

10 ÉV KRÓNIKÁJA

A Kepler űrtávcső korszaka

Kepler adatokkal dolgozó kutatóként nehéz elfogulatlanul írni arról a hamarosan nyugállományba kerülő űreszköwről, amely majd 10 éves működésével olyan sok területen bővítette tudásunkat a világunkról. Az eredeti Kepler misszió, majd később annak kiterjesztése, a K2, olyan mennyiségű és minőségű adatokkal látta el a csillagászokat, amelyek még akár évtizedekig is alapjául szolgálhatnak a kutatásoknak.

A 2009. március 7-én pályára állított Kepler űrtávcső eredeti és elsődleges feladata a fedési módszerekkel történő exobolygó kutatás volt az égbolt egy meghatározott területén, a Hattyú és a Lant csillagképek irányában. Érzékenysége alapján akár a csillaguktól 1 CsE távolságra (1 CsE, vagyis 1 Csillagászati egység, a Föld és Nap közepes távolságával egyenlő, körülbelül 150 millió km) lévő exobolygók kimutatására is képes, a legkisebb detektálható objektum pedig 0,5 földtömegű. 4 évnyi működést követően, miután a második lendkereke is meghibásodott, 2013 májusában idő előtt felfüggesztették a teleszkóp működését. A műszert eredetileg négy stabilizáló célú lendkerékkel látták el, amelyeknek a feladata a távcső folyamatos irányban tartása volt, és úgy tervezték, hogy három ilyen eszköz képes legyen ezt a feladatot ellátni. A K2 misszió keretében a kiesett lendkerekek stabilizáló hatását a Nap sugárnyomásának minél egyenletesebb eloszlását biztosító térbeli pozicionálással oldották meg. Ez azt jelenti, hogy a távcsövet a keringési síkjának irányába, azaz az ekliptikára vagy más néven az állatövre irányozták.

Előnye a korábbi űrfotometriai missziókhöz (mint a CoRoT vagy a MOST) képest, hogy nem Föld körüli, hanem Föld-követő pályára tervezték, így mentesült a bolygónk zavaró hatásaitól. Maga a teleszkóp egy 1,4 méteres főtükörű, 95 cm-es nyílásátmérőjű Schmidt-távcső. Az eredeti misszió alatt közel 170 000 fősorozati és óriáscsillag fé-

1. ábra. Az eredeti Kepler látómező és a K2 égterületek. (Forrás: NASA/Ames Research Center/Wendy Stenzel)



nyességét mérte, ugyanazon a 105 négyzetfokos területen, míg a K2 során körülbelül háromhavonta más-más ekliptikai égterületre irányozták a berendezést (1 ábra). A hatalmas, 42 CCD-ből álló, összesen 95 megapixeles felbontású detektor nem használ szűrőket, 430 és 840 nanométeres hullámhosszak közötti tartományban, szinte a teljes optikai tartományt lefedve érzékeny.

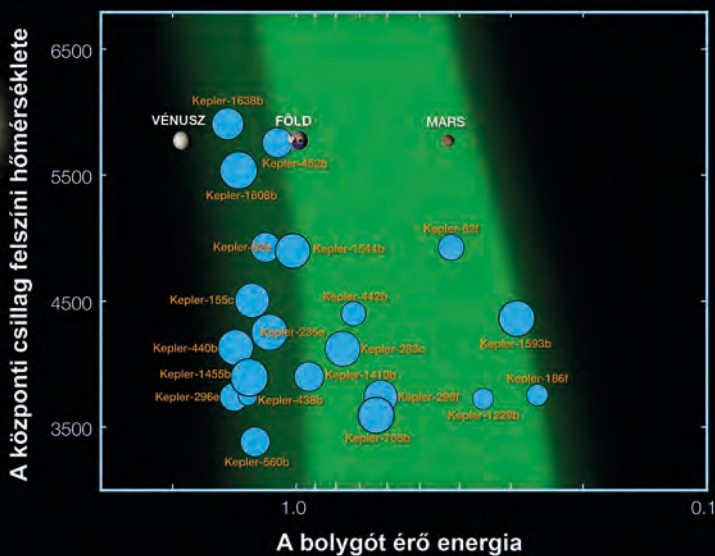
Az exobolygó-kutatás zászlóshajója

Az űrtávcső fő feladata, amiről elsődlegesen ismertté vált, a fedési módszerekkel történő exobolygó detektálás volt, és túlzás nélkül állítható, hogy forradalmasította a csillagászat ezen területét (is). Ezt jól példázza az a tény, hogy a (cikk megírásának pillanatában) ismert exobolygóknak (3767 db) közel kétharmada (2343 db) Kepler felfedezés.

Különösen fontos az, hogy nem csak a nagyméretű és a csillagukhoz nagyon közel keringő bolygók észlelésére képes (amelyek ebből kifolyólag nagyon forró felszínűek). Kifejezetten úgy tervezték meg, hogy a kisebb, a csillaguktól nagyobb távolságra lévő Föld-szerű bolygók detektálására is alkalmas legyen (a központi csillag lakhatósági zónájában). Ezekből eddig 30 db-ot talált (2. ábra).

Ahhoz, hogy biztosak legyünk benne, hogy egy idegen planéta okozta a csillag fényességének a csökkenését, a fedésnek többször is meg kell ismétlődnie. Márpedig minél messzebb helyezkedik el egy bolygó a csillagától, annál lassabban kering körülötte. Ezért

2. ábra. 21 Föld-szerű Kepler exobolygó a csillagaik lakhatósági zónájához képest.
(Forrás: NASA Ames / N. Batalha and W. Stenzel)



monitorozta az űrtávcső közel négy éven keresztül ugyanazt az égterületet. Az adatok feldolgozása természetesen most is tart, jelenleg még 2244 Kepler exobolygó jelölt vár a hitelesítésre.

A Kepler azonban nem csak az exobolygó felfedezésekben alkotott maradandót, hanem a csillagászat számos egyéb területén, a változócsillagásztól kezdve a csillagfejlődés vizsgálatán át a szupernóváig. Lehetetlen lenne mindent a cikk terjedelmében felsorolni, így a teljesség igénye nélkül próbálom összefoglalni a végzett kutatásokat és a legfontosabb tudományos eredményeket.

Szupernóva-kutatás

Az eredeti misszió során több mint 400 galaxis esett a távcső látómezőjébe, folyamatos megfigyelésükkel pedig sikerült számos szupernóva felvillanást is detektálni bennük. Mivel a szupernóvák a természetük-nél fogva váratlan események, így szinte mindegyiküket "késve", csak a felfényesedés alatt, vagy már utána, az elhalványulás során vesszük észre. Ez pedig komoly gond, mivel éppen a jelenség kezdete árulkodik leginkább a szupernóvává váló égitestről és környezetéről. Éppen ezért különösen értékesek azok a felvételek, melyeket a Kepler már a felrobbanás pillanatától kezdve készített. Ezek között előfordultak mind magkollapszusos, mind pedig Ia típusú, úgynevezett termonukleáris szupernóvák is. Az Ia osztályba tartozók viselkedését a mai napig nem ismerjük teljesen, a Kepler által megfigyelt két ilyen esemény nagyban segített a természetük jobb megértésében.

A legelfogadottabb elmélet szerint a progenitor (szülőcsillag) egy úgynevezett fehér törpe csillag [4], mely a kísérőjéről (általában egy vörös óriás csillag) anyagot von el. Ennek hatására a tömege növekszik, míg el nem ér egy kritikus (úgynevezett Chandrasekhar-féle) tömeghatárt, minek következtében a csillag összeomlik a saját súlya alatt. Az ekkor beinduló fúziós reakciók elhárapózása gyakorlatilag szétveti az objektumot. A robbanás mindig egy adott tömeg elérésekor következik be, ezért fényességüket közel azonosnak gondolva standard gertyáknak is használjuk őket.

A Kepler minden korábnál részletesebb és jobb időfelbontású fénygörbéket készített az általa detektáltakról, melyek azonban egy másik elméletet, a "double progenitor" rendszert támasztották alá. Ebben a felállásban

a fehér törpe kísérője egy másik fehér törpe, így pedig szó sincs anyagelszívásról, a kritikus tömeg átlépése a két komponens összeolvadása miatt következik be (**3. ábra**). Ebben az esetben a felrobbanó tömeg természetesen változó (az összeolvadó csillagok tömegeinek összege). Az eredeti elmélet keretei között a robbanást követően ledobódó anyaghéj a tágulása során eléri a kísérő csillagot. Az ennek következtében beinduló folyamatok plusz energiát termelnek, ami egy kis felfényesedést okoz a fénygörbében. A Kepler által talált Ia szupernóváknál semmi ilyet nem észleltek, ami kizárja, hogy a kísérők vörös óriások lettek volna.

A kérdés persze ma sem eldöntött, valószínűleg mindkettő eset (fehér törpe-vörös óriás / kettős fehér törpe) előfordulhat a természetben.

A Boyajian-csillag

2015-ben robbant be a köztudatba a KIC 8462852, felfedezője után a Boyajian-csillag, ismertebb nevén Tabby-csillag vagy a WTF („Where is The Flux”, azaz „Hol van a fluxus?”) csillag. A távcső mérései szerint a csillag fényessége rövid idő alatt körülbelül az ötödével csökkent, majd visszafényesedett az eredeti szintre (**4. ábra**). Ekkora méretű exobolygó pedig nem lehetséges, és az elhalványulás karakterisztikája sem emlékezteti a kutatókat egy fedési jelenségre. Így pedig nyitva áll a kérdés, mitől csökkent a csillag fénye, vagy mi takarta el azt a távcső elől?

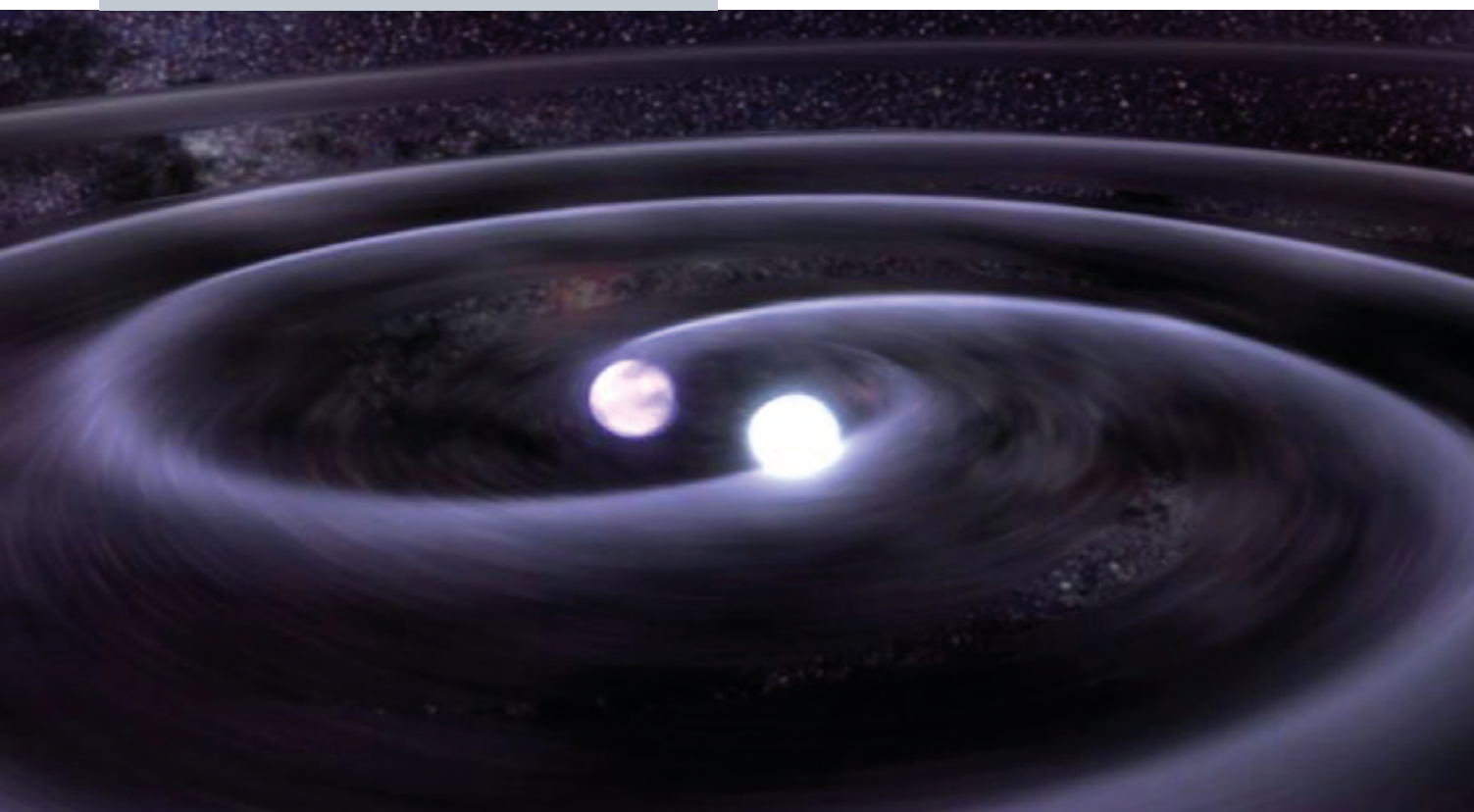
3. ábra. Fantáziarajz egy összeolvadni készülő fehér törpe párosról. (Forrás: NASA)

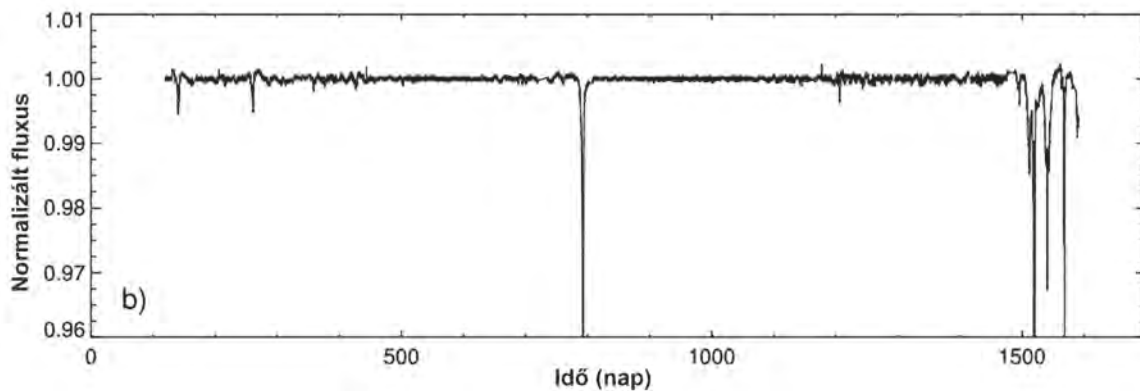
Számos elmélet született a jelenség megmagyarázására, kezdve a csillag külső légkörének kémiai változásától, a különböző óriási por és/vagy üstökös-felhők keringésén át, egészen az idegenek Dyson-szféráinak [6] vizionálásáig. A probléma mindegyik elméletnél az, hogy bizonyos részleteiben igen, de egészében nem tudja megmagyarázni a mérési adatainkat. Például, ha egy hatalmas aszteroida vagy üstökösfelhő kering a csillag körül, akkor miért nem észlelünk infravörös többletsugárzást (és egyáltalán, hogyan jöhetett ilyen létre, miért nem tömörödött össze a bolygókeletkezés során)?

További érdekes körülmény, hogy a csillag fényessége lassan, de biztosan halványodott az utóbbi 100 évben, és az elméletnek ezt is meg kellene magyaráznia. Bármennyire is furcsa ilyet mondani, de jelenleg egy idegen civilizáció által épített kozmikus megastruktúra ötlete szinte semmivel sem légből kapottabb, mint a hatalmas porfelhők létezése a csillag körül (*Az újabb vizsgálatok szerint a hosszabb idejű fényességcsökkenésekért valószínűleg a csillag körül keringő apró porszemcsék lehetnek a felelősek – A szerk.*)

Az exoholdak rejtélye

A legtöbb felfedezett exobolygó jóval nagyobb méretű, mint a Föld, és még ha véletlen a lakhatósági zónán belül is keringene, egy gázóriás esetében elég nehezen képzelhető el rajta bármiféle élet. Azonban egy, az óriásbolygó körül keringő kisebb méretű holdon az életfeltételek már reálisabban kialakulhatnak.



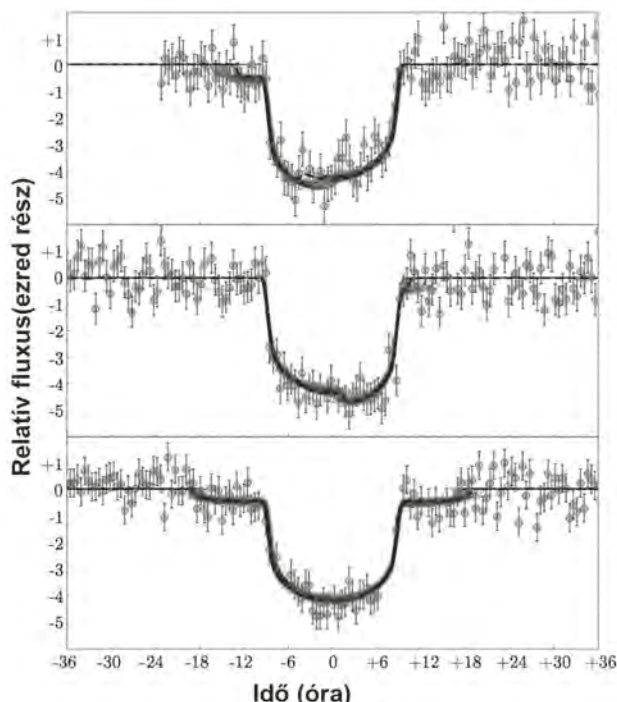


4. ábra. A Boyajian csillag fénygörbéje. A hosszú vonalak az elhalványulás időszaka alatt detektált fluxus-csökkenéseket jelölik, lemennek egészen 0,8 - 0,85%-ig. (Forrás: Boyajian et al. 2016)

Ráadásul ez akár a lakhatósági zónán kívül is előfordulhat (akár az erős árapályfűtésnek kitett Jupiter hold, az Europa óceánjában). A Naprendszerünkben is számtalan hold kering a bolygók körül, így jogos a feltételezés, ha már az exobolygók kifejezetten gyakori jelenségnek számítanak az Univerzumban, miért ne létezhetne számtalan exohold is? Ha pedig léteznek, akkor miért nem észleltük őket eddig?

Mondhatnánk, hogy a mérési pontosságunk elégtelen ehhez, azonban a legkisebb felfedezett exobolygó (a Kepler-37b) 4500 km-es átmérője kisebb, mint néhány nagyobb méretű Naprendszerbeli holdé (például a Titán átmérője 5100 km). Ebből kifolyólag ki-

5. ábra. A Kepler-1625 csillag fényességének változásai. A nagy horpadások a bolygó okozta csillagfedések. A pluszban megjelenő kisebb horpadások lehetnek a hold által okozott extra fedések. (Forrás: Teachey, Kipping & Schmitt, 2017)



jelenthetjük, hogy bár a kicsi és bolygójukhoz közel keringő holdakat nem, de a (bolygóhoz képest) nagy méretű és messzebb keringő holdakat (mint akár a Föld Holdja is) ki kellene tudnunk mutatni a Kepler adataiban.

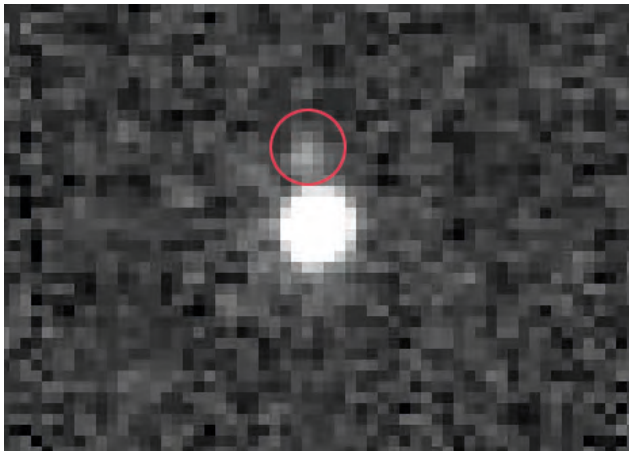
Nem szabad elfelejteni azonban, hogy a legtöbb ismert exobolygó keringési periódusa rövidebb vagy sokkal rövidebb mint 1 év. Valószínű, hogy akárcsak a Naprendszer esetében, a holdak a messzebb keringő (azaz hosszabb keringési periódusú) bolygók jellemzői. Ezeket viszont jóval nehezebb felfedezni, különösen holdakat keresni körülöttük.

Egyetlen egy esetben azonban lehetséges, hogy egy exohold csillagfedését sikerült észlelnünk a Kepler adataiban. A Kepler-1625b jelű (a Jupiternél mintegy 10-szer nagyobb tömegű) bolygónál a távcső három bolygófedést látott, és mindháromnál kis mértékű további halványodást is kimutatott (5. ábra). Egyáltalán nem biztos, hogy ezt egy exohold okozta, de ha igen, akkor nagyjából egy Neptunusz méretű égitestnek kellett lennie (ami egy nagyon szokatlan rendszer lenne).

Naprendszerbeli égitestek vizsgálata

Az eredeti Kepler misszió 2013-as felfüggesztése rendkívüli csapásként érte a tudományos közösséget, ám a K2 küldetés megakadályozta, hogy idő előtt kárba vesszen az úrtávcső. Sőt, az ekliptikára irányítással (a bolygók és aszteroidák pályasíkjá) óriási lehetőséget kaptak a Naprendszerbeli objektumokkal foglalkozó kutatók is, ugyanis a korábbiakhoz képest sokkal hosszabb és jobb minőségű adatsorokhoz juthattak a K2 adataiból, mint arra általában lehetőségük lenne.

Különösen értékesek ezek a megfigyelések a kis égitestek, a főövbeli és a Neptunuszon túli aszteroidák (Trans Neptunian Objects - TNO) esetében, ugyanis ezen objektumokat apró méretük és (főleg az utóbbi csoport esetében) nagy távolságuk miatt csak nagyobb méretű eszközökkel lehet megfigyelni. Az olyan teleszkópok, melyek képesek az ehhez szükséges alacsony határfényességet elérni, "arany árban" mért távcsőidővel rendelkeznek. Azaz, ha jut is idő egy-egy ilyen aszteroida megfigyelésére, az sem egy egész éjszakán át tartó mérés lesz, maximum néhány pillanatfelvétel az objektumról. Az igazán érdekes dolgokat azonban



6. ábra. A 2007 OR10 és holdja.
(Forrás: NASA, STScI,
Wesley Fraser, Gábor Marton)

csak jóval hosszabb mérésekből lehet megállapítani. A fővi aszteroidák rendszerint pár napig, míg a távoli és lassabban keringő TNO-k akár hetekig is a távcső látómezejében tartózkodnak.

A 2007 OR10 névre keresztelt égitest egyike a megfigyelteknek, melyről a K2 hosszú adatsorainak köszönhetően derült ki, hogy nagyon hosszú, több mint 44 órás a forgási üteme. Ez a meglepő felfedezés vezette oda a kutatókat, hogy kísérőt gyanítsanak az égitest körül, melynek a fékező hatása alakíthatta ki ezt a rendkívül lassú forgási periódust. A feltételezés később igaznak bizonyult, és az apró holdat sikerült archív Hubble felvételeken azonosítani (6. ábra).

Nagy arányban detektálta a kettősséget a Jupiter pályáján keringő (vagyis azzal 1:1-es rezonanciában lévő) Trójai kisbolygók között is. A különböző Naprendszer-fejlődési modellekben kardinális kérdés, hogy az egyes kisbolygó alosztályok (Trójaiak, Hilda-csoport stb.) között milyen arányban fordulnak elő a kettősök, így ezek a mérések felbecsülhetetlen értékűek a Naprendszer dinamikai történetét vizsgáló kutatásokban.

A K2 program keretében megfigyelésre került a Szaturnusz, az Uránusz és a Neptunusz, valamint néhány holdjuk is. Korábbi elméletek szerint az óriásbolygók nem a mai helyükön keletkeztek, és még csak nem is a mai sorrendben. Az elméletek szerint az Uránusz és a Neptunusz helyet cseréltek egymással a Naprendszer fejlődése során. Ezt az elképzelést látszik megerősíteni néhány paraméter a K2 által (is) megfigyelt irreguláris holdak esetében.

Változócsillagászat

A távcső nem csak a bolygófedések által okozott parányi fényességsökkenések detektálására képes. Közel 3000 fedési kettőscsillagot is azonosított, melyekre halvány mivoltuk miatt eddig nem volt lehetőség.

Az asztroszeizmológia, vagyis a csillagok belső pulzációinak tanulmányozása terén is figyelemre méltó haladást értek el a kutatások. A pulzáló változócsillagok közül a Nap-típusú oszcillátorok rezgéseit a csillagok felszínéhez közeli turbulenciák miatti apró gerjesztődések váltják ki. Ezek nagyon kis amplitúdójú méret és alakbeli változásokat okoznak a csillagok felszínén, amiket olyannyira nehéz kimutatni, hogy a Kepler előtt (pár kivételtől eltekintve) szinte csak a Nap esetében ismertünk ilyen változásokat.

A jóval nagyobb amplitúdójú RR Lyrae típusú változók esetében is adódtak új eredmények, amelyek kutatásának Magyarországon Detre László óta majd évszázados hagyománya van. Ezek a változók öreg, radiális pulzációt folytató vörös óriás csillagok, melyek nagyon jó távolságindikátorok. Pulzációütemük és abszolút fényességük között empirikus összefüggés van, így őket is standard gyertyáknak használhatjuk. Harlow Shapley a segítségükkel mérte fel a XX. század elején a Tejútrendszert és határozta meg azon belül a Nap helyzetét. A Kepler mérései számos, korábban ismeretlen, kis amplitúdójú pulzációs effektust mutatnak ki a változóosztályban, illetve az úgynevezett perióduskettőződés jelenségét, amely váltakozó nagyságú maximumok és minimumok formájában jelentkezik a csillagok fénygörbéjében.

A közeljövőben induló űrfotometriai missziók, mint a PLATO vagy a TESS (A TESS űrtávcső felbocsátása idén április 18-án megtörtént – A szerk.) várhatóan további tudományos áttöréseket hoznak majd, azonban addig is bőven van mivel foglalkoznia a kutatóknak. Ki tudja mennyi tudományos ismeret rejtőzik még felfedezésre várva a Kepler adatbázisaiban.

JUHÁSZ ÁRON