

## A Kepler-űrmisszió

Szabó Róbert

MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete

2009. március 7-én indult útjára a NASA Kepler-űrtávcsöve, melynek elsődleges célja a lakhatósági zónában keringő, Földhöz hasonló exobolygók kimutatása fotometriai (tranzit) módszerrel. A program lényeges eleme a csillagok szeizmológiai vizsgálata, melybe Intézetünk is bekapcsolódott. A tudományos célkitűzések és az első eredmények mellett a misszió előkészítésében és földi támogatásában végzett magyar hozzájárulást is bemutatjuk.

### Bevezetés

Napjainkban az asztrofizika egyik legaktívabb területe és motorja a Naprendszeren kívüli bolygók és bolygórendszerek felfedezése, kialakulásuk és fejlődésük vizsgálata. A földről végezhető, periodikus radiálissebesség-változásra épülő exobolygó-keresési módszer mellett a fotometriai, azaz a tranzitok kimutatásán alapuló metódu is egyre nagyobb szerephez jut. Ez utóbbi súlypontja a kisméretű földfelszíni távcsöveket tartalmazó rendszerekről az űreszközökre tevődik át. Ennek a folyamatnak jeles képviselője a francia–európai CoRoT-műhold, eddig 7 exobolygó-felfedezéssel. A NASA hasonló, még ambiciózusabb Discovery-programja, a Kepler, 600 millió dolláros költségvetéssel indult (<http://kepler.nasa.gov/>). A Kepler elsődleges célpontjai a Naphoz hasonló csillagok körül, a lakhatósági zónában keringő – akár éves keringési periódusú – fedési (kőzet)bolygók. Mindkét említett űrprogram jellemzője, hogy a fotometriai exobolygó-keresés követelménye, az ultrapontos fényességmérés asztro-szeizmológiai célokra is kitűnően használható.

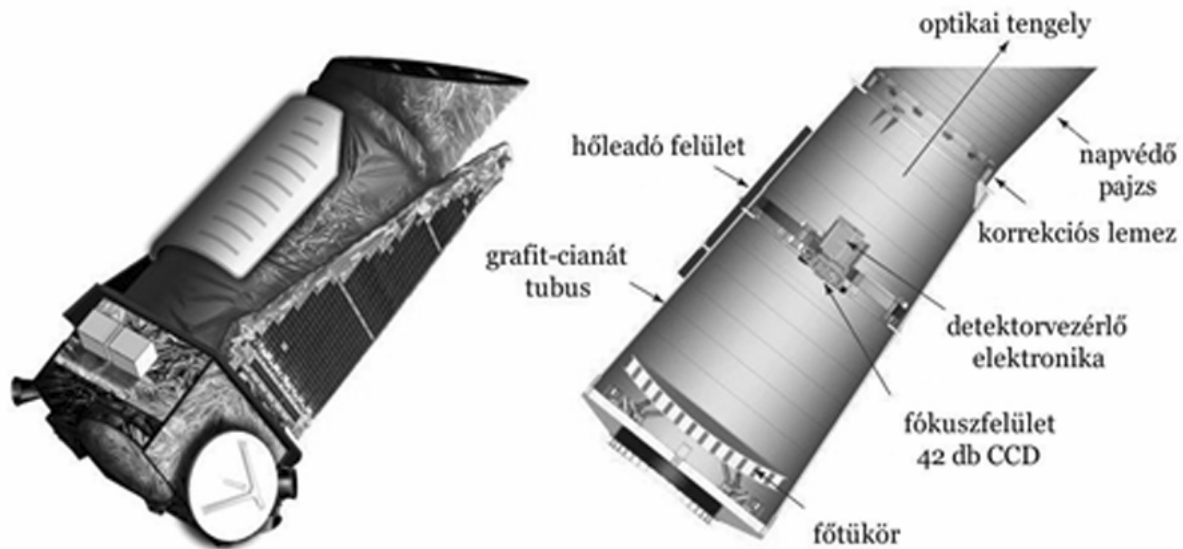
A Kepler tudományos céljának megvalósításához egyrészt nagyszámú ( $\sim 10^5$ ) csillag folyamatos megfigyelését kell biztosítani, másrészt extrém pontos és éveken keresztül stabil fényességmérésre van szükség. A követelmény 20 ppm (part per million, milliomod rész) fotometriai pontosság egy Föld-méretű planéta 12 magnitúdós, Naphoz hasonló (G2V) csillag előtti, 6,5 óráig tartó átvonulása alatt. A műszernek (és az adatredukciós lépéseknek) képesnek kell lenniük az évenkénti egyetlen,  $10^{-4}$  relatív fényességcsökkenést jelentő tranzit kimutatására is.

### A Kepler-űrtávcső

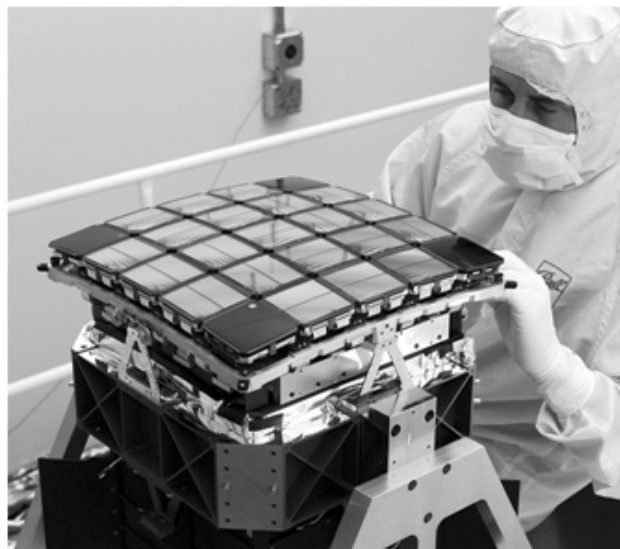
A fenti kritériumokat teljesítő rendszer felépítése a következő (1. ábra): A műszer a pontos fotometria kivitelezésére épített egyetlen nagy fotométernek fogható fel. Optikáját tekintve egy 1,4 méter átmérőjű F/1-es nyílászó viszonyú, 95 cm szabad apertúrájú Schmidt-teleszkóp, mely a valaha épített kilencedik legnagyobb Schmidt-távcső. Főtükre 85%-kal könnyített, extrém alacsony hőtágulási együtthatójú üvegből készült. A fókuszában elhelyezett 42 db 2200x1024 pixeles CCD-chip (2. ábra) 105 négyzetfokos terület egyidejű leképezését teszi lehetővé. Az észlelések fehér fényben, a 430-840 nm (FWHM) közötti hullámhossztartományban történnek. Sem színszűrő, sem a detektorokat védő zár (shutter) nincs az optikai útban. A Kepler egyetlen területet észlel folyamatosan (3. ábra), melynek középpontja a RA:  $19^{\text{h}}22^{\text{m}}40^{\text{s}}$ , DEC:  $44^{\circ}30'00''$  ( $l=76,32^{\circ}$   $b=+13,5^{\circ}$ ) koordinátákkal jellemezhető, és a Cygnus–Lyra csillagképek irányába esik. A fotometriai stabilitást és a terület állandó láthatóságát 372,5 nap keringési idejű, Nap körüli, ún. Earth-trailing pálya (4. ábra) garantálja, stabil termikus és sugárzási környezetet biztosítva az űreszköznek.

A tudományos program tervezett tartama 3,5 év, ami kedvező eredmények és pénzügyi háttér esetén akár 2,5 évvel is meghosszabbítható. Ez esetben a Kepler a nominális élettartama után is a fent említett területet fogja tovább észlelni. A folytonos energiaellátás érdekében évente négyszer  $90^{\circ}$ -os rotáció történik, ezáltal a napelemek mindig a Nap irányába néznek. A Kepler

bolygókereséshez és csillagszeizmológiához használt célpontjai 9–16 magnitúdó<sup>1</sup> közé esnek, kivételes esetben azonban 7 magnitúdós csillag fotometriájára is van mód, a Guest Observer programban pedig akár 20 magnitúdós objektumok mérése is megoldható. A csillagok képei kb. 4"-re vannak defokuszálva, a jobb jel/zaj arány eléréséhez. A szaturáció elkerülése miatt 6 másodpercenként történik a kiolvasás, a fénygörbék közül néhány 1 perces (short cadence, SC), a többség pedig 30 perces integrációs időnek megfelelő összegezéssel (long cadence LC) tárolódik.



1. ábra. A Kepler-űrtávcső felépítése



2. ábra. A Kepler detektorrendszere földi tesztelés közben

Az adatok letöltése, valamint a vezérléshez szükséges parancsok és az új targetek feltöltése havonta egyszer történik. Mivel 30 napig az összes adatot nem tudják tárolni, sem letölteni, ezért csak előre kiválasztott objektumok pixeljei (az összes pixel kb. 5%-a) tárolódnak, ezt tömörítik, majd töltik le periodikusan. Időnként, tesztelési céllal a teljes látómező minden pixelét eltárolják.

Az 1. táblázat a hasonló programot folytató CoRoT és a Kepler legfontosabb jellemzőit hasonlítja össze.

<sup>1</sup> A fényességek a Kepler által megfigyelt hullámhossztartományban mért magnitúdók.

## A Kepler-misszió

A 2. táblázatban a legfontosabb eseményeket tüntettük fel időrendi sorrendben. A Kepler alapvetően három különböző kategóriába eső célpontot észlel. Ezek: a) bolygókeresésre használt, b) asztroszeizmológiai és c) Guest Observer célpontok. A Kepler által észlelt adatok nagy része átlagosan 1 év védett időtartam után válik nyilvánossá.

| Jellemző                     | CoRoT                                | Kepler                       |
|------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| Főtükör szabad átmérője      | 27 cm                                | 95 cm                        |
| Teljes tömeg                 | 630 kg                               | 1039 kg                      |
| Optikai elrendezés           | afokális teleszkóp                   | Schmidt-rendszer             |
| Detektor-rendszer            | 4 db e2v CCD-chip,<br>13,5 µm        | 42 db e2v CCD-chip,<br>27 µm |
| Összes pixelek száma         | 16 megapixel                         | 95 megapixel                 |
| Színek                       | prizma                               | nincs                        |
| Látómező                     | 2,7 x 3,5 fok, változtatható         | 105 négyzetfok, fix          |
| Terület                      | Monoceros / Aquila,<br>Serpens Cauda | Cygnus–Lyra                  |
| Folyamatos észlelés hossza   | 150 nap / 50 nap                     | 3,5 év (+ 2,5 év)            |
| Felbocsátás időpontja        | 2006. december 27.                   | 2009. március 7.             |
| Felbocsátás helye            | Bajkonur, Kazahsztán                 | Cape Canaveral, FL, USA      |
| Pálya jellege                | Föld körüli, poláris                 | Nap körüli, Earth-trailing   |
| Űreszköz keringési periódusa | 103 perc                             | 372,5 nap                    |

1. táblázat. A CoRoT és a Kepler jellemzőinek összehasonlítása

| esemény                              | időpont                      |
|--------------------------------------|------------------------------|
| A NASA kiválasztja a Keplert         | 2001. december 21.           |
| Felbocsátás (Delta II hordozórakéta) | 2009. március 7. 03:49:57 UT |
| Tubusfedő leválása                   | 2009. április 7.             |
| Első fény rögzítése                  | 2009. április 8.             |
| Pontos fókuszbeállítás               | 2009. április 24.            |
| Tudományos megfigyelések kezdete     | 2009. május 12.              |

2. táblázat. Kepler-kronológia

- a) A főprogram 150000, főként késői (F-K) fősorozati csillag folyamatos megfigyelését jelenti. Az elsődleges cél a Földhöz hasonló, lakhatósági zónában keringő exoplanéták tranzitjainak detektálása, ezért ezek a célpontok a misszió teljes élettartama alatt folyamatos monitorozást igényelnek. A célpontlista kisebb arányban korai fősorozati csillagokkal bővült, ezek összehasonlításra használhatók. A komplex fényváltozást mutató, és/vagy óriáscsillagnak bizonyuló targetek fokozatosan kikerülnek a programból. Mintegy 1000, jó jel/zaj viszonyú vörös óriáscsillag asztrometriai referenciaként fog szolgálni. A programnak ezt a részét a PI (William Borucki) és a Kepler Science Team kutatói irányítják.
- b) Az asztroszeizmológiai célpontok kettős célt szolgálnak. Egyrészt a – Kepler által felfedezett – bolygóval rendelkező csillagok fizikai tulajdonságainak pontosítását teszik lehetővé, másrészt a Hertzsprung–Russell-diagram minden szegletében jelenlévő pulzáló változócsillagok jobb megértését fogják elősegíteni. Mintegy 4000 ilyen csillag lesz a misszió folyamán. Ebből több mint

500 csillagot 1 perces mintavételezéssel észlel a Kepler a misszió elején, később ezek helyét fokozatosan a bolygóval rendelkező csillagok fogják átvenni. Az ultrapontos Kepler-űradatok asztroszeizmológiai kiaknázására jött létre a nemzetközi Kepler Asztroszeizmológiai Tudományos Konzorcium (KASC) (l. <http://astro.phys.au.dk/KASC>), amely több mint 350 kutatót tömörít. Az egyes munkacsoportokat (melyek több alcsoportra tagolódnak, jellemzően: földi támogatás, adatfeldolgozás, modellezés) a 3. táblázatban soroltuk fel a hozzájuk tartozó, kezdeti időszakot jellemző célpontszámmal együtt. A táblázatban vastagon szedtük azokat a munkacsoportokat, ahol

- a csoportot (Mirák: Kiss László, Cefeidák: Szabó Róbert) vagy

- annak valamelyik alcsoportját (RR Lyrae – elméleti modellezés alcsoport, Szabó Róbert) magyar kutató vezeti.

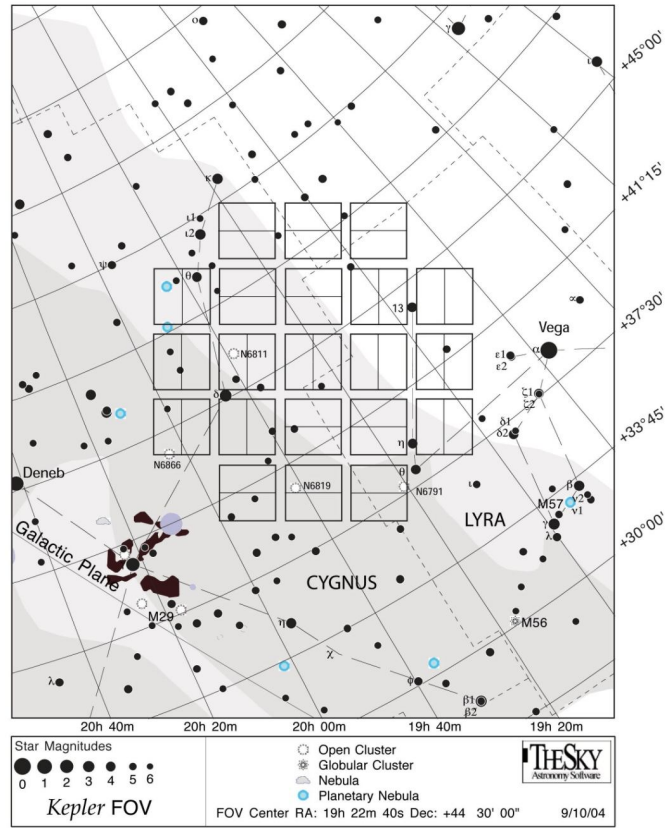
Az asztroszeizmológiai célpontok kiválasztása, jelölése is a KASC feladata. Az első időszakban survey jelleggel mértük fel a legérdekesebb változócsillagokat, 2010-től pedig a kiválasztott célpontok specifikus vizsgálatai kezdődnek meg. Ebben a szakaszban rendkívül eredményesen vettünk részt. A cefeida, Mira és RR Lyrae csillagtípus célpontjavaslatait is csoportunk vezetésével nyújtottuk be, s ezek túlnyomó többségét elfogadták. A célpontok kiválasztásáért, javaslatáért és tudományos indoklásáért csoportvezetőként Intézetünk munkatársai lesznek felelősek. Ehhez az eddigi mérések feldolgozásán kívül elengedhetetlenek a kiegészítő, földi megfigyelési adatok is.

A Kepler asztroszeizmológiai programja nem pályázható megfigyelési időszleteket biztosít a kutatóknak, hanem a célpontok kiválasztása egyedül az űradatokra és a földi támogatás révén elérhető egyéb információkra alapozva kialakított tudományos indoklás alapján történik. A célpontok dinamikusan változtathatóak, így közvetlenül, aktívan alakítjuk a Kepler megfigyelési programját. Az MTA KTM CsKI kutatócsoportja azonban nemcsak az előkészítő munkába és a célpontkiválasztásba kapcsolódott be, hanem az adatfeldolgozásban, a földi támogatásban és az adatok értelmezésében és modellezésében is aktív szerepet játszik.

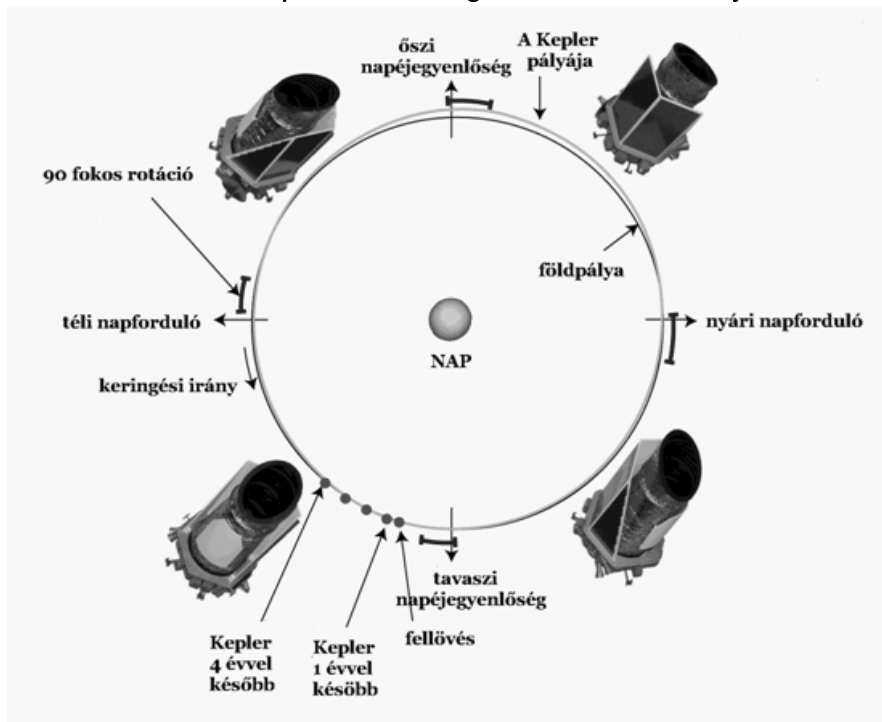
- c) Az időről időre meghirdetett Guest Observer (GO) program a Kepler látómezejébe eső egyéb pontszerű és kiterjedt asztrfizikai objektumok (pl. aktív galaxismagok, nóvák, törpenóvák stb.) nagy pontosságú fotometriai vizsgálatát célozza, melyre bárki adhat be pályázatot (l. <http://keplergo.arc.nasa.gov/>). A GO-programban 3000 LC és 25 SC célpont észlelését biztosítják a misszió vezetői. Megjegyezzük, hogy mintegy 15 millió ismert forrás esik a Kepler-mező irányába.

| KASC munkacsoport                                 | Csillagok száma |
|---|-----------------|
| 1. Nap típusú oszcillációk                        | 1358            |
| 2. Oszcillációk csillaghalmazokban                | 216             |
| 3. Béta Cephei csillagok                          | 28              |
| 4. Delta Scuti csillagok                          | 353             |
| 5. roAp csillagok                                 | 12              |
| 6. Lassan pulzáló B-csillagok (SPB)               | 25              |
| <b>7. Cefeidák</b>                                | 40              |
| 8. Vörös óriások                                  | 1523            |
| 9. Pulzáció fedési kettősökben                    | 105             |
| 10. Gamma Doradus csillagok                       | 107             |
| 11. Kompakt pulzátorok (fehér törpék, szubtörpék) | 50              |
| <b>12. Mirák (és félszabályos csillagok)</b>      | 315             |
| <b>13. RR Lyrae csillagok</b>                     | 60              |
| 14. RV Tauri csillagok                            | 2               |

3. táblázat. A Kepler Asztroszeizmológiai Tudományos Konzorcium munkacsoportjai (kiemelve az MTA KTM CsKI kutatói által vezetett csoportok és alcsoportok), valamint a célpontok kezdeti száma.



3. ábra. A Kepler által észlelt égbolttrészlet sematikus rajza



4. ábra. A Kepler pályája és a 90 fokos elfordulások helyzete az ekliptika északi pólusa felől

#### A kezdeti és a várható eredmények

A Kepler legelső tudományos eredménye a már ismert, HAT-P-7b jelű fedési exobolygóhoz köthető (Borucki és mtsai, 2009). A Kepler az elsődleges tranziton kívül a másodlagos fedéseket is könnyedén

detektálta nem sokkal a fellövés után rögzített 10 napos adatsor alapján, ezen túlmenően pedig a fedések között folytonos fényességváltozást mutatott ki, ami a bolygó fázisváltozásaival magyarázható. A másodlagos fedés által okozott fényességcsökkenés mindössze  $130 \pm 11$  ppm. Ennek alapján a Kepler teljesítőképessége közel van a specifikációhoz, annak ellenére, hogy az adatredukciós pipeline még nem végleges, annak finomítása a szisztematikus és instrumentális eredetű hibákat tovább fogja csökkenteni. Minden esély megvan tehát az eddigi legkisebb exobolygók felfedezésére.

A Föld típusú bolygók felfedezése mellett a következő célok megvalósítását is kitűzték az exobolygó-programban:

- a Föld típusú bolygók gyakoriságának megállapítása a lakhatósági zónákban;
- ezen bolygók sugár- és pályaméret-eloszlásának meghatározása;
- bolygók vizsgálata több csillagot tartalmazó rendszerekben;
- több bolygót tartalmazó rendszerek feltérképezése;
- a várhatóan sok forró Jupiter fizikai tulajdonságainak vizsgálata (pályaméret, albedó, méret, tömeg, sűrűség);
- a bolygók gazdacsillagai tulajdonságainak meghatározása.

Ha a Földhöz hasonló bolygók gyakoriak, akkor a Kepler akár több százat is felfedezhet belőlük, forró Jupiterből pedig még ennél is többet.

Az asztroszeizmológia is korábban elképzelhetetlen eredményeket szolgáltathat a Kepler-adatok felhasználásával. A szimulációk szerint a szoláris oszcillációkkal foglalkozó munkacsoport képes lesz a csillagok sűrűségét 1%, sugarát 2-3%, tömegét 5%, korát 5-10% pontossággal meghatározni (Creevey, 2009; Kjeldsen és mtársai, 2009), ami a körülöttük keringő bolygók paramétereiről (sugár, sűrűség) és kialakulásáról fog létfontosságú adatokat szolgáltatni. A csillagszeizmológia azonban nem áll meg itt, a csillagok forgását és mágneses ciklusait is tanulmányozhatja a sztochasztikusan gerjesztett p-módusok segítségével (Christensen-Dalsgaard és mtársai, 2009).

A pulzáló változócsillagok szinte minden típusánál új eredmények várhatóak, melyek közül csak néhányat villantunk fel:

- A cefeidák esetében a periódusváltozások és a fénygörbe stabilitásának vizsgálatát, valamint kísérők detektálását teszi lehetővé az újfajta űradatsor. A régóta sejtett nemradiális (Moskalik és Kolaczowski, 2009) és strange módusok (Buchler és Kolláth, 2001) kimutatása is szóba jöhet, a Nap típusú oszcillációk esetleges felfedezése pedig tovább lökést adhat az asztrofizikai távolságindikátorok fontos csoportjának szeizmológiai vizsgálatához.
- Az RR Lyrae csillagoknál a fentiekén kívül remek lehetőséget jelent a pontos és folyamatos adatsor a Blazhko-effektus tanulmányozására: az előfordulási statisztika (Jurcsik és mtársai, 2009), a modulációs jellemzők és hosszú távú változásaik (Sódor és mtársai, 2007) vizsgálatát is tervezzük.
- A klasszikusan nemradiális módusokban pulzáló csillagoknál az egyik legizgalmasabb kérdés a hibrid csillagok tanulmányozása. Ezekben a csillagokban a delta Scuti csillagokra jellemző rövid periódusú p- és g-módusok és a gamma Doradus típus sajátjaiként ismert hosszú periódusú g-módusok is gerjesztettek, segítségükkel a csillag más-más rétegeiről kapunk információt.
- A mirák és félszabályos változók szeizmológiája is lehetővé válik a Kepler segítségével. Az M típusú óriáscsillagokban az oszcillációk szoros kapcsolatban vannak a konvekcióval és a tömegvesztéssel. A sztochasztikusan gerjesztett szoláris oszcilláció frekvenciáinak, amplitúdóinak és élettartamának mérése révén a konvekció és a kappa-mechanizmus kölcsönhatását és a gerjesztésben betöltött szerepét vizsgálhatjuk. A rejtélyes hosszú másodperiódusok (Nicholls és mtársai, 2009) okára is fény derülhet, s a kaotikus viselkedés megfigyelése is elképzelhető ezeknél a nagy luminozitású objektumoknál.
- Fedési kettőscsillagoknál a fedésből nyerhető asztrofizikai információkat kiegészíthetjük az akár mindkét komponensnél külön elvégezhető asztroszeizmológiai analízissel, ami új távlatokat nyit a kettőscsillagok fizikájában.

- Fontos kiaknázni a csillaghalmazokra alkalmazott asztroszeizmológia nyújtotta lehetőségeket. Az elméleti (pl. csillagfejlődési) modellek számára nemcsak a halmaztagok közös kora, távolsága és kémiai összetétele jelent megszorítást, hanem a megfigyelt Nap típusú oszcillációk is.

### **Összefoglalás**

A Kepler rendkívüli pontosságú, folyamatos, több évre kiterjedő fotometriája egyedülálló lehetőséget teremt az asztrfizikában. A bolygórendszerek kialakulásáról és fejlődéséről alkotott képünket forradalmasítani fogja, csakúgy, mint a csillagokról szerzett ismereteinket. Emellett minden bizonnyal új jelenségek felfedezéséhez is el fog vezetni.

A Kepler utódjának az európai PLATO (PLANetary Transits and Oscillations of stars, I. [http://www.lesia.obspm.fr/perso/claude-catala/plato\\_web.html](http://www.lesia.obspm.fr/perso/claude-catala/plato_web.html)) űreszköz tekinthető; az amerikai TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) felbocsátását 2009-ben nem támogatta a NASA. Ez utóbbi hat kis méretű, nagy látószögű távcsövet tartalmazna, és 2 millió fényes csillag megfigyelésével mintegy 1000 exobolygót fedezhetett volna fel. A PLATO a Kepler koncepciójának továbbfejlesztése, azzal a különbséggel, hogy nagyobb területet (több mint 900 négyzetfokot) tervez megfigyelni, 28 kisebb távcsővel a fedélzetén. A Keplerhez hasonlóan, a tranzitmérések mellé asztroszeizmológiai vizsgálatok is csatlakoznak a tervek szerint 2018-ban startoló ESA-programban.

### **Köszönetnyilvánítás**

Az MTA KTM CsKI kutatóinak a Kepler előkészítési fázisába történő bekapcsolódását a KvVM – MŰI K-36-08-00031K pályázata támogatta.

### **Irodalom:**

- Borucki, W. és mtsai, 2009, *Science*, 325, 709  
Buchler, J. R. & Kolláth, Z., 2001, *ApJ*, 555, 961  
Christensen-Dalsgaard, J. és mtsai, 2009, *Comm. in Asteroseismology*, 158, 328  
Creevey, O. L., 2009, GONG 2008/SOHO 24 XXI. conf. proc. arXiv:0810.2440, megjelenőben  
Jurcsik, J. és mtsai, 2009, *MNRAS*, 400, 1006  
Kjeldsen, H. és mtsai, 2009, *Proc. IAU Symp. Vol. 253*, 309  
Moskalik, P. & Kolaczowski, Z., 2009, *MNRAS*, 394, 1649  
Nicholls, C. P. és mtsai, 2009, *MNRAS*, 399, 2063  
Sódor, Á. és mtsai, 2007, *A&A*, 469, 1033