

# FIZIKAI NOBEL-DÍJ AZ ELSŐ EXOBOLYGÓ FELFEDEZÉSÉÉRT

Haris-Kiss András  
ELTE és CSFK Csillagászati Intézet

1995 októberében két svájci csillagász, *Michel Mayor* és *Didier Queloz* bejelentették, hogy felfedeztek egy Jupiter-nagyságú bolygót az 51 Pegasi csillag mellett, ami attól mindössze nyolcmillió kilométerre kering.

Ekkor első alkalommal sikerült megfigyelni egy bolygót, ami egy Naphoz hasonló csillag körül kering, ráadásul hozzá elképesztő közelségben, jóval a Merkúr pályájának (58 millió km) megfelelő távolságon belül. Csillagát mindössze 4,2 nap alatt kerüli meg.

A felfedezéssel új korszak kezdődött a csillagászatban, amelynek fontosságát jelzi az is, hogy a két felfedező munkáját idén fizikai Nobel-díjjal tüntették ki.

Mayor és Queloz az 51 Pegasi b-re keresztelt bolygót a Haute-Provence-i Csillagvizsgálóban működő ELODIE spektrográffal detektálták. Módszerük – amelyet *radiális sebesség módszernek* neveznek – lényege az, hogy a csillag spektrumában észlelhető vöröseltolódás segítségével periodicitásokat keresnek a csillag mozgásában. Ha azt tapasztalják, hogy a csillag egy ideig távolodik, majd közeledik, és ez a mozgás folytonosan ismétlődik, az azzal magyarázható, hogy a csillag a bolygóval közös tömegközéppontja körül való keringése során hol távolabb, hol közelebb kerül a megfigyelőhöz.

Az ELODIE a saját m/s nagyságrendű sebességfelbontásával bőven elég érzékeny volt, hogy az 51 Pegasi b által okozott körülbelül 118 m/s sebességeltéréseket megfigyelje a csillag mozgásában.

Mivel a nagyobb tömegű bolygók nagyobb, így könnyebben kimutatható változásokat okoznak egy csillag sebességében, az elsők között felfedezett exobolygók mind nagy, a Jupiteréhez hasonló vagy még annál is nagyobb tömegűek voltak. Bár ez a módszer határozottan eredményes, és a mai napig fedeznek fel így exobolygókat, illetve erősítenek meg más módon felfedezett exobolygó-jelölteket, az új



Didier Queloz és Michel Mayor

bolygók megtalálásának ma már nem ez a legsikeresebb módja.

1999-ben két független kutatócsoport, az egyik *David Charbonneau*, a másik *Greg Henry* vezetésével a HD 209458 jelű csillag fényességét vizsgálva parányi mértékű, ismétlődő elhalványodást vett észre, amelyet egy már korábban radiális sebesség módszerrel felfedezett bolygó okozott azzal, hogy amikor felőlünk nézve elhaladt a csillaga előtt, fényének egy részét kitakarta.

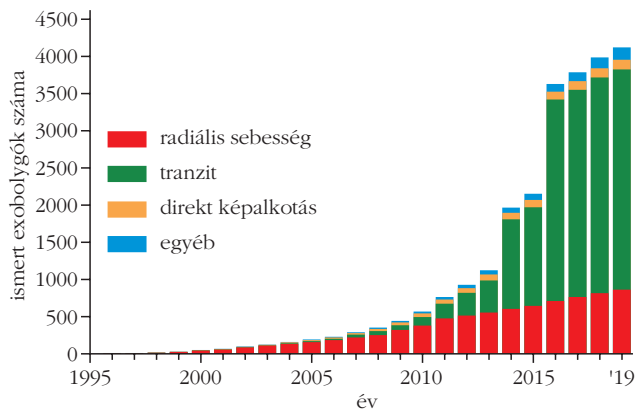
A bolygófelfedezés ezen módját, amikor egy csillag fényességének az előtte elhaladó bolygó okozta csökkenéséből következtetünk a bolygó létezésére, *tranzitmódszernek* nevezzük. Napjainkban ennek segítségével fedezik fel a legtöbb exobolygót és az exobolygókat kutató űrtávcsövek is ezt a módszert alkalmazzák.

E módszer előnye még az is, hogy olyan apróbb bolygókat is ki tud mutatni, amelyeket radiális sebesség-mérésekkel nem feltétlenül lehetne felfedezni. Mivel a kisebb tömegű bolygók viszont általában kisebb átmérőjűek is, ezek kisebb területet takarnak el a csillagukon, és így csak gyengébb elhalványodást okoznak. Ennek megfelelően minél kisebb fényességváltozást tudunk észrevenni, annál kisebb átmérőjű bolygókat tudunk felfedezni.

Az exobolygók felfedezésének harmadik fontos módja az, ha közvetlenül képet alkotnak az égitestről. Ez először 2008-ban sikerült, amikor a Déli Hal csillagkép legfényesebb, 25 fényév távolságra lévő Fomalhaut nevű csillagánál sikerült azonosítani a csillag körüli törmelékgyűrűben egy három Jupiter-tömegű bolygó elmozdulását a Hubble-űrtávcső 2004 és 2006 között



Haris-Kiss András az ELTE csillagász szakos hallgatója, a CSFK Csillagászati Intézet demonstrátora. Kutatásának célja olyan exobolygók azonosítása, melyek körül stabil pályán keringhetnek potenciálisan lakható holdak.



1. ábra. Az ismert exobolygók száma időrendben a felfedezésük módja szerint megkülönböztetve (az adatok forrása: <http://exoplanet.eu>).

készített felvételein (ez a kép szerepelt a *Fizikai Szemle* 2019. októberi számának címlapján). Azóta több exobolygót is sikerült így, *direkt képalkotással* beazonosítani számos földi és űrtávcső fényképein.

Az exobolygók detektálásának ezen kívül még több módja is van, amelyeket a cikk terjedelme miatt nem részletezünk. Megemlítendő, hogy egy pulzár (a csillagmaradványok egyik típusa) körül már 1992-ben kimutattak bolygókat a pulzárjel ismétlődési idejének modulációjából (*Aleksander Wolszczan* és *Dale Frail* felfedezése).

A különböző felfedezési módszerek elterjedtségét és az ismert exobolygók számát évekre bontva az 1. ábra mutatja.

Az első exobolygókat mind egyesével találták a csillaguk körül, azt a látszatot keltve, hogy a miénkhöz hasonló több bolygóból álló naprendszer ritkaságnak számít. 1999-ben az addig „egybolygós” v Andromedae rendszerben még két új bolygót fedeztek fel. Ma már az ismert bolygórendszerek több mint 20%-áról tudjuk, hogy egynél több bolygó kering bennük, a legnépesebb ismert bolygórendszerben lévő bolygók száma pedig megegyezik a saját Naprendszerünkével. Ez a Kepler-90 elnevezésű bolygórendszer viszont sokkal kompaktabb, mint a miénk. Itt a csillagtól legtávolabbi bolygó is csak egy csillagászati egységre, tehát olyan távolságban kering, mint a Naptól a Föld.

Az öt, illetve még több bolygót tartalmazó ismert rendszerek túlnyomó többsége szintén legalább ennyire szűkös.

Természetesen a Földön kívüli élet kutatása is izgalmas lehetőség, amelynek új lendületet adott az exobolygók kutatása. Lakható zónának nevezzük a csillagtól vett azon távolságtartományt, ahol a bolygó felszíni hőmérséklete – a Földéhez hasonló légkört feltételezve – lehetővé teszi, hogy a felszínen folyékony víz geológiai időskálákon stabilan fennmaradjon. Az első bolygót a lakható zónában 2001-ben fedezték fel a Genfi Egyetem kutatói. Ez a HD 28185 b, tömege a Jupiter tömegének hatszorosa. Ahogy egyre több exobolygót fedeznek fel, egyre gyakrabban számolnak be lakható zónában keringő

bolygókról, amelyek híre gyakran a közvéleményhez is eljut. Ma már több tucatnyi potenciálisan lakható exobolygót ismerünk, amelyek között több a Földéhez hasonló tömegű.

Szintén 2001-ben történt, hogy először tudták tanulmányozni egy exobolygó légkörének összetételét. Ahogy a HD 209458 b jelű bolygó elhaladt a csillaga előtt, a légkörén áthaladó fényben nátriumot mutattak ki a Hubble-űrtávcső spektrográfiájával. Az elemek ilyen módon történő felismerése rendkívül fontos lesz az élethez elengedhetetlen víz kimutatásához egy bolygón. Egy bolygó saját, csillaggal nem összesmosott spektrumát először 2007-ben tudták rögzíteni az infravörösben mérő Spitzer-űrtávcsővel.

A csillagok körülbelül 50%-a kettős vagy többes csillagrendszer tagja, így az exobolygók kutatása szempontjából fontos kérdés volt, hogy létezhetnek-e ilyen, első hangzásra különös rendszerekben keringő bolygók, akár csupán az egyik, akár mindkét csillagot megkerülve.

A kérdés első részét hamar megválaszolták: az 1996-ban az amerikai Lick és McDonald csillagvizsgáló munkatársai által egymástól függetlenül felfedezett 16 Cygni Bb egy hármas csillagrendszer egyik komponense körül 2,2 éves periódussal kering. A válasz második felére 2011-ig kellett várni, ekkor jelentették be a Kepler-16b felfedezését. Ez a Szaturnusz nagyságú bolygó egy 0,2 Nap-tömegű vörös törpecsillagból és egy 0,6 Nap-tömegű csillagból álló rendszerben kering, két „szülőcsillagát” 229 nap alatt kerüli meg. (Viszont meg kell jegyezni, hogy fősorozati csillagból és barna törpéből álló kettős rendszerben keringő bolygót már 2005-ben találtak.)

Az exobolygók kutatása 2003-ban kezdett kitelepníni a világűrbe. Ekkor indították Kanada első űrtávcsővét, a bőröndnyi nagyságú MOST-ot (Microvariability and Oscillations of Stars), amivel rendkívül pontosan lehetett mérni a csillagok fényességváltozását, így az asztroszeizmológiai mérések mellett tranzitmódszerrel is újabb exobolygókat lehetett felfedezni.

A következő nagy érzékenyséű űrtávcső, amit exobolygók felfedezésére alkalmaztak, a 2006-ban indított francia gyártású CoRoT (Convection, Rotation et Transits planétaires) volt. Első bolygóját (CoRoT-1b) 2007 májusában fedezte fel. A távcső hét éven át maradt aktív.

Valószínűleg a legismertebb űrtávcső, ami közvetlenül az exobolygókhoz kötődik, a 2009-ben indított Kepler. Az ismert exobolygók száma korábban is folyamatosan gyarapodott, de az igazán ugrásszerű növekedést a Kepler mérési adatai okozták.

A Kepler ugyancsak a csillagok elhalványodásának mérésével kereste az exobolygókat. A bolygókeresés mellett más céljai az asztroszeizmológiai vizsgálatok voltak, illetve bármely, látómezejében található asztrofizikai objektumra (például kisbolygók vagy változócsillagok) akár éveket átfogó nagyon pontos fénygörbéket tudott előállítani. A Kepler a Hattyú és Lant csillagképek határán fekvő 575 holdkorongnyi területet folyamatosan figyelte majdnem négy éven keresztül.

Amikor a Kepler több stabilizáló lendkereke is elromlott, és már nem lehetett folyamatosan egy irányban tartani a távcsövet, elkezdődött a K2, a Kepler második küldetése, amelynek során az űrtávcső az ekliptika mentén készített felvételeket, körülbelül 80 naponként megváltoztatva a látómezőjét.

A Kepler adatai alapján véve változtatták meg az exobolygókról alkotott elképzeléseinket. A Kepler óta ismert például, hogy a csillagok legalább 70%-ának van bolygója, illetve, hogy minden hatodik csillagnak van a Merkúrnál közelebb keringő Föld-méretű bolygója. Összesen 2662 megerősített exobolygó-felfedezést köszönhetünk a Keplernek.

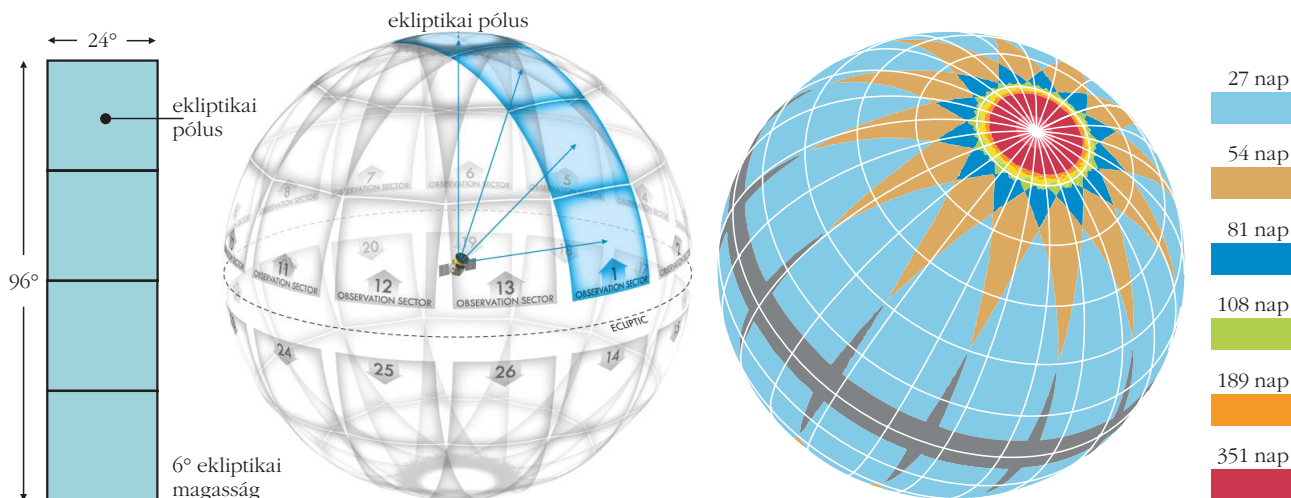
A Kepler és a K2 misszióról a *Fizikai Szemle* 2019/7–8. számában jelent meg *Boldog Ádám* összefoglalója.

Az űrtávcsövek ugyanakkor nem szorították ki a korábbi módszereket. 2016-ban radiálissebesség-mérésekkel mutatták ki, hogy a Naphoz legközelebbi csillag, a Proxima Centauri körül Föld nagyságú kőzetbolygó kering. A Proxima Centauriból áramló erős csillagszél miatt viszont a kutatók nem tartják valószínűnek, hogy a bolygón élet alakulhatna ki.

Jelenleg második évét tölti az űrben az exobolygót kereső legújabb űrtávcső, a TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite), amely 2018 augusztusában látta meg „első fényét”. Célja annyiban más az előző hasonló küldetésektől, hogy két év alatt az egész égboltot végig fogja észlelni. Ezt úgy teszi, hogy 27 napon keresztül az ég egyik féltékéjének 1/13-át figyeli meg, majd továbbfordul a következő, eddig feltérképezetlen égrészre. Ennek az az előnye, hogy a 27 naposnál rövidebb keringési periódusú bolygók, amelyek kellően fényes csillag körül keringenek ahhoz, hogy a TESS megfigyelje őket, mind ismertek lesznek (50 ppm érzékenység a 9–15 magnitúdó fényességtartományban). 2019 novemberéig 29 megerősített bolygó felfedezése fűzhető a TESS-hez.

A TESS által vizsgált égbolterületeket a 2. ábra mutatja be.

2. ábra. A TESS űrtávcső által végigpásztázott égterületek. A bal oldali éggömb színezett része szemlélteti, mekkora égterületet figyel meg egy 27 napos észlelési kampány során. A jobb oldali éggömbön a színek a különböző megfigyelt területek közötti átfedést érzékeltetik. Minél lejjebb van egy szín egy jelmagyarázatban, annál hosszabb egybefüggő adatsort kapunk az adott színel jelölt területről (NASA, TESS) (forrás: <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/teess/operations.html>).



Az elmúlt huszonnégy évben felfedezett több mint négyezer exobolygó – tömege és bolygórendszerén belüli helyzete szerint is – elképesztően sokféle. A legnagyobb ismert tömegű exobolygó körülbelül 82 Jupiter-tömegű, míg a legkisebb a Föld tömegének hét tizedrészét sem éri el. A legrövidebb keringési periódusú bolygó 40 perc alatt kerüli meg csillagát, míg van olyan is, aminek 2000 év szükséges egy keringéshez.

Ismerünk forró, Jupiter-szerű gázóriásokat, amelyek annyira közel keringenek a csillagukhoz, hogy felszínük több ezer kelvinre felhevül, csillaguktól távol keringő, Neptunuszhoz hasonló jeges bolygókat, és a Földhöz hasonló kőzetbolygókat is, amelyek akár a miénkhez hasonló életnek is otthont adhatnak.

Az exobolygókkal kapcsolatos eredményekhez magyar kutatók is hozzájárultak. A *Bakos Gáspár* által vezetett HATNet (Hungarian Automated Telescope Network) projekt egy automata távcsövekből álló hálózat, amely tranzitmódszerrel keres exobolygókat. A HATNet a mai napig 63 bolygót fedezett fel.

A TRAPPIST-1 egy hét bolygóból álló rendszer, amelyet a CSFK Csillagászati Intézet kutatói is vizsgálnak. A magyar kutatók témái fedik még az exobolygók körül keringő lehetséges holdakat (exoholdak) és az M színképosztályú törpecsillagokat, amelyek körül a bolygók keresése a jövő évtized űrtávcsöveinek egyik kiemelt feladata lesz (a TRAPPIST-1 is M színképosztályú törpecsillag).

Jelenleg 2500 exobolygó-felfedezés vár megerősítésre. A tervek szerint 2019 végén indítják az Európai Űrügynökség exobolygó-kutató CHEOPS (Characterising Exoplanets Satellite) űrtávcsövet, amit 2026-ban a PLATO (Planetary Transits and Oscillations of Stars), 2028-ban pedig az ARIEL (Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey) űrtávcsövek követnek majd. Az előreláthatóan 2021-ben induló James Webb űrtávcső egyik célja az exobolygók légkörének kutatása lesz spektroszkópia segítségével.

Az első exohold felfedezése szintén néhány éven belül várható (az ilyen holdak felfedezésének a lehetőségével *Simon Attila* foglalkozott a *Fizikai Szemle* 2012/7–8. számában).

Egy ennyire fiatal tudományágtól már a jelenlegi ismereteink is kimagasló eredmények, a tervezett kutatásokat látva pedig az exobolygókkal és idegen

naprendszerekkel kapcsolatos tudásunk további jelentős bővülésére és akár újabb vaskos meglepetésekre is számíthatunk.

Az exobolygók kutatásáról szemléletes összefoglalást ad a <https://exoplanets.nasa.gov>, az összes ismert exobolygót tartalmazó archívum a <http://exoplanet.eu> linken érhető el.

## INNOVÁCIÓ ÉS A 60 ÉVES BUDAPESTI KUTATÓREAKTOR

Rosta László,<sup>1</sup> Bajnok Katalin,<sup>1</sup> Baranyai Rózsa,<sup>2</sup> Belgya Tamás,<sup>2</sup> Bottyán László,<sup>2</sup> Fábíán Margit,<sup>1</sup> Füzi János,<sup>1</sup> Kis Zoltán,<sup>2</sup> Len Adél,<sup>2</sup> Szentmiklósi László<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Budapesti Neutron Centrum, Wigner Fizikai Kutatóközpont

<sup>2</sup>Budapesti Neutron Centrum, Energiatudományi Kutatóközpont

Az MTA csillebérci kampuszán lévő Budapesti Kutatóreaktor idén ünnepelte 60 éves fennállását – először 1959. március 25-én kezdte meg működését. Ez egy kiemelkedő jelentőségű mérföldkő volt a magyar tudomány és technológia fejlődésében: a Budapesti Kutatóreaktor (BKR) folyamatosan megújuló és bővülő műszerparkja azóta is a legnagyobb, jelentős számú felhasználót kiszolgáló kutatási infrastruktúra hazánkban, sőt a közép-európai régióban is. A BKR megbízható üzemelésével meghatározó szerepet játszik az európai neutronkutatási közösség életében is, és az elkövetkező évtizedben ez még hangsúlyosabb lesz, hiszen egyre több európai ország dönt úgy, hogy hasonló típusú kutatóreaktorait bezárja. Jelenleg mintegy 200 hazai és – két éves átlagban – körül-

belül ugyanannyi külföldi kutató használja a neutronos módszereket, munkájukhoz a jövőben is a BKR által biztosított neutronok szolgáltatják a kísérleti háttérrel, amihez a reaktor élettartamának hosszabbítását tervezik.

Az 1959-ben indított új létesítmény akkor számos újdonságértékű, különféle fizikai jelenségek kutatásával kapcsolatos tevékenységet mozdított elő, különösen a neutronfizika, reaktorfizika, szilárdtestfizika, egészségügy, valamint a nukleáris kémia és sugárvédelem terén. Ezen kívül lehetővé tette Magyarország számára új nukleáris eszközök tervezését, előállítását, valamint az izotópgyártás beindítását. Az alapkutatások mellett az innováció és technológiatranszfer, valamint a kereskedelmi hasznosítás is mindig komoly hangsúlyt kapott a BKR-nél végzett tevékenységek során.

A reaktor jelenlegi formájában (10 MW teljesítmény, hidegforrás és neutronvezető rendszer, 16 felhasználói berendezés) a legutóbbi átfogó átalakítást (1986–92) követően 1993-ban kezdte meg működését egy 30 évre szóló üzemidő-engedéllyel. Ezzel egy időben alakult meg a Budapesti Neutron Centrum (BNC) [1], amely a neutronos mérőállomásokat üzemeltető laboratóriumok konzorciumaként működik azzal a céllal, hogy összehangolja a reaktor kutatási célú hasznosítását, ehhez biztosítsa a tudományos és műszeres háttérrel, így lehetővé téve a hozzáférést a mérőberendezésekhez a hazai és nemzetközi neutronfelhasználó közösség számára. Ugyancsak a BNC adja a keretet a kísérleti javaslatok befogadására és szakmai kiválóságának biztosítására a nemzetközi bizottság bírálati rendszerén keresztül. Így a neutronokkal történő kutatás vált a reaktor hasznosításának fő profiljává. A BNC tagja az európai neutronközpontok hálózatának és konzorciumi partner az EU keretprogramjainak számos projektjében is. Kulcsfontosságú tevékenység a jövőbeli tudományos szakértők képzése is. Magyar és külföldi egyetemekkel együttműködve hallgatókat fogad la-

Az írásban szereplő eredmények a Budapesti Kutatóreaktor több évtizedes sikeres innovációs tevékenységét tükrözik – ezért a munkáért nagyon sok korábban, illetve jelenleg is itt dolgozó kollégát illeti köszönet. Az alábbi fénykép a reaktor vezénylőjében készült 2018-ban és a reaktorüzemben, valamint a kísérleti állomásokat üzemeltető laboratóriumokban dolgozó mintegy 100 fős kollektíva akkor jelen lévő tagjait mutatja.

Az eredmények számos hazai és nemzetközi projekthez is köthetők, amelyek a finanszírozáshoz jelentősen hozzájárultak, itt a jelenleg is futó SINE 2020 (EU H2020 Grant No. 654000), a V4-Korea RADCON (NKFIH NN17 127102), az NKFIH K17 124068 és a CAK (NVKP\_16-1-2016-0014), BrightnESS-2 (EU H2020 Grant No. 823867) projekteknek nyilvánítunk köszönetet.

