

EXOBOLYGÓK A FIZIKA ÉRETTSÉGIN – I. RÉSZ

Horváth Zsuzsa

Kosztolányi Dezső Gimnázium, Budapest

Érdi Bálint

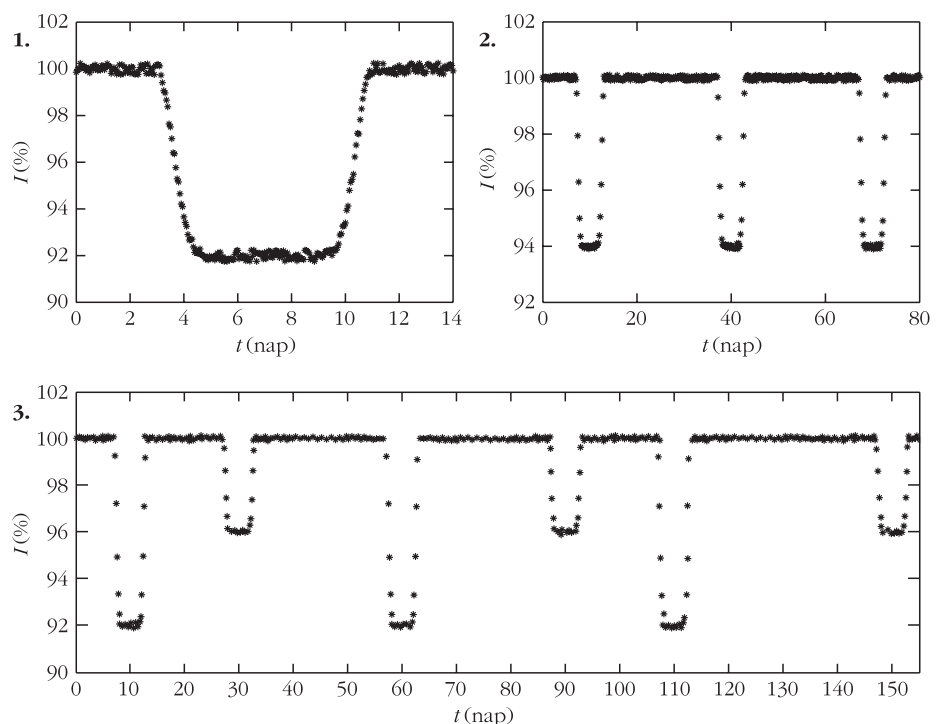
Eötvös Loránd Tudományegyetem, Csillagászati Tanszék

A 2011. májusi fizika középszintű érettségi egyik választható feladata a Naprendszeren kívüli bolygókkal, exobolygókkal volt kapcsolatos. Tankönyveinkben még nem szerepelnek ezekkel foglalkozó ismeretek, hiszen az első ilyen égitest felfedezése óta 20 év sem telt el. Az exobolygó-kutatás napjaink sikeres, gyorsan fejlődő csillagászati területe. A jelenkori kutatások bemutatása tanulóinknak igen nehéz, ez alól az egyik kivétel az exobolygó-kutatás, hiszen eredményei könnyen közérthetővé tehetőek, és mindenkit érdekelnek, ezért a hozzá kapcsolódó fizikai ismereteket is jobban megjegyzik diákjaink. Az érettségi feladathoz kapcsolódóan mutatjuk be az exobolygókat, a fontosabb megfigyelési módszereket, néhány kutatócsoportot és az űrtávcsöveket. Egy-két érdekesebb exobolygórendszert is megemlítenk.

Emlékeztetőül a 2011. májusi középszintű 3/A feladat szövege és ábrái [1]:

Az exobolygók (azaz a mi Naprendszerünkön kívüli bolygók) egy része olyan pályán kering a csillaga körül, hogy a Földről nézve áthalad

a csillag előtt. Ilyen exobolygókat, különösen a nagyobbakat, fel lehet fedezni úgy, hogy a csillag fényességét folyamatosan mérve észleljük, amikor a bolygó áthalad előtte, ugyanis ilyenkor a bolygó részleges takarása miatt a mért fényesség lecsökken. Az első grafikon mutat egy tipikus mérési görbét, ahol a csillagfény intenzitásának százalékos csökkenése van feltüntetve.

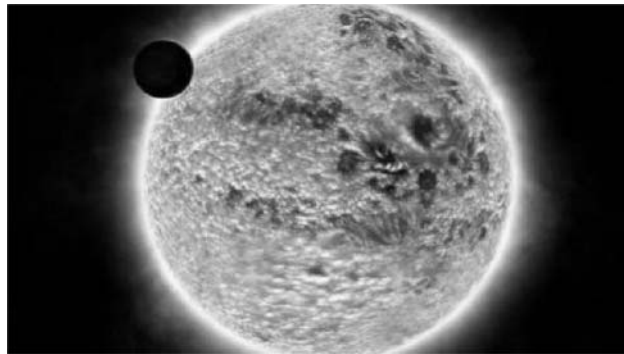


a) Körülbelül mennyi idő alatt haladt át a bolygó a csillag előtt?

b) Mit mondhatunk a görbe alapján a csillag és a körülötte keringő bolygó átmérőjének viszonyáról (arányáról)?

c) A második ábra egy másik csillag fényintenzitásának az előzőnél hosszabb időn át mért változását tartalmazza. A csillag felületének mekkora hányadát takarja ki a bolygó? Mekkora a keringés periódusideje és nagyságrendileg mennyi idő alatt halad át a csillag előtt a bolygó?

d) A harmadik grafikon egy harmadik csillag fényintenzitásának mérési eredményét mutatja. Olvassa le a grafikonról a fényintenzitás csökkenések közelítő időpontjait! Mi lehet a magyarázata annak, hogy a fényintenzitás-minimumok eltérő mértékűek? Hogyan értelmezhető az egymást követő fényintenzitás-minimumok között eltelt időintervallumok eltérő nagysága?



A javítási-értékelési útmutató ide vonatkozó része:

a) *A bolygó áthaladási idejének leolvasása a görbéről:* (2 pont) A bolygó körülbelül 8 nap alatt halad át a csillag előtt (a csillag fényességcsökkenésének kezdetétől a teljes fényesség újbóli eléréséig számítva). (Nem kell hibának tekinteni, ha a vizsgáló csak a körülbelül 6 napig tartó minimális fényességű időszak tartamát olvassa le, így a 6 nap is teljes pontszámot ér. Ez a megjegyzés a továbbiakban is érvényes.)

b) *A takarás mértékének megállapítása:* (2 pont). A csillag felületének 8%-át takarja ki a bolygó.

A csillag, illetve a bolygó sugara közti viszony kiszámítása: (4 pont, bontható). A bolygó és a csillag látszólagos felületének viszonya $0,08$. $(r^2\pi)/(R^2\pi) = 0,08$ (2 pont), amiből $2r/2R \approx 0,28$ arány adódik (2 pont).

c) *Az adatok helyes leolvasása:* (4 pont, bontható). A bolygó a csillag látszólagos felületének körülbelül 6%-át takarja ki (1 pont). A bolygó 30 napos periódusidejével kering a csillag körül (2 pont). A bolygó áthaladási ideje körülbelül 2-8 nap (1 pont). (Mivel a grafikonról az áthaladás ideje csak rosszul látható, a becslést tág határok között kell elfogadni.)

d) *A közelítő időpontok helyes leolvasása:* (2 pont, bontható). (2 pont akkor adható, ha mind a hat adatot helyesen olvasta le a vizsgáló. 1 pontot egynél nem több félreolvasás esetén lehet adni.)

Az eltérő mértékű fényintenzitás-csökkenés magyarázata: (3 pont, bontható). A csillag körül két, különböző átmérőjű bolygó kering. (A két bolygó felismerése 2 pont, a különböző átmérőre utalás 1 pont. Egyéb értelmes ötletekre, magyarázatokra 1 pont adható.)

Az egymást követő fényintenzitás-csökkenések között eltelt időintervallumok eltérő voltának magyarázata: (3 pont, bontható). Hol az egyik, hol a másik bolygó takarja a csillagot. A két exobolygó keringési periódusa különböző. (A két bolygó váltakozó lefedésére való utalás 1 pont, a különböző periódusidő kimondása 2 pont.)

Összesen 20 pont.

A feladatból megtudhatjuk, hogy mik is az exobolygók, és az egyik megfigyelési módszerüket (az átvonulási fotometriát) is leírják, majd a fénygörbéről kell információkat leolvasni. Az utolsó kérdésnél már egy kissé bonyolultabb fénygörbét találunk, amelynek okára (két különböző átmérőjű bolygó is kering a csillag körül) is rákérdeznek [1].

Az érettségi feladat képen a WASP-12b exobolygó művészi ábrázolására ismerhetünk. A név első része a SuperWASP (Wide Angle Search for Planets, Nagy Látószögű Keresés Bolygók után) angol kutatócsoportra utal, amely 2008-ban fedezte fel ezt a planétát, a WASP-12-nek elnevezett csillag körül. A 12-es szám arra utal, hogy a SuperWASP kutatócsoportnak ez volt a 12. felfedezett exobolygója.

Az első, fősorozatbeli csillag körüli exobolygó felfedezése 1995 augusztusában történt. *Michael Mayor* és *Didier Queloz*, a Genfi Observatórium munkatársai az 51Peg, egy tőlünk 50 fényévnnyire levő, Napunkhoz hasonló csillag körül találtak egy fél Jupiter tömegű exobolygót [2]. A Bellerophonnak elkeresztelt égitest mindössze 4 nap alatt kerüli meg csillagát. Alig fél év múlva, 1996 elején *Geoffrey Marcy* és *R. Paul Butler* talált a hozzánk képest 80 fényévnnyire levő 70Vir csillag körül egy több, mint 6 Jupiter tömegű exobolygót.

Ezután egyre szaporodtak a felfedezések. Eleinte igen nagy, csillagukhoz közel keringő gázóriásokat, „forró Jupitereket”, fedeztek fel. Ez igen meglepő volt, és felvetődött a bolygók pontosabb meghatározásának a kérdése is.

Hol a határ egy csillag és egy bolygó tömege között? Az elmúlt tíz évben a Nemzetközi Csillagászati Unió két konferencián is foglalkozott a bolygók meghatározásával. 2003-ban a felső tömeghatárt határozták meg, 13 Jupiter-tömegben. Az ennél nagyobb tömegű égitestekben beindulhatnak a fúziós folyamatok (először a deutériumé), így ezeket már nem (exo)-bolygóknak, hanem barna törpéknek nevezik. Nemcsak a Naprendszeren kívül fedeznek fel újabb égitesteket, hanem a Naprendszeren belül is, amelyek már nem nagy tömegűek. Így felvetődött a bolygók alsó tömeghatárának a kérdése is. A 2006-os prágai konferencián vitatták meg ezt a kérdést, pontosan meghatározták, mit nevezünk bolygónak. Eszerint bolygó az az égitest, amely a Nap körül kering, és elegendően nagy tömegű ahhoz, hogy kialakuljon a hidrosztatikai

egyensúlyt tükröző közel gömb alakja, valamint tisztára söpri a pályáját övező térséget. Itt nem olyan könnyű tömeghatárt megadni, mert a tömegén kívül a csillagtól való távolságtól is függ, hogy egy égitestet bolygónak tartunk-e; gravitációsan uralja-e pályája környékét. A Plútó már nem tartozik a bolygók közé, tömege kevesebb, mint a Föld tömegének ezredrésze. A Plútó és hozzá hasonló naprendszerbeli égitestek részére a törpebolygó elnevezést javasolták. Már a 2003-as konferencián szó volt az exobolygók definiálásáról, amely szerint exobolygók azok az égitestek, amelyek csillagok vagy csillagmaradványok körül keringenek, és tömegük alatta van annak a határértéknek, aminél a deutérium termonukleáris fúziója beindulna (13 Jupiter tömeg). Egyelőre az alsó tömeghatárral kapcsolatban még nincs probléma, mert a Földhöz hasonló tömegű exobolygó felfedezésekből nincs sok [3].

A Világegyetemben százmilliárdnyi galaxis figyelhető meg, és mindegyikben, mint a mi Tejútrendszerünkben is, néhány százmilliárdnyi csillag található. A csillagok jelentős részének lehetnek bolygó kísérői, így csak a mi galaxisunkban több milliárd bolygó várhat a felfedezésre. A halványabb vagy messzi csillagok megtalálása is igen nehéz, a körülöttük levő bolygók észlelése pedig reménytelennek tűnhet. A mai távcsövek és egyéb megfigyelési eszközök (például spektroszkópok) igen pontos méréseket, észleléseket tesznek lehetővé, a digitális fényképezés pedig megkönnyítette a jó minőségű felvételek készítését. A számítástechnika ugrásszerű fejlődése az adatok (képek) tárolását és feldolgozását könnyítette meg nagymértékben, így vált lehetővé az exobolygók megtalálása, kutatása.

A legeredményesebb exobolygó-keresési módszerek

Radiális sebesség-mérés

Eleinte a csillagok látóirányú sebességmérésének segítségével fedeztek fel exobolygókat. Ha egy csillagnak van egy számottevő tömegű kísérője, amely lehet csillag vagy bolygó is, akkor a két égitest a közös tömegközéppont körül kering. Abban az esetben, ha a csillag pályasíkja nem a látóirányunkra merőleges, mozgása során egyszer közeledik, másszor távolodik tőlünk, vagyis látóirányú (radiális) sebessége változik. Ez a sebesség-ingadozás a csillag spektrumában levő vonalak kék eltolódását (felénk való közeledéskor) és vörös eltolódását (tőlünk való távolodéskor) okozza (Doppler-effektus). A hullámhossz-eltolódás méréseiből a radiális sebesség meghatározható:

$$v_r = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda},$$

ahol c a fénysebesség és λ a vizsgált színekpvonal hullámhossza. A színekpvonalak eltolódásának periódusa az exobolygó keringési idejét adja meg. Minél nagyobb tömegű a kísérő égitest és minél közelebb

kering csillagához, annál nagyobb mértékű a csillag látóirányú sebességének ingadozása. Természetesen ez az érték a pályahajlás mértékétől is függ. Ha a pályasík szöget zár be a látóirányunkkal, akkor csak a sebesség látóirányunkba eső komponensét tudjuk mérni, ezért a kísérő égitest tömegére csak alsó becslés adható ezzel a módszerrel. Abban az esetben, ha az exobolygó éppen a látóirányunkra merőlegesen kering, ilyen módon nem detektálható [4, 5].

Asztrometria

Az asztrometriai módszernél is azt használják ki, hogy az exobolygó gravitációs hatása ide-oda rángatja a csillagot a közös tömegközéppont körül, így a látó mozgás egyenletlenségéből a láthatatlan kísérő tömegére és helyzetére lehet következtetni. Különbség az előző módszerhez képest, hogy ennél nem a látóirányú, hanem az erre merőleges, az égboltra vetülő komponenszt mérik, a legnagyobb távcsövekkel. Először ezzel a módszerrel próbáltak exobolygót keresni a Barnard csillag körül a múlt században. *Peter van de Kamp* több évtizedig figyelte ezt a tőlünk mindössze 6 fényévre levő csillagot, mivel a Földről nézve sajátmozgása ennek a legnagyobb (a Naptól eltekintve). Az észlelt hullámzó mozgást a csillag körül keringő bolygónak tulajdonították, ami tévesnek bizonyult. Nemcsak a mérési pontosság hiányzott, hanem a planéta is. 2009-ben fedeztek fel ezzel a módszerrel exobolygót (VB10b), amelynek érdekessége, hogy méretében hasonló csillagához, de természetesen jóval könnyebb nála [4].

Átvonulási fotometriai

A radiális sebesség-mérésen kívül fotometriai módszerrel figyelik meg a legtöbb exobolygót, és mivel a Kepler-űrszonda ilyen elven keresi a csillagok bolygókísérőit, egyre több tranzitos exobolygó felfedezése várható. Tranzitmódszerként is szokták emlegetni ezt a módszert, mert a központi csillag fényességcsökkenését vizsgálják, miközben egy bolygója elvonul a csillag előtt. A Naprendszerben is jól megfigyelhetők fedési jelenségek, amikor keringése során egyik égitest a másik elé, majd mögé kerül. Gondolhatunk a nap- és holdfogyatkozásokra, vagy a belső bolygók napkorona előtti áthaladásaira, és a Jupiter korongja előtt is megfigyelhetők a nagyobb holdjai. A fedési változó csillagok esetében már találtak a csillagászok az időleges fényességcsökkenés jelenségével. Ha egy kísérő csillag áthalad a másik csillag korongja előtt, akkor annak egyébként állandó fénye rövid időre csökken. A fénygörbe alakjából, a fényességcsökkenések időpontjából, időtartamából a láthatatlan kísérő méretét, pályáját határozhatjuk meg. A csillagok összetételére is következtethetünk a rendszer színekéből, ugyanis a halvány csillag el is tűnik a fényesebb mögött (mellékminimum), ekkor csak a fényesebb csillagot jellemzi a megfigyelt színek, majd az újbóli megjelenésénél, láthatóságánál a halványabb kísérő fénye is eljut hozzánk. Az exobolygók tranzitja csak mértékben különbözik a kettős-

csillagoknál megfigyeltektől, jóval kisebb az általuk okozott fényességcsökkenés. Összehasonlításképpen, ha egy messzi csillagról figyelnénk a Jupiter Nap előtti átvonulását, az 1%-nyi fényességcsökkenést okozna, míg a Föld fedése csak 0,01%-nyit. A fénygörbe mélysége a bolygó és csillaga méretarányától függ, ezért földszerű bolygók keresése a kisebb vörös törpecsillagok körül a legeredményesebb. Minél messzebb van egy bolygó a csillagjától, annál kisebb a valószínűsége, hogy észleljük átvonulását a csillag előtt, esetleg némelyik csak sűrölja a csillagkorongot (ez még kisebb fényességcsökkenéssel jár). Figyelembe kell vennünk, hogy a csillag korongja sem egyenletes fényű, akár foltok is lehetnek rajta (hasonlóan a napfoltokhoz). A fotometriai eljárás segítségével az exobolygó-léggörök is elemezhetők. A bolygó csillaga előtti áthaladásakor a csillag fénye átvilágít a bolygó esetleges léggörén, és ez nyomot hagy a csillag színképében. A fénygörbe kis ingadozásaiából újabb exobolygókra vagy esetleg exoholdak létezésére is következtethetünk.

Hasonlóan a radiális sebesség méréséhez, itt is fontos, hogy a bolygó pályasíkja a látóirányunkkal egybeessen (vagy legfeljebb kissé térjen el tőle). Hosszabb keringési idejű bolygóknál türelmesen meg kell várni az újabb átvonulások idejét. Legalább három fedést kell megfigyelni ahhoz, hogy egy bolygójelöltből elismert exobolygó legyen, ami több évig is eltart. Általában még spektroszkópiai vizsgálattal is megerősítik az exobolygó létét, tulajdonságait. Hatékonyá tehető a fotometriai eljárással való bolygókeresés, ha egyszerre nagyon sok csillag fényességváltozását figyelik folyamatosan, hosszabb ideig (évekig). Más módszerrel felfedezett exobolygóknál is érdemes fénygörbét megfigyelni (ha lehetséges), mert így újabb adatokat ismerhetünk meg róluk. Például a radiális sebesség méréséből tömeget, a fotometriából méretet lehet meghatározni, így már az égitest sűrűségét is megismerhetjük [4–6].

Gravitációs mikrolencse hatás

Az általános relativitáselmélet szerint a nagy tömegek mellett elhaladó fénysugár elhajlik, vagyis egy közelebbi égitest (általában csillag) gyűjtőlencseként működik egy mögötte levő fényforrás (galaxis, csillag) számára. Azokban az esetekben, amikor egy közelebbi csillag nagy sajátmozgása következtében éppen egy távolabbi, látszólag fix helyzetű csillag előtt halad át (vagyis tőlünk nézve éppen elfedi a távolabbi csillagot), akkor e lencsehatás következtében a nagyító-lencseként működő csillag időszakosan felerősíti a háttércsillag fényét. Ez a jelenség távcsővel és a fény erősségét mérő eszközzel (fotométerrel) megfigyelhető. Kisebb mértékben ugyan, de egy a közelebbi csillag körül keringő exobolygó is képes lencseként működni, vagyis időszakos fényerősödést létrehozni, amely a fénygörbén másodlagos maximumként jelentkezik vagy a felszálló vagy a leszálló ágon. Tehát ha egy ilyen másodlagos púpot találunk, akkor az jelzi egy exobolygó létét a közelebbi csillag

körül. A másodlagos púp amplitúdója az exobolygó tömegétől függ, míg helyzete a fénygörbén megmutatja az exobolygó pillanatnyi szögtávolságát a csillagjától (ha ismerjük a csillag tőlünk mért távolságát, akkor ebből a csillag és a bolygó valódi távolsága is meghatározható). Ez a módszer különösen alkalmas a csillaguktól nagy távolságra levő exobolygók felfedezésére. Eddig így 16 bolygót figyeltek meg [7]. Probléma, hogy a jelenség ritka, előre nem jelezhető, és nem is ismétlődik, vagyis utólagosan nem igazolható. A kutatók célszerűen az égbolt olyan területére koncentrálnak, ahol a csillagsűrűség nagy (például a Tejútrendszer középpontjának környéke), és igyekeznek sok millió csillag fényváltozásait egyidejűleg követni annak érdekében, hogy a felfedezés valószínűsége nagyobb legyen. Ezzel a módszerrel van remény a csillagközi térben egyedül repülő „bolygók” felfedezésére is [4].

Direkt képalkotás

Legegyszerűbbnek tűnő eljárás, hogy takarjuk le valahogyan a központi csillag képét, és közvetlenül figyeljük meg a közelében található exobolygókat. A módszer a központi csillagtól távoli, fényes bolygóknál lehet eredményes, mert a csillag fénye egyébként teljesen elnyomja a bolygóét. A csillag és bolygója fényessége között akár milliárdszoros eltérés is lehet, de infravörös-tartományban milliószorosra csökkenhet ez az arány, így a képalkotás főképp infravörös hullámhosszakon lehetséges. Eddig 31 exobolygót sikerült lefényképezni (például a HR 8799b, c, d rendszert: http://keckobservatory.org/gallery/detail/milky_way/26).

Pulzárjelek vizsgálata

A pulzárak gyorsan forgó, erős mágneses térrel rendelkező neutroncsillagok. A pulzárak irányából nagyon pontos periodicitással rádióimpulzusokat észlelünk. A PSRB1257+12 pulzárról például 0,00622 s-ként érkeznek rádióhullámok felénk. Amennyiben a pulzárnak van kísérője, akkor a közös tömegközéppont körüli mozgásból adódóan hol közeledik, hol távolodik tőlünk, amit az észlelt impulzusok közötti időtartamok periodikus változásaként észlelünk. A rádióimpulzusok frekvenciájának ezt a szabályos váltakozását is a Doppler-effektussal magyarázhatjuk. A pulzárról jövő rádiójelek vizsgálatából kis tömegű bolygókísérők kimutatása is lehetséges.

Az exobolygók meghatározása alapján a csillagma-radványok körül keringő objektumokat is az exobolygók közé soroljuk. Így az első, további vizsgálatokkal megerősített exobolygó felfedezése már 1991 végén megtörtént. Ugyanis *Alekszander Wolszczan* és *Dale Frail* többes bolygórendszert talált egy pulzár (PSRB1257+12) körül. Ez a felfedezés azért nem hozta lázba a világot, mert a pulzárak gyorsan forgó neutroncsillagok, amelyek körül még a földtömegű exobolygók sem tudunk elképzelni életet, legalábbis a miénkhez hasonlókat nem. Természetesen a csillagászokon kívül az embereket főleg az érdekli, hogy az ép-

pen felfedezett égitesten van-e, lehet-e élet, és az értelmes élet-e. Ez azonban külön tudományág, az asztrobiológia foglalkozik ezekkel a kérdésekkel. Vannak más módszerek is, amelyekkel exobolygókat találhatunk, de az említettek a legjelentősebbek [4].

Irodalom

1. http://www.oh.gov.hu/3_1_6_korabbi_ereztsegi/2011-majusi-ereztsegi-kozepszint
2. Michel Mayor, Didier Queloz: A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature* 378 (1995) 355–359.
3. Csizmadia Szilárd: A Plútó osztályozásáról. *Fizikai Szemle* 56/12 (2006) 399–403.
4. Almár Iván: *Kozmikus társkereső*. Kossuth Kiadó, 2011.
5. Szatmáry Károly: Bolygók mindenütt. *Fizikai Szemle* 57/12 (2007) 433.

6. Szabó Róbert: Bolygóáradat és asztroszeizmológia. *Fizikai Szemle* 59/4 (2009) 121–126.
7. <http://exoplanet.eu/catalog/?f=%22microlensing%22+IN+detection>

További források

Kereszturi Ákos: *Asztrobiológia*. Magyar Csillagászati Egyesület, Budapest, 2011.

Meteor Csillagászati évkönyv 2011, 2009, 2003

<http://tudasbazis.csillagaszat.hu>

<http://hirek.csillagaszat.hu>

<http://www.konkoly.hu/KIK>

<http://kepler.nasa.gov> – a Kepler-misszió honlapja

<http://exoplanet.eu>

<http://astro.elte.hu>

<http://www.spacechronology.com/exoplanets.html>

<http://kepler.nasa.gov/Mission/discoveries/kepler2b>