

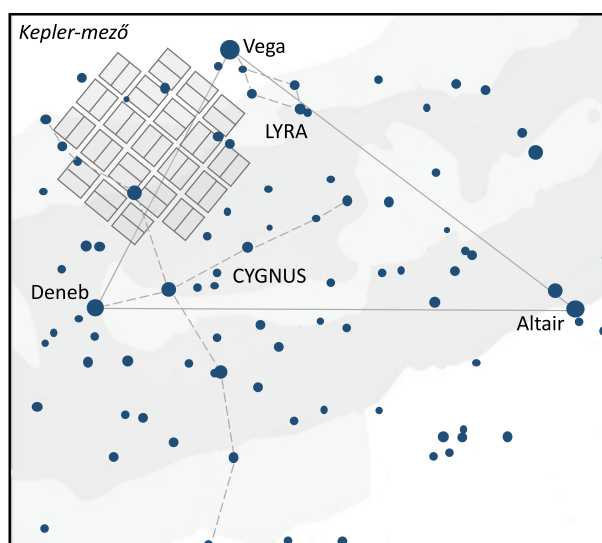
Ég veled, Kepler

Hogy van-e élet más bolygókon, azt még nem tudjuk, de mára azt már biztosan tudjuk, hogy rengeteg bolygó létezik Naprendszeren kívül. Valójában most már úgy gondoljuk, hogy több bolygó van az Univerzumban, mint csillag, és ezek egy része hasonló Földhöz. Azt, hogy ez a sejtés tudományos tényré vált, annak az űrtávcsőnek köszönhetjük, amely nevét a bolygómozgás törvényeit felfedező csillagászról, Johannes Keplerről kapta. A Kepler űrtávcsővel tett felfedezések azonban nem csak a távoli csillagok körül keringő bolygókról szólnak, korszakalkotó új tudásra tettünk szert a csillagászat számos további területén is, és a munka még messze nem ért véget. Az alábbiakban a pályára állás óta eltelt tíz év tudományos eredményeiből válogatunk.

Előkészületek

A Kepler útja nehezen indult. Bár a 80-as években már egyértelművé vált, hogy Föld-típusú bolygók felfedezéséhez szükséges pontosságot csak egy űrben lévő távcső tudja teljesíteni, a misszió ötletét mégis négyszer vetette el a NASA. Több ezer csillag szimultán észlelése kivitelezhetetlen tűnt, és ekkor még a megfelelő pontosságú detektorok sem léteztek, fotométerekkel nem lehetett az ötletet megvalósítani. Azonban már akkor is látszott, hogy a fényváltozások folyamatos méréséből a tudományos közösség széles köre profitálhat, így Bill Borucki, a misszió atyja és csapata nem adta fel. A fejlesztés éveken keresztül zajlott, bebizonyították, hogy a CCD detektorok már rendelkeznek a szükséges pontossággal, a csillagok ezreinek egyszerre mért adatait is ki lehet nyerni, és az űrbéli használatról is voltak tapasztalatok. Az űrtávcső helyzetét eredetileg a Nap-Föld gravitációs rendszer egyik nyugalmi helyzete, egyik Lagrange-pontja körül képzelték el, ám ezt végül elvetették. A Nap körüli pályára állítás jelentősen olcsóbb ötletével már belefért a projekt a NASA Discovery-programjának költségvetésébe. Végül sikerült a misszió körüli összes kételyt eloszlatni és 2001 decemberében zöld utat kapott. (Borucki et al., 1985, 1999, 2001; Koch et al. 2000; Benkő & Szabó, 2011)

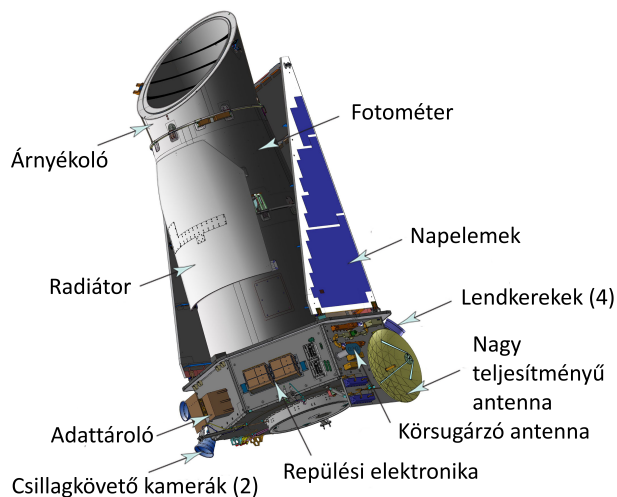
A misszió elsődleges célja Föld-típusú bolygók nagyszámú felfedezése volt Nap-típusú csillagok lakható zónájában, hogy meghatározzák a gyakoriságukat. A bolygó, miközben elhalad csillaga előtt, annak egy részét eltakarja, így halványabbnak látjuk ezalatt a bolygófedés alatt. Hogy mennyivel lesz halványabb, az a csillag és a bolygó méretétől és a csillag látható fényességétől is függ. Abból a távolságból például, ahonnan a Nap egy 12 magnitúdós csillagnak látszik, a Föld fedése egy 84 milliommód magnitúdós halványodást okoz. Így képzeletbeli távoli



1. ábra. A Kepler-misszió látómezője a Hattyú (Cygnus) és a Lant (Lyra) csillagkép határán. (Forrás: D. Koch)

szomszédjainknak legalább 20 millimagnitúdós pontosságra van szükségük, hogy kimérjék a Föld fedését. Ám legalább három fedést észlelniük kell, hogy ki tudják számítani a Nap-Föld rendszer méreteit, és ehhez legalább négy évig folyamatosan figyelniük kell minket. Pontosan ez a koncepciója a Kepler-misszióknak: négy éves folyamatos precíz fényességmérés több mint százezer törpe csillagra, hogy a mienkhez hasonló bolygókat találjunk.

A megfigyelendő terület kiválasztásánál pedig a következő kritériumokat vették figyelembe. Legyen olyan terület ami egész évben mérhető, minimális szórt fénnel a Nap irányából. Legyen az északi égbolton, mert a földi kiegészítő észleléshez szükséges infrastruktúra északon található. Legyen egy csillagokban gazdag terület a Galaxis síkjától nem messze, de ne is túl közel, és lehetőleg minél kevesebb kettőscsillaggal a háttérben, amely hamis pozitív detektálást jelenthet. Ezek a kritériumok behatárolták a területet a Cygnus és a Lyra csillagképek határán (1.ábra), amelynek végső pozícióját úgy választották, hogy a fényes, a felvételeken szaturált csillagok közül minél több essen a 21 CCD modulból álló detektor réseibe (Koch et al. 2005). Minden egyes CCD modul két, egyenként 2200×1024 pixel felbontású CCD-ből áll, egy modul pedig egy 5 négyzetfokos területet fed le az égen. A teljes látómező így durván 10×10 fokos, azaz több mint 500 teliholdnyi. A távcső maga egy 1,4 m átmérőjű főtükörrel rendelkező és 95 cm apertúrájú Schmidt-távcső (2.ábra). A űreszköz



2. ábra. A Kepler-űrtávcső felépítése.
(Forrás: NASA Ames/Ball Aerospace)

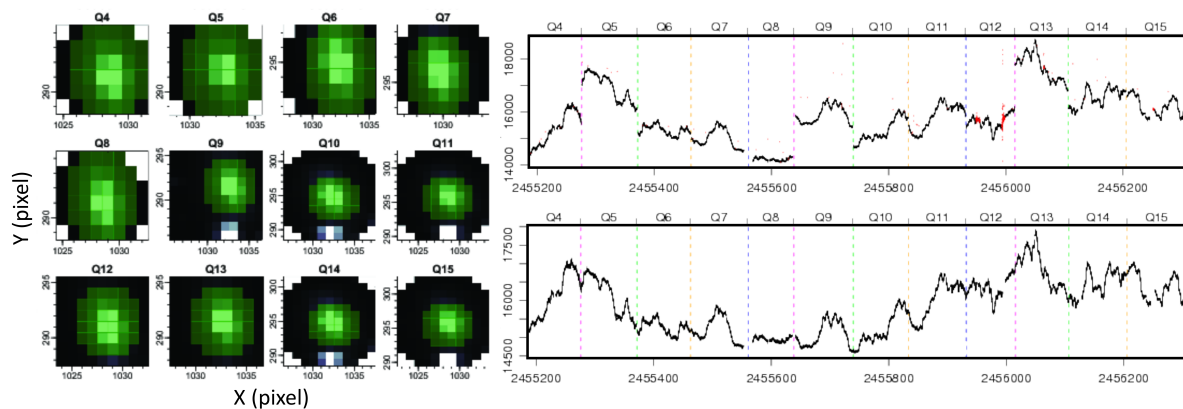
megépítése 2006-ig tartott, de az indítást költségvetési okokból többször elhalasztották. A fellövésre végül 2009. március 7-én, a Floridai Cape Canaveral Légibázisról került sor. Az űreszközt egy olyan Nap körüli pályára állították, amely a Földtől kissé lemarad, így több mint egy év, 372,5 nap alatt tesz meg egy keringést. Ez a pálya igen előnyös, mivel a Föld gravitációs és mágneses mezeje itt már nem fejt ki jelentős forgatónyomatékokat az űrtávcsőre, így könnyebb a látómező irányában tartani, és a Föld és a Hold szórt fénye sem zavarja a méréseket (Koch et al. 2004). A tudományos mérések 2009. májusában kezdődtek.

Missziók

A Kepler-missziót eredetileg 3,5 évre tervezték a következő, jól körülhatárolt célokkal: meghatározni, hány Föld méretű, vagy nagyobb bolygó van a csillagok, elsősorban Naphoz hasonló csillagok lakható zónájában, vagy annak közelében, meghatározni a bolygók méretét és pályájukat, újabb tagokat keresni a rendszerekben és megbecsülni a többes bolygórendszerek számát. Valamint meghatározni az anyacsillag tulajdonságait, és ha lehet, a bolygók sűrűségét, és így a lehetséges összetételét.

Az előre kiválasztott célcillagok megfigyelésére kétféle mintavételezéssel volt lehetőség, 30 perces illetve 1 perces időfelbontással. Ez utóbbit azokra a csillagokra tartották fenn, amiknél a gyors változások miatt gyors mintavételezés szükséges. Az exobolygó-jelölt csillagok mellett asztroszeizmológiai célpontokat is válogattak. Az asztroszeizmológia tudománya a csillagok rezgéseit használja a fizikai tulajdonságok meghatározásához. Ezek a rezgéseket fényváltozások formájában látjuk, amik igen gyorsak is lehetnek, például a Napon

5 perces felszínközeli akusztikus oszcillációkat figyelhetünk meg. A célpontok kiválasztására és az adatok vizsgálatára megalakult a Kepler Asteroseismic Science Consortium, röviden KASC. A KASC tagjai jellemzően pulzáló vagy oszcilláló csillagokkal foglalkozó csillagászok, különböző témák szerinti munkacsoportokba tömörülve, összességében több száz, főként európai kutató. A megfigyelt körülbelül 170 ezer célcillagot a Kepler Input Catalog (KIC) tartalmazza, mindegyikük egy 7 jegyű azonosítószámot kapott. A célcillagokra fényességüktől függően néhány különböző méretben maszkokat definiáltak, alakjuk miatt ezeket bélyegképeknek, „postage stamp”-eknek is nevezik (3. ábra). A korlátozott telemetria miatt csupán ezeknek a bélyegeknak az adatai érkeztek a Földre, a teljes látómező képének a letöltésére havonta csak egyszer volt lehetőség. 52 ilyen Full Frame Image (FFI) kép származik a Kepler-misszióból, amiken egyébként 4,5 millió csillag látszik. Az adatletöltés havonta

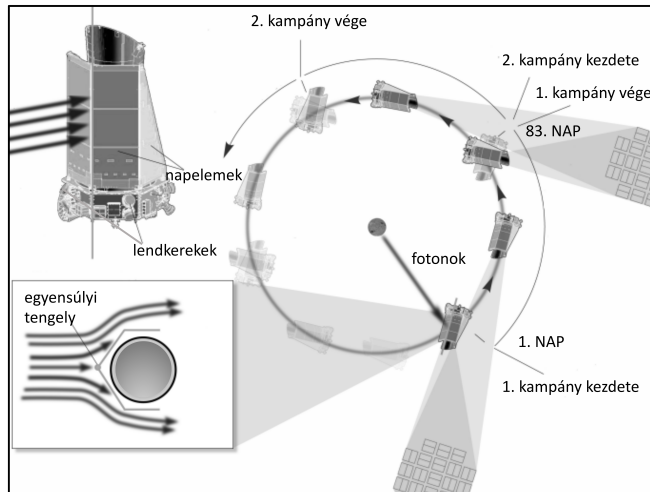


3. ábra. A negyedévenként különbözőképpen definiált maszkok, és a fénygörbe diszkontinuitások korrekciója. (Forrás: Edelson et al. (2014))

történt, ilyenkor a távcső néhány órán át nem gyűjtött adatokat. Ezek, illetve a biztonsági módban töltött időszakok miatt a fénygörbék nem teljesen folytonosak, tartalmaznak kisebb lyukakat. De ennél nagyobb problémát okozott az adatok negyedéves ciklusa, a távcsövet ugyanis fix napelemei miatt negyedévenként 90 fokkal el kellett fordítani a tengelye körül, hogy megfelelő mennyiségű fény érje. Egy űreszköz tervezésnél fontos szempont, hogy minél kevesebb mozgó alkatrészt tartalmazzon, a forgatás következtében viszont a csillagok képei teljesen máshova kerültek a detektoron. A CCD pixelek érzékenységbeli különbsége egy kellemetlen mellékhatást produkált: az ugyanarról a csillagból gyűjtött átlagos fluxus és a fényváltozás mértéke is minden negyedév adatában más, így a negyedévek adatainak összeillesztése komoly kihívást jelent. Az adatokat a letöltés után a NASA Ames Research Center (ARC) dolgozta fel, és kalibrált fénygörbéket, valamint úgynevezett „target pixel file” (TPF) képeket adott közzé negyedévenként. Ez utóbbiak alkalmasak arra, hogy bárki saját fotometriát készítsen, tetszőleges apertúrával. Az adatok kezdetben nem voltak szabadon elérhetőek mindenki számára, a KASC-tagok prioritást élveztek, az exobolygó jelölteket pedig az Ames-ben elemezték.

Sikeres misszió révén a kutatók a hosszabbításban is reménykedhettek: ezt 2012-ben meg is ítélte a NASA, további 2+2 évre való anyagi fedezettel. A misszió a 17. negyedévében azonban bajba került. Négy giroszkópjából egy már korábban tönkrement, 2013. május 8-án viszont egy második is. Hamar kiderült, hogy a lendkerék többé nem mozdítható. Két megmaradt lendkerékével a távcső térbeli helyzete csak két tengely mentén biztosítható, a harmadik tengely mentén elmozdul. Lendkerékcsere természetesen szóba sem jöhetett, ekkor már a távcső egyébként is fél csillagászati egységre volt lemaradva a Földtől.

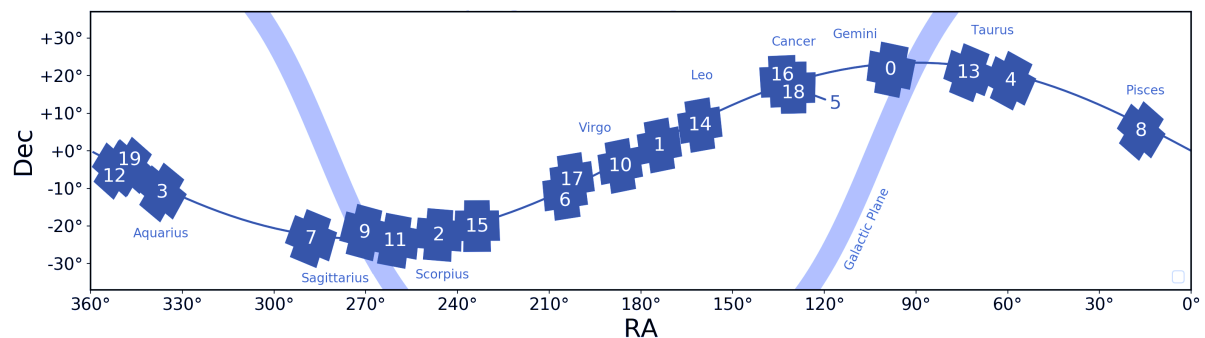
Adott volt tehát egy egy irányban nem stabilizálható, egyébként teljesen kifogástalanul működő űrtávcső, amely soha addig nem látott pontosságú fotometria adatokat képes szolgáltatni, és melynek támogatását éppen meghosszabbították. Mindenki egyetértett abban, hogy kár lenne veszni hagyni, ki kell dolgozni egy új küldetést. Az is biztató volt, hogy a megmaradt két giroszkópnál nem mértek anomális viselkedést és megemelkedett sűrűlődést. Így a tudományos közösség összefogott, és 42 különböző javaslatot küldött NASA-nak a távcső megmentésére. Ezeknek az ötleteknek egy része új tudományos programokat, másik része technikai trükköket, számításokat tartalmaztak a korlátozott képességű távcső optimálisan kihasználásához.



4. ábra. A K2-misszió koncepciója. (Forrás: NASA Ames)

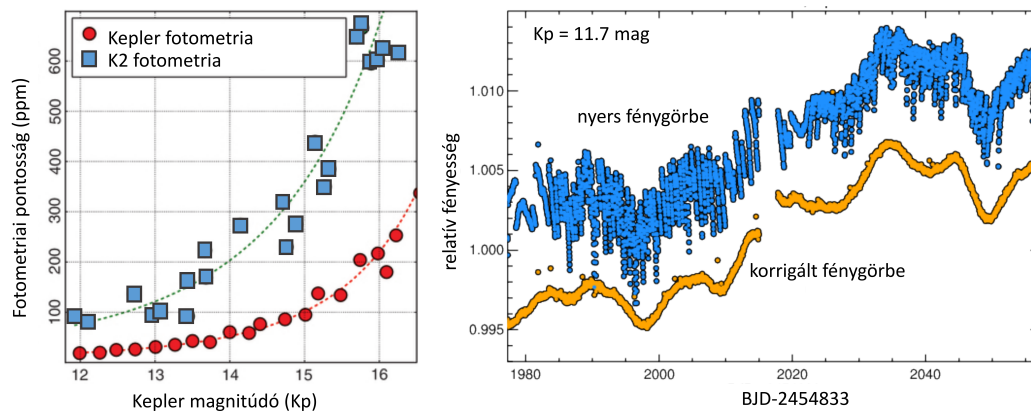
Végül megszületett a döntés, és K2 misszió néven a távcsövet újra munkába állították. A terv lényege az volt, hogy a távcső pozícióját a két megmaradt lendkerék mellett a harmadik irányban a napszél nyomása biztosítsa. A konfiguráció a látóirányt is kijelölte, amelynek a távcső keringési síkjában, tehát gyakorlatilag az ekliptikában kell lennie. Ahhoz, hogy a napfény mindig oldalról, a napelemek felől érje, a pozícióját időnként módosítani kellett. Így 75-80 napig lehetett egy égterületet megfigyelni: ezeket kampányoknak nevezték el (4.ábra). Egy rövid tesztelési időszakot követve a K2 misszió 2014. március 8-án megkezdődött a 0.

Kampánnyal, 2018. szeptember 26-án pedig, a 19. kampány közepén az űreszköz üzemanyagának elfogyásával, véget ért. A kényszerűségből választott megfigyelési program óriási tudományos potenciált tartalmazott és hihetetlenül sikeressé vált. A távcső látómezejének változtatásával a megfigyelhető csillagok száma megsokszorozódott (5. ábra). Bár az eredeti cél, a Föld analóg bolygók keresése lehetetlenné vált, számos más tudományterület kapott lehetőséget. A K2 misszióban a pályázási és az adatkibocsátási eljárás is változott. Nem voltak többé központilag kijelölt célpontok, viszont a Guest Observer, vagyis vendégészlelői programon keresztül bárki javasolhatott célcillagokat, tudományos érdeklődése szerint. A pályázatokat szakmai elbírálás során válogatták ki, az adatok pedig rögtön mindenki számára nyilvánosak lettek.



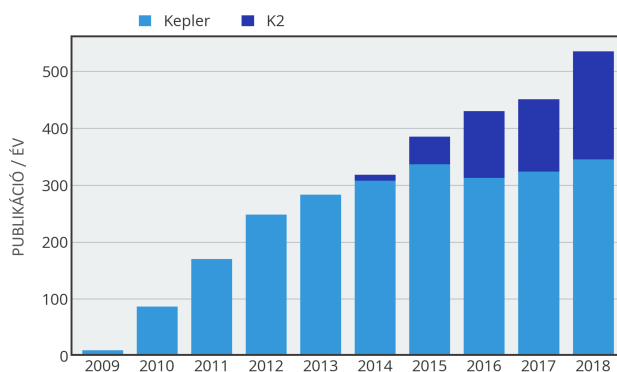
5. ábra. K2-kampányok látómezői az ekliptikán. (Forrás: NASA Ames/ Kepler & K2 Science Center)

Kampányonként körülbelül 20 000 csillag mérésére volt kapacitás, egyes sűrűbb csillagmezőkön pedig nagyobb összefüggő területet is megfigyeltek. A két lendkeres üzem mód miatt a fotometriai pontosság csökkent. A szélessávú, lényegében fehér fényben, Kepler magnitúdóban (K_p) mért csillagok az eredeti misszióban milliomod nagyságrendű hibával rendelkeztek, a K2-misszióban a halványabb csillagokra ez a hiba már jelentősen megnőtt. További problémát jelentett, hogy a távcsövet érő forgatónyomaték miatt 6 óránkénti kiigazító manőverekre volt szükség: ez azt eredményezte hogy a csillagok képe a CCD-n lassan elmozdult majd 6 óra múlva visszaugrott. Az elmozdulás 1-2 pixelt, azaz 8-16



6. ábra. Fotometriai pontosság a K2-misszióban. (Forrás: Howell et al. (2014), A. Vanderburg)

ívmásodpercet is kitett. Ezek fura szisztematikus hibákat vittek be a fénygörbékbe (6. ábra), aminek a kijavítása újabb kihívást jelentettek a tudományos közösség számára. Több fajta fotometriai megoldás is született ennek korrigálására, de a mai napig nem készült olyan eljárás amely az összes csillagra tökéletes fénygörbét adna. Különösen problémások azok a csillagok, amiknek a fényváltozásának a periódusa 6 óra körüli vagy annak többszöröse, és az pozíció ugrálásokhoz hasonlóan éles vagy hegyes fénygörbealakokkal rendelkeznek, mivel ezeket a legtöbb korrekciós eljárás összekeveri.



7. ábra. A Kepler-űrtávcsőhöz kapcsolódó publikációk száma évenként. (Forrás: NASA Ames)

A nehézségek további ecsetelése helyett azonban nézzük az eredményeket. A Kepler távcsőhöz kapcsolódó publikációk száma óriási, 2019-re meghaladta a háromezretet. A Kepler adatokkal foglalkozó csillagászok száma a publikációk szerzőit számba véve körülbelül 5500. 2018-ban naponta 1,6 cikk született a Kepler és a K2 missziókból, és bár az űrtávcső már nem működik a publikációs aktivitás még várhatóan sokáig fog tartani (7. ábra). És akkor lássunk az eddigi eredményekből néhány izgalmas vagy kiemelkedően fontos témát.

Az exobolygó-forradalom

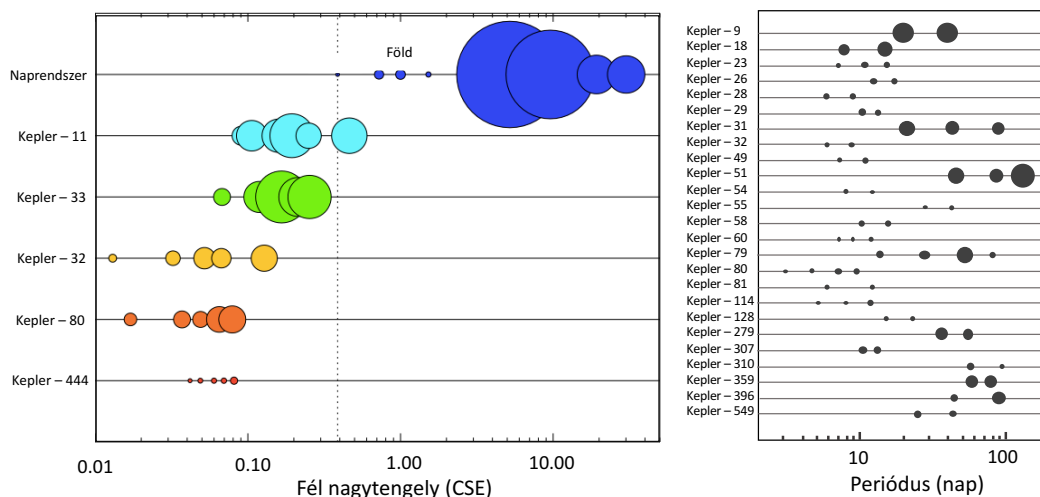
A Kepler tehát egy fő kitűzött céllal épült: hogy meghatározza, milyen gyakoriak a Földhöz hasonló méretű bolygók a Naphoz hasonló csillagok körül. Vagyis nem egyszerűen csak érdekes naprendszereket kellett felfedezni vele, hanem össze kellett gyűjteni egy olyan

nagy, és lehetőleg egységes mintát, amiből ilyen statisztikai adatok kinyerhetők. Ez azt is jelentette, hogy az exobolygók keresése a fénygörbékben csak az egyik része volt a munkának. Ugyanilyen fontos volt, viszont sokkal kevésbé volt látványos a végtelen mennyiségű tesztelés is, hogy kiderüljön, milyen bolygókat lenne képes egyáltalán felfedezni: vagyis, ha egy adott méret vagy csillagtípus esetében kevés bolygót látunk, az azért van-e, mert tényleg kevés van belőlük, vagy mert már nem tudja őket kimutatni az űrtávcső.

Ennek egyik fontos lépése volt például, hogy a Kepler négy éves adataiból előállított végleges katalógust teljes mértékben számítógép állította össze. A Robovetter nevű szoftverbe persze bele volt építve a csillagászok összes addig gyűjtött tapasztalata, de ez a módszer garantálta, hogy mind a 170 000 csillag adata ugyanúgy volt kiértékelve, és egyetlen bolygójelölt sorsa sem függött attól, hogy a fénygörbére néző kutatónak éppen jó, vagy rossz napja volt. Az így összegyűjtött 4034 bolygójelölt biztosan nem az összes, amit ki lehetne édesgetni az adatokból, de statisztikai vizsgálatokra ez az összeállítás a legalkalmasabb. A feladat nehézségét viszont jelzi, hogy csak 48 bolygójelölt esik a leginkább keresett kategóriába: a lakható zónának megfelelő távolságban keringő, kisméretű bolygók közé (Thompson et al. 2018). Nem is csoda, hogy meglehetősen tág határok között mozognak a gyakoriságra adott becslések: különböző szerzők 10 és 34% közé teszik azt, vagyis minden tizedik, de az is lehet, hogy minden harmadik, Naphoz hasonló, G-K színképtípusú törpecsillagnak van kicsi, tehát jó eséllyel csak kőzetből álló bolygója a lakhatósági zónában. Sőt, 2-6% esetében akár egynél több is. Fontos viszont, hogy a lakhatóságot itt a lehető leglazább értelemben kell venni, ez itt csak annyit jelent, hogy ideális körülmények között lehet folyékony víz a felszínükön. (Hsu et al. 2019, Zink & Hansey 2019)

Persze ugyan a fő cél ezeknek az összesítő számoknak a kinyerése volt, de több ezer bolygórendszer felfedezése több, mint elegendő biztosíték volt arra, hogy rengeteg váratlan újdonságra is fény derüljön. Az hamar kiderült, hogy eddig csak a felszínt kapargattuk: a forró Jupiterek, és úgy általában a nagyon rövid periódusú, és/vagy nagyon nagy méretű bolygók ritkák. Viszont már pusztán a bolygók méreteloszlásából is adódott egy megdöbbentő felfedezés: kiderült, hogy a csillagokhoz közeli bolygók között a szuperföldek és minineptunuszok a leggyakoribbak. És éppen ezek, a Földnél nagyobb, de az Uránusznál és Neptunusznál kisebb bolygók hiányoznak teljesen a mi Naprendszerünkben, így nincs is igazán támpontunk arra, hogyan is nézhetnek ki közelről. Ennek kiderítése még a jövő távcsöveinek feladata lesz. De ugyanígy, a csillagjukhoz extrém közel keringő, részben olvadt kőzettel borított lávabolygók is ismeretlenek felénk.

Sok bolygóról az is kiderült, hogy nincs egyedül, a többszörös bolygórendszerek pedig egy gordiuszi csomót is átvágtak a Kepler számára. Eleinte reménytelennek tűnt, hogy a több ezer bolygójelöltnél akár töredékét is sikerüljön megerősíteni, vagyis például radiálissebesség-mérésekkel igazolni, hogy valódi, bolygónyi tömegű kíséreléssel van dolgunk. Míg ugyanis egyetlen fedési jelnél még felmerülhet, hogy valami nagyon hasonlót produkáló hamis pozitív jelenséggel, például egy ugyanarra látszó fedési kettőscsillaggal van dolgunk, addig kettő, három, vagy még több tranzit esetén ennek nagyon gyorsan nullára zuhan a valószínűsége. Sőt, hamar kiderült, hogy a többszörös rendszerekben a bolygók tömege is megmérhető, drága és lassú spektroszkópia igénybe vétele nélkül. Az egyes bolygók ugyanis mind mozgatják a csillagot a közös tömegközéppont körül, sőt, akár egymás mozgására is hatással vannak, ez pedig a látott fedések időpontjainak ide-oda csúszkálását okozza. Ezek a tranzitidőpont-változások lehetővé teszik, hogy megbecsüljük a bolygók tömegét. Sőt, annyira fontosnak bizonyultak, hogy a bolygókereső algoritmust is módosítani kellett, hogy megengedjen némi szabálytalanságot a fedések ismétlődésében, különben egyszerűen kizárta volna az ilyen a többes rendszereket.



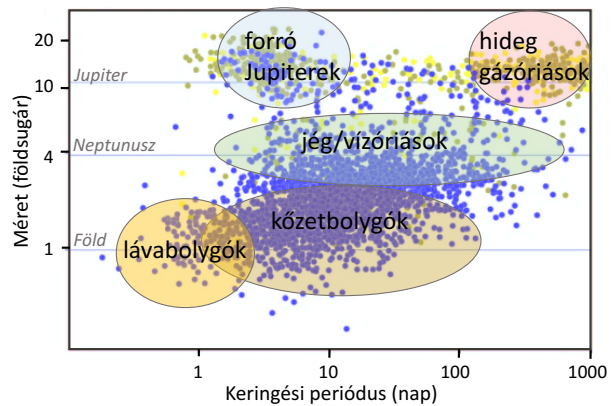
8. ábra. Példák többes exobolygórendszerekre. (Forrás: Campante et al. (2015), Millholland, S. et al. (2017))

A többes rendszerek rengeteg hasznos információval szolgáltak (8. ábra). Kiderült, hogy az összetettebb rendszerek hasonlítanak a Naprendszerre, például igen gyakran közel egy síkban keringenek. Sőt, szintén hozzánk hasonlóan, a legtöbb esetben a kisebb bolygók keringenek belül, a nagyobbak kívül – bár példát az ellenkezőjére is sikerült találni. Sőt, a többes rendszerekkel „láthatatlan” bolygókat is sikerült felfedezni: olyan égitesteket, amik maguk ugyan nem okoztak csillagfedést, de gravitációjuk ide-oda rángatta a fedő bolygót, és az időeltolódások mégis felfedték a jelenlétüket. És igazából a többes jelző nem is korlátozódott a bolygókra: a Keplerrel sikerült felfedezni az első, kettőscsillag körül keringő bolygókat is. A NASA-nál nem aprózták el ennek a bejelentését sem: a sajtótájékoztatón helyet kapott az Industrial Light & Magic cég egy képviselője is, aki örömmel konstatálta, hogy igazuk volt, amikor 1977-ben megalkották a Tatuin rendszert a Csillagok Háborúja számára. Ezek a rendszerek tényleg hasonlítanak a filmbeli elképzelésre, ahol egy szoros kettőscsillagot kerülget a bolygó. Persze ilyenkor a beérkező sugárzás a csillagok helyzetétől függően nagyon erősen tud ingadozni, így a kettőscsillagok körül meghatározott lakhatósági zóna komolyságát a szokásosnál is óvatosabban kell kezelni.

Nem csak a bolygók száma volt lenyűgöző, de a négy évnyi, folyamatos megfigyelés nyújtotta pontosság is. A legkisebb bolygók, amiket sikerült azonosítani, bőven kisebbek a Földnél: a Kepler-37 rendszer legkisebb bolygója alig nagyobb a Holdnál. De a legnagyobb bolygók esetében is ki lehetett használni a néhány milliomodrésznyi fényváltozásokat is rögzítő megfigyeléseket. A csillag előtt elhaladó bolygókkal fel lehet térképezni például a csillagfoltok eloszlását, mivel a csillag kicsit fényesebbnek fog tűnni, amikor a bolygó egy kevésbé világító foltot takar el. Számos forró Jupiternél a bolygóról visszavert csillagfényt sikerült megfigyelni. Sőt, időnként annak változásait is: a HAT-P-7b esetében például szinte keringésről-keringésre változott a bolygó fázisgörbéje, vagyis a felszínről visszavert fény mennyisége. Más szavakkal kifejezve: időjárási változásokat láttunk egy Naprendszeren kívüli bolygón. Persze ezt az időjárást egészen máshogy kell elképzelni, mint felénk: a közel hárromezer fokban forróságban felhőket nem víz, hanem ásványok, például korund tud csak alkotni. A HAT-P-7b-re kitalált, egyszerű időjárás-modell szerint a bolygót körbejáró szelek, valamint az éjszakai oldalon kicsapódó, majd a nappali oldalra besodródó ásványi felhők közötti összjáték határozza meg, hogy változik, mennyi fényt ver vissza a bolygó (Armstrong et al. 2016).

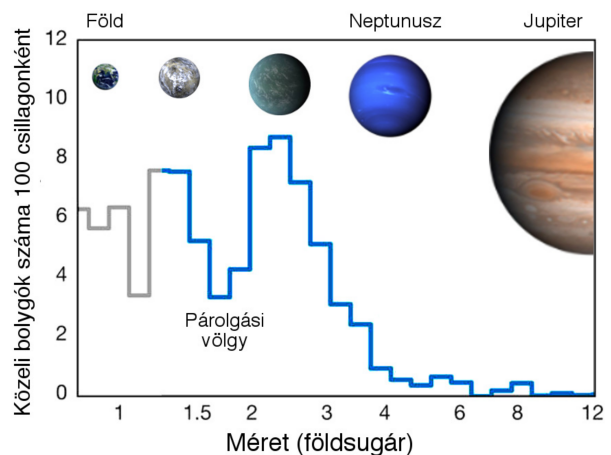
Egy nagy probléma azért még fennállt a Kepler bolygójelöltjei kapcsán: az égitestek korát, méretét, tömegét, és így az összetételét csak annyira pontosan lehetett meghatározni, amennyire pontosan az anyacsillaguk korát, méretét, tömegét ismertük. Ezt a bolygós

csillagok egy kis részére ki lehetett nyerni a csillagregzések megfigyelésével, a többihez viszont külső segítség kellett. Ez egyrészt a másik forradalmár, az európai Gaia űrtávcső által gyűjtött távolságadatokat jelentette, másrészt egy nagy, több, mint ezer Kepler csillagra kiterjedő spektroszkópiai felmérést a Keck óriástávcsővel (Petigura et al., 2017). És ezzel a bolygók eloszlása egyszerre világosan kirajzolódott (9. ábra). Ahol eddig a szuperföld-minineptunusz régió terült el, hirtelen két külön csoportosulás jelent meg, egy szinte üres réssel közöttük, a kb. 1,5-2,5 földszugár mérettartományban: a párolgási völgy (10. ábra). Elméleti számítások már sejtették, hogy egy csillagához közel kialakuló bolygó vagy elég nagy lesz, hogy képes legyen megtartani a vastag gázburkot, amivel kialakult, vagy elveszti az egészet. Ha egy kicsit is kisebb a kritikus értéknél, az egész hamar el tud párologni, hátrahagyva a puszta kőzetmagot. (A kritikus méret függ attól is, milyen messze van a bolygó a csillagtól, ezért nem teljesen üres a völgy a 10. ábrán.) Úgy tűnik, valóban így működik a bolygófejlődés a csillagokhoz közel (Fulton et al., 2017; Van Eylen et al., 2018).



9. ábra. Exobolygótípusok. (Forrás: NASA Ames)

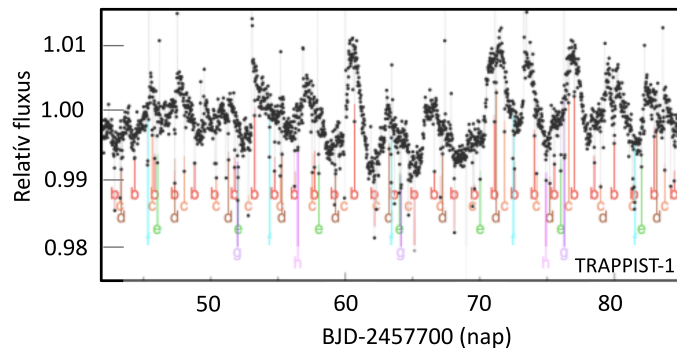
A bolygófejlődés más szakaszait is megfigyelte a Kepler. Forró Jupitereknek már korábban is megfigyelték, hogy a csillag hője és csillagszele hatására üstökösszerű csóva formájában párologni tud a bolygó légköre. A Kepler azt is felfedezte, hogy kőzetbolygók is el tudnak párologni. A nagyon szorosan keringő lávabolygók csillag felé forduló oldalát megolvadt kőzet borítja, ami extrém esetben maga is gázzá tud alakulni. A Kepler-1520b nevű, aprócska, a Marsnál is kisebb bolygó felszínét 2000 fok fölé hevíti a csillaga, és az ettől elpárolgó láva rengeteg hidegebb porszemet is magával ragad. A Kepler valójában nem is a bolygót magát látta, hanem a belőle kinyúló, vastag porcsóva okozta fedéseket. A modellszámítások alapján a bolygó már a végét járja, és nagyon gyorsan fogy az anyaga: alig néhány százmillió éven belül teljesen elenyészik majd (Rappaport et al., 2012).



10. ábra. Közeli exobolygók méreteloszlása. (Forrás: NASA Ames)

A Kepler első életének végével aztán búcsút kellett mondani a több évnnyi megfigyelési idő előnyeinek, de a K2 küldetés másfajta lehetőségekkel kárpótolta a csillagászokat. A látómezők váltakozásával célpontba kerültek például közeli csillagok, legyenek akár fényes égitestek, vagy kicsi vörös törpék, amelyekkel tele a Tejútrendszer, de halványságuk miatt nehezen megfigyelhetők. Ezek a közeli csillagok kiváló első célpontokat fognak jelenteni a James Webb űrtávcső számára is, például a bolygók színképének vizsgálatához. A vörös törpékre egy jó példa a TRAPPIST-1 rendszer: ez a csillag mindössze 40 fényévre van tőlünk, de 2015-ig fogalmunk sem volt róla, hogy egy hét bolygós rendszer rejtőzik a Nap közelében. Ennél a csillagnál a K2 méréseivel lehetett meghatározni a legkülső, hetedik bolygó keringési periódusát, és igazolni, hogy összetett rezonancia-láncok kapcsolják össze mind a hét bolygó

mozgását (11. ábra). De ugyanígy a K2 fénygörbe mutatta meg azt is, hogy a csillag, más hideg vörös törpékhez hasonlóan, nagyon erős flereket dobál ki magából, ami kifejezetten rossz hír a bolygói és azok légkörei számára – ha egyáltalán van még nekik (Luger et al. 2017; Vida et al., 2017).



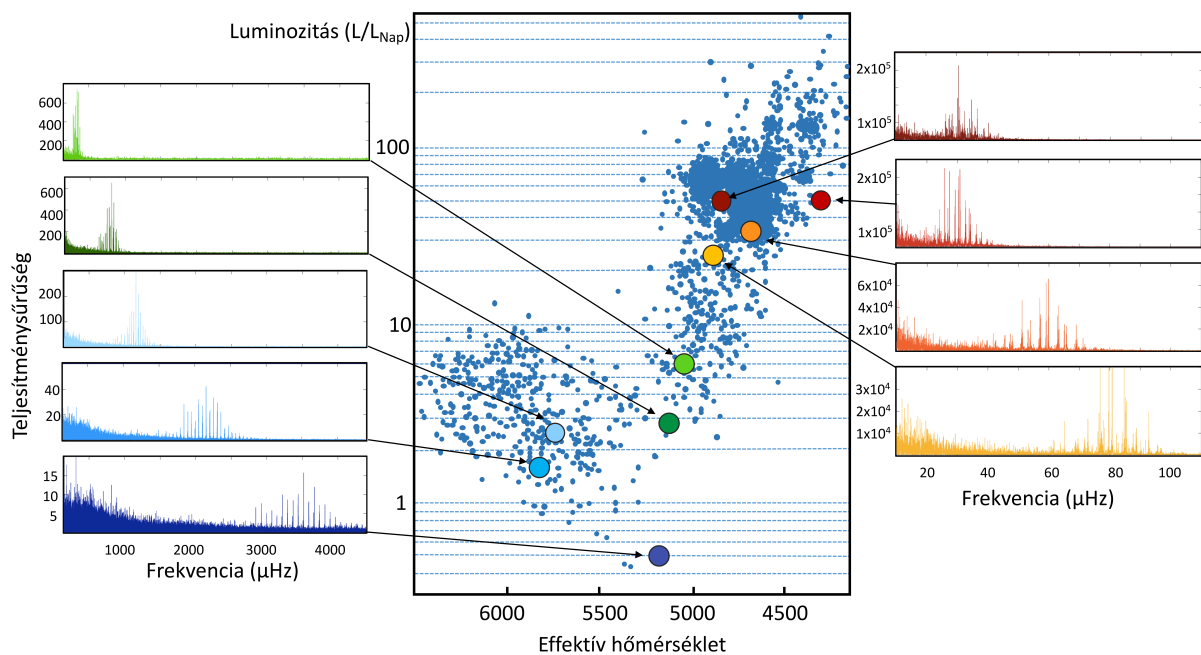
11. ábra. A TRAPPIST-1 csillag fénygörbéjének részlete.
(Forrás: Luger et al. (2017))

aktívabbak, mint a már többmilliárd éves „felnőttek”, így fedéseket is nehezebb azonosítani a fényváltozásaik közepette. A legifjabb bolygót a Skorpió csillagkeletkezési területein sikerült megtalálni, ahol mindössze 11 millió évesek a csillagok (Mann et al., 2016). A néhány százmillió éves nyílthalmazokban is feltűnt néhány exobolygó, de érdekes módon a Fiastyúkban például pont nem sikerült még felfedezni egyet sem a K2-vel. A fiatal bolygók közül pedig több is szokatlanul nagy méretűnek bizonyult: ez talán jelentheti azt is, hogy a csillag erős sugárzása felpuffasztotta a légkörüket, és éppen a kezdődő vagy már folyamatban lévő elpárolgást látjuk éppen (Rizzuto et al., 2018).

Csillagrezgések – a csendes forradalom

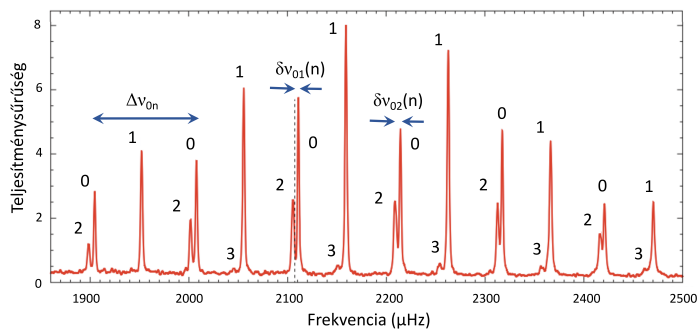
Az exobolygók keresése mellett a Kepler másik fő feladata a Naphoz hasonló, illetve öregebb, vörös óriáscsillagok fényváltozásainak megfigyelése volt. Ezek a csillagok a jelentős, felszínhez közeli konvektív réteg miatt nem pulzálnak, de a konvektív mozgások miatt csillapodó oszcillációk folyamatosan gerjesztődnek és halnak el bennük. A rezgések tanulmányozásával következtethetünk a csillag fizikai paramétereire és a belső szerkezetére is. Mivel ezek a rezgések kicsiny amplitúdóval jelentkeznek, csupán néhány tizedred-milliomod résznyi fényességváltozás okozva, több hónapos nagy pontosságú adatra van szükség a vizsgálatukhoz. A francia vezetésű CoRoT űrtávcső volt az első, amely képes volt ezeket a gyenge jeleket észlelni több mint ezer vörös óriás típusú csillagban (Hekker et al. 2009). A Kepler űrtávcső viszont több tízezernyi vörös óriással és több száz fősorozati csillaggal bővítette a gyűjteményt. A fősorozati, vagyis a magjukban hidrogént égető csillagok esetében a nap-típusú rezgések csupán néhány percesek. Ahogy tovább fejlődnek, először a szubóriás, aztán a vörösóriás-ág felé, az oszcillációk egyre hosszabb periódusúak és egyre erősebbek lesznek (12. ábra). Ezek a rezgések akusztikus hullámok, amelyek sugárirányban és arra merőleges irányban is képesek haladni. A csillagon kialakuló mintázatokat gömbfüggvényekkel lehet leírni. Az egyre magasabb rendű gömbfüggvények egyre több egymás melletti, ellentétesen változó szeletre osztják a csillag felszínét, a látott fényváltozás viszont ezek összegéből adódik. A geometriai kioltás miatt csak a legalacsonyabb rendű oszcillációkat lehet távolról megfigyelni (Chaplin & Miglio, 2014).

Egy további, nagyon fontos újítása a K2 programnak az eredeti Kepler-mezőhöz képest, hogy megfigyel egészen fiatal csillagokat is. Az Eklíptika mentén olyan jól ismert nyílthalmazok is a távcső látómezejébe kerültek, mint a Fiastyúk, a Hyadok, vagy a Jászolthalmaz. Ilyen, fiatal, ismert korú területek megfigyelésével nyomon lehet követni, hogyan változnak maguk az exobolygók is a korrall. Legalábbis, ha sikerül őket felfedezni: a fiatal csillagok ugyanis sokkal



12. ábra. Nap-típusú oszcilláció különböző fejlődési állapot szerint. (Forrás: Chaplin & Miglio (2013))

A nap-típusú oszcillációk fő jellegzetessége, hogy az egyes módusok a frekvenciaspektrumban sajátos, ismétlődő sorozatot alkotnak, a sorozat tulajdonságaiból pedig meg lehet becsülni a csillag fizikai paramétereit. Az egymás utáni felhangok közötti, úgynevezett nagy frekvenciaszeparációból tudunk következtetni a csillag sűrűségére (13. ábra). A rezgések erőssége közel gaussi eloszlást mutat: az eloszlás csúcsát jelentő frekvencia a felszíni hőmérséklet és gravitáció függvénye. A különböző felszíni rendű módusok közötti kis szeparációk viszont a csillag korával vannak összefüggésben. Így, kellően pontos fényességmérések segítségével pontosan meg tudjuk határozni, milyen csillaggal van dolgunk, anélkül, hogy színeképre támaszkodnánk, sőt, akár jóval pontosabban is, mint amire színeképek lehetőséget adnának. A Kepler-nél ezeknek az asztroszeizmológiai vizsgálatoknak az egyik legfontosabb alkalmazási területe az exobolygók anyacsillagai tulajdonságainak meghatározása volt, mert ezekből válik lehetővé nagyon pontos bolygó-paraméterek származtatása is. A Kepler-444 csillagról, és így a bolygóról is kiderült, hogy elképesztően öregek, már 11 milliárd évesek, tehát még az Univerzum fiatal korában születtek. A Kepler-93b esetében is nagy szerepe volt az asztroszeizmológiának abban, hogy a bolygó sugarát 1% pontossággal lehetett meghatározni: ez abszolút skálán mindössze 120 km-es hibahatárt jelent egy több, mint 300 fényévre lévő égitestnél. Sőt, az asztroszeizmológia mentette meg a Kepler legelső exobolygó-jelöltjét is. A Kepler-1658b volt a negyedik azonosított, de első, már az űrtávcső által felfedezett jelölt a látómezőben. Aztán viszont a furcsaságai miatt többször is hamis pozitívnak lett minősítve. Végül a négy évnyi adat összesítése tette lehetővé, hogy a csillaga rezgéseit is észlelni lehessen. Ezekből derült ki, hogy nem is Naphoz hasonló, fősorozati csillaggal van dolgunk, ahogy azt korábban feltételezték, hanem egy szubóriással, ami éppen puffad fel, úton a vörös óriás állapot felé. Így már világos lett, miért is olyan furcsa ez a rendszer, illetve egyike lett

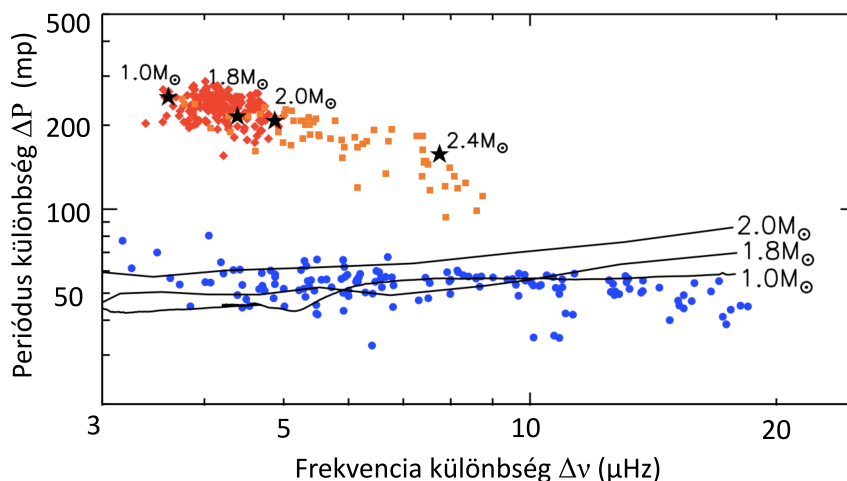


13. ábra. Egy G színképtípusú fősorozati csillag, a 16 Cyg A oszcillációs Spektruma. (Forrás: Chaplin & Miglio (2013))

a kevés ismert szubóriásnak, amiről tudjuk, hogy bolygóval rendelkezik (Campante et al., 2015, Ballard et al., 2014, Chontos et al., 2019).

De az asztroszeizmológia nem csak az exobolygók miatt, hanem saját jogán is nagyon fontos területté vált. A Tejútrendszer számos részét átvizsgáló K2 misszió kezdetével nyílt meg a lehetőség például a galaktikus régészeti műfaja előtt. Azzal ugyanis, hogy hirtelen csillagok tízezreiről állt rendelkezésre pontos kor, tömeg, fejlődési állapot és kémiai összetételi információ is, lehetővé vált, hogy a galaxisunk építőköveit, és azok múltját is feltérképezzük. A Kepler adataiból sikerült például közvetlenül is kimutatni, hogy a Tejútrendszer korongjában a fősíkban vannak a legfiatalabb csillagok, és a korongra merőlegesen távolodva egyre öregebb égitesteket találunk (Casagrande et al., 2016). Sőt, a rezgések megfigyelésével megnyílt az út nem csak a csillagok fő paraméterei, de a belső felépítésük vizsgálata felé is. A különböző módusok eltérő mélységig hatolnak be a csillagba, és így felhasználhatók arra, hogy szinte szeletenként vizsgálhassuk azokat. Amikor a hanghullámok áthaladnak egy éles határon, például a konvektív zóna alsó határán a csillagban, az kissé elhangolja őket. Így, a felszínre kierő rezgések szabálytalanságain keresztül közvetlenül lehet tesztelni, valójában mennyire pontosan is írják le a modelljeink a csillagok felépítését. De ugyanígy, mivel a forgás is nyomot hagy a rezgésekben, a mélységi információon keresztül még azt is ki lehet deríteni, milyen gyorsan forog a csillag belseje a felszínhez képest.

A vörös óriások belsejét még ennél is alaposabban fel lehetett térképezni. A felszínen megfigyelt hanghullámok ugyanis főleg a csillag külsőbb rétegeiről szállítanak információt, a magról magáról hallgatnak. Vannak viszont a csillagokban másfajta rezgések is: nehézségi hullámok. Ezek hasonlóak a víz hullámokhoz, ahol a nyomás helyett a gravitáció visszatérítő ereje működik. A fősorozati csillagokban ezek be vannak zárva a magba, de vörös óriásoknál már csatlódnak a kinti hanghullámokhoz. Az ilyen, belül inkább nehézségi, kívül inkább akusztikus hullámok a kevert módusok. Segítségükkel sikerült például először szétválasztani a vörös óriások két családját (14. ábra), a fiatalabb, csak az inaktív mag körüli héjban hidrogént égető csillagokat, és az idősebbeket, ahol már annyira összetömörödött a mag, hogy a hélium fúziója is be tudott indulni (Bedding et al., 2011). Ez a két állapot kívülről szinte ugyanúgy néz ki, ami eddig szinte lehetetlenné tette, hogy a két különböző fejlődési állapotban lévő csillagokat megkülönböztethessük. A csillagmag közvetlen vizsgálata egy másik alapvető



14. ábra. Hélium-mag égető és hidrogén-héj égető vörös óriások. (Forrás: Bedding et al. (2011))

csillagfejlődési kérdés megválaszolásához is közelebb vihet. Ahogy a csillagok öregednek, a magjuk egyre jobban összehúzóódik, egészen a fehér törpe állapotig. Ahogy csökken a méretük, a forgásuknak nagyon fel kéne gyorsulnia a perdületmegmaradás törvénye miatt, a klasszikus pörgő jégtáncos hasonlatnak megfelelően. Csakhogy amikor végre szabaddá válnak, pusztá

fehér törpeként, azok a vártnál jóval lassabban forognak. Az asztroszeizmológia lehetővé teszi számunkra, hogy nyomon kövessük, hogyan változik a mag forgási sebessége a vörös óriásokban, és így segíthet megtalálni azokat a fizikai folyamatokat is, amik el tudják szállítani a perdület nagy részét a magból.

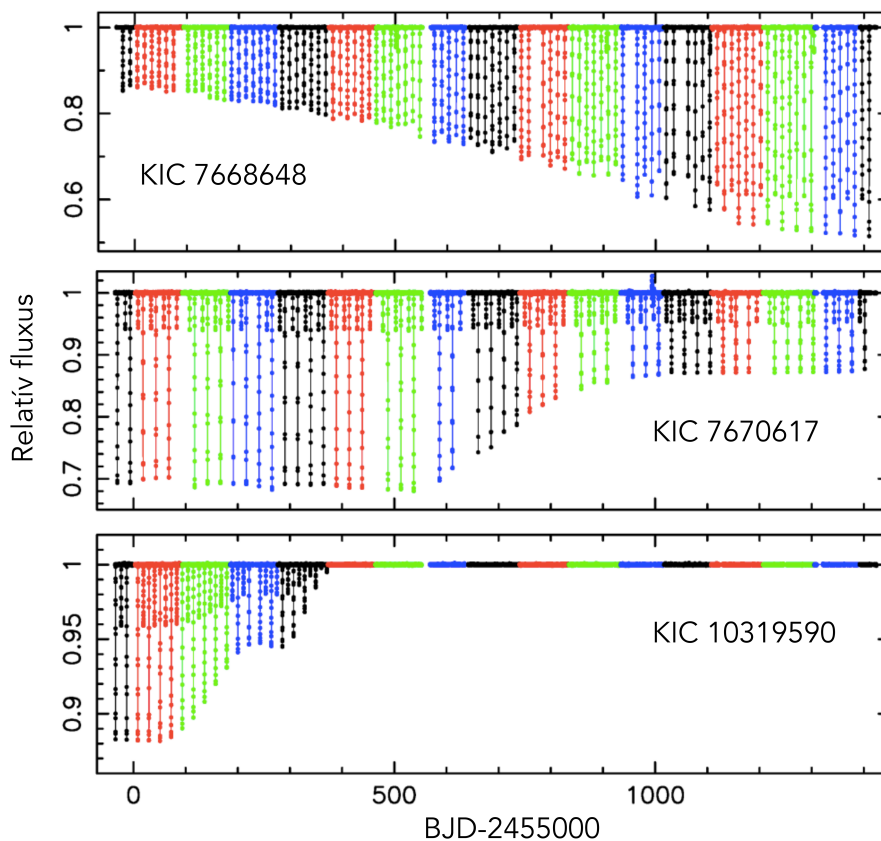
Az asztroszeizmológia eszköztára nem korlátozódik a Naphoz hasonló csillagokra és a vörös óriásokra. A fősorozat mentén további, nagyobb tömegű és hőmérsékletű csillagokban is felfedezhetők oszcillációk és pulzáció is. A legforróbb csillagok esetén a belső szerkezet és folyamatok megismerése és modellezése kulcsfontosságú, mivel ezeknél a csillagoknál nem a külső burookban, hanem a középben a magban áramlik körbe a csillag anyaga. Emiatt, amíg nem tudjuk megmondani, pontosan hogyan működik ott a konvekció, mennyire hatékonyan keveredik be például hidrogén friss üzemanyagként a magba a felette lévő rétegekből, még azt sem tudjuk pontosan megmondani, milyen hosszú lesz ezeknek a csillagoknak az élete. A Kepler itt hátrányban volt, az eredeti látómezőben szinte nem is voltak fiatal, forró O-B színek típusú óriáscsillagok, és a K2 látómezők sem hemzsegttek bennük. Ezen a területen inkább majd a TESS űrtávcső hozhatja el az áttörést. Egy színekposztállal lejjebb viszont, az A-F csillagok területén hatalmas előrelépést sikerült elérni. Ebben a régióban vannak a δ Scuti, illetve γ Doradus típusú változócsillagok, de a Kepler bizonyította, hogy itt sokkal összetettebb a kép. A változócsillagok nagy részéről kiderült, hogy valójában hibrid pulzátorok, vagyis egyszerre jelennek meg bennük a δ Scuti csillagokra jellemző, hanghullámokból álló pulzáció és a γ Doradusokra jellemző, nehézségi hullámok okozta fényváltozás (Uytterhoeven et al., 2011). Elméletileg tehát ezeknél a csillagoknál ugyanúgy fel lehet térképezni a köpenyt és magot is, mint a vörös óriásoknál, de a gyakorlatban ez nehezebbnek bizonyult, mert a pulzáció miatt nagyon eltérő lehet egy-egy módus amplitúdója, bonyolítva az észlelt frekvenciák megfelelő módusokhoz rendelését. Sőt, az azonosítást tovább bonyolította, hogy egy harmadik oszcilláció-típust is felfedeztek számos A-F csillag fényváltozásaiban. Ezek a Rossby-módusok akkor tudnak kialakulni, ha a csillag elég gyorsan forog, és a Coriolis-erő maga is felléphet, mint visszatérítő erő (Saio et al., 2018). A modellszámítások pedig azt sejtetik, hogy ezek az oszcillációk lehetnek az egyik folyamat, amely a mag perdületét átviszi a csillag külső rétegeibe. És ez egy szép példa a Kepler kínálta szinergiákra, ahol egy csillagtípus problémájára akár megoldást is kínálhat egy másik típusban tett felfedezés.

Kettőscsillagok és szívdobbanások

A kettőscsillagok tanulmányozása elengedhetetlen az exobolygók szempontjából is, mert a protoplanetáris diszk méretét a kísérőcsillag korlátozza, ezért befolyással bír arra milyen bolygók alakulhatnak ki, és hol. Emellett a kísérő jelenléte a pályaparaméterek időbeli fejlődésére is hatással van, például a pályasíkok elfordulásán és bolygók migrációján keresztül. A kettőscsillagok ugyanakkor hamis pozitív találatokat is jelenthetnek az exobolygók felfedezésében. A 4x4 ívmásodperces pixelméret következtében nem ritka, hogy több csillag fénye is bekerül a fénygömbébe, ez pedig lecsökkenti a fedés mélységét, amelyből az keringő égitest méretére következtetnek. A kísérőcsillag jelenlétét nagyfelbontású földi észlelésekkel próbálják kimutatni. Az exobolygó-jelölteket tartalmazó Kepler Object of Interest (KOI) katalógus nagy részéről már bebizonyosodott közeli csillag jelenléte a fotometriában. Azonban ez a csillag nem feltétlenül tartozik fizikailag a rendszerhez, egyszerű háttércsillag is lehet. Ha valódi kettős rendszerről van szó, feltételezhetjük, hogy egy felhőből születtek, tehát a koruk azonos. Ebben az esetben azonos izokrón (egyidejű) görbén kell tartózkodniuk a Hertzsprung-Russell diagramon, amely színméresekkel ellenőrizhető. Így kiderült, hogy a 2 ívmásodpercnél kisebb szeparációjú csillagok több mint fele fizikailag kötött, 1 ívmásodpercnél pedig a valószínűség már 80% felett van. A fizikai kettősök nagy

bizonytalanságot jelent az exobolygó méretmeghatározásában is. Feltéve, hogy a bolygó egyenlő valószínűséggel kering a fényesebb vagy halványabb tag körül, előfordulhat, hogy jelentősen, akár 50 százalékkal alábecsüljük a bolygó méretét (Hirsch et al., 2017). A fizikai kettősök periódusa igen hosszú, akár ezer év is lehet, túl hosszú, hogy a relatív mozgást ki tudjuk mutatni. Azonban a kettősség felfedhető a sajátmozgások vizsgálatával is, ha ugyanúgy haladnak az égen, jó eséllyel egyenlő távolságra vannak tőlünk. Megbízható sajátmozgás adatokat most már a Gaia DR2 katalógus is tartalmaz, de földi radiálissebesség-mérési adatokra is támaszkodhatunk (Wittrock et al. 2016).

Az eredeti Kepler látómezőben eddig már közel háromezer fedési kettős rendszert azonosítottak. Bár a kettősök nagy része „sima” fedési kettős volt, igazán különleges fényességváltozások nélkül, a négy év hosszú adatokat így is alaposan ki lehetett aknázni. A fedések időpontjainak változásából a kettősök kb. 9%-ról lehetett kimutatni, hogy valójában hármas rendszerek tagjai. Ezek közel háromnegyedénél csak a térbeli mozgásuk okozta időeltérések látszóttak, de a maradéknál dinamikai hatások is kimutathatók voltak, ahogy a csillagok árapályereje valós időben változtatták egymás pályáit. A pályasíkok elfordulását más módon is látni lehetett a Keplerrel, például a fedésmélységek változásán keresztül (15. ábra): egy csillagrendszer esetében ez konkrétan a fedések eltűnését okozta az évek során (Kirk et al., 2016; Borkovits et al., 2016).

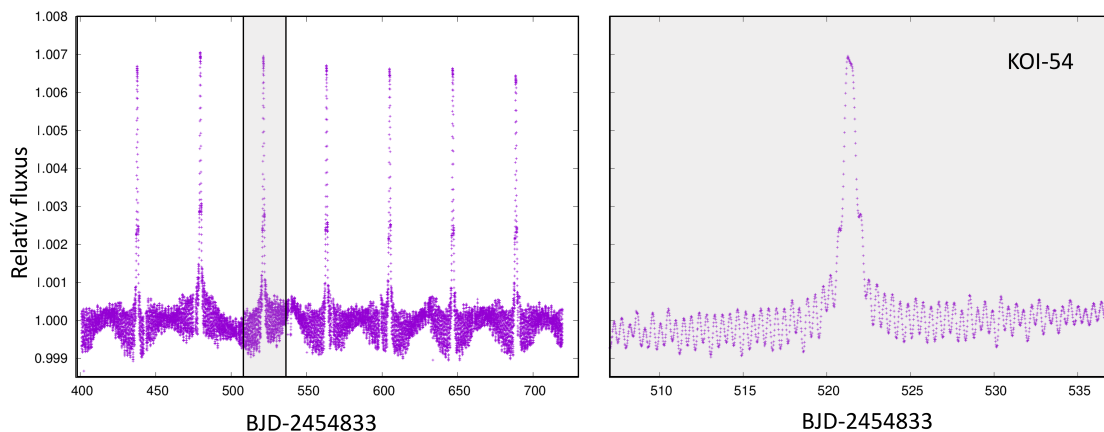


15. ábra. Változó mélységű fedések hármas csillagrendszerekben. (Forrás: Orosz (2015))

De találtak olyan speciális kettősöket is, ahol még relativisztikus effektusokat is sikerült felfedezni. Az általános relativitás szerint ugyanis a felénk közeledő tárgyak a relativisztikus Doppler-nyalábolás miatt fényesebbnek tűnnek, a tőlünk távolodók pedig halványabbnak, mintha állnának. A Kepler több rendszernél, például a KOI-74 esetében is kimutatta a Doppler-nyalábolás hatását a fénygörbére. Mivel ez a jelenség a látóirányú

sebesség függvénye, a megfigyelése lehetőséget ad arra is, hogy a csillag radiális sebességét meghatározzuk anélkül, hogy egyetlen színeképet is rögzítenénk róla (Bloemen et al., 2012).

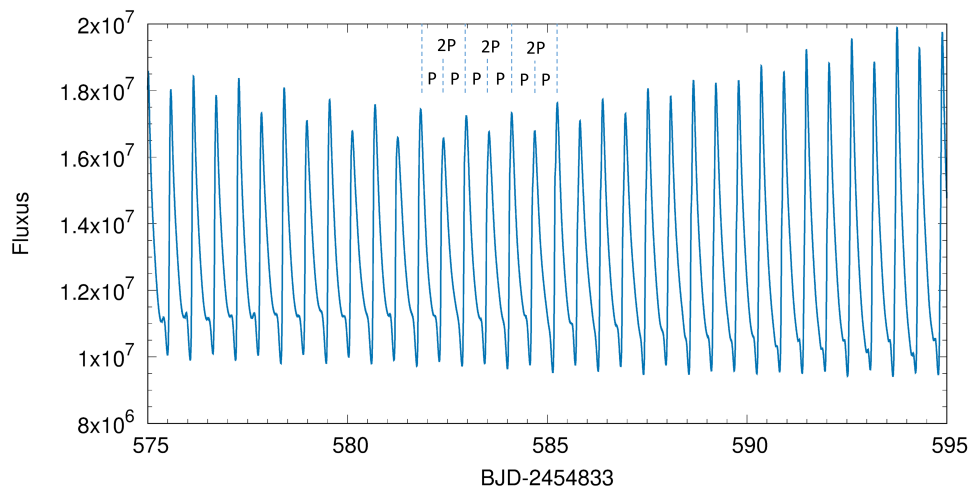
A kettősök egy másik extrém csoportja a szívdobbanás-csillag nevet kapta, mivel a fénygörbe nem fedéseket mutatott, hanem EKG-görbére hasonlító fel-le ugrásokat (16. ábra). Hamar kiderült, hogy ezek a rendszerek nagyon excentrikus pályán keringő csillagok, és amikor a két csillag nagyon megközelíti egymást, felfűtik egymás felszínét, rövid időre fényesebbé téve az egész rendszert. Egy másik érdekessége ezeknek a rendszereknek, hogy a hatalmas, és gyorsan változó árapályerő időszakos oszcillációkat is gerjeszt a csillagokban. Az árapály-oszcillációk különböznek a szokványos nap-típusú oszcillációktól: csak olyan rezgések gerjesztődnek így, amelyek periódusai rezonanciában vannak a keringés periódusaival. Az arányszám egészen magas is lehet: a KOI-54 rendszer esetében például pontosan 90 és 91 rezgési ciklus fér egy keringésbe. A különböző rezgések viszonya még nem teljesen tisztázott. Kettős-tag δ Scuti csillagokban az árapály-rezgéseket a pulzációval párhuzamosan is meg lehet figyelni. Vörös óriások esetében viszont úgy tűnik, hogy az árapály-erők elfojtják a nap-típusú oszcillációkat. A HD 181068 jelű csillagrendszerben például a központi vörös óriás egyáltalán nem mutatta a szokásos, fésűszerű mintázatot a frekvenciaspektrumban, hanem csak a körülötte keringő vörös törpe pár periódusával rezonáns jeleket lehetett benne azonosítani (Thompson et al., 2012; Derekas et al., 2011).



16. ábra. A KOI-54 szívdobbanás csillag fénygörbéje. (Forrás: Molnár et al. (2016))

RR Lyrae és cefeida csillagok

Az RR Lyrae csillagok legizgalmasabb rejtélyét már több mint száz éve a Blazskó moduláció, a pulzációs amplitúdó és fázis kváziperiodikus változása jelenti. A Kepler űrtávcső ultrapontos, folyamatos adataiból azonban egy érdekes új jelenséget, perióduskettőződést sikerült kimutatni (Szabó et al., 2010). Ez váltakozó, kis és nagy pulzációs amplitúdójú ciklusok képében jelenik meg a fénygörbén, és fél-egészes, úgynevezett szubharmonikus csúcsokkal a frekvenciaspektrumban (17. ábra). A földfelszínről ezt szinte lehetetlen észrevenni, hiszen az RR Lyrae csillagok nagyjából fél napos periódussal pulzálnak, így éjszakánként csak minden második ciklust látjuk. Maga a jelenség a kaoszelmélet körébe tartozik: a nemlineáris dinamikai rendszerek képesek bizonyos paraméterek fennállása esetén az egyperiódusú állapotból kétperiódusú állapotba kerülni. Ezt a rendszer destabilizációja okozza, amiért pedig rezonanciák tehetők felelőssé. Csillagmodellekből ki lehetett mutatni, hogy az RR Lyraeknél egy felszín közelébe befogott módus, a kilencedik felhang léphet



17. ábra. Perióduskettőződés az RR Lyr csillagban.

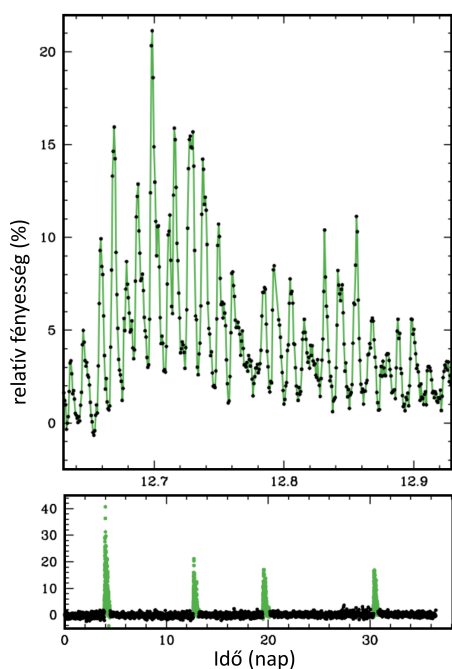
rezonanciába az alaplómódussal. A perióduskettőződést csak a Blazskó csillagok mutatják, így feltételezhető, hogy a két jelenségnek köze van egymáshoz (Kolláth et al., 2011).

De nem a kilencedik felhang volt az egyetlen, ami feltűnt ezekben a korábban nagyon egyszerűnek tartott csillagokban. A Keplerrel azonban megvolt a pontosság ahhoz, hogy kis amplitúdójú, millimagnitúdós további pulzációs módusokat is detektálni lehessen. Sok célpont megfigyeléséből pedig a minták is kezdtek kirajzolódni. Az alaplómódusú csillagokban kis amplitúdóval megjelenhet az első felhang és a második felhang, és még egyéb módusok amelyek eredete még nem tisztázott. A felhangban, illetve mindkét fő módusban pulzáló csillagoknál ellenben csakis nemradiális módusok mutathatók ki, amelyek nagyon erősen kötődnek az első felhanghoz. Olyan erősen, hogy az OGLE felmérés földi adataiban felhangú RR Lyrae és cefeida csillagoknál is sikerült ugyanezeket kimutatni (Moskalik 2014).

Cefeidákban viszont nem bővelkedett a Kepler eredeti látómezeje. Az egy szál klasszikus cefeidában sikerült kimutatni kismértékű változásokat a pulzációs ciklusok között, illetve gyenge moduláció és granulációs zaj jelenlétét is (Derekas et al., 2017), az egy szál II. típusú cefeidában pedig azt, hogy a pulzáció leírható kaotikus jelként (Plachy et al., 2018). De az igazán változatos csillagok még a K2 adatok között rejtőznek: a második misszió több tucat cefeidát és több, mint négyezer RR Lyrae csillagot figyelt meg, utóbbi esetben megszázsorozva a vizsgálható célpontok számát. Ráadásul az űrtávcső fénygyűjtő képessége azt is jelentette, hogy a leghalványabb, még éppen kimutatható célpontok már nem is Tejútrendszerben találhatóak, hanem olyan szomszédos törpegalaxisokban, mint a Leo IV vagy az IC 1613 (Molnár et al., 2015).

Fehér törpék

A csillagok 95 százaléka fehér törpeként fejezi be életét. A pulzáló fehér törpéket a hatvanas évekbeli felfedezésük óta aktívan tanulmányozzák, a Keplerrel viszont egy teljesen új jelenséget sikerült felfedezni bennük. A nagy amplitúdójú kitörések alatt a csillag pulzációjának erőssége hirtelen többszörösére ugrik, és az átlagos fényessége is megemelkedik (Bell et al. 2015). Ez a felfedezés szintén az adatok hosszának és folyamatosságának köszönhető. A kitöréseket több hidrogén légkörrel rendelkező, DAV típusú pulzáló fehér törpében is azonosították. Hosszuk jellemzően több óra, hosszabbak mint a perces időskálán zajló pulzáció, és néhány naponta-hetente jelennek meg, de nem szigorúan periodikusan (18. ábra). A jelenség elméleti magyarázata még nincsen meg, de gyanítható



18. ábra. Pulzáló fehér törpe kitörések
(Forrás: Hermes et al. (2015))

hogy a pulzációhoz kapcsolódik (Hermes et al., 2015). Az amplitúdók ilyen drasztikus, 10-20-szoros növekedésére a rezonáns móduscsatolódás adhat magyarázatot. A kitöréseket egyébként a leghosszabb periódusú, hidegebb DAV csillagoknál találták, amelyek szabálytalanabb pulzációt mutatnak, mint rövidebb periódusú, forróbb társaik. A szabálytalanságokat szintén magyarázhatja a módusok kölcsönhatása.

A Kepler adatokból olyan érdekességek is előbukkannak, mint a „kannibál fehér törpe”, a csillag, amely éppen darabokra zúzza és felfalja kisbolygóját. A WD1145+0.17 jelű csillag 4.5 óránként asszimétrikus alakú fedéseket mutatott, amely arra utalt, hogy az áthaladó égitest egy csóvát húz maga után. Mivel maga fehér törpe is nagyon kicsi égitest, a fedéseket egy éppen darabokra hulló kisbolygó kell, hogy okozza. Egyébként ez az első bolygószerű égitest, amelyet fehér törpe körül találtak. A fehér törpe színképeének nehézelem-tartalma pedig arra utal, hogy a körülötte lévő törmelékgyűrűből az anyag végül a felszínére áramlik (Vanderburg et al. 2015). Valójában már évtizedekkel ezelőtt is megfigyeltek fémvonalakat fehér

törpék színképeiben. Mint utólag kiderült, valójában ezek voltak az első megfigyelési bizonyítékok csillagok körüli bolygók léteire, csak éppen akkor még ezt senki nem tudta volna bizonyítani.

Ciklusok, halmazok és a girokronológia tudománya

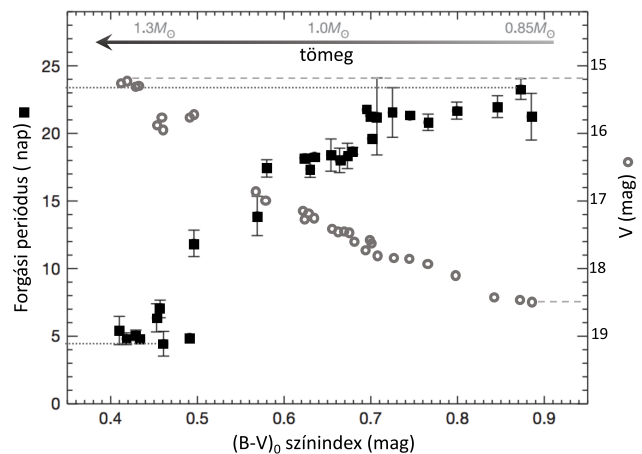
Fényváltozások nem csak pulzáció, oszcillációk vagy kísérők jelenléte miatt alakulhatnak ki csillagokon, hanem pusztán amiatt is, hogy nem tökéletesen homogén a felszínük. Ahogy forognak, a különböző fényességű foltok ki- és befordulnak az általunk látott félgömbre, vagy pedig flerek tűnnek fel rajtuk. A csillagfoltok és flerek keletkezését a mágneses tér fejlődése irányítja. Fotometriai mérésekkel a csillag forgási periódusát már viszonylag rövid távon meg lehet határozni: az eredeti látómezőn több, több tízezer fősorozati csillagra sikerült ilyen adatot kinyerni. A csillagok, különösen a hűvösebb csillagok forgási periódusa szorosan összefügg a korukkal, mivel a csillagszél okozta mágneses fékeződés miatt folyamatosan lassulnak. Vagyis, ha meg tudjuk mérni a forgási periódust, meg tudjuk mondani a kort: ezzel foglalkozik a girokronológia tudománya. Ezért nagy meglepetést okozott, hogy a Keplerrel kimért periódusok a Napnál kisebb és hidegebb csillagoknál egyértelműen két csoportra oszlottak. Vajon mitől? Mégsem ilyen egyszerű a kép, és egy adott kornál hirtelen mind lelassultak? Vagy a csillagkeletkezés üteme nem volt egyenletes? Ezek már olyan kérdések voltak, amiket a Kepler önmagában nem tudott megválaszolni. A Gaia távolság- és sebességadataival együtt viszont világossá vált, hogy a Nap környezetében lévő csillagok jelentős része a csillagkeletkezés közelmúltbeli fellángolása alatt jött létre feltehetően úgy 600 millió évvel ezelőtt. Emiatt alkotnak ezek a fiatal csillagok felismerhető csoportosulást a gyorsabban forgó szekcióban (McQuillan et al., 2014; Davenport & Covey, 2018).

Csillaghalmazok vizsgálatával pedig még átfogóbb betekintést nyerhetünk a csillagkeletkezés és –fejlődés rejtelseibe, mivel egy egész kupac, azonos korú csillagot tudunk megvizsgálni egyszerre. A Kepler űrtávcső összesen 29 halmazt figyelt meg: kettő egymillió évnél fiatalabb csillagkeletkezési területet, 18 nyílthalmazt, amelynek kora 1 millió és 8 milliárd év közé tehető, és 9 darab, 11 milliárd évnél is idősebb gömbhalmazt (Cody et al., 2018). Eddig girokronológiai eredményeket csak 1 milliárd évesnél fiatalabb halmazokra sikerült elérni, a Keplerrel viszont egy 2,5 milliárd éves halmazra, az NGC 6819-re is meg lehetett határozni a forgási periódusokat, kitöltve az űrt 4.5 milliárd éves Napunk és a fiatal csillagok között. Egészen egyértelművé vált, hogy egy adott korú halmazban a csillagok forgása tömegfüggő is (19. ábra). A forgás és tömeg egyidejű illesztése tehát lehetőséget ad, hogy 10 százalékos pontossággal meghatározzuk a hideg fősorozati csillagok életkorát a teljes Galaxisban (Mieboom et al. 2015).

Egy másik érdekes kérdés, hogy vajon a csillaghalmazok meg tudják-e őrizni szülő molekulafelhőjük forgási tulajdonságait, vagy esetleg a fragmentáció során fellépő turbulens mozgások miatt teljesen elvesztik azt. Korábbi vizsgálatok, csillagfoltok mozgását és a spektrumvonalak forgás miatti kiszélesedését feltérképezve, véletlenszerű forgástengely-irányokat mutattak fiatal halmazokban. A Kepler viszont megmutatta, hogy a csillagok forgástengelyének térbeli viszonyai az asztroszeizmológia segítségével is meghatározható. Két idős nyílthalmaz vörös óriás csillagait vizsgálva kiderült, hogy 70 százalékuk közel egy irányba áll, vagyis megőrizték az eredeti molekulafelhő irányultságát. A forgásirány megőrzésében szerepet játszhatott az is, hogy ezek a nyílthalmazok viszonylag távol vannak a galaxis sűrű területeitől (Corsaro et al., 2017).

De visszatérve a csillagfoltokra: azok a csillag mágneses terének egyik, de nem egyetlen, jellegzetes megjelenési formája. A másik könnyen felismerhető mágneses jelenség a flerek, vagyis kitörések. Ilyenkor a kedvezőbb konfigurációba átködődő mágneses erővonalak hatalmas mennyiségű energiát tudnak felszabadítani. A flerek váratlanul bekövetkező, és gyorsan lecsengő jelenségek, így a pontos statisztikához a folytonos fotometria a tökéletes eszköz. Össze lehet például hasonlítani, hogy a kitörések mennyire kapcsolódnak térben a csillagfoltokhoz, vagyis a mágneses tér ugyanott kelti-e a két jelenséget. Érdekes módon bármilyen összefüggés csak a gyenge flerek és csillagfoltok pozíciója között adódott. Ez jelentheti azt, hogy az igazán nagy kitörések bármikor észlelhetőek, akkor is, ha nem a felénk forduló félgömbön történnek, míg a kisebbeket csak olyankor vesszük észre, ha felénk történnek – a foltokkal együtt (Roettenbacher & Vida, 2018).

Hosszabb adatokkal viszont további megfigyeléseket is lehet tenni, mivel a csillagok mágneses aktivitása gyakran aktivitási ciklusokba rendeződik. A Nap ciklusa nagyjából 11 év hosszú, túl hosszú ahhoz, hogy akár a Kepler képességei mellett is végig követhető legyen, ha kívülről figyelnénk meg. Ugyanakkor más csillagok rendelkezhetnek rövidebb, akár négy év alatt is kimutatható ciklusokkal. A Napon a mágneses fejlődés egyik megnyilvánulása a pillangó-diagram, vagyis, hogy a ciklus elejétől végéig a foltok egyre alacsonyabb



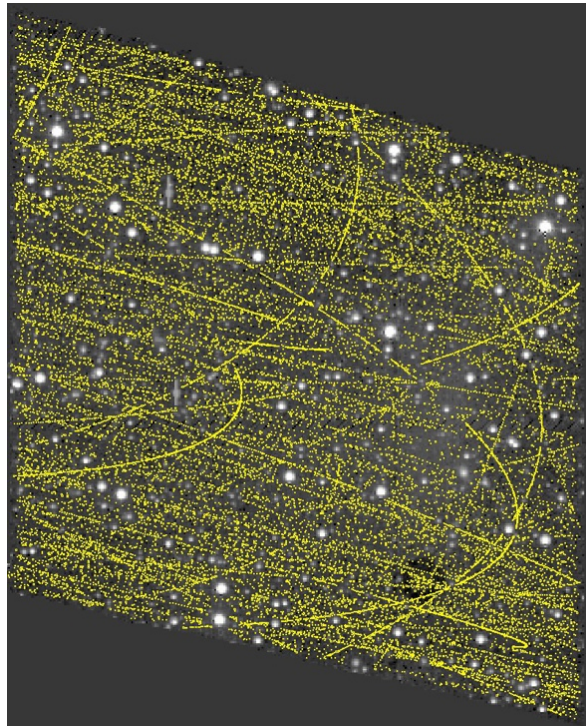
19. ábra. Forgási periódus és fényesség a tömeg függvényében. (Forrás: Meibom et al. (2015))

szélességeken jelennek meg: a pozícióik időben kirajzolva egy pillangó szárnyait rajzolják ki az egyenlítő körül. Miután a Nap, és más csillagok is differenciálisan rotálnak, a foltok által átélt forgási periódus változni fog, ahogy más-más sebességgel körbejáró szélességeken jelennek meg. Ezt a technikát, változást keresve a látott foltok periódusaiban, több tucat, gyorsan forgó foltos csillagra sikerült alkalmazni, 300-900 nap közötti ciklusokat felfedezve. De akár egy még egyszerűbb technikát is választhatunk. A foltok száma változik az aktivitási ciklus során, így a csillagok átlagos fényessége is változik lassan, és kis mértékben. Elméletileg elég lenne csak időről-időre megmérni nagyon pontosan, milyen fényesek a fősorozati csillagok, hogy ezt a változást detektáljuk, de ehhez hosszú távon is nagyon pontosan kalibrált mérésekre van szükség. A Kepler négy évnyi adatai tudják, ezt, és ami még jobb, valójában, némi kreativitással a látómező összes csillagára tudták. Az eredeti küldetés alatt havi rendszerességgel készített, teljes CCD-t lefedő felvételeket is ki lehet ugyanis fotometrálni. Az így előálló, csillagonkénti 52 adatpont meglehetősen kevés, de arra jó volt, hogy több száz, az űrtávcső által célzottan nem is mért csillagnál lehessen kimutatni lassú változásokat, és 28 esetben egyértelműen ciklikus változásokat is (Vida et al., 2014; Montet et al., 2017).

A Naprendszer

A K2 misszió egy nagy előnye volt, hogy megnyitotta az utat a Naprendszer síkjában található, változatosabb célpontok: kisbolygók, nagybolygók, holdak és üstökösök megfigyelése előtt (20. ábra). Több ötlet is született arra, hogy egy, mozgó objektumok mérésére sosem tervezett űrtávcső segítségével hogyan lehetne legjobban kiaknázni a folytonos és nagy pontosságú fotometria előnyeit a Naprendszer kutatása terén is. Az egyik érdekes felfedezés az (225088) 2007 OR10 nevű törpebolygóhoz kapcsolódott. A Kepler fénygörbe alapján sikerült meghatározni ennek a nagyon távoli, bőven a Plutón túl keringő égitestnek a forgási periódusát, a lassú forgás pedig arra utalt, hogy az OR10-et egy hold árapályereje lassítja (Kiss et al. 2017).

A Kepler eleinte csak a külső Naprendszert célozta meg, ahol az égitestek látszólagos mozgása lassú, és így viszonylag kevés aktív pixellel is hosszabb ideig lehet megfigyelni azokat. A Kuiper-öv több égitestjére, illetve beljebb, az óriásbolygók között keringő kentaurokra is sikerült meghatározni a forgási periódusokat. De holdakat is lehetett így kutatni, a Neptunusz Nereida nevű holdjáról például sikerült kimutatni, hogy nagyon durva a felülete, ami rengeteg mély kráter jelenlétét sejteti. De aztán közelebbi égitestek is terítékre kerültek, például a Jupiterrel együtt keringő trójai kisbolygók, sőt, főövié is. Mindegyik esetben kiderült, hogy a földi mérések bizony elfogultak a rövid, egy-két éjszakányi adatból meghatározható forgási periódusok felé, pedig némely kisbolygónak akár egy-két hétbe is kerülhet, amíg körbe fordul. (Kiss et al. 2016, Molnár et al. 2018., Szabó et al. 2017).

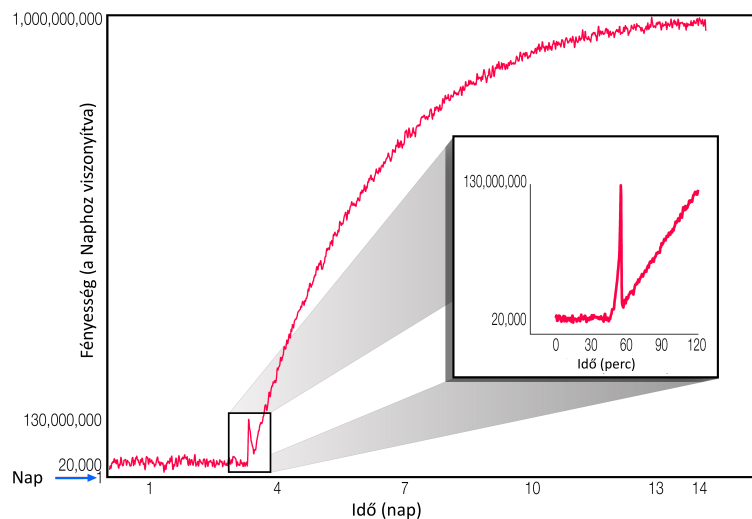


20. ábra. 600 kisbolygó pályája egy K2 mozaik képen.
(Forrás: Molnár et al. (2018))

Sőt, az kampányok során két óriásbolygót, az Uránuszt és a Neptunuszt is hosszabb ideig megfigyelt az űrtávcső. Hogy mi értelme egy gyenge felbontású távcsővel bolygókat nézegetni, amikor a Hubble például sokkal részletesebb képeket készít? Hát pont az, hogy a Kepler gyakorlatilag fénypontokként látta őket – pontosan úgy, ahogy egy másik bolygórendszer bolygóját, vagy egy barna törpét látunk. Ezek a mérések lehetővé tették, hogy a Neptunusz fénygörbéjét összehasonlítsák a részletes képekkel, és a fényváltozásokat felszíni formákhoz, felhősávokhoz és viharokhoz kapcsolják. Egy-egy ilyen gyakorlat nagyon fontos tesztet jelent bármilyen módszernek, amely fénygörbék alapján próbál meg egy barna törpe vagy óriás exobolygó felszíni viszonyaira következtetni.

Szupernóva-vadászat

A folyamatos, megszakítatlan fotometria előnyeit hamar felismerte egy további tudományos közösség is. A Kepler fénygűjtő képessége lehetővé tette, hogy például aktív galaxismagok fényváltozásait kövesse, megfigyelve a központi szupernehéz fekete lyuk körül örvénylő anyagban zajló változásokat. De még ennél is izgalmasabbnak bizonyult, hogy sok-sok galaxis megfigyelésével előbb-utóbb szupernóva-robbanásokat is elcsíphetett. Egy szupernóva felvillanásának gyakorlatilag semmi előjele, így eddig szinte lehetetlen volt a robbanás első pillanatait elcsípni. Pedig a szülő égitestről éppen ezek az első percek-órák hordozzák a legfontosabb információkat. Már az eredeti Kepler-misszióban is vadászott egy kisebb csapat szupernóvákra, és három év alatt sikerült is hatot elcsípni. Ezek közül talán a KSN 2011d, egy felrobbanó vörös óriás volt a legizgalmasabb. Ennél ugyanis a Kepler látta a tényleges robbanást megelőző egyetlen, aprócska jelet. A fúziós energiából kifogyó, összeomlásnak induló csillagmag lökéshullámot indít meg kifelé, amely rövid felvillanásként jelenik meg a felszínen, még mielőtt a csillag szétvetődése megindulna (21. ábra, Garnavich et al., 2016).



21. ábra. A KSN 2011d szupernóva fénygörbéje. (Forrás: Garnavich et al. (2016))

A K2 misszió aztán már nagyüzemben kereste a szupernóvákat, és ennek meg is lett az eredménye. A 15. kampányig 22 extragalaktikus tranzienszt figyeltek meg, és csak ezután jöttek a kifejezetten szupernóva-vadászatra kijelölt 16-17. kampányok, amelyeket úgy helyeztek el, hogy földi távcsövek is tudják követni az égterületet. Itt eddig a legérdekesebb szupernóvának az SN 2018oh jelű, Ia típusú robbanás bizonyult, ami az első napokban

fényesebb volt a vártnál. Ezt vagy az okozta, hogy a felrobbanó fehér törpéből szétrepülő anyag nekicsapódott a körülötte keringő, öt eddig hizláló társ csillag felszínének, vagy pedig robbanásszerűen fúziós reakciók indultak be a két összeolvadó fehér törpén, mielőtt szupernóvává váltak volna (Dimitriadis et al., 2019). De a K2 mérések azt is megmutatták, hogy nem minden szupernóva, ami felrobban egy galaxisban. Szupernóvára hasonlító, de sokkal gyorsabban felfényesedő, majd elhalványodó felvillanásokat már korábban is felfedeztek, de a KSN 2015k gyorsabbnak bizonyult mindnél. Erre a megfigyelésre jelenleg a legjobb magyarázat az, hogy egy sűrű, a csillag által alig korábban ledobott anyagburok egyszerűen felfogta a robbanás nagy részét. A felfénylés a robbanás okozta lökéshullám hatása volt a gázburokra, de ugyanez a burok a szupernóvák hosszú lecsengését adó, forró, táguló gázfelhő fényét már szinte teljesen elzárta előlünk (Rest et al., 2018).

És a megmagyarázhatatlan dolgok

A Kepler sok mindent látott az égbolton. Voltak, amire számítottak a csillagászok, más megfigyelések váratlanok voltak, és új magyarázatokat követeltek. És volt néhány, amire azóta sem sikerült választ találni. Az ismertebb ezek közül a Boyajian-csillag volt, ami egészen furcsa, szabálytalan elhalványodásokat élt át, az apróktól egészen a 22% fényességcsökkenést okozó jelenségekig. A fedések alakja kizárta az okok közül a szabályos, éles peremű bolygókorongokat. De csillaghoz közeli, szétszakadó bolygók vagy üstökösök porfelhői sem jöhetnek szóba, mert plusz hőszugárzást sem látni a csillagnál az infravörös tartományban. Egy darabig felkapott volt az a magyarázat is, hogy talán mesterséges szerkezeteket látunk a csillag körül, de későbbi mérések arra jutottak, hogy részben átlátszó, hideg porfelhők lehet a legjobb magyarázat a jelenségre. De hogy távoli, óriási üstökösfelhők, szétszakadó, vagy óriási gyűrűrendszerrel rendelkező bolygó, vagy esetleg a csillagon belüli, ritka fizikai folyamatok okozzák-e a halványodásokat, azt még egyelőre nem sikerült megnyugtatóan eldönteni (Boyajian et al., 2016).

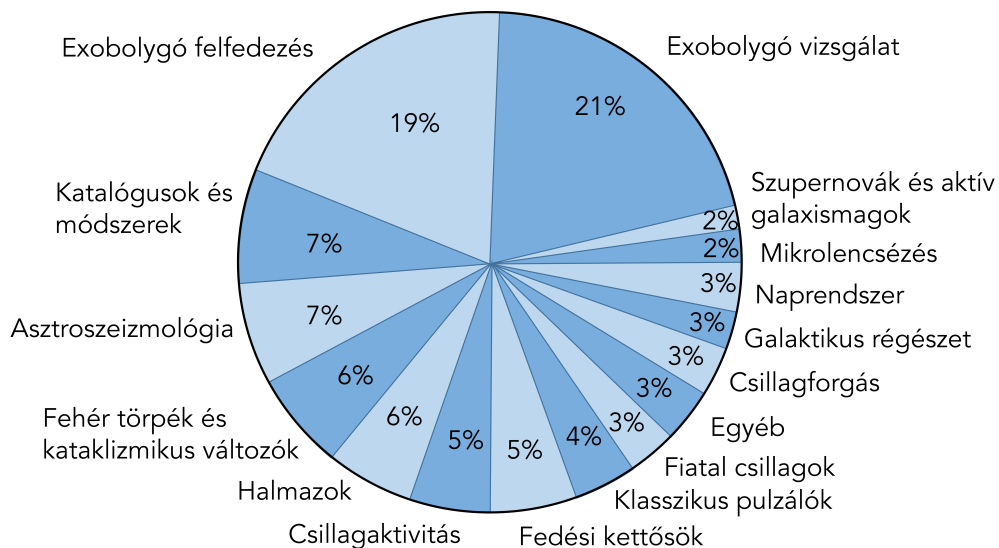
A közelmúltban pedig egy másik hasonló, egyelőre értékelhető magyarázat nélküli megfigyelés is felbukkant, immár a K2 misszióból. A HD 139139 jelű csillag a Random Transiter (kb. Véletlenszerű Fedések) nevet kapta. 87 napnyi észlelés alatt 28 apró, 0.2 millimagnitúdó körüli nagyságú, 1-8 óra közötti hosszúságú halványodást produkált, a rendszeresség legkisebb jele nélkül. A kutatók számos tesztnek vetették alá a fedések eloszlását, és egyértelműen véletlenszerűnek találták azt, már amennyire ezt meg lehet állapítani egy 28 elemű mintára. Még csak a fedések egy részéről sem lehetett megállapítani, hogy periodikusan ismétlődnének, a többi között rejtőzve. Egyelőre halvány fogalmunk sincs, mi történik ezzel a csillaggal, pedig már a felfedező cikk is kilenc különböző forgatókönyvet vizsgált meg – majd vetett el (Rappaport et al., 2019).

Összegzés

Túlzás nélkül állítható, hogy a Kepler űrtávcső forradalmasította az exobolygók kutatása és a csillagok asztrofizikájának területét is. A Kepler bőven több lett, mint egy exobolygó-kereső misszió, olyannyira, hogy a cikkek többsége más témából született (22. ábra). Tíz év alatt eljutottunk annak a sejtésétől, vagy reményétől, hogy lehetnek a csillagok körül bolygók mindenfelé, a tényleges tudatig, hogy több bolygó van a Tejútrendszerben, mint csillag. Az asztroszeizmológia eleinte elérhetetlen, majd pedig úttörő vizsgálati módszer helyett már az asztrofizika mindennapos feladatai közé tartozik. És ehhez még persze hozzáadódik az ezzel párhuzamosan zajló asztrometriai forradalom: a csillagok távolsága

rejtélyes, megfoghatatlan információból egy katalógusból kikereshető számmá vált, a Gaia űrtávcsőnek hála.

A csillagok rejtélyei megfejtve, az exobolygók felfedezve, hátradőlhetünk hát? A legkevésbé sem! Rengeteg csillag vár még például a mai napig egy gyors pillantásnál mélyebb elemzésre. A K2 misszió három havonta újabb és újabb égterületről beeső adatai lényegében garantálták, hogy a kutatóknak csak a legszebb, legizgalmasabb adatokkal volt idejük foglalkozni, mire lehajoltak volna a bonyolultabb problémákért, már jött is az újabb kampány. A helyzet komolyságát jelzi, hogy a K2 küldetés irányítói összeállítottak egy listát a 21 legfontosabb feladatról az Kepler és K2 adatokat illetően. Az exobolygók kapcsán egyelőre nem létezik olyan homogén bolygókatalógus a K2 misszióra, mint amit a Robovetter állított elő az eredeti látómező csillagaira. Exobolygók rejtőzhetnek speciális pixel maszkokon, a bélyegképekre véletlenül rákerülő háttércsillagok körül, vagy nagyon sűrű csillagmezőkön. Az egyik kampány során a Tejútrendszer közepét is célba vette az űrtávcső: itt rejtőzhetnek mikrolencsézésen keresztül felfedezhető exobolygók, ha valakinek sikerülne feldolgoznia az alacsony felbontás miatt rémesen összemosódott csillagok képeit. De ugyanígy rengeteg feladat vár még ránk a csillagok asztrofizikája, az extragalaktikus célpontok, vagy a Naprendszer kapcsán is (Barentsen et al., 2018).



22. ábra. Kepler publikációk témák szerint. (Forrás: NASA Ames/ Kepler & K2 Science Center)

Már ez is bőven elég lenne, hogy évtizedekre elszórakoztassa a Föld csillagászeit, de még csak az a luxus se adatik meg nekünk, hogy nyugodtan foglalkozzunk az aranybányával, amit a Kepler és K2 archívumok jelentenek. Időközben a TESS űrtávcső is elkezdte ontani magából az adatokat. A TESS más filozófiával készült, mint a Kepler, egyetlen égterület nagyon mélyreható vizsgálata helyett az egész égboltot vizsgálja át exobolygók után. Elsősorban közeli csillagok közeli bolygóira koncentrál, de a küldetés második évében az eredeti Kepler-mezőt is meglátogatja. A négy év hosszú adatok így hirtelen kapnak még egy kis kiegészítést, tíz évvel a Kepler startja után. Aztán a húszas évek második felében az európai PLATO űrtávcső fogja átvenni a stafétát az űrfotometria terén. A Kepler öröksége pedig sokáig velünk marad még.

Irodalom

- Armstrong, D. J., et al., 2016, *Nature Astr.*, 1, 4
Ballard, S., et al., 2014, *ApJ*, 790, 12
Barentsen, G., et al., 2018, arXiv:1810.12554
Bedding, T. R., et al., 2011, *Nature*, 471, 608
Bell K. J., et al., 2015, *ApJ*, 809, 14
Benkő, J. M., Szabó R., *Magyar Csillagászati Évkönyv 2011.* p 207
Bloemen, S., et al., 2012, *MNRAS*, 422, 2600
Borkovits, T., et al., 2016, *MNRAS*, 455, 4136
Borucki, W. J., Scargle, J.D., Hudson, H.S. 1985, *ApJ*, 291, 852
Borucki, W. J., 1999, Technical Report, NASA Ames Research Center Moffett
Borucki, W.J., et al. 2001, *PASP*, 113, 439
Boyajian, T., et al., 2016, *MNRAS*, 457, 3988
Campante, T. L., et al., 2015, *ApJ*, 799, 170
Casagrande, L., et al., 2016, *MNRAS*, 455, 987
Chaplin, W. J., Miglio, A. 2013, *ARA&A*, 51, 353
Chontos, A., et al., 2019, *AJ*, 157, 192
Cody et al., 2018, *RNAAS*, 2, 199
Corsaro, E. et al., 2017, *Nature Astronomy*, 1, 64
Davenport, J., R. A., Covey, K. R., 2018, *ApJ*, 868, 151
Derekas, A., et al., 2011, *Science*, 332, 216
Derekas, A., et al., 2017, *MNRAS*, 464, 1553
Dimitriadis, G., et al., 2019, *ApJ*, 870, 1
Edelson et al. 2014, *ApJ*, 795, 2
Fulton, B. J., et al., 2017, *AJ*, 154, 109
Garnavich, P., et al., 2016, *ApJ*, 820, 23
Hermes J. J., et al., 2015, *ApJ*, 810, 5
Hirsch, L. A., et al., 2017, *AJ*, 153, 117
Howell et al. 2014, *PASP*, 126, 398
Kiss, Cs., et al., 2016, *MNRAS*, 457, 2908
Kiss, Cs., et al., 2017 *ApJ*, 838, 1
Kirk, B., et al., 2016, *AJ*, 151, 68
Koch, D. G., et al. 2000, *Proc. SPIE Vol. 4013*, p. 508
Koch, D. G, et al., 2005, *BAAS*, 37,1339
Koch, D.G., et al., 2004, *Proc. SPIE Vol. 5487*, pp. 1491
Kolláth, Z., Molnár, L., Szabó, R., 2011, 444, 1111
Luger, R., et al., 2017, *Nature Astr.*, 1, 129
Mann, A., et al., 2016, *AJ*, 152, 61
McQuillan, A., Mazeh, T., Aigrain, S., 2014, *ApJS*, 211, 24
Meibom, S. et al., 2015, *Nature*, 517, 589
Millholland, S. et al. 2017, *ApJ*, 849
Molnár, L., et al., 2015, *ApJ*, 812, 2
Molnár et al., 2016, *JAVSO*, 44, 168
Molnár, L., et al., 2018, *ApJS*, 234, 37
Montet, B., T., Tovar, G., Foreman-Mackey, D., 2017, *ApJ*, 851, 116
Moskalik, P., 2014, *IAUS*, 301, 249
Orosz, J. A., 2015, *ASPC*, 496, 550
Petigura et al., 2017, *AJ*, 154, 107

Plachy, E., Bódi, A., Kolláth, Z., 2018, MNRAS, 481, 2986
Rappaport, S., et al., 2012, ApJ, 752, 1
Rappaport, S., et al., 2019, MNRAS, 488, 2455
Rest, A., et al., 2018, Nature Astr., 2, 307
Rizzuto, A. C., et al., 2018, AJ, 156, 195
Robinson, L. B., et al., 1995, PASP, 107, 1094
Roettenbacher, R., M., Vida, K., 2018, ApJ, 868, 3
Saio, H., et al., 2018, MNRAS, 474, 2774
Szabó, Gy., et al., 2017, A&A, 599, 44
Szabó, R., et al., 2010, MNRAS, 409, 1244
Teachey, A., Kipping, D. M., 2018, Science, 4, 10
Thompson, S. E., et al., 2012, ApJ, 753, 86
Thomson, S. E., et al., 2018, ApJS, 235, 38
Uytterhoeven, K., et al., 2011, A&A, 534, 125
Vanderburg, A. et al., 2015, Natur, 526, 546
Van Eylen, V., et al., 2018, MNRAS, 479, 4786
Vida, K., Oláh, K., Szabó, R., 2014, MNRAS, 441, 2744
Vida, K., et al., 2017, ApJ, 841, 124
Wittrock, J. M., et al., 2016 AJ, 152, 149