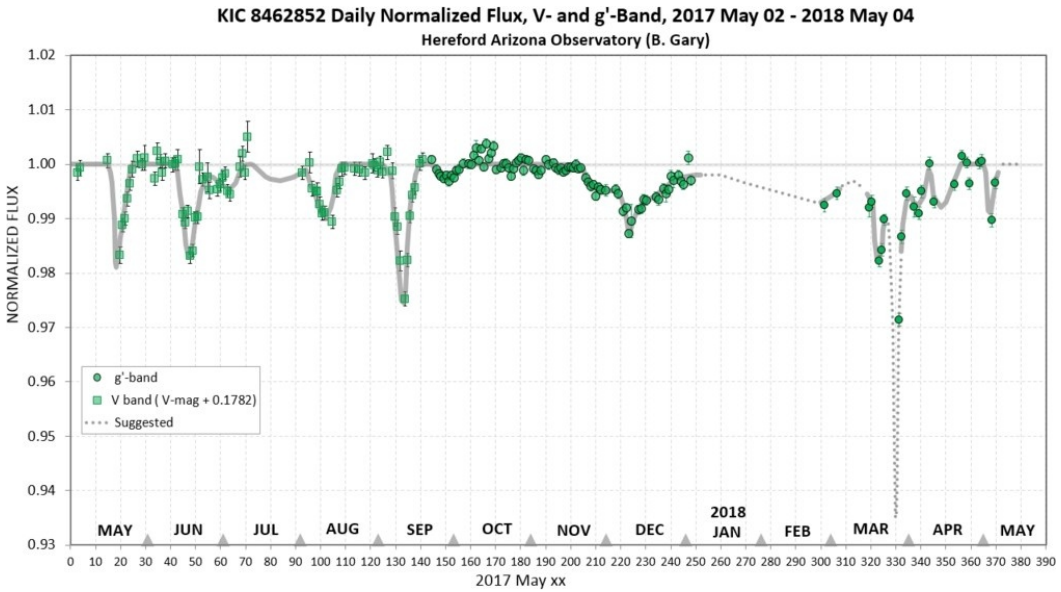
Négy esetben kimutatható a periodikus fényességváltozás, feltehetőleg a kettősség okozza. Jóval nagyobb a kettőscsillagok gyakorisága a planetáris ködök centrális csillagainál, mint azt korábban gondolták.

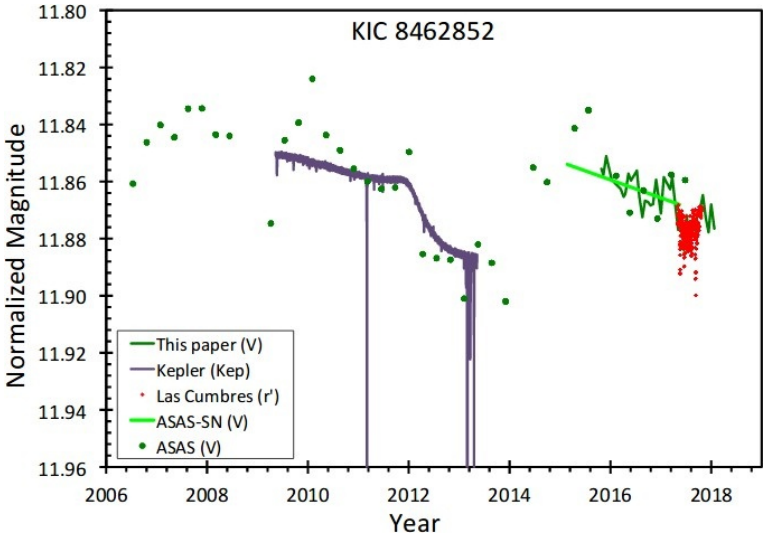
A Boyaijan-csillag

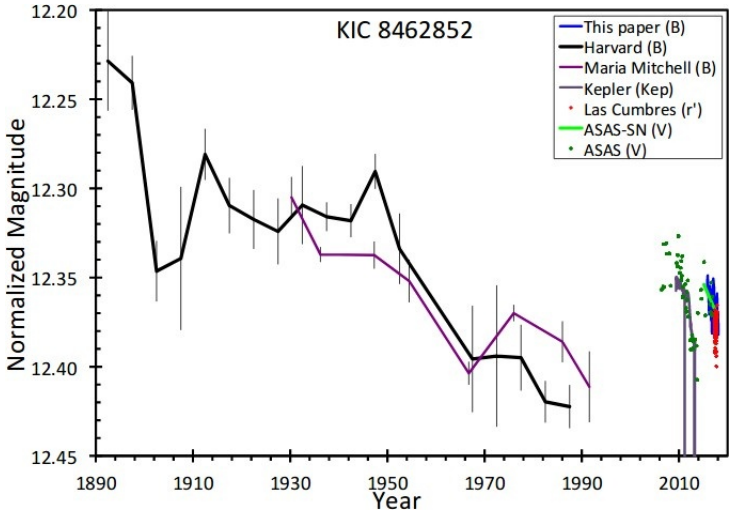
KIC 8462852: fősorozati F3 színképtípusú csillag.

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

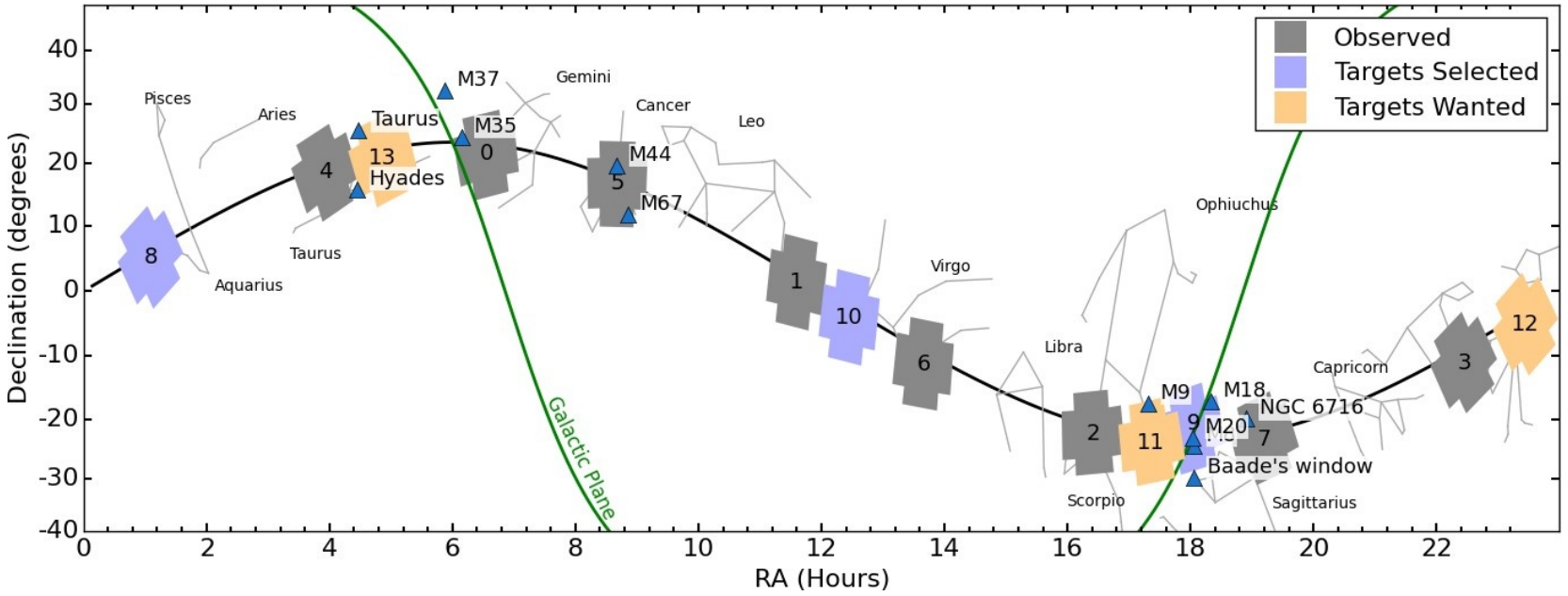
Porszemcsékből álló felhők okozhatják, nem civilizációs eredetű üzenet.







A Kepler folytatása: K2



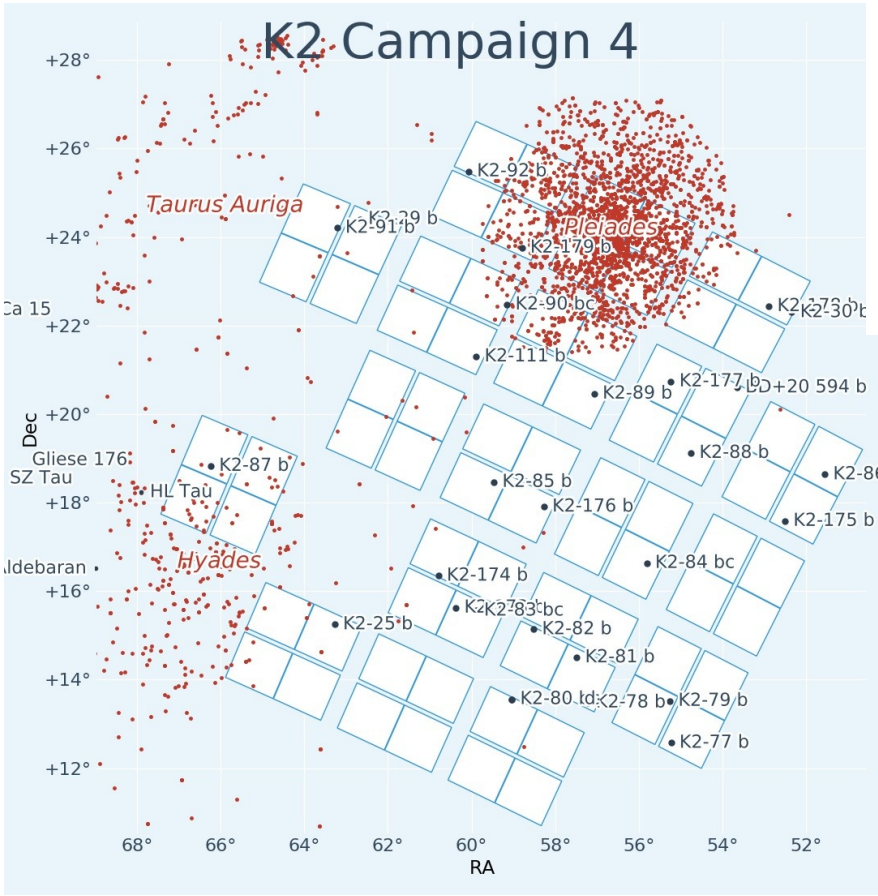
K2: ekliptika menti észlelések 300 ppm pontossággal 2018. októberig.

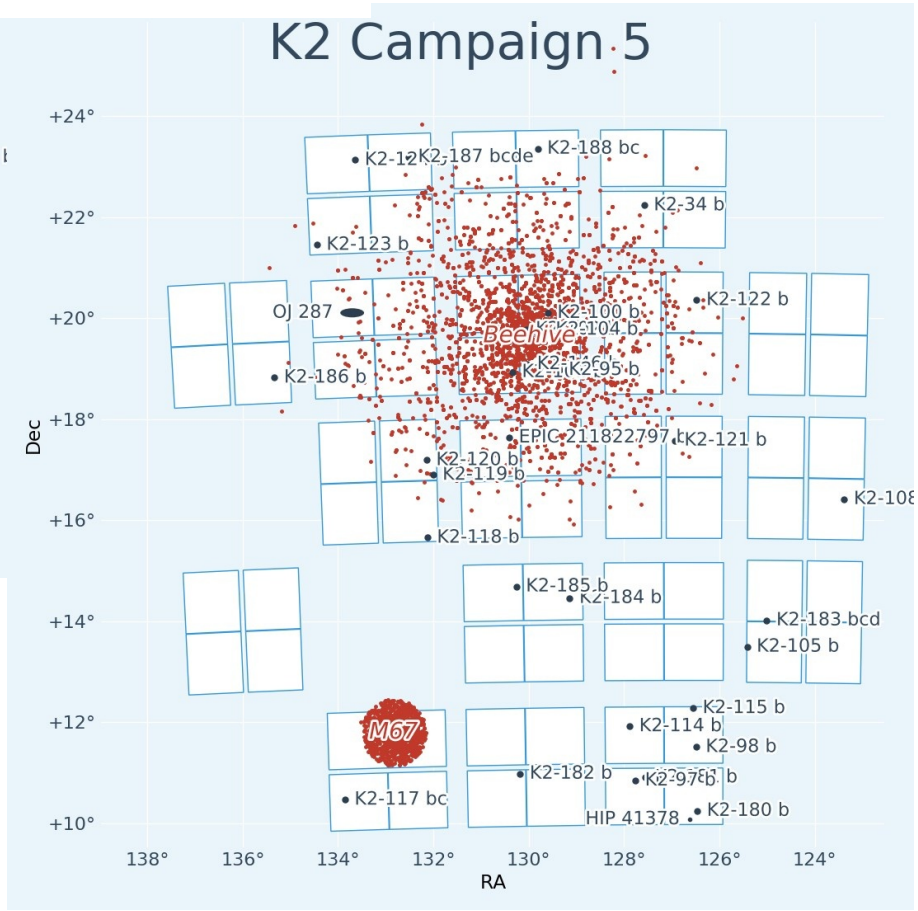
A mérendő csillagokat pályázatok alapján választották ki. A K2 tudományos potenciálja jóval gazdagabb, mint az eredeti Kepler-programé. Mindenféle terület sorra került: fiatal csillaghalmazok (Plejádok, Hyadok, Praesepe), csillagkeletkezési régiók (a Sco-ban 11 millió éves), galaxisokban gazdag mezők.

Az 1. kampány adataiból 2500 változócsillagot katalogizáltak. Az adatok kezdettől fogva 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
0	2014 Mar 08	2014 May 27	2014 Sep 08	06:33:11	+21:35:16	Near Gal. Anti-center, M35, NGC 2158
1	2014 May 30	2014 Aug 21	2014 Dec 23	11:35:46	+01:25:02	North Galactic Cap
2	2014 Aug 23	2014 Nov 13	2015 Mar 16	16:24:30	-22:26:50	Near Gal. Center, M4, M80, Upper Sco, ρ Oph
3	2014 Nov 14	2015 Feb 03	2015 Jul 17	22:26:40	-11:05:48	South Galactic Cap, Neptune
4	2015 Feb 07	2015 Apr 23	2015 Sep 04	03:56:18	+18:39:38	M45 (Pleiades), NGC1647, Hyades
5	2015 Apr 27	2015 Jul 10	2015 Oct 31	08:40:38	+16:49:47	M44 (Beehive), M67
6	2015 Jul 14	2015 Sep 30	2016 Feb 12	13:39:28	-11:17:43	North Galactic Cap
7	2015 Oct 04	2015 Dec 26	2016 Apr 20	19:11:19	-23:21:36	Near Galactic Center, NGC 6717, Pluto
8	2016 Jan 03	2016 Mar 23	2016 Jul 04	01:05:21	+05:15:44	Uranus, IC1613
9†	2016 Apr 21	2016 Jul 01	2016 Sep 30	18:01:25	-21:46:47	Gal. Center, M21, M18, M25, M8, Mars
10	2016 Jul 06	2016 Sep 20	2016 Dec 20	12:27:07	-04:01:38	North Galactic Cap
11	2016 Sep 24	2016 Dec 08	2017 Jun 30	17:21:33	-23:58:33	Galactic Center, Saturn
12	2016 Dec 15	2017 Mar 04	2017 Jul 31	23:26:38	-05:06:08	South Galactic Cap, Chiron, Mars
13	2017 Mar 08	2017 May 27	2017 Aug 28	04:51:11	+20:47:11	Hyades, Taurus-Auriga
14	2017 May 31	2017 Aug 19	2017 Nov 20	10:42:44	+06:51:06	North Galactic Cap, Wolf 359, WASP-104
15	2017 Aug 23	2017 Nov 20	2018 Mar 14	15:34:28	-20:04:44	Upper Sco, GW Lib, HP Lib
16†	2017 Dec 07	2018 Feb 25	2018 May 30	08:54:50	+18:31:31	M44 (Beehive), M67
17†	2018 Mar 01	2018 May 08	2018 Aug 16	13:30:12	-07:43:16	Galaxies.
18	2018 May 12	2018 Jul 02	2018 Oct 24	08:40:39	+16:49:40	M44 (Beehive), M67

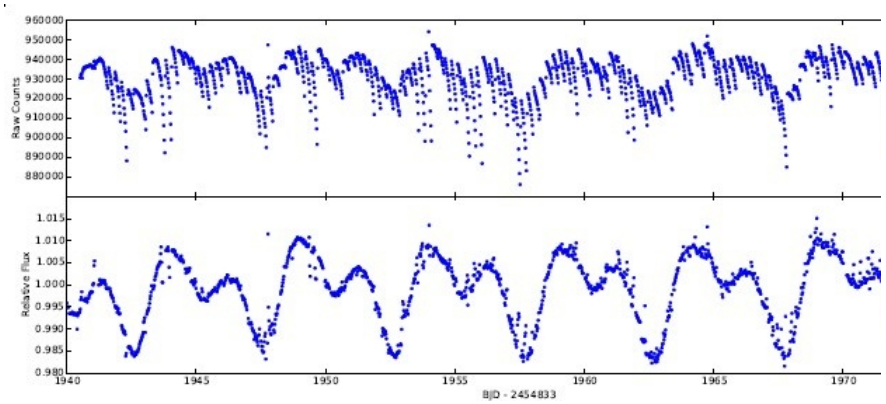
†**Note:** fields 9, 16, and 17 are forward-facing campaigns, for which simultaneous observations from the ground are possible throughout the duration of the campaign.

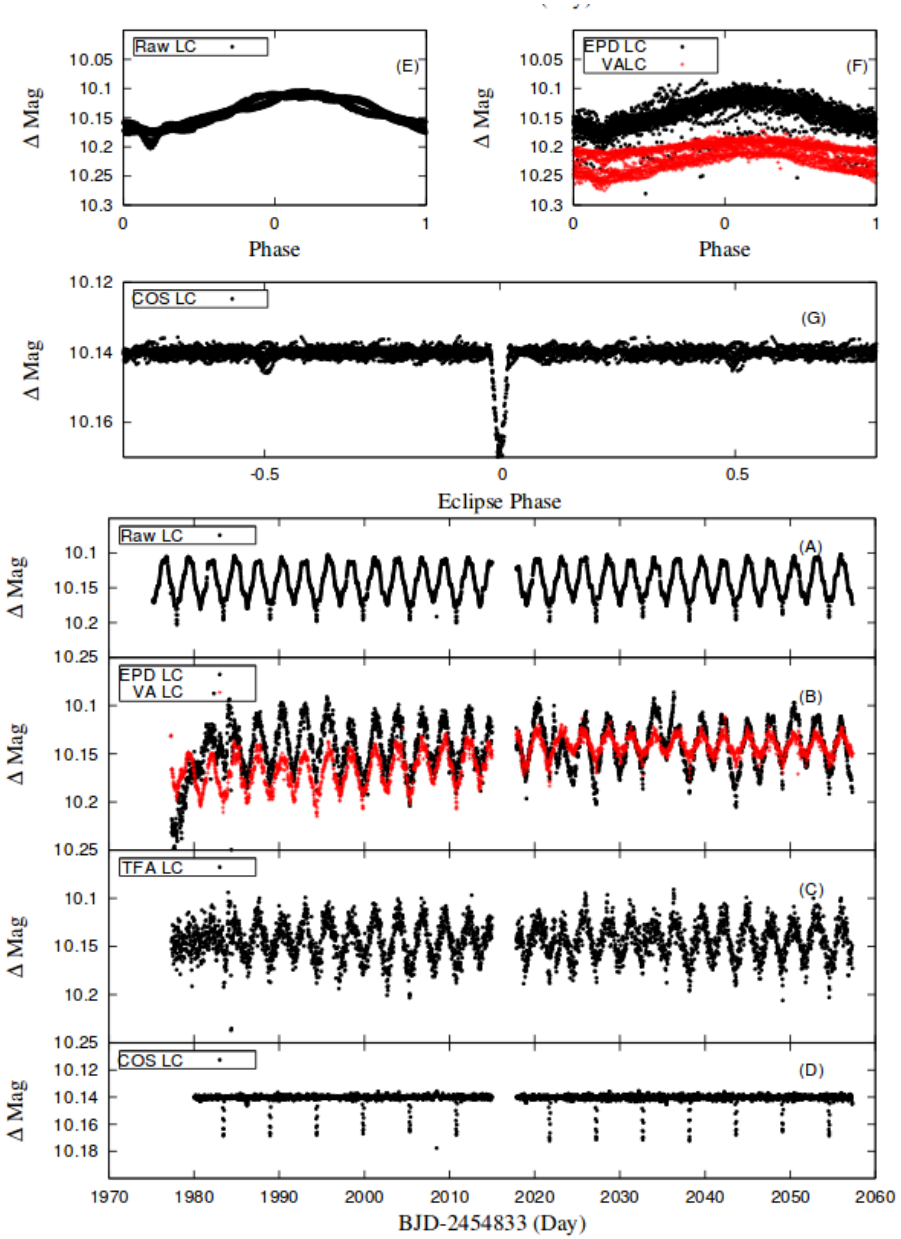
A K2 adatainak kezelése

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

Fontos a trendszűrés (bal alsó ábra).

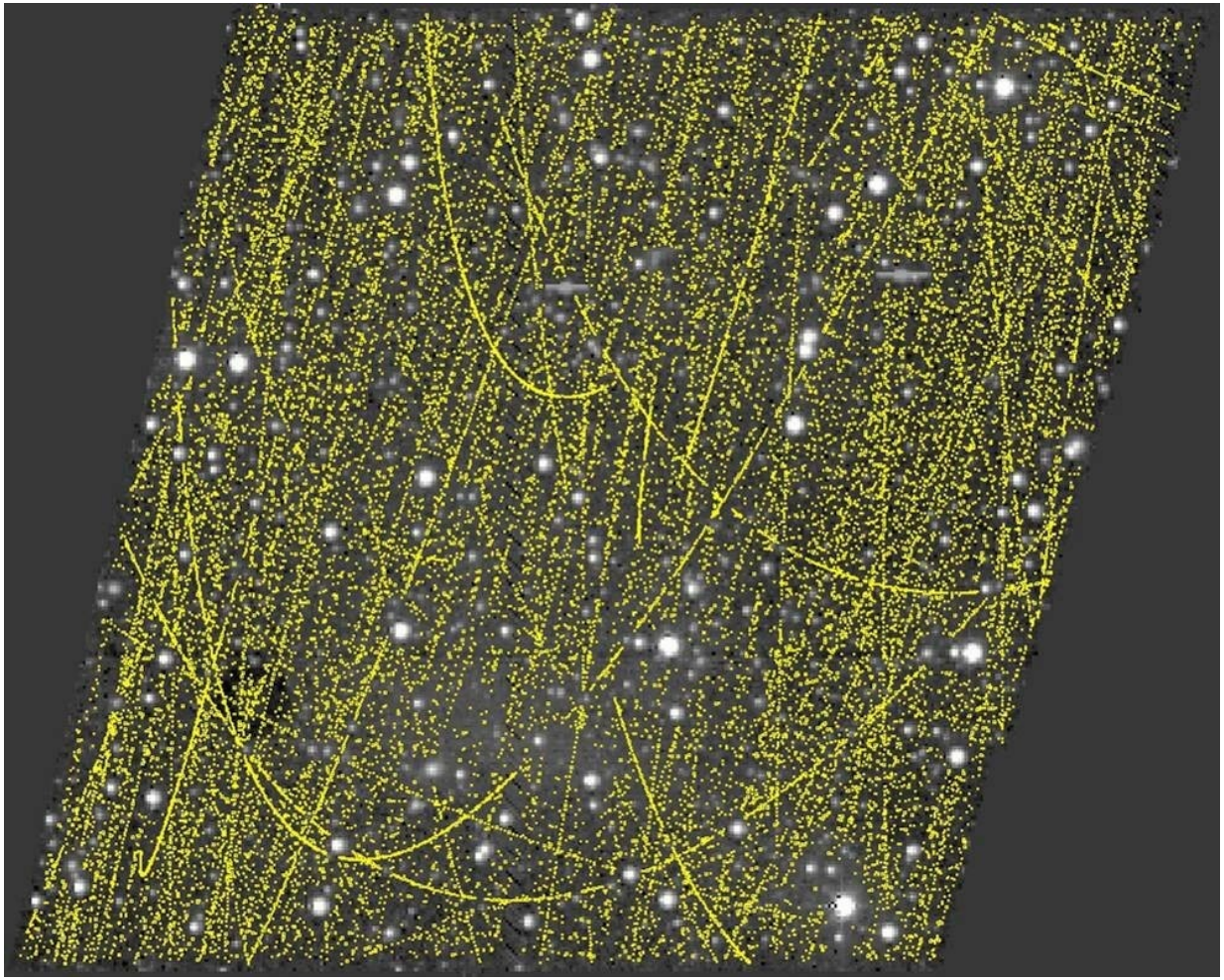
Apertúrafotometriával RAWLC, utána EPD (external parameter decorrelation), TFA (trend filtering), COS (cosinus filtering).





Érdekes eredmények a K2 méréseiből

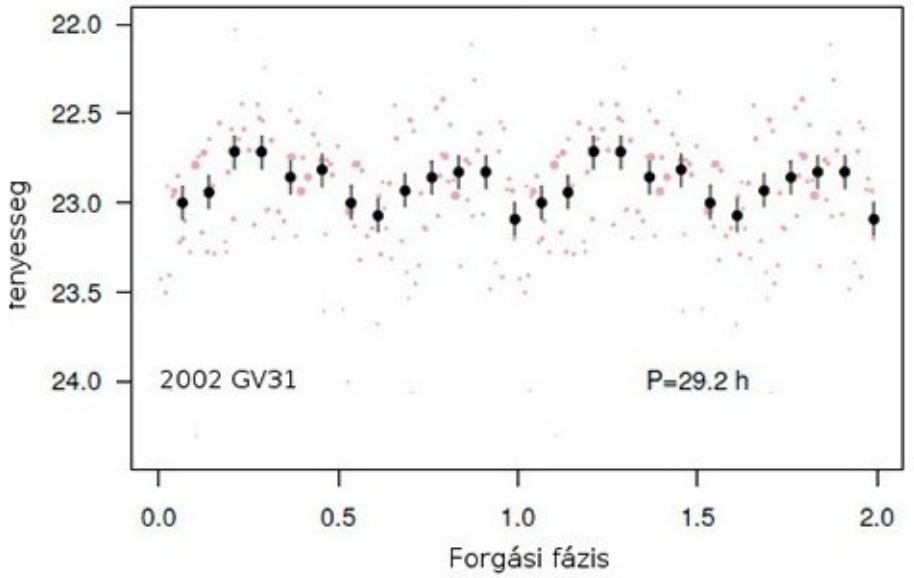
Magyar kutatók kisbolygók és Kuiper-övbeli objektumok fotometriai adatait is ki tudták nyerni és feldolgozni. A képen 600 kisbolygó pályarészlete látszik.

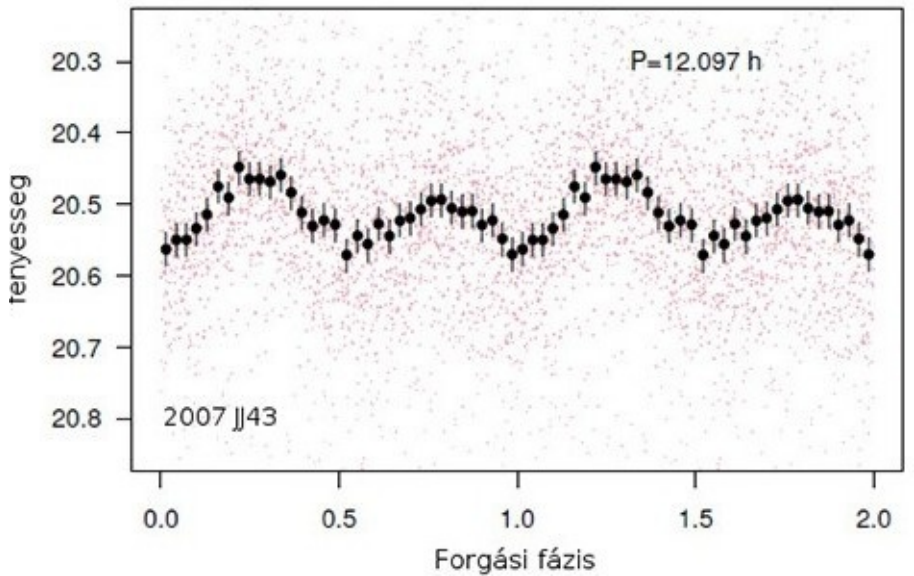


Érdekes eredmények a K2 méréseiből

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.

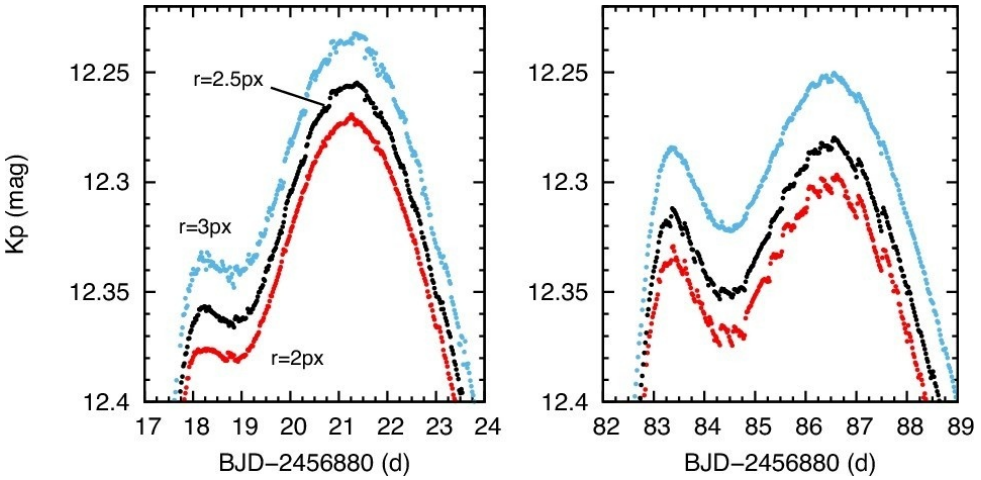


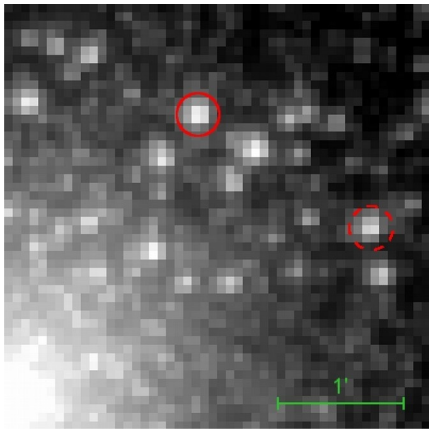


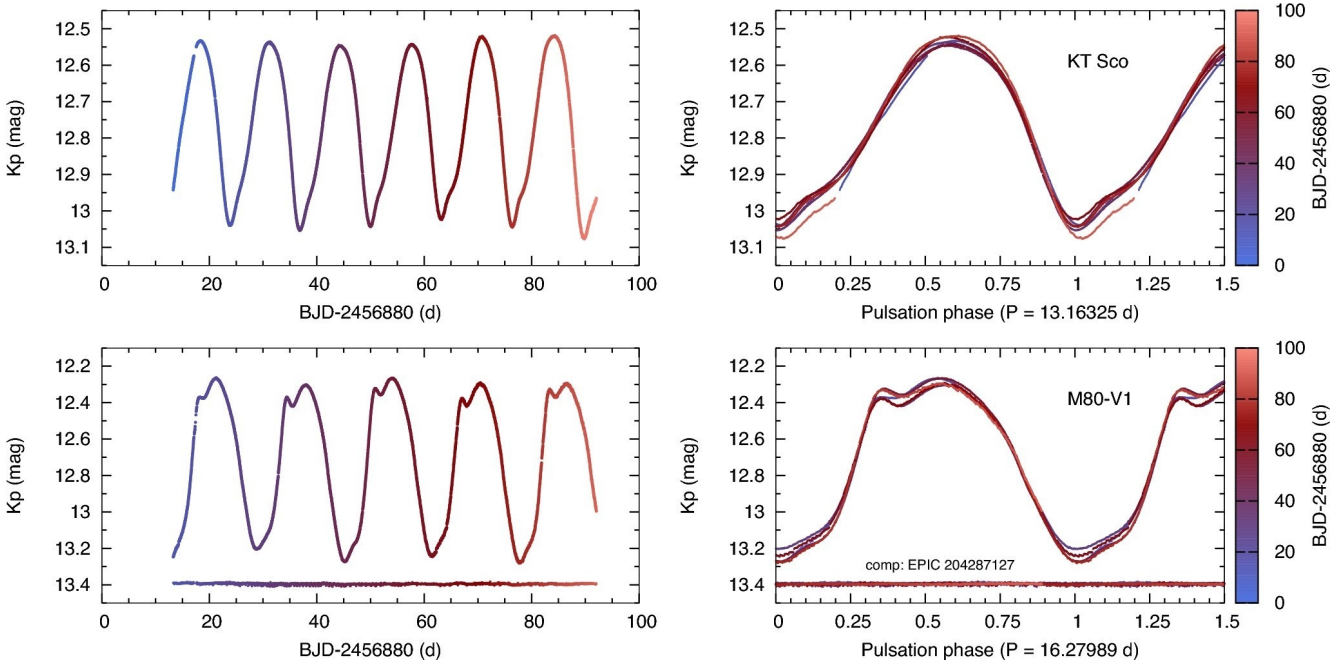
Érdekes eredmények a K2 méréseiből

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 periódusketszereződés lépett fel. (Plachy et al., 2017)

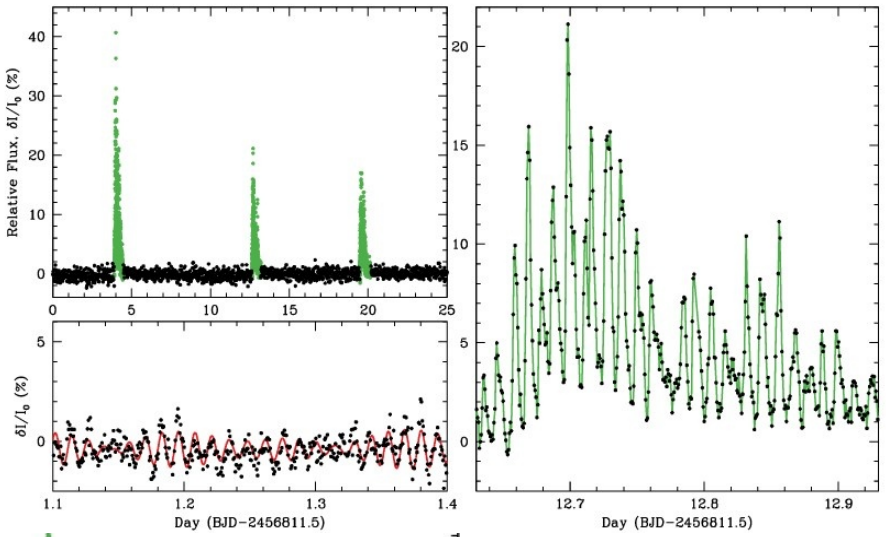


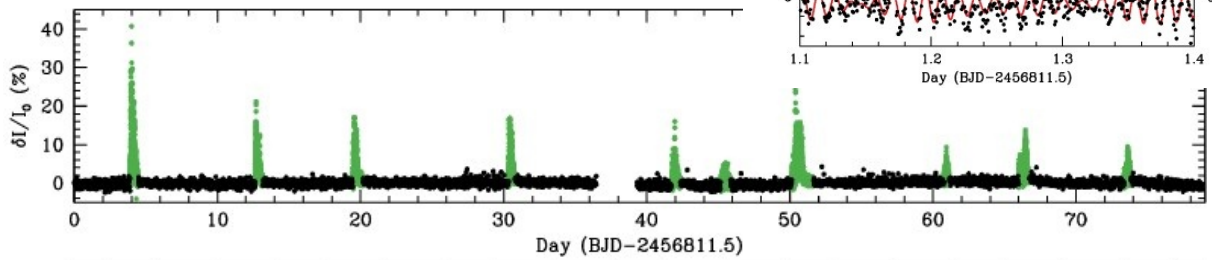


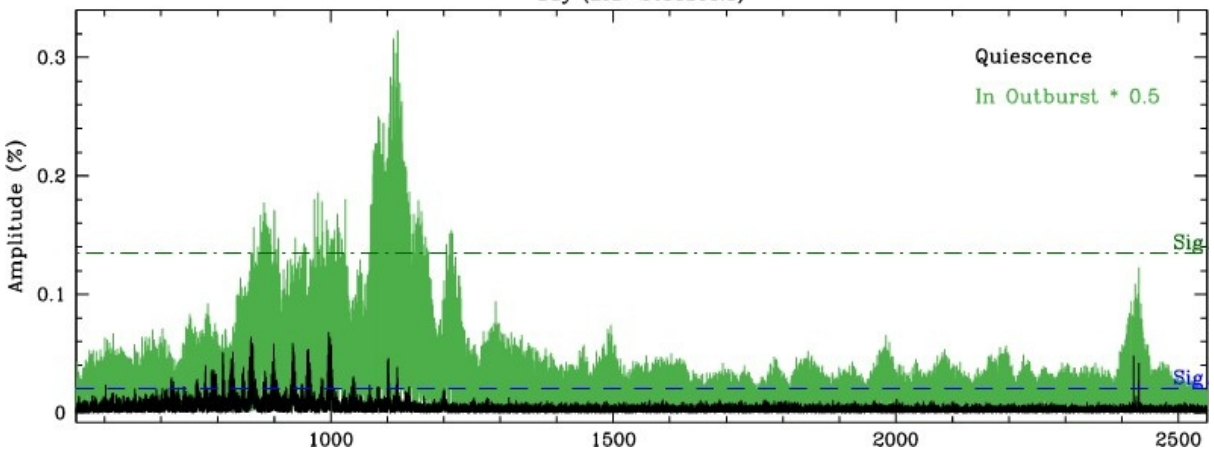


Érdekes eredmények a K2 méréseiből

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

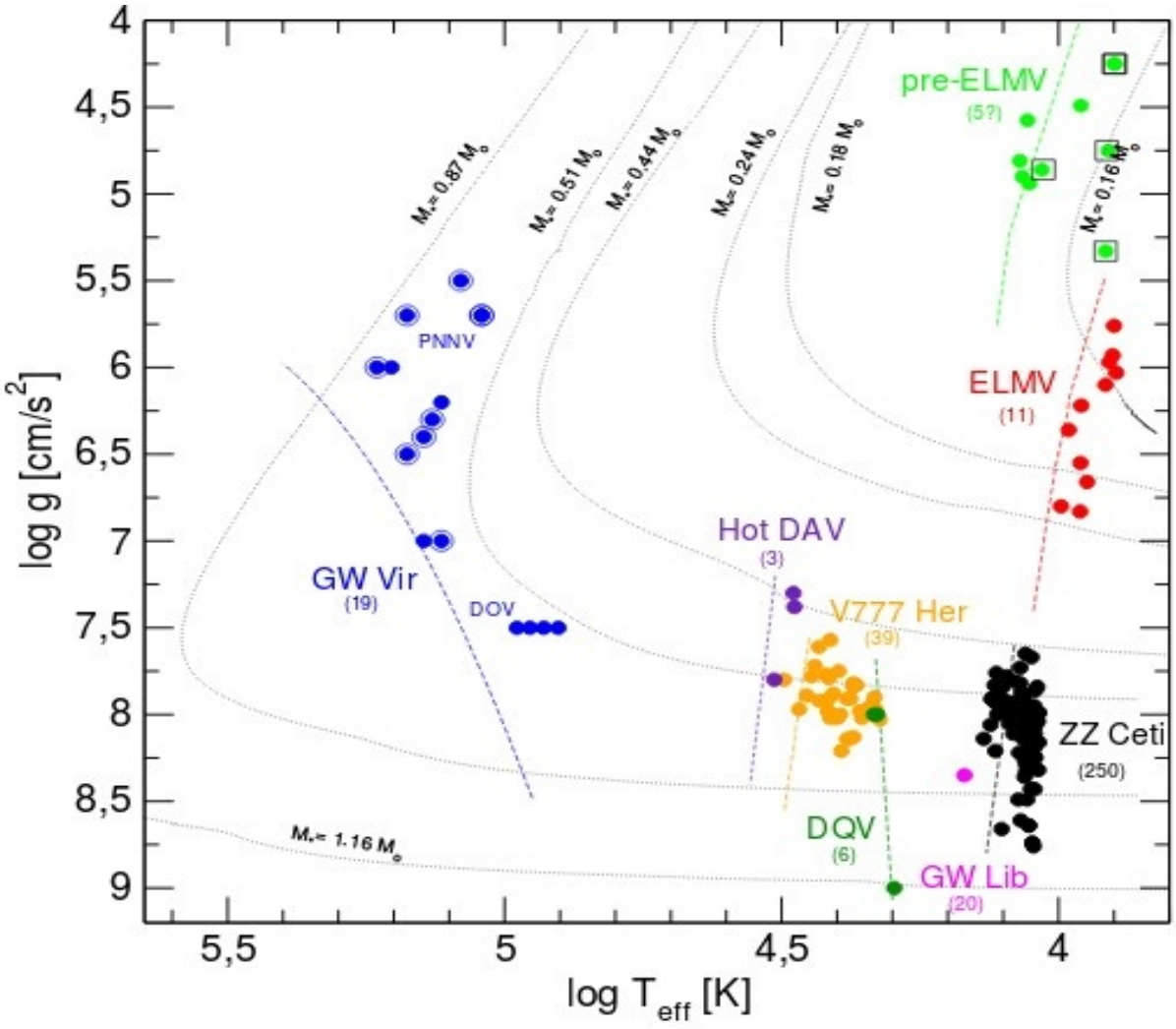
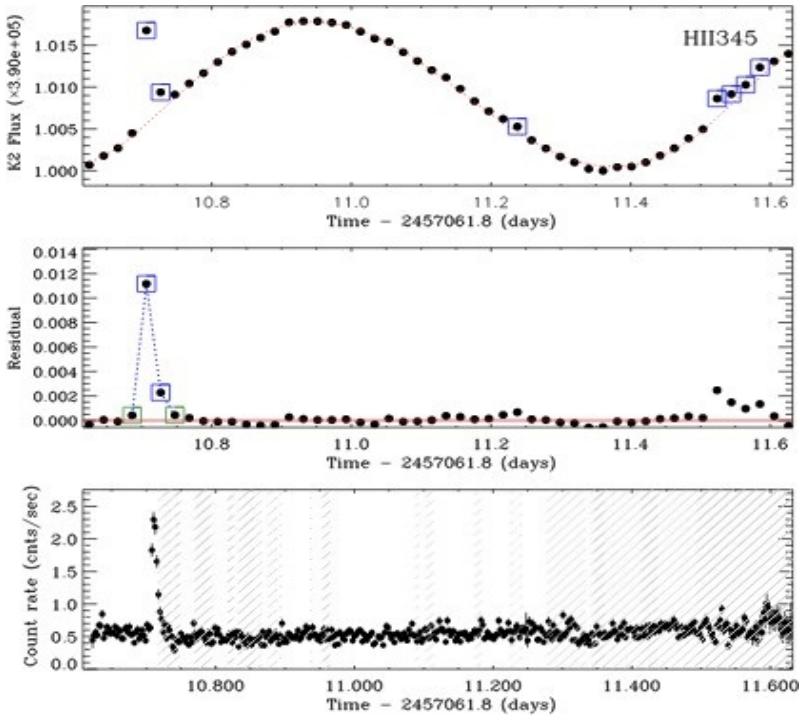
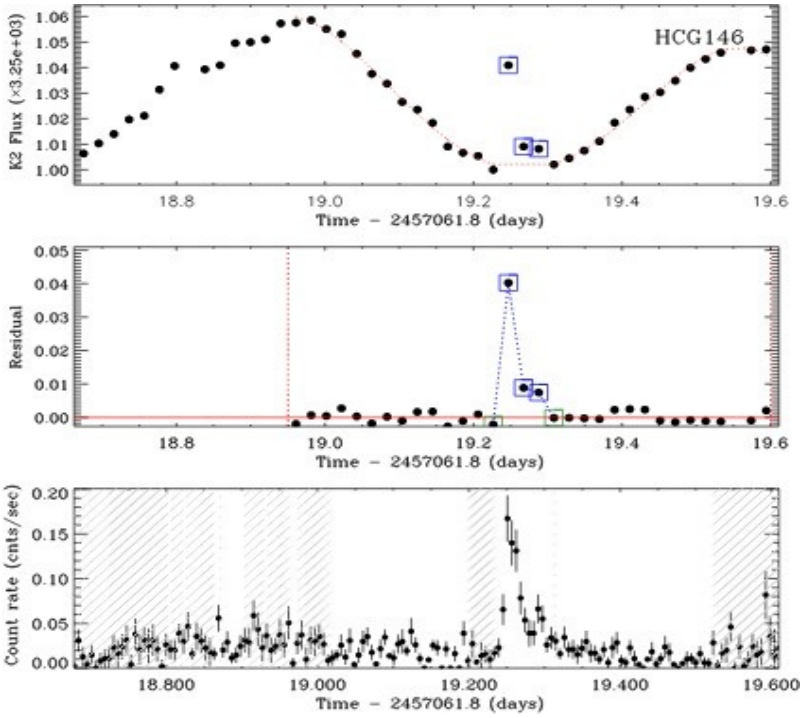


Figure 2. Confirmed and tentative sub-classes of pulsating white-dwarf and pre-white-
stars (circles of different colors) in the $\log T_{\rm eff} - \log g$ diagram (adapted from Córsico

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

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

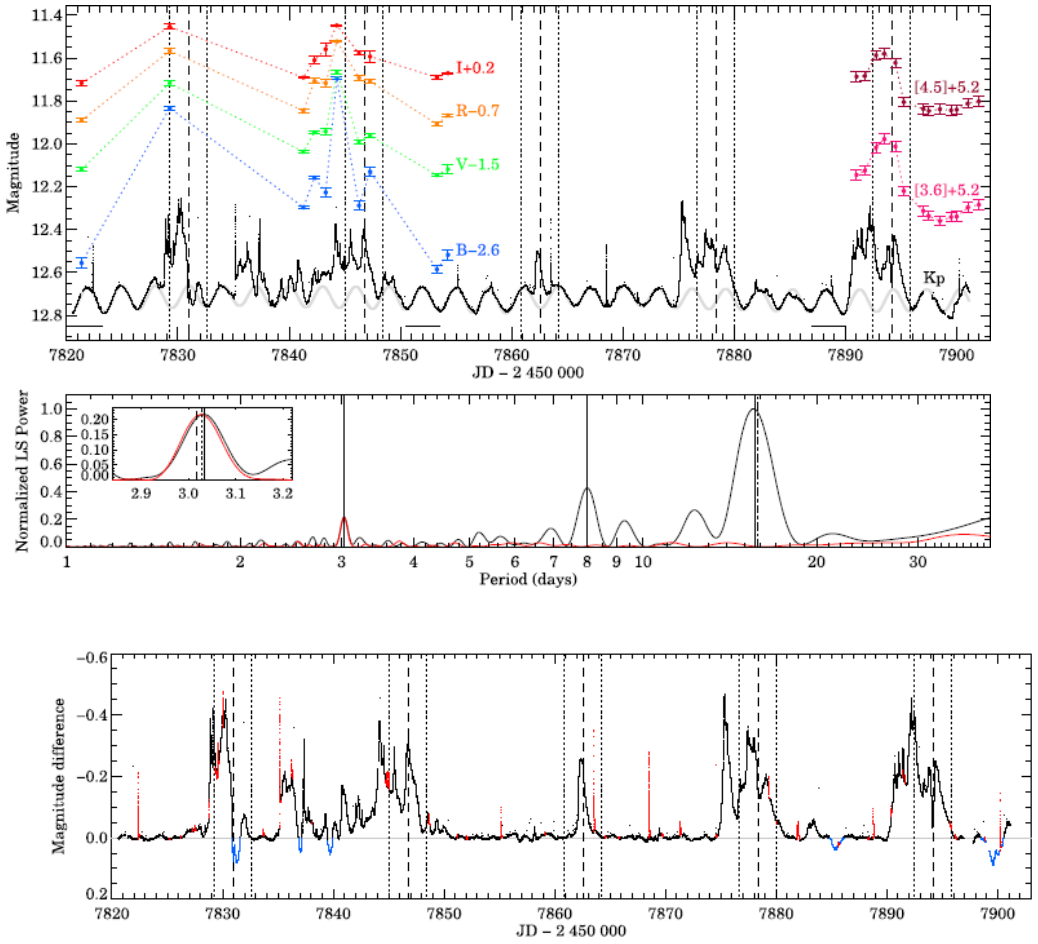


Figure 4. *K2* light curve of DQ Tau after removing the sinusoidal variation due to rotational modulation. Points highlighted in red color indicate the identified flares (Section 4.3), while the blue points mark possible "dipper" events (Section 5.5). As in Figure 2, dashed lines mark the periastrons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

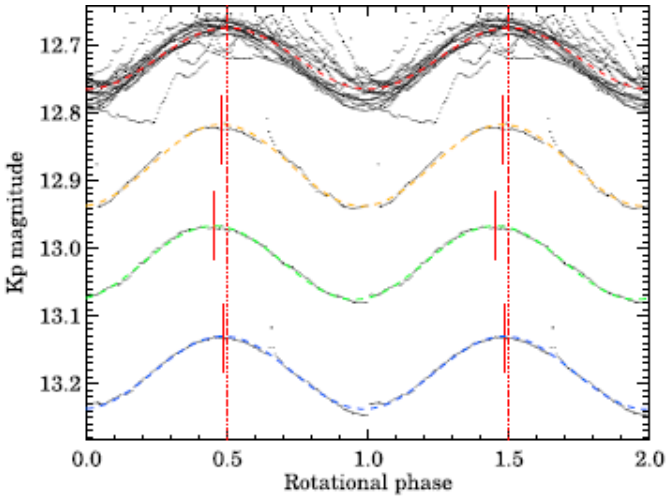
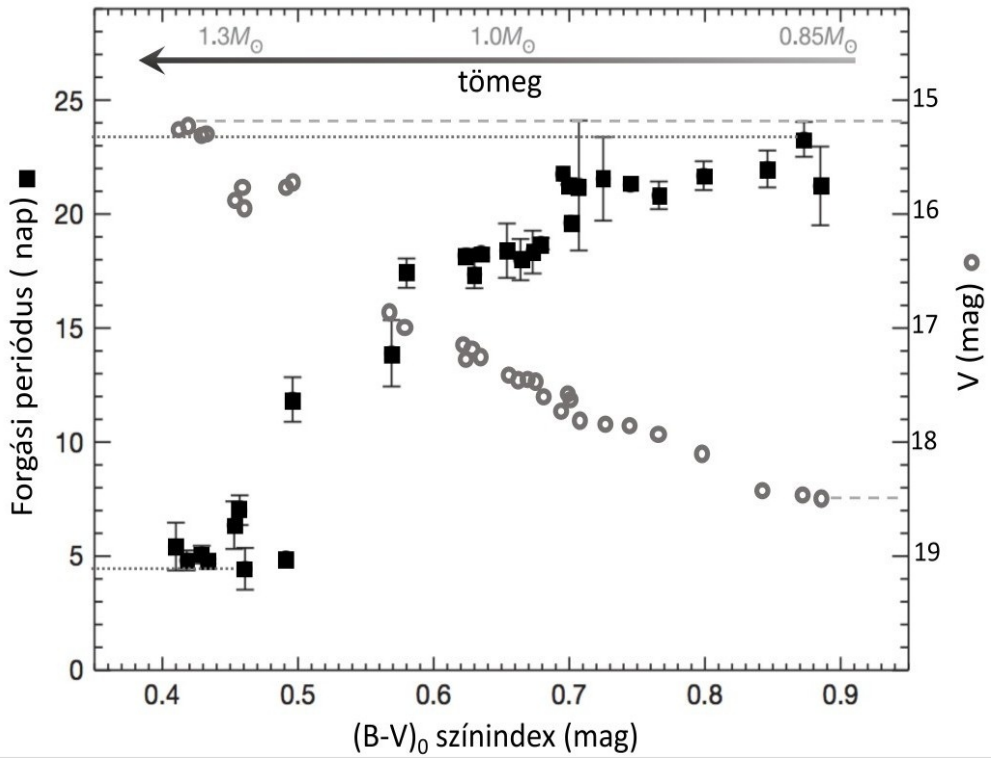


Figure 3. Phase-folded long cadence *K2* light curve of DQ Tau using $P = 3.017$ days, together with a sine function fitted for the full data set (red dashed curve). The data points and sine fits below display three single cycles, between JD−2 450 000 = 7820.23–7823.26, 7850.56–7853.59, and 7886.95–7889.99.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

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.

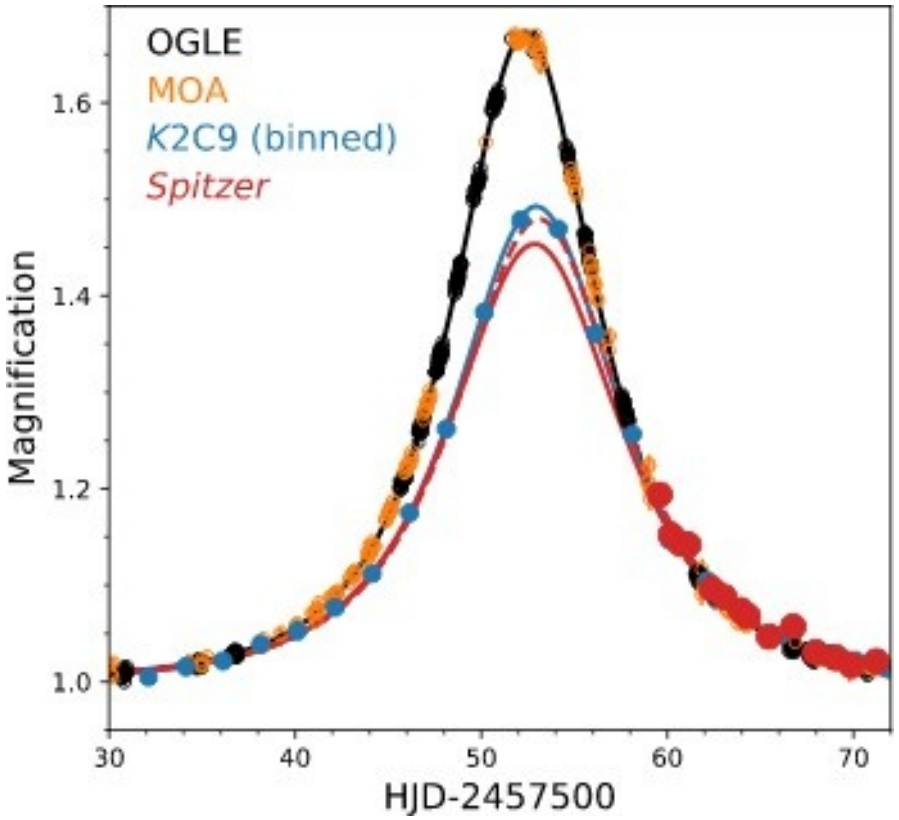
29860 csillag rotációs eredetű fényváltozása alapján a forgási periódusok eloszlása bimodális (a Kepler-mezőben is). Lehetséges ok: a közbülső periódus-tartományban a fáklyák hatása kioltja a csillagfoltokét, ezért nincs észlelhető fényváltozás a forgás során (Reinhold & Hekker, 2020)



Érdekes eredmények a K2 méréseiből

MOA-2016-BLG-290: Gravitációs mikrolencse eredetű felfényesedés együttes vizsgálata földi és Spitzer-mérésekkel. A lencséző 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 Naprendszertől az extragalaxisokig:
Molnár et al. (2018) két cikke: az egyik kisbolygók fénygörbéje (forgási periódusa), a másik a Leo IV törpegalaxisban található RR Lyrae csillagok fénygörbéje, az egyiknél még a Blazskó-effektus is látszik.

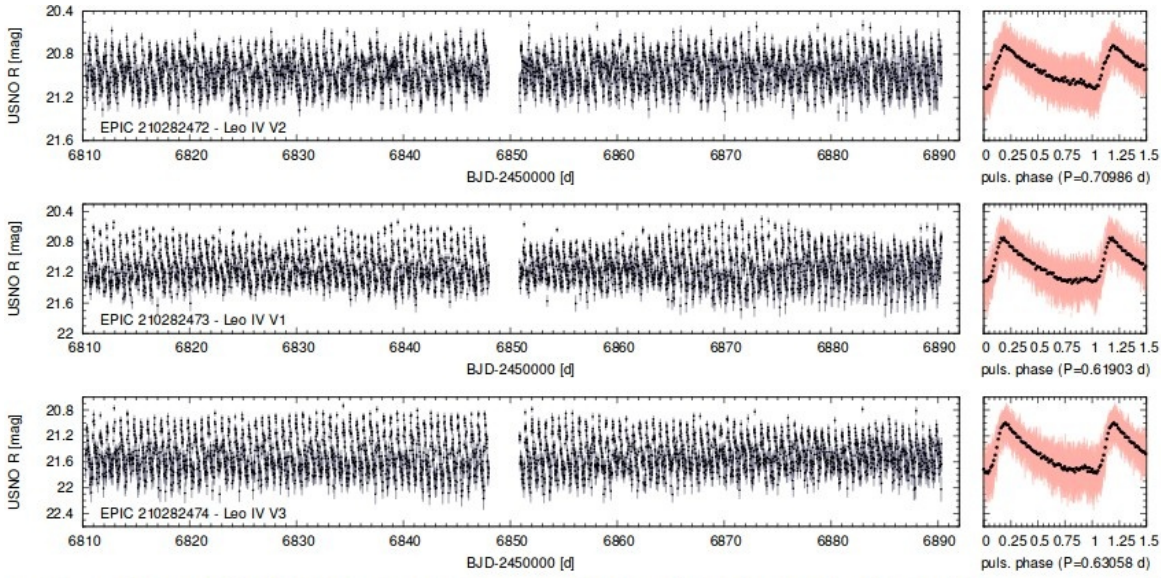


FIG. 3.— Light curves of the three RR Lyrae stars. Left panels: light curves after outlier removal and Fourier filtering. Note the variabl amplitude of EPIC 210282473 in the middle panel. Designations from Moretti et al. (2009) are also indicated. The right panels show th folded light curves (pink dots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

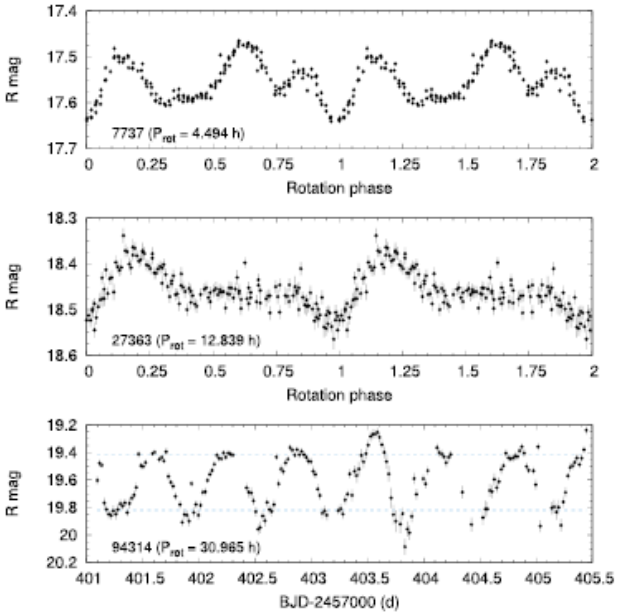
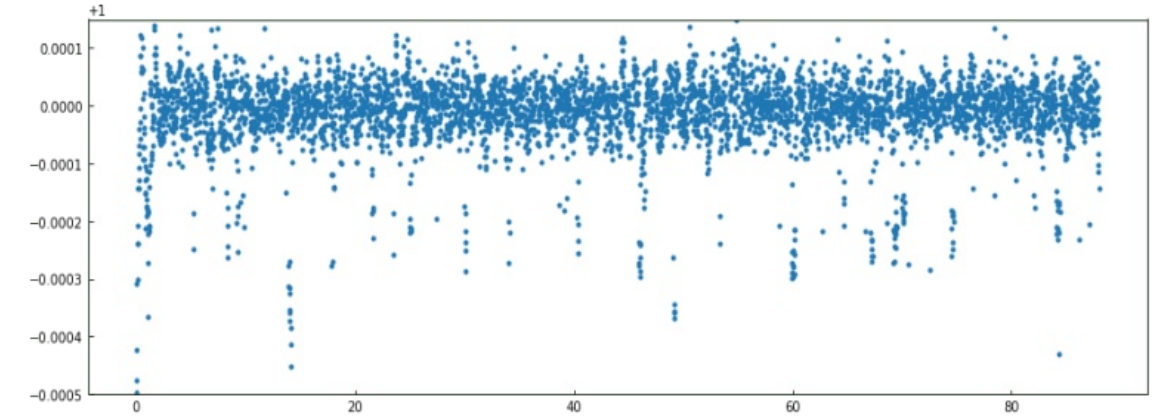
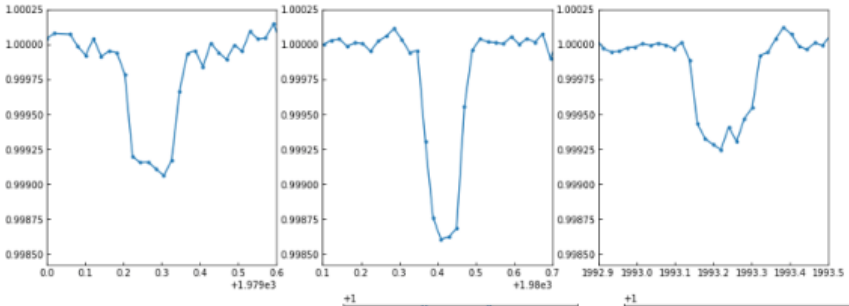


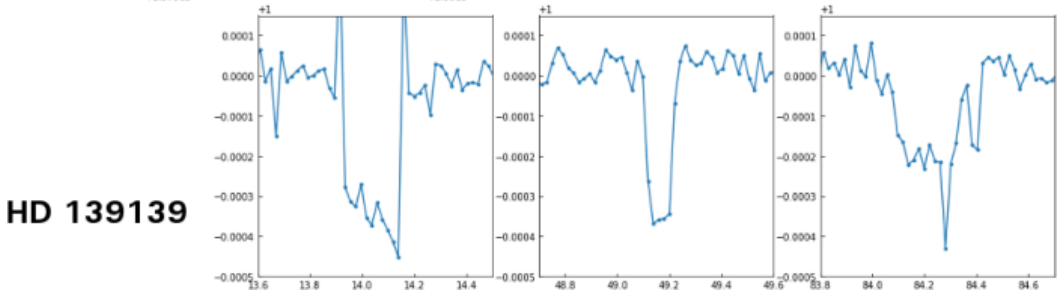
Figure 7. Top: phase curves of two asteroids with multi-peaked light curves. (7737) Sirrah features likely four different peaks per rotation. The light curve of (27363) Alvancark shows one dominant bright phase and a plateau-like feature that contains two smaller bumps. Bottom: the light curve (94314) 2000 AO_{165}, 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

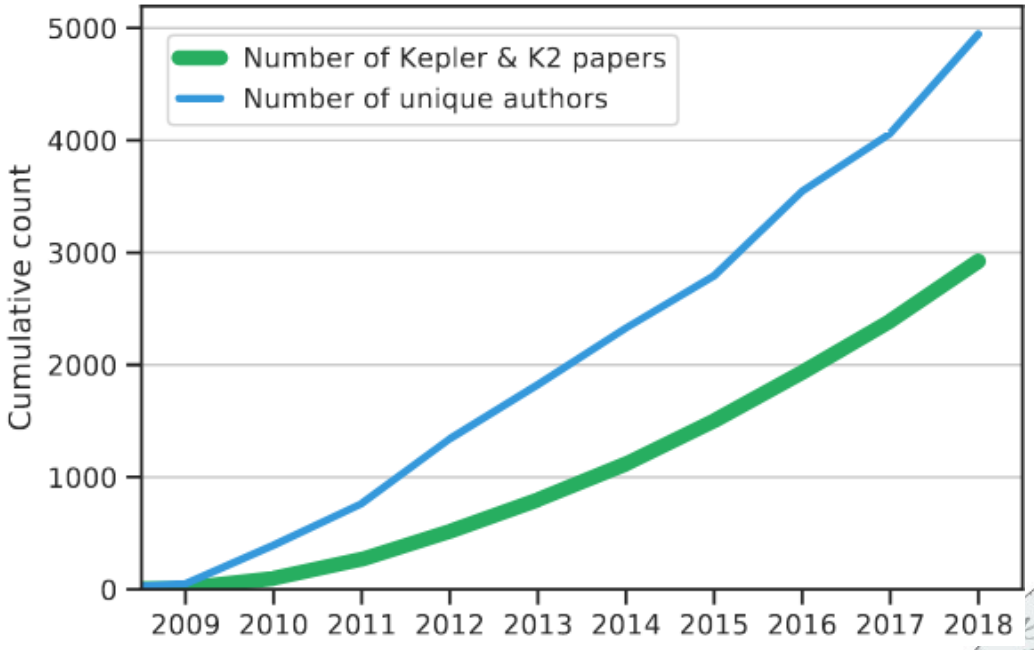
Random Transiter (véletlenszerű fedések): a HD 139139 mutatja. A 87 napos mérési időszak során 28 egészen csekély (0,2 millimagnitúdós) halványodások néhány órás időtartamra.
Az eddig publikált magyarázatokat mind elvetették.

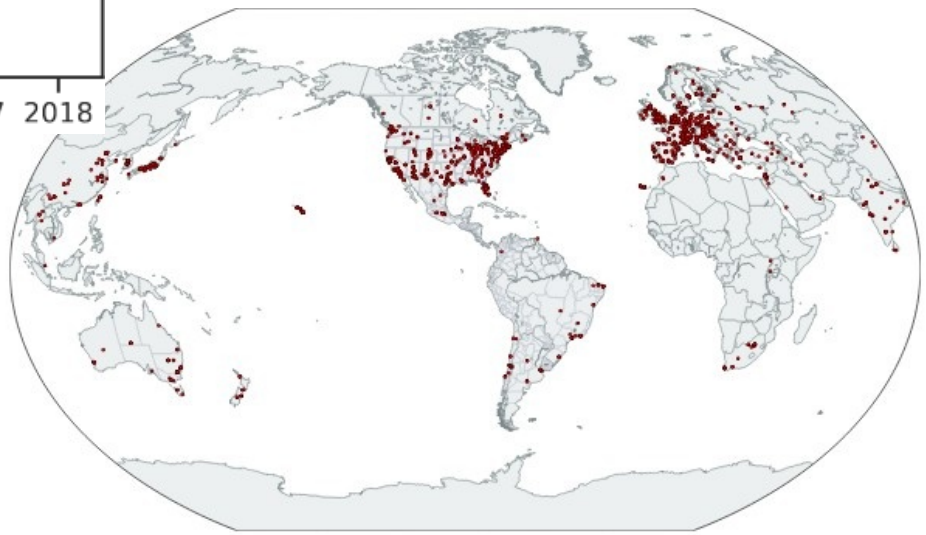






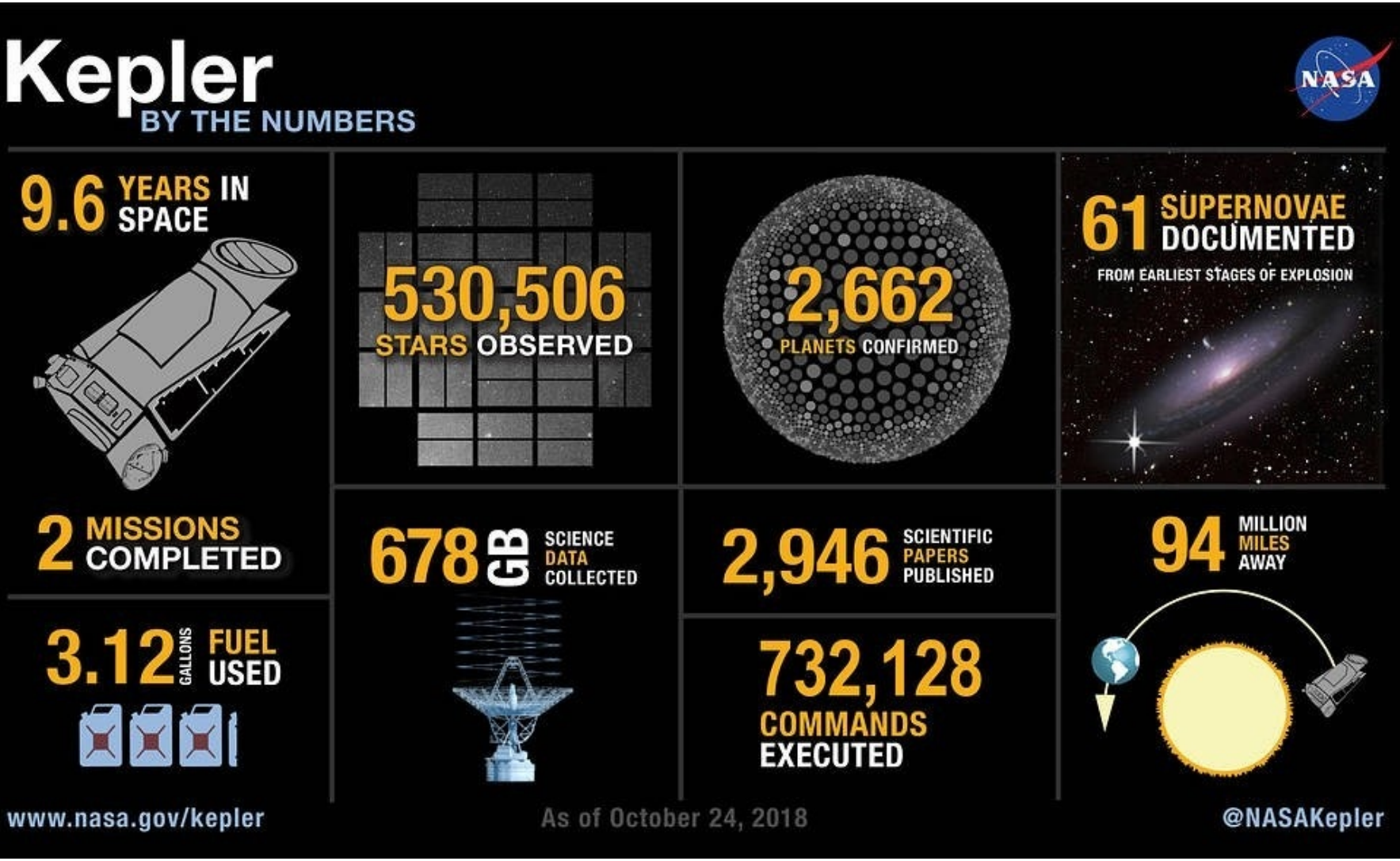
A Keplerrel kapcsolatos statisztika (2018-ig)





re 2. Map of the institutions of authors and co-authors of Kepler and K2 publica
ıte, Kepler data have been used in 63 countries across 6 continents.

„Numerikus” összefoglalás a Keplerről



A Kepler és Gaia szinergiája

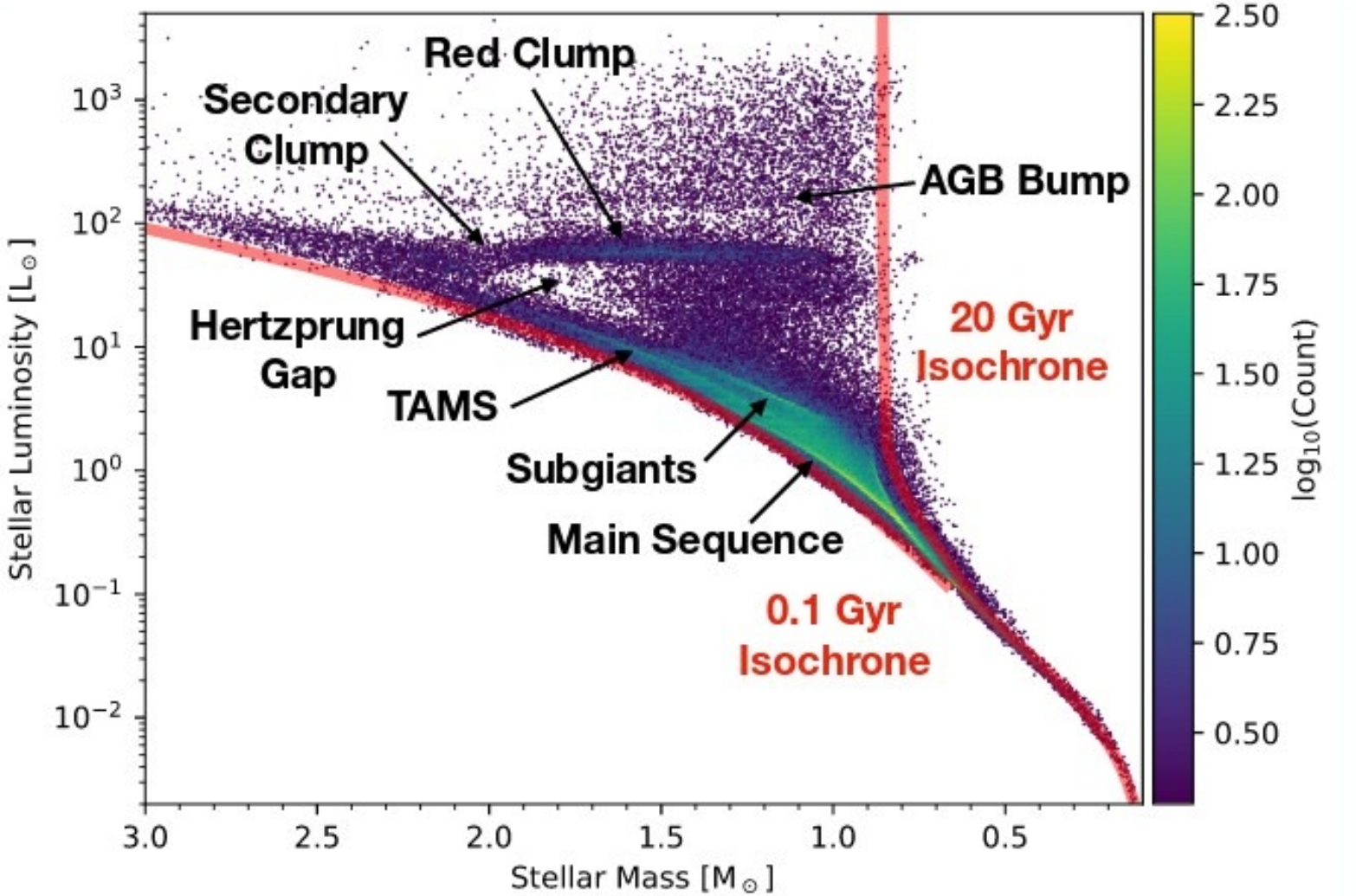
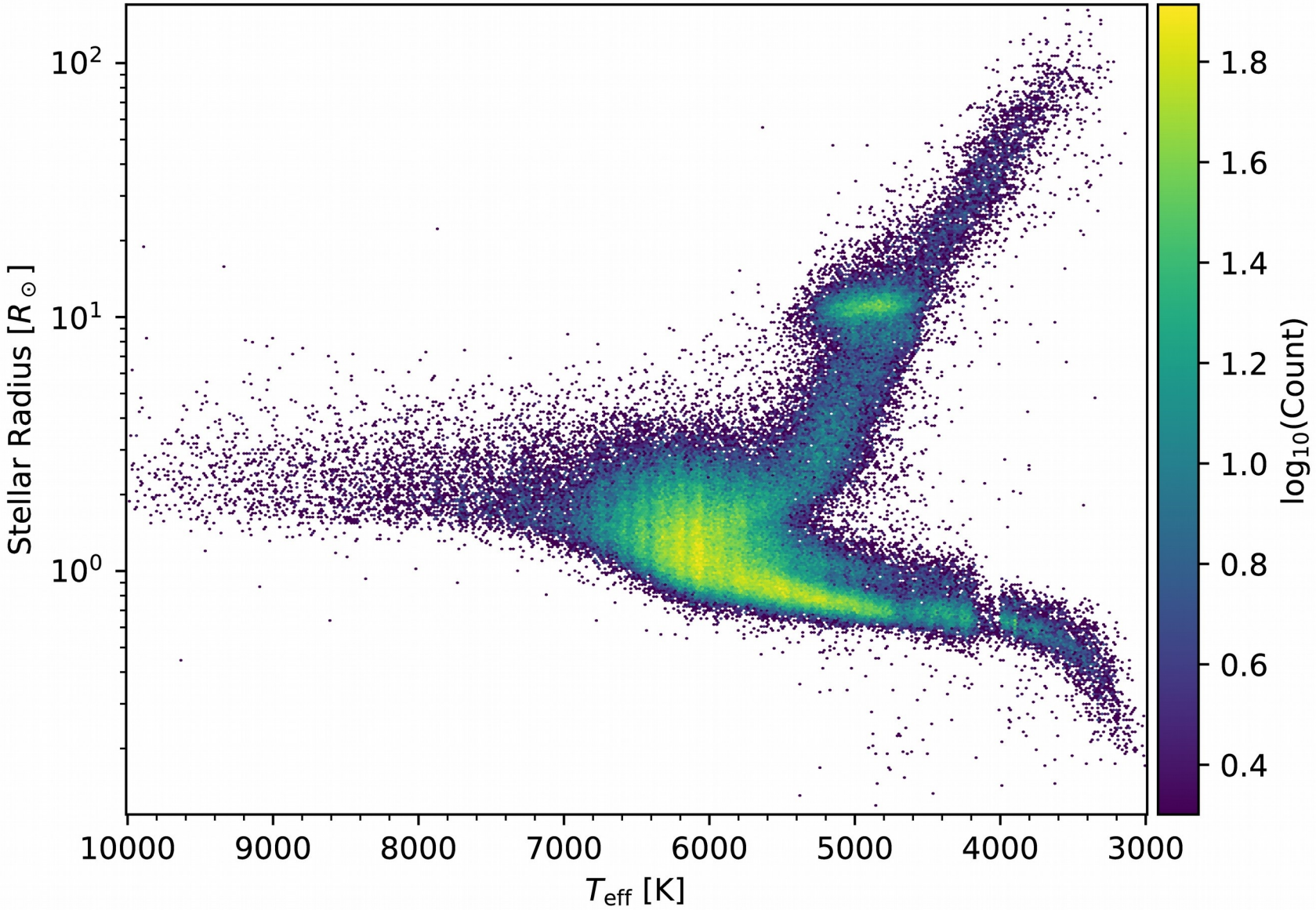


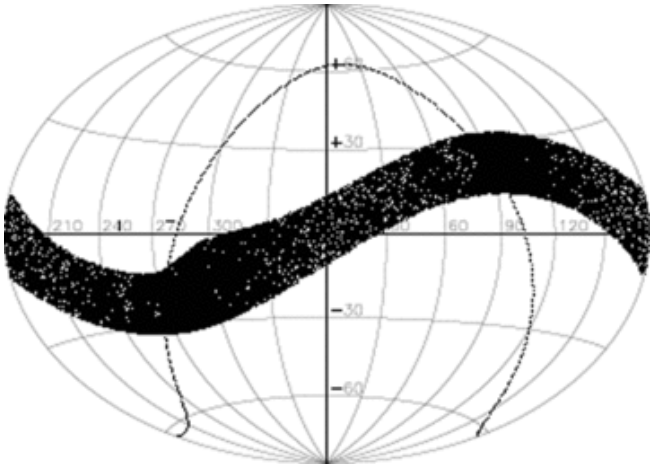
Figure 8. Luminosity versus mass for ∼186,000 *Kepler* stars. Color-coding represents logarithmic number density. The red, translucent curves represent the 0.1 (left) and 20 Gyr (right), [Fe/H] = 0.0 dex isochrones. We have labeled all features in the distribution accordingly.

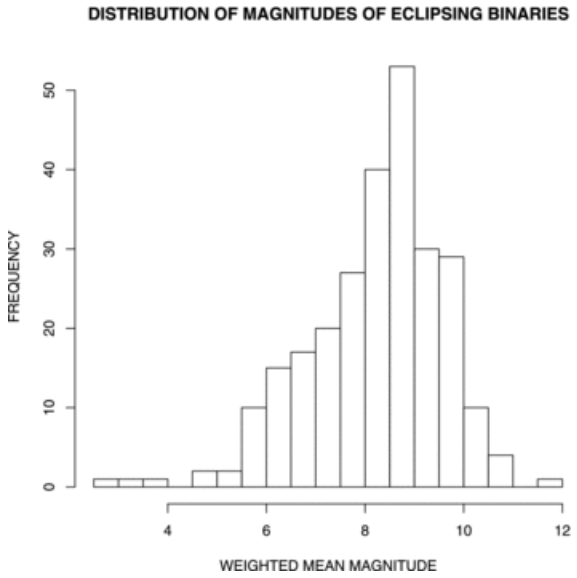
A Kepler és Gaia szinergiája

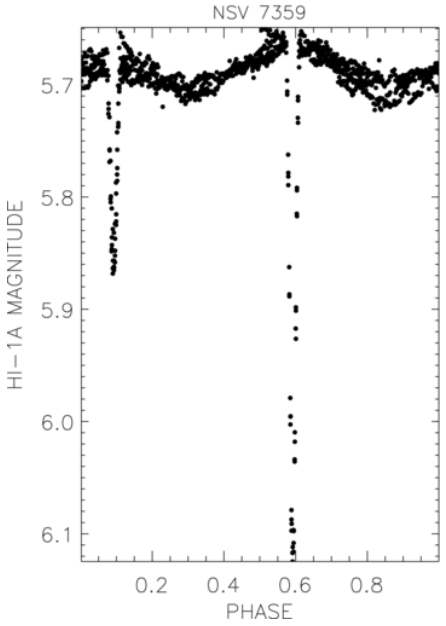


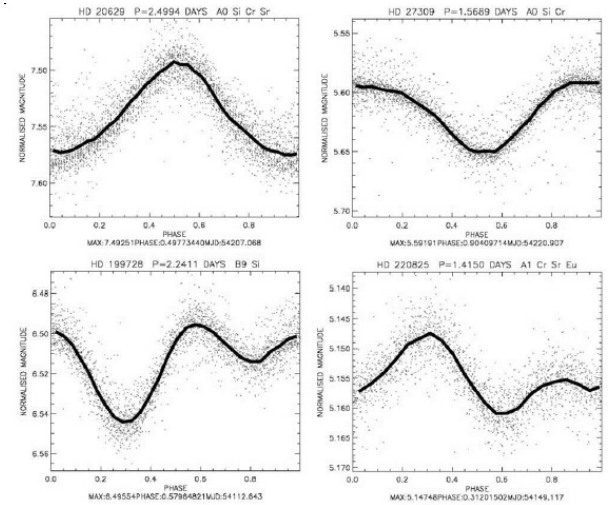
Fotometria a STEREO szondával

STEREO/H1-1A (1B) adataiból 263 fedési kettős fénygörbéje.
NSV 7359 mint példa: P=9,1999 nap.
Korábban BCEP típusúként volt ismert + 0,2872 napos SB. A fedést egy harmadik komponens okozza.
Jobbra lent: CP-csillagok fénygörbéje.



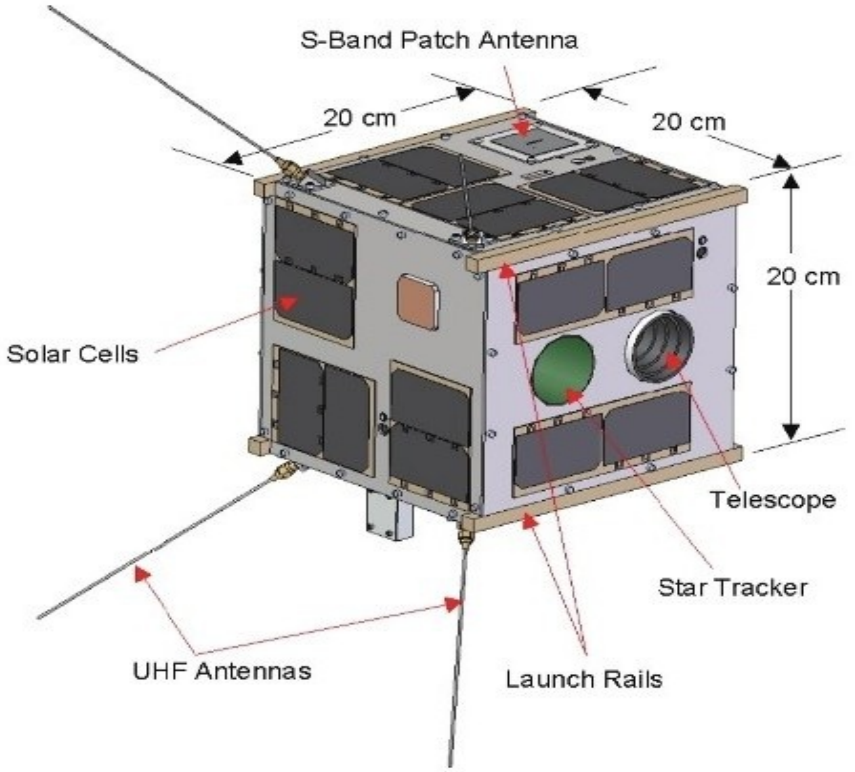






A BRITE szondacsalád

BRITE: **BRI**ght **T**arget **E**xplorer; 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, illetve B szűrővel. Egyszerre 15 csillag észlelhető.



Name	F	Launcher	T0	Orbit km
Austria:				
TUGSAT-1	$\tilde{B}$	PSLV-C20	Feb. 2013	781 × 766
UniBRITE	$\tilde{R}$	PSLV-C20	Feb. 2013	781 × 766
Poland:				
B-Lem	$\tilde{B}$	DNEPR	Nov. 2013	600 × 900
B-Heweliusz	$\tilde{R}$	LM-4B	Aug. 2014	600 × 630
Canada:				
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; $^{(\dagger)}$ for reasons unknown, BRITE-Montréal did not release from the upper stage of DNEPR.

A BRITE szondacsalád

BRITE-Montréal: nem állt pályára
UniBRITE: 2019. augusztus óta nem működik
BRITE-Lem: 2020. május óta nem működik
2023 végén leállítják a még működő BRITE-szondák méréseit.
A BRITE szondacsaládról, a mérések feldolgozásáról és a BRITE-mérések alapján kapott néhány fontos eredményről nagyon jó összefoglalás: Weiss et al. (2021): Space Photometry with BRITE-Constellation, Universe, 7, 199

Owner	Name	Filter	ID	Launch Date	Orbit km	Period min
Austria	UniBRITE	red	UBr	25 Feb. 2013	781 × 766	100.37
	BRITE-Austria	blue	BAb	25 Feb. 2013	781 × 766	100.36
Poland	BRITE-Heweliusz	red	BHr	19 Aug. 2014	612 × 640	97.10
	BRITE-Lem	blue	BLb	21 Nov. 2013	600 × 900	99.57
Canada	BRITE-Toronto	red	BTr	19 June 2014	629 × 577	98.24
	BRITE-Montréal	*blue*		*19 June 2014*		*n/a*

Table 1: Launch and orbit information for the BRITE nanosats. BRITE-Montréal did not separate from the launch vehicle and is not operational. The red-filter covers 550 – 700 nm, and the blue filter 400 – 450 nm.

A BRITE szondacsalád

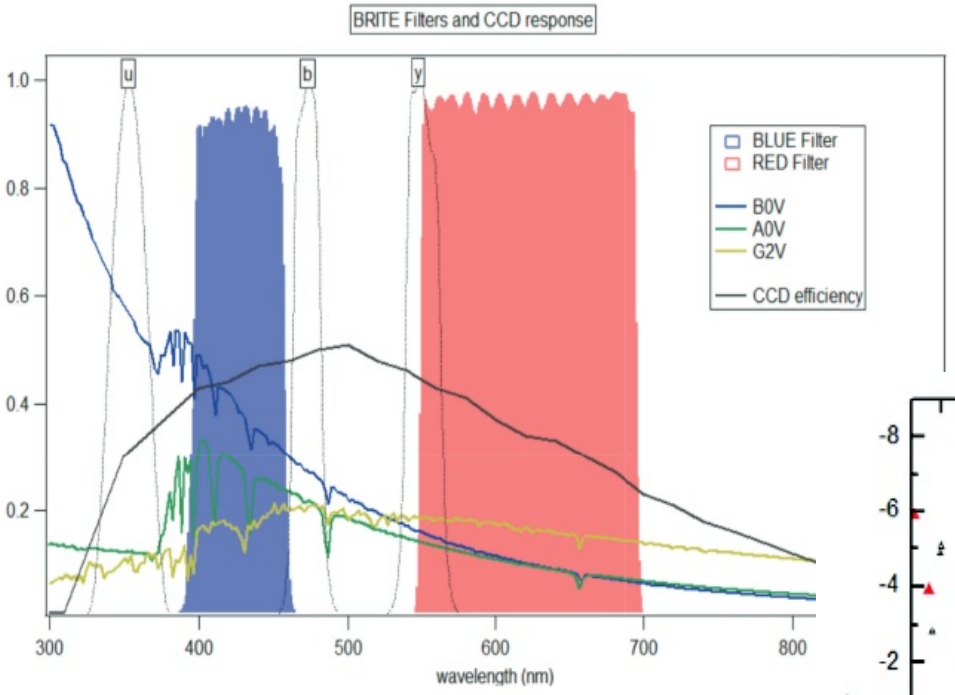
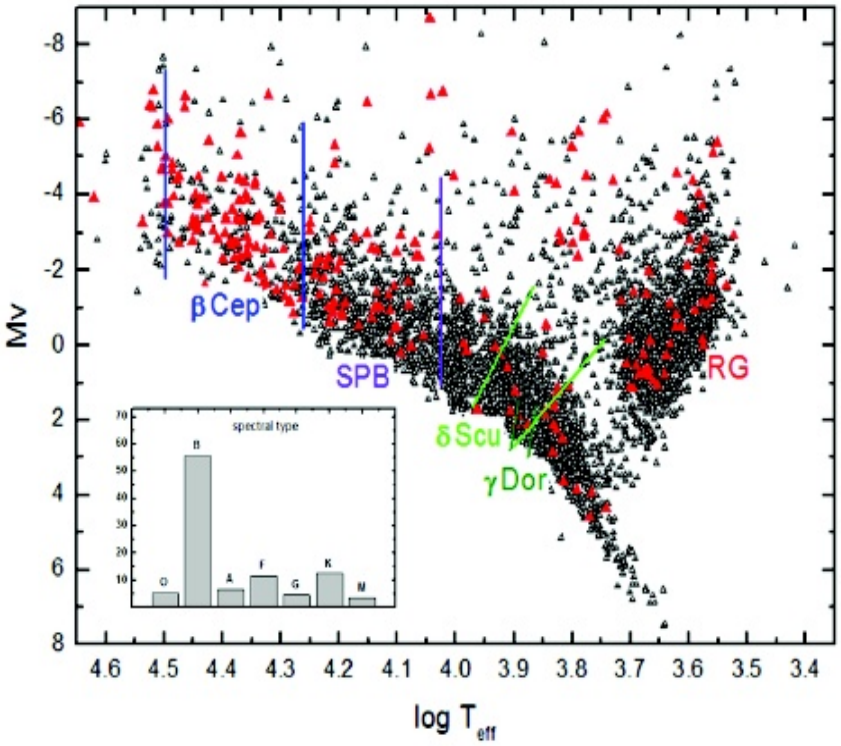


Figure 3. Blue and red filter used for the BRITE instruments compared to tl
distribution of B-, A- and G-type stars, and to u,b and y Stroemgren filter trans



A BRITE korlátozott pontossága

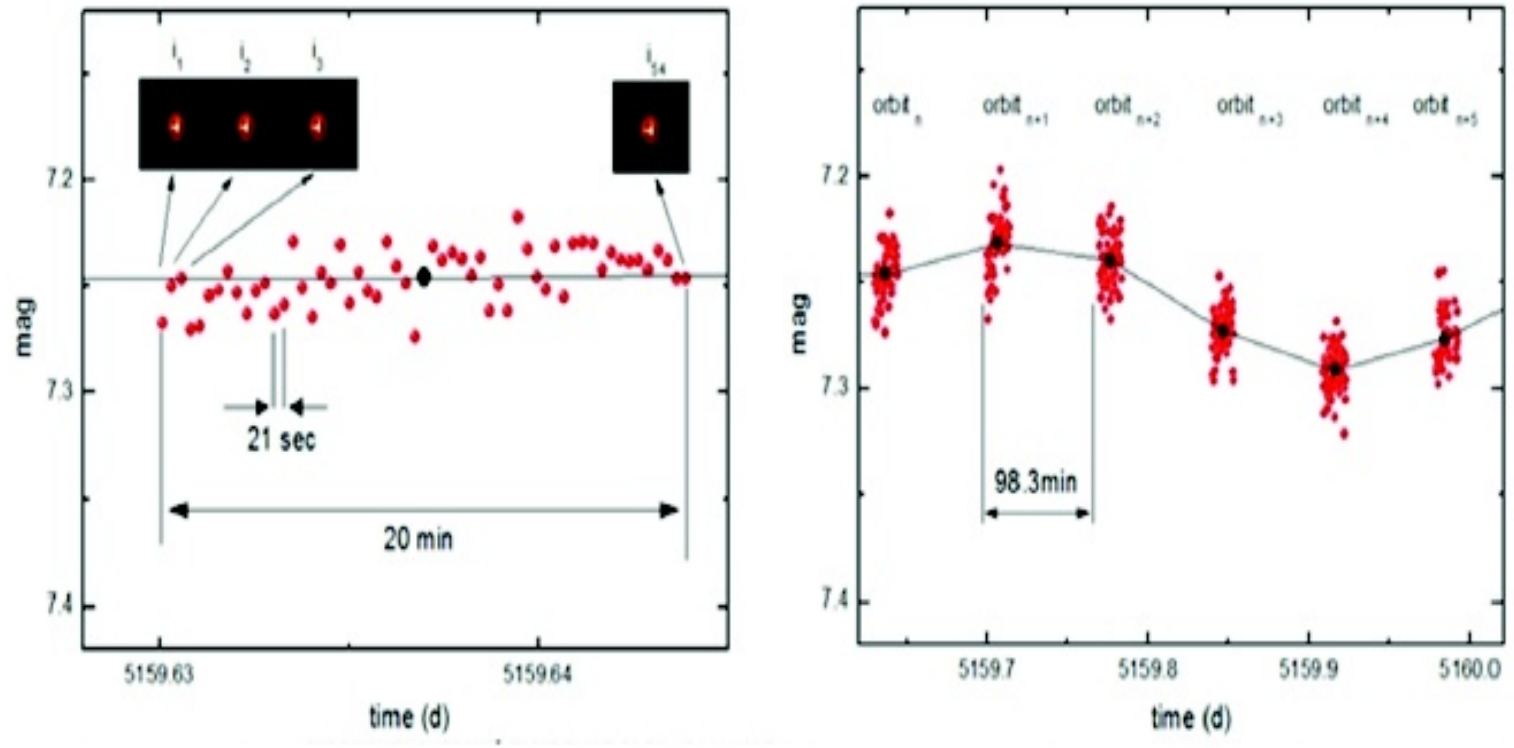
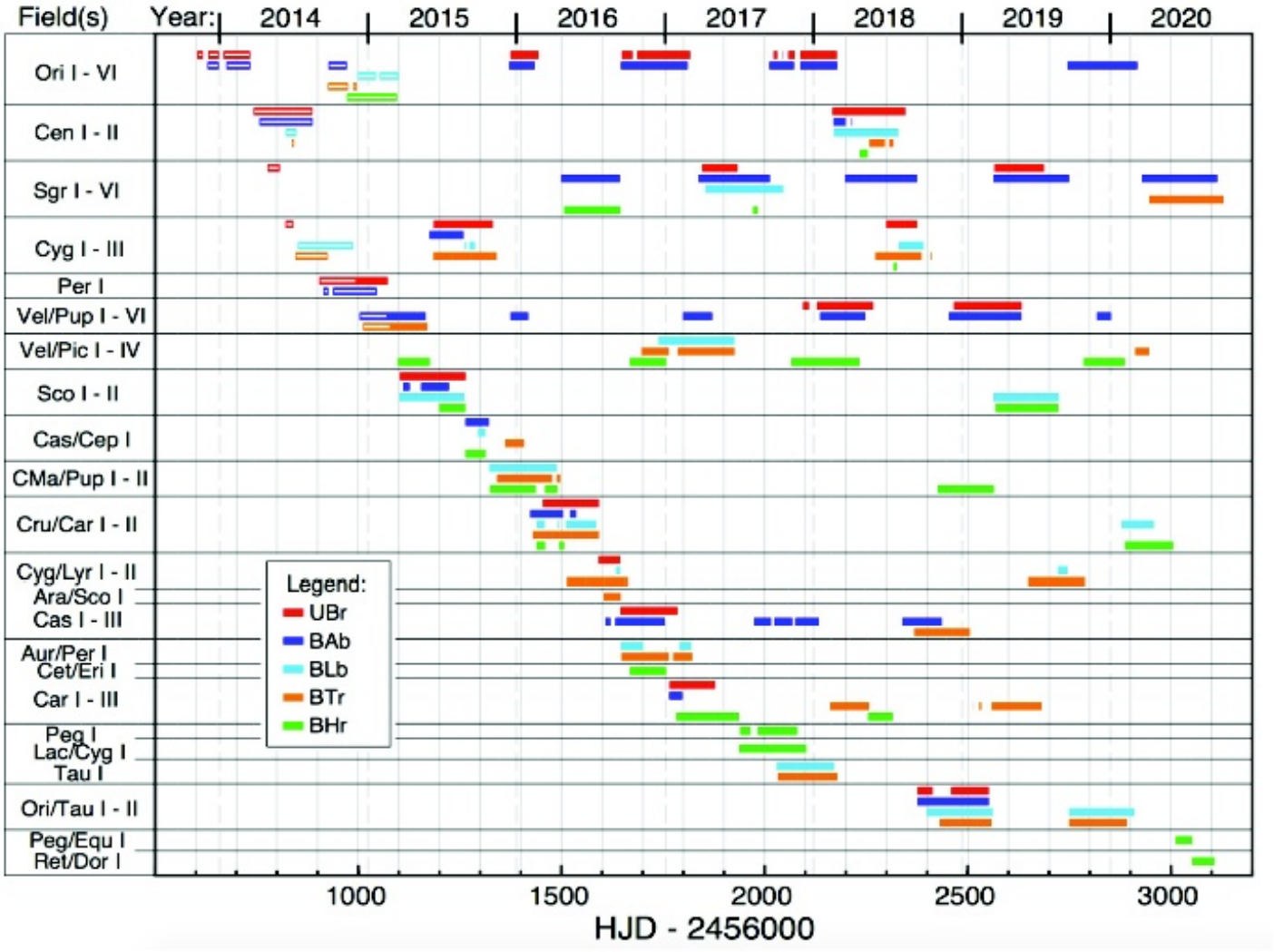


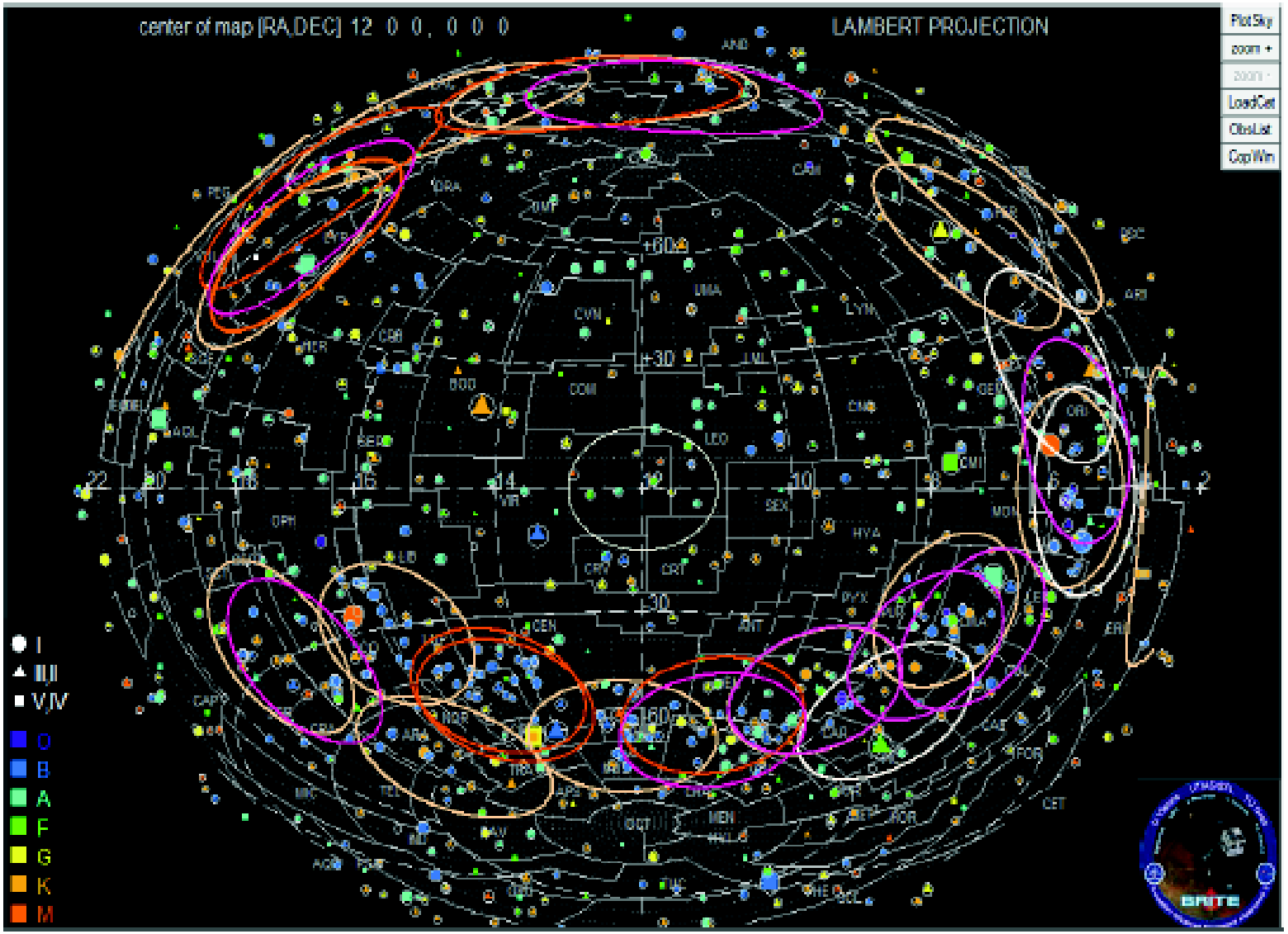
Figure 4. Typical photometric sequence during the visibility of a field in a single orbit (left) and the data sequence during six consecutive orbits (right).

A BRITE mérési programja 2020-ig



re 8. Temporal distribution of the observations of all five BRITE satellites until the end of 2020.

A BRITE mérési programja



Sky map highlighting the fields observed thus far by at least one BRITE satellite.

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.

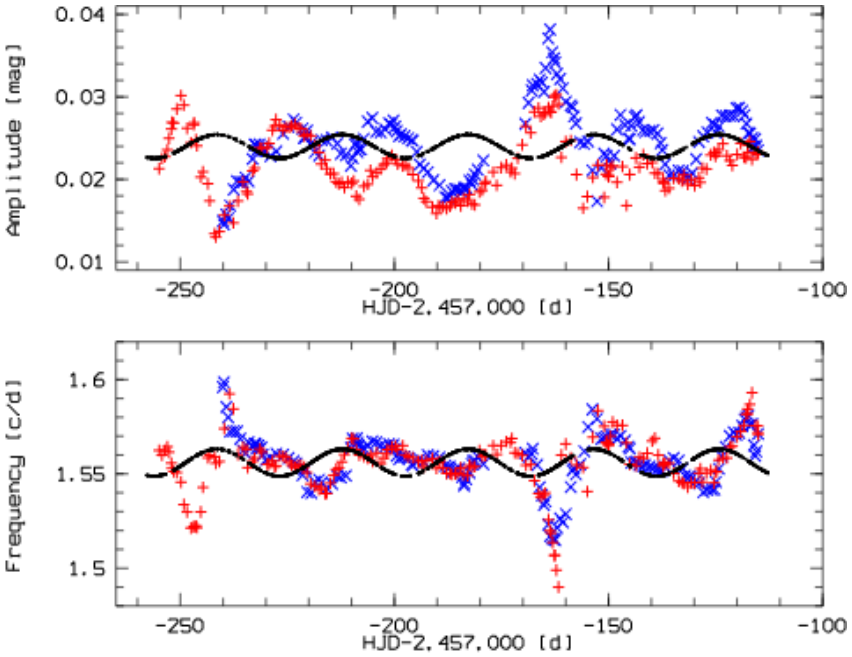


Fig. 8. Time dependence of the frequency (lower panel) and amplitude (upper panel) of the 1.5562-c/d variability in η Cen (red passband: +; blue passband: ×). Frequencies and amplitudes were determined as sliding averages over 3-day intervals from sine fits. For comparison, the sine curve fitted to the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

	Blue		Red	
ID	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.

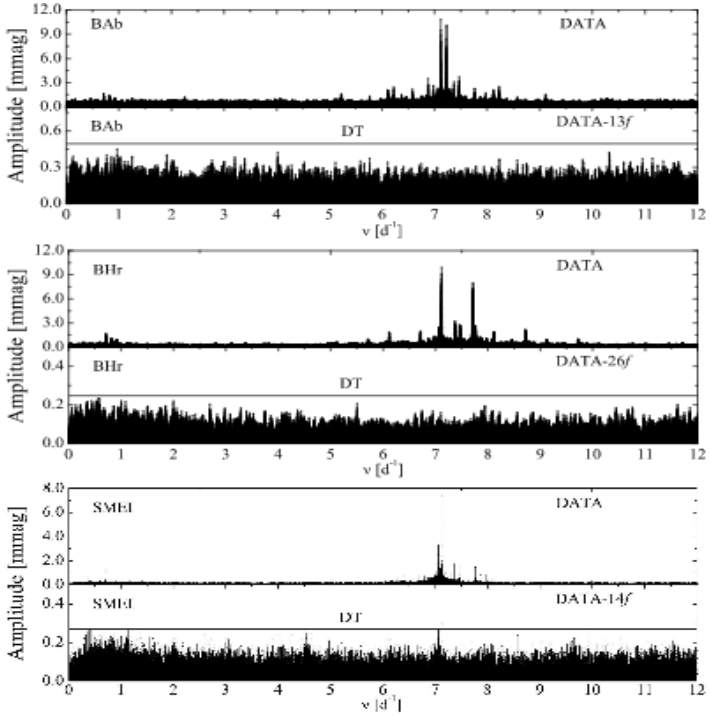


Figure 2. Top panels show the first run periodogram obtained from all BAb data and periodogram calculated from residuals after removing the variability with all significant frequencies. Middle and bottom panels — the same for all BHr and SMEI data, respectively. Horizontal lines in each panel indicate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

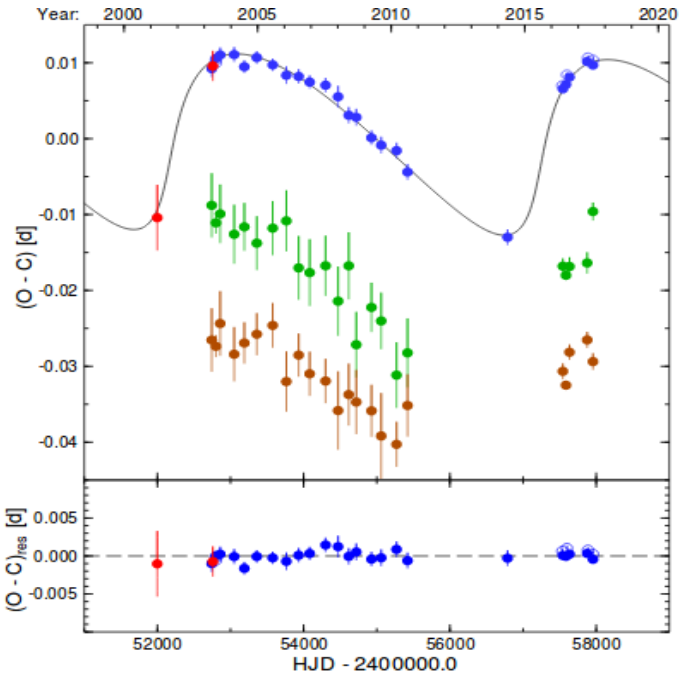
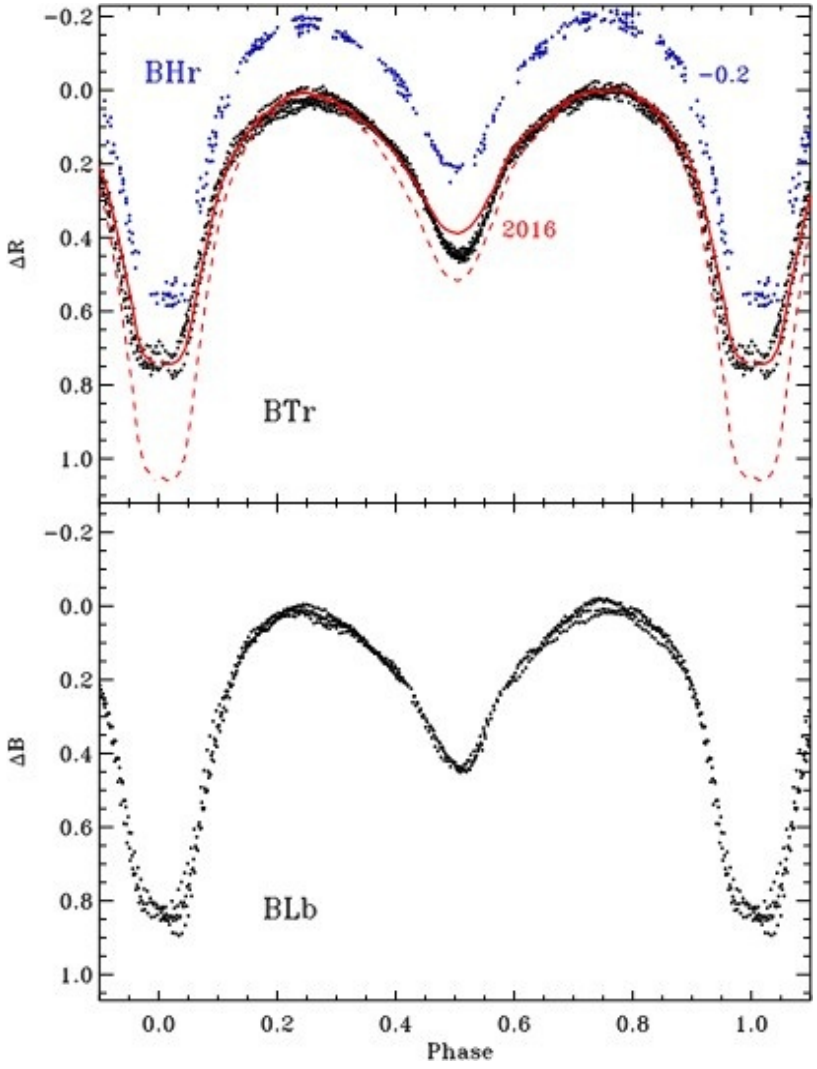


Figure 3. Top: The O − C diagram for the dominant mode (ν_1) in θ Oph based on the photometric (blue dots) and RV (red dots) times of maximum. The O − C values were calculated with respect to the ephemeris (1). A constant phase shift of +0.0340 d was applied to the values of O − C derived from the RV 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

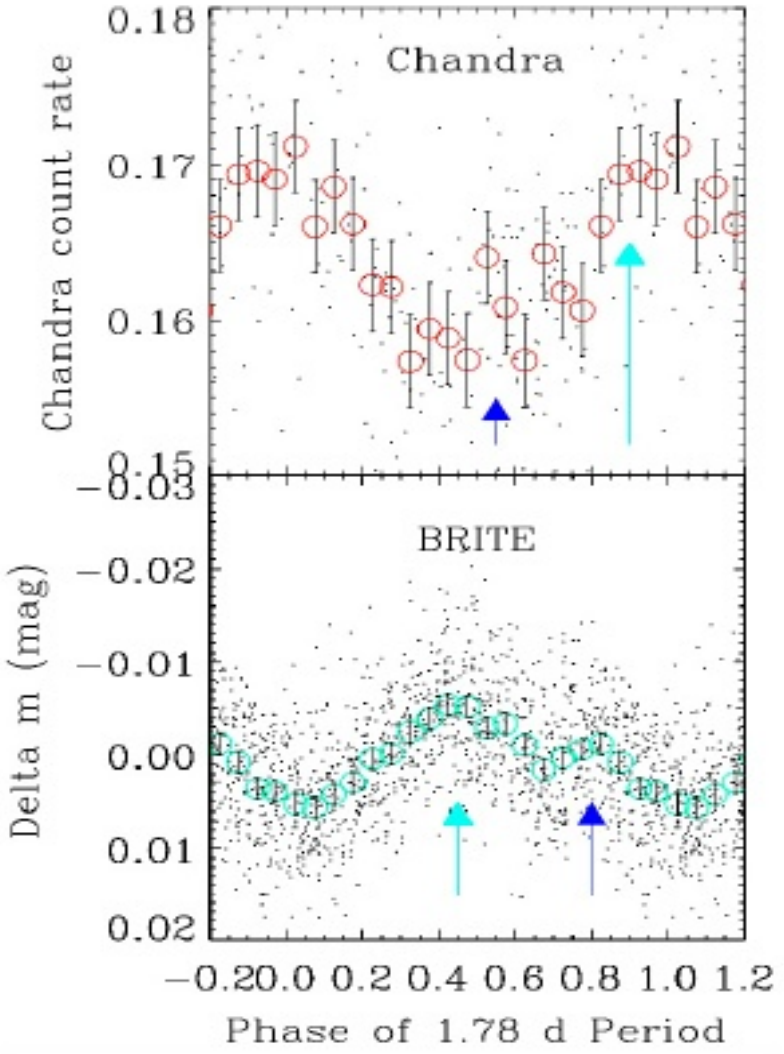
Eredmények a BRITE mérései alapján

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



Eredmények a BRITE mérései alapján

ζ Puppis (Naos): O4 színképű, forró szuperóriás csillag fényes fotoszferikus foltokkal.
A tömegvesztés üteme egymilliomod naptömeg/év, a csillagszél sebessége 2500 km/s. A felszín alatti konvekció hatására a csillagszél változó erősségű.
A Chandra szondával szimultán röntgenméréseket is végeztek. Ezek is igazolják az eddigi modell helyességét.
Az 1,78 nap a tengelyforgás periódusa.



Eredmények a BRITE mérései alapján

A Nova Carinae 2018 (V906 Car) fotometriája a BRITE-Toronto szondával. Közvetlenül az 5 magnitúdós HD 92063 mellett látszik. Kék színnel a Fermi-LAT gammatartománybeli mérései is fel vannak tüntetve. Később a TESS is mérte: a keringési periódus 1,6 óra vagy annak kétszerese.

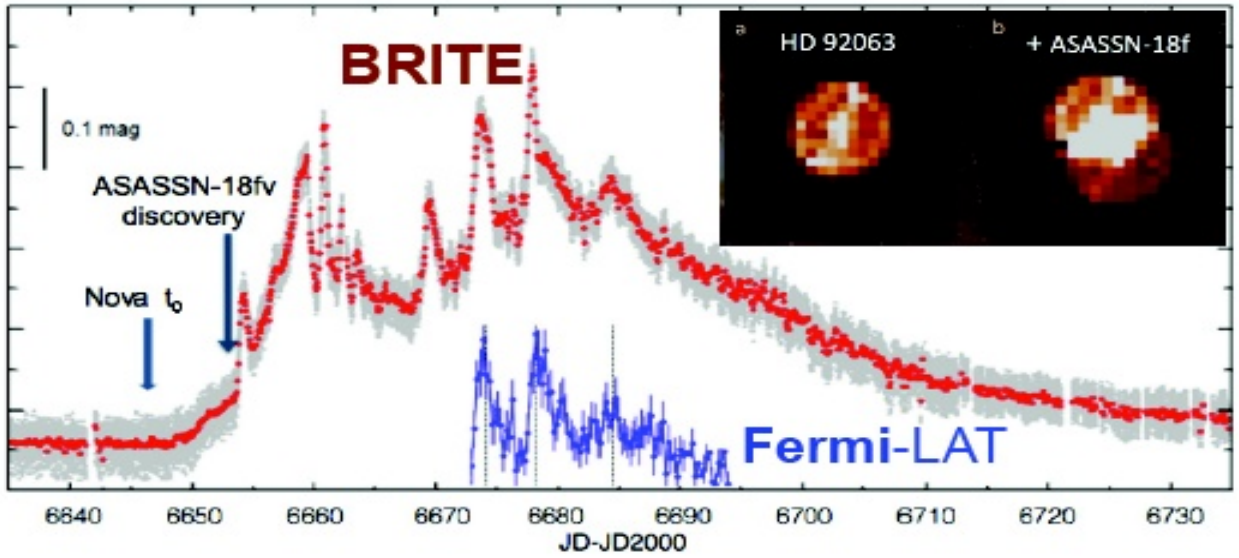


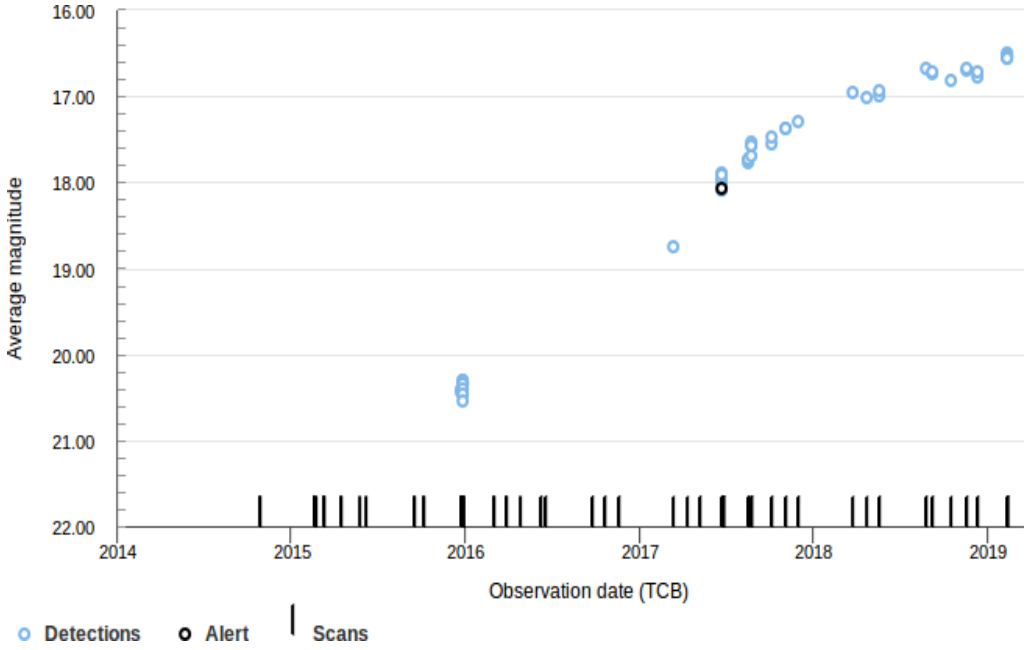
Figure 14. BRITE-TORONTO photometry of Nova Carinae 2018 (grey: individual observations with red-filter, red: orbit averages). Blue: Fermi-LAT (γ-ray) observations. Inserts: raster centred on HD 92063, taken on 2018-03-01 (left), and on 2018-04-14, after nova eruption (right). Scale of 27" per pixel and 4 sec exposures.

Fotometria a Gaia asztrometriai űrszondával

A **Gaia DR3**-ban 10,5 millió változócsillagra vannak adatok. Ebből:
2 184 477 fedési kettős
1 720 588 LPV (long period variable)
271 771 RRL (a GCVS-ben kb. 8000)
15 021 cefeida (a GCVS-ben <1000)
474 026 forgási változó (BYDRA) (a GCVS-ben kb. 1200)
878 028 aktív galaxismag (AGN)
363 mikrolencse-esemény

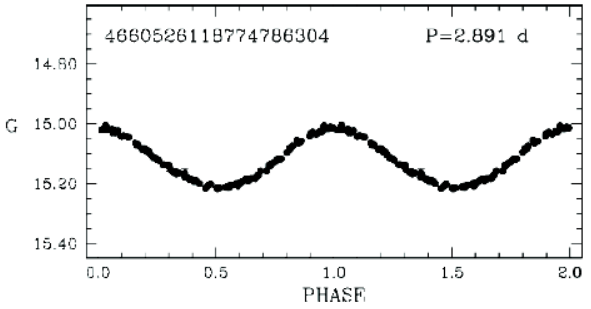
GAPS: 1,2 millió forrás az M31 5,5 fok sugarú környezetében.

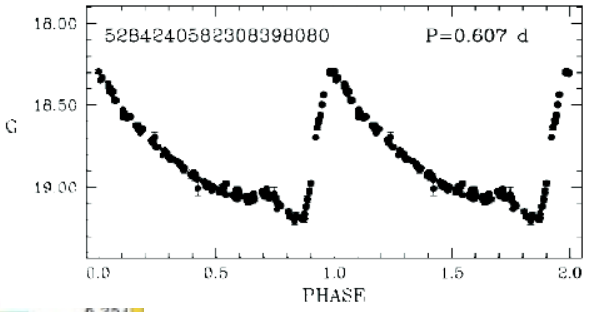
Gaia Science Alert: Évente kb. 2500 riasztás (eleinte kevesebb)
Jelölés: Gaia után az évszám utolsó két számjegye és hárombetűs kód aaa-tól kezdve.
Példa: a Gaia17bpi fuor fénygörbéje.

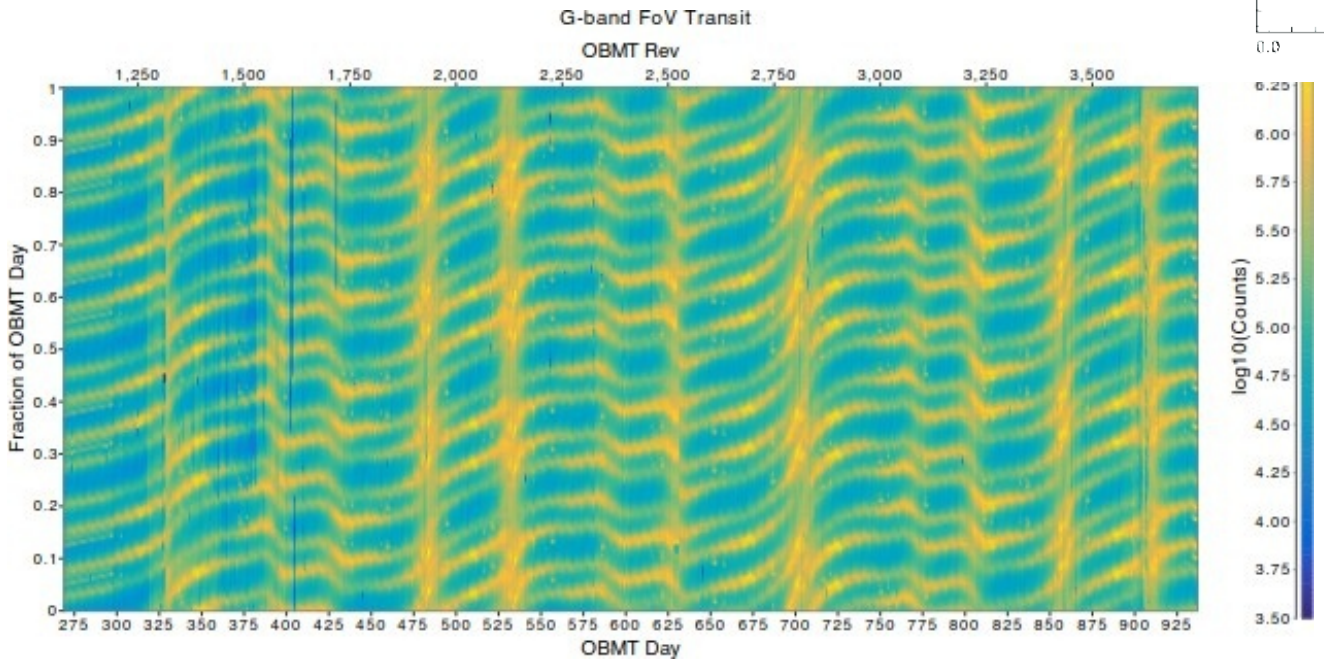


Fotometria a Gaia asztrometriai űrszondával

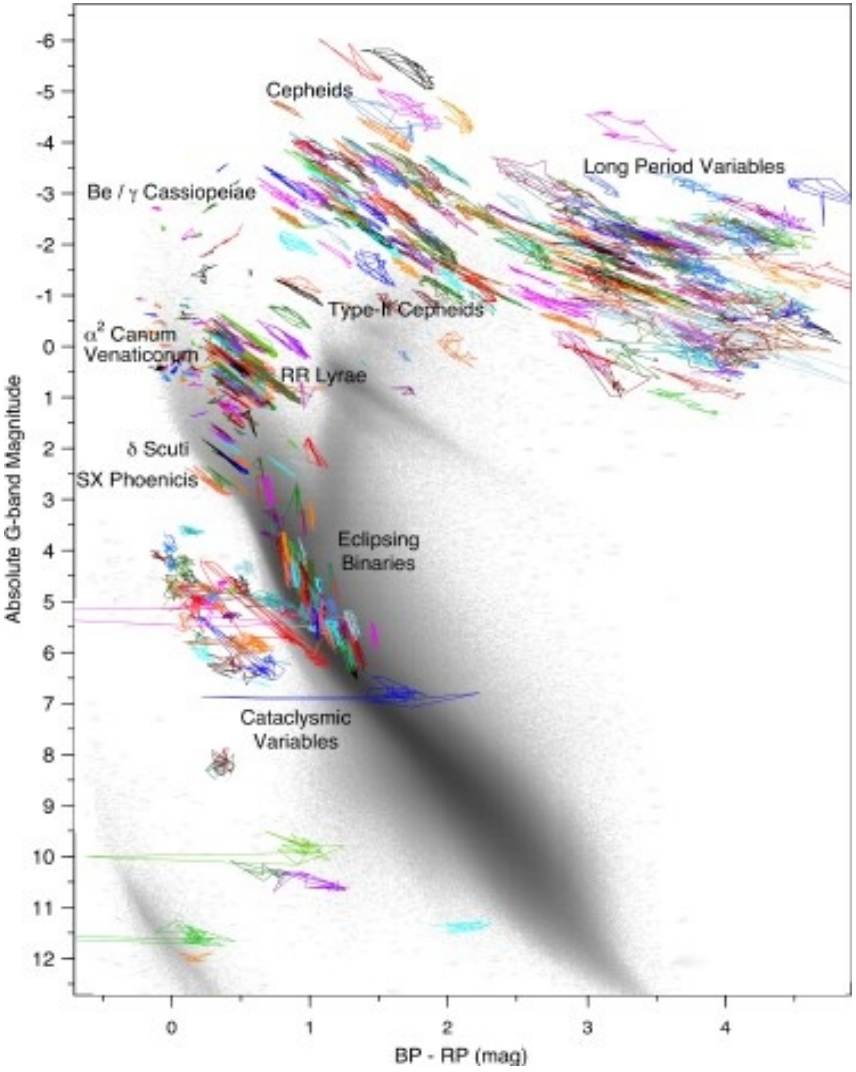
2014 nyarán a rutinmérések előtt egy hónapig folyamatosan mérte a déli ekliptikai pólus környékét, azóta főkörök mentén szkenneli az eget, de az időbeli mintavételezés kedvezőtlen a változócsillagok vizsgálatára.
Még így is a legalább 1,8 milliárd csillag
Mindegyikéről kapott kb. 100 fényességmérés páratlan adatbázis.

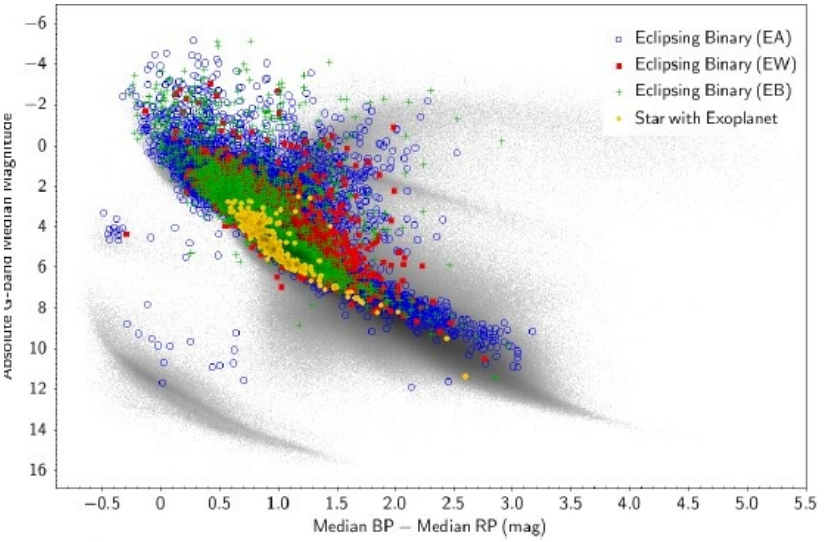






Fotometria a Gaia asztrometriai űrszondával



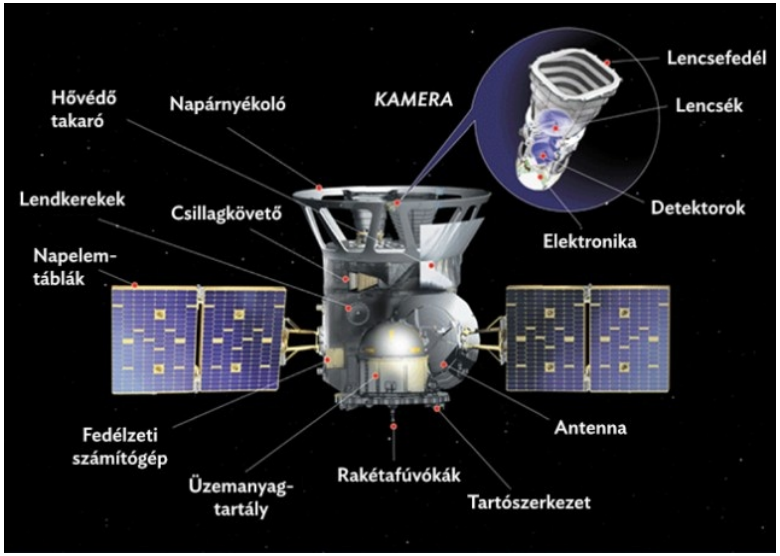


. Same as Fig. 2 but for eclipsing binaries (of types EA, EB, EW) and known host-stars exhibiting exoplanet transits. As expected, eclips
es can be anywhere in the CaMD, that explains why they are a main source of contamination for instance of pulsating stars.

Eyer et al. (2018)

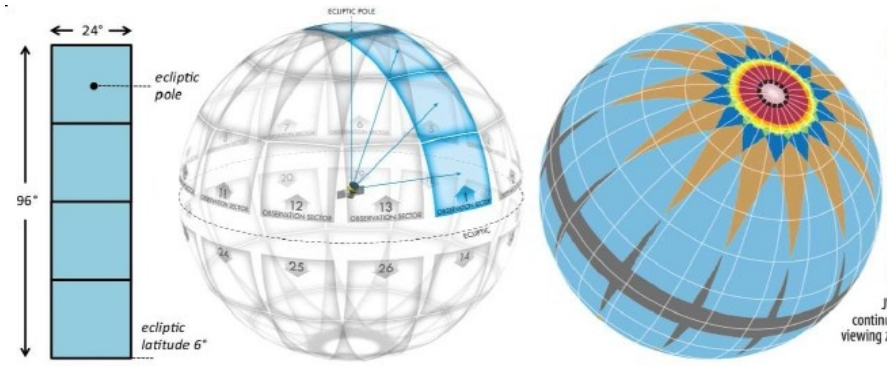
TESS

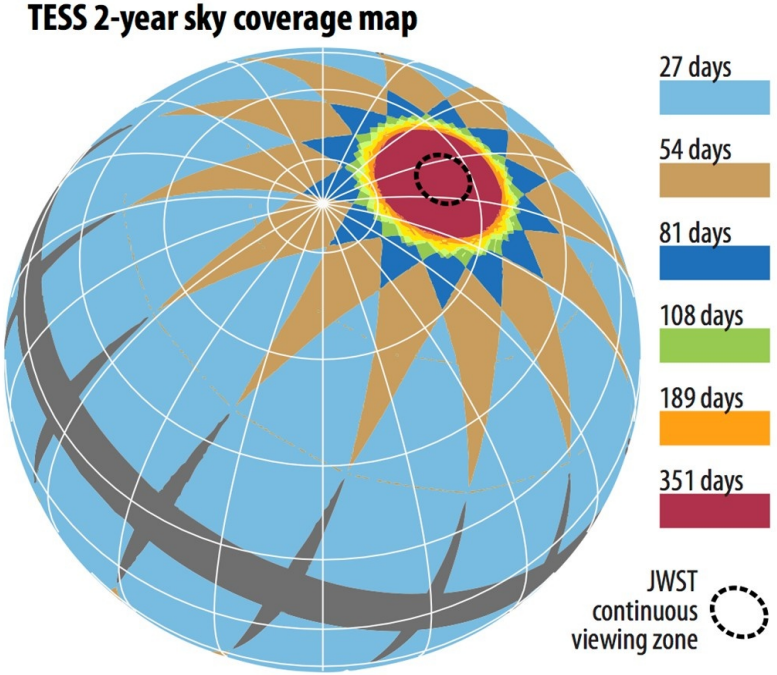
TESS (Explorer–95 vagy MIDEX–7): Transiting Exoplanet Survey Satellite; Eredetileg az MIT javasolta 2006-ban, és a Google támogatta anyagilag. A NASA 11 űrmisszió közül választotta ki. Indítás: 2018. ápr. 18. Indítási tömeg: 350 kg. Keringési periódus kb. 13,7 nap, a Holddal 2:1 arányú rezonáns pályán (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 folyamatos a támogatás. A fő cél: exobolygók keresése 200 000 csillag körül, közte a Földhöz hasonló méretűek is (a tömeg, méret, sűrűség, pálya meghatározása). 2022 végéig 6000 exobolygójelölt, közülük 273 felfedezés megerősítve. Itt is legalább annyira fontos az asztroszeizmológia, mint a Kepler esetében



TESS

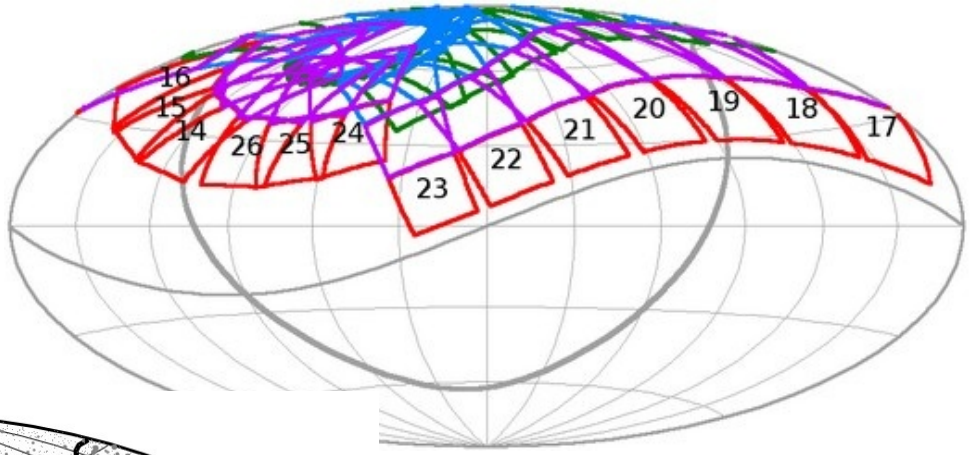
Négy nagy látószögű kamera mindegyikéhez CCD-kamera csatlakoztatva. A 4 távcső egymással szomszédos (24°x24°-os) területet észlel (együtt 400-szor nagyobb, mint a Kepler által vizsgált égboltrész). A teljes égbolt 26 szektorra van felosztva, mindegyik szektor 2 itt is legalább 4°x96° méretű. Egy-egy 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).
2018. júliustól a déli félgömböt mérte végig, majd egy évig az északit, aztán évente felváltva.

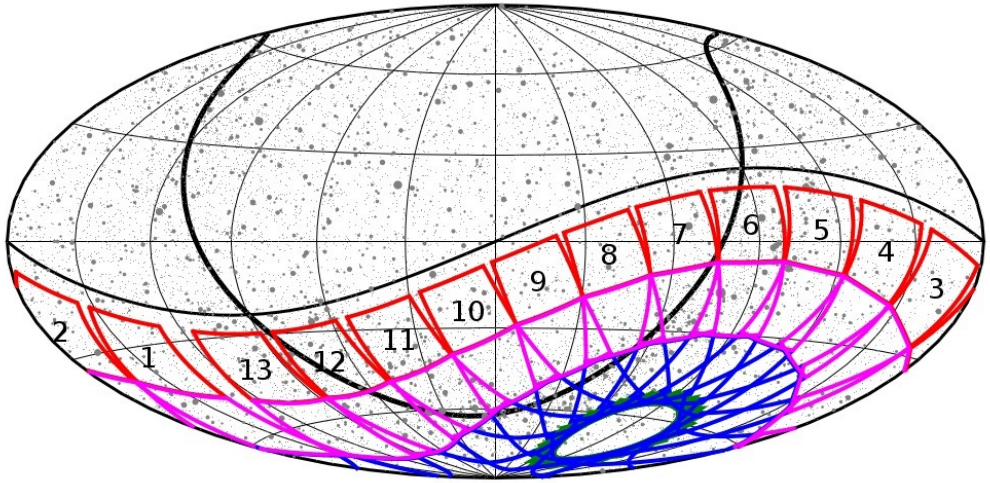




TESS

Széles sávú fotometria, az optikaiból a közeli infravöröbe is belenyúlik.
A fényes csillagokról 2 perces mintavételezésű adatsorok, a teljes megfigyelt égterületről (full frame image, FFI) pedig 30 perces mintavételezésű adatsorok érhetők el. Az adatokat kéthetente küldik a Földre.
A hosszabbítás során 2 perces mintavételezés >15000 csillagra szektoronként, 1000 csillagra pedig 20 másodperces mintavételezés.

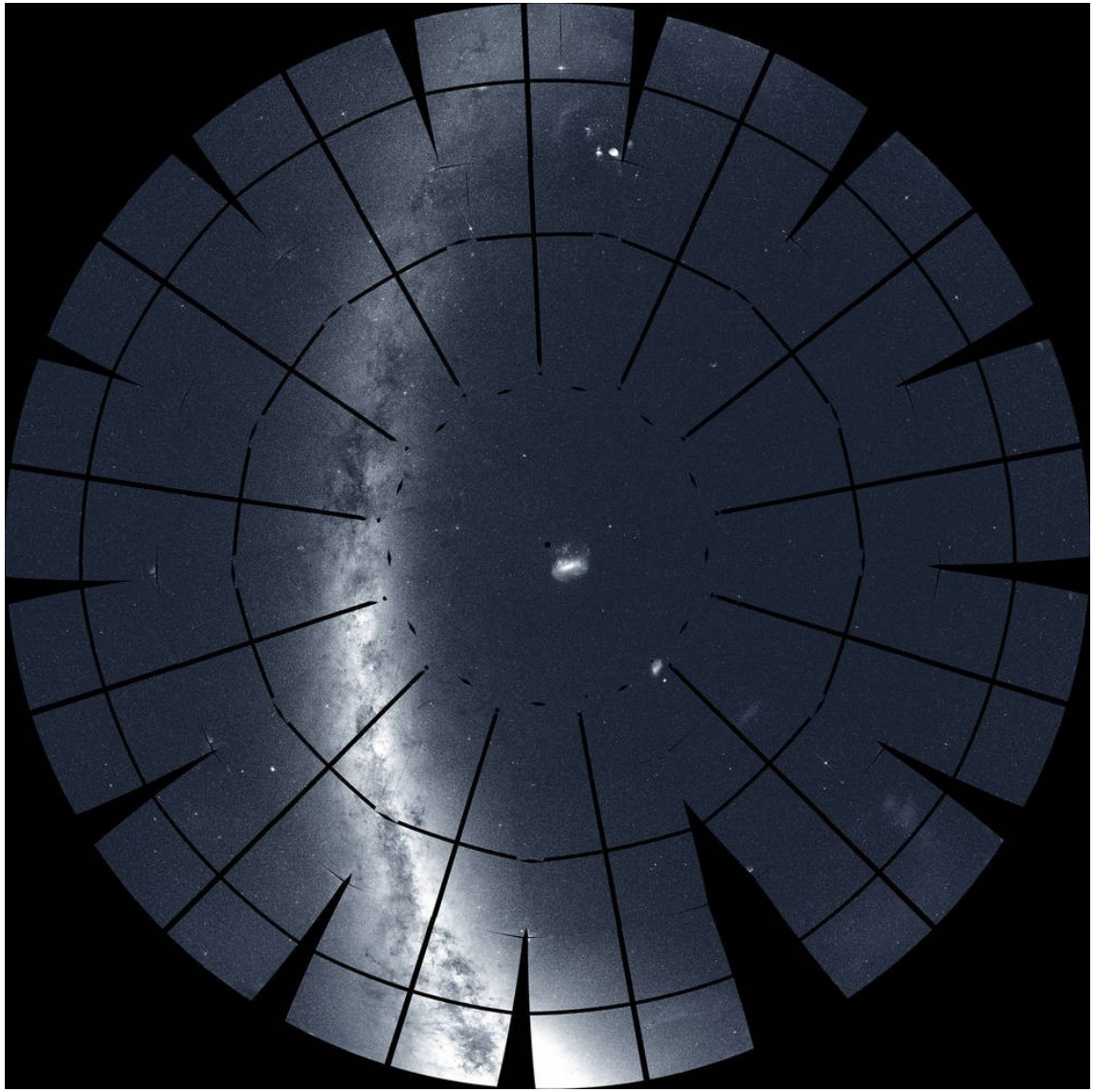




Az ekliptika környékét is észleli a TESS.

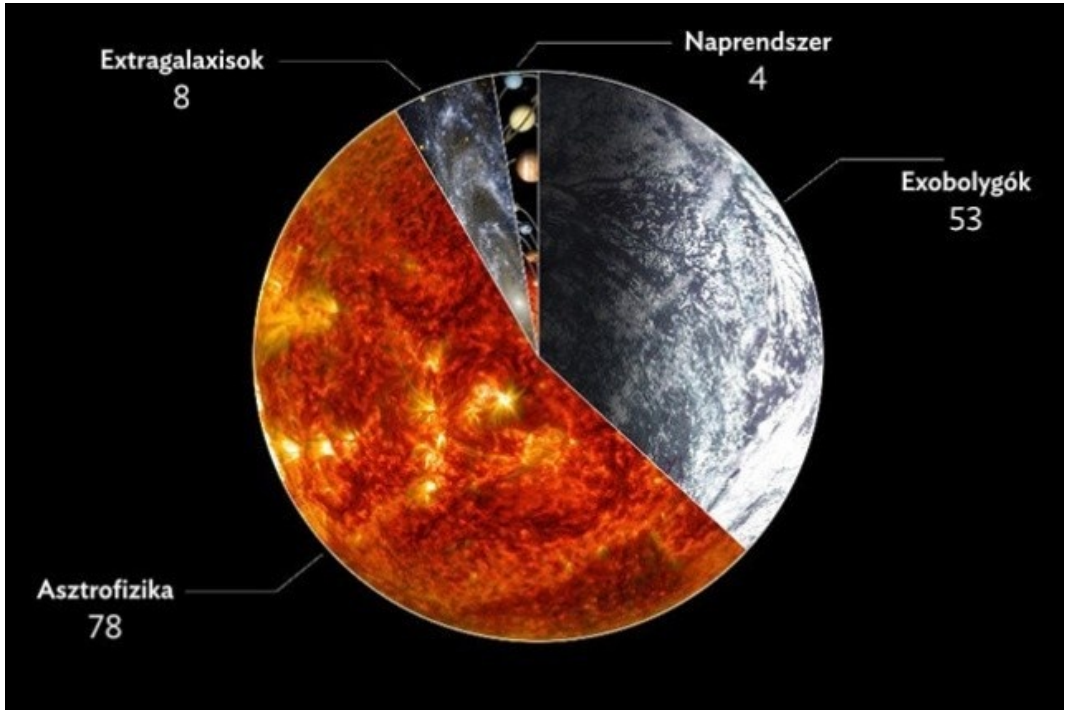
TESS

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



TESS

A TESS más jellegű tudományos programja is legalább olyan súlyúak, mint a Kepler és a K2 esetében. A magyarok részvétele a TESS-ben (TASC) ugyancsak domináns. Az eredeti program befejezése: 2020. július.
2023. márciusban már a 62. szektor észlelése történt. (2023. januárban öt napra biztonsági üzemmódba kapcsolva mérési szünet volt.)
Az első 57 szektor mérései alapján 6133 objektumnak van TOI azonosítója, és 282 exobolygó-felfedezés van megerősítve.



A TESS-fotometria eredményeiből

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

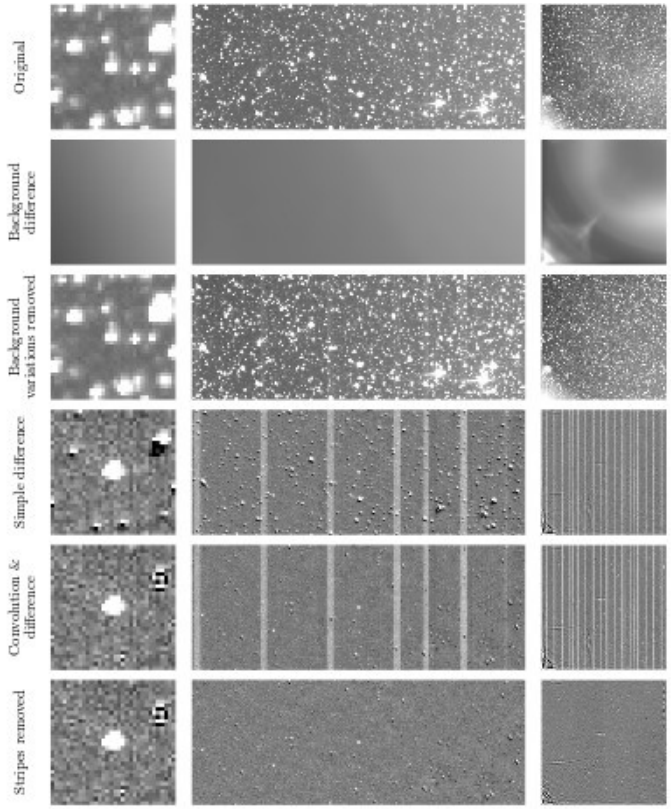
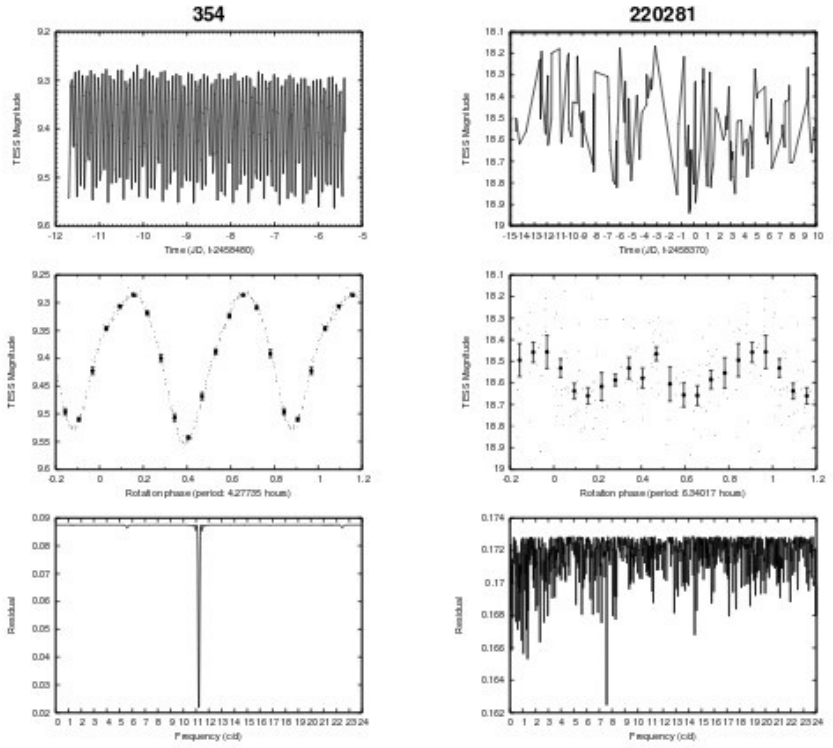


Figure 1. Panels showing the various stages of the image-level data processing using asteroid (2429) Schurer as an example, observed during Sector 2, by Camera #1, CCD #3. The *left* column shows the $10' \times 10'$ vicinity of the target, the *middle* column shows the neighbourhood ($3.7^\circ \times 1.4^\circ$) 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.



igure 3. Object light curve plots for (354) Eleonora (left column of 3 individualplots) and (220281) 2003 BA_{47} (olumn of 3 individual plots). These plots are available for all of the 9912 objects presented in this study.

A TESS-fotometria eredményeiből

U Gruis
(Bowman et al. 2019):
árapályerők által keltett oszcillációk félig szétválasztott (semi-detached) kettős rendszerben.
1980 óta ismert a kettősség. A főkomponens A5 típusú, a keringési periódus 1,88 nap.
A TESS az első két szektorban észlelte.

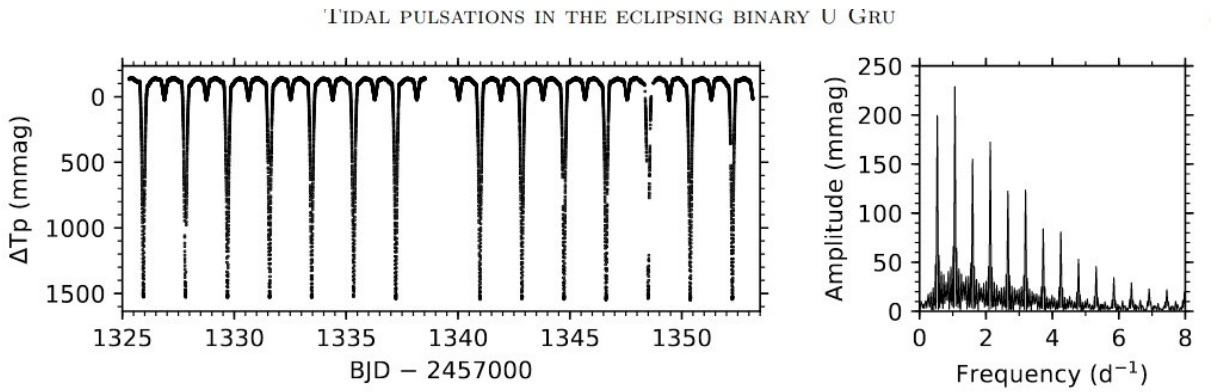
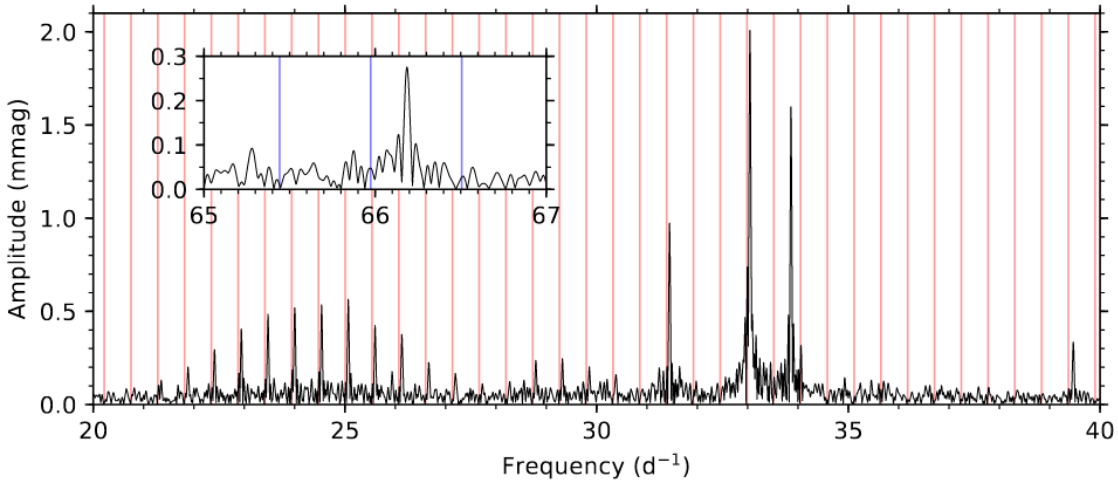


Figure 1. *Left:* TESS light curve of the pulsating Algol system U Gru (TIC 147201138). *Right:* amplitude spectrum showin the low-frequency orbital harmonic series associated with the eclipses in the light curve.



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

A TESS-fotometria 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.

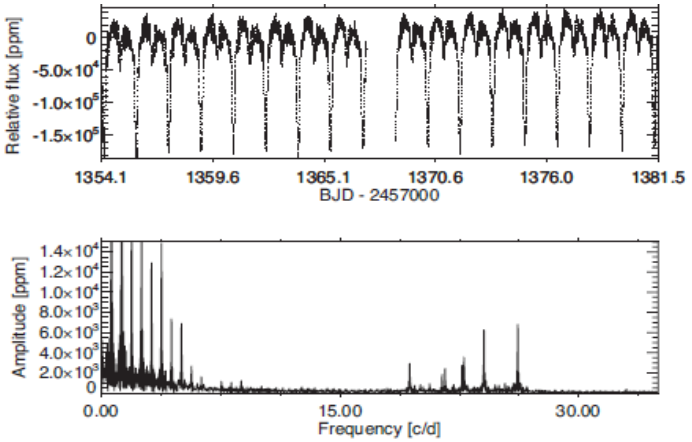


Figure 12. HD 220687. Upper panel: light curve. Lower panel: amplitude spectrum. The equally spaced peaks at low frequencies are due to the eclipses clearly visible in the light curve displayed in the upper panel.

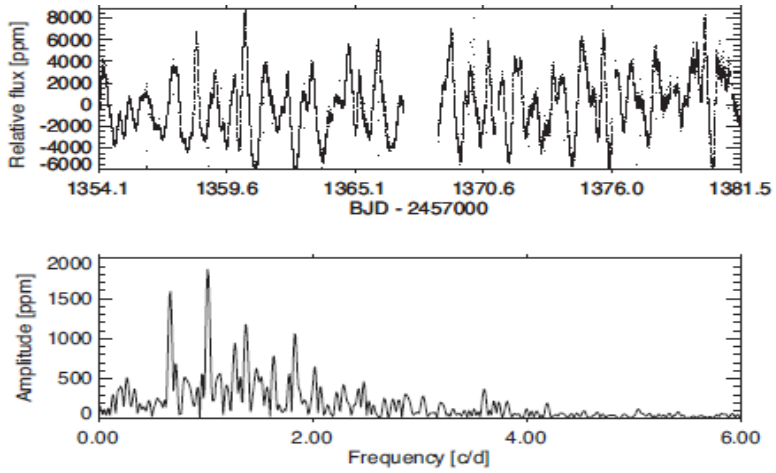


Figure 17. π PsA. Upper panel: here we show the light curve that clearly resembles the variability of a typical γ Dor star. Lower panel: Fourier spectrum of the *TESS* light curve. Here we find six statistically significant

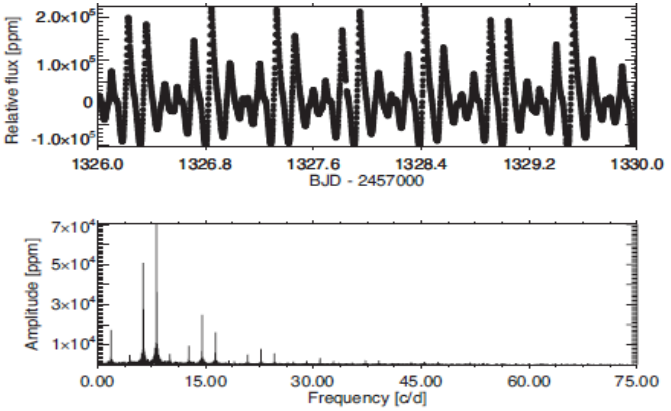


Figure 14. Upper panel: A 4-d section of the *TESS* light curve of HD 224852. The highly non-sinusoidal light curve and the beating between the two dominant modes are clearly visible. Lower panel: amplitude spectrum. The large majority of these peaks are combination frequencies and harmonics of the four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

A TESS-fotometria 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.

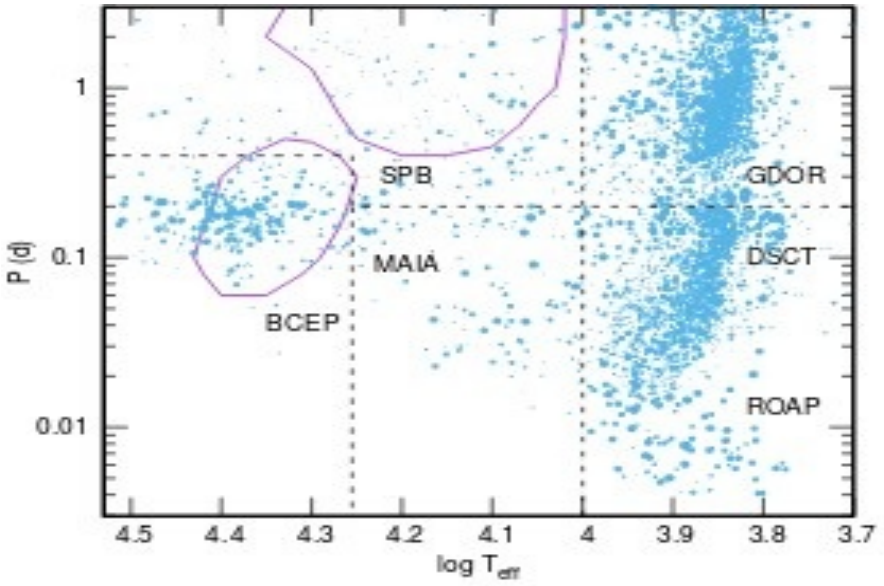


Figure 2. Location of *TESS* pulsating stars stars in the period/effective temperature diagram. For each star, the frequency of maximum amplitude is plotted with size proportional to logarithm of the amplitude. The two oval regions show the location of unstable modes of low degree calculated by Miglio 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.

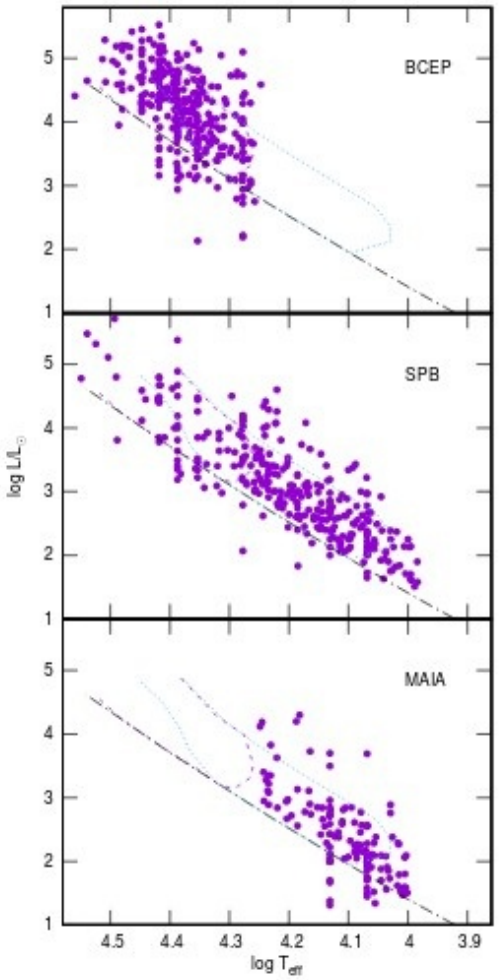
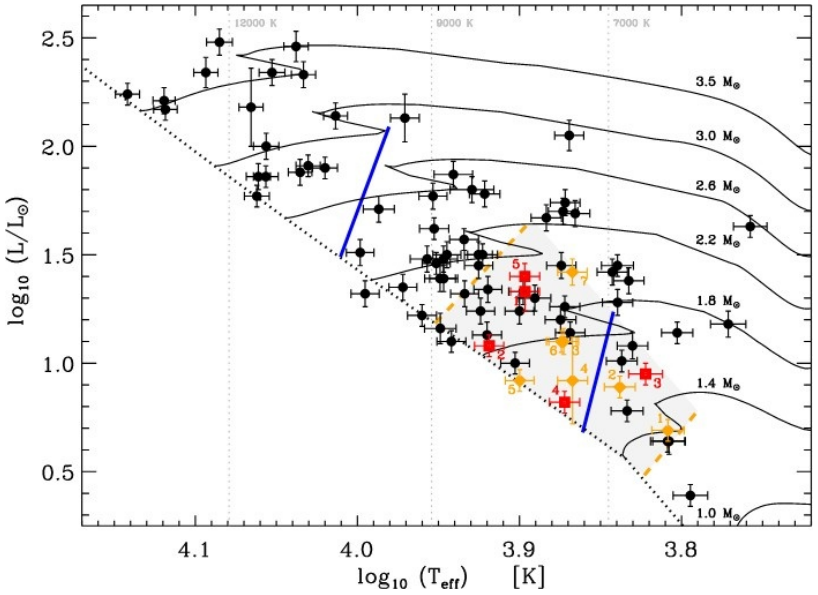
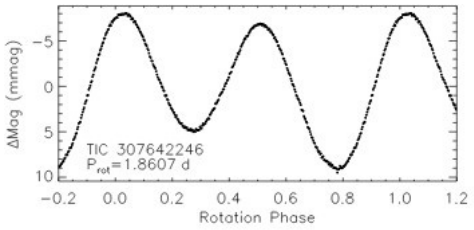


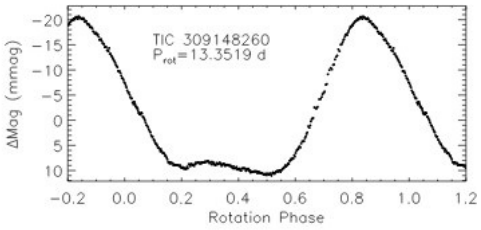
Figure 1. The H–R diagram showing the β Cep, SPB and Maia stars observed by *TESS*. Also shown is the theoretical zero-age main sequence (solid line) and the instability regions of the β Cep and SPB pulsating stars for $Z = 0.02$ and spherical harmonic degree $l \leq 3$ from Miglio et al. (2007b).

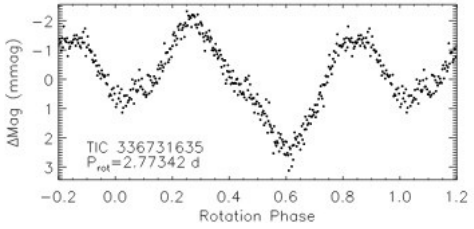
A TESS-fotometria eredményeiből

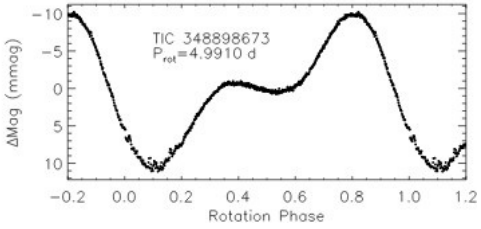
Ap csillagok pulzációja és rotációja (Cunha et al. 2020).
Pirossal jelölve a felső ábrán az újonnan talált gyorsan pulzáló Ap (roAp) csillagok, köztük az eddig ismert legrövidebb periódusú ilyen csillag is (4,7 perces periódussal oszcillál).
Narancsszínű pontok: az 1. és 2. szektorban észlelt, már korábban 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-fotometria 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)

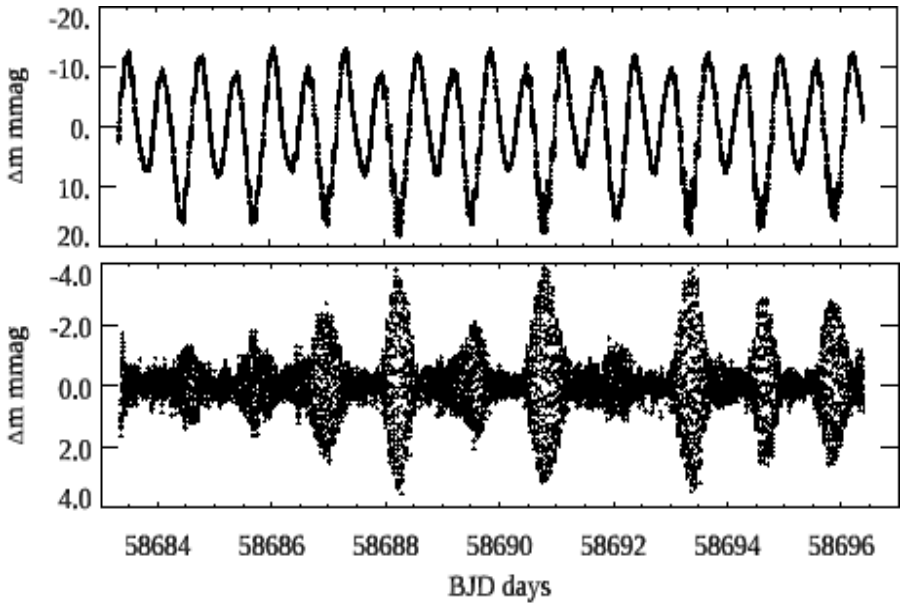
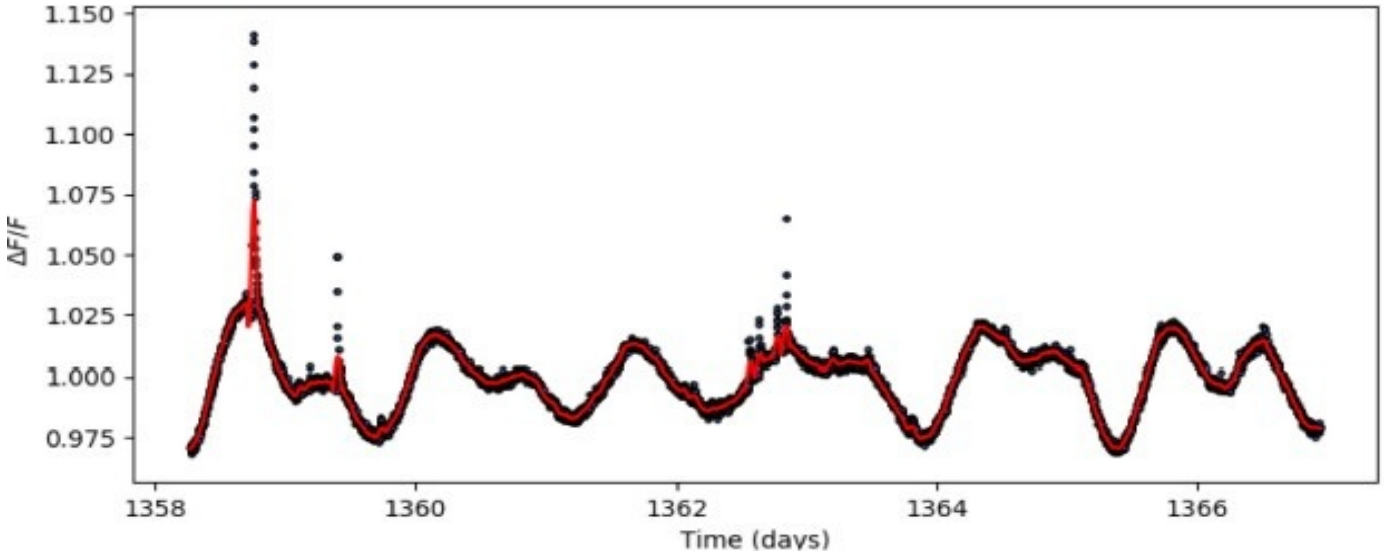


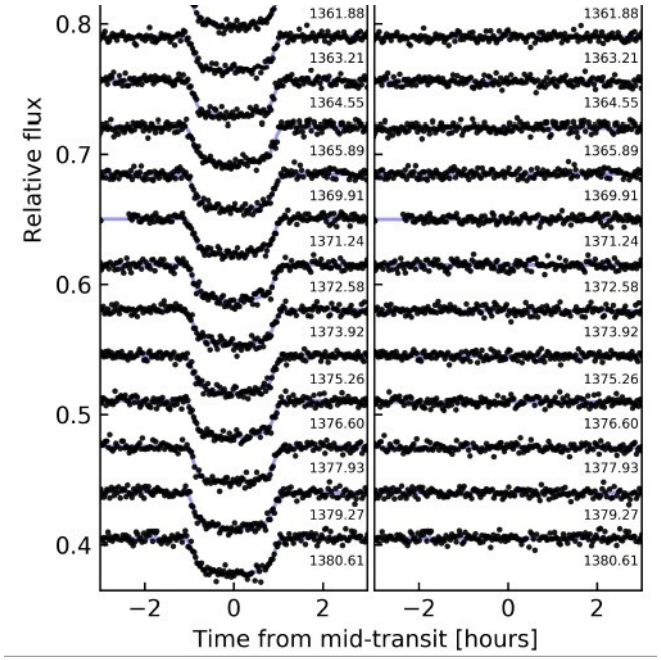
Figure 3. Top: A section of the initial light curve showing the clear ellipsoidal variations. The section of the light curve not shown is similar. Bottom: The same section of the light curve after pre-whitening the orbital variations, g mode frequencies and low frequency artefacts. The amplitude modulation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

A TESS-fotometria 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 becsülték a flerek energiáját. 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 (2 szektorban észlelte a TESS). Flertevékenység az összidő 7,2%-ában zajlik a Proximán. A flerek energiaeloszlása alapján szuperflerek (legalább 10^{33} erg energiával) évente háromszor várhatók. Ez nem engedi a bolygó lakhatóságát.

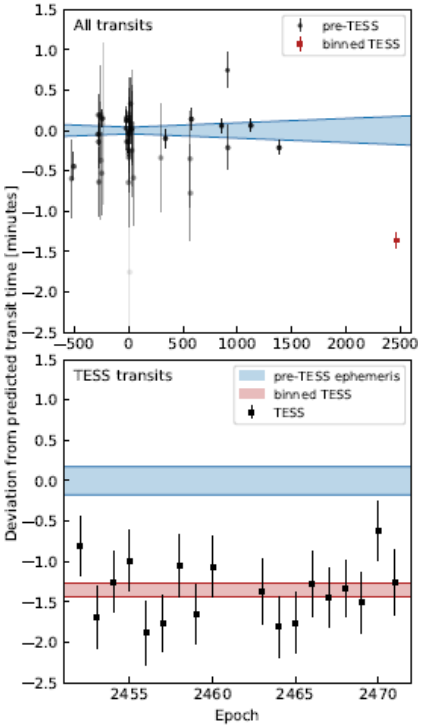


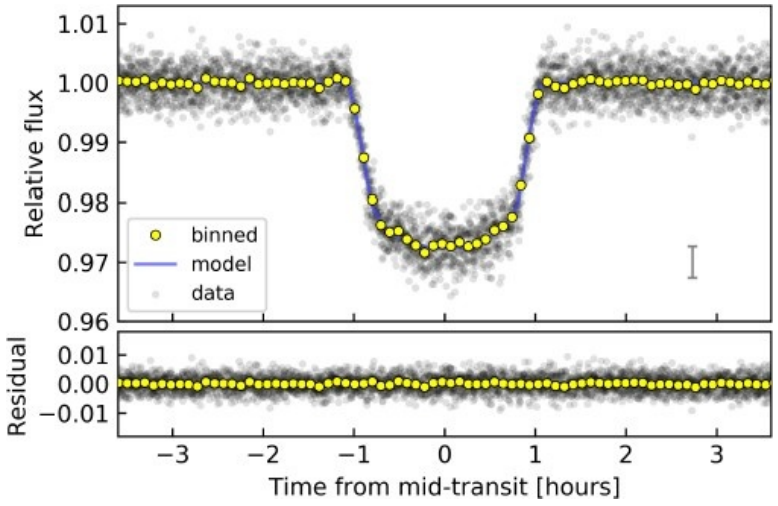
A TESS-fotometria eredményeiből

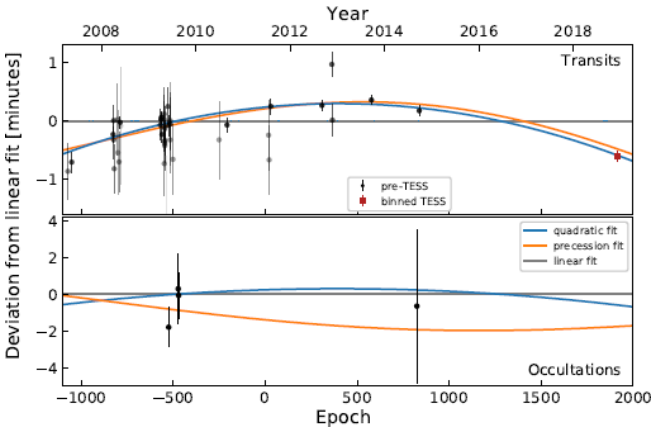


WASP-4 (forró jupiter) 1,3 napos keringési periódussal. A keringési periódus 12,6 ms/év ütemben csökken.

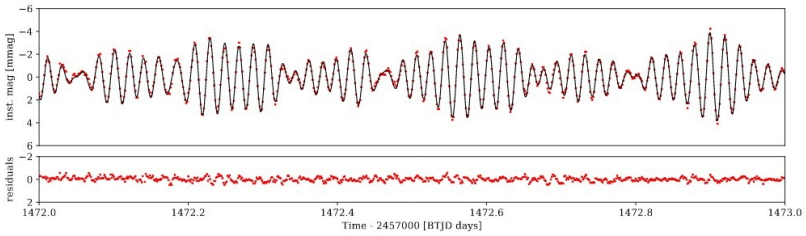
(WASP: Wide-Angle Search for Planets)







A TESS-fotometria eredményeiből



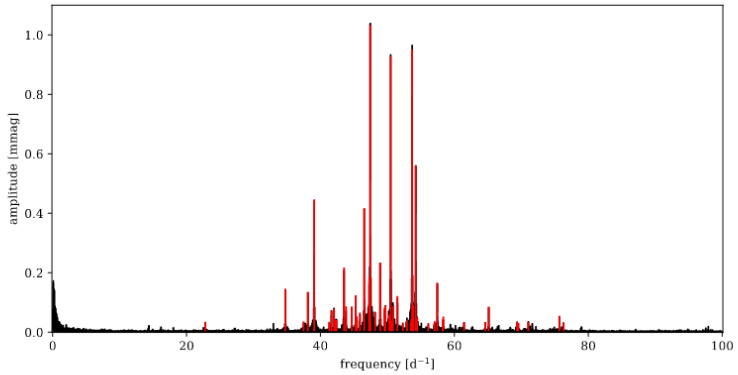
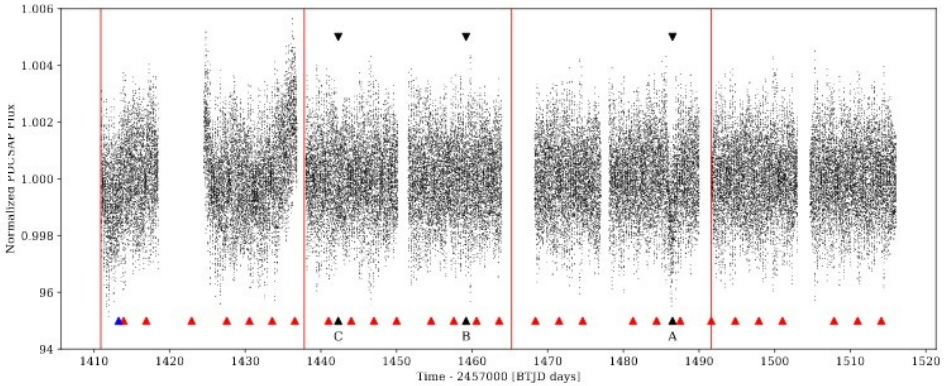
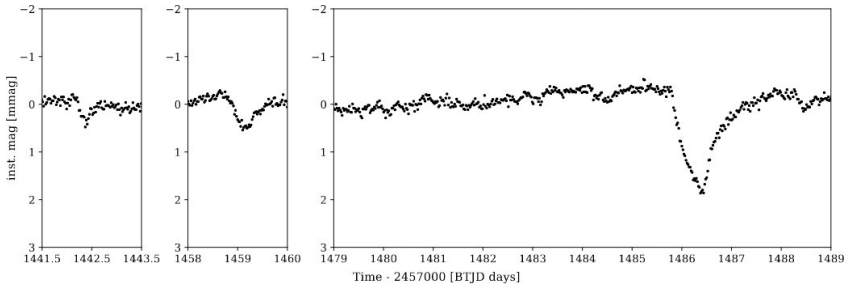


Fig. B.1. Pulsation frequency analysis of β Pictoris: The original amplitude spectrum is in black and the 54 identified δ Scuti pulsations are marked in red.



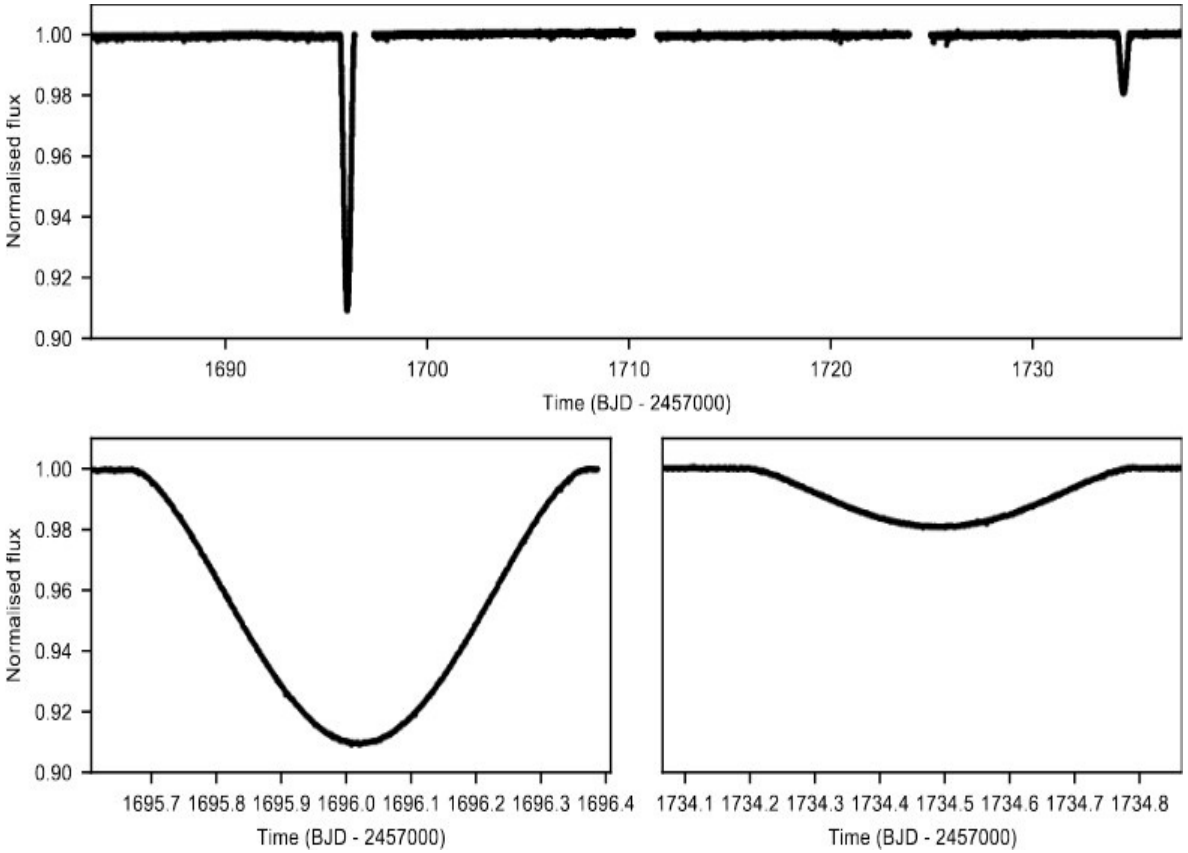
l PDCSAP light curve of β Pictoris used in this analysis. The red vertical lines mark the starts of the Sectors 4 through 7. The black ıt to the three identified decreases in flux, labelled A,B,C in decreasing signal to noise. The time of momentum dumps are marked igles, and a small change in spacecraft 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)

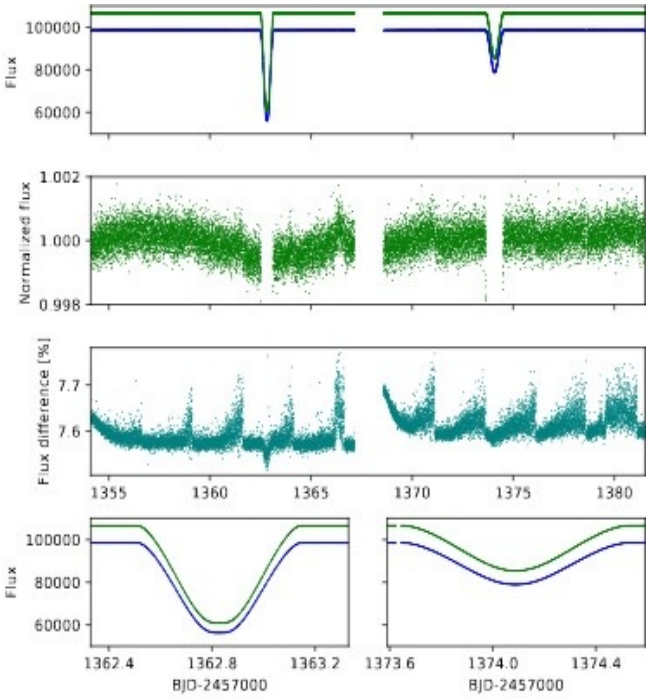


Figure 2. The TESS light curve of AI Phe. The lower (blue) curves show the `SAP_FLUX` values and the upper (green) curves shows the `PDC_SAPFLUX` values from the MAST archive data file. Only the `PDCSAP_FLUX` values are shown in the second panel down from the top. The flux difference value shown in the third panel down are 1 − `SAP_FLUX/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)

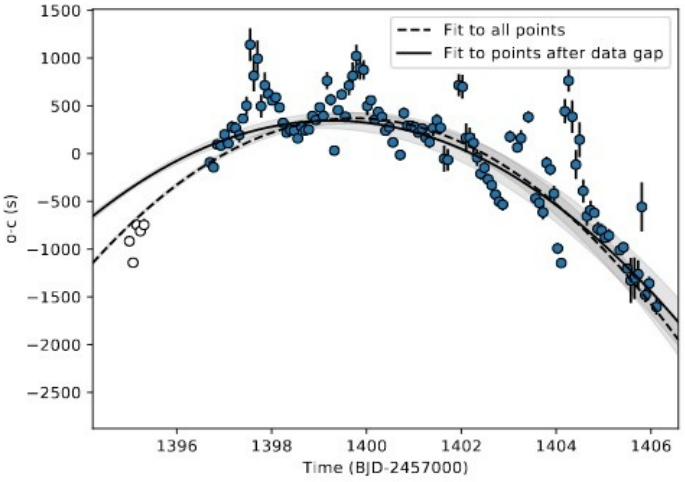
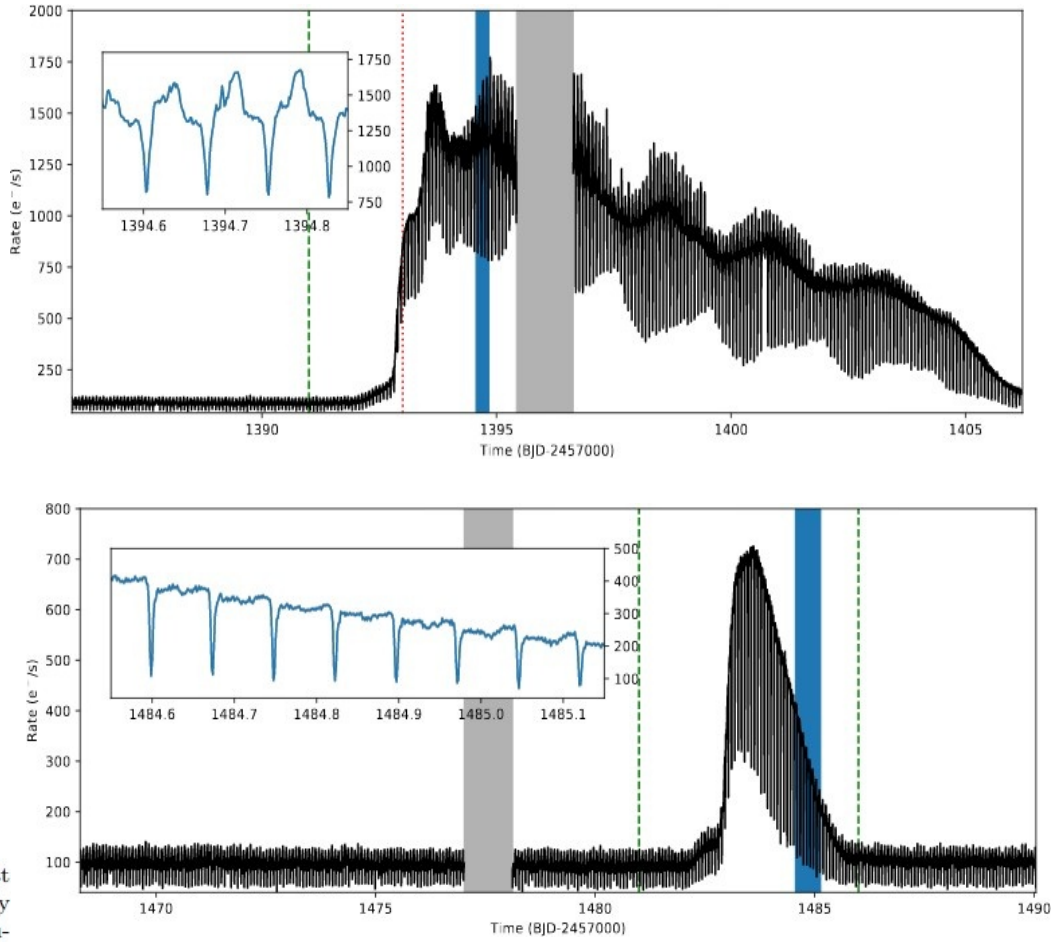


Figure 16. An O-C diagram of superhump arrival times against a linear ephemeris with a period of 0.0771892 d and arbitrary phase. The dashed line is a quadratic ephemeris fit to all su-



A TESS-fotometria eredményeiből

Különféle típusú cefeidák vizsgálata az 1-5. szektorok alapján (Plachy et al. 2021). Kis amplitúdójú modulációk, periódusingadozás stb.

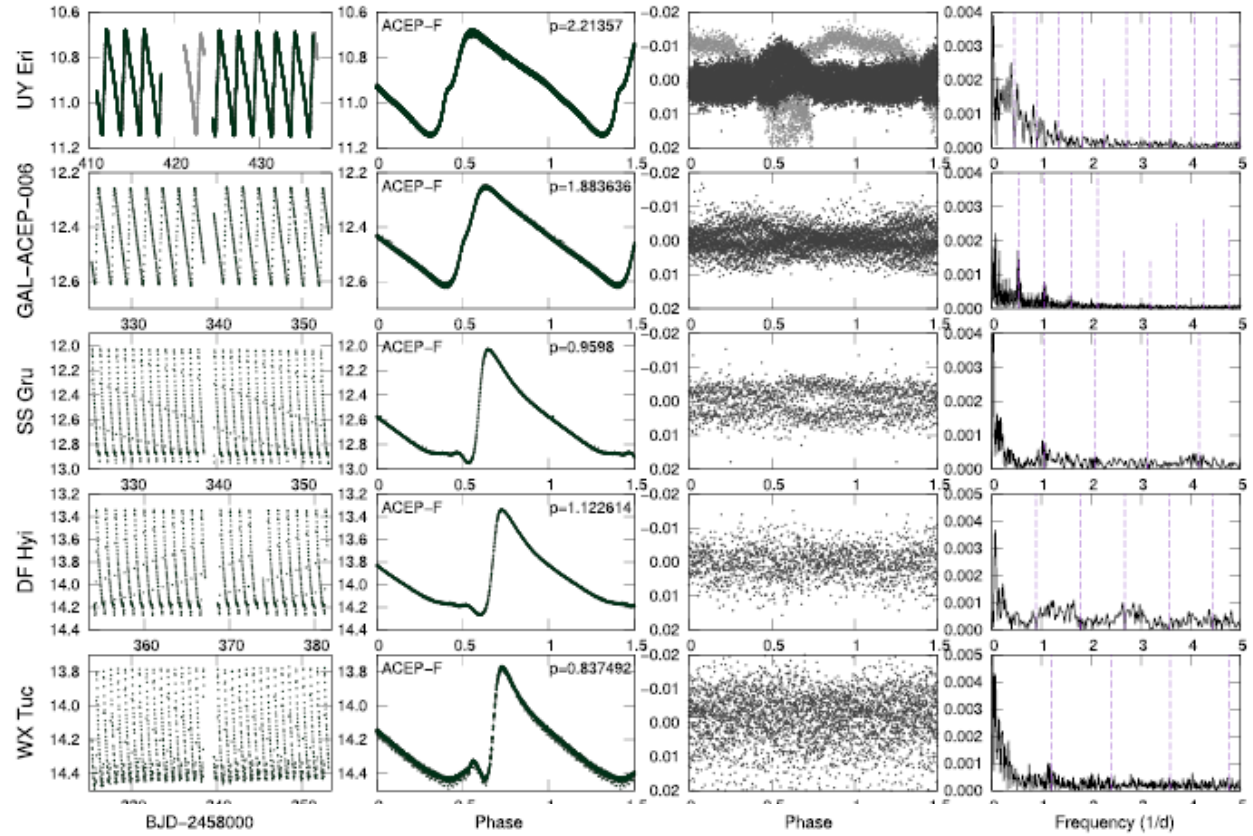


Figure 4. TESS light curves of stars classified as short-period Cepheids in the Milky Way. Types are marked with different colors. Dark green: ACEP-F, light green: ACEP-1O, red: BLH, brown: non-Cepheid. Columns from left to right: light curves, phased light curves, phased residual light curves, and residual spectra (after removing the frequency series of the brightness variation, marked with dashed lines).

A TESS-fotometria eredményeiből

Az előző ábra alsó része: anomális és II. típusú cefeidák (Plachy et al. 2021)

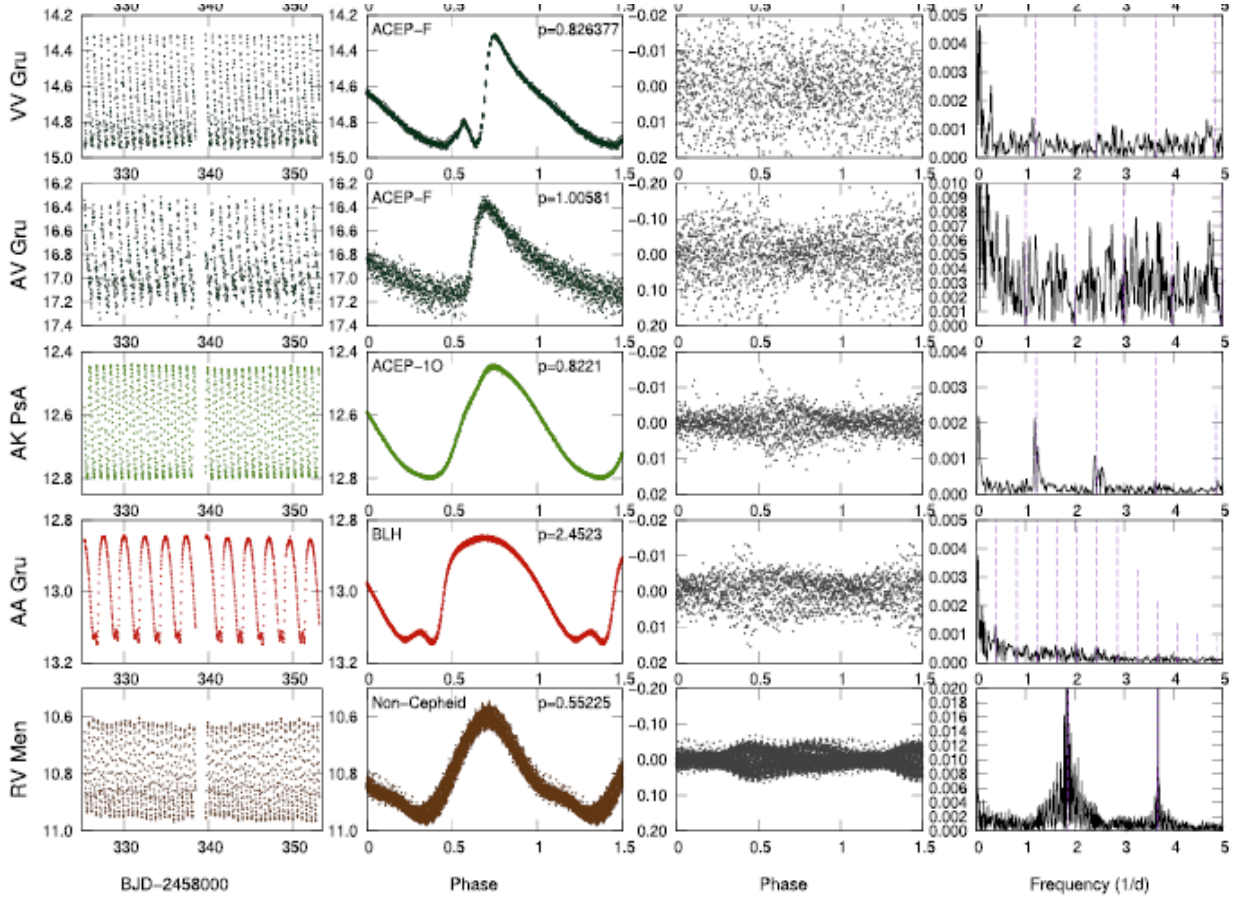


Figure 4. TESS light curves of stars classified as short-period Cepheids in the Milky Way. Types are marked with different colors. Dark green: ACEP-F, light green: ACEP-1O, red: BLH, brown: non-Cepheid. Columns from left to right: light curves, phased light curves, phased residual light curves, and residual spectra (after removing the frequency series of the brightness variation, marked with dashed lines).

A TESS-fotometria eredményeiből

Még a Magellán-felhőkbeli cefeidák is jól észlelhetők. (Plachy et al. 2021)

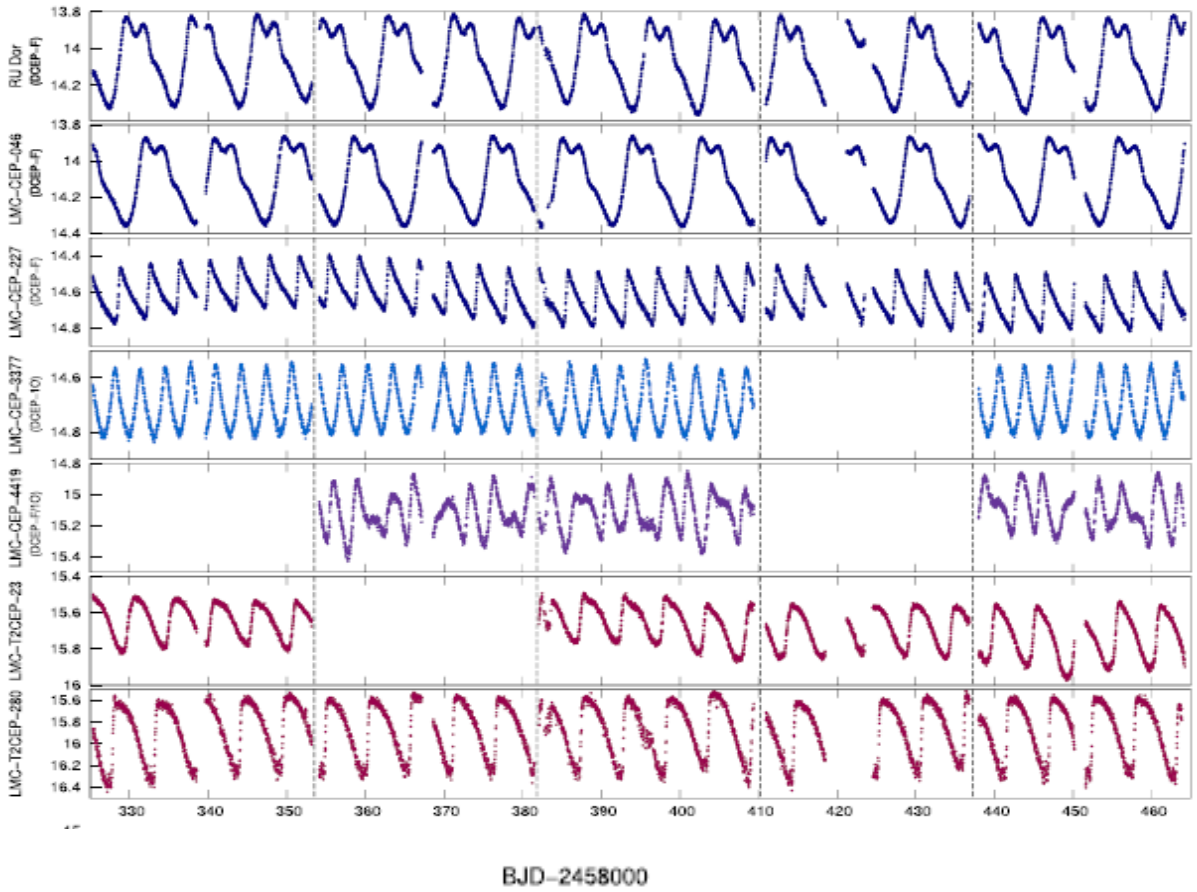


Figure 9. FITSH light curves of Cepheids in the Magellanic System. Subtypes are marked in different colors: DCEP-F (dark blue), DCEP-1O (light blue), double-mode stars (purple), and T2CEP (dark red). Dashed vertical lines divide the different sectors.

A TESS-fotometria eredményeiből

Példák kettős cefeidákra: az OGLE LMC-T2CEP-023 fénygörbéje a keringési periódussal feltekerve (balra), az OGLE-LMC-CEP-227 O-C diagramja pedig fényidő-effektust mutat (jobbra). (Plachy et al. 2021)

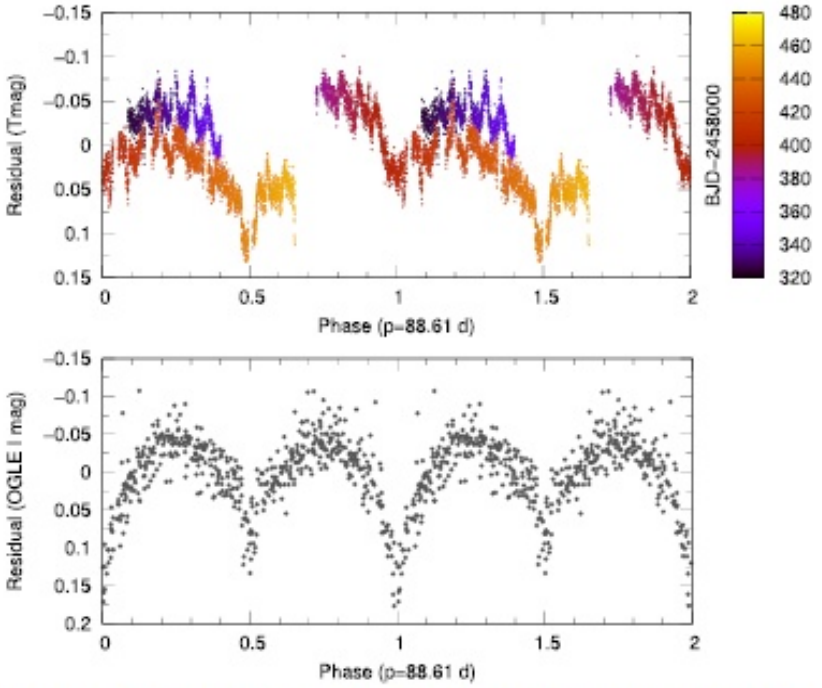


Figure 10. Residual light curves of OGLE LMC-T2CEP-023 folded with the orbital period of the system. Upper panel: TESS data. The color bar indicates the time evolution (BJD-2,458,000). Lower panel: OGLE *I*-band data.

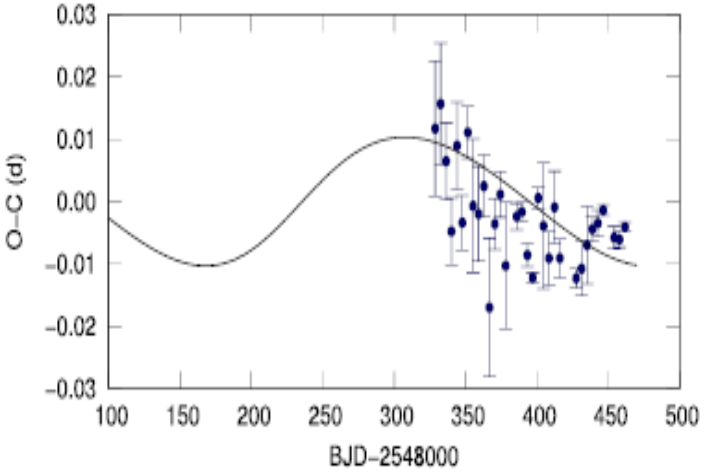


Figure 11. The O−C diagram of OGLE LMC-CEP-227 plotted on the expected light-time effect caused by the known companion star.

A TESS-fotometria eredményeiből

Az XZ Ceti anomális cefeida 2 perces mintavételezésű adatsora igazi csemege: a fő pulzáció mellett megjelenik a 0,61 arányú nemradiális módus is, alharmonikusokkal (mint az RR Lyrae típusú csillagoknál). (Plachy et al. 2021)

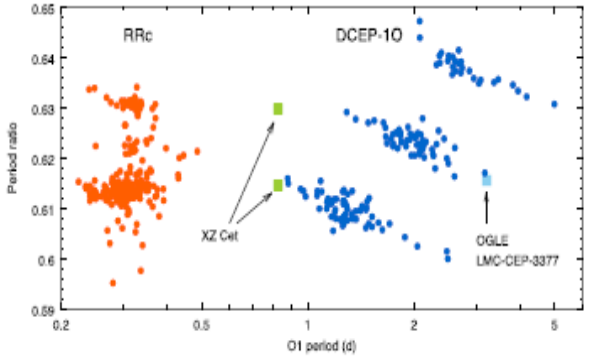


Figure 6. The Petersen diagram of nonradial modes of spherical-harmonic degree $\ell = 7, 8, 9$, from top to bottom, in overtone RR Lyrae (orange) stars and Cepheids (blue). Sources: Netzel et al. (2015a, 2015b), Netzel & Smolec (2019), Moskalik et al. (2015), Jurcsik et al. (2015), Smolec & Śniegowska (2016), and Moskalik & Kołaczkowski (2009). The new discoveries, XZ Cet and OGLE LMC-CEP-3377 (see Section 3.3.4), are marked with squares.

Table 3
Fourier Solution of XZ Cet

	Frequency (c/d)	Amplitude (m)	Phase
f_1	1.215105(8)	0.15298(6)	0.13958(6)
$2f_1$	2.43021(5)	0.02638(6)	0.8554(3)
$3f_1$	3.64532(9)	0.01327(6)	0.5430(6)
$4f_1$	4.8604(2)	0.00519(6)	0.183(2)
$5f_1$	6.0755(10)	0.00120(6)	0.831(8)
$6f_1$	7.291(3)	0.00041(6)	0.12(2)
$7f_1$	8.5057(10)	0.00092(6)	0.734(10)
$8f_1$	9.7202(10)	0.00104(6)	0.387(9)
$9f_1$	10.9359(10)	0.00097(6)	0.031(10)
$10f_1$	12.1511(10)	0.00078(6)	0.68(12)
$11f_1$	13.366(2)	0.00060(6)	0.34(15)
$12f_1$	14.581(3)	0.00043(6)	0.96(2)
$13f_1$	15.796(4)	0.00028(6)	0.61(3)
f_2	1.97717(10)	0.00930(6)	0.8511(10)
$f_1 + f_2$	3.1922(2)	0.00462(6)	0.332(2)
$2f_1 + f_2$	4.4074(5)	0.00265(6)	0.883(3)
$3f_1 + f_2$	5.622(10)	0.00117(6)	0.531(8)
$4f_1 + f_2$	6.838(10)	0.00073(6)	0.192(12)
$f_2 - f_1$	0.7621(4)	0.00336(6)	0.839(3)
$0.5f_2$	0.9886(3)	0.00353(6)	0.3348(11)
$1.5f_2$	2.9657(7)	0.00152(6)	0.819(5)
$f_1 + 1.5f_2$	4.1808(10)	0.00107(6)	0.361(10)
$2f_1 + 1.5f_2$	5.3960(10)	0.00110(6)	0.845(12)
$3f_1 + 1.5f_2$	6.611(2)	0.00064(6)	0.474(15)
f_3	1.9296(10)	0.00097(6)	0.980(11)
$0.5f_3$	0.9648(3)	0.00428(6)	0.321(13)

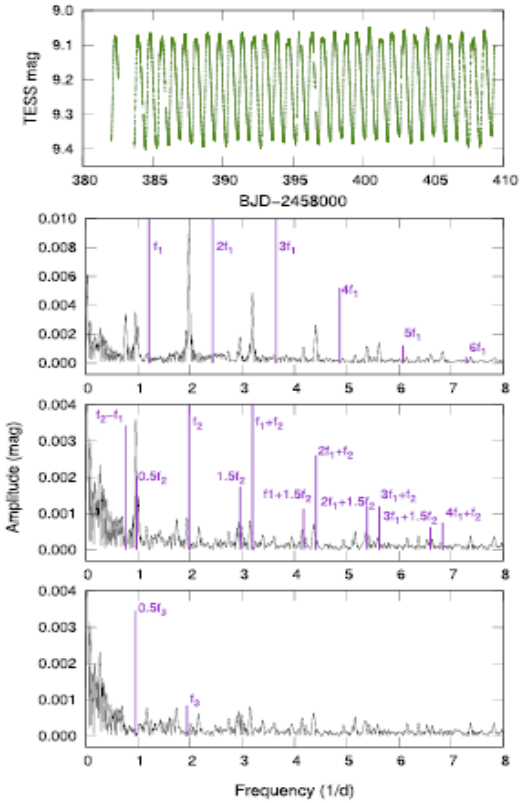


Figure 5. The TESS light curve of XZ Cet (upper panel) and residual Fourier spectra at different pre-whitening steps: after prewhitening with the f_1 harmonic series (second panel), with f_2, its subharmonics and combinations with f_1 (third panel), finally with f_3 and its subharmonic (lower panel).

A TESS-fotometria eredményeiből

A ciklusról ciklusra történő periódusingadozás minden típusú cefeidánál látszik. (Plachy et al. 2021)

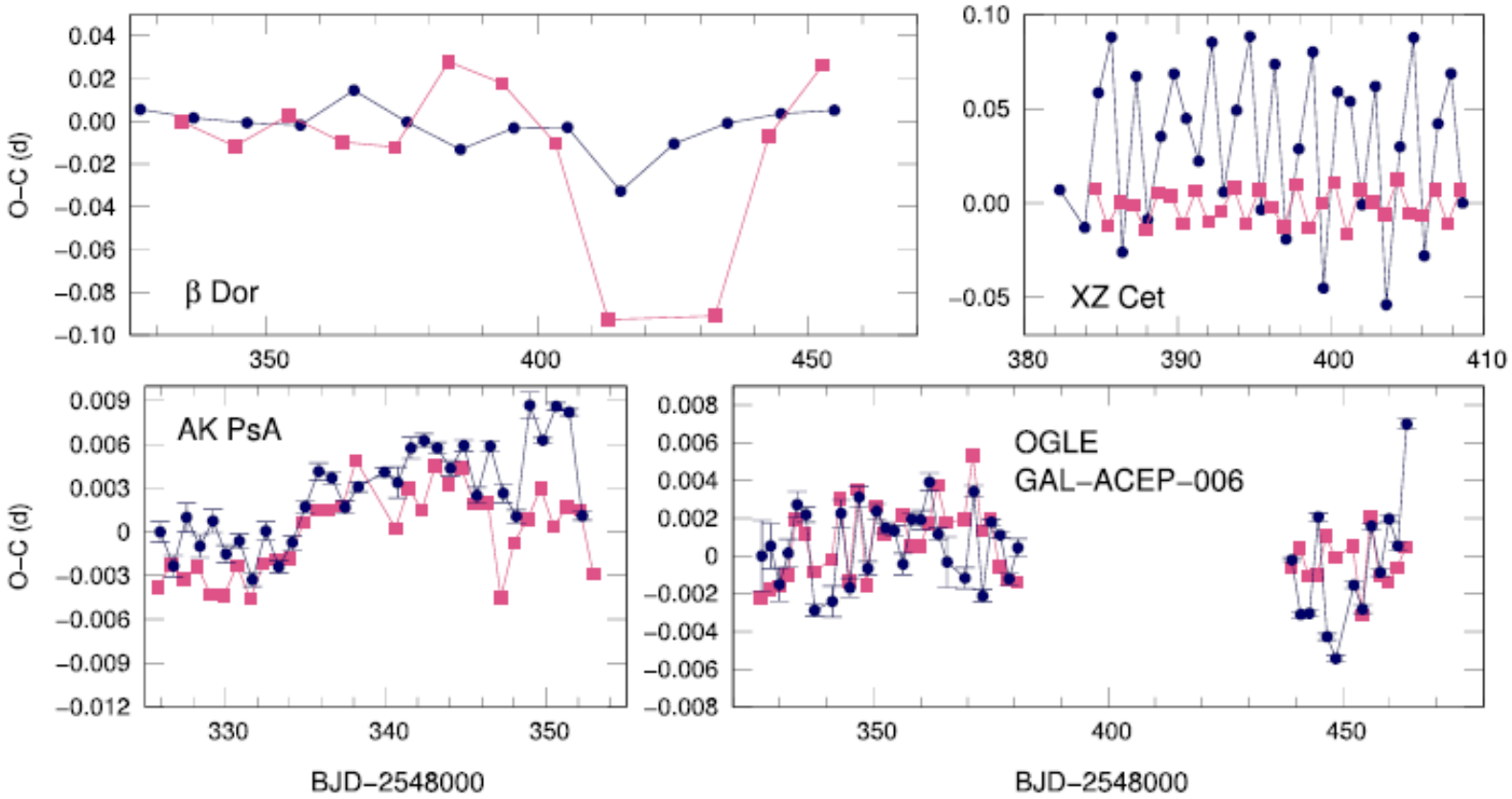
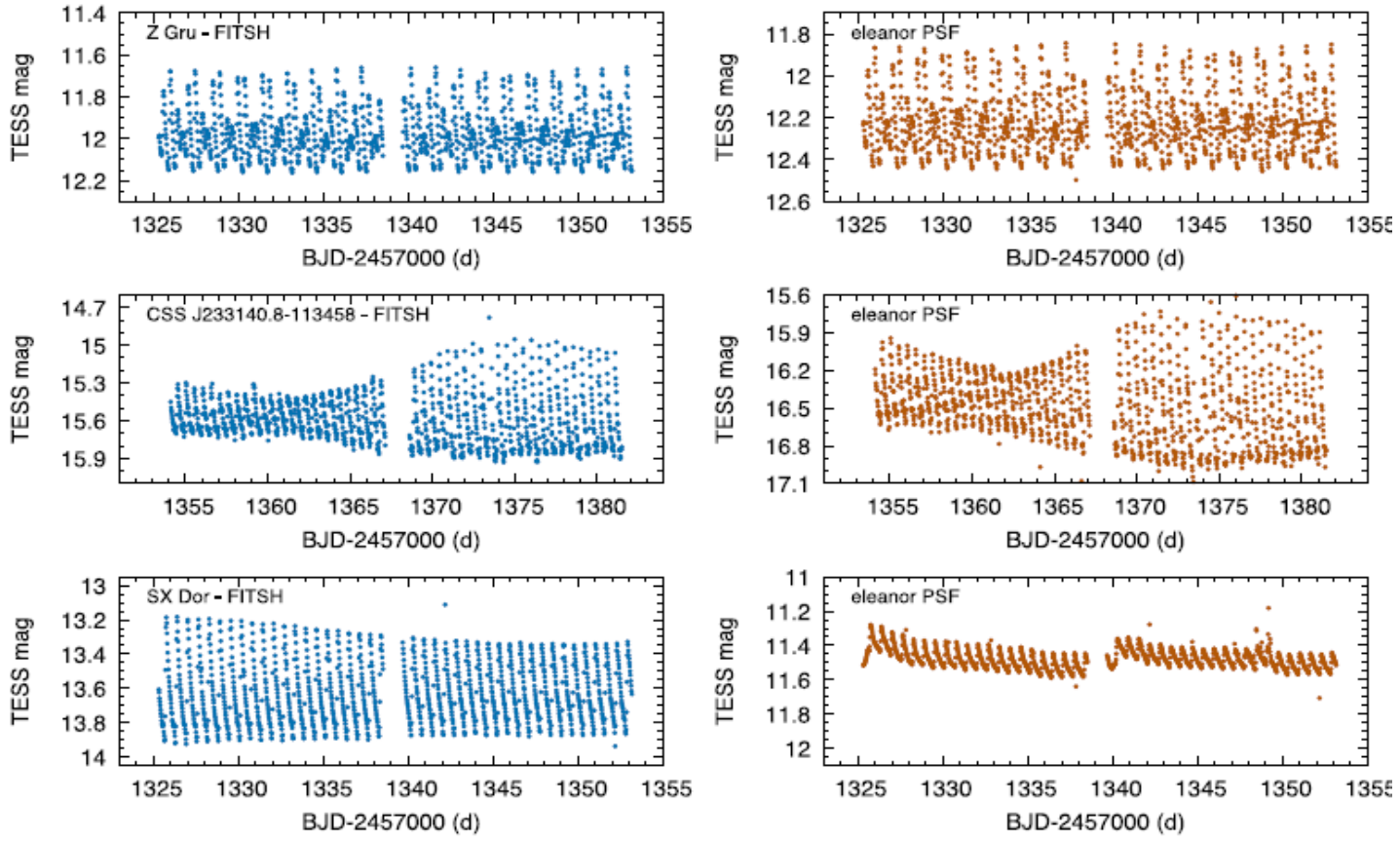


Figure 18. O−C diagrams of β Dor, XZ Cet, AK PsA, and OGLE GAL-ACEP-006, calculated via polynomial fitting of the maxima (blue) and median value of the ascending branch (pink). Errors are smaller than the symbols in the upper panels (15–20 s for β Dor, 1–2 s for XZ Cet). The median method for AK PsA and OGLE GAL-ACEP-006 gives errors below 1 minute.

A TESS-fotometria eredményeiből

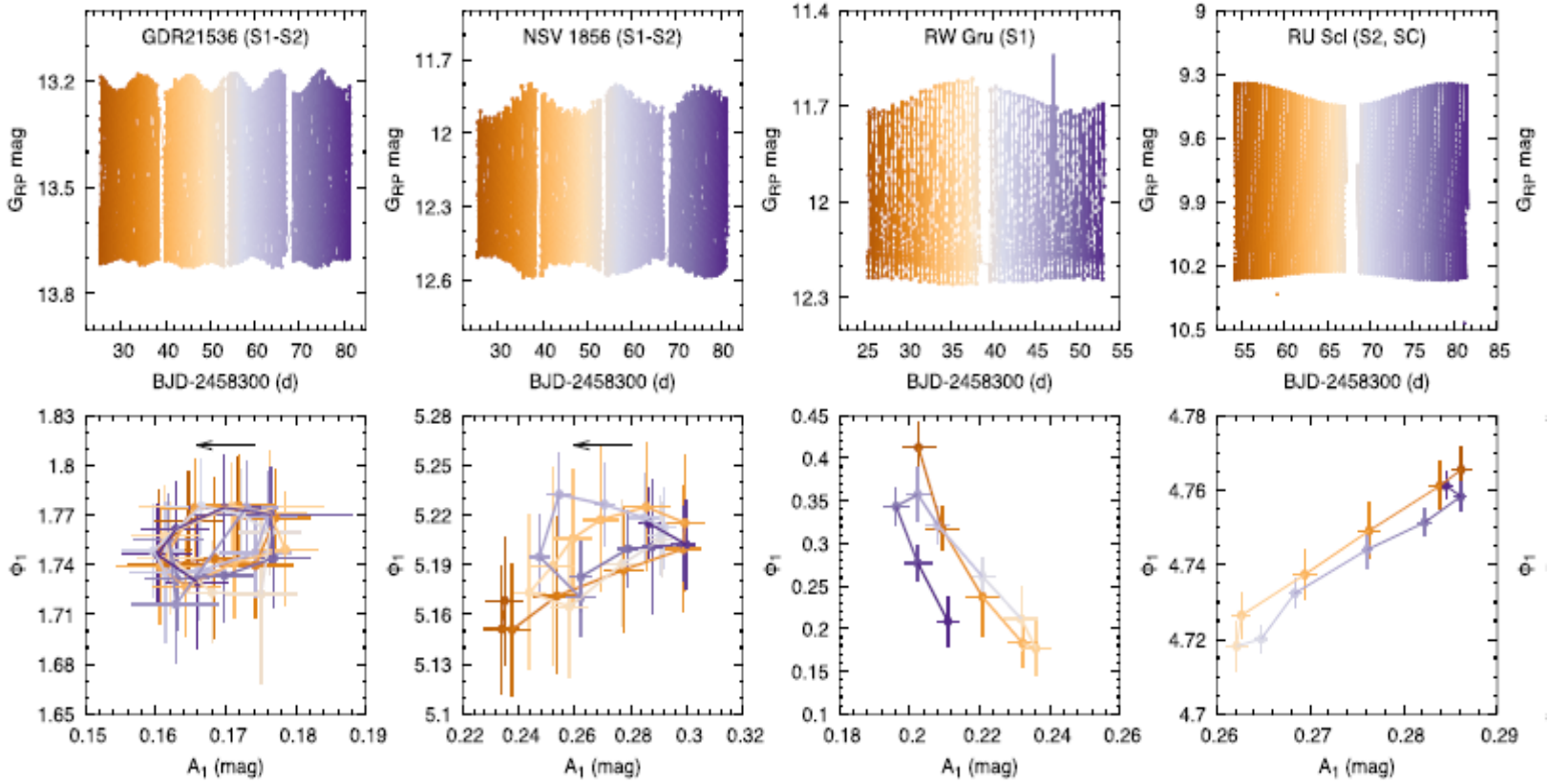
RR Lyrae típusú csillagokra hasonlóan alapos vizsgálat: 118 csillagra az 1-2. szektorok mérései alapján. A fénygörbék többsége modulált. (Molnár et al. 2022)



gure 2. Comparison of the FITSH differential-imaging aperture photometry (left row) with the ELEANOR

A TESS-fotometria eredményeiből

A fénygörbe és a Fourier-paraméterek ciklikus változása RRab csillagokra. (Molnár et al. 2022)



igure 9. Five examples of modulated RRab stars. Upper row: light curves. Bottom row: loop diagrams of the A_1 and ϕ_1 Fourier terms

A TESS-fotometria eredményeiből

A fénygörbe és a Fourier-paraméterek ciklikus változása RRc csillagokra. (Molnár et al. 2022)

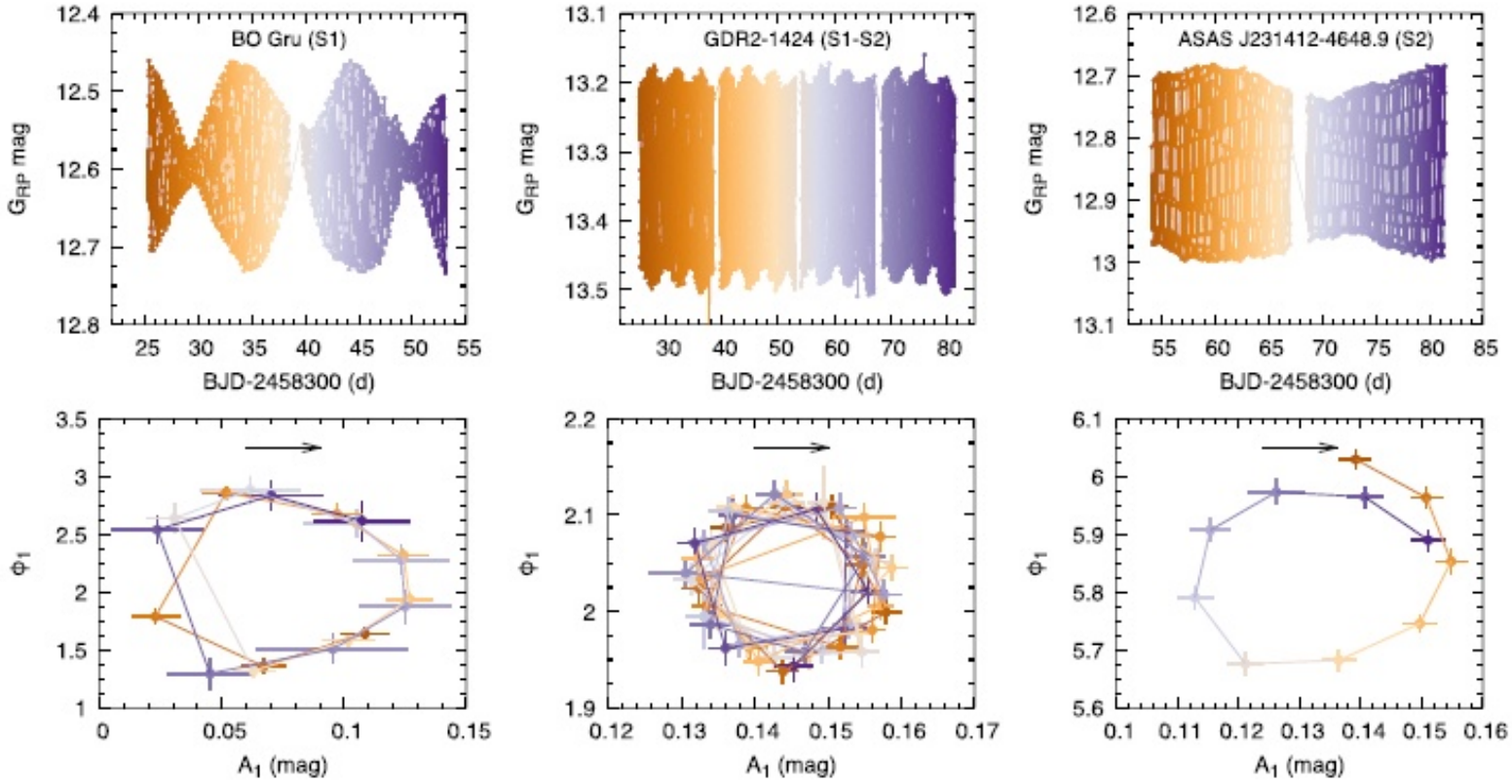
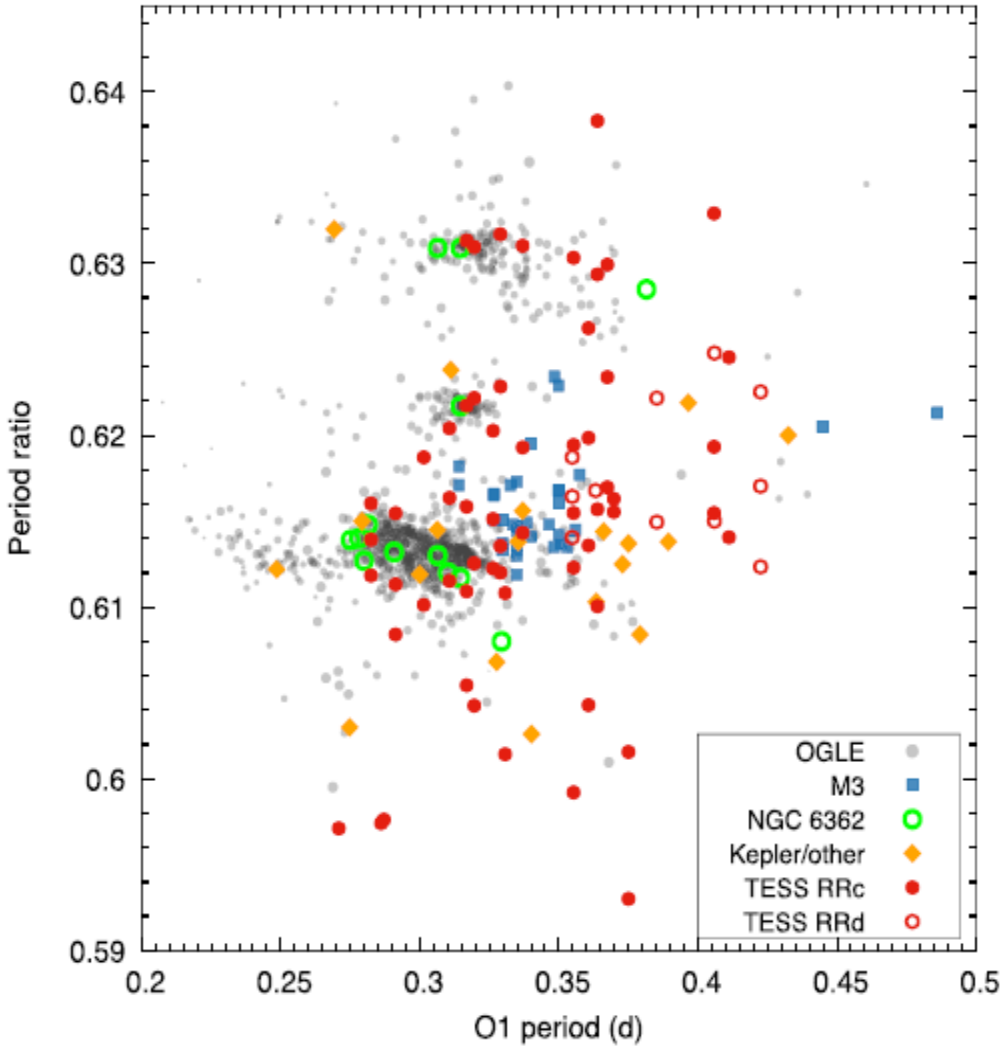


Figure 10. Same as Figure 9 but for modulated RRc stars.

A TESS-fotometria eredményeiből

Az RR Lyrae csillagok nemradiális módusainak periódusarányai az alapperiódus függvényében (ún. Petersen-diagram). (Molnár et al. 2022)



A TESS-fotometria eredményeiből

Két évnyi adatsorból 633 felhangban pulzáló RR Lyrae (RRc) csillag fénygörbéjének vizsgálata. 10% a Blazskó-effektus gyakorisága. A fő pulzáció frekvenciája fluktuál, ha gerjesztve van nemradiális módus is. (Benkő et al. 2023)

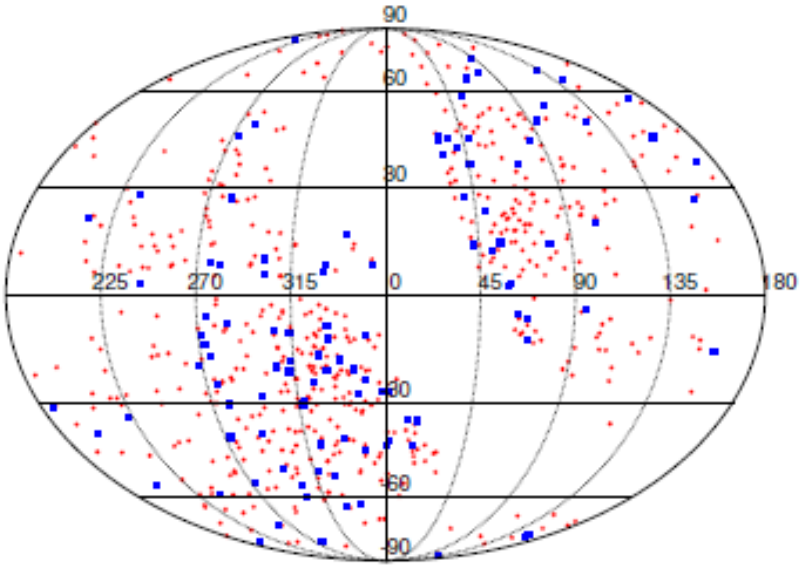


Figure 12. Galactic distribution of the bright *TESS* RRc sample. Red dots: stars with additional modes, blue rectangles: stars without additional modes.

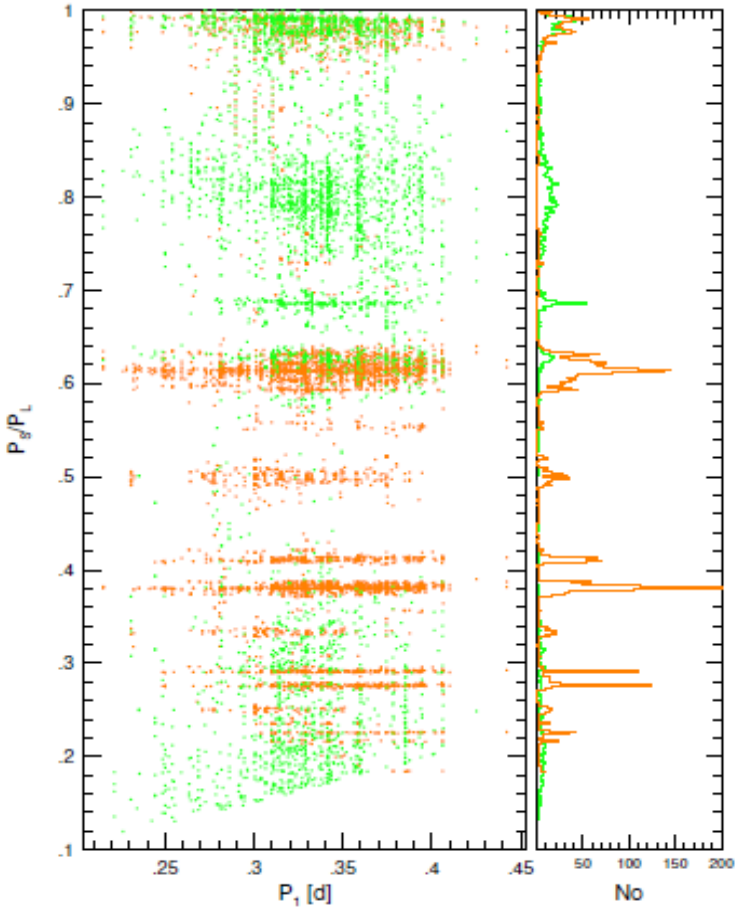


Figure 3. Left panel: period ratios of the additional mode P_x and the dominant pulsation period P_1 as a function of P_1. In accordance with previous studies, we always divide the shorter period P_S with the longer one P_L, so the values are always between 0 and 1. Orange symbols: $P_x/P_1 < 1$ (shorter periods), green symbols: $P_x/P_1 > 1$ (longer periods). Right panel: histograms show the additional frequency incidence rates as a function of the period ratio.

A TESS-fotometria eredményeiből

Triplán fedő hármas rendszerek fénygörbéinek fotodinamikai elemzése (Rappaport et al. 2023, a szerzők között Borkovits Tamás).

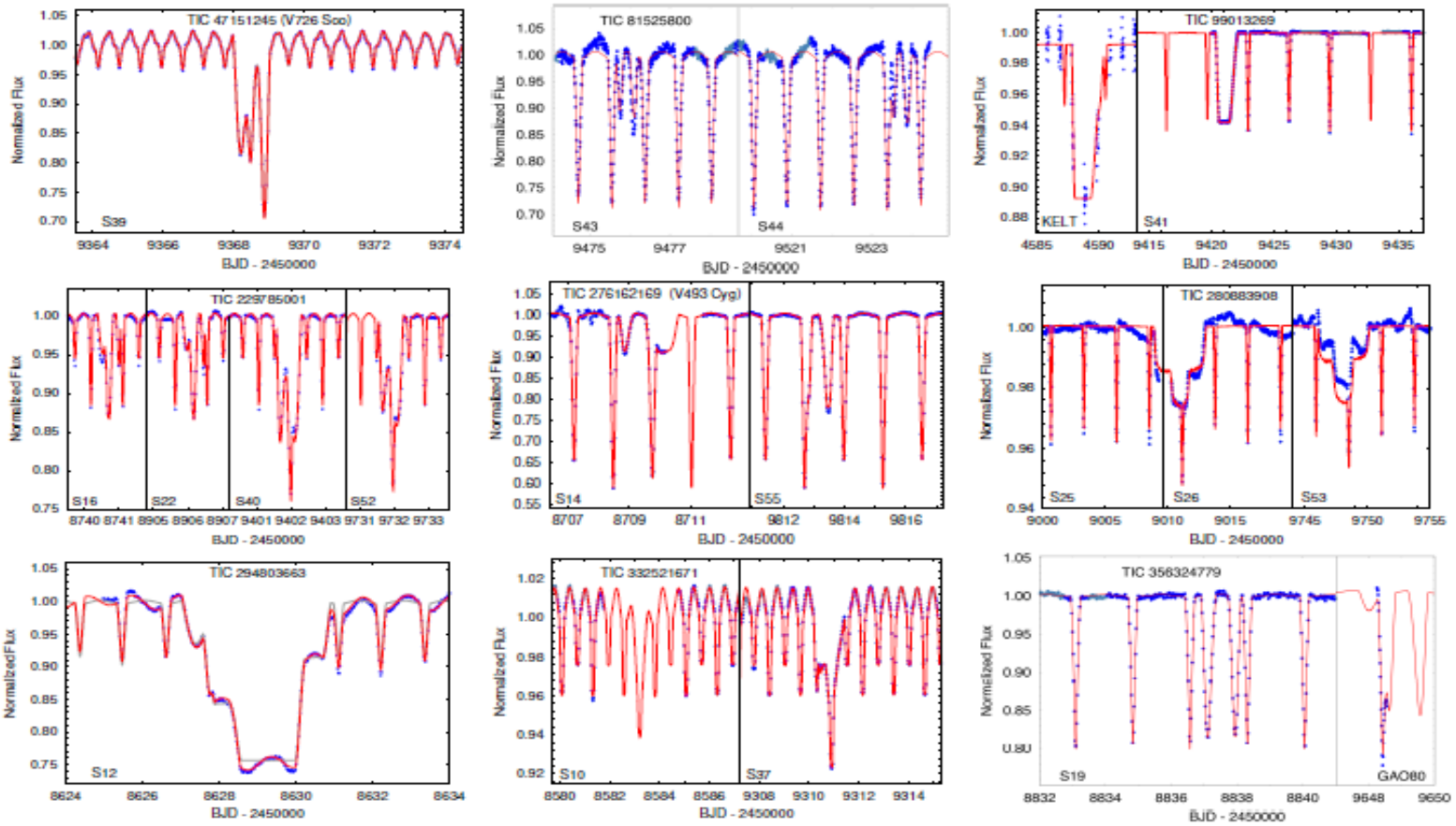


Figure 1. *TESS* third body lightcurves. We present a portion of a sector's lightcurve for each source containing the third body event that led to their discoveries. For most of the sources there is only a single third body event that was detected. The overplotted model lightcurves are discussed in Sect. 7. The lighter blue points in the out-of-eclipse region were omitted from the photodynamical fits to save computation time. Note, in the case of TICs 47151245 and 294803663 the light gray lines represent the pure triple-star model, without the contributions of the stellar oscillations.

A TESS-fotometria eredményeiből

A vizsgált 9 rendszerben a belső fedési kettős tagjainak tömege 0,9–2,6 naptömeg közötti, a külső tag tömege 1,4–2,8 naptömeg, sugara 1,5–13 naprádiusz. Hat rendszerben a pályák koplanárisak. (Rappaport et al. 2023)

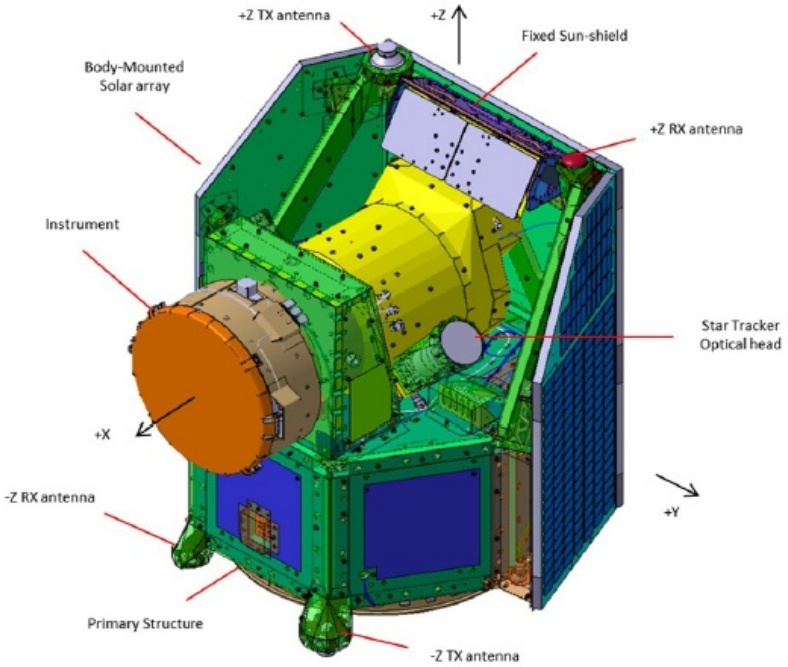
Table 2. *TESS* Observation Sectors for the Triples[a]

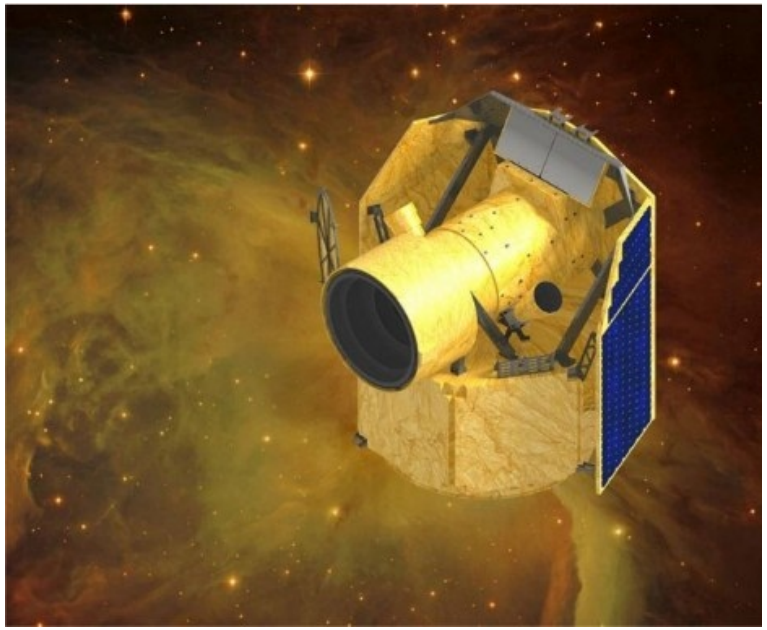
Object	Sectors Observed	Third Body Events
TIC 47151245	S12 & S39	S39
TIC 81525800	S43-S45	S43 & S44
TIC 99013269	S14-S15, S41, S55	S41
TIC 229785001	23 sectors in S14-S55	S16, S22, S40 & S52
TIC 276162169	S14-15, S41, S54-S55	S14, S55
TIC 280883908	S25-S26 & S52-S53	S25-S26 & S53
TIC 294803663	S11-S12 & S38-S39	S12
TIC 332521671	S10 & S37	S37
TIC 356324779	S19	S19

Object	This Work[b] (P_{out}, e_{out}, ω_{out})	Gaia DR3 Orbits[b,c] (P_{out}, e_{out}, ω_{out})	Zasche et al.[b,d]
TIC 47151245	284.90 d; 0.480; 219°	…	285 d
TIC 81525800	47.85 d; 0.614; 201°	…	…
TIC 99013269	604.05 d; 0.463; 271°	Astr.: 609.5 d; 0.458; …	…
TIC 229785001	165.25 d; 0.458; 31°	Spect.: 166.0 d; 0.493; 16°	165.3 d
TIC 276162169	117.10 d; 0.268; 243°	…	…
TIC 280883908	184.35 d; 0.260; 146°	Spect.: 184.1 d; 0.258; 142°	…
TIC 294803663	153.14 d; 0.030; 313°	Spect.; 153.1 d; 0.047; 252°	153.1 d
TIC 332521671	48.50 d; 0.004; 311°	…	…
TIC 356324779	86.65 d; 0.284; 144°	…	86.7 d

CHEOPS

CHEOPS: ***CH***aracterizing ***E***x***OP***lanet ***S***atellite (Svájc+ESA – az ESA első S-missziója). Cél: 1–20 földtömeg közötti exobolygók keresése 3,5 évig, már ismert exobolygók részletes vizsgálata (tömeg, sugár meghatározása, földi spektroszkópiai adatok birtokában). Indítás: 2019. december 18. (Kourou), 712–715 km magasan húzódó napszinkron pályára, 90 perces keringési idővel. Cheops írásmóddal is hivatkoznak rá. Magyar részvétel: hardverrel és a tudományos programban is.





CHEOPS

A 32 cm-es RC-távcsővel végzett tudományos program kezdete: 2020. április.
A detektor hátsó megvilágítású CCD-kamera képtovábbító üzemmódban.
A kamera 330–1100 nm hullámhosszak között érzékeny. A tudományos program 80%-a GTO (Guaranted Time Observing), 20% (GO, Guest Observer) pályázható. A CHEOPS Science Team (vezeti Didier Queloz) ítéli oda.

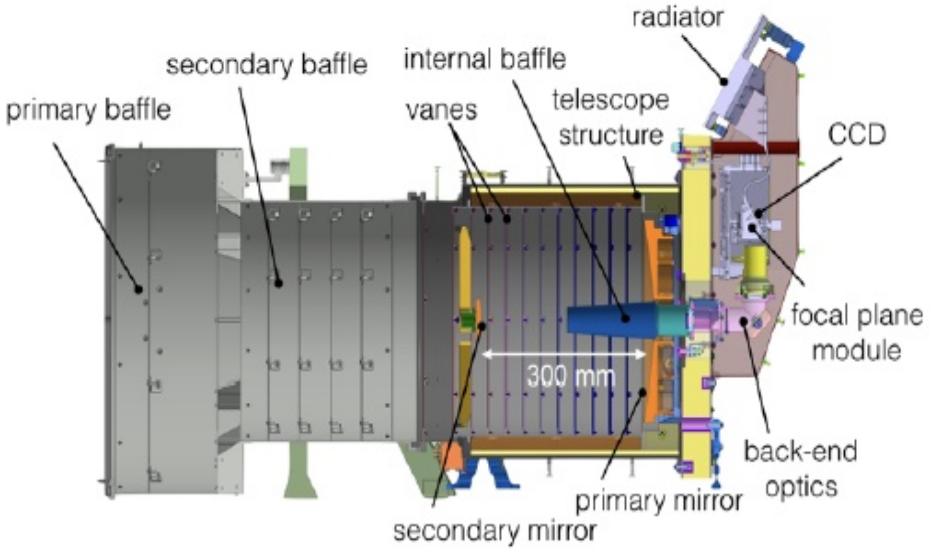
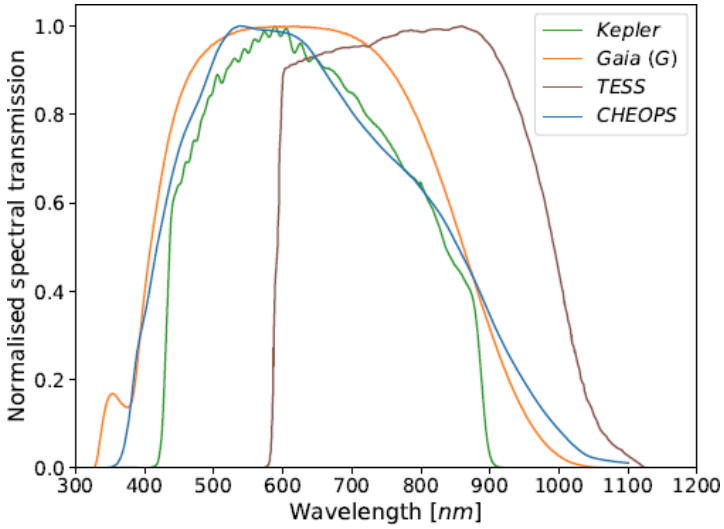


Fig. 5 CAD/CAM view of the OTA and BCA assemblies as mounted on the spacecraft. The primary and secondary baffle constitute the BCA. It is a separate unit mounted on the spacecraft independently of the OTA. The remaining items resemble the OTA.



CHEOPS

Egy tipikus CHEOPS-mérési adatsor részlete

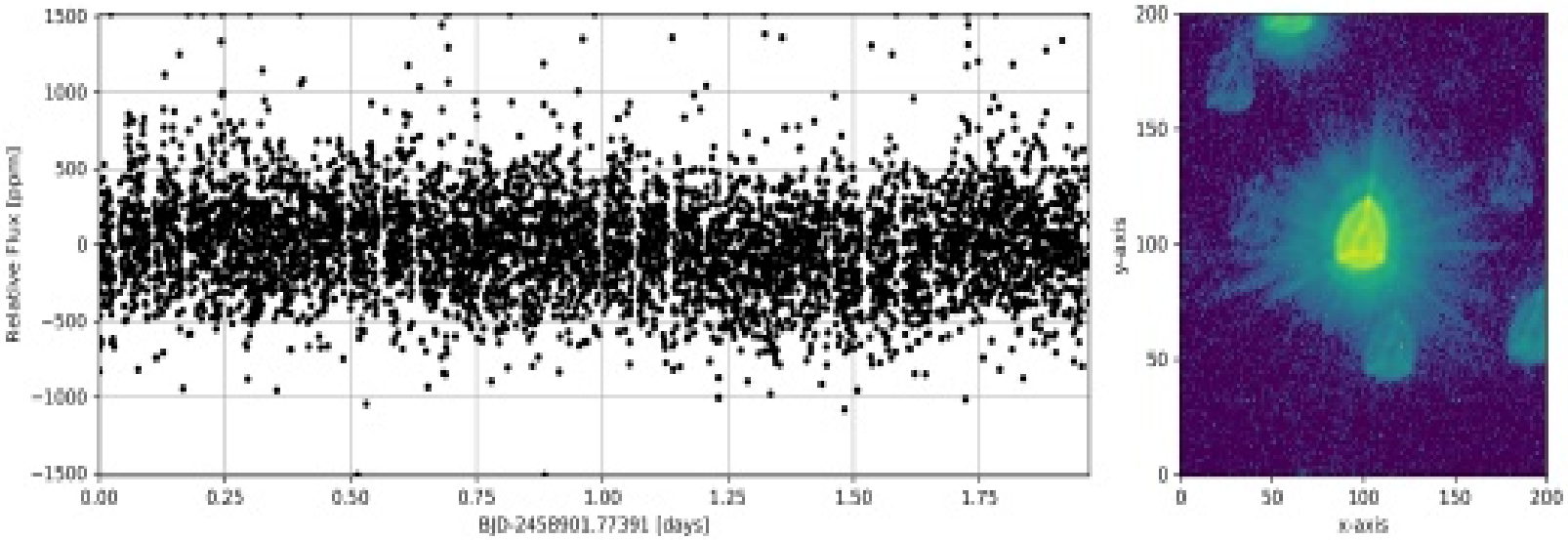
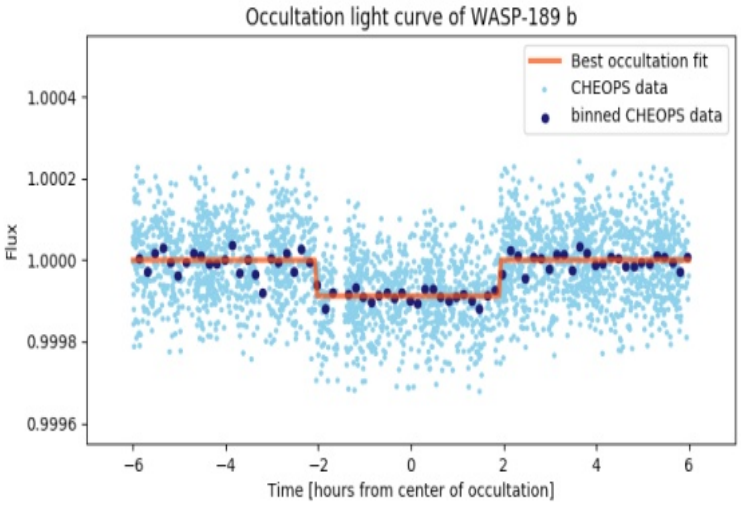
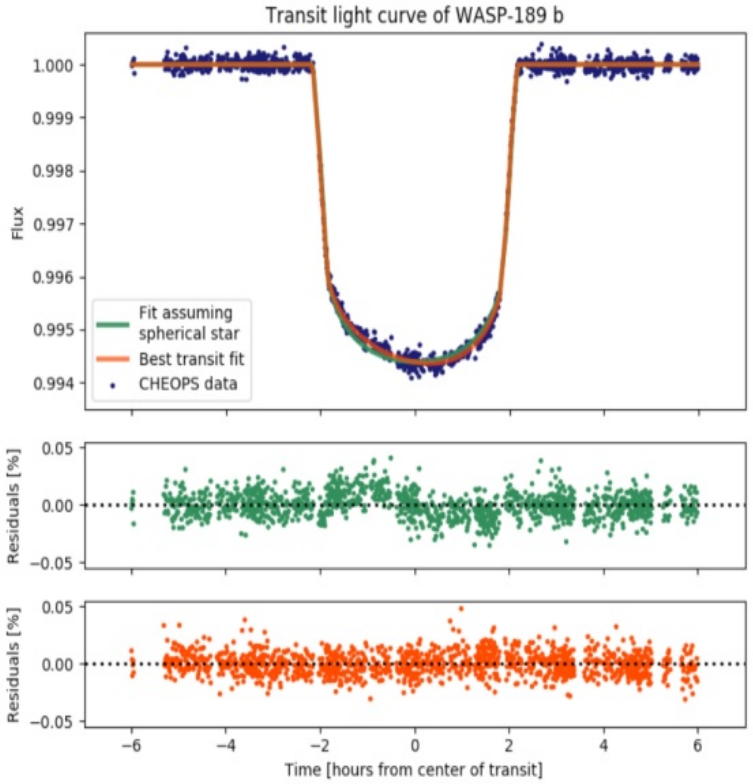


Fig. 14 Left: Photometric light-curve of the star HD 88111 obtained from images taken every 30 seconds over a period of 47 hours without any detrending. The gaps in the data are due to the Earth occulting the target star and to the passage of the spacecraft through the South Atlantic Anomaly, a period during which the data are discarded. Over a period of 6 hours, the precision achieved is 15.5 ppm; Right: One of the image of HD 88111 as recorded by CHEOPS

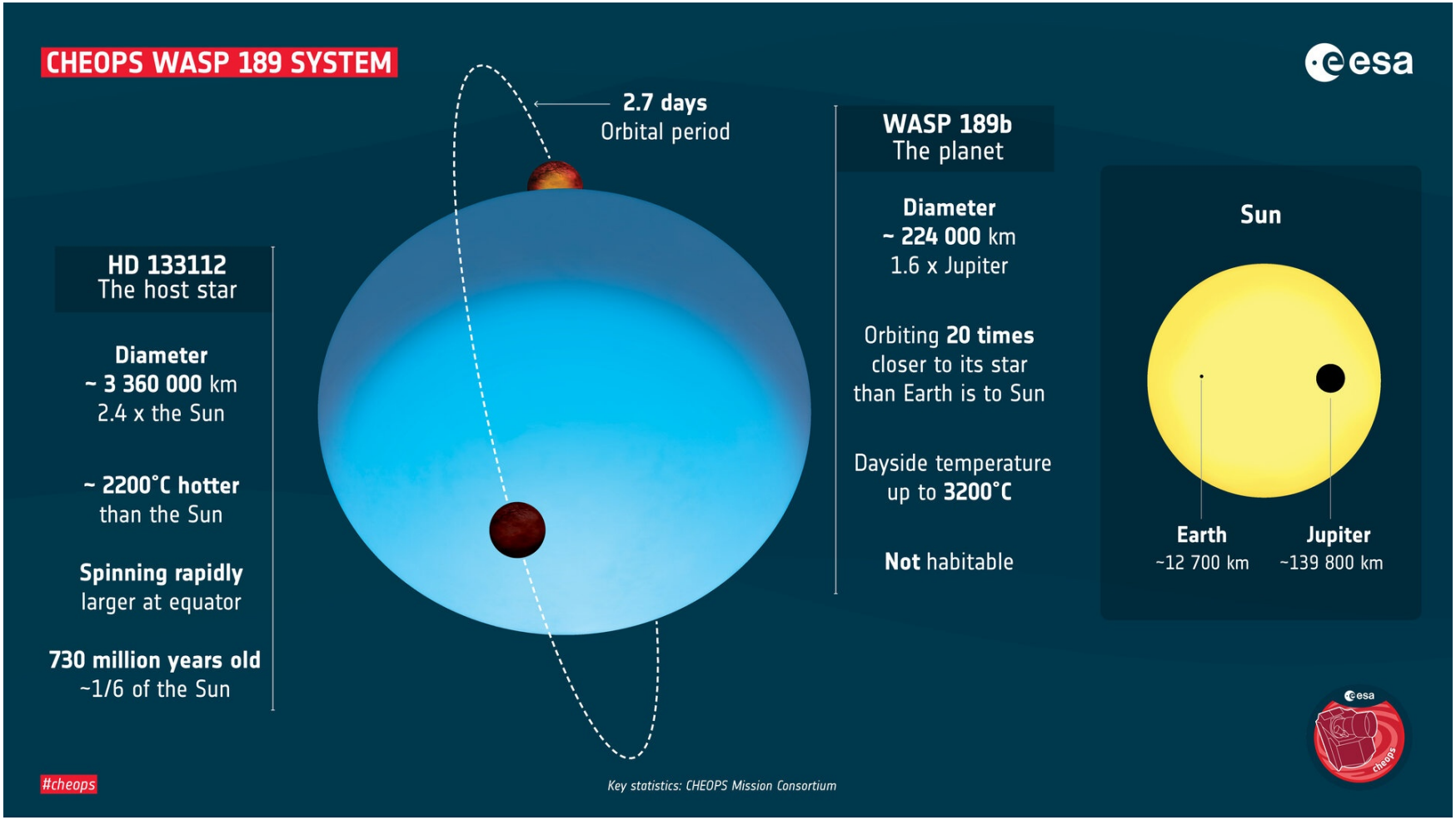
Példa CHEOPS-eredményre

A 322 fényévre levő HD 133112 körüli bolygó (WASP 189 b) vizsgálata.
A 2,7 napos keringési periódusú bolygó felszínén 3200 ˚C a hőmérséklet.
A bolygó másfélszer nagyobb a Jupiternél (ultraforró jupiter).
A bal oldali képen a világoskék pontok 33,4 másodpercenkénti egyedi mérések, a sötétkékek tízpercenkénti átlagok.



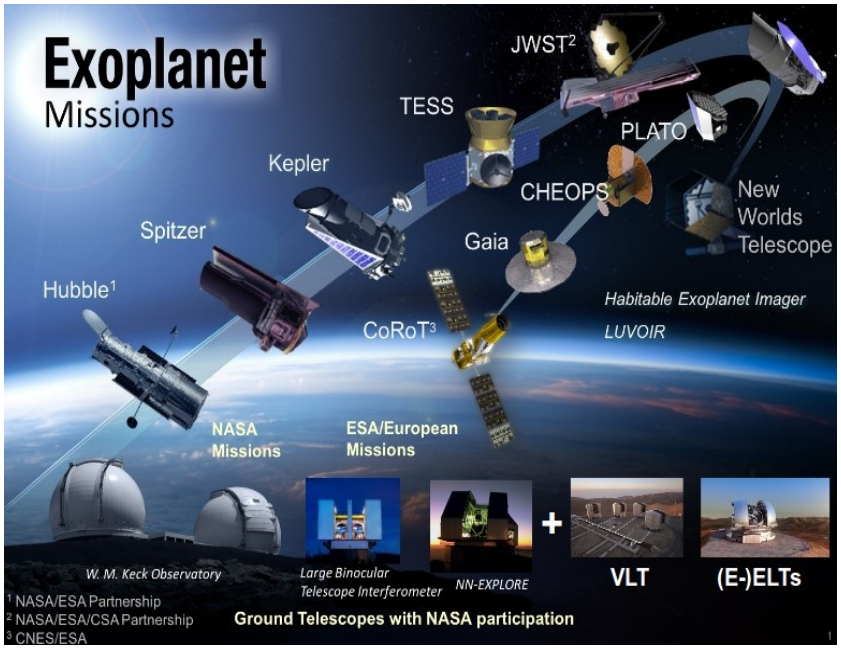


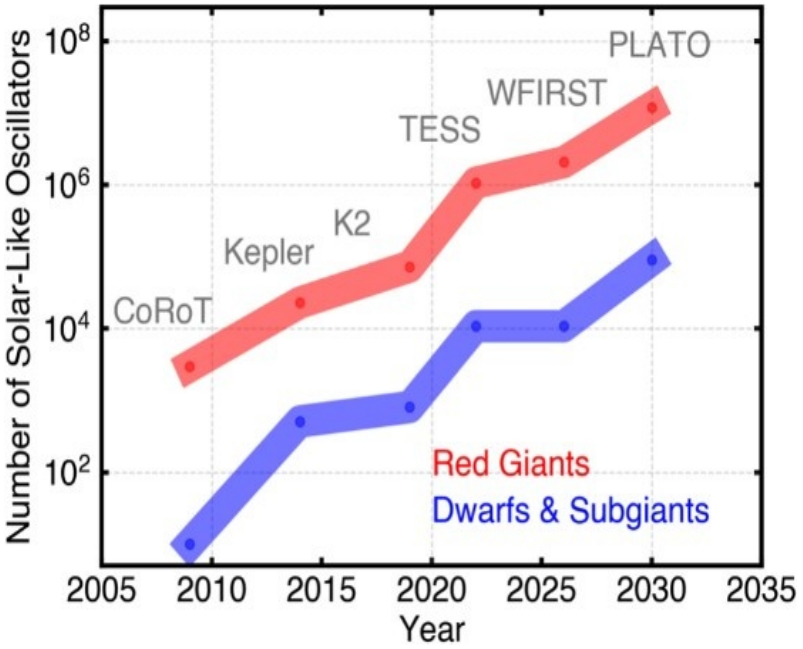
Példa CHEOPS-eredményre



Az űrfotometria jelene

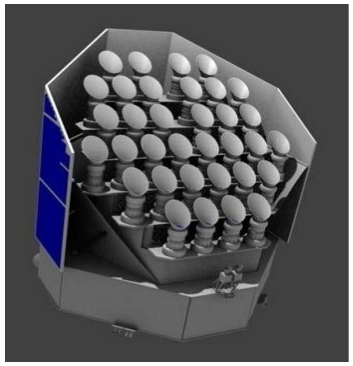
Jelenleg méréseket végző szondák: HST, Gaia, BRITE, TESS, CHEOPS, JWST (+ XMM-OM, INTEGRAL OMC, Swift UVOT).
A Gaia szerepe kiemelendő a források száma és a határmagnitúdó miatt.
Továbbá rengeteg a még feldolgozásra váró Kepler-, K2-, CoRoT-adat.
Az exobolygókra hivatkozva könnyebb támogatást szerezni, de az űrfotometria feladata sokrétűbb, mint pusztán exobolygókeresés.

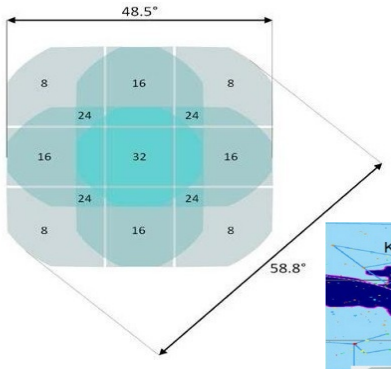


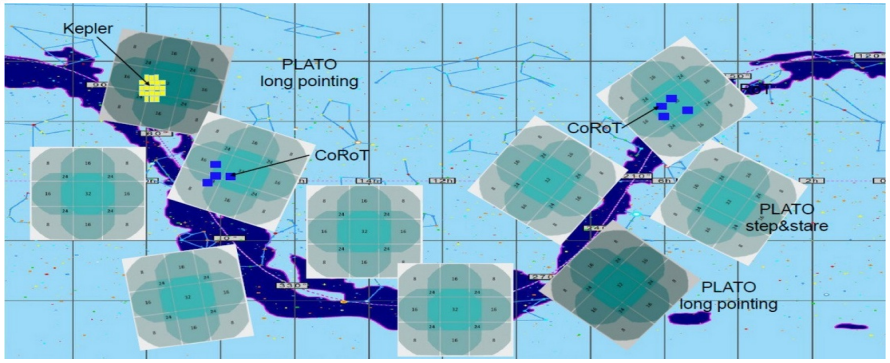


Az űrfotometria jövője: PLATO

PLATO: ***PLA***netary ***T***ransits and ***O***scillation of stars, ESA-misszió, elsőre nem fogadták el, 2014-ben viszont sikerült elfogadtatni. Tervezett indítás: 2026 az L2 Lagrange-pontba. Éveken át méri a fényes (4-11 magnitúdó közötti csillagokat a bolygók és gazdacsillaguk jellemzőinek pontos meghatározására. 32 kis távcső közös platformon (látómezejük: 1100 négyzetfok). Mindegyikre 4510x4510 pixeles CCD-kamera szerelve.
25 másodperces időfelbontású észlelés a látómező minden pontforrására, fedélzeti adatredukálással.







Az űrfotometria jövője: ARIEL

ARIEL: ***A***tmospheric ***R***emote-sensing ***I***nfrared ***E***xoplanet ***L***arge-survey. Ugyancsak ESA-misszió, célja 1000 ismert fedési exobolygó részletes vizsgálata, beleértve a légkörük kémiai összetételének meghatározását.

Tervezett indítás: 2029, Ariane–6 rakétával, a hordozórakéta egyszerre viszi fel a Comet Interceptor szondával.

Az ARIEL szonda fedélzeti műszere egy Cassegrain-távcső lesz 1,1x0,7 méteres ovális alakú főtükörrel. Optikai és közeli infravörös színkép-tartományban mér, főként spektrális vizsgálatokat végeznek vele az 55 K hőmérsékletű környezetben.