

TÖBB, MINT ÉGEN A CSILLAG – 1. RÉSZ

Exobolygók felfedezése

Regály Zsolt

MTA CSFK, Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet

Az utóbbi két évtizedben több mint kétezer exobolygót – a Naprendszerből távoli csillagok körül létrejött bolygót – találtak. Az exobolygók gyakorisága arra enged következtetni, hogy a Tejútrendszerben akár több (100 milliárd) bolygó keletkezhetett, mint csillag. Az eddig felfedezett exobolygórendszerek lényegesen eltérnek Naprendszerünkétől, és bolygók megdöbbentő változatosságot mutatnak. Ismerünk Föld-szerű és a Földnél nagyobb kőzetbolygókat, a Neptunusznál kisebb vagy akár a Jupiternél tízszer nagyobb óriásbolygókat, amelyek csillaguk közvetlen közelében, vagy tőlük óriási távolságban keringenek.

A modern csillagászat egyik legfontosabb kérdése, hogy miként alakultak ki ezen bolygórendszerek, és miért fejlődtek a mi Naprendszerünkétől eltérő szerkezetűvé. A távoli bolygórendszerek keletkezésének jobb megértése által az emberiséget régóta foglalkoztató kérdésekre kaphatunk választ, például arra, hogyan jött létre számunkra oly értékes planétánk, a Föld, illetve vannak-e a Földhöz hasonló bolygók a Tejútrendszerben.

Módszerek távoli bolygók felfedezésére

Képalkotás

A legegyszerűbb módszer, amelynek segítségével megpillanthatnánk egy távoli csillag körül keringő bolygót, a képalkotás. Azonban ez némi nehézségbe ütközik, ha kiszámítjuk, hogy milyen fényesnek látnánk a csillaga fényét visszaverő bolygót az optikai hullámhossztartományban (0,3–0,7 μm). Egy R_p sugarú és A albedójú (fényvisszaverő képesség, a Földé $\sim 0,3$) bolygó, a távolságban (csillagászati egységben, 1 CSE = a Nap–Föld-középtávolság) a csillagától a rávetülő fénynek csupán

$$f = 0,00014 \frac{A}{0,3} \left(\frac{R_p}{R_\odot} \right)^2 \frac{1}{a^2}$$

részét veri vissza. Egy Föld-szerű bolygó így 24–25 magnitúdóval lenne halványabb a csillagnál. Ez az óriási fényességkontraszt lehetetlenné teszi a bolygó által visszavert fény közvetlen detektálását.

Nagyobb szerencsével járunk, ha a bolygó infravörös hullámsávbeli ($> 0,7 \mu\text{m}$) sugárzását próbálnánk detektálni. Feltételezve, hogy a bolygó felszíni hőmérséklete hasonló a Földéhez ($T_p \sim 270 \text{ K}$), akkor feketetest-sugárzásának maximuma nagyjából a 20 μm -es hullámhosszra esne. Ekkor egy R_* sugarú csillag esetén a kontrasztarány

$$f = \left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2 \frac{\exp(bv/k_B T_*)}{\exp(bv/k_B T_p)}$$

lenne, ami az előző esethez képest 4–5 magnitúdóval nagyobb kontrasztarányt jelentene. Igen ám, de ahhoz, hogy az infravörös-tartományban meg tudjunk különböztetni egy Föld-szerű bolygót és a tőle 1 CSE-re levő csillagát, elképesztően nagy, közel 50 m átmérőjű távcsőre lenne szükségünk, hiszen a távcsövek felbontóképessége a hullámhosszal fordítottan arányos.

A bolygók képalkotással történő felfedezését az is nehezíti, hogy ha a fényképfelvétel egy halványan pislákoló fénypontot látunk a csillag mellett, az még nem jelenti azt, hogy kísérőjeként kering is körülötte. Ahhoz, hogy ezt bizonyítsuk, további felvételeket kell készítenünk, amelyeken egyértelműen kimérhető a kísérő elmozdulása, vagyis a csillag körüli keringése.

Így már érthető, hogy eddig csupán másfél tucat bolygóról – és azok is a Jupiternél nagyobb gázóriások – sikerült infravörös hullámhossztartományban képet alkotni, a legnagyobb (8–10 méteres) földi távcsövekkel, például a European Southern Observatory (ESO), Subaru, Gemini és a Keck Observatóriumok távcsöveivel, illetve a Large Binocular Telescope-pal (LBT), az világűrbeli pedig a Hubble Space Telescope (HST) segítségével. E felfedezések is csak úgy születhettek meg, hogy a napfizikában már korábban használt koronagráfához hasonló módszerrel, vagy egy teljesen új technikával, a nullázó interferométerrel elhalványították a bolygónál tízmilliárdszor fényesebb csillagot.

Bolygók termikus sugárzásának közvetlen detektálásával az első óriásbolygót, a 2M1207 vörös törpecsillag körül keringő gázóriást 2004-ben fedezték fel. A 2M1207b tömege majd tízszerese a Jupiterének, és olyan távol kering csillagától, mint a Plútó a Naptól. Négy évvel később már több exobolygórendszer sikerült észlelni. Ezek közül az egyik legnevezetesebb a HR 8799 rendszer, ahol rögtön három óriásbolygót, két évvel később pedig még egy újabbat is felfedeztek. Azóta képalkotással még további féltucat gázóriást sikerült felfedezni. Az így felfedezett legkisebb óriásbolygó, a Fomalhaut csillag körül keringő is kétszer nagyobb, mint a Jupiter. Ám a Fomalhaut bolygójával kapcsolatosan felmerült az a kétely, hogy infravörös sugárzása túl halvány egy óriásbolygóéhoz képest, inkább egy neutroncsillagéhoz hasonlít.

Radiális sebesség mérése

Már a 20. század első felében felvetették, hogy egy csillag hozzánk viszonyított, úgynevezett radiális sebességének periodikus változásai alapján ki lehetne mutatni egy nagy tömegű kísérő, azaz egy óriásbolygó jelenlétét.

Egy távoli csillag körül keringő óriásbolygó hatására a csillag hol hozzánk közeledni, hol tőlünk távolodni látszik a két égitest közös tömegközéppont körüli ke-

ringése miatt. Ezért a csillag által kisugárzott fény periodikus Doppler-eltolódást szenved. Az impulzusmegmaradás egyenletéből levezethető, hogy az M_* tömegű csillag radiális sebességének látóirányú komponense

$$v_* \sin(i) = \frac{M_p}{M_*} \sqrt{\frac{GM_*}{a}} \sin(i)$$

amplitúdóval szinuszosan oszcillál egy a távolságban, a látóiránnyal i szöget bezáró síkban körpályán keringő, M_p tömegű bolygó hatására. Az oszcilláció periódusa megegyezik a bolygó keringési idejével:

$$P = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{GM_*}}$$

Ennek kimérésével a bolygó tömege meghatározható – valójában csak a lehetséges legkisebb tömeg, azaz $M_p \sin(i)$, mivel a pályasík látóiránnyal bezárt szöge ismeretlen.

A bolygók nemcsak kör alakú, hanem elliptikus pályán is keringhetnek csillaguk körül. Ekkor e_p excentricitású bolygópálya esetén a csillag radiális sebességének amplitúdóváltozása kissé módosul:

$$v_* \sin(i) = \frac{1}{\sqrt{1 - e_p^2}} \frac{M_p}{M_*} \sqrt{\frac{GM_*}{a}} \sin(i)$$

Így a radiális sebesség időbeli változása nem tisztán szinuszos jellegű, és a radiális sebesség amplitúdójának maximuma jóval nagyobb lehet, mint körpálya esetén. Ez utóbbi könnyen megérthető annak fényében, hogy az elliptikus pályán a pericentrumban (a bolygó és a csillag egymáshoz legközelebbi helyzetében) a mozgás felgyorsul. Mivel a bolygópálya excentricitását nem ismerjük, a bolygótömeg több különböző e_p feltételezéssel kiszámított és a mért radiálissebesség-változások összehasonlításával becsülhető.

Egy csillag bolygója által okozott radiálissebesség-változás amplitúdója igen kicsi, a Nap–Jupiter esetén 12 m/s, míg a Nap–Föld esetén 1 m/s. Ezért az exobolygók közvetett detektálása csak úgy lehetséges, ha a csillag spektrumában egyszerre több elnyelési vonalat vizsgálunk. Az ilyen módszerrel elsőként talált exobolygó a *Michel Mayor és Didier Queloz* által felfedezett, mindössze 4,2 nap periódusidővel keringő, fél Jupiter-tömegű 51 Pegasi b óriásbolygó.

Történeti érdekességként említjük meg, hogy az első, kétséget kizáró exobolygó-felfedezés *Aleksandr Wolszcan* és *Dale Frail* nevéhez köthető, akik 1992-ben meglepő módon nem egy közönséges csillag, hanem egy pulzár körül fedeztek fel egyszerre két bolygót. A PSR 1257+12 jelű milliszekundumos pulzár anomális pulzusváltozásairól kimutatták, hogy azt a fentebb bemutatott jelenség, azaz a pulzárnak a bolygói hatására létrejövő reflexmozgása okozza. Az azóta pontosított mérések alapján ma azt gondoljuk, hogy e pulzár két, egy, a Földnél nagyobb tömegű ($4 M_\oplus$) és egy, a Földnél kisebb tömegű ($0,02 M_\oplus$) bolygónak ad otthont.

Asztrometria

Magától értetődő, hogy az előbb bemutatott jelenség alapján úgy is kimutathatjuk a szemünk elől elrejtőző bolygót, ha annak gravitációs hatását a csillag elmozdulásából mérjük ki. Így – az előzőekben bemutatott módszerektől eltérően – a bolygópálya excentricitása és a pálya hajlásszöge is meghatározható lenne.

Az astrometriai módszert gyakran alkalmazzák kettőscsillagok pályaszámítására, de ezzel a módszerrel eddig még nem sikerült bolygószerű kísérőt kimutatni. Ennek oka az, hogy egy 10 fényév távolságú csillag látszó elmozdulása közelítőleg 10 μív másodperc, ha $10 M_\oplus$ tömegű bolygója 1 CSE távolságban kering körülötte. Ez az elmozdulás még mindig kisebb, mint a jelenleg legprecízebb astrometriai műszer, az Európai Űrügynökség (ESA) Gaia űrszondájának pontossága, ami egy 15 magnitúdós csillag esetén 10 milliív másodperc.

Bolygóátvonulás a csillagkorong előtt

Ha egy bolygó keringése során periodikusan elvonulni látszik csillagának korongja előtt, akkor a csillag fényességében periodikus fényességcsökkenést figyelhetünk meg. Fontos, hogy az elhalványodás amplitúdója független a bolygó keringési távolságától, szemben az előző fejezetben tárgyalt effektussal. Mivel az elhalványodás amplitúdója csupán a bolygó és a csillag méretétől függ,

$$f = \left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2,$$

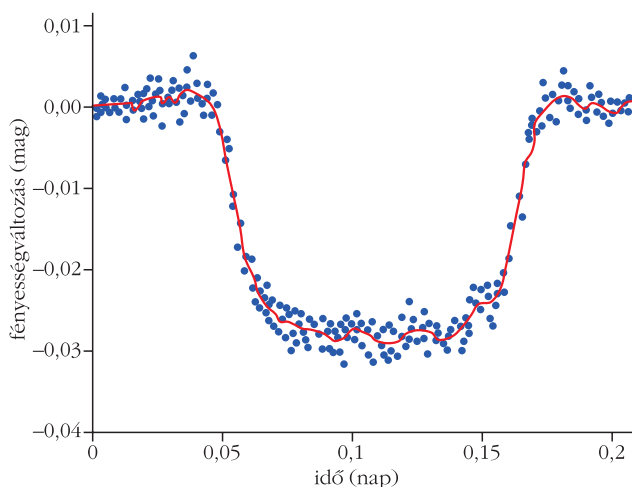
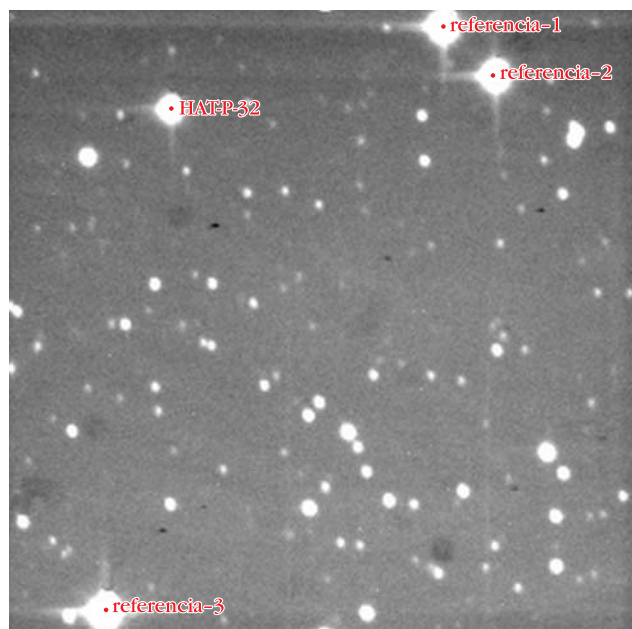
ezért a bolygóátvonulások segítségével meghatározható a bolygó sugara. Egy Jupiter-szerű gázóriás esetén a fényességcsökkenés 0,01 magnitúdó lenne, azonban egy, a Föld átlagos sűrűségével megegyező kőzetbolygó esetén csupán

$$8,4 \cdot 10^{-4} \left(\frac{M_p}{M_\oplus} \right)^{2/3} \text{ magnitúdó.}$$

A keringés során előfordulhat az is, hogy a csillag takarja el a bolygót, ekkor is csökken a csillag-bolygó rendszer fényessége, mégpedig pontosan a bolygó saját fényével. Ez az úgynevezett mellékminimum igen kicsi periodikus fényességcsökkenést eredményez, egy 1000 K felszíni hőmérsékletű óriásbolygó esetén csupán 10 milliimod magnitúdónyit. A csillag fényesség-változását okozhatja az is, hogy a bolygó keringése során – a Hold fázisaihoz teljesen hasonló módon – változó nagyságú felületet látunk a csillag által megvilágítva. Emiatt a rendszer fényessége folyamatosan nő a főminimumtól, majd újra csökken a mellékminimumig.

Óriásbolygók fedésének kimérése tehát nem könnyű, de kivitelezhető, elegendően precíz fotometriai módszerek segítségével, közepes vagy kis átmérőjű földi távcsövekkel is. A relatív fotometriai módszernél a látómezőben feltűnő, állandó fényességű csillagok





1. ábra. HAT-P 32 jelű óriásbolygó fedése. Felül a fotometriához használt állandó fényű csillagok (referencia-1, -2, -3), alul a HAT-P 32 csillag fényességcsökkenése látható. A mérést a szerző az MTA CSFK Csillagászati Intézet Piszkéstetői Observatóriumának 50 cm-es távcsövével, ANDOR iXON 888 EMCCD kamerával készítette. Forrás: <http://www.konkoly.hu/staff/regaly/research/HAR.html>

átlagos fényességét hasonlítjuk a vizsgálni kívánt csillag változó fényességéhez, így a folyamatosan jelen levő légköri zaj lényegesen csökkenthető (1. ábra).

Egy Föld méretű kőzetbolygó által okozott fényességcsökkenés kimérésekor a földi légkör zavaró effektusait nem tudjuk a szükséges mértékben kiküszöbölni, ezért a világűrbe telepített távcsőre van szükségünk. A NASA Kepler űrtávcsövének segítségével mára már több mint ezer exobolygót ismerhettünk meg, és még további négyezer bolygójelölt akad a négy évet felölelő adatsorokban. Egyelőre azért csak bolygójelöltek, mert hasonló periodikus fényességcsökkenést más jelenség, például a csillag korongján elvonuló, a napfoltokhoz hasonló csillagfolt is okozhat. Így az exobolygójelölteket radiálissebesség-méréssel is ellenőrizni kell, hogy valóban bolygó okozza-e a csillag fényének periodikus elhalványodását.

Amint a bolygó belép a csillag korongja elé, vagy kilép onnan, a csillag fényessége lineárisan csökken vagy növekszik, míg a plátón még további gyenge halványodás, majd fényesedés látható (1. ábra). Az első effektus annak a következménye, hogy a bolygó belépéskor egyre nagyobb területet takar ki a csillagkorongból és egyre kisebbet kilépéskor. A második effektus azért lép fel, mert a csillagkorong a középpontja felé egyre fényesebb, így a bolygó egyre fényesebb területet takar ki a csillagból a csillagkorong középpontjához közeledve és egyre halványabbat, amint távolodik onnan. A plató alakjának kimérésével így lehetőség nyílik a bolygópálya és a csillagkorong relatív helyzetének megállapítására is.

Nem minden bolygót látunk elvonulni a csillag korongja előtt, hiszen a bolygópálya síkja tetszőleges lehet. Statisztikai számítások szerint, ha minden csillag körül keringene egy Föld típusú bolygó, akkor minden pillanatban százezerből egy csillag tranzitját észlelhetnénk. Ezért a Kepler űrtávcső és más, földi bolygókereső projektek (például Wide Angle Search for Planets [WASP] vagy Hungarian Automated Telescopes [HAT]) egyszerre több százezer csillagot vizsgálva periodikusan visszatérő fényességváltozásokat keresnek. A bolygóátvonulás módszerén alapuló projektek máig 656 exobolygórendszert, összesen 1179 exobolygót fedeztek fel. A fenti számokat összevetve láthatjuk, hogy az exobolygórendszerek majd felében több bolygó is kering.

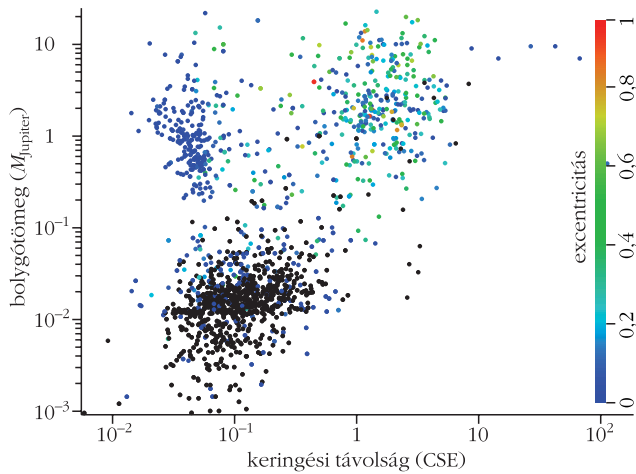
A bolygófedés módszerét a radiálissebesség-mérésekkel ötvözve a bolygók belső szerkezetét (sűrűségét) is megállapíthatjuk, ugyanis a fedésből a bolygó sugara, míg a radiálissebesség-mérésekkel tömege állapítható meg.

Gravitációs lencszés

Az általános relativitáselmélet szerint a fény sugar elterül egy gravitáló test környezetében, hasonlóan ahhoz, ahogy a megváltozott törésmutatójú közegben a fény törést szenved. Egy tőlünk d_L távolságban levő M_* tömegű test a mögötte levő, tőlünk d_s távolságban elhelyezkedő csillag pontszerű képét egy Einstein-gyűrűbe képezi le, amelynek térbeli látszó átmérője

$$\Theta_E = \frac{2}{c} \sqrt{GM_* \frac{d_s - d_L}{d_L d_s}}$$

A Tejútrendszer 25 000 fényévre levő középpontja felé rengeteg csillagot láthatunk, ezért jó esélye van annak, hogy a Tejútrendszer középpontjában, illetve a hozzánk képest félúton levő csillagok időnként pontosan azonos irányban látszanak. Amikor a hozzánk közelebbi csillag éppen áthalad a távoli csillag előtt, a gyűrűben megnövekszik a fényintenzitás, ugyanis a $\Theta_E = 0,001$ olyan kicsi szög, hogy magát a gyűrűt felbontani nem tudjuk. Ha a lencsecsillag körül egy nagy tömegű bolygó Θ_E szögnél kisebb távolságra látszik keringeni (10 000 fényévre levő csillagokra tipikusan néhány CSE-nek felel meg), a lassú fényességnöveke-



2. ábra. A 2015-ig felfedezett exobolygók tömege a keringési távolság függvényében. A színskála a bolygópályák excentricitását mutatja. Forrás: <http://exoplanets.org>

dés mellett egy hirtelen kifényesedést is észlelhetünk, amikor a bolygó és a lencsecsillag éppen egy irányban látszanak.

Tehát ahhoz, hogy a Tejútrendszer közepe felé felúton keringő csillagok körüli bolygókat felfedezzük, csupán annyi a dolgunk, hogy folyamatosan mérjük a Tejútrendszer középpontjához közeli csillagok fényességváltozását. A lassú, jellemzően néhány hetes, közel 5 magnitúdós kifényesedésekben hasonló nagyságú, de gyors (a bolygótömegtől függően 1 nap Jupiter-szerű, illetve néhány óra Föld-szerű bolygók esetében) kifényesedéseket keressünk. Részletes statisztikai vizsgálatok szerint a Tejútrendszer közepontja körül levő nagyszámú (közelítőleg 100 millió) csillag miatt évente legfeljebb 500 gravitációs mikrolencsézési eseményt detektálhatunk. Az Optical Gravitational Lensing Experiment (OGLE) vagy a Micro-

lensing Observations in Astrophysics (MOA) projekt keretében mára 32 bolygórendszert (két rendszerben egyszerre több bolygót is) fedeztek fel e módszerrel.

Távoli bolygórendszerek tulajdonságai

A következőkben bemutatjuk, hogy a fentebb tárgyalt módszerekkel az elmúlt húsz évben felfedezett majd kétezer exobolygó (2. ábra) statisztikai analízise alapján Naprendszerünk mennyire hasonló a távoli bolygórendszerekhez, vagy eltérő azoktól. Előbb azonban tekintsük át, hogy milyen alapvető tulajdonságai vannak Naprendszerünknek: nyolc bolygó kering benne; a kisméretű kőzetbolygók $0,4-1 R_{\oplus}$, a nagyméretű gázóriások pedig a $3,9-11,2 R_{\oplus}$ sugarúak; a bolygók körpályán keringenek, az átlagos excentricitás kicsi: $\langle e \rangle = 0,06$; a bolygók pályasíkja nagyjából megegyezik, az átlagos inklináció $\langle i \rangle = 1,9^{\circ}$ -kal tér el a Naprendszer teljes peridülete által definiált síktól; a peridület nagy részét a bolygók hordozzák: $L_{\odot}/L_p = 0,5\%$; a Nap egyenlítője 6° -kal tér el a Naprendszer síkjától.

Bolygók magányos csillagok körül

Az ismert exobolygók tömegét keringési távolságuk (a) függvényében ábrázolva (2. ábra) rögtön szembetűnik, hogy a Naprendszerben ismeretlen bolygócsaládok is léteznek, például a Jupiternél akár tízszer nagyobb tömegű óriásbolygók, illetve néhány napos keringési idejű (tehát a csillagukhoz nagyon közeli) pályákon keringő bolygók. A nagy tömegű bolygókat forró Jupitereknek, a Földnél nagyobb, kis tömegű bolygókat pedig forró szuper-Földeknek nevezzük.

A 2. ábrát szemlélve az is látható, hogy az exobolygók nem egyenletesen töltik ki az $a-M_p$ síkot.

LETÖLTHETŐ ÉS TÖBB MINT 3 MÉTER SZÉLESEN, SZÍNESEN KINYO

A magyarázó szöveggel kiegészített posztert keress a Fizikai Szemle (www.fizikaiszemle.hu)

Föld

A Nap körül keringő Föld kőzetbolygó. A rajta kialakult oxigéntartalmú légkör, a felszínén összegyűlt víz és a Naptól való távolsága – körülbelül 150 millió km = 1 csillagászati egység (CSE) – együttesen kedvezett az élet kialakulásának.

Naprendszer

A Naprendszer központi csillaga, a Nap körül nyolc nagybolygó kering: Merkúr, Vénusz, Föld, Mars, Jupiter, Szaturnusz, Uránusz és Neptunusz. A Mars és a Jupiter pályája között található a Föld kisbolygók, de kisbolygók (aszteroidák) más pályákon is keringenek a Naprendszerben. A nagybolygók és a kisbolygók közötti mérettartományba ennek a törpebolygók, közülük öt ismert: Ceres, Eris, Haumea, Makemake és Pluto. A külső bolygók pályáján túl kezdődik a Kuiper-öv, amely apró égitesteket (közöttük üstökösöket) tartalmaz.

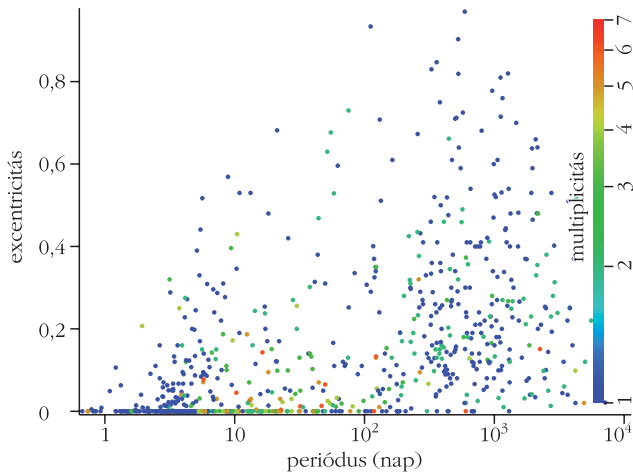
A Naprendszer környezete

A Naprendszer nem ér véget a Kuiper-övnél, kifelé még az üstökösök tartalmazó Oort-felhő található, amelynek átmérője az 1 fényévet is meghaladja. A Naphoz legközelebbi csillag, a Proxima Centauri körülbelül 4,2 fényévre van tőlünk. A csillagok nem egyforma erősen sugároznak, ezért egy csillag látszó fényességéből nem lehet következtetni a távolságára. A csillag fényteljesítménye (luminositása) a felszíni hőmérsékletétől és az átmérőjétől függ. Az égbolt fényességében nagyobb csillagok, a Szíriusz 8,6 fényévre van tőlünk, jó néhány csillag ennél közelebbi. A legfényesebb csillagokra egyedi tulajdonságokkal, a halványabbakra a csillagkatalógusokban kapott sorszámmal hivatkozunk.

A Tejútrendszer

A szabad szemmel látható csillagok – a csak távcsővön át látható társzálkák együtt – galaxisunk, a Tejútrendszer tagjai. A Tejút deringő sávja valójában halvány csillagok és színes csillagok. A Tejútrendszer spirális galaxis: a csillagok zöme a csillagközi anyag nagy részével együtt spirálkarok mentén tömörül. Becslések szerint a Tejútrendszer 200 milliárd csillag alkotja.





3. ábra. A 2015-ig felfedezett exobolygók excentricitása a keringési periódus függvényében. A színskála az adott rendszer bolygóinak számát jelöli. Forrás: <http://exoplanets.org>

Nagy keringési távolságokon kisebb tömegű bolygókat nem fedeztünk fel, de ez nem jelenti azt, hogy ilyenek nincsenek, csak azt, hogy a detektálási módszerek nem alkalmasak észlelésükre.¹

Azt azonban valóban kijelenthetjük, hogy a néhány évnél rövidebb keringési idejű, 10–100 M_{Jup} tömegű kísérőkből (vörös törpecsillagok) egy nagyságrenddel kevesebb van, mint az 1–10 M_{Jup} tömegű óriásbolygókból. Ezt az érdekes tényt vöröstörpe-sivatagnak nevezzük. Jól látható, hogy 0,1 M_{Jup} és annál nagyobb

¹ A Kepler űrszondával igen nehéz a több éves keringési idejű (a csillagtól távol keringő) és kis tömegű bolygók detektálása, mivel az általuk okozott fényességcsökkenés igen kicsi, illetve az űrszonda működési ideje alatt csak egy átvonulás figyelhető meg. A radiális sebesség mérése pedig azért érzéketlen a távol keringő bolygókra, mert a kísérő okozta tömegközéppont-eltolódás és így a csillag reflexmozgásának amplitúdója fordítottan arányos a bolygó keringési távolságával.

óriásbolygó jóval kevesebb van, mint kisebb tömegű bolygó. A kis tömegű bolygók általában kis excentricitású pályán keringenek, míg nagy excentricitás csak a csillagtól távolabbi pályákon tud kialakulni.

Részletes statisztikai vizsgálatok megmutatták, hogy a Nap típusú csillagok legalább 10%-ának van óriásbolygója, és 50%-ának ennél kisebb bolygója. A leggyakoribb bolygótömeg 5–10 M_{\oplus} . Érdekes, hogy a forró Jupiterek általában magányosan fordulnak elő, míg a kisebb tömegű bolygóknak nagyobb valószínűséggel vannak kis tömegű bolygótársai.

A 3. ábra a bolygók excentricitását ábrázolja a keringési periódus függvényében. Szembeötlő, hogy a több bolygót is tartalmazó rendszerekben (ahol a multiplicitás nagyobb egynél) a bolygók jellemzően kis excentricitású pályákon keringenek, míg a csak egy bolygót tartalmazó rendszerekben nagyon elliptikus pályák is előfordulnak. Ez talán azzal magyarázható, hogy a nagy excentricitású pályák dinamikailag instabillá teszik a többes bolygórendszereket, így ezek kisebb számban fordulnak elő.

A 4. ábra a bolygók excentricitását mutatja a csillaguk fémtartalmának (a hidrogénnél nehezebb elemek és a hidrogén előfordulási arányának logaritmus, $Fe/H = 0$ a Nap esetében, $Fe/H < 0$ fémszegény, $Fe/H > 0$ fémgazdag) függvényében. Látható, hogy a fémben gazdag csillagok bolygói nagyobb excentricitású pályákon keringenek, míg az alacsony fémtartalmú csillagok bolygói jellemzően kisebb excentricitású pályái vannak. További érdekesség, hogy a fémgazdag csillagok bolygói jellemzően távolabb keringenek csillaguktól. Ez azzal magyarázható, hogy a fémgazdag csillagok körüli protoplanetáris korongban (ahol a bolygók kialakultak) nagy mennyiségű szilárd anyag volt, így több bolygó keletkezhetett, amelyek végül a kölcsönös gravitációs perturbációik révén megnövelték pályáik excentricitását.

MTATHATÓ A HELYÜNK A VILÁGEGYETEMEN MIND A NÉGY RÉSZEI!

Mellékletek menüpontjában, a posztot bátran rakjad ki a fizika-előadó vagy a folyosó falára!

ÁGEGYETEMEN

A galaxisok Lokális csoportja

A galaxisok túlnyomó többsége nem elsősorban helyezkedik el a térben, hanem csoportosulva. Néhány tucat tagból állnak a galaxiscsoportok, és több száz vagy akár ezer tagja is van a galaxis-halmazoknak. A Tejútrendszer a Lokális csoporthoz tartozik körülbelül 60 ismert galaxissal együtt. E csoport meghatározó tagjai a Tejútrendszeren kívül az Andromeda-kód (M31) és a Triangulum-kód (M33) – mindhárom spirális galaxis. Mellettek számos szabálytalan és ellipszoidális törpegalaxis alkotja a Lokális csoportot.

–10 millió fényév

Virgo-szuperhalmaz

A galaxis-halmazok még nagyobb egységekké, úgynevezett superhalmazokba szerveződnek. A Lokális csoport (benne a Naprendszer is tartozó Tejútrendszerrel) a Virgo-szuperhalmaz része.

–110 millió fényév

Lokális szuperhalmazok

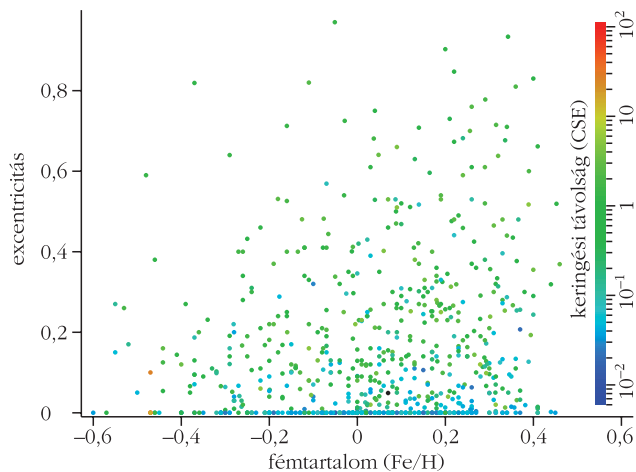
A galaxisok halmazait tartalmazó szuperhalmazok között hatalmas kiterjedésű űrök vannak, amelyekben alig fordulnak elő galaxisok. A szuperhalmazokat és az űröket egyaránt arról a csillagképről nevezték el, amelybe a geometriai középpontjuk esik.

–1 milliárd fényév

Az észlelhető Univerzum

Az Univerzum nagy skálájú szerkezete valójában szappanhabra emlékeztet: a buborékok felületén vannak a galaxisok és azok nagyobb szerveződési egységei, a galaxis-halmazok és szuperhalmazok. A fény véges terjedési sebessége (körülbelül 300 000 km/s) miatt minél messzebbre nézünk, annál korábbi állapotokban vehetjük szemügyre az egízteteket és azok rendszereit.

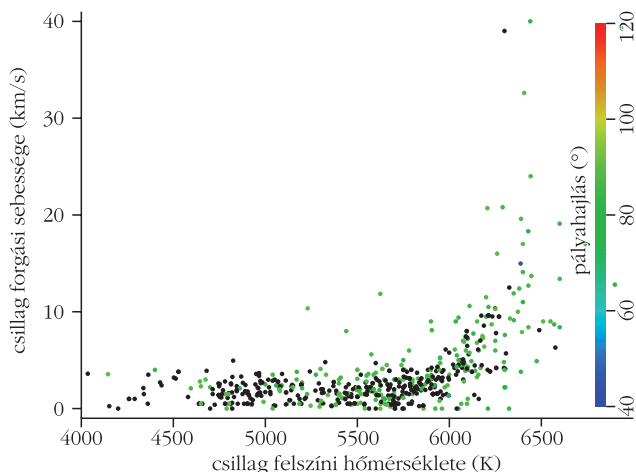
–90 milliárd fényév



4. ábra. A 2015-ig felfedezett exobolygók excentricitása csillagok fémtartalmának (Fe/H) függvényében. A színskála a bolygók keringési távolságát jelöli. Forrás: <http://exoplanets.org>

Megvizsgálva a bolygók pályahajlását a csillagok egyenlítőjéhez képest, a következő érdekes tényre derül fény. Azt már régóta tudjuk, hogy a csillagok forgási sebessége és felszíni hőmérséklete kapcsolatban áll egymással: 6100 K felszíni hőmérséklet felett a csillagok egyre gyorsabban forognak (5. ábra). De az igazán érdekes az, hogy a hidegebb csillagok bolygóinak pályahajlása átlagosan kicsi, míg a forróbb csillagok bolygóinak pályasíkja lényegesen eltérhet a csillag egyenlítőjétől. Sőt ismerünk olyan bolygót is (WASP-17), amelyik a csillag forgásával ellentétes irányban kering, azaz a pálya hajlásszöge nagyobb 90° -nál. Ez azért furcsa, mert ha a bolygók a protoplanetáris korongból alakultak ki, akkor a csillagok és bolygók a korong kezdeti impulzusmomentumát örökölték meg. Így a bolygók pályahajlásának kicsinek kellene lennie, ugyanúgy, mint a Naprendszerben. A pályahajlási anomália talán azzal magyarázható, hogy a hideg csillagok belső szerkezete és mágneses tere eltér a forrókétól. A 6100 K-nél forróbb felszínű csillagokban nem, míg a

5. ábra. A 2015-ig felfedezett exobolygók csillagainak forgási sebessége ($v_{\text{sin } i}$) a csillag felszíni hőmérsékletének (T_{eff}) függvényében. A színskála a bolygó pályahajlását jelöli. A fekete pontokkal ábrázolt bolygóknál a pályahajlás nincs meghatározva. Forrás: <http://exoplanets.org>



hidegebbekben vastag konvektív zóna alakul ki, így ez utóbbiaknak jóval erősebb mágneses terük lesz. Ezért a hideg csillagok forgása a mágneses fékeződés következtében lelassul, miközben bolygók pályáját igyekeznek saját egyenlítői síkjukba fordítani. Forró csillagok körüli bolygók pályahajlása nagy maradhat, hiszen erős mágneses tér hiányában a fenti jelenség nem játszik szerepet. Az azonban továbbra is kérdés, hogy mi alakította ki a bolygók kezdeti nagy pályahajlását.

Bolygók kettőscsillagok körül

Hogy tovább bővítsük a furcsaságok listáját, kettőscsillagok körül is találtak bolygókat, ahol a jelenlegi bolygókeletkezési elméletek szerint nem alakulhattak volna ki. Elméletileg a kísérőcsillag gravitációs perturbációja oly mértékben zavarja meg a protoplanetáris korong szerkezetét, hogy abban nem tud kialakulni bolygó (részletesebben cikkünk folytatásában tárgyaljuk). Mégis közel hetven olyan bolygó ismert, amelyek a kettős rendszernek csak az egyik komponense körül, és öt olyan, amely mind a két csillag körül kering (mint Luke Skywalker Tatooine-ja).

Elméleti vizsgálatok szerint a 20 CSE-nél tágabb szeparációjú kettőscsillagrendszerekben csupán 50%-kal kisebb az esélye annak, hogy a bolygó csak az egyik csillagot, és nem mindkettőt kerüli meg. Szoros kettős rendszerekben (a szeparáció < 20 CSE) ilyen bolygót eddig nem találtak. Érdekes, hogy az eddig ismert legnagyobb excentricitású ($e \approx 0,85$) pályán keringő bolygót egy olyan tág (> 20 CSE) kettős rendszerben fedezték fel, amelyben a bolygó csak az egyik csillagot kerüli meg.

A kettős rendszer mindkét csillagát megkerülő (cirkumbináris) bolygók mindegyike a stabilitási sugár közvetlen közelében, de azon kívül kering. Erre a jelenségre az adhat magyarázatot, hogy a protoplanetáris korongban lévő gáz hatására a bolygók pályasugara folyamatosan csökken. Azokat a bolygókat, amelyek migrációjuk során a stabilitási sugárnál beljebb kerültek, óhatatlanul elnyelte valamelyik csillag, így csak olyanokat láthatunk, amelyek migrációja megállt a stabilitási sugárnál.

A cirkumbináris bolygókkal kapcsolatban azt is tudjuk, hogy eddig mindegyik ismert bolygó pályája szinte egy síkba esik a kettőscsillag keringési síkjával. Azt is megemlíjtük, hogy a méréseken alapuló statisztikai vizsgálatok szerint cirkumbináris bolygók azonos valószínűséggel keletkeznek szoros kettős rendszerekben, mint magányos csillagok körül.

Cikkünk következő részében a modern bolygókeletkezési elméleteket mutatjuk be, amelyek magyarázatot adhatnak az eddig felfedezett exobolygórendszerek és a Naprendszer eredetére.

Ajánlott irodalom

- Armitage, P.: *Astrophysics of Planet Formation*. Cambridge University Press, 2010.
 Winn, J. N. Fabrycky, D. C.: The Occurrence and Architecture of Exoplanetary Systems. *Annu. Rev. Astron. Astroph.* (2015), megjelenőben.