

Napjainkban már elmondhatjuk, hogy nagy vonalokban feltérképeztük a Világegyetem általunk belátható tartományát, és egyre inkább a részletek tanulmányozására helyeződik át a hangsúly. A mai legmodernebb megfigyelési technikákkal meglepő részletességgel tanulmányozhatjuk a csillagok keletkezési környezetét, és bepillantást nyerhetünk a távoli bolygórendszerek fejlődésébe is. E naprendszerek vizsgálata során számos kérdésre választ remélhetünk, és egyre inkább fel-táruul előttünk a természet roppant változatosága.

A más csillagok körül keringő ismert exobolygók száma a földi távcsövek és a modern űreszközök egyre pontosabb mérései révén rohamosan növekszik. A felfedezett bolygók nagy része a Neptunusznál (17,1 földtömeg) is nagyobb, a Jupiter tömegével összemérhető tömegű óriás gázbolygó. Ezek tömege Földünknek több százszorosa, de akár négyezerszeresét is meghaladhatja. Az óriásbolygókhoz viszonyítva jelenleg még csekély a Neptunusznál kisebb tömegű ismert planéták száma, azonban arányuk a javuló érzékenységű mérés technikák egyre szélesebb körű alkalmazásával fokozatosan nő. Főként az exobolygó-keresés szolgálatában álló űrcsillagászati műszerek érzékenysége terén tapasztalható nagyarányú javulás.

## A bolygókereső Kepler-űrtávcső

A NASA 2009 tavaszán pályára állította bolygókereső műszerét, a Kepler-űrtávcsövet (1. ábra). A program fő célja a Földhöz hasonló méretű bolygók kimutatása a csillagok lakhatósági zónájában, és e kis tömegű planéták gyakoriságának meghatározása a Tejútrendszerben. A Kepler 1,4 méter átmérőjű főtükre és rendkívül érzékeny fotométere a csillagok előtti bolygóátvonulások (tranzitok) okozta kis mértékű fényesség-

1. ábra. A Kepler-űrtávcső fellövése.



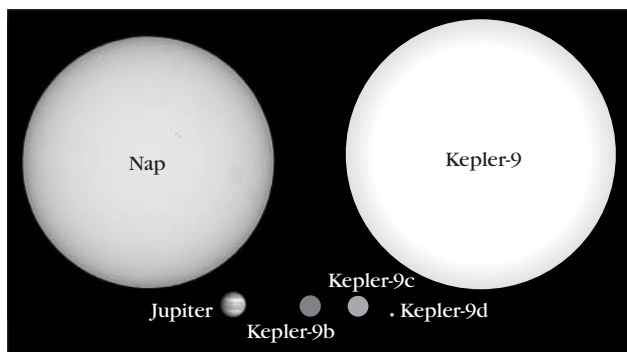
csökkenések nagy pontosságú mérését teszi lehetővé. A távcső nagyon fontos egysége a 42 elemből álló, összesen 95 megapixel kapacitású CCD-érzékelő, amely a látható fény hullámhossztartományában a 9–15 magnitúdó közötti fényességű csillagok fotometriai vizsgálatát teszi lehetővé. Példának okáért a Kepler fotometriai érzékenysége olyan mértékű, hogy a 12 magnitúdós Nap-szerű csillagok fényessége  $2 \cdot 10^{-5}$  nagyságrendű csökkenésének mérésére is képes. Ebben az esetben egy, a Földhöz hasonló méretű bolygó tranzitja 84 ppm (part per million) fényességváltozást idézne elő [1]. Ez a nagyfokú mérési precizitás alkalmas arra, hogy egy adott csillag – asztroszeizmológiai vizsgálatokat követően modellezett – átmérőjének és a fényességcsökkenés mértékének ismeretében akár 1%-os pontossággal meg lehessen határozni az adott bolygó átmérőjét. Az ily módon felfedezett planéták tömegét pedig érzékeny spektrográffal felszerelt távcsövek alkalmazásával határozzák meg. A viszonylag pontos átmérő- és tömegadatok felhasználásával kiszámítható a bolygók átlagsűrűsége, amelyből következtetni lehet összetételükre, és modellek állíthatók fel belső szerkezetükre.

A Kepler által felfedezett, eddig bejelentett exobolygók nagy tömegük révén a Jupiterre és a Szaturnuszra hasonlítanak leginkább. 2010 nyarán az első 43 nap adatsorait publikussá téve a NASA bolygójelöltek számainak kimutatását jelentette be, amikor 706 csillag fényességváltozásában találtak bolygófedésre utaló jelet. Ezek tényleges létezésének bizonyítása további alapos vizsgálatokat tesz szükségessé. A 706 csillagból 306 adatait tették közzé, azonban ezen jelöltek többsége már a Neptunuszhoz mérhető, illetve kisebb méretű exobolygó, ami nem zárja ki, hogy később a hosszabb keringési periódusú planéták között a Földünkéhez hasonló átmérőjű bolygókat találjunk.

## A tranzitok tudományos jelentősége

A csillaguk előtt átvonuló bolygók által okozott fizikai hatás megfigyelésén alapuló bolygókereső módszer utolérhetetlen előnye a bolygóméretek viszonylag pontos meghatározásának lehetősége. Ez azért is fontos, mert így egy adott bolygó esetében meglehetősen kis hibával terhelt átlagsűrűség számítható, ami által jobb közelítés adható az összetételre és a belső szerkezetre. Ezen kívül a mérési adatok felhasználásával egyéb fizikai paraméterek is modellezhetők, így például az idealizált bolygófelszínre vonatkoztatott nehézségi gyorsulás átlagos értéke is.

A világűrben alkalmazott nagy pontosságú fotometria lehetővé teszi a Neptunusznál kisebb, sőt Föld méretű bolygók detektálását is. Egy Nap-szerű csillag esetén egy Jupiter méretű objektum  $10^{-2}$ , egy Földhöz hasonló méretű planéta pedig  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  nagyságrendű



2. ábra. A Kepler-9 csillag és ismert bolygóinak mérete a Nap és a Jupiter méretéhez viszonyítva.

fényességcsökkenést idéz elő a fedés alkalmával. A Kepler fotometriai érzékenysége megfelelő az ilyen kis méretű bolygók felfedezéséhez, sőt adott esetben akár Földünk sugarának 80%-át kitevő átmérőjű bolygókísérők is kimutathatók. Természetesen minél kisebb a megfigyelt csillag átmérője, annál nagyobb például egy előtte átvonuló Föld méretű bolygó által okozott fényességcsökkenés. Egy ilyen méretű objektum átvonulásakor a vörös törpék esetében a megfigyelhető változás a Nap típusú csillagokkal ellentétben  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  helyett  $2 \cdot 10^{-3}$ – $10^{-4}$  közötti nagyságrendű. Ennélfogva a vörös törpecsillagok ígéretesebb vizsgálati célpontnak mutatkoznak nagyobb tömegű társaiknál, ráadásul ezek a leggyakoribb csillagtípusok, és a körülöttük keringő bolygók periódusideje is rövidebb. Azonban halványosságuk miatt csillagászati értelemben csupán viszonylag kis távolságokban lehetséges a tranzitok megfigyelése.

A tranzitok másik nagy jelentősége abban rejlik, hogy a fedések alkalmával a csillag fénye az előtte átvonuló bolygó légkörén is áthalad, így annak lenyomata a csillag spektrumán marad, és lehetségessé válik a bolygólégkör kémiai összetételének meghatározása. Ennek pedig elsősorban az esetleges életjelek kutatása terén van nagy szerepe. A közeljövő infravörös tartományban működő űrteleszkópjai képesek lesznek kimutatni egy csillaga előtt átvonuló exobolygó légkörében az élet esetleges jelenlétére utaló gázokat (biomarkereket). A kutatóknak a szuper-Földek közül elsőként a 42,4 fényévre lévő vörös törpecsillag körül 1,58 nap periódusidővel keringő GJ 1214b jelű exobolygó légkörét sikerült elemezniük. Eredményeik szerint ennek az 5,69 földtömegű és 2,75 földátmérőjű planétának vízgőzben gazdag légköre van.

## A Kepler-program első szuper-Földjei

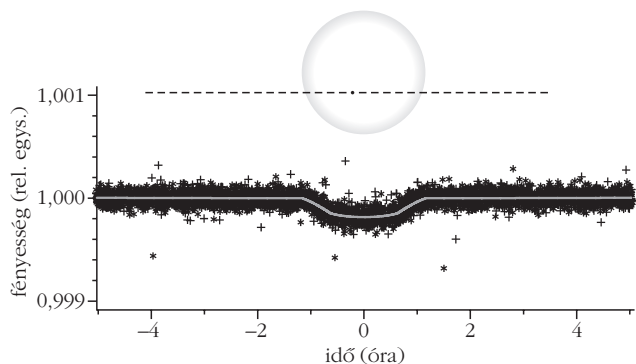
A bolygók tömegspektrumának 1 és 10 földtömeg ( $M_{\oplus}$ ) közötti kategóriájába tartozó égitesteket szuper-Földek néven említi a szakirodalom. A szuper-Földek lehetnek Föld típusú, főként szilikátos összetételű bolygók. Ezekon kívül minden bizonnyal léteznek jelentős víztartalmú képviselőik is, amelyeknek fémes magja és szilikát köpenye felett vízjégből álló gömbhéj helyezkedik el [2].

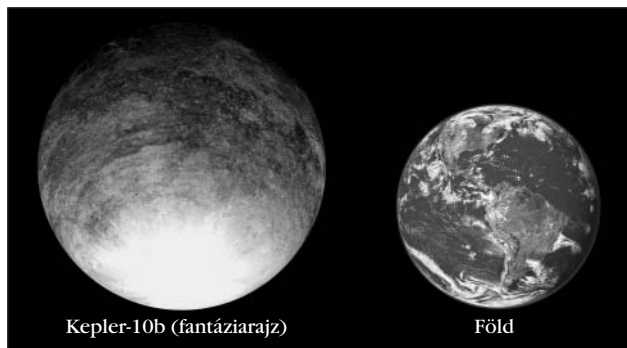
2010 augusztusában a NASA egy többszörös fedéseket mutató bolygórendszer felfedezését jelentette be (2. ábra). Az 1 naptömegű és 1,1 napátmérőjű Kepler-9 csillag fényességét két Szaturnuszhoz hasonló méretű óriásbolygó csökkenti a fedések alkalmával. A 19,2 napos periódussal keringő Kepler-9b jelű exobolygó átmérője közel 5%-kal nagyobb mint a Szaturnuszé, tömege azonban 84%-a annak. A 38,9 nap keringési idejű Kepler-9c sugara 2%-kal haladja meg a naprendszerbeli óriásbolygó sugarát, tömege pedig csupán a Szaturnusz 57%-a. A c jelű planéta tehát kétszer annyi idő alatt kerüli meg szülőcsillagát, így e két bolygó 2:1 rezonanciában áll egymással.

A rendszerre vonatkozó Kepler-adatsorok még egy harmadik objektum létezésére is utaltak, amely a fénygörbe jellegzetességei alapján egy szuper-Föld méretű bolygó. Ez a Kepler-9d jelű planéta nagyon közel kering a központi csillaghoz, mintegy 1,59 nap alatt kerüli meg azt. Emiatt felszíni rétege nagyon forró lehet, amely egyaránt lehet lávatenger és forró vízpára-légkör is. A bolygó átmérője 1,64-szerese Földünkének, és a tömegét egyes források 7 földtömegre becsülik (bár e sorok írásakor még nincs megbízható adatunk a tömegre). Összehasonlításképpen: egy, a Földhöz hasonló összetételű, de nála 5-ször nagyobb tömegű bolygó átmérője 1,537-szerese lenne bolygónkénak [3]. A Kepler-9d-hez fizikai vonatkozásokban hasonló exobolygó a CoRoT-7b, amelynek átmérője 1,68-szorosa a Földének, tömege pedig a földtömeg 4,8-szeresének bizonyult. A megfigyelt fizikai paraméterek alapján valószínű, hogy a Kepler-9d egy Föld típusú bolygó.

Az Amerikai Csillagászati Társaság Washington-állambeli Seattle-ben tartott 2011. januári találkozásán egy újabb kisméretű exobolygó, a Kepler-10b (3. ábra) felfedezését jelentették be. A szuper-Föld családba sorolható planéta átmérője a mérések alapján 1,416 földátmérőnek (4. ábra), tömege pedig 4,56 földtömegnek adódott, ami alapján kőzetbolygó-jellegre következtethetünk. A Kepler-10b majdnem hatvanszor közelebb kering a Naphoz hasonló csillagához, mint a Föld-Nap távolság. Emiatt felszíni hőmérséklete mintegy 1550 °C, így nagy valószínűség szerint a felszint láva borítja. A bolygó átlagsűrűsége több mint 8,8 g/cm<sup>3</sup>, ezért a megfigyelési adatokból

3. ábra. A Kepler-10b jelű kis tömegű exobolygó által előidézett fényességcsökkenés görbéje [4].





4. ábra. A Kepler-10b bolygónkéhez viszonyított mérete.

számított tömeg-sugár reláció alapján úgy tűnik, hogy a planéta vasmagja a teljes bolygótömeghez viszonyítva valamivel nagyobb, mint a Földé (bolygónk vas-nikkel magja a teljes tömeg 32,6%-a).

## Összegzés

Az igazán nagy jelentőségű felfedezés az olyan Földhöz hasonló méretű bolygók megtalálása volna, amelyek csillaguk lakhatósági zónájában keringenek. Azonban nemcsak a Földünk méretével megegyező planéták lehetnek érdekesek, hanem a nála nagyobb kőzetbolygók is, hiszen ezek megfelelő környezeti feltételek teljesülése esetén szintén életet hordozhatnak felszínükön. Az összetételre vonatkozó számítási eredmények felhasználásával nagyszerű összehasonlításokat végezhetünk a nagy tömegű kőzetbolygók és a mi Földünk tulajdonságai között. A Földhöz hasonló felépítésű, de annál nagyobb tömegű szuper-Földek geológiai értelemben aktívabb égitestek, hiszen magasabb belső hőmérsékletük intenzívebb geodinamikát tarthat fenn, elősegítve ezzel a hatékonyabb le-

meztectonikát. Számos kutatás pedig alátámasztani látszik azt a feltételezést, amely szerint a lemeztectonika léte elősegítette a földi élet fejlődését. Így a szuper-Földek – megfelelő kritériumok teljesülése esetén – akár kedvezőbb feltételeket is nyújthatnak az olyan típusú élet számára, mint amit mi itt a Földön megismertünk. Az élet jellegét meghatározó vagy befolyásoló fizikai paraméterek közül pedig az egyik legfontosabb a felszíni nehézségi gyorsulás értéke, mivel ez szabja felső határt az élőlények tömegének és méretének egy adott planéta bioszférájában.

A Kepler-úrtávcső mérései által a Földünkhöz hasonló és a nála nagyobb méretű bolygók esetén a várható felfedezések száma akár a több százat is elérheti, amely adattömeg már segíti a szakembereket a Tejútrendszerbeli potenciálisan lakható bolygók lehetséges számának becslésében. A 2010-es év összes bejelentett exobolygó-felfedezése száz körül volt, és ebből 8 az elsőként a Kepler-úrtávcsővel detektált planéta, amely arány növekedésére lehet számítani a következő években. Mivel a kis tömegű exobolygókat illetően is tömeges felfedezések várhatók, a Kepler valóságos forradalmat indíthat el az exobolygó-kutatás területén.

Linkgyűjtemény:

Kepler: <http://www.kepler.nasa.gov/Mission/discoveries/>

Kepler-9d: <http://arxiv.org/abs/1008.4393v3>

Exobolygó enciklopédia: <http://exoplanet.eu/>

Irodalom

1. Szabó R.: Bolygóáradat és asztroszeizmológia. *Fizikai Szemle* 59/4 (2009) 121–126.
2. Futó P.: Szuper-Földek. *Természet Világa* 141 (2010) 520.
3. P. Futó: Detailed internal structure model for super-Earths in case of Earth-like composition. *Lunar and Planetary Science XLI*. (2010) #1024, Houston.
4. N. M. Batalha: Kepler's First Rocky Planet: Kepler-10b. *Astrophys. J.* 729 (2011) 27.

## A FIZIKA TANÍTÁSA

# A LORENTZ-FÉLE SEBESSÉGTRANSZFORMÁCIÓ SZEMLELTETÉSE ENERGIA-IMPULZUS DIAGRAMOKKAL

Bokor Nándor  
BME, Fizika Tanszék

Furcsa és kicsit egzotikus példa a relativisztikus jelenségek energia-impulzus diagramokkal [1] való szemléltetésére a Lorentz-féle sebességtranszformációs képlet levezetése. Egy tisztán kinematikai kérdést ugyanis dinamikai fogalmak segítségével (energiamegmaradás, impulzusmegmaradás) szemléltet és vezet le.

Az [1] cikkhez hasonlóan itt is  $c = 1$  egységeket használok. A sebességek tehát dimenzió nélküli szá-

mok, amelyek csak  $(-1)$  és  $1$  közötti értékeket vehetnek fel; a tömeg, impulzus és energia pedig mind ugyanabban az egységben mérendő.

Egy  $S$  vonatkoztatási rendszerben egy meteor  $v$  sebességgel mozog balra, egy űrhajó pedig  $u$  sebességgel jobbra. A kérdés: mekkora  $v'$  sebességgel mozog balra a meteor az űrhajóhoz képest, azaz az űrhajóhoz rögzített  $S'$  vonatkoztatási rendszerben?