

Túlzás nélkül állítható, hogy a Kepler-űrtávcső forradalmasította mindazt, amit az exobolygókról tudunk. Ezresével szállította a bolygójelölteket, és még mindig számos exobolygó rejtőzhet az adatokban. A megfigyelései alapján kiderült, hogy a csillagokhoz közeli, egy évnél rövidebb keringési idejű égitestek között igen ritkák az óriásbolygók. A csillagok körül leggyakrabban olyan bolygók keringenek, amelyek a Naprendszerből hiányoznak: a Föld és a Neptunusz közti űrt kitöltő szuperföldek, vízbolygók és minineptunuszok [1]. A csillagok fizikájában szintén számos új, alapvető eredmény kapcsolódik a Kepler megfigyeléseihez.

Máskor verd be jól a patkószeget!

A közismert angol gyermekvers szerint a rosszul bevart patkószeg miatt a ló, a ló miatt a lovas, a lovas miatt a csata, a csata miatt pedig az ország is elveszett. A Kepler számára patkószegnek a lendkerekek bizonyultak. A fantasztikus felfedezések az elképesztően pontos, néhány tucat milliomodrészt elérő pontosságú fényességméréseken alapultak. A fotometriai pontosság viszont csak részben származott abból, hogy a légkörön kívül, az űrben van a távcső. Ugyanilyen fontos, hogy hónapokon át egyetlen pixel töredékével sem mozdultak el a csillagok képei a kamerán, vagyis az űrtávcső elképesztően pontosan tartotta térbeli irányát. Ehhez pedig precíz iránystabilizálásra volt szükség: erre szolgáltak a lendkerekek. Fontosságuk miatt a Keplert négygel szerelték fel, hogy bármelyik kiesése esetén a maradék három is el tudja látni a feladatát. Amikor viszont 2013 nyarán a Kepler második lendkereke

A kutatás a TÁMOP-4.2.4.A/2-11/1-2012-0001 Nemzeti Kiválóság Program című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával készült. A kutatás infrastruktúrája az OTKA K83790, valamint a KTIA URKUT_10-1-2011-0019 pályázatok által biztosított forrásokból valósult meg.

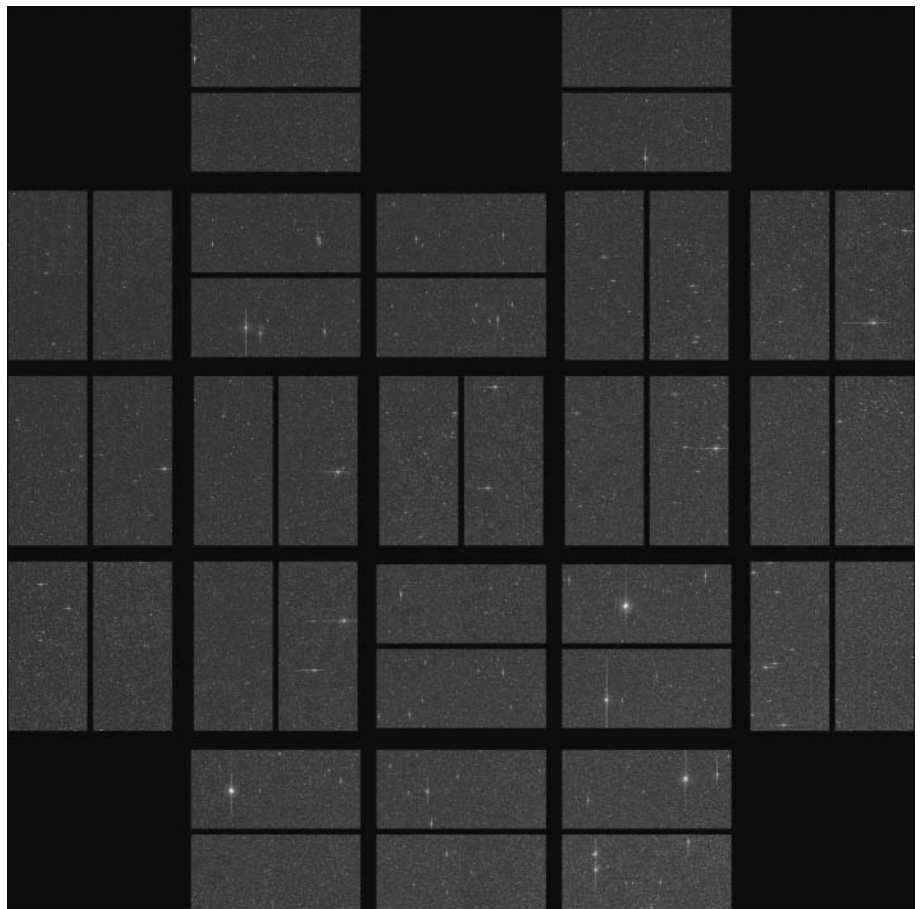
is leállt és a beindításukra tett kísérletek is kudarcot vallottak, a NASA második legnagyobb űrtávcsövének sorsa igen borúsnak tűnt.

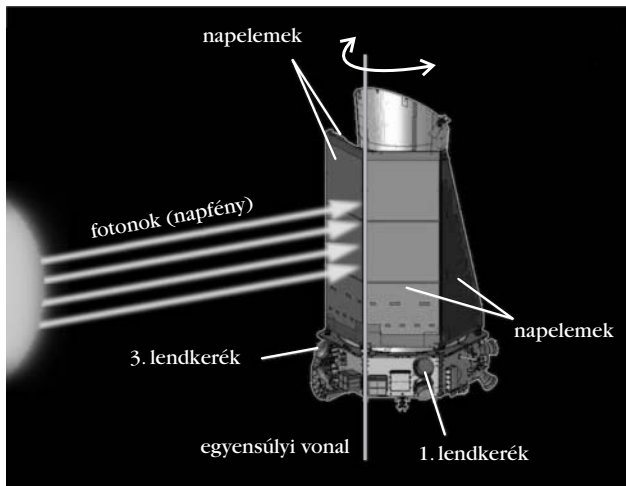
Másfelől nézve azonban a NASA továbbra is rendelkezett egy igen potens űrtávcsővel. A Hubble után a Kepler a legnagyobb csillagászati űreszköz odafent, amely a látható fény tartományában dolgozik. A kép-rögzítésért felelős 42 CCD-ből 38 kifogástalanul üzemel (1. ábra). Látómezeje hatalmas: száz négyzetfok – ez annyi, mint ötszáz telihold területe, vagy amekkorát kinyújtott karral a kifeszített kezünkkel eltakarunk az égbolttól.

Ki mit tud?

A Kepler tehát csupán kissé illuminált állapotban van: egyik tengelye körül nem képes stabilan megállni. Olyan nagy probléma ez? Ezt a kérdést tették fel a Kepler üzemeltetői is a tudományos és mérnöki közösségnek. Adott volt egy két lendkerékkel üzemelő űrtávcső és néhány hozzávetőleges számítás arról,

1. ábra. A Kepler új első fénye: a legelső felvétel a csillagos égről, amelyet két lendkerékkel működve készített az űrtávcső. Sajnos azóta egy második CCD-pár is meghibásodott, így már csak 38 üzemel. (Forrás: NASA Ames)

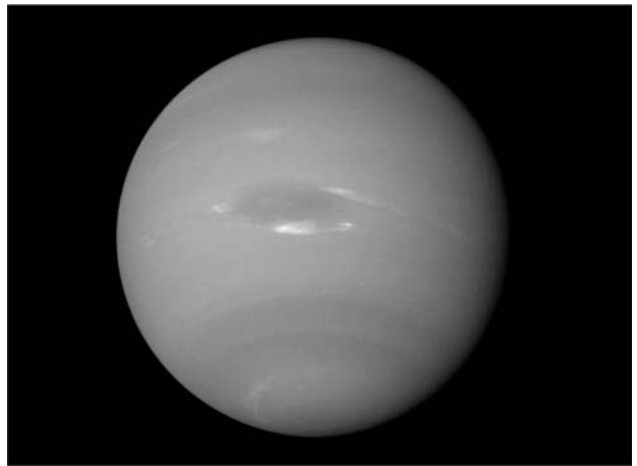
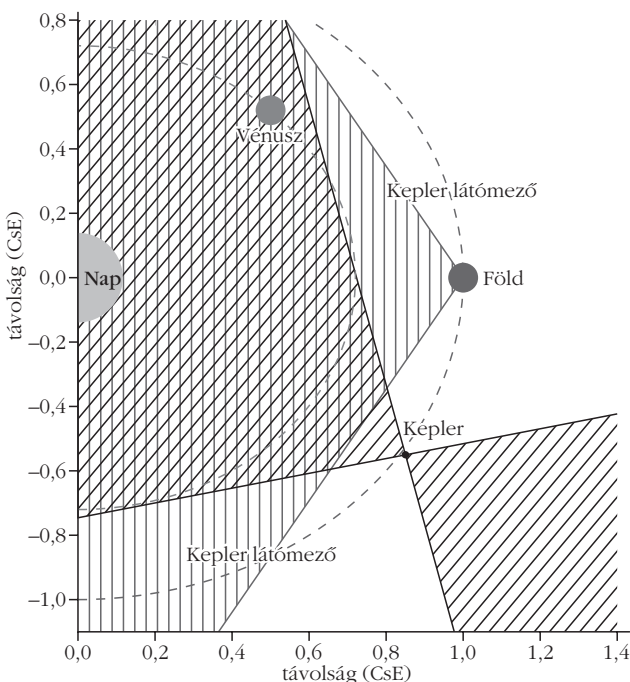




2. ábra. A Nap sugárnyomásának hatása az űrtávcsőre. Ha a szerkezet egyik oldalán nagyobb forgatónyomaték ébred, a Kepler elfordul a távcső optikai tengelye mentén. (Forrás: NASA Ames/W. Stenzel)

hogy a különböző pozíciókból milyen gyorsan billenti ki a Nap sugárnyomása. A térbeli irány tartásának legfőbb ellensége ugyanis csillagunk: a belőle eredő fotonok nyomást fejtenek ki a napelemekre és a többi megvilágított felületre. Ha a sugárnyomás középpontja nem esik a Nap és az űrtávcső tömegközéppontja közé húzott vonalba, forgatónyomaték lép fel, ami szép lassan forgatja a távcsövet – akár körbe az optikai tengely körül, akár arra merőlegesen, billentve (2. ábra). Vannak ugyan rakétahajtóművek is a Kepleren, de azok folyamatos üzem mellett néhány héten-hónapon belül minden üzemanyagot elhasználnának, így ez sem járható út.

4. ábra. A Kepler a Nap körül kering, lassan lemaradva a Földtől. Az egyik felhasználási javaslat ezt használta volna ki: ebből a nézőpontból a Föld pályáján belül keringő kisbolygók is megfigyelhetők lettek volna. (Forrás: Stevenson et al., arXiv:1309.1096)



3. ábra. A K2 egyik legkülönlegesebb célpontja: a Neptunusz. A Nap típusú oszcillációkhoz hasonlóan a gázbolygóban is terjednek lecsengő hanghullámok: ha az általuk okozott fényességváltozásokat sikerülne kimutatni, akkor a bolygó belső szerkezetét is fel tudnánk vele térképezni. (Forrás: NASA/JPL, utófeldolgozás: Björn Jönsson)

Ennyit lehetett tudni, illetve azt, hogy csak a technikai feltételek kötik meg: mire lehet használni az űrtávcsövet (felbontás, tárhely, kiolvasási idő stb.), de tudományos és üzemeltetési szempontból nyitottak voltak bármilyen javaslatra. Azok pedig özönltek: másfél hónappal később 42, igencsak eltérő kidolgozottságú javaslatot hoztak nyilvánosságra [2]. A többség az észlelési lehetőségekre koncentrált, és tényleg szinte minden felmerült, amit csak meg lehet figyelni látható fényben. Sok javaslat született bolygók keresésére, mindenféle trükkökkel növelve a jel/zaj arányt: vörös, barna és fehér törpecsillagok kísérőire is vadásztak volna. Volt, aki egyszerűen a Neptunuszt javasolta: a bolygó nem túl fényes, de mivel jelentős részben gázból áll, a csillagokhoz hasonló oszcillációk ébredhetnek benne, felfedve belső szerkezetét (3. ábra). Volt, aki mikrolencsézésre, volt, aki a Földet megközelítő kisbolygókra vadászott volna vele. A megalapozottabb kisbolygós javaslat kihasználta volna, hogy a Kepler, a Nap körül keringve, már mintegy fél csillagászati egységgel (CSE: átlagos Nap-Föld-távolság) le van maradva tőlünk. Ebből a nézőpontból kényelmesen belátott volna a Föld elé, egészen a Vénusz pályájáig, oda, ahova a Nap fénye miatt számunkra lehetetlen (4. ábra). A bolondosabb ötlet egy hatalmas teljesítményű infravörös lézerrel szkennelte volna végig a Kepler előtti teret, és az apró, de közeli kisbolygókról visszaverődő fényt kereste volna.

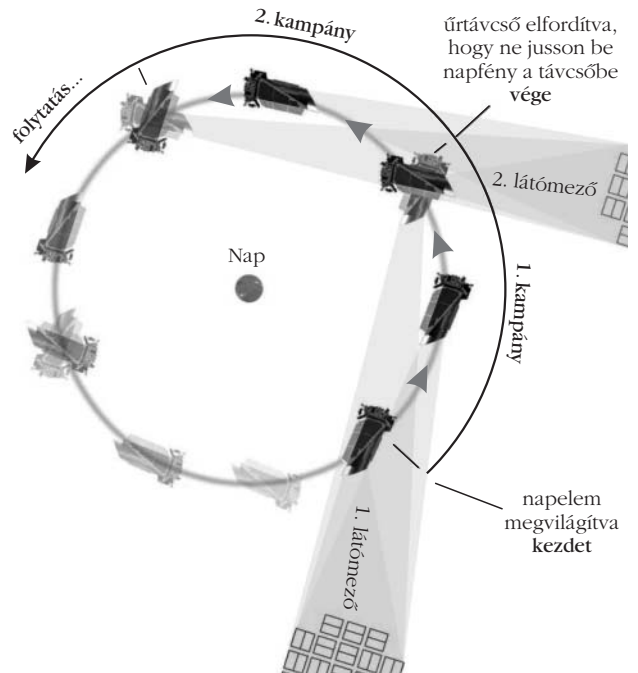
Hazai kutatók három javaslat kidolgozásában vettek részt. Az általam vezetett tanulmány az eredeti Kepler-látómező továbbészlelése melletti érveket és a nehézségeket vette sorra [3]. Bár a pontosság a várakozások szerint jelentősen, akár két nagyságrenddel is csökkenhetett volna, még mindig felülmúlta volna a földi méréseket, és továbbra is folytonosan gyűjthette volna az adatokat. Az apró bolygókat és a Nap típusú oszcillációkat ugyan nem lett volna képes tovább mérni, de ezt ellensúlyozta volna, hogy sok más égitest esetében jobban jártak volna a csillagászok a

hosszabbodó adatsorokkal. Többes bolygórendszerek esetén a tranzitidőpont-változások követésével távolabbi, akár nem fedő bolygókat is azonosítani lehetett volna. Többes csillagrendszerek, vagy hosszú periódusú változók esetében is sokat profitáltak volna a kutatók a további mérésekkel.

Egy másik javaslatot Szabó Róbert vezetésével dolgoztunk ki [4]. Eszerint a Keplert az ekliptika déli pólusa felé irányítottuk volna, a Nagy-Magellán-felhő külső régiói felé. A területnek számos előnye van: a Kepler számára egész évben elérhető, de megfigyelhető a déli félteke óriástávcsöveivel, például a négy VLT távcsövel is. Mindenféle összehasonlításokra nyílna lehetőség a Nagy-Magellán-felhő és a Tejútrendszer csillagai között. A területen nagyon egyszerű lenne a célpontválasztás: az OGLE és MACHO felmérések már alaposan feltérképezték az itt található csillagtípusokat. E terület legnagyobb problémája – és az eredeti Kepler-mezőnek is –, hogy az űrtávcsőnek az ekliptikára közel merőlegesen kell állnia. Ahhoz, hogy a sugárnyomás középpontja ne mozduljon el a tömegközéppont elől, és a napelemet is érje fény, mindig ugyanúgy kell fordulnia a Nap felé. Mivel közben kering is a Nap körül, a csillagokhoz képest lassan körbefordul. Ez egyben azt is jelenti, hogy a csillagok is körbejárnak egy év alatt a látómezőben.

Ahhoz, hogy éveken át mérhessen egy ilyen területet a Kepler, egy sor további feladatot is meg kellett volna oldani. Az űrtávcső helytakarékosági okokból csak az előre kiválasztott csillagok körüli pixeleket őrizte meg, 5,5 megapixel a teljes 95 millióból. Ha a csillagok eközben tendenciózusan kóborolnak a pixelek között, vagy néhány körkörös ívre kellett volna korlátozni az észleléseket, vagy valahogy rávenni a számítógépet, hogy a képkivétel, összeadogatás és elmentés mellett még a csillagok pozícióit is számolgassa, és naponta új térképet osszon ki magának. (A napi rádiókommunikáció sajnos nem kivitelezhető, ahhoz túl messze jár a Földtől, a Deep Space Network óriás rádióantennáinak kapacitása pedig véges és drága is.) Sejtettük, hogy ez ötletünk bizonytalan pontja, de a kiírók bátorítottak mindenkit: álmódjunkt merészet.

A harmadik javaslat, amelyben szintén szerzőtársak voltunk, egy másik megközelítést választott [5]. Az első becslések során is felmerült, hogy ha az űrtávcsövet elfektetik az ekliptika mentén, a látóirány körüli forgás minimalizálható. Ez a legstabilabb pozíció, ám itt más korlátozó tényezők lépnek fel. A Nap is az ekliptika mentén látszik körbejárni: fordított nézőpontból nézve, ahogy a fekvő Kepler kering a Nap körül, egy idő után az már nem az oldalát sütné, hanem a végét vagy az elejét. Előbbi állapot azért baj, mert a napelemek oldalt vannak, utóbbi pedig azért is, mert akkor közvetlen napfény jutna a távcsőbe, ami akár tönkre is teheti a kamerákat. Ebben az esetben tehát a Keplernek időről időre új területre kell állnia, de ennek is van előnye. Az ekliptika közelében ugyanis számos, viszonylag közeli, kiterjedt nyílthalmaz is található. A nyílthalmazokat néhány száz vagy ezer



5. ábra. A Kepler üzem módja a K2 küldetés során. A keringés kampányokra lesz bontva, amelyek között az űrtávcső pozíciót fog váltani, hogy a napelemek mindig a Nap felé forduljanak. (Forrás: NASA Ames/W. Stenzel)

csillag alkotja, amelyek közel egy időben, ugyanabból az óriás molekulafelhőből alakultak ki. Vagyis egy halmaz megfigyelésével sok-sok igen eltérő tömegű, de azonos korú csillagról látunk pillanatfelvételt. Több eltérő korú halmaz megfigyelésével pedig arra is lehet már következtetni, hogyan változtak a csillagok az idők során. 29 halmazt írtunk össze, amelyek közül számosról szinte mindenki hallott már valaha: arra van többek között a Fiastyúk (lásd a címlapot), a Jászol-halmaz, a csodálatos kettőshalmaz a Perzeuszban, vagy épp a Sas-ködbe ágyazott csillagok, ahol a Teremtés oszlopai is találhatóak. A legfiatalabbnak még a fenekén van a tojáshéj, csak 3,2 millió éves, míg a legidősebb a maga 7 milliárd évével bőven leköri a Napot.

Javaslatokból tehát nem volt hiány. Most már csak várni kellett, hogy mire harapnak rá a Kepler irányítói: mi az, ami megvalósítható, illetve mi az, ami eladható majd a NASA értékelő bizottságának.

A K2 előlép

A bejelentés végül a 2. Kepler Tudományos Konferencián történt meg 2013 novemberében, itt mutatkozott be az új küldetés, amit egyszerűen K2-nek neveztek el. A név, legyen akármilyen egyszerű, többszörös szójátékot is rejt: a kettes egyszerre vonatkozik a Kepler második életére és a két megmaradt lendkerékre is. De utal a hegycsúcsra is, ami magasságra csak a második a Földön, mégis ezt tartják a legnagyobb kihívásnak mind közül. (Ha már a nevet így körbejárjuk, egy érdekesség: a Himalája melletti Karakorum hegylánchoz tartozó K2 csúcstól ezért hív-

ják egyszerűen K2-nek, mert még legközelebbi településekről sem látni, így a helyiek csak a vállukat vonogatták, amikor a földmérők a neve felől érdeklődtek. Így ragadt rajta a K(arakorum)2 megjelölés.)

Tudományos szempontból a K2 valóban hatalmas kihívást vázolt fel. A Kepler-űrtávcső örökre szakított az eredeti látómezővel: az új programban az ekliptika mentén képzeltek el számára rövid kampányokat. Ekkor, mint fentebb már kifejtettem, a látómezőt stabilan lehet tartani, egy-két naponkénti újraszabályozás esetén a csillagok csak néhány pixelt mozdulhatnak el a képen. Az újraszabályozás egyébként már létező eljárás volt: a lendkerekek négy napon át ellensúlyozták a távcső elmozdulását, majd visszaállították fordulatszámukat az eredeti szintre. Ekkor a rakétahajtóművek tartották pozícióban az űreszközt.

Egy-egy kampány 80-90 napig fog tartani, amiből 75 napon át ténylegesen mérési adatokat fog gyűjteni az űrtávcső. A kampányokat most nem fogja havi adatletöltés megszakítani, csak a mérések befejeztével olvassák ki a háttérát. Egy területen azonban csak 10-20 000 kiválasztott csillagot fog mérni a Kepler. Ez egy nagyságrenddel kevesebb, mint az eredeti, százötvenezres kapacitás, de a csökkentésnek több oka is van. Egyrészt most két és félszer annyi ideig gyűlnek a mérések a fedélzeten, másrészt a látómező egy-két pixelnyi lötyögése miatt nagyobb foltokat kell az egyes csillagok körül megőrizni [6] (5. és 6. ábra).

Még több tudományt!

Bár az eredeti mező elhagyása azzal jár, hogy a Kepler már nem lesz képes a távoli, apró bolygókat felfedezni, ez nem jelenti azt, hogy befellegzett az exobolygó-keresésnek. A kampányok hossza miatt 30-35 naposnál hosszabb keringési idejű bolygókat csak közvetett módon tud majd detektálni, de kárpótlásul olyan csillagok körül is keresgélhet, amelyek az eredeti mezőből hiányoztak. Feltérképezhet egy sor kö-

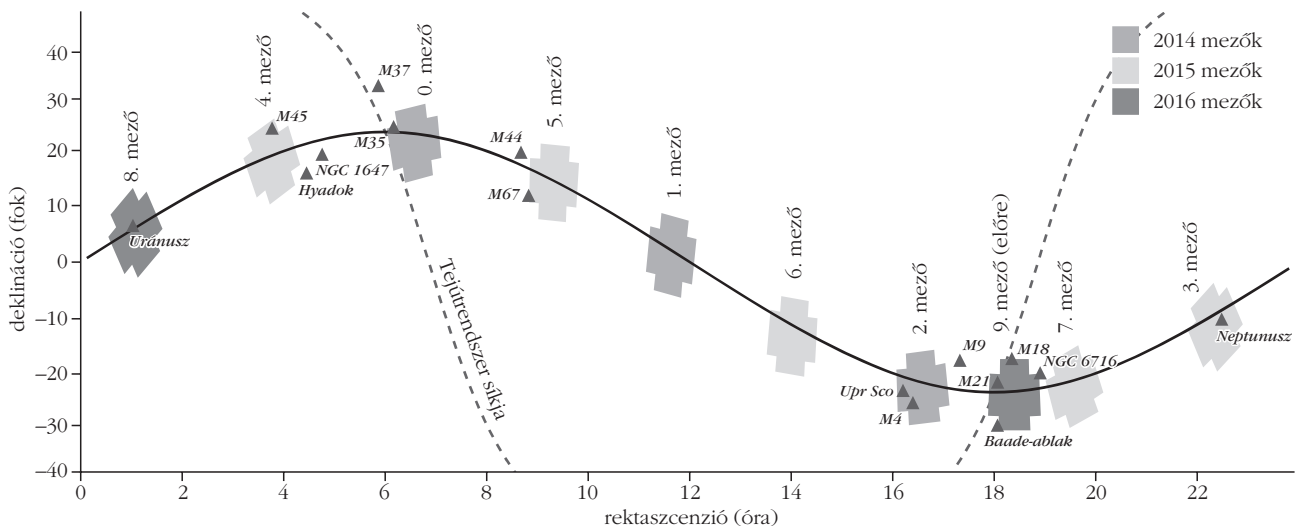
zeli, fényesebb csillagot, és ha talál körülöttük bolygókat, azokat sokkal könnyebb lesz más műszerekkel továbbvizsgálni, mint a sok halvány, távoli csillag körüli bolygójelöltet. Megkeresheti szomszédjainkat, a Nap közelében található, apró vörös törpecsillagok bolygóit. A vörös törpék elég halványak ahhoz, hogy egy 30 napos keringési idejű bolygó már a lakhatósági zónájukba essen. A 2017-ben induló TESS és CHEOPS űrtávcsövek pedig a hosszabb periódusú bolygókat sejtető rendszereket is ellenőrizhetik majd.

Az eredeti mezőben minden csillag felnőtt volt: fiatalabb, idősebb, de már teljesen kialakult. Az Ekliptika mentén azonban igen fiatal csillaghalmazok és csillagkeletkezési régiók is találhatóak. A K2 kiváló lehetőséget biztosít majd a bolygórendszerek fejlődésének vizsgálatára. Segíthet annak eldöntésében is, hogy a forró jupiterek, a csillagokhoz igen közel keringő óriásbolygók a csillagukhoz közel is keletkeztek-e, vagy csak később, már kifejődve kerültek oda.

A Kepler egyik nagyszerű és némileg váratlan eredménye volt, hogy szupernóvákat is sikerült megfigyelnie. A gyenge felbontás miatt ugyan a szupernóvák fényét összemérte a megfigyelt galaxisokkal, de a folytonos megfigyeléseknek hála, a modellek szempontjából oly lényeges kezdeti kifényesedést sikerült pontosan végigkövetni. A kutatók állítása szerint a Kepler egyedül több mérést készített a még fényesedő szupernóvákról, mint a Földről felfedezett összes robbanásról eddig sikerült. Az ekliptika mentén pedig még több felfedezésre számíthatunk. Rögtön az egyes számú látómező a Szűz és Oroszlán csillagképek határára fog esni, ahol százszámra található viszonylag közeli galaxisok is.

De a többi tervezett látómező is sok érdekességet rejt. A harmadikra a Neptunusz, a nyolcadikra az Uránusz esik, vagyis mindkét gázbolygó oszcillációit meg tudja majd figyelni a Kepler. Sok híres, közeli nyílthalmaz is feltűnik az egyes mezőkön: a negyedik a Fiastyúk és a Hyadok széle, az ötödiken a Jászol-halmaz (M44) széle, illetve az M67 jelenik meg. A nyílt-

6. ábra. A látómezők pozíciója az égbolton a K2 során. A fekete vonal az ekliptika, a földpálya síkjának vetülete. A Tejútrendszer síkjában fekvő és a galaxisunkból egyenesen kifelé néző kampányok váltják majd egymást. (Forrás: NASA Ames)



halmazok minden életkort lefednek majd 2-től 630 millió évig, sőt az M67 igazi matuzsálem lesz a maga 3,6 milliárd évével. A második és hetedik mező a Tejút közepe felé fognak tekinteni, az előbbi a híres ρ Ophiuchi csillagkeletkezési régió irányába. Ugyanitt több fényes gömbhalmaz (M4, M19, M80) is felbukkan, bár kérdés, hogy a Kepler nagyméretű pixelei mennyire olvasztják össze a sűrű gömbhalmazok közepén található sok ezer csillagot.

Mikrolencsék és parallaxisok

A tervezett utolsó terület lesz a legkülönlegesebb. A kilences számú mező esetében a Kepler nem háttal fordul majd a Földnek, hanem felénk fog nézni. A látómezőben bókászó, nagyon fényes Föld okozta szórt fény persze nem lesz jó hatással a fényességmérésre, de ezt ellensúlyozza a speciális térbeli helyzet előnye. Normál esetben ugyanis nem fogjuk látni, mit mér a Kepler: annyival lemaradva követi a Földet, hogy amikor nekünk háttal fordul, az általa befogott égiterrület a Földről épp eltűnik a Nap mögött, az esti szürkület fényében. Annyi előnye van ennek a konfigurációnak, hogy az adott látómező körülbelül akkor tűnik fel újra a hajnali szürkület előtt, amikor a feldolgozott adatok elérhetőek lesznek. Ha tehát valami érdekeset fedez fel a Kepler, egyből felkereshetik helyét az óriástávcsövek.

De visszatérve a kilencedik mezőhöz: ezt szimultán fogja látni a Kepler és mi is. A távcső a Tejút közepontja, a galaktikus dudor felé fog fordulni: itt nagyon sűrű a csillagháttér, és régóta kedvelt vadászmezejé ez a mikrolencsézést kereső programoknak. A mikrolencsézés az a jelenség, amikor a látóirányba eső csillag-bolygó páros pont jó helyen halad el, és egy háttércsillag fényét a gravitációjuk felénk fókuszálja. Ekkor néhány óráig, esetleg egy-két napig tartó fényesedést és halványodást látunk, amire a bolygó tulajdonságaitól függően gyorsabb plusz fényesedések rakódhatnak.

Pusztán földi megfigyelésekből gyakran csak bizonytalanul lehet megállapítani a lencséző objektumok távolságát és így a méretüket is. Így járt például az az égitest, ami talán az első exohold lehetett: a mérések azonban nem voltak elég pontosak annak eldöntésére, hogy egy közeli, szabadon lebegő bolygó-hold, vagy egy távolabbi, hagyományos csillag-bolygó páros okozta-e a lencsézést [7]. A Kepler elég messze van a Földtől ahhoz, hogy egészen más lencsézést lásson a bolygótól, mint a földi távcsövek, és így segítsen feloldani a méret- és távolságbeli bizonytalanságot [8].

A Kepler fő problémája, hogy nem őrzi meg a teljes látómező felvételét, csak kiválasztott csillagokét. Ezért a mikrolencsék megfigyelésekor gyakori rádiókapcsolatra lesz szükség: legalább hetente, de inkább néhány naponta értesíteni kell majd az űrtávcsövet, hogy épp melyik csillagnál látszik gyanús fel-fényesedés.

Lehet még egy javaslattal több?

Az új területekben az is a nagyszerű, hogy szinte csak a kutatók fantáziája szab határt a javasolt célpontoknak. A Kepler CCD-i fényes csillagokkal is elboldogulnak, egészen körülbelül 3 magnitúdóig, vagyis egy szabad szemmel jól látható csillag fényességéig. Alsó korlát hivatalosan nincs, de persze meg lehet becsülni, hogy miként romlik a fotometriai pontosság a halvány határ felé. Ennek ellenére egészen kreatív ötletek is felmerülnek. Csak a mi kutatóközpontunk két fura javaslattal is előállt. Az egyes számú mezőben található egy nagyon apró, sok sötét anyagot, de csillagokat szinte alig tartalmazó, ősi törpegalaxis, a Leo IV. Olyan nehezen felismerhető, hogy a Tejútrendszer ezen kísérőjéről, több társával együtt, csak 2005 óta tudunk. De azóta kiderült, hogy három RR Lyrae típusú, erős fényváltozást mutató csillag is található benne [9]. A három változó, illetve a néhány fényes vörös óriáscsillag lehetnek a Kepler első Tejútrendszeren túl megfigyelt csillagai (a külön kategóriát jelentő szupernóvákat nem számítva). Bár nagyon halványak, változásaik kimérése nem lehetetlen: ezeket a csillagokat is megfigyelésre javasoljuk a nyári mezőben.

Sokkal közelebb is találtunk célpontot: a Naprendszerben, a Neptunuszon túl található Kuiper-öv apró, jeges égitesteinek vizsgálatát is felvetettük. A Kepler éppen arra az égiterrületre néz, ahol ezek az égitestek lelassulni és visszafordulni látszanak az égen. Ebből kifolyólag mozgásuk viszonylag kevés (néhány száz) pixellel lefedhető lenne a 75 nap során. Bár ezek az apró égitestek is igen halványak, 20 magnitúdó körüliek, ennyi idő alatt igen pontosan kimutathatónak kell lennie forgási periódusuk, de akár alakjukra, akár a felszínen a legnagyobb sötét-világos foltok helyzetére is következtetni lehet majd az adatokból. A cikk írásakor viszont még kérdéses, hogy végül sikerül-e meggyőzni a Kepler irányítóit: áldozzanak ennyi pénzelt egy-két ilyen extrém égitestre.

A jövő zenéi: politikusok és trónkövetelők

A K2 jövője – a kézirat elkészültekor – még nincs biztosítva. A Kepler 2012-es, első meghosszabbítása 2+2 évre szól, egy 2014-ben esedékes felülvizsgálattal. Ha az űrtávcső továbbra is hibátlanul működne, az egyetlen veszélyforrás a NASA asztrofizikára fordítható keretének drasztikus megszorítása lehetne. Ezt a jelek szerint sikerült elkerülni: a teljes törvényhozás által támogatott terv 668 millió dollárt irányoz elő, húszmillióval többet, mint amit a Fehér Ház eredeti javaslata tartalmazott. A K2 azonban hiába használ létező hardvert, lényegében egy teljesen új tudományos programot vázol fel. Ezért a Kepler irányítóinak 2014 áprilismájusában meg kell győzniük a felülvizsgálati bizottságot (Senior Review), hogy a K2 küldetés érdemes a pénzügyi támogatásra.

Akárhogy is lesz, nem maradunk teljesen Kepler-mérések nélkül: még az első meghosszabbítás kereté-

ből levezényelnek egy előzetes kampányt 2014. márciustól májusig. Az űrtávcső nem volt teljesen tétlen az utóbbi időkben: december óta többször is végeztek vele tesztméréseket, hogy finomhangolják a pozíciótartást és teszteljék a fotometriai pontosságot. A legutóbbi próbamérések alapján mindössze 3-4-szeres romlás várható a fotometriai pontosságban. Tekintve, hogy a Kepler nagyságrendekkel lekörözte az összes többi hasonló, földi és űrbéli vetélytársát, a csökkenés ellenére is a legpontosabb fényességmérő eszközünk marad.

Az elkövetkező években azonban ez meg fog változni: 2017-ben két új űrtávcső váltja fel a Keplert. Az amerikai TESS ugyan nem lesz pontosabb nála, de az egész égboltot feltérképezi majd, hogy a fényes, közeli csillagok közeli bolygóit azonosítsa. Vele szemben az ESA CHEOPS űrtávcsöve nem keresni fog, hanem találni: az ismert exobolygórendszereket fogja igen nagy pontossággal felmérni, hogy többet tudhasunk meg az ottani égitestekről. A tudományterület újabb megreformálása a húszas években jön el: a várhatóan 2018-tól üzembe álló, óriási James Webb Space Telescope-től azt várjuk, hogy egy sor exobolygóról részletes adatokat szolgáltatson, például a légkörük összetételét. A Kepler örökségét a 2024-re tervezett európai PLATO fogja továbbvinni: sokkal nagyobb égiterrületen, nagyobb pontossággal keresi majd a Földhöz hasonló fedési exobolygókat.

Ezekből az űrprogramokból a magyar kutatók sem maradnak ki. Az elmúlt években jelentős tudásbázis alakult ki az itthoni csillagászati műhelyekben: exoholdak, kettős és többes csillagrendszerek és klasszikus változócsillagok kutatásában is a világ élvonalához tartozunk. A TESS-hez mint NASA-misszióhoz európai kutatóintézetek hivatalosan nem csatlakozhatnak ugyan, de a terv az, hogy egyszerűen átmentjük a Keplernél bevált struktúrát, és egy újabb nemzetközi konzorciumot formálunk. Az európai űrprogramokba viszont már betettük a lábunkat. A PLATO és a CHEOPS vezetésében is jelen vagyunk, a döntéshozó tanácsokban Szabó Róbert, illetve Kiss László képviseli hazánkat. A CHEOPS pedig egy kicsiny részben magyar űrtávcső is lesz: az Admatis Kft. fogja elkészíteni a CCD-kamerák hűtését biztosító alrendszert. A jövő tehát fényesnek tűnik a Kepler, az űrfotometria és a magyar csillagászat számára is.

Irodalom

1. Batalha N., Rowe J. F., Bryson S. T. et al., *ApJS* 204 (2013) 24.
2. <http://keplerscience.arc.nasa.gov/TwoWheelWhitePapers.shtml>
3. Molnár L., Szabó R., Kolenberg K. et al., 2013, arXiv:1309.0740
4. Szabó R., Molnár L., Kołaczowski L. et al., 2013, arXiv:1309.0741
5. Guzik J., Bradley P. A., Szabó R. et al., 2013, arXiv:1310.0772
6. Howell S., Sobeck C., Haas M. et al., 2013, *PASP*, beküldve, arXiv:1402.5163
7. Bennett D. P., Batista V., Bond I. A. et al., 2013, arXiv:1312.3951
8. Gould A. & Horne K., 2013, arXiv:1306.2308
9. Moretti M. I., Dall'Ora M., Ripepi M. et al., *ApJ* 699 (2009) L25.

FEMTOSZEKUNDUMOS ELEKTRONKOHERENCIÁK SZEREPE ULTRAGYORS DINAMIKAI FOLYAMATOKBAN

Vibók Ágnes – Debreceni Egyetem, Elméleti Fizikai Tanszék

Halász Gábor – Debreceni Egyetem, Információ Technológiai Tanszék

A huszadik század végére a femtoszekundumos lézerimpulzusok kifejlesztésével lehetővé vált az úgynevezett pumpa-próba kísérletek kidolgozása, amelyek segítségével molekuláris rendszerek atommagjainak kontrollálását sikerült megvalósítani. A kísérleti apparátus tökéletesedésével párhuzamosan a gerjesztett elektronállapotokat leíró, úgynevezett „multi-reference” típusú elektronszerkezeti módszerek is széleskörben elterjedtek, és így lehetővé vált a kísérleteket támogató, azokat előkészítő, illetve értelmező számítások elvégzése is. A femtoszekundumos fotokémia megalapozásáért *Abmed Zewail* 1999-ben kémiai Nobel-díjat kapott [1].

Ezen diszciplína keretein belül azonban nem sikerült megoldani a szelektív kötésfelhasználás problémáját.

A kutatás a TÁMOP 4.2.4.A/2-11-1-2012-0001 Nemzeti Kiválóság Program című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Ugyanis az intramolekuláris vibrációs legerjesztődés gyors és domináló hatása miatt a kívánt kötés felhasználására célzottan bevitt energia – még mielőtt a kötést felszakította volna – gyorsan és hatékonyan szétszóródott a rendszer rezgési módusain.

Körülbelül 10-15 évvel később, az attoszekundumos lézerimpulzusok megjelenésével újra előtérbe került ez a probléma, de most a magok helyett az elektronokat célozták meg. Mozgásuk, amely 2-3 nagyságrenddel gyorsabb a magokénál, attoszekundumos lézerimpulzusok segítségével már megfigyelhetővé, sőt szabályozhatóvá vált. Ez utóbbi kutatásban és fejlesztésben *Krausz Ferenc* és csoportja úttörő szerepet vállalt [2, 3]. Munkájuk nyomán kézzelfogható közelségbe került az atomok, molekulák és szilárdtestek belsejében végbemenő elektromos folyamatok megfigyelése és kontrollálása.

A fenti rendszerek belső dinamikájának vizsgálatában kulcsfontosságú szerepet játszik az elektronkoherencia. Ennek létrehozása és vizsgálata atomokban