

EXOBOLYGÓK A FIZIKA ÉRETTSÉGIN – II. RÉSZ

Horváth Zsuzsa
Kosztolányi Dezső Gimnázium, Budapest

Érdi Bálint
Eötvös Loránd Tudományegyetem, Csillagászati Tanszék

Csillagukhoz közel keringő gázóriások

Az érettségi feladatban szereplő WASP-12b exobolygót fotometriai módszerrel fedezték fel. A gazdacsillag, a WASP-12 forró, fémekben gazdag, tőlünk 900 fényévnire, az Auriga (Szekeres) csillagképben levő csillag, amelynek tömege 1,29-szorosa, míg sugara 1,58-szorosa Napunkénak. A WASP-12b exobolygó egy forró gázóriás, tömege 1,39-szorosa, míg sugara 1,83-szorosa a Jupiterének, egyike a legkisebb sűrűségű exobolygónak (sűrűsége negyede a Jupiter sűrűségének, körülbelül 300 kg/m^3). A hőmérsékletükben sokkal nagyobb az eltérés, a Jupiter átlaghőmérséklete 150 K , a WASP-12b exobolygó viszont 2500 K átlaghőmérsékletű. Ez a nagy különbség könnyen magyarázható a csillaguktól való távolságukkal. Míg a Jupiter $5,2 \text{ CsE}$ távolságra¹ van a Naptól, addig a WASP-12b csak $0,023 \text{ CsE}$ -re található csillagától. A WASP-12b, az egyik legforróbb exobolygó keringési ideje $1,09$ nap [8].

A csillagukhoz közel keringő égitestek tengelyforgása általában kötött,² ami azt jelenti, hogy tengelyforgási és keringési periódusuk megegyezik, tehát a bolygó mindig ugyanazt az oldalát fordítja a csillag felé. Az exobolygók ennél gyorsabb tengelyforgását az árapályerők lassítják le a keringési idő értékére, ha elég hosszú idő telt már el a rendszerben. Ez a jelenség nem ritka a Naprendszerben sem, nemcsak a Föld Holdjára gondolhatunk, hanem például a Jupiter négy nagyobb, Galilei-féle holdjára is [9].

A csillagászok szerint a WASP-12b is kötött keringésű, és mivel igen közel kering a csillagához, hatalmas árapályerők hatnak rá, amelyek következménye, hogy alakja is torzul, ellipszoidhoz lesz hasonló. A gázbolygó anyaga az erős csillagszél miatt folyamatosan távozik az exobolygóról, és üstököscsóvához hasonlóan spirálozik a csillagba. A kutatók szerint 10 millió év múlva magát a fogyó exobolygót is elnyeli a csillaga. Az igen közeli kötött keringésből adódóan a WASP-12b exobolygó csillag felőli oldala magas hőmérsékletű, míg az éjszakai oldal jóval hidegebb. Egy rendszer fényessége annak következtében is változik, hogy éppen milyen fázisban látjuk az exobolygót. Ezt a kis effektust már sikerült megfigyelni 2008 -ban, a CoRoT-1b exobolygónál³ (1. ábra).

A <http://www.spacechronology.com/exoplanets.html> helyen exobolygók kutatásáról szóló kisfilm nézhető meg.

¹ 1 CsE a Föld és a Nap átlagos távolsága, mintegy $150\,000\,000 \text{ km}$.

² Animáció a kötött tengelyforgásról összehasonlítva egy nem így keringővel: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6d/Tidal_lock.gif

³ Egy kisfilm, animáció látható a következő videón: <http://www.youtube.com/watch?v=pin4Q6VDaRg>

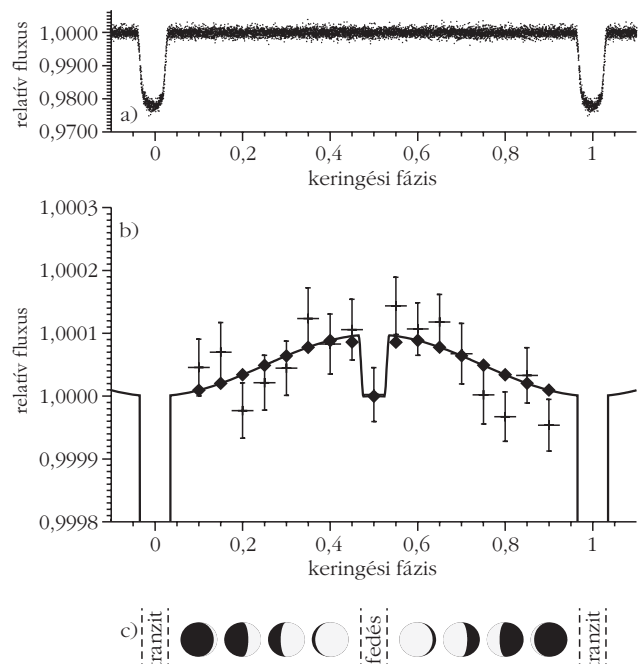
A CoRoT-1 csillag tőlünk 1500 fényévnire, a Monoceros (Egyszarvú) csillagképben lévő, Napunkhoz hasonló csillag (tömege $0,95$ naptömeg, sugara $1,11$ napsugár, felszíni hőmérséklete közel 6000 K). A CoRoT-1b exobolygó jupiter-tömegű, de sugara másfélszerese a Jupiter sugarának. Ez az exobolygó is olyan közel kering a csillagához, mint a WASP-12b, $1,5$ naponta kerüli meg azt körülbelül $0,025 \text{ CsE}$ távolságban [10]. A CoRoT-1b nevét egy űrtávcsőről kapta.

Exobolygókat kereső űrtávcsövek

Miért szükségesek az űrtávcsövek, milyen előnyei vannak az űrbeli megfigyeléseknek?

A földi légkör az elektromágneses sugárzásnak csak egy töredékét engedi át, főleg az optikai és rádiótartományokban. Űreszközökkel viszont megfigyeléseket lehet végezni más hullámhosszakon is. Az űrtávcsöves mérések további előnye, hogy folyamatosan végezhető, és a földi távcsöveknél fellépő zavaró légköri hatások sem okoznak problémát. Természetesen az űrszondák fellövése, megfelelő pályára állítása, pontos irányba fordításuk, energiaellátásuk, a kapcsolattartás velük nem egyszerű mérnöki feladat. Esetleges javítá-

1. ábra. A CoRoT-1b csillagának fénygörbéje, a keringési periódus körülbelül $1,5$ nap (a), alatta a függőleges tengely 200 -szorosán kinagyított skáláján jól látszó fázisváltozások (körülbelül $0,08$ naponkénti átlagolással) (b), míg legalul a keringési fázisokat szemléltető rajzok (c) [10].



suk is nehezen megoldható, így általában a mérések a műszerek fizikai élettartamáig tartanak.

A CoRoT (*Convection Rotation Transits*, konvekció, forgás és bolygóátvonulás) űrtávcsövet 2006. december 27-én indították. A 850 km-es magasságban, poláris pályán a Föld körül keringő űrtávcső a csillagok által kibocsátott fény változását méri egy 27 cm átmérőjű távcsővel. Félpercenként készítenek felvételeket fél éven át az égbolt ugyanazon területéről, majd a következő fél évben ellenkező irányba fordul az űreszköz, hogy a Nap mindig hátulról érje, a nap-elemeknél. A fénygörbékből nemcsak exobolygótranszitokat figyelnek meg, hanem a csillag forgására, belső energiaterjedésére is következtetnek, és asztroszeizmológiai vizsgálatokat is végeznek, hogy a csillag jellemzőit (tömeg, kor, kémiai összetétel) meghatározhassák. A megfigyelési program francia vezetéssel, több európai ország és Brazília együttműködésével keresi az exobolygókat. Hazai kutatók is részt vesznek a programban, főleg az asztroszeizmológiai kutatásokban [11, 12].

Nagyrészt csillagukhoz közel keringő forró Jupiterek fedeztek fel ezzel az űrtávcsővel, de a CoRoT-7b egy 5 földtömegű kőzetbolygó. Felfedezése igazi szenzáció volt a sok forró óriás gázbolygó megtalálása után. A CoRoT-7b is egy Naphoz hasonló csillag körül kering, amely tőlünk 480 fényévnire található, szintén a Monoceros (Egyszarvú) csillagkép irányában. A CoRoT-7 csillag 0,93 naptömegnyi, sugara a Napunkénak 0,87-szerosa, felszíni hőmérséklete 5300 K. A CoRoT-7b körülbelül 20 óránként kerüli meg csillagát, igen közel, 0,017 CsE távolságban. A Naprendszerben ez még a Merkúr távolságánál is 23-szor közelebbi pályát jelentene. Az exobolygó mérete körülbelül 70%-kal nagyobb a Földénél (sugara 0,15 jupitersugárnyi), de sűrűsége hasonló értékű, ezért gondolják kőzetbolygónak. Még a felfedezés évében, 2009-ben találtak egy újabb kőzetbolygót a rendszerben. A CoRoT-7c exobolygó kicsit nagyobb (0,026 jupitertömegű), kicsit távolabb kering a csillagjától (fél nagytengelye 0,046 CsE), de ez még mindig igen közeli, a keringési ideje mindössze 3,7 nap. Mindkét exobolygó igen forró, és kötött keringést végez. A csillag felőli oldalukon olvadt kőzetek, lávakitörések valószínűsíthetők, míg az éjszakai félteke szilárd kőzetekből áll.

2011 januárjában a Kepler-űrszonda segítségével fedeztek fel kőzetbolygót: a Kepler-10b⁴ mérete 1,4-szerese bolygónkénak, tömege pedig 4,6-szerese a Földének. Átlagos sűrűsége 8,8 g/cm³, ami a vas sűrűségénél is több. Mivel a Naphoz hasonló csillaga körül igen közel kering ez az exobolygó, a felszíne nagyon forró, így ezt is inkább „lávaóceán” borítja, mint szilárd kőzet.

A *Fizikai Szemle* korábbi számaiban több cikk is foglalkozik a Kepler és a CoRoT űrszondákkal és eredményeikkel [6, 13–15].

⁴ A <http://www.spacechronology.com/exoplanets.html> helyen a NASA kisfilmje látható erről az exobolygóról.

A Kepler-űrszonda egyik célja Földünkhöz hasonló exobolygók keresése. Az ötlet már 1971-ben megjelent *F. Rosenblatt* cikkében, amelyben arról írt, hogyan lehet az exobolygók méretét és keringési periódusát meghatározni a tranzitmódszer segítségével [16]. 1984-ben *W. J. Borucki* és *A. L. Summers* is foglalkozott ezzel a témával, és megállapították, hogy a földfelszínről történő megfigyeléssel csak nagyobb, Jupiter méretű égitestek fedezhetők fel fotometriai módszerrel [17]. A kisebb, Föld méretű planéták észleléséhez az űrbe kell telepíteni a távcsövet. A hosszú előkészítés meghozta gyümölcsét, a 2009. március 7-én felbocsátott Kepler-űrszonda ontja az új felfedezéseket, köztük, ahogy várták, a kisebb, Földhöz hasonló exobolygókét is.

A Kepler-űrtávcső Nap körüli pályán kering, 372,5 napos periódusidővel. A folyamatos megfigyeléshez fontos, hogy a távcső látómezeje távol legyen az ekliptikától, hogy se a Hold, se a Nap ne takarja el a megfigyelt égiteret. A galaktikus síkhoz közeli Hattyú és Lant csillagképek határán lévő, nagy csillagsűrűségű területre esett végül a választás, az ott lévő csillagokból 150 000-et figyel meg az 1,4 m átmérőjű Kepler-űrtávcső. Ez a megvizsgált terület az éjszakai égbolt négyszázad része. Az adatok kiértékelésében, elemzésében, a megerősítő észlelésekben magyar csillagászok is eredményesen vesznek részt [18].

A missziót még legalább három évre meghosszabbították, így hosszabb periódusú exobolygók felfedezése is várható. A Kepler-űrtávcső segítségével közel 80 exobolygót fedeztek fel három év alatt, és több mint kétezer bolygójelöltjük is van. Azonkívül, hogy Földhöz hasonló exobolygókat is találtak, több exobolygórendszert is felfedeztek az űrtávcső segítségével, köztük olyat is, amelynek 5-6 bolygója van. A Kepler-11⁵ a Naphoz hasonló csillag tőlünk 2000 fényévnire található, és körülötte hat exobolygót fedeztek fel. Mind a hat bolygó nagyobb a Földnél és közelebb keringenek csillagukhoz, mint a Vénusz a Naphoz.

A Kepler-programban először földi távcsövekkel már korábban felfedezett exobolygók fénygörbéjét vizsgálták, például a HAT-P7b-ét.⁶

Magyar vonatkozások

A HAT kezdetű rövidítések egy magyar exobolygó-kutató csoportra, a HATNet-re utalnak. A Magyar Automatikus Távcsőhálózat angol megfelelőjének kezdőbetűiből adódik a rövidítés (Hungarian Automated Telescope Network). *Bakos Gáspár* vezetésével tervezték a 11 cm átmérőjű automatizált távcsöveket. Az elkészítésben *Sári Pál* gépészmérnök, *Papp István* elektromérnök és *Lázár József* szoftvermérnök

⁵ A NASA animációja: <http://www.youtube.com/watch?feature=endscreen&NR=1&v=uo4xOz6iWlk>

⁶ Ilyet láthatunk a Kepler-2b animációján: <http://kepler.nasa.gov/Mission/discoveries/kepler2b>

segített. 2001-ben készült el az első távcső, és azóta már több helyszínre (Arizona, Hawaii, Izrael, Chile, Namíbia és Ausztrália) telepítettek belőlük. 2006 augusztusában került sor a magyar HATNet csoport első exobolygó felfedezésére (HAT-P-1b), az Arizonában telepített robottávcsövekkel [19]. Egy távoli kettőscsillag halványabb tagja körül igen közel kering a fél jupitertömegű HAT-P-1b elnevezésű exobolygó 4,5 napos periódussal. 2009-ben találtak egy retrográd, vagyis csillagának forgásával ellenkező irányban keringő bolygót (HAT-P-7b).

Az American Astronomical Society fiatal kutatóknak adható rangos elismerését, a Newton Lacy Pierce díjat, 2011-ben honfitársunknak, Bakos Gáspárnak, az egyik legeredményesebb exobolygóvadásznak ítelték.

Az exobolygók változatos világa

Már közel 900, Naprendszeren kívüli bolygót ismerünk, az első 17 évvel ezelőtti felfedezése óta. Milyenek ezek az exobolygók? Sokfélék. A kezdeti felfedezésekből már látszott, hogy nem tudunk az exobolygók vagy rendszereik tulajdonságaira a mi Naprendszerünk alapján következtetni. Pályájuk nagyon változatos, több közülük nagy excentricitású ellipszisen mozog. Sok a Jupiternyi vagy annál nagyobb tömegű exobolygó, és közelebb keringenek csillagukhoz, mint a Merkúr a Naphoz, de találtak számunkra szokatlanul messze haladót is. Amíg a Naprendszerben a bolygók közel egy síkban keringenek, a Nap forgásával egy irányban, addig vannak olyan exobolygópályák, amelyek jelentősen eltérnek csillaguk egyenlítői síkjától, és akadnak retrográd bolygók is. Változatos képet mutatnak az exobolygók gazdacsillagai is. Mindenféle csillag körül találtak már bolygót, lehet kis tömegű vagy óriás, és tarthat a csillagfejlődés bármelyik szakaszán. A csillagok több mint fele kettős vagy többes rendszer tagja, ismerünk exobolygókat ilyen rendszerekben is. Egy hármas csillagrendszer egyik tagja körül keringő exobolygó, a Gliese 667Cc felszínén meglepő látvány fogadna minket, ott három „Nap” is ragyog az égen (2. ábra).

Egy kis tartomány viszont üres az igen változatos exobolygóvilágban, létezik egy úgynevezett „kis Jupiter sivatag”. Ez azt jelenti, hogy a csillaghoz közel vagy nagy gázóriások vagy kisebb kőzetbolygók találhatóak, de Neptunusz tömegű exobolygót még nem figyeltek meg csillagjához közel keringeni. Erre az érdekességre magyar csillagászok is keresik a magyarázatot [15].

Mai ismereteink alapján úgy gondoljuk, hogy élet a csillagok körül az úgynevezett *lakhatósági zónán* belül keringő exobolygókon vagy holdjaikon lehetséges, ezért is fontos ezek keresése, tulajdonságaik vizsgálata, ami csak fizikai, asztrofizikai kutatásokkal lehetséges. Diákjaink is sokszor találkoznak földönkívüli világokkal a filmekben és a számítógépes játékokban. A távoli bolygók, bolygórendszerek ismerete segít saját planetánk és Naprendszerünk megismerésében is.



2. ábra. Fantáziakép a Gliese 667Cc-ről, ahol három „Nap” is ragyog az égen. Ez az exobolygó egyike annak a kilencnek (2012. decemberi állapot szerint), amelyek akár lakhatók is lehetnek.

A csillagászati és geológiai folyamatok nem emberi léptékűek, tanulmányozásuk ezért igen nehéz. Az égbolton viszont különböző korú rendszereket figyelhetünk meg, így pontosabb képet alkothatunk a bolygók keletkezéséről, a bolygórendszerek fejlődéséről, jövőjéről. Kíváncsiak vagyunk arra is, hogy mennyire egyedi, vagy éppen átlagos a Naprendszerünk.

Az exobolygókkal kapcsolatos ismeretekkel érdekesebbé tehetjük a fizikaórákat mind a Kepler-törvények és világképek tanításánál, mind a csillagászat tananyagrésznél, és megemlíthető ez a témakör a fénytannál is, mint a spektroszkópia egy alkalmazása. Természetesen földrajzórakon is létjogosultsága van a témának.

Az elmúlt húsz évben az exobolygó-kutatás rohamos fejlődésnek indult. Jóllehet sok ismeretnek nem vagyunk még birtokában, az elért eredményeket érdemes és fontos ismertetni érdeklődő diákjainkkal.

Irodalom

- L. Hebb, és mtársai: WASP-12b: The hottest transiting extrasolar planet yet discovered. *The Astrophysical Journal*, 693 (2009) 1920–1928.
- Marik Miklós (szerk.): *Csillagászat*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1989.
- I. A. G. Snellen, E. J. W. de Mooij, S. Albrecht: The changing phases of extrasolar planet CoRoT-1b. *Nature* 459 (2009) 7246, 543–545.
- <http://www.konkoly.hu/HAG/index.html>
- <http://www.scienceinschool.org/2009/issue13/corot/hungarian>
- Paparó Margit: Asztroszeizmológia és exobolygó-kutatás. *Fizikai Szemle* 58/2 (2008) 46–50.
- Balázs Lajos: Az űrcsillagászat európai útiterve. *Fizikai Szemle* 60/10 (2010) 325–331.
- Szabó M. Gyula, Simon Attila, Szalai Tamás: Újdonságok az exobolygók világából. *Fizikai Szemle* 61/7–8 (2011) 217–222.
- F. Rosenblatt: A Two-Color Photometric Method for Detection of Extrasolar Planetary Systems. *Icarus* 14 (1971) 71.
- W. J. Borucki, A. L. Summers: The photometric method of detecting other planetary systems. *Icarus* 58 (1984) 121–134.
- http://www.konkoly.hu/KIK/index_hu.html
- <http://www.cfa.harvard.edu/~gbakos/HAT/>