

# Fizikai Szemle

## MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította  
A Matematikai és Physikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

LIX. évfolyam

4. szám

2009. április

## BOLYGÓÁRADAT ÉS ASZTROSZEIZMOLÓGIA

### Elindult a Kepler-űrtávcső

Szabó Róbert

MTA Konkoly Thege Miklós  
Csillagászati Kutatóintézete

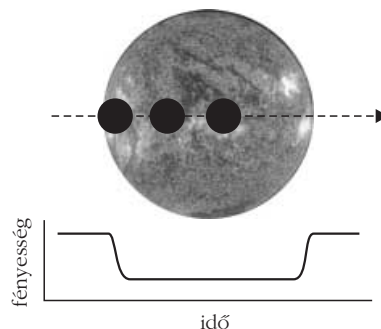
A *Csillagászat Nemzetközi Évében*, 2009. március 7-én hajnalban indult útjára a Kepler-űrtávcső a floridai Cape Canaveralból. Kézenfekvő volt, hogy a NASA bolygókereső műszerét éppen a „prágai” csillagászról nevezék el, hiszen a bolygók mozgására vonatkozó, általa felfedezett törvények közül az első kettőt éppen 400 éve, 1609-ben tette közzé *Astronomia Nova* című munkájában. Akkoriban még csak a szabad szemmel is látható öt bolygót ismerték. Az elmúlt évtizedek rohamos technikai fejlődésének köszönhetően ma már a távoli naprendszerekben talált 342 exobolygóra is alkalmazhatóak a Kepler-törvények. Ráadásul *Kepler* alapvető jelentőségű munkát végzett az optika és a távcső működésének magyarázata terén is. Éppen ezért az űrtávcső startja méltó tisztelgés a híres tudós emlékének. Írásunkban áttekintjük a bolygókereső misszió és a hozzá kapcsolódó csillagszeizmológiai program céljait, jellegzetességeit és a várható tudományos eredményeket.



– a projekt tudományos vezetője – már 1984-ben javasolta [2], a megvalósításra éppen negyed századot kellett várni. A földfelszínről már korábban elkezdődött a módszer alkalmazása (lásd pl. a magyar vonatkozású, rendkívül sikeres HATNet-programot 11 bejelentett exobolygóval), míg a hasonló tudományos programmal tervezett francia vezetésű COROT (CONvection, ROTation and planetary Transits) műholdat 2006 decemberében bocsátották fel, s eddig 7 szubstelláris tömegű objektumot talált.

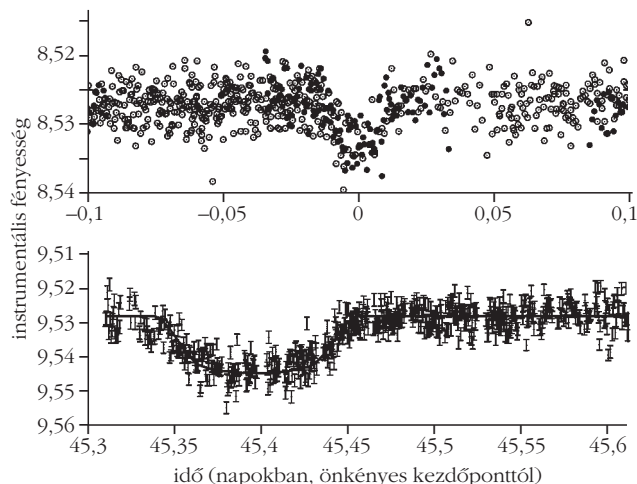
A bolygónk felszínéről végzett tranzitkeresések (HATNet, WASP, TrES stb.) közös jellemzője, hogy leginkább a nagy és központi csillagukhoz közel keringő bolygókra, az úgynevezett forró Jupiterekre érzékenyek (2. ábra). Ezek létezéséről a '90-es évek közepéig – az első néhány exobolygó felfedezéséig – nem is volt tudásunk, ma pedig (legalábbis a Kepler indításáig) ez a leggyakrabban felfedezett bolygó-típus. Az elhalványodás mértéke a csillag és a bolygó

1. ábra. Egy bolygótranzit és a csillag fényességében bekövetkező csökkenés



### Exobolygók a földfelszínről és az űrből

A 2001-ben zöld utat kapott misszió célja extraszoláris bolygók felfedezése fősorozati csillagok körül, tranzit módszerrel. Ennek lényege, hogy a bolygó áthaladása központi csillaga előtt periodikus csökkenést okoz a csillag fényességében, amely pontos fotometriával kimutatható (1. ábra). Bár a technika űrbeli alkalmazását *William Borucki* (NASA Ames Research Center)



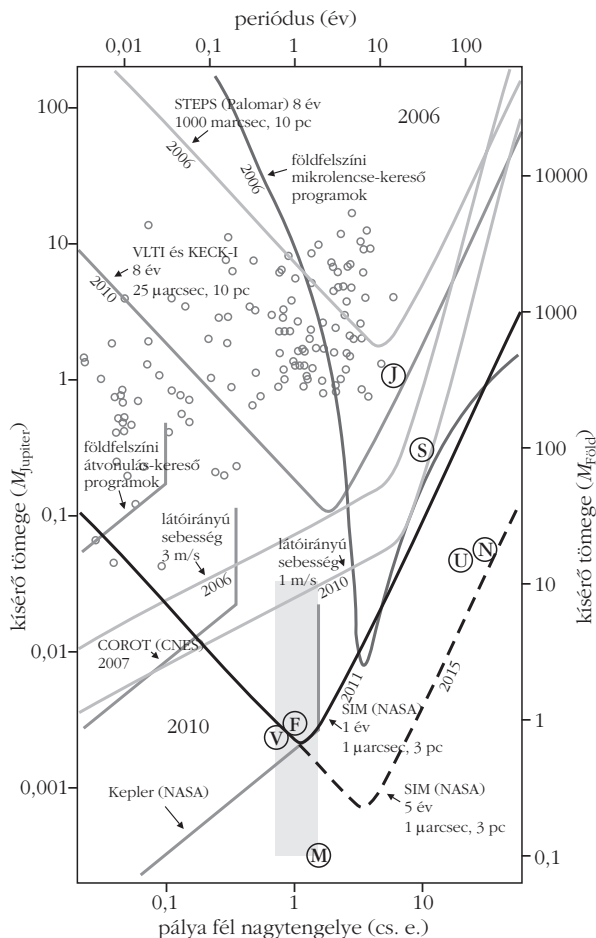
2. ábra. Felül a HAT-P-1b jelű exobolygó öt tranzitja a felfedező fénygörbén (11 cm-es távcsövekkel), fázis szerint összetekerve, alul egy megerősítő mérés a piszkéstartói 60/90 cm-es Schmidt-teleszkóppal [1].

méretéből kapható meg. Míg egy Nap típusú csillag esetén egy Jupiter méretű égitest  $10^{-2}$ , addig Föld-szerű társa  $10^{-4}$  nagyságrendű fényességcsökkenést produkál tranzit esetén. Az előző könnyen detektálható a földfelszínről; a Földhöz hasonló bolygók nagyszámú, biztos megfigyeléséhez már űreszközre van szükség a légkör zavaró hatásai miatt (3. ábra). A módszer hátránya, hogy csak kedvező geometriai elrendezés esetén figyelhetünk meg tranzitot. Így a forró Jupiterek körülbelül 10%-a fedi el központi égitestjét; egy 1 csillagászati egységre (átlagos Nap–Föld-távolság) keringő Föld-szerű bolygó viszont csak 0,47% eséllyel fog látóirányunkba kerülni. Utólérhetetlen előny viszont, hogy a módszer szolgáltatja a bolygó méretét is, ami a tömeget ismerve már a sűrűsége, ezáltal a bolygó összetételére utalhat.

A másik nagyon fontos módszer, amely idáig a legtöbb exobolygó-felfedezést szolgáltatta, a radiális (látóirányú) sebesség mérésén alapszik. Ez szintén a nagyobb tömegű és rövid keringési idejű exobolygókat preferálja, bár a közeli jövőben itt is várhatók a kisebb és a csillaguktól távolabb keringő bolygótrófeák. Ilyenkor a bolygó hatására a csillag színképében az abszorpciós vonalak periodikus eltolódását figyelhetjük meg a Doppler-effektus miatt. A kisebb bolygók esetén akár 1 m/s (!) pontosságú spektroszkópiai megfigyelésekre is szükség lehet, ezeket a legnagyobb földi teleszkópok szolgáltatják. A radiális sebesség módszerével Kepler harmadik törvényét felhasználva a planéta tömegére következtethetünk:

$$\frac{K^3 P}{2 \pi G} = \frac{m^3 \sin^3 i}{(M + m)^2},$$

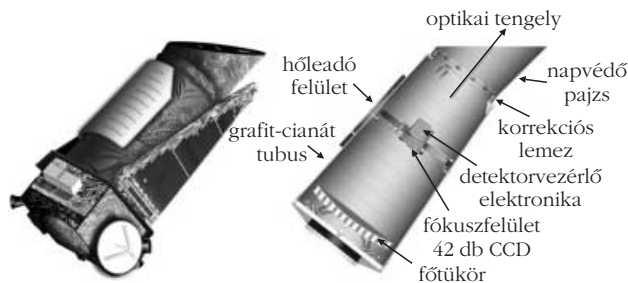
ahol  $K$  a bolygó radiálissebesség-változásának amplitúdója,  $P$  a keringési periódus,  $M$  a csillag,  $m$  a bolygó tömege,  $G$  a gravitációs állandó,  $i$  pedig a látóirány és a pályasík normálisa által bezárt szög, ami jó közelítéssel  $90^\circ$ , és a tranzit modellezésével pontosan számolható. Minthogy tranzit-hoz hasonló fényességcsök-



3. ábra. Néhány bolygókereső módszer érzékenysége. A Naprendszer bolygóit nagy kezdőbetűjűkkel, néhány exobolygót pedig kis korongokkal jelöltünk. A kísérő tömeget Jupiter- (bal), illetve Föld-tömeg (jobb) egységben is feltüntettük. A bal alsó sarokban jól látható, hogy a Kepler milyen mértékben fogja kiterjeszteni a Föld típusú bolygók megtalálásának esélyeit. A függőleges sátrózás a tervezett TPF misszió vizsgálati tartományát mutatja. (A NASA/JPL-Caltech engedélyével.)

kenést sokféle egzotikus konfiguráció okozhat (kettőscsillag kis tömegű másodkomponenssel, fedési kettőscsillag egy fényes előtér- vagy háttércsillagra vetülve, sűrű fedés normál fedési kettőscsillag esetén stb.), a spektroszkópiai megerősítésre a tranzitmódszer esetén is szükség van az égitest mibenlétének pontos megállapításához.

Az 591 millió dolláros űreszköz azokat a Föld-szerű bolygókat fogja keresni, amelyek a lakhatósági zónákban – vagyis ahol a hőmérsékleti viszonyok megengednek a folyékony víz jelenlétét – helyezkednek el. Az ilyen objektumokat az asztronómusok Szent Grálként keresik, és napjainkban fő hajtóerejét adják a csillagászati kutatásoknak, fejlesztéseknek. Ezen égitestek megtalálása és későbbi behatóbb vizsgálata (pl. atmoszférájuk spektroszkópiai elemzése) révén remélhetjük, hogy esetleg bioszférára utaló nyomokra bukkanhatunk a távoli planéták légkörében. A biomarkerek (metán, vízgőz, ózon stb.) kimutatására mind az ESA (Darwin), mind a NASA (TPF: Terrestrial Planet Finder) űrinterferometriai eszközök tervezésével készül.



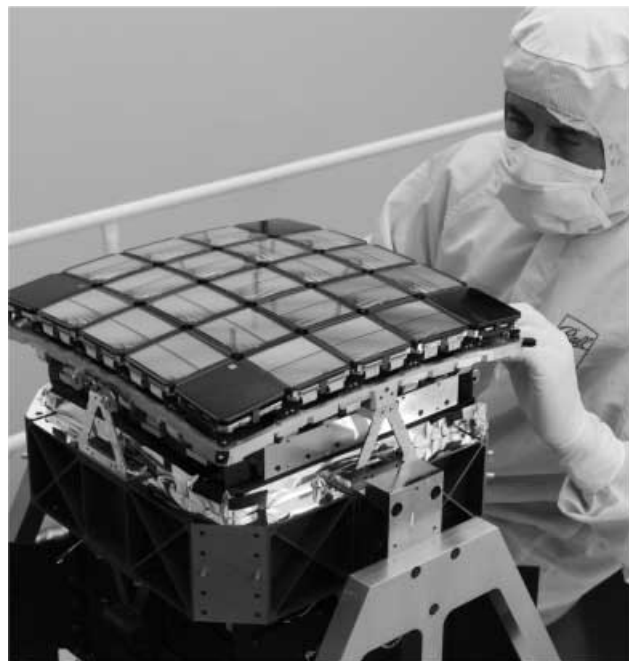
4. ábra. A Kepler-űrtávcső szerkezete

## 95 millió pixel – „összetett szem” az űrben

A Kepler főműszere nem más, mint egy hatalmas fotométer (4. ábra). Érdekes, hogy optikai elrendezését tekintve megegyezik az MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete által üzemeltetett piszkés-tetői Schmidt-teleszkóppal. Az egyszerűen elkészíthető gömbfelület alakú főtükör leképezési hibáit a tubus elején elhelyezett korrekciós lemez mérsékli elfogadható mértékűre. Ezeket a műszereket eredetileg nagylátómezejű fotografikus égboltfelmérésekhez tervezték. Azóta természetesen digitális képérzékelők (CCD-k) váltották fel az emulziókat.

Így a Kepler-műszer tubusának közepén, a görbült fókuszfelületen is 42 darab,  $2200 \times 1024$  pixeles CCD-chip helyezkedik el (5. ábra). A műszer egyetlen, széles hullámhossztartományban (400–850 nm) érzékeli a beérkező fényt. A csillagok képeit enyhén defokuszálják, hogy a több begyűjtött foton révén minél magasabb jel/zaj viszonyt érhessenek el. A teljes látómező mintegy 105 négyzetfok lesz. Ezt folyamatosan, 3,5 évig

5. ábra. A Kepler-űrtávcső görbült fókuszfelületére illeszkedő detektorrendszer a laboratóriumban



fogja figyelni a berendezés (sikeres működés esetén a kutatók további 2 év hosszabbítással kalkulálnak). A  $-85^\circ\text{C}$ -ra hűtött kamera a folyamatosan gyűjtött fotonokat alapesetben 30 perces időintervallumokban integrálja (közben 6 másodpercenként kiolvassa a jelet, a túlcsoordulás elkerülésére), és így továbbítódik a földi fogadóállomások felé havonta. Ismert, vagy újonnan talált tranzit és egyéb rövid periódusú jelenségek, így csillagszeizmológiai célpontok esetén azonban lehetőség van 1 perces integrációra is.

Az elvárt pontosság érzékeltetésére álljon itt egy példa. Egy 12 magnitúdós, Nap típusú csillag esetén 6,5 óra integrációs idővel a fotometriai pontosság 20 ppm (part per million) lesz, a csillagból eredő 10 ppm zaj mellett. Egy földszerű bolygó tranzitja 84 ppm fényességváltozást okoz, s ez az esemény 13 óráig tart, ha a planéta a csillagkorong középpontján halad keresztül.

A tranzitok kimutatásához a műszer kezdetben mintegy 170 000 csillagot fog folyamatosan megfigyelni a 9–15 magnitúdó fényességtartományban: főként a Naphoz hasonló, illetve kisebb tömegű főszorozati csillagokat. Itt ugyanis a méretarányokból következően nagyobb mértékű fényességcsökkenés várható a tranzit során, mint a főszorozatról elfejlődött csillagok esetén. Ezt később 100 000 objektumra csökkentik, elhagyva a túl zajos fénygörbéjű (aktív, változó stb.) csillagokat. A távcső a Tejút sávjához közel, az Orionspirálkar mentén, a Cygnus–Lyra irányba fog nézni, és zömében 600–3000 fényév távolságú csillagok lesznek a célpontjai. A megfigyelendő objektumoknak csupán 1%-a 600 fényévnél közelebbi.

Az „űrfotométert” egy Delta-II hordozórakéta állította heliocentrikus (a Földéhez hasonló) pályára, amelyen a keringési periódus 371 nap. Az űreszköz így évről évre mind jobban eltávolodik bolygónktól, ami korlátozza az adatkommunikációra fordítható sávzélességet. Ez a másik ok, amiért majd csökkenti kell a folyamatosan megfigyelt objektumok számát. A Nap körüli pálya és az ekliptikától távol választott égtérület biztosítja a Kepler-mező folyamatos megfigyelését.

## Milyen gyakoriak a Föld típusú, lakható bolygók?

A tranzitmódszer alkalmas a kis és közepes méretű bolygók tömeges felfedezésére, de ennek feltétele sok ( $\sim 10^5$ ) csillag fényességének nagy pontosságú fotometriája. A Kepler stratégiája is ezen alapszik, hisz küldetésének fő célja a Földhöz hasonló méretű és bolygónk pályájához hasonló keringési periódusú bolygók kimutatása. A nagy fénygyűjtőképességű (1,4 méteres főtükörű) távcső a fényességmérés rendkívüli pontosságát biztosítja, így minden eddiginél kisebb bolygók tömeges felfedezése várható. A hosszú keringési periódusú bolygók kimutatásának lehetősége pedig a Kepler-fotométer folyamatos, több év hosszú-ságú adatsoraiban rejlik. Összehasonlításképpen: a

COROT – Föld körüli pályája miatt – legfeljebb 150 napig tud folyamatosan figyelni egy bizonyos területet, és teleszkópja csak 27 cm-es átmérőjű.

A Föld típusú és nagyobb exobolygók gyakoriságának meghatározása a lakhatósági zónához közel, különféle típusú csillagok körül, nemcsak tudományos, hanem filozófiai jelentőséggel is bír. Ez az eredmény annak a kérdésnek a megválaszolásához visz minket közelebb, hogy hány potenciálisan lakható bolygó létezik Galaxisunkban. Ha az ilyen bolygók gyakoriak, akkor a most indított NASA-eszköz több százat is találhat belőlük. A megfigyelt csillagok nagy számát tekintve statisztikailag az is megalapozott állításra vezetne, ha a felfedezett bolygók száma elmaradna a várakozásoktól. Ennek a forgatókönyvnek azonban a legtöbb kutató jelenleg kevés esélyt ad.

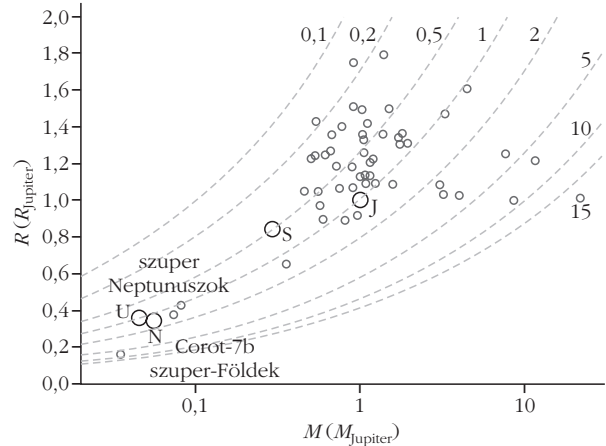
A fenti bolygóminta méret- és pályasugár-eloszlásának meghatározása a következő feladat. A bolygók mérete a fényességcsökkenés mértékéből adódik, de ehhez a szülőcsillagok méretét is ismerni kell. A tranzitok között eltelt idő és a csillag tömege Kepler harmadik törvényének felhasználásával adja a pályaméretet:

$$a = \sqrt[3]{\frac{G P^2 M^3}{4\pi (M + m)^2}}$$

Fontos a stabil bolygópályák lehetőségének vizsgálata a többszörös csillagrendszerekben is. Ezen kívül további űreszközökkel és földi spektroszkópiával a kisméretű, tranzitot mutató bolygók nagyobb méretű testvéreit is sikerülhet kimutatni ugyanazon bolygórendszerben.

A már említett rövid periódusú, forró óriásbolygók-ból is remek mintát fognak kapni a kutatók, ráadásul már a küldetés első néhány hónapja után. Ezen bolygók fizikai paramétereinek (pályaméret, albedó, méret, tömeg) meghatározása is a projekt célja. A kőzet- és óriásbolygókat is beleszámítva a Kepler összesen több ezer bolygót találhat, persze a pontos szám egyelőre bizonytalan, de nagyban befolyásolja majd a bolygókeletkezési és -fejlődési elméleteket. A bolygók szülőcsillagainak tulajdonságai meghatározóak az eredmények értelmezésében. Egyetlen példát említve megjegyezzük, hogy az eddig talált forró Jupiterek szülőcsillagainak többsége nehéz elemekben (csillagászati zsargonon fémekben) gazdagnak mutatkozott. Jelenleg úgy tűnik, hogy ezek a rendszerek eleve nagyobb fémtartalmúak, és ez a tulajdonság növeli a bolygóképződési hajlandóságot, tehát nem arról van szó, hogy a csillag utólag „szennyeződött be” a bolygókeletkezés során megmaradt, gázban szegény, porban és ezáltal nehéz elemekben feldúsult anyaggal. Mostanra az is valószínűsíthető, hogy a kisebb tömegű bolygók nem követik ezt a trendet, és hasonló valószínűséggel megtalálhatók a kisebb fémtartalmú csillagok körül is [4].

A talált bolygók csillagainak spektráltípusa és fémtartalma a Földről is mérhető. A Kepler-adatokból a csillag forgási sebessége, aktivitása, folttevékenysége



6. ábra. Az ismert fedési exobolygók tömeg-sugár diagramja (mindkettő Jupiter-egységben kifejezve). A szaggatott vonalak állandó sűrűségnek megfelelő görbék, a kis számok a sűrűséget jelzik, a Jupiterhez sűrűségéhez (1,326 g/cm<sup>3</sup>) mint egységhez viszonyítva. A Naprendszerbeli négy óriásbolygót nagy korong jelöli. Forrás: <http://exoplanet.eu> [5]

is megállapítható lesz. A csillagparamétereket az asztroszeizmológia segítségével kapott pontos kor- és tömegmeghatározás fogja kiegészíteni, ezáltal nyújtva teljes képet a bolygórendszerek tulajdonságairól.

Az eddig megismert exobolygók olyan elképesztő változatosságot mutatnak, amilyenre addig nem számíthattunk, ameddig csak a Naprendszert ismertük. A listán képviseltetik magukat a nagyon kis átlagsűrűségű, felfűvódott, forró Jupiterek, az elméleti számítások által megjósolt, nagy sűrűségű szubsztelláris égitestek, a Szaturnusz és a Neptunusz távoli ikertestvérei, és egy, a COROT által talált kétszeres földátmérőjű, de forró (talán kőzet-) bolygó, a Corot-7b (6. ábra). Semmi kétség, a Föld távoli megfelelői között is akadnak majd a képzelőerőt megmozgató, sci-fibe illő világok: vastag óceán, jég, sűrű légkör vagy éppen láva borította földek, lemeztectonikát mutató planéták, holdakkal, gyűrűkkel körülvett, lakható bolygók. Az átmenet valószínűleg folytonos a kis tömegű csillagoktól az óriás gázbolygókra keresztül a kőzetbolygókig.

A Kepler tehát az „exobolygó-kirakó” fontos darabjainak megtalálására vállalkozik. Közvetlen utódai az amerikai TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) és az európai PLATO (Planetary Transits and Oscillations of stars) lesznek. A TESS 2012-ben indulna, és az egész égboltot figyelné tranzitok után kutatva a közeli és fényes csillagok körül keringő Neptunuszok és szuper-Földek felfedezésének reményében. A PLATO is a Kepler koncepciójának továbbfejlesztése, azzal a különbséggel, hogy szintén nagyobb területet (több mint 900 négyzetfokot) tervez megfigyelni, 28 kisebb távcsővel a fedélzetén. Hasonlóan a most induló NASA-űrtávcsőhöz, a tranzitmérések mellé asztroszeizmológiai vizsgálatok is csatlakoznak a tervek szerint 2018-ban startoló ESA-programban.

A szóban forgó tudományos program eredményei fontos szerepet játszanak a távolabbi jövő bolygókutató misszióiban is. Így az extraszoláris bolygók köz-

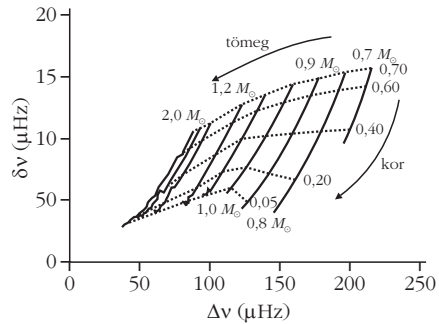
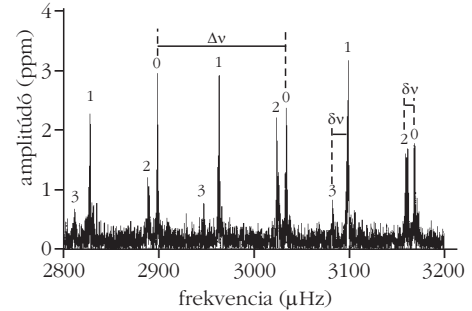
vetlen kimutatására és légkörük spektroszkópiai vizsgálatára tervezett eszközök is profitalni fognak a Kepler-örökségből. Nemcsak a már felfedezett bolygók közvetlen megfigyelése révén, de a szülőcsillagok fizikai paramétereiben talált törvényszerűségek és trendek is befolyásolni fogják a jövő űreszközait tervező kutatók munkáját.

## Asztroszeizmológia

A Föld típusú bolygók tranzitjainak detektálásához szükséges fotometriai pontosság lehetővé teszi a csillagok Nap típusú oszcillációinak kimutatását is. Ezt a szerencsés körülményt kihasználva asztroszeizmológiai vizsgálatokra létrehozott tudományos csoport is kapcsolódik a Keplerhez (KASC – Kepler Asteroseismic Science Consortium). A tranzitkutatás és az asztroszeizmológia házasítása bevált módszer a COROT hold működtetésénél is. A csoportnak kettős feladata van. Egyrészt a csillagszeizmológia révén pontos információkhoz jutunk a bolygók szülőcsillagainak fizikai tulajdonságairól, koráról; ez pedig a bolygórendszerek kialakulásának megértését fogja segíteni. Másrészt, a pulzáló változócsillagok (és persze egyéb változócsillagok is, pl. a fedési kettőscsillagok, foltos aktív csillagok) olyan pontosságú és hosszúságú folyamatos megfigyelését fogja szolgáltatni a Kepler, amilyenről az asztrofizikusok idáig csak álmodhattak.

A csillagszeizmológia a '70-es években született és azóta páratlan sikereket elért napszeizmológia logikus kiterjesztése a távolabbi csillagokra. A Napban a felszínhez közeli konvektív réteg sztochasztikusan gerjeszti az 5 perchez közeli periódusú oszcillációkat. Központi csillagunk esetén az egyedi rezgési módusok száma hatalmas, tízmilliós nagyságrendű. Az egyes módusok hatását a luminozitás változásában (néhány ppm) vagy a felszín radiális sebességének mérésével (20 cm/s) érhetjük tetten. A rezgési módusok különböző mélységig hatolnak a Nap belsejébe, ezáltal megteremtve annak lehetőségét, hogy valódi szeizmológiát műveljünk, azaz letapogassuk életadó csillagunk belső szerkezetét. Ehhez elegendő a frekvenciákat mérni, és azonosítani őket a megfelelő módusokkal. A frekvenciák összehasonlíthatatlanul pontosabban mérhetők, mint bármely más fizikai jellemző. A megfigyelt módusok nagy száma arra is lehetőséget ad, hogy közvetlen módon, inverz módszerekkel rekonstruáljuk a hangsebesség és a sűrűség radiális lefutását, teszteljük a különféle állapotegyenleteket a Nap magjában, a forgási sebesség változását a mélységgel, a héliumtartalmat a konvekciós zónában, valamint a konvekciós zóna mélységét.

Az  $(r, \theta, \varphi)$  koordinátákkal jellemzett háromdimenziós gázgömb sajátmódusai három egész számmal jellemezhetők:  $n$  a radiális sajátfüggvényt jellemzi,  $l$  és  $m$  pedig a felszíni struktúrát jellemző szférikus harmonikus  $(Y_l^m(\theta, \varphi))$  leírására szolgálnak. A kitérés radiális komponense ezen módusok szuperpozícióként írható:



7. ábra. Részlet a Nap frekvenciaspektrumából, mely a SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) VIRGO műszerével kapott adatokból készült. A számok az  $l$  értékeket mutatják. Leolvashatók a nagy és kis szeparációk. b) Különböző tömegű csillagok fejlődését mutatja a jobb oldali diagram. A nagy  $(\Delta v)$  és kis frekvenciaszeparáció  $(\delta v)$  a korról, illetve a tömeggel korrelál. A csillagok tömegét nap-tömegben tüntetett fel (vastag vonalak), a szaggatott vonalak konstans centrális hidrogéntartalmat jelölnek, ami a csillag korával csökken.

$$\xi_r = \sum_{n, l, m} \xi_{r, nl}(r) Y_l^m(\theta, \varphi) \exp(2\pi i \nu_{n, l} t).$$

Megmutatható, hogy az  $n \gg l$  esetben a közeli módusokra jellemző frekvenciákból az alábbi módon képzett különbségek, vagyis az úgynevezett nagy szeparáció  $\Delta v = \nu_{n, l} - \nu_{n-1, l}$  és a kis szeparáció:  $\delta v = \nu_{n, l} - \nu_{n-1, l+2}$  jó közelítéssel állandóak, és fontos diagnosztikus szerepet töltenek be. Míg az előbbi a csillag sűrűségére jellemző, addig az utóbbi a magban mérhető átlagos molekulatömeggel van szoros kapcsolatban, ez pedig a kort jellemzi egyértelmű módon (7. ábra).

A csillagok legtöbbje tömegétől és fejlődési állapotától függetlenül mutat a Naphoz hasonló oszcillációkat. A megfigyelhető frekvencia a csillagbelsőre jellemző hangsebesség és sűrűségstruktúra függvénye, ezt módosíthatja a csillag forgása és mágneses tere. Az amplitúdókat és a fázisokat a felszínhez közeli rétegek befolyásolják, ideértve a turbulens konvekciót is. A csillagaktivitás is hatással van a módusok jellemzőire (amplitúdó, frekvencia, élettartam), egyedülálló lehetőséget biztosítva a Napéhoz hasonló aktivitási ciklusok kimutatására. Az utóbbi egy-másfél évtizedben földfelszíni fotometriával és spektroszkópiai idősorokból távoli csillagoknál is sikerült kimutatni a Nap típusú oszcillációt.

A „precíziós űrfotometria” minden bizonnyal új fejezetet nyit a csillagszeizmológia területén is. A Kepler által kínált pontosság és a vizsgált objektumok száma nagyságrendi ugrást jelent. A küldetés első

kilenc hónapja folyamán a szeizmológiai program keretében több mint 5000 csillag fényét rögzítik a detektorok. Az előzetes eredmények alapján az űrtávcső mintegy 1100 csillagot fog a misszió teljes időtartama alatt figyelni. A Kepler-idősorok asztroszeizmológiai alkalmazásával a csillagok sugara 2–3% pontossággal, koruk 5–10 százalékos hibával kapható meg. A több éves megfigyelés végére ezekről a csillagokról jó parallaxis (távolság) is rendelkezésre fog állni; ez pedig a luminozitásuk bizonytalanságát 2%-ra csökkenti, ami a csillagmodellekkel való összevetésből 1%-nál pontosabb sugarat eredményez [3].

A Kepler-adatok hatalmas előrelépést jelenthetnek a csillagfejlődés megértése terén is. A szóban forgó teleszkóp a csillagok oszcillációit olyan fantasztikus pontossággal képes detektálni, hogy közvetlenül láthatjuk majd a csillagok szerkezetében a csillagfejlődés miatt bekövetkező változásokat. Tovább növeli az asztroszeizmológia alkalmazhatóságát, ha csillag-halmazbeli objektumok a célpontok. A Kepler látómezőjében 5 fényesebb nyílthalmaz van, s az egyes halmazok tagjai egyenlő távolságra vannak tőlünk, kémiai összetételük és koruk első közelítésben azonos. Ezek a megkötések fontos segítséget adnak az elméleti vizsgálatoknak, és leszűkítik a lehetséges modellek körét.

Egy sor olyan kérdés megválaszolásához is közelebb kerülhetünk, amelyek vizsgálatát eddig a kellő pontosság hiánya sok szempontból hátráltatta. Ilyen problémák a száz éve ismert, de máig nem értett amplitúdó- és fázismoduláció az RR Lyrae csillagokban (Blazsko-effektus), a nemradiális és strange módusok jelenléte a klasszikusan radiális módusokban pulzáló változócsillagokban (ilyenek a cefeidák és az RR Lyrae csillagok), a hosszú periódusú változások oka félszabályos változóknál. Hasonlóan fontos kérdések a gerjesztési és módusszelekciós hatások fősorozathoz közeli, nemradiális pulzációt végző (delta Scuti és gamma Doradus típusú) csillagoknál, a mag konvektív túllövése és a forgási sebesség a nagy tömegű fősorozati (pl. béta Cephei típusú) csillagok belsejében, a konvektív granulációs szerkezet a vörös óriás csillagokban, a pulzáció, rotáció és a mágneses tér kölcsönhatása (ami jól vizsgálható pl. a gyorsan oszcilláló Ap csillagokban), relativisztikus és mikrolencsehatások kettőscsillagokban. Itt csak néhány példát említettünk, de a pontosságnak ezen a szintjén számtalan új jelenség okozhat meglepetést a kutatóknak.

Az MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézet munkatársai is aktívan részt vesznek a KASC munkájában: az adatok elemzésével, modellszámításokkal és földi megfigyelésekkel járulnak hozzá a projekt sikeréhez. A magyar tudósok főként a pulzáló változócsillagokra fognak koncentrálni. Az előkészítő munka során mintegy 100 ilyen csillagot javasoltak, amelyek bekerültek a Kepler programjába. A KASC tudományos programja 14 munkacsoportban folyik. Ezek közül a cefeida változócsillag-típushoz kapcsolódó munkacsoport vezetésével jelen cikk szerzőjét bízták meg.

## A Kepler várható hatása

A tudományban – így a csillagászatban is – a mérési pontosság kiterjesztése, az új mérési eszközök, technikák alkalmazásai is inspirálják az új gondolatokat, eredményeket. Gondolhatunk *Eötvös* precíziós ingájára, de éppúgy *Tycho Brahe* távcső nélkül végzett rendkívül pontos csillagászati pozícióméréseire, amelyek lehetővé tették Johannes Keplernek, hogy felismerje a bolygómozgás törvényeit. Forradalmi volt *Galilei* 400 évvel ezelőtti mozdulata is, amellyel távcsövet az égbolt felé fordította: az eszköz fénygyűjtőképessége kitágította tudásunkat az Univerzumról. Ehhez hasonló momentum talán csak a Hubble-űrtávcső felbocsátása volt. Legutóbb pedig a COROT-műholddal indult el egy „mikromagnitúdós forradalom” a csillagászati űrfotometriában. A Kepler a méltó folytatás záloga: a pontosságban még egy nagyságrenddel továbblépve, új típusú objektumok felfedezésével és vizsgálatával vívhat ki elismerést az exobolygó-kutatásban, ugyanakkor a napszeizmológia kiterjesztése a távoli csillagokra szintén mérőföldkőnek bizonyulhat.

A küldetés vezetői ügyelnek arra, hogy a „Kepler-hatás” a szakmai körökön kívül is minél nagyobb legyen: az űrprogram költségvetésének jelentős hányada jut a tudományos munka mellett ismeretterjesztő, népszerűsítő tevékenységre. Szinte minden korosztálynak kínálnak programokat, előadásokat, oktatóanyagokat a csillagászat és az exobolygók témakörében. Továbbá bárki elküldhette nevét és 500 szavas üzenetét, ezeket összegyűjtve egy DVD-lemezen a Kepler fedélzetére erősítették, ezáltal is szoros kapcsolatot alakítottak ki a nagyközönséggel. Ennek is köszönhető, hogy az első eredményeket a kutatók mellett az érdeklődő közönség is türelmetlenül várja itthon és külföldön egyaránt.

## Köszönetnyilvánítás

Az MTA KTM CSKI munkatársainak a Kepler asztroszeizmológiai programjában való részvételét és az Intézetben folyó előkészítő munkákat a Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium a magyar űrkutatás fejlesztésének támogatására kiírt, K-36-08-00031K számú pályázata támogatja.

## Linkgyűjtemény

Kepler: [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/kepler/main/index.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/main/index.html)  
COROT: <http://smc.cnes.fr/COROT/>  
HATNet: <http://www.cfa.harvard.edu/~gbakos/HAT/>  
Exobolygó enciklopédia: <http://exoplanet.eu/>

## Irodalom

1. Bakos, G. Á., Noyes, R. W., Kovács, G., *Astrophysical Journal* 656 (2007) 552.
2. Borucki, W. J., Summers, A. L.: *Icarus* 58 (1984) 121.
3. Stello, D., Kjeldsen, H., Bedding, T. R., *Astronomical Society of the Pacific Conference Series* 366 (2007) 247.
4. Sousa S. G., Santos, N. C., Mayor, M. és mtsai: *Astronomy and Astrophysics* 487 (2008) 373.
5. Torres, G., Winn, J. N., Holman, M. J., *Astrophysical Journal* 677 (2008) 1324.