

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

LXI. évfolyam

7–8. szám

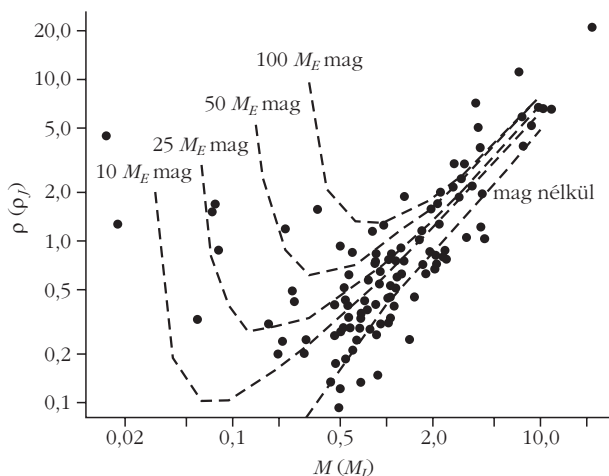
2011. július–augusztus

ÚJDONSÁGOK AZ EXOBOLYGÓK VILÁGÁBÓL

Szabó M. Gyula, Simon Attila – MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézet, Budapest
Szalai Tamás – SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék, Szeged

Az exobolygók vizsgálata a csillagászat húzóágazatává vált az elmúlt években [1–4]. Különösen fontos csoportot alkotnak a *tranzitos* bolygók, amelyeket – a pályasíknak a megfigyelő számára kedvező helyzetéből adódóan – periodikusan átvonulni látunk csillaguk korongja előtt. A nagyobb bolygók esetében 1-2 százalékos fényváltozás detektálására van lehetőség, míg egy Föld méretű bolygónak egy Naphoz hasonló csillag előtt való átvonulása mindössze 0,01%-nyi intenzitáscsökkenéssel jár. A fénycsökkenés mértékéből meghatározható a bolygó mérete, a közös tömegközéppont körül keringő csillag látóirányú sebességének változásaiból pedig kiszámítható a bolygó tömege is.

1. *ábra.* Az exobolygók tömeg-sűrűség eloszlása a Jupiter tömegének és sűrűségének egységében; a pontok jelzik az ismert exobolygókat. A szaggatott vonalak a feliratok szerinti kezdeti magtömegű, az abszcisszának megfelelő össztömegű egyensúlyi átlagsűrűségeket mutatják. Figyeljük meg, hogy a légkör kezdetben csökkenti az átlagsűrűséget, majd ahogy növekszik az atmoszféra tömege (nyomása, gravitációja, sűrűsége), az átlagsűrűség ismét nagyra nőhet.

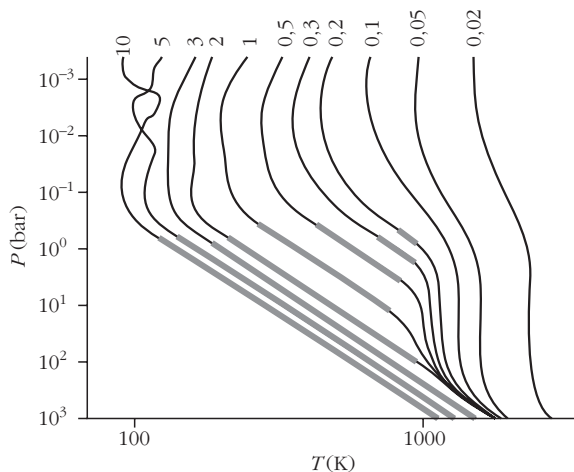


Pontosabban, a keringési periódusból és a tranzit időtartamából közvetlenül a csillag sűrűsége határozható meg (ennek bizonyítása szép középiskolás versenyfeladat lehetne). A fedés mélysége alapján becsülhető a *relatív sugár* (a csillag és bolygó sugarának aránya), a sebességamplitúdók alapján számítható a tömegarány, ebből a bolygó sűrűsége is kiszámítható. A bolygó paramétereinek kiszámítása ezután további, megfelelő csillagmodelleken alapul (1. *ábra*). (A gyakorlatban természetesen nem az imént leírt „receptet” számoljuk végig, hanem a fenti megfontolásokat is magukban foglaló, a fényváltozást leíró egyenletek paramétereit – időtartam, relatív sugár, tranzit-időpont, ütközési paraméter – közvetlenül illesztjük az egész megfigyelt fénygörbére, a bolygó paramétereit pedig az eredményből számoljuk visszafelé.)

Exobolygók és gazdacsillagaik

A bolygó tömegének és sűrűségének ismeretében információkhoz juthatunk a belső szerkezetet illetően, szerencsés esetben pedig – spektroszkópiai mérésekből – a felsőléggör legfontosabb alkotóelemeit is meg lehet határozni. Az exobolygók atmoszférájának vizsgálatára már léteznek jól használható modellek (kis módosításokkal a csillaglégkörökre vonatkozó modelleket kell alkalmazni); ezekben feltétlenül figyelembe kell venni az erős külső megvilágítást, valamint – az óriásbolygók esetében – a bolygó lassú, milliárd éves időskálán zajló összehúzódását is – ezeknél a planétáknál ez a belső hőtermelés forrása – (2. *ábra*). Fontos eltérés a csillagokhoz képest, hogy a bolygónak

A kutatásokat az MTA Lendület fiatal kutatói programja, az OTKA K76816, K83790 és MB08C 81013 számú pályázata támogatta.



2. ábra. Mag nélküli, Jupiter-tömegű bolygó felsőlégkörének nyomás-hőmérséklet diagramjai. Az atmoszféramodellek egy Nap-analóg csillagtól adott távolságra alakulnak ki, a távolságértékeket a görbék fölötti számskála mutatja csillagászati egységben. Vastagított, szürke vonal jelzi a konvektív instabilitás tartományát.

lehet szilárd magja, ám ennek tömege egyelőre nem meghatározható, így szintén illesztendő paraméter. Ha megfelelő pontossággal ismerjük a csillag luminozitását és életkorát, akkor egy óriásbolygó belső szerkezetének modellezése lényegében két paraméterre – a szilárd mag tömegének és az össztömeg meghatározására – redukálódó probléma. Kisebb bolygók esetében (amikor kevésbé kiterjedt a légkör) más paraméterre lehet szükség: itt a bolygó vas- és kőzettartalma, jégtartalma és légkörének tömege léphet fel modellezendő paraméterként (a szóhasználat kissé leegyszerűsített, ugyanis az exoplanetológiában minden illékony, szerves vagy szervesetlen, nem gáz halmazállapotú anyagot jégnek hívunk, akkor is, ha az anyag történetesen cseppfolyós halmazállapotú).

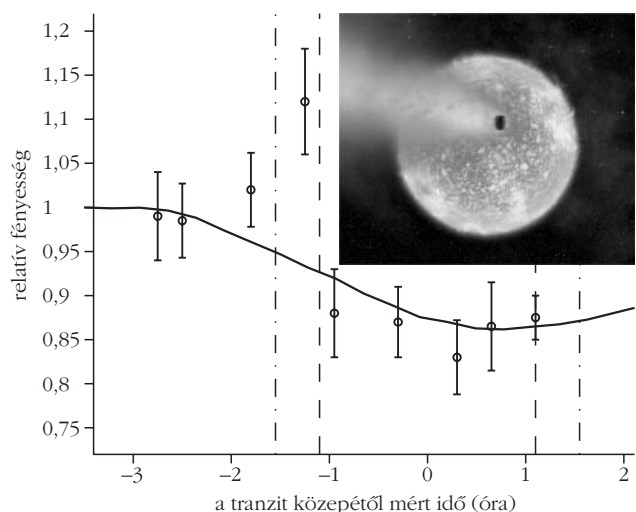
Jelenleg már csaknem hatszáz, más csillag körül keringő bolygót ismerünk. Ezek többsége a Jupiterhez hasonló gázóriás; a Földünkhöz hasonló méretű planéták felfedezése egyelőre még várat magára. Ezen bolygók közül mintegy 130 tranzitot, amelyek túlnyomó többsége „forró” típusú (a definíció még kissé bizonytalan, általában a 0,05 csillagászati egységnél kisebb sugarú pályán keringő bolygókat sorolják ide, de egyéb konvenció is lehetséges). Ha meg tudjuk figyelni egy forró exobolygó eltűnését a csillag mögött (*másodlagos átvonulás*), úgy lehetővé válik a bolygó saját luminozitásának meghatározása, ami végeredményben a hőmérséklet és az albedó kiszámítását teszi lehetővé. A forró gázóriásokat ezen megfigyelések szerint két nagy csoportra lehet osztani. A nagyjából 1000–1500 K hőmérsékletű forró jupiterek alkotják az úgynevezett pL csoportot: ezeknél jelentős radiális konvekció alakul ki, és felsőlégkörüket sűrű felhők alkotják (az albedójuk nagy, hasonlóan a Jupiteréhez és a Szaturnuszéhoz). A másik, úgynevezett pM csoport tagjainak felsőlégkörében sztratoszféra, azaz hőmérsékleti inverzió alakul ki, ami megállítja a konvekciót (2. ábra), ilyen planéta a Naprendszerben nincs. Ebbe a csoportba a 2000 K-nél magasabb effektív hőmérsékletű bolygók tartoznak, amelyek legin-

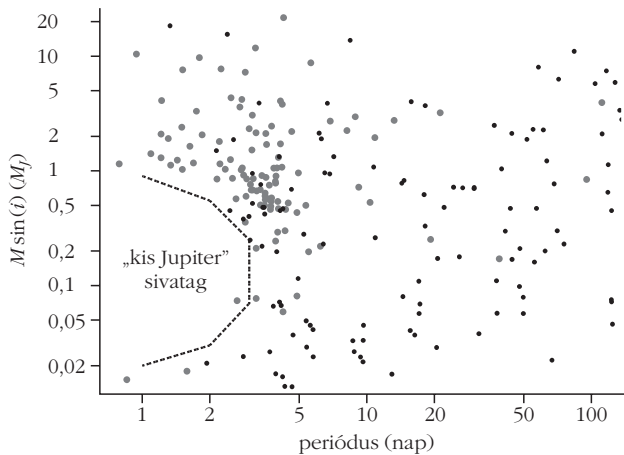
kább az M típusú törpecsillagokra hasonlítanak (innen az elnevezés). Ezen bolygók esetében nincs felhőképződés, a légkör jó közelítéssel abszolút fekete test, és a felsőlégköri rétegben mélyebbre „látunk”. A csillag közelsége miatt ezeknek a bolygóknak is viharos a légköre, de ebben az esetben a sztratoszférában inkább zonális irányú szelek jellemzőek. Néhány exobolygó „vegyes” képet mutat: a csillag felé eső oldalon forróbb (itt a légkör a pM csoportra jellemző), az éjszakai oldalon pedig hűvösebb, nagyobb albedójú terület alakul ki. Ezekben az esetekben a forró folt gyakran kissé eltérő irányba esik, mint amerre a csillag látszik a bolygó felől – ezen aszimmetriák oka egyelőre tisztázatlan.

Néhány forró jupiter légköre folyamatosan elpárolog, mert a csillagszél és a sugárnyomás elfújja a nagy besugárzástól jelentősen kitágult bolygó lazán kötött felsőlégkörét. Az ilyen bolygók körül jelentős méretű, ritka gázokból és plazmából álló felhő alakul ki, amelyet például a hidrogén Lyman-alfa vonalán végzett megfigyelésekkel mutathatunk ki. A HD 209458 bolygó esetében a tranzit mélysége Lyman-alfa hullámhosszon a teljes intenzitás 0,12 része, vagyis a bolygó körül kialakult hidrogénfelhő olyan mértékben kiterjedt, hogy a csillag fényének 12%-át elnyeli! (Pontosabban, a Lyman-alfa hullámhosszon kisugárzott energia 12%-a hidrogén ionizálására fordítódik.) Ennél a rendszernél teljes elnyelést feltételezve is a csillag méretének harmadánál kiterjedtebb felhőt kapunk (3. ábra)!

Mostanában kezdik nagy számban felfedezni az úgynevezett forró neptunuszokat, a csillagaikhoz hasonlóan közel keringő, de a forró jupitereknél kisebb tömegű égitesteket. Az eddig azonosított exobolygók eloszlása azt mutatja, hogy forró neptunuszokból több van, mint forró jupiterekből. Mindez a keringési periódusoktól függetlenül igaz: a 3–100 nap tartományon nagyjából végig hasonlóan tűnik a forró jupiterek és forró neptunuszok becsült aránya, az egyszerű bolygókeletkezési elméletekkel összhangban.

3. ábra. A HD209458 tranzitja Lyman-alfa hullámhosszon. A jelentős fényelnyelés az elpárologó bolygó kiterjedt hidrogénburkának tulajdonítható (az inzertben látható fantáziarajznak megfelelően).

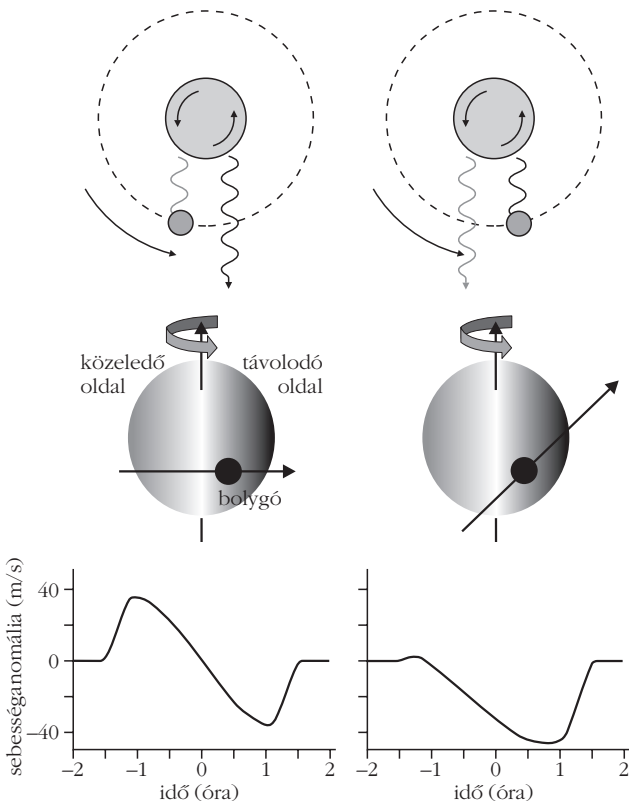




4. ábra. A tranzitos exobolygók periódus–tömeg eloszlása (nagyobb, szürke pontok), kiegészítve a radiálissebesség-mérések által detektált periódus – minimális tömeg eloszlással (kisebb, fekete körök).

Az MTA KTM Csillagászati Kutatóintézet Lendület-csoportjának tagjai, Szabó M. Gyula és Kiss L. László frissen megjelent cikkükben [5] tranzitos exobolygók eloszlását elemezve egy meglepő jelenségre hívják fel a figyelmet: három napnál rövidebb keringési periódusú, Jupiternél kisebb tömegű bolygót alig ismerünk, annak ellenére, hogy a forró jupiterek „hemzsegnek” ezen a tartományon. A tranzitos exobolygók tömegét a keringési periódus függvényében ábrázolja

5. ábra. A Rossiter–McLaughlin-jelenség. Fent és középen a csillag előtt átvonuló bolygó a csillag forgástengelye és egyenlítője felől nézve. Lent: a sebességszelektív kitakarás miatt fellépő anomália a vonalak „átlagos” sebességében. Figyeljük meg, hogy az eltérő geometriai konfigurációkhoz eltérő sebességgörbék tartoznak. Így a méréssel lehetővé válik a bolygó pályájának térbeli meghatározása.



egy jól körülhatárolt üres tartomány, a „kis Jupiter sivatag” (sub-Jupiter desert; az elnevezés Jupiternél kisebb tömegű forró jupitereket és Neptunusznál nagyobb méretű forró neptunuszokat takar) rajzolódik ki, amely éles ellentétben áll a három napnál hosszabb periódusok esetén megfigyelt eloszlással, és külön magyarázatot igényel. A jelenségre korábbi vizsgálatok is utaltak, de mostanra gyűlt össze annyi megfigyelés, amelyek alapján egzakt statisztikai módszerekkel kijelenthető, hogy a „lyuk” magában az eloszlásban van benne, és nem a véletlen adateloszlás rossz tréfájának áldozatait vagyunk. Ráadásul a bolygók eloszlása a csillagok körül erősen sűrűségfüggő is. Lényegében úgy tűnik, hogy a kisebb sűrűségű és tömegű exobolygókat kitiltja a csillag közeléből egy olyan folyamat, amely nem hat a kicsit nagyobb sűrűségű forró jupiterekre és a nagy sűrűségű, de kis tömegű szuperföldekre sem.

A szakirodalomban több alternatívát is közöltek a jelenség magyarázatára. Lehet, hogy a kis jupiterek gyorsan elpárolognak a csillag közelében, hiszen légkörük gravitációsan kevésbé kötött. A forró jupiterek is párolognak, de a párologási ráták lényegesen kisebbek, így a gázóriások hosszabb ideig bírják ki stabilan a csillag közelségét (4. ábra). Létezik azonban egy mind jobban terjedő, ugyanakkor bonyolultabb magyarázat. Eszerint a kis jupitereket már a bolygókeletkezés korai szakaszában, a protoplanetáris korong evaporációjának időszakában kitiltja a korong árapályhatása (pontosabban a korong belső peremének árapály-csapdázása, amely ekkor kifelé vándorol) a csillagok közvetlen közeléből, miközben a nagy tömegű bolygókra ez a folyamat nem hat.

Spektroszkópiai megfigyelésekkel a bolygó pályájának a csillag forgástengelyéhez mért szögét is meg lehet határozni. A mérés azon alapul, hogy az átvonuló bolygó a tranzit során a csillag különböző radiális sebességgel mozgó részeit takarja ki, ami az átlagos radiális sebesség jellegzetes torzulását okozza (Rossiter-McLaughlin-effektus – 5. ábra). A megfigyelések arra utalnak, hogy a forró jupiterek jelentős része (nagyjából harmada) a csillag egyenlítőjéhez nagy szögben hajló pályán kering, és nem ritka a retrográd keringés sem. A megfigyelés rendkívül meglepő, és egyelőre nem is sikerült megnyugtatóan magyarázni. Különös, bár statisztikailag egyelőre csak valószínű feltételezés, hogy a korai, A-F színképtípusú csillagok hajlamosak nagy inklinációjú pályán keringő forró jupitereket „tartani”, míg a Naphoz nagyjából hasonló vagy hűvösebb csillagok nem igazán [6]. A jelenséget talán bimodális bolygókeletkezéssel, vagy egzotikus, árapályerők által irányított későbbi pályafejlődéssel lehet magyarázni.

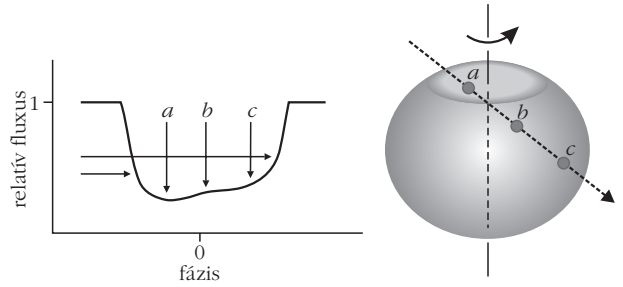
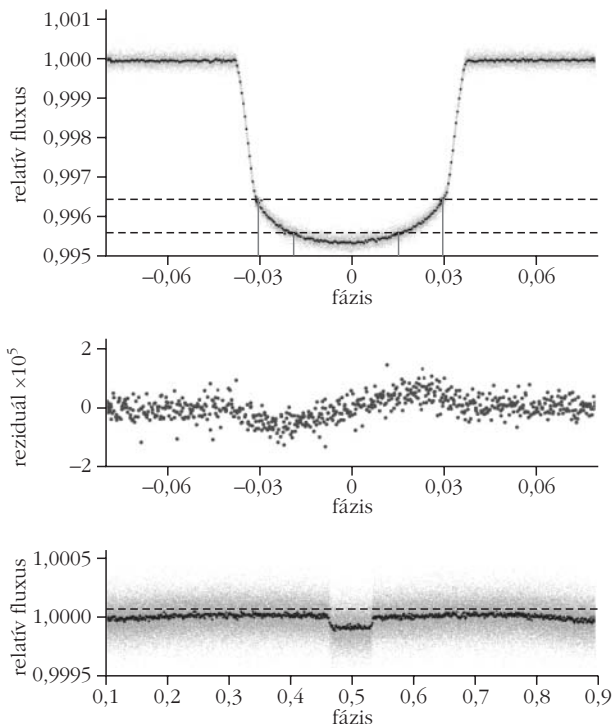
A gyorsan forgó csillagok alakja a centrifugális erők miatt ellapul, az egyenlítő távolabb, a pólusok közelebb kerülnek a csillag magjához. Így a csillag pólusvidékei magasabb hőmérsékletűek lesznek, mint az egyenlítő. Az ilyen csillag előtt ferde pályán elhaladó bolygók és kis méretű kísérők fényváltozása jellegzetes torzulást mutat, hiszen az átvonulás megfelelő részén, ahol a forróbb terület előtt tartózkodik a bolygó, a kita-

kart fény több, így az átvonulás fénygörbéjében egy lokális gödör keletkezik – némiképpen emlékeztetve a Rossiter–McLaughlin-jelenségre –, de itt tisztán fotometriai effektusról van szó. Ha ilyen fénygörbetervezést látunk (6. ábra), abból egyszerre következtethetünk a csillag gyors forgására és a bolygó ferde pályájára – az utóbbi konklúzió a bolygókeletkezési és vándorlási folyamatok nagyon fontos, ám eddig még nem pontosan tisztázott szerepű nyomjelzője.

Ezt a jelenséget elméleti megfontolások alapján 2009-ben jósolta meg *J. W. Barnes* [7], ám mostanáig nem sikerült megfigyelni. Az első ilyen típusú rendszer azonosítása az MTA CSKI Lendület-csoportjának eredménye. A detektálás a Kepler-űrtávcső nyilvános adatainak átnézésén alapul, amelyet kiegészítettek egy németországi távcsővel készített nagy felbontású színekkel (*Holger Lehmann*, Thüringiai Csillagvizsgáló, Németország), valamint a legnagyobb magyar távcső, a Piskés-tetői 1 méteres RCC-teleszkóp nagy szögfelbontású megfigyeléseivel. Külön kiemelendő, hogy a Kepler-űrtávcsővel végzett felfedezések megerősítésében az 1 méteres távcső nagy szögfelbontású üzemmódja egy év alatt már másodszer játszott kulcsfontosságú szerepet: az áprilisban a *Science* folyóiratban bejelentett Trinity-rendszer [8] természetének tisztázása is e távcső feladata volt.

A „rendkívül költői”, KOI-13.01 jelű égitestet a Kepler-űrtávcső által talált bolygójelöltek között jelentették be 2011 februárjában. A magyar kutatócsoport a fénygörbe aszimmetriájára felfigyelve kiderítette, hogy egy száz éve ismert, kissé eltérő fényességű komponen-

7. ábra. Felül: a KOI-13 tranzit fázisdiagramja. A vonalak mutatják a jellegzetes fénygörbetervezéseket. Középen: A fénygörbe eltérése egy szimmetrikus mintagörbétől. Lent: A tranziton kívüli fényváltozás is aszimmetrikus, ami változó megvilágításra utal. A mellékminimum mélysége alapján a kísérő hőmérséklete mintegy 3150 kelvin.

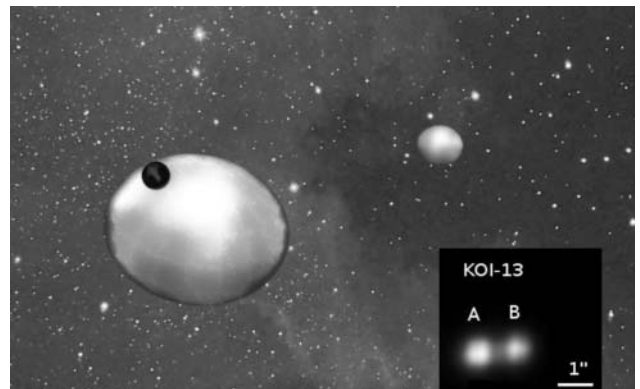


6. ábra. Torzulások egy gyorsan forgó csillag előtt áthaladó bolygó fénygörbéjén. A jobb oldali ábra szemlélteti a forgás miatt a pólusoknál kialakuló forró foltokat.

sekből álló szoros kettőscsillag egyik tagja körül kering a kísérő (7–8. ábra). A felfedező cikkben megjelent lábjegyzet szerint a Kepler-képező egyetlen pixelére két csillag fénye esik, de az nem derült ki, hogy a rendszer hogyan néz ki pontosan, és hogy a Kepler adatait korrigálták-e a zavaró fényre. Egy tranzit nagy szögfelbontású megfigyelésével, valamint a Kepler-adatok *Szabó Róbert* által végzett „trükkös” újradenkálásával kiderült, hogy a kísérő a kettős fényesebb csillaga körül kering. A kutatók azt is kimutatták, hogy a két csillag fizikai kettőst alkot, mert a tagok helyzete 100 év alatt nem változott észrevehetően (együttmozgó kettős). A csillagok gyors forgását időközben a Thüringiai Csillagvizsgáló spektroszkópiai megfigyelése is megerősítette. A csillagokra modellt illesztve és a Kepler adatait a halványabb csillag fényének figyelembevételével újradenkálva kiderült, hogy két, a Napnál 23-szor, illetve 30-szor fényesebb csillag alkotja a rendszert, amely tőlünk 1800 fényévre helyezkedik el. A kísérő mérete a Jupiter méretének 2,2-szerese, ami alapján inkább barna törpének tekinthető, nem pedig „valódi” bolygónak [9].

Végeredményben tehát egy olyan rendszert kell elképzelnünk, amelyben két gyorsan forgó, kissé lapult, forró, nagy méretű csillag kering egymástól nagyságrendileg ezerszeres Nap–Föld-távolságban; a fényesebb csillag körül pedig erősen inklinált (ferde pályán kering egy barna törpe kísérő, mégpedig a

8. ábra. A KOI-13 rendszerrel alkotott lehetséges elképzelés. Az inzert az 1 méteres RCC-távcsővel készített képet mutatja a területről. Az ellipszoidális alakú, gyorsan forgó csillagok a rendszer A és B jelű komponensei; a csillagok elnyúltsága és intenzitásterképe az Altair interferometriai képén alapul. A KOI-13.01 kísérő az A komponens közvetlen közelében kering.

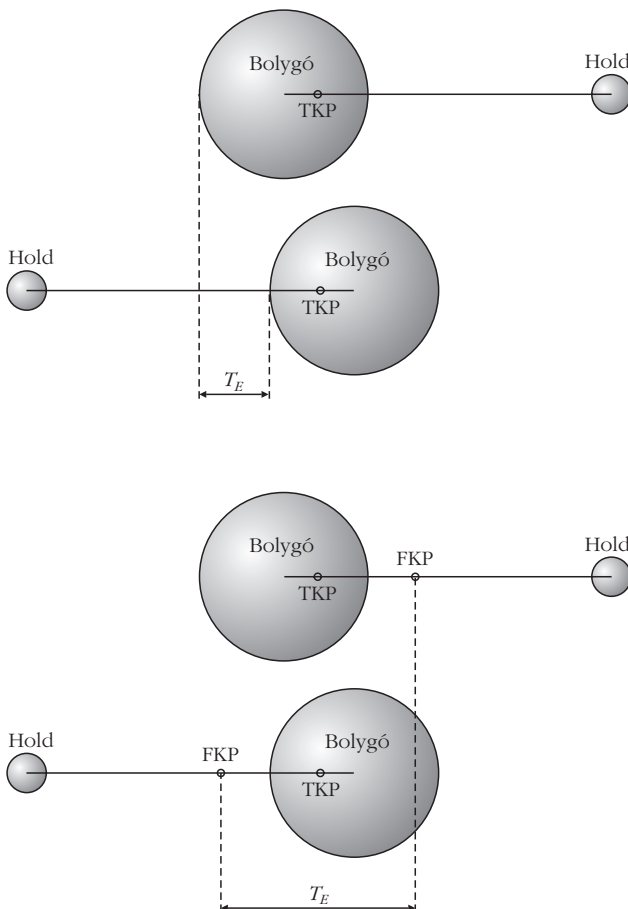


csillag sugarának mindössze hatszoros(!) távolságában. Maga a rendszer is minden szempontból unikális: ilyen forró csillag körül egyáltalán nem ismertünk még kísérőt, ráadásul a kísérő maga is egy „forró bar-na törpe” lehet – ez szintén egyedülálló.

Exoholdak

Különösen merész állításnak hangzik, hogy egyes kutatók már a távoli bolygóholdak kimutatásának lehetőségéről elmélkednek. Ám az ilyen jellegű vizsgálatok már korántsem a víziók, hanem a tudományosan megalapozott eljárások kategóriájába esnek. A távoli világok bolygóholdjainak felfedezése különösen izgalmas lenne, hiszen saját Naprendszerünkben is számos példát látunk arra, hogy milyen egzotikus világok rejtezhetnek egy-egy bolygó „udvartartásában”. A Jupiter Io nevű holdján aktív vulkáni tevékenység figyelhető meg. Egyes holdak (a Jupiter körül keringő Europa és Callisto, a Szaturnusz körüli Enceladus vagy a Neptunusz körüli Triton) esetében felszín alatti vízóceán lehet, míg

9. ábra. Holdak kimutatására alkalmas két lehetséges mérés. A bolygó és a hold közös tömegközéppontját TKP jelöli, a bolygó keringése e pont körül kimutatható a bolygó tranzitidőpontjainak változásából. Hasonló lehetőség a kompozit fénygörbe (bolygó és hold együtt) súlyvonalának (centroidjának) megfigyelése, amely egybeesik egy, a térben elhelyezhető fotometriai középpont tranzitjával (FKP). Mivel FKP is TKP körül kering, a fénygörbe-centroidok is időpont-eltolódást mutatnak.



a Szaturnusz Titan nevű kísérőjét vastag légkör borítja, felszínén pedig metánfolyók vannak. Földünk Holdja ránézésre nem ennyire különleges, de nagyon fontos szerepe van bolygónk forgástengelyének stabilizálásában, így az élet kialakulásában és fennmaradásában is. Ezért az exoholdak jövőbeli felfedezése további változatos égitestek megismerését, vagy akár életre utaló jelek kimutatását is maga után vonhatja.

D. Williams modellszámításai [10] alapján az infravörös tartományban végzett megfigyelések során jó esély kínálkozik bolygó-hold rendszerek kimutatására. Exoholdak keresésére az infravörös hullámhossztartomány a legmegfelelőbb, mivel a legfeljebb néhány száz fokos testek hőmérsékleti sugárzásának zöme ebbe az intervallumba esik. Ezek a jelek nem túl erősek, de elemzésük révén még így is lehetővé válhat a bolygó kísérőinek kimutatása, különösen a Földéhez hasonló, légkör nélküli holdak esetében. Ezen égitestek felszíni hőmérséklete ugyanis rendkívül dinamikus módon változik attól függően, hogy az adott terület éppen a nappali vagy az éjszakai oldalon van-e (Holdunk esetében az értékek körülbelül -220 és $+130$ °C között változnak). A hold nagy hőmérséklet-ingadozása apró, de periodikus jelként észlelhető az infravörös sugárzásban.

A Szegedi Tudományegyetemen és az MTA KTM Csillagászati Kutatóintézetben dolgozó kutatók egy csoportja – Szabó M. Gyula, Szatmáry Károly, Simon Attila – egy másik módszerrel történő exohold-detektálás lehetőségét vizsgálják [11]. Ötletük a már említett tranzitmódszerre épül. Az exoholdak detektálásának lehetősége a kísérőnek a bolygóra gyakorolt gravitációs vonzóerején alapul, ez a hatás pedig leginkább akkor figyelhető meg, ha a hold tömege relatíve nagy a planétaéhoz képest. Ugyanakkor a bolygóátvonulások során felvett fénygörbékben annál nagyobb arányú a fényességcsökkenés (és annál jobban vizsgálható rajtuk a holdak hatása), minél nagyobb a fedést okozó planéta. A feltételek alapján úgy tűnik, hogy a Szaturnuszhoz hasonló, alacsony átlagsűrűségű óriásbolygók kísérőinek kimutatására nyílnak először esélyek. A magyar csoport modellszámításai alapján, ha a hold is kering a bolygó körül, apró időpont-eltolódások jelennek meg a fedési fénygörbékben (9. ábra). A vizsgálatok szerint egy Földre hasonlító bolygó megtalálása esetén körülbelül 20% eséllyel lehet majd detektálni egy esetleg ott lévő, Holdunkhoz hasonló nagyságú kísérőt. Az eredményeket D. Kipping és munkatársai [12] is megerősítették: számítógépes szimulációkon alapuló eredményeik szerint a Kepler-úrtávcső érzékenysége elegendő lehet a Földünknél akár ötször kisebb tömegű bolygókísérők detektálásához is.

Összehasonlításképpen meg kell jegyeznünk, hogy a Naprendszerben lévő holdak jócskán alatta vannak ennek a határnak: bolygórendszerünk legnagyobb holdja, a Jupiter rendszerében lévő Ganymedes negyvenszer, míg a Hold nyolcvanszor kisebb tömegű planétánknál; de még bolygószomszédunk, a Mars tömege is csak nagyjából egy tizede a Földének. Mivel azonban tudjuk, hogy más naprendszerekben a Jupiternél jóval nagyobb tömegű bolygók is találhatóak, nem lehet kizárni a Mars-

nál nehezebb holdak létezését sem. Az Európai Űrügynökség tervezett új űrobszervatóriuma, a PLATO teljesítménye már elegendő lehet egy 0,4 Föld-méretű exohold kimutatására is – ebbe a mérettartományba pedig már beleesik a Naprendszer 2-3 legnagyobb holdja! Ha a projekt zöld utat kap, minden bizonnyal ki fogja deríteni, hogy mi újság más naprendszerek bolygói körül – főleg a forró jupiterek és forró szuperföldek kísérőire remélhető megbízható statisztika. A tervezett űrtávcsöves programban egyébként jelen cikk első szerzője vezeti az exohold-programot.

Irodalom

1. Szatmáry Károly: Exobolygók. *Magyar Tudomány* (2006/8) 968–979.
2. Szatmáry Károly: Mindentudás az iskolában – Bolygók mindenütt. *Fizikai Szemle* 57/12 (2007) 443.
3. Szabó Róbert: Bolygóaradatok és asztroszeizmológia – Elindult a Kepler-űrtávcső. *Fizikai Szemle* 59/4 (2009) 121.
4. Futó Péter: A Kepler-forradalom. *Fizikai Szemle* 61/3 (2011) 87.
5. Szabó M. Gyula, Kiss L. László: A Short-period Censor of Sub-Jupiter Mass Exoplanets with Low Density. *Astrophysical Journal Letters* 727 (2011) 44.
6. Winn, Joshua N., Fabrycky, Daniel, Albrecht, Simon, Johnson, John Asher: Hot Stars with Hot Jupiters Have High Obliquities. *Astrophysical Journal* 718 (2010) 145.
7. Barnes, J. W.: Transit Lightcurves of Extrasolar Planets Orbiting Rapidly Rotating Stars. *Astrophys. J.* 705 (2009) 683.
8. Különleges csillagrendszert fedeztek fel magyar csillagászok. *Fizikai Szemle* 61/5 (2011) 180.
9. Szabó M. Gyula, Szabó Róbert, Benkő József, Holger Lehmann, Mező György, Simon Attila, Kővári Zsolt, Hodosán Gabriella, Regály Zsolt, Kiss L. László: Asymmetric transit curves as indication of orbital obliquity: clues from the late-type dwarf companion in KOI-13. *Astrophysical Journal Letters* 736 (2011) L4.
10. Williams, D. M., Knacke, R. F.: Looking for Planetary Moons in the Spectra of Distant Jupiters. *Astrobiology* 4 (2004) 400.
11. Simon Attila, Szatmáry Károly, Szabó M. Gyula: Determination of the size, mass, and density of “exomoons” from photometric transit timing variations. *Astronomy and Astrophysics* 470 (2007) 727.
12. Kipping, D. M., Fossey, S. J., Campanella, G.: On the detectability of habitable exomoons with Kepler-class photometry. *Monthly Notices of the Royal Astron. Soc.* 400 (2009) 398.

ASZTROSZEIZMOLÓGIA ÉS CSILLAGKAVALKÁD A KEPLER-ŰRTÁVCSŐ OPTIKÁJÁN KERESZTÜL

Szabó Róbert, Derekas Aliz

MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézet, Budapest

A Kepler-űrtávcső fő célja más csillagok körül található, Földhöz hasonló bolygók, valamint bolygórendszerek felfedezése [1]. Az űrtávcső immáron több mint két éve gyűjt fotometriai adatokat az ég egy bizonyos, 105 négyzetfokos területéről (a teljes égbolt körülbelül 40 000 négyzetfok), mintegy 160 000 csillagot monitorozva folyamatosan. Több mint 1200 bolygójelölt bejelentésével – amelyek meglepően nagy része több bolygót tartalmazó (nap)rendszerben található –, a Neptunusz és szuper-Föld méretű bolygók magas gyakoriságának megállapításával, a lakhatósági zónában keringő bolygók felfedezésével a Kepler alig két év alatt teljesen átformálta az exobolygókról szerzett ismereteinket. Azonban az utóbbi időben nemcsak a számos különleges exobolygó-felfedezés kötődik az űrtávcső nevéhez, hanem az asztrofizika egyéb területein is születtek jelentős áttörések. Ez nem meglepő, ha felidézünk, hogy a Kepler bolygókeresési stratégiája az úgynevezett tranzitmódszeren alapul, amely a távoli csillagok körül keringő bolygók csillaguk korongja előtti áthaladása által létrehozott fényességcsökkenés detektálását jelenti. (Fontos megjegyezni, hogy a csillag korongja a Keplerrel is felbonthatatlan,

a bolygó maga pedig láthatatlan, mindössze a fényesség csökkenése mérhető.) Minthogy a Nap körül keringő Kepler 2–3 nagyságrenddel pontosabb fényességmérést tesz lehetővé a földi műszerekhez képest, ráadásul szinte folyamatosan figyel nagyszámú csillagot, ami a Földről vagy Föld körüli pályáról csak korlátozottan valósítható meg, ezért szinte törvényszerű volt, hogy magukról a csillagokról szerzett tudásunkat is forradalmasítsa a NASA űreszköze. Ennek alapja az, hogy a legtöbb csillag különféle fényváltozásokat mutat, amelyek az esetek többségében a csillag szerkezetéről, a benne végbemenő folyamatokról (pulzáció, oszcilláció), gravitációsan kötött kísérőjéről (fedési kettősök), esetleg forgásáról, aktivitásáról, csillag körüli anyagról stb. hordoznak információt. A legfrissebb, csillagok fizikájával kapcsolatos eredményekből szemezgetünk, külön kitérve a magyar vonatkozású felfedezésekre.

Csillagrezgések bővületében

A csillagok rezgésével foglalkozó asztroszeizmológia segítségével bepillantást nyerhetünk a csillagok belső szerkezetébe is. Az első ismert pulzáló csillagok, a cefeidák rezgése meglehetősen egyszerű módja a pulzációnak, a csillag periodikusan kitágul és összehúzódik. A folyamatos rezgést az úgynevezett kappamechanizmus tartja fenn, amely a csillag bizonyos réte-

Szabó Róbertet a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj, Derekas Alizt a Magyary Zoltán Posztdoktori ösztöndíj, a KIK-csoport munkáját az MTA Lendület programja, az OTKA K83790 és MB08C 81013 számú pályázatai, valamint az Európai Közösség 7-es Keretprogramjának (FP7/2007–2013) 269194. számú szerződése támogatta.