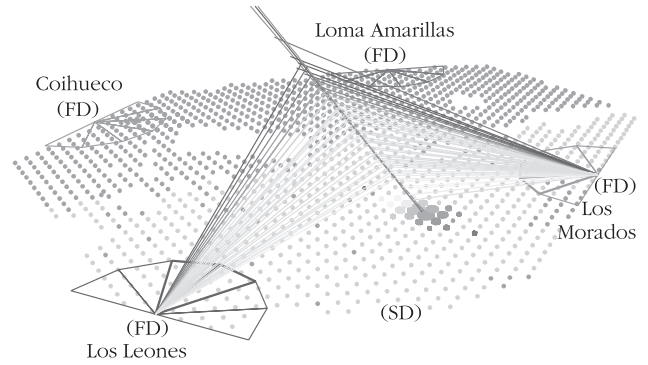




8. ábra. A teljes Auger Observatórium a Balaton környékre vetítve.

Ezen a ponton jobb, ha megállunk és értékeljük az extrém energiatarományban működő fluoreszcens detektorok bevezetése által nyújtott jelentős új lehetőségeket. Először is a longitudinális fejlődés megfigyelhetősége, az átlagoszapor-maximum és fluktuációjának mérése segít megállapítani a bejövő magok átlagos



9. ábra. Hibrid esemény megfigyelése az Auger Observatóriumban. Két fluoreszcensdetektor-állomás (FD) és a felszín-detektorrendszer (SD) is mér.

összetételét. Ez a felszíni légizápor-detektor mérések egyik Achilles-sarka. Az energiámérés nagyobb pontossága és a hibrid módban történő újrakalibrálás nemcsak a hadron-modellezés bizonytalanságai-ból adódó szisztematikus hibát csökkenti, hanem a keresztkalibrálás által a hasznos adatgyűjtési időt egy teljes naptári nappá növeli a felhőtlen, holdfénymentes éjszakák helyett.

A következő számban sorra kerülő folytatás első része a gyorsítókkal már ellenőrzött részecskefizika kiterjesztésével foglalkozik az extrém energiák tartományába. Azután a fluoreszcens detektorok és a két új hibrid detektor legújabb megfigyeléseit tárgyalja kiemelve az Univerzum korai fejlődéséről szóló szigorú korlátokat.

ÚTON AZ EXTRASZOLÁRIS HOLDOK FELFEDEZÉSE FELÉ

Simon Attila

MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont
Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet

A Földhöz hasonló bolygó létezésének kérdésével már az ókori görögök (*Démokritosz*, *Epikurosz*) is foglalkoztak. Először *Huygens* (1698) próbált meg kimutatni bolygót más csillagok körül, de hamar rájött, hogy egy ilyen bolygó kimutatása messze meghaladja legjobb távcsöveinek lehetőségeit is. A 19. században *William Stephen Jacob* és a 20. század első felében *Peter van de Kamp* ez irányú próbálkozásai sem jártak sikerrel. Az első megerősített exobolygóra egészen 1992-ig kellett várni (*Aleksander Wolszczan* és *Dale Frail*, a PSR 1257+12 jelű pulzár bolygója [1]), majd 1995-ben *Michael Mayor* és *Didier Queloz* a rádiálissebesség-módszerrel felfedezte az első olyan exobolygót, amely a Napunkhoz hasonló csillag, az 51 Pegasi körül kering [2].

Az eltelt húsz év alatt az exobolygók felfedezése szinte hétköznapi jelenséggé vált, napjainkban több mint 700 távoli kísérő létezését mondhatjuk bizonyítottnak. Emellett a Kepler-űrtávcső sikerességét mutatja, hogy több ezer exobolygójelölt vár még meg-

erősítésre. Az exobolygók számának ugrásszerű növekedése a kutatókat arra ösztönözte, hogy részletesebben is megvizsgálják a következő kérdést: melyek azok a feltételek, amelyek az élet kialakulásában szerepet játszanak egy exobolygón. Az egyik ilyen fontos szerepet éppen az exobolygók körül keringő holdak (és Holdunk) töltenek be, ugyanis stabilizálják a bolygó (Földünk) forgástengelyét, ami az élet kialakulásának és fennmaradásának egyik elengedhetetlen feltétele.

Ahogy néhány évtizeddel ezelőtt még merész gondolatnak számított, hogy távoli csillagok körül exobolygók után kutassunk, úgy ezen bolygók körüli holdak keresését is egy kicsit a sci-fi világába tartozónak érezhetjük. Azonban bolygók keresésének merész gondolatából valóság lett, a távoli bolygóholdak keresése sem fikció többé, már több mint egy évtizede elkezdődött az olyan módszerek kidolgozása, amelyekkel egyre közelebb kerülhetünk egy távoli bolygó holdjának felfedezéséhez.

Exobolygó-exohold fénygörbe

A exoholdak felfedezésére irányuló kutatásokban elsősorban olyan rendszereket vetettek vizsgálat alá, amelyben az exobolygó-exohold páros elhalad a csillag korongja előtt (ezek a fedési vagy tranzit rendszerek). A nagyobb bolygók 1-2 százalékkal, míg a kisebbek (Föld-méretűek) 0,01%-kal csökkentik a Napunkhoz hasonló csillagok fényét. Ez az érték holdak esetében két nagyságrenddel kisebb, amely a legtöbb esetben (Földnél kisebb holdméretek esetén) meghaladja a legjobb űrtávcsövek teljesítőképességét is. A hold által okozott fényességcsökkenés közvetlen megfigyelésére így kevés lehetőségünk van, csak a bolygó fénygörbéjére gyakorolt közvetett hatást tudjuk vizsgálni. Ehhez azonban elengedhetetlen a bolygó-hold modellezett fénygörbéjének pontos ismerete: a hold egyedi fénygörbéje hasonló a bolygóéhoz, a különbség a kettő között mindössze annyi, hogy a hold kisebb méretű lévén kevesebb fényt takar ki a csillagból, így az általa okozott fényességcsökkenés is kisebb, a fénygörbéje sekélyebb (1. ábra felső panel, Δm_B , Δm_H fényességcsökkenés). Azonban a bolygó és a hold is más-más időpontban takarja ki a csillag egy részét, így fénygörbe-minimumainak időpontjai különbözni fognak (1. ábra felső panel, τ_B , τ_H időpontok). Vezető hold esetén ez azt eredményezi, hogy a csillag elé először a hold lép be, majd követi a bolygó is. A csillag előtt együtt haladva először a hold éri el a csillag peremét, megkezdja a kilépést, majd követi a bolygó is. A fénygörbében ez úgy mutatkozik meg (1. ábra), hogy egy sekélyebb vállal indul a fénygörbe (belép a hold), majd bolygó belépése után az együttes fénygörbe első fele kicsit mélyebben halad, ezután a hold fedésének befejeztével megemelkedik, végül a bolygó kilépésével végződik [3].

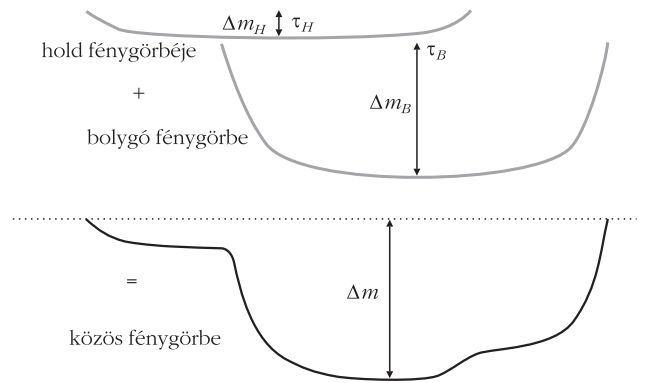
Az exoholdak kimutatására javasolt módszerek

Az ezredforduló környékén Paola Sartoretti és Jean Schneider tanulmányozta először az exoholdak kimutatásának lehetőségét [4]. Modelljükben (S2 modell) a bolygó-hold rendszer tömegközéppontja egyenletes sebességgel kerüli meg a csillagot, és a hold ezen tömegközéppont körül keringve „megrángatja a bolygót”. Ennek következményeként a bolygó és a hold adott térbeli konfigurációjától függően az egymást követő bolygófedések időpontjai egyszer előbb, máskor később következnek be (TTV_b értékkel csúsznak el, lásd a 2. ábrán). A jelenséget baricentrikus tranzit-időpont-eltolódásnak nevezzük (TTV_b).

Munkájuk során olyan formulát vezettek le, amelylyel a TTV_b ismeretében becsülhető a rendszerben keringő hold tömege. Mivel az effektus nagysága arányos a hold tömegének és pályasugarának szorzatával,

$$TTV_b \propto a_H m_H \quad (1)$$

(ahol m_H a hold tömege, a_H a holdpálya fél nagytengelye), így a holdtömeg becsüléséhez a hold pálya-

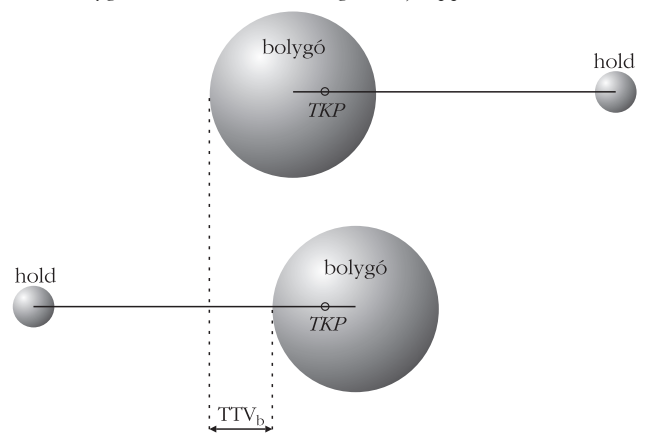


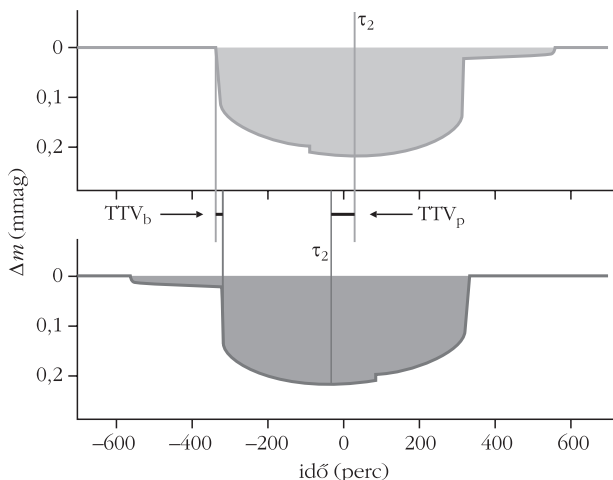
1. ábra. A bolygó és a hold fedési fénygörbéje külön-külön és a közös fénygörbe (a vízszintes tengelyen jobbra múlik az idő, a függőleges tengelyen a fényesség van feltüntetve magnitúdóban).

sugarára előzetes feltevést kell tennünk. Jason Barnes és David O'Brien 2002-ben az exoholdak keringésére a következő feltételeket szabta meg: a holdak pályája hosszú időskálán csak akkor maradhat stabil, ha fél nagytengelyük maximális értéke nem haladja meg a Hill-sugár harmadát [5]. Az így becsült pályasugarat használva a módszert később többen is alkalmazták egy-egy hipotetikus exohold maximális tömegének megbecslésére, illetve végeztek vizsgálatokat a tranzitidőpontok eltolódásának magyarázatára.

Az S2 modell használhatóságát korlátozza, hogy a hold által okozott fotometriai effektust nem veszi figyelembe, a hold magában a fedésben nem vesz részt, így nem ad járulékot a fényességcsökkenéshez. Habár a hold a legtöbb esetben nem okoz akkora torzulást a fénygörbén (1. ábra), hogy az közvetlenül kimutatható lenne, de nagy hatással van bolygó-hold fénygörbe „súlypontjának” helyzetére (3. ábra τ_1 és τ_2). Az utóbbi vizsgálatával Szabó M. Gyula és munkatársai egy teljesen új oldalról közelítették meg az exoholdak által okozott fotometriai effektust, a fedés időpontját a fénygörbe súlyvonalával definiálták [6]. Ebben a fotocentrikus modellben a fedés idő-

2. ábra. A bolygó fedésének időpontjai keringésről keringésre változnak a tömegközéppont (TKP) körüli keringés miatt. Az ábrán a bolygófedések időpontjának eltolódásai láthatóak a maximális érték esetén, amely akkor következik be, ha két egymás utáni tranzit során a bolygó és a hold térbeli konfigurációja éppen ellentétes.



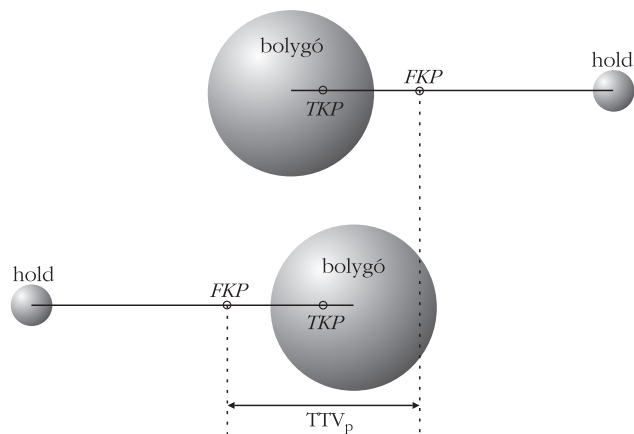
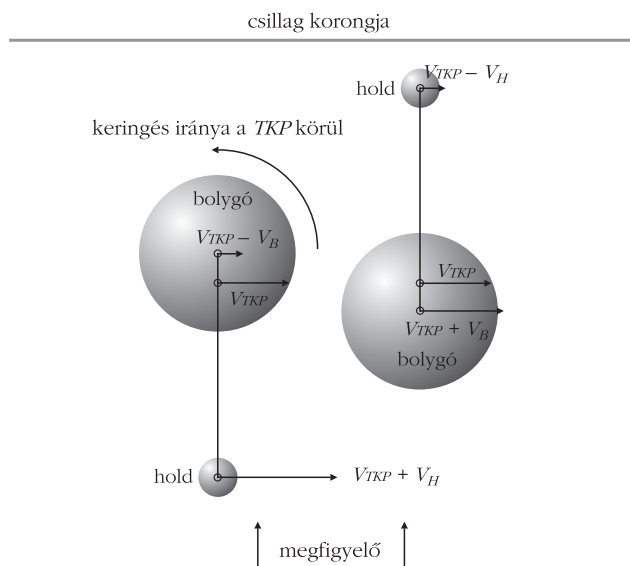


3. ábra. TTV_p : A fotocentrikus modellben a súlyvonal helyzetének (τ_1 és τ_2) és ezzel a fedés időpontjának változása két ellentétes bolygó-hold konfiguráció esetén. TTV_b : a bolygótranszit időpontjának változása Sartoretti és Schneider baricentrikus modelljében. Látható, hogy a TTV_p -effektus nagysága többszöröse a TTV_b -effektusnak, előjele pedig ellentétes. A Nap–Föld–Hold-rendszerben a TTV_b és a TTV_p értékei rendre $\pm 2,6$ és $\pm 15,2$ perc.

pontja abba az irányba tolódik el, amerre a hold járulékos fényességcsökkenése található a bolygóhoz képest. Ez a fotometriai tranzitidőpont-eltolódás (TTV_p). A hold ezen fotometriai hatása a legfontosabb, ugyanis a bolygó körüli keringés miatt a hold fedései nagyon eltérő időpontokban következnek be, így alkalmasak a fénygörbe súlyvonalában jelentős elmozdulást okozni amellet, hogy maga a hold jele közvetlenül nem figyelhető meg a fénygömbében (3. ábra).

A fotocentrikus modell részletes analízise azt mutatja, hogy a fénygörbe súlyvonalának megfeleltethető a bolygó-hold egyenesén egy fix pont (4. ábra, FKP), a

5. ábra. A bolygó és hold látszólagos sebességének nagysága a csillag korongja előtt. Látható, hogy két ellentétes térbeli konfiguráció esetén a jobb oldali konfigurációban a bolygó gyorsabban halad el a csillag korongja előtt, így a fedés időtartama rövidebb lesz, mint a bal oldali esetben.



4. ábra. Az FKP fotometria középpont kering a TKP tömegközéppont körül, aminek hatására a fénygörbe súlyvonalával definiált tranzitidőpontok fedésről fedésre változnak. Az ábra a TTV_p lehetséges maximális értékét mutatja, amely ellentétes konfigurációk esetén jöhet létre.

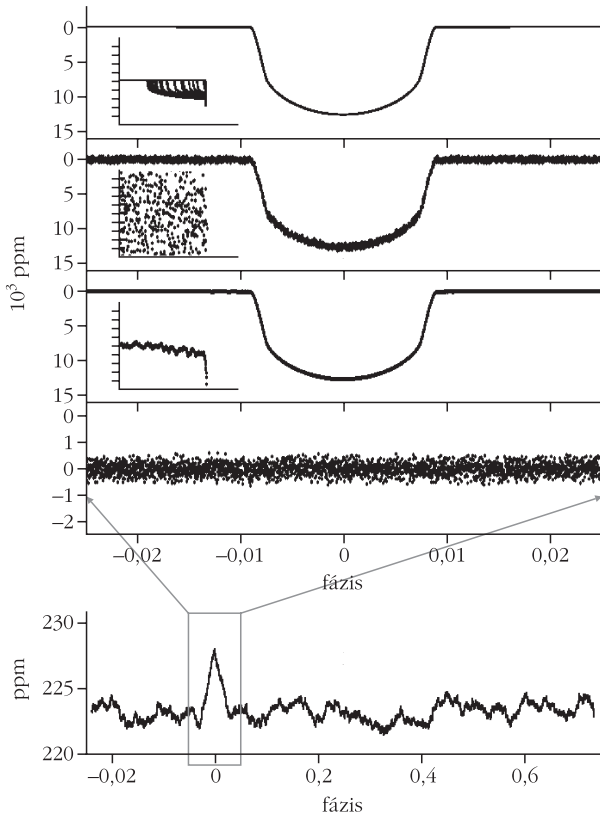
fotometriai középpont. A fedési bolygó-hold rendszerünk a mérendő mennyiség szempontjából helyettesíthető egy olyan képzeletbeli égitesttel, amely ebben a fotometriai középpontban helyezkedik el. A fotometriai középpont képzeletbeli testként kering a rendszer közös tömegközéppontja körül, aminek eredményeképpen a fénygörbe súlyvonala, azaz a tranzitidőpont keringésről keringésre változik.

Alapelgondolásban a Sartoretti–Schneider-modell csak azt a dinamikai effektust veszi figyelembe, ahogy a bolygó a tömegközéppont körül kering, míg utóbbi megközelítés a keringő fotometriai középpontra fekteti a hangsúlyt, amely kombinálja a hold dinamikai és fotometriai hatásait a fedés folyamata során.

A rendszer maximális fotometriai időpont-eltolódásának és a bolygó-hold paraméterek felhasználásával a hold sugara és tömege becsülhető. Lényeges, hogy a fotometriai tranzitidőpont-eltolódásnak létezik maximuma, amelynél nagyobb becsült értékek nem származhatnak egy fizikailag értelmes bolygó-hold rendszertől [3]. A tranzit időpontjának periodikus elcsúszása így nemcsak egy hold jelenlétére utalhat, hanem egy perturbáló bolygó vagy a periasztron vándorlása is okozhatja. A TTV_b vagy TTV_p nullától különböző értéke így előre jelezheti egy exohold jelenlétét, de önmagában nem elegendő a megbizonyosodáshoz.

A hold egy újabb effektusát, a tranzit időtartamának változását mutatta be David M. Kipping 2009-ben [7]. Ez a jelenség a bolygófedés időtartamához köthető, azt szintén a testek tömegközéppont körüli keringése okozza. A tömegközéppont egyenletes sebességéhez képest a bolygó sebessége a rendszer térbeli konfigurációjától függően hol nagyobb, hol kisebb. Ebből az következik, hogy egyszer gyorsabban, máskor lassabban halad el a csillag korongja előtt, ami mérhető változást okoz a bolygótranszit időtartamában (TDV-effektus, 5. ábra).

Eredménye szerint a TDV-effektus nagysága arányos a hold tömegével és fordítottan arányos a hold pályasugarának gyökével:



6. ábra. A szórásicsúcs-módszer kiértékelésének lépései. Fentről lefelé: a modell fénygörbe, a zajjal terhelt fénygörbe, a mozgó medián átlag, a reziduál görbe és a szórásgörbe látható a keringés fázisa szerint ábrázolva. A kis beillesztések a hold különböző időbeli lefolyású hatásait mutatják a bolygó belépő fázisa előtt.

$$TDV \propto \frac{m_H}{\sqrt{a_H}}, \quad (2)$$

ahol m_H a hold tömege és a_H a holdpálya fél nagytengelye.

Felhasználva, hogy a TTV_b -effektus nagysága egyenesen arányos a hold tömegével és fél nagytengelyével – lásd az (1) egyenletet – és képezve az (1) és a (2) egyenletek hányadosát, látható, hogy a hold tömege eliminálható, a hold pályasugarát pedig a két effektus mérésével közvetlenül becsülni tudjuk. A pályasugár ismeretében viszont a hold tömege meghatározható. Feltéve, hogy a hold pályájának excentricitása közel nulla értéket vesz fel, Kepler III. törvényét felhasználva a hold keringési periódusát is ki tudjuk számolni.

Szemléltetésül képzeljünk el egy Föld-tömegű, 2,5 nap keringési periódusú exoholdat a GJ436b bolygó körül. A jóslott TTV_b -effektus nagysága 138 másodperc lenne, míg a TDV-effektusé 57 másodperc. *Roi Alonso* és munkatársai 2008-ban a másfél méteres *Carlos Sánchez* teleszkóppal ≈ 13 másodperc pontossággal tudták meghatározni a fedés középidejét, míg a tranzit időtartamára ≈ 50 másodperces pontosságú értéket kaptak [8]. Ez azt jelzi, hogy a hold által okozott TTV_b -effektust már földi eszközökkel, míg a TDV-effektust a közeljövő eszközeivel detektálni lehet.

A fentebb tárgyalt módszerek azon alapulnak, hogy figyelik az egymást követő tranzit időpontjaiban bekövetkező változásokat. A problémát új szemszögből vizsgáltuk meg, és az úgynevezett szórás csúcs (scatter peak) fogalmát bevezetve az eddigiektől eltérő módszert dolgoztunk ki az exoholdak jelének kimutatására [9]. A módszer lényege, hogy elegendően sok tranzit fénygörbéjét nagyon pontosan fedésbe hozzuk egymással, korrigálva az olyan hatásokra, amelyek a fedés középidejében változásokat okozhatnak (TDV, TTV). Az így kapott fénygörbéből egy mozgó mediánablakkal levonva a bolygó jelét a visszamaradt reziduál – amely nem más, mint magának a fénygörbének a szórása, benne a hold jelével – lokális szórásának ingadozását elemezzük (6. ábra).

Az egyedi fénygörbéken a hold effektusai a bolygó tranzitja előtt vagy után jelennek meg, a tranzit geometriájától függően hosszabb-rövidebb ideig. A fázisgörbében így a hold különböző időbeli lefolyású hatásai egymásra rakódnak, és megnövelik a fénygörbe szórását a fedésen kívüli értékhez képest, amely a szórásgörbén a bolygó fedésének ideje alatt egy csúcsként jelenik meg, utalva a hold jelenlétére (6. ábra, legalsó sor).

A módszert négy különböző minőségű szimulált adatsoron – Kepler-úrtávcső hosszú és rövid mintavételezésű, a legjobb földi, és egy tervezett úrtávcső, a PLATO mintavételezésének megfelelő adatsorokon – teszteltük, és arra kerestük a választ, hogy az adott műszerrel mekkora méretű az a hold, amely még kimutatható. Eredményeink szerint egy Ganymedes-méretű holdat a PLATO¹ vagy az ahhoz hasonló úrtávcső képes lesz kimutatni, de elméletileg a Kepler rövid (körülbelül percnkénti) mintavételezésű adatsorában is lehetőségünk van már Föld-méretű hold detektálására. Az esetek egyharmadában erre a földi minőségű adatsorok is alkalmasak, míg a hosszú integrációs idejű adatokban az *elkenődés* jelensége miatt a hold kicsiny hatása elvész.

A módszer eredményes használatához legalább 100 fedési fénygörbe analízisére van szükség. A sikerhez elengedhetetlen az is, hogy a bolygó tranzitja előtt és után elegendően sok mérési pontunk legyen, azaz az észlelések kivitelezésénél a tranzit idején kívül is mérni kell a csillagot legalább annyi ideig, ameddig a tranzit tart. Fontos, hogy a műszeres trendek eltávolítását úgy kell elvégezni, hogy azok ne legyenek hatással a bolygó be- és kilépésének közvetlen környezetére, valamint a fénygörbe fázisba rendezésénél ügyelni kell a nem holdtól származó effektusok pontos eltávolítására.

A fentebb tárgyalt módszerek mindegyike a legsikeresebb bolygófeldező módszer, a tranzit fotometriáján alapul, de az irodalomban olvashatunk egyéb, nem a csillag fényességváltozását monitorozó módszerekről is. Ezekről teszünk említést néhány gondolat erejéig a következőkben.

¹ Meg kell azonban említeni, hogy a PLATO-úrtávcső terveit és megvalósítását az ESA 2011 októberében felfüggesztette.

Karen Lewis és munkatársai 2008-ban pulzárok jelének periodikus késését vizsgálták, és arra keresték a választ, hogy egy rendszerben keringő exohold milyen mértékben módosítja a vizsgált pulzárjelek periódusát. Eredményeik szerint a hold jelének detektálására akkor van a legnagyobb esély, ha mind a bolygó, mind a hold nagy tömegű és nagy távolságra keringenek egymás körül [10].

A radiális sebesség-mérés a Rossiter–McLaughlin-effektus révén jelentős szerepet játszik a fedési exobolygók kutatásában, az egyre pontosabb adatok eléggé biztatóak egy exohold felfedezésére. Simon Attila és munkatársai megmutatták, hogy lehetőség van egy exohold torzító jelét megfigyelni a Rossiter–McLaughlin-görbén [11]. A módszer a hold sugarára a legérzékenyebb, és csak olyan csillagok körül érdemes exoholdak után kutatni, amelyek alacsony aktivitást mutatnak.

2010-ben Christine Liebig és Joachim Wambsgans kísérletezett olyan szimulációkkal, amelyekben Föld-méretű holdak mikrolencsézését vizsgálták. A korábbi eredményekkel ellentétben azt találták, hogy olyan esetben figyelhetünk meg a holdtól származó, nem elhanyagolható nagyságú jelet, amikor a bolygó-hold távolság hasonló vagy nagyobb, mint a bolygóhoz tartozó Einstein-gyűrű sugara. Elsősorban törpecsillagok közül kerülhetnek ki a potenciális jelöltek, mivel az óriáscsillagok esetében a holdtól származó minden jel kisimul. Emellett az is feltétel, hogy a források Ein-

stein-gyűrűjének szögátmérője kisebb legyen, mint 0,001 radián. Ezek a 8 kpc távolságban lévő, Nap-méretű vagy annál kisebb csillagok [13].

Az irodalomban eddig csak az exoholdak kimutatására vonatkozó módszerek születtek meg. Arra még nincs példa, hogy egy exohold Naprendszeren kívüli létét sikeresen bizonyították volna, de a technika fejlődését, az egyre pontosabb adatokat és a jövőbeli űrtávcsöves küldetések terveit látva a Naprendszeren kívüli első hold detektálása remélhetőleg a 2010-es évek második felében vagy a 2020-as évek elején megtörténik.

Irodalom

1. Wolszczan, A., Frail, D., *Nature* 355 (1992) 145.
2. Mayor, M., Queloz D., *Nature* 378 (1995) 355.
3. Simon, A. E., Szatmáry, K., Szabó, Gy. M., *A&A* 470 (2007) 727.
4. Sartoretti, P., Schneider, J., *A&AS* 134 (1999) 553.
5. Barnes, J. W., O'Brien, D. P., *ApJ* 575 (2002) 1087.
6. Szabó, Gy. M., Szatmáry, K., Dívéki, Zs., Simon, A., *A&A* 450 (2006) 395.
7. Kipping, D. M., *MNRAS* 392 (2009) 181.
8. Alonso, R., Barbieri, M., Rabus, M., Deeg, H. J., Belmonte, J. A., Almenara, J. M., *A&A* 363 (2008) 81.
9. Simon, A. E., Szabó, Gy. M., Kiss, L. L., Szatmáry, K., *MNRAS* 419 (2012) 164.
10. Lewis, K. M., Sackett, P. D., Mardling, R. A., *ApJ* 685 (2008) L153.
11. Szabó, Gy. M., Simon, A., Szalai, T., *Fizikai Szemle* 61/7–8 (2011) 217.
12. Simon, A. E., Szabó, Gy. M., Szatmáry, K., Kiss, L. L., *MNRAS* 406 (2010) 2038.
13. Liebig, C., Wambsgans, J., *A&A* 520 (2010) A68.

VÉLEMÉNYEK

AZ ENTRÓPIAPROBLÉMA – I. RÉSZ

Oláh Károly
BME, Fizikai Kémia Tanszék

Egy fogalomnak sincs olyan kalandos története, mint az entrópiának.

1999 decemberében jelent meg Harvey S. Leff figyelemreméltó cikke az *American Journal of Physics*-ben *What if entropy were dimensionless?* címmel [1]. Ebben az entrópia rejtélyes („puzzling”) energia/hőmérséklet jellegét elemzi és von le hat következtetést. Ezek között van a javaslat a dimenziómentes entrópiavariáns használatára. Egy másik javaslat a hőmér-

séklet-fogalmat illeti: javasolja a hőmérséklet (T) helyett az RT energiajellegű mennyiség használatát. Nevet is ad: *tempergia* („tempergy”).

Clausius, a hőhatás entrópiája

Másfél évszázada már, hogy az entrópia fogalma megszületett (Clausius, 1865) [2]. Ez időben a természettudomány egyik fő témája az energiakérdés volt. Mi történik a gőzgépben? Hogyan lehet kazánban termelt „hőt” hasznos munkára fogni?

Megszületett a hét alappennyiség rendszere.

A három extenzitás (E_i): az energia (U), a térfogat (V), az anyagmennyiség (N).

A három potenciál (F_i): a hőmérséklet (RT), a nyomás (P), a kémiai potenciál (μ).

És a hetedik: az entrópia.

A *Fizikai Szemle* szerkesztőbizottsága az 1972-ben meghirdetett VÉLEMÉNYEK sorozatát az olvasók kérésére tovább folytatja ez évben is. A szerkesztőbizottság állásfoglalása alapján „a Fizikai Szemle feladatául vállalja el, hogy teret nyit a fizikai kutatásra és fizika oktatására vonatkozó véleményeknek, ha azok értékes gondolatokat tartalmaznak és építő szándékúak, függetlenül attól, hogy egyeznek-e a lap szerkesztőinek nézetével, vagy sem”. Ennek szellemében várjuk továbbra is olvasóink, várjuk a magyar fizikusok leveleit.