

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI ÉS INFORMATIKAI KAR
KÍSÉRLETI FIZIKAI TANSZÉK
FIZIKA DOKTORI ISKOLA

Exoholdak fedési exobolygók körül

Doktori értekezés tézisei

- Szerző: Simon Attila,
PhD hallgató, Szegedi Tudományegyetem,
tudományos segédmunkatárs, MTA KTM CSKI
- Témavezetők: Dr. Szabó M. Gyula,
egyetemi adjunktus, Szegedi Tudományegyetem,
tudományos munkatárs, MTA KTM CSKI
- Dr. Szatmáry Károly,
habil. egyetemi docens, Szegedi Tudományegyetem
- Konzulens: Dr. Kiss L. László,
tudományos tanácsadó, MTA KTM CSKI
címzetes professzor, University of Sydney



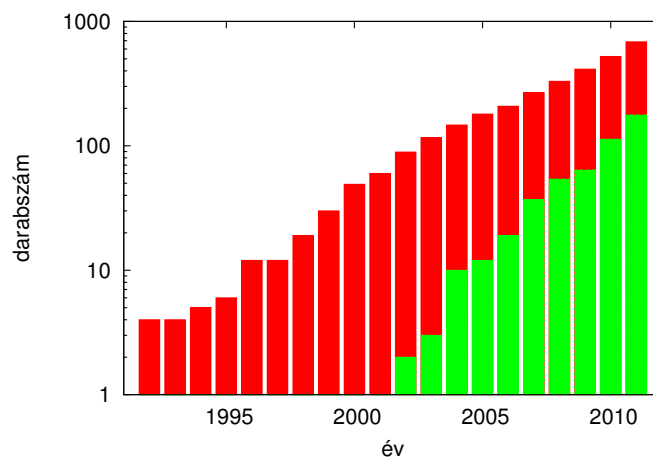
Szeged, 2011

Tudományos háttér

Naprendszeren kívüli bolygók (exobolygók – Szatmáry, 2006) kutatása az elmúlt közel 20 évben új kutatási irányná nőtte ki magát a csillagászatban belül.

A Földhöz hasonló bolygó keresésének és felfedezésének kérdésével az ókori görögök (Démokritosz, Epikurosz) foglalkoztak először. Munkásságuk számos filozófust (Giordano Bruno, Fontenelle, Goethe, Kant) is gondolkodásra ösztönzött, de először Huygens (1698) próbált meg kimutatni bolygót más csillagok körül. Hamar rájött, hogy egy ilyen bolygó kimutatása messze meghaladja legjobb távcsövei lehetőségeit is. A XIX. században W. S. Jacob, és a XX. század első felében van de Kamp ez irányú próbálkozásai sem jártak sikerrel. Az első megerősített exobolygóra egészen 1992-ig kellett várni, amikor is Wolszczan és Frail a PSR 1257+12 jelű pulzár körül felfedezte az első exobolygót. A következő detektálás Mayor és Queloz nevéhez fűződik. 1995-ben ők mutattak ki elsőnek radiális sebesség-mérések elemzésével olyan exobolygót, amely egy fősorozati, a Napunkhoz hasonló 51 Pegasi csillag körül kering.

1999-ben Charbonneau és munkatársai (2000) elsőként figyelték meg egy csillag fényességváltozását, ahogy egy exobolygó elhalad annak korongja előtt. Ez utóbbi módszer hatékonyságára és egyszerűségére sokan felfigyeltek, így a technikára épülő kistávcsöves égbolttelmerítő programok (HAT, SuperWASP) elindulása után a 90-es évek végére a felfedezett exobolygók száma még gyorsabb ütemben kezdett el nőni. 2011 októberében a felfedezett és megerősített exobolygók száma elérte a közel 700-at (1. ábra), a CoRoT és Kepler űrtávcsövek adataiban további 1200 jelölt várja, hogy megerősítsék vagy cáfolják létezését.



1. ábra. A felfedezett exobolygók száma. A piros az összes, a zöld oszlop a fedési exobolygókat jelöli. A darabszám logaritmikus ábrázolású (Schneider, 2011).

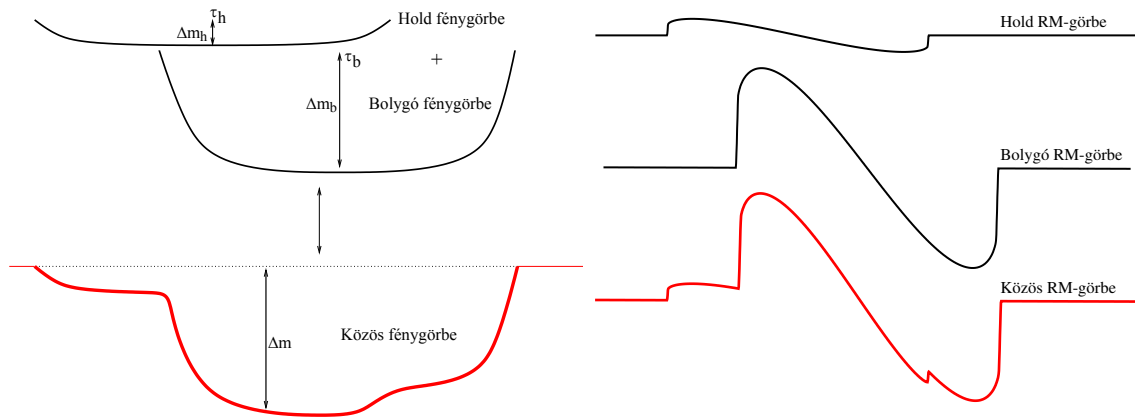
A kezdeti sikerek arra ösztönözték a kutatókat, hogy közelebről is megvizsgálják ezeket az exobolygórendszereket és feltegyék a kérdést, hogy milyen jellemvonásokban különböznek a mi Naprendszerünktől. A csillagok fizikai tulajdonságainak vizsgálata és a bolygók eloszlása az élet kialakulásának feltételeit kereső kutatásokhoz nyúlik vissza. A követelmények hosszú sora mellett Wagner (1936) és Asimov (1979) munkájában olvashatunk arról a feltételről, amely szerint a földi élet megjelenésében Holdunk nagy szerepet játszott. A bolygók további fejlődését számos körülmény meghatározta, például hold jelenléte nélkül a kőzetbolygók forgástengelyének iránya rövid időskálán jelentős változáson mehet keresztül. A Föld esetében ez szélsőséges időjárási viszonyokat, és ezzel együtt az életnek még a csíra állapotában történő elfojtását eredményezte volna. Holdunknak tehát nagy szerepe van abban, hogy bolygónk forgástengelye hosszú időskálán stabil maradjon, és lehetőséget adjon az intelligens civilizáció megjelenéséhez. Ez a gondolat inspirálta kutatásaimat, amelyekben elsődlegesen olyan módszerek kidolgozását tűztem ki célul, amelyek segítségével távoli csillagok bolygói körül keringő holdak kimutatásának tanulmányozására van lehetőség. Továbbá kutatásaimat ösztönözte az a tény is, hogy az irodalomban még nincs példa arra, hogy egy ilyen hold létezését a Naprendszeren kívül bebizonyították volna.

Kutatási módszerek

Exoholdak vizsgálatára elsősorban akkor van lehetőségünk, ha az exobolygó-exohold páros elhalad a csillag korongja előtt. A fedés során a bolygó és a hold kitakarja a csillag korongjának egy részét, így annak egyrészt lecsökken a fényessége, másrészt megváltozik a látszó radiális sebessége. (Az utóbbi a Rossiter-McLaughlin-effektus (RM-effektus): a forgó csillag felületelemeihez tartozó radiális sebességek átlaga a kitakarás miatt különbözni fog a csillag teljes felületére vett nulla értékétől.) A folyamat eredményeképpen az adott rendszerre jellemző fény- és Rossiter-McLaughlin görbe jön létre. A vizsgálataim ezen görbék tanulmányozására alapulnak.

A hold egyedi fénygörbéje hasonló a bolygóéhoz, a különbség a kettő között mindössze annyi, hogy a hold kisebb mérete révén kevesebb fényt takar ki a csillagból, így az általa okozott fényességcsökkenés is kisebb, a fénygörbéje sekélyebb (2. ábra bal felső panel). Ha a rendszer akkor halad el a csillag előtt, amikor a hold nem tartózkodik a csillag-bolygó egyenesen, akkor a bolygó és a hold is más-más időpontban takarja ki a csillag egy részét, így a fénygörbe minimumai-

nak időpontjai különbözni fognak (2. ábra, 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 a hold éri el először a csillag peremét, megkezdődik a kilépést, majd követi a bolygó is. A fénygörbében ez úgy mutatkozik meg, 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 (2. ábra bal alsó panel).



2. ábra. A bolygó és a hold fedési fénygörbéje (balra) és RM-görbéje (jobbra) külön-külön és a közös görbék.

A Rossiter–McLaughlin görbén a jelenség teljesen hasonló módon játszódik le (2. ábra jobb alsó és felső panel), az eredő görbe a két egyedi görbe összege lesz.

A fénygörbe mélységét és alakját a csillag-bolygó-hold hármas számos fizikai paramétere meghatározza. A bolygó és a hold relatív (a csillaghoz viszonyított) sugarának növekedésével a csillag elhalványodása növekszik. A csillag hőmérsékletének változásával változik a peremsötétedés értéke, a fénygörbe alakja és mélysége. A bolygópályának a látóiránnyal bezárt szöge a fedés időtartamát és – a peremsötétedés lokális változása miatt – a mélységét befolyásolja. A Rossiter–McLaughlin görbe menetét a fentiekén kívül meghatározza még a bolygó és a hold keringésének iránya és pályájuknak hajlásszöge a csillag forgástengelyéhez képest, valamint a csillag forgási periódusa és peremsötétedése.

A fenti effektusok megfigyeléséhez elengedhetetlen, hogy a bolygó pályasíkja közel egybeessen a látóirányukkal. Ez a feltétel különösen igaz abban az esetben, ha a bolygó-hold rendszer távol kering a csillagtól.

A fény és RM-görbéket numerikus módszerek segítségével tanulmányoztam, széles skálán vizsgálva az egyedi rendszerek fizikai tulajdonságait.

Tézisek

I. Az exohold szimulátor program és a fedések görbéinek jellegzetességei (Simon és mtsai., 2009)

Az exoholdak vizsgálatához mindenekelőtt szükség volt egy olyan programra, amellyel képesek vagyunk a csillaguk előtt elhaladó exobolygó-exohold rendszer szimulációjára. A vizsgálatokhoz olyan numerikus algoritmust fejlesztettem ki, amellyel tanulmányozhatjuk ezen rendszerek fény- és Rossiter–McLaughlin görbéit. Az algoritmus programozása során elkészítettem a csillag pixel alapú képét, amelyekhez különböző intenzitás értékeket rendeltem, figyelembe véve a csillag helyi peremsötétedésének értékét. A fedés jelensége úgy valósul meg, hogy a fedés alatt a bolygó és a hold pozíciójában a csillag pixelei nulla értéket vesznek fel. Az elkészült szoftvert grafikus felhasználói felületen keresztül lehet kezelni, amelyen a rendszer fizikai tulajdonságainak beállítását és a kívánt mérési pontosságot, mintavételi időt lehet beállítani.

A programmal számos fedési rendszer fénygörbáját és Rossiter–McLaughlin görbáját tanulmányoztam, amiből azt a következtetést vontam le, hogy egy fedési rendszerben keringő hold hatásai a bolygó által létrehozott fényváltás menetére jellegzetes módon rakódnak rá. A hold egyedi görbéje a bolygóéhoz hasonló alakú, a különbség csak annyi, hogy a hold mérete kisebb, így kevesebb fényt takar ki a csillagból, aminek eredményeként az általa okozott effektus is kisebb. Ez a kisebb effektus a bolygóhoz képest időben eltolva jelenik meg.

A programmal megvizsgáltam, hogy a rendszer paramétereinek változtatásakor miként változik meg a görbék alakja. Tanulmányoztam, hogy a különböző méretű hold mekkora járulékos jellel járul hozzá a bolygó fény- és RM-görbéjéhez, és milyen mértékben módosítja annak menetét.

II. A fotocentrikus modell és a fotometriai tranzitidőpont-eltolódás (Szabó és mtsai., 2006)

1999-ben Sartoretti és Schneider exobolygók körül keringő holdak kimutathatóságát vizsgálta. Azt tapasztalták, hogy a hold dinamikai hatása miatt a bolygó fedésének idejében csúszásokat okoz, ez a baricentrikus tranzitidőpont-eltolódás (TTV_b). A közölt formulával az eltolódás mértékéből a rendszerben keringő hold tömegére becslést tudtak adni. Rámutattam a modell hiányosságára, hogy nem veszi figyelembe a hold fotometriai hatásait, a hold

tömegével egyenes arányos effektust hoz létre. A létrejövő effektus pedig olyan kicsi, hogy szigorúan véve nem mérhető mennyiség. Ezek mind a módszer használhatóságának korlátait mutatják.

Munkámban más oldalról közelítettem meg az exoholdak által okozott fotometriai effektust, és fedések időpontjaiban történő változások kimutatásához a fedés középidejét a fénygörbe súlyvonalával definiáltam. Ebben a fotocentrikus modellben a fedés ideje abba az irányba tolódik el, amerre a hold járulékos fényességcsökkenése található a bolygóhoz képest. A hold ezen fotometriai hatása a legfontosabb, ugyanis a bolygó körüli keringés miatt a hold fedésének időpontjai nagyon eltérő időpontokban következnek be, így alkalmas a fénygörbe középidejében jelentős elmozdulást okozni amellet, hogy maga a hold nem mutatható ki közvetlenül a fénygörbében.

A Föld–Hold rendszerre végzett tesztjeim azt mutatták, hogy az így definiált fotometriai tranzitidőpont-eltolódás (TTV_p) sokkal érzékenyebb a hold fénygörbére gyakorolt hatásaira, mint a Sartoretti és Schneider-féle baricentrikus módszer.

III. A fotometriai középpont és paraméterezése, az exoholdak fizikai tulajdonságainak meghatározása (Simon és mtsai., 2007)

A fotocentrikus modell részletes analízisével kiderült, hogy a fedési bolygó-hold rendszerünket a mérendő mennyiség szempontjából egy képzeletbeli égitest helyettesíteni tudja, amely az úgynevezett fotometriai középpontban helyezkedik el. A fotometriai középpont helyzete fix a bolygó-hold egyenesén és kering a rendszer közös tömegközéppontja körül, aminek eredményeképpen a fotometriai tranzitidőpont keringésről keringésre változik.

A rendszer maximális fotometriai időpont-eltolódásának és a bolygó-hold paraméterek felhasználásával a hold sugarának, tömegének és sűrűségének becslésére alkalmas formulát vezettem le. A Föld–Hold rendszerben elvégzett kísérletek azt mutatják, hogy a hold sugarára kapott eredmények jobban közelítik a valóságot, mint a hold tömegére kapott értékek.

Egy másik fontos eredmény, hogy a fotometriai tranzitidőpont-eltolódásnak létezik maximuma, amelynél nagyobb becsült értékek nem származhatnak egy fizikailag értelmes bolygó-hold rendszertől. Ha olyan mérési eredményeink vannak, amelyekben az időpont-eltolódás értéke meghaladja a rendszertől elvárható maximális értéket, akkor alternatív magyarázatot kell keresni az effektus pontos magyarázatára (perturbáló bolygó, trójai kisbolygók).

IV. Exoholdak kimutatásának lehetősége a Rossiter–McLaughlin-effektusból (Simon és mtsai., 2010)

Fedési exobolygók Rossiter–McLaughlin jelének mérése révén lehetőségünk nyílna a bolygó körül keringő hold által okozott modulációk keresésére is. Mivel a görbe alakját a pálya csillaghoz viszonyított helyzetétől is nagyban függ, jó esély van az égitestek sugarán felül pályáik szögparamétereinek megbecslésére is. A laboratóriumban elérhető 1 cm/s pontosságú sebességmérés (Li és mtsai., 2008) biztató jel lehet ezen holdak effektusainak kimutatására.

Munkámban tanulmányoztam a hold hatásait a bolygó Rossiter–McLaughlin görbéjén. Egy szimulált mérés elemzésével elvégeztem a rendszer paramétereinek teljes rekonstrukcióját. A pontos bolygómodellt levontam a mérésekből, és az előre elkészített holdmodellek reziduálra való illeszkedését vizsgáltam.

A szimuláció eredményei azt mutatták, hogy az RM-effektusból a hold sugarát tudjuk a legpontosabban meghatározni, és a hold keringési periódusáról is kapunk információt. A fedések időpontjainak ismeretében (például fotometriából) becslést tudunk adni a hold pályájának szögparamétereire és a hold sűrűségére is. Ellenben a hold tömegére semmilyen információ nem nyerhető ki, ha a fedés időpontja ismeretlen.

A csillagok aktivitásából és oszcillációjából származó jelek felülmúlhatják a hold RM-görbére gyakorolt hatását, ami a módszer használhatóságának korlátait is mutatja. A legjobb célpontok éppen ezért az alacsony aktivitású K és korai M színképtípusú csillagok körül keringő rendszerek lehetnek.

V. Exoholdak detektálhatósága a szórási csúcs módszer segítségével (Simon és mtsai., 2011)

A szórási csúcs módszerrel újszerű megközelítésben vizsgáltam az exoholdak jelének kimutathatóságát. Minden eddigi technika az űrfotometriai mérések közvetett vizsgálatán alapszik, ezzel szemben a szórási csúcs közvetlenül a fénygörbében keresi az exoholdakra utaló jeleket.

Az eljárásban a fedési fénygörbéket nagyon pontosan fedésbe hozzuk egymással, korrigálva az olyan hatásokra, amelyek a fedés középidejében változásokat okozhatnak (TDV, TTV). Az így kapott fénygörbe lokális szórásának ingadozását elemezzük, amelynek eredményeképpen létrejön a fázisfüggő szórásgörbe. A hold különböző időbeli lefolyású hatásai a fázisba tekert

fénygörbe szórását megnövelik a fedésen kívüli értékhez képest, amely a szórásgörbén a bolygó fedésének időpontjában egy csúcsként jelenik meg, utalva a hold jelenlétére.

A módszert négy különböző minőségű szimulált adatsoron teszteltem (Kepler hosszú és rövid, földi és a tervezett PLATO mintavételezésű adatsorok), és azt vizsgáltam, hogy mekkora hold mutatható ki az adott adatsorból. Eredményeim szerint egy 0,5 Föld-sugarú holdat a PLATO vagy az ahhoz hasonló űrtávcső képes lesz majd kimutatni, de elméletileg a Kepler rövid mintavételezésű adatsorban is lehetőségünk van már Föld-méretű hold detektálására. Az esetek egyharmadában ezt a földi minőségű adatsorok is tudni majd, míg a hosszú integrációs idejű adatokban az elkenődés jelensége (smearing effect: Kipping, 2010) miatt a hold kicsiny hatása elveszik. A módszer azonban csak akkor használható eredményesen, ha legalább 100 fedési fénygörbét tudunk kiértékelni. A sikerhez szükséges az is, hogy a bolygó tranzitja előtt és után elegendően sok mérési adatunk legyen, és a műszeres trendeket eltávolító algoritmusok ezeken a szakaszokon lévő kicsiny változásokra ne legyenek hatással.

Az értekezésben felhasznált publikációk

Referált folyóiratban megjelent publikációk

- I. **Simon, A. E.**; Szabó, Gy. M.; Kiss, L. L. & Szatmáry, K.: *Signals of exomoons in averaged light curves of exoplanets* 2011, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, tmp, 1592
- II. **Simon, A. E.**; Szabó, Gy. M.; Szatmáry, K. & Kiss, L. L.: *Methods for exomoon characterization: combining transit photometry and the Rossiter-McLaughlin effect*, 2010, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **406**, 2038
- III. **Simon, A. E.**; Szabó, Gy. M. & Szatmáry, K.: *Exomoon Simulations*, 2009, Earth, Moon and Planets, **105**, 385
- IV. **Simon, A.**; Szatmáry, K. & Szabó, Gy. M.: *Determination of the size, mass, and density of "exomoons" from photometric transit timing variations*, 2007, Astronomy & Astrophysics, **470**, 727
- V. Szabó, Gy. M.; Szatmáry, K.; Divéki, Zs. & **Simon, A.**: *Possibility of a photometric detection of "exomoons"*, 2006, Astronomy & Astrophysics, **450**, 395

Konferenciákon megjelent poszterek

- I. Szabó, Gy. M., **Simon, A. E.**, Kiss, L. L., Regály, Zs., 2010, *Practical suggestions on detecting exomoons in exoplanet transit light curves*, „The Astrophysics of Planetary Systems: Formation, Structure, and Dynamical Evolution”, Torino, Italy, 11-15 Oct, 2010
- II. **Simon, A. E.**, Szabó, Gy. M., Szatmáry, K., 2008, *Exomoon simulations*, „Future Ground Based Solar System Research: Synergies with Space Probes and Space Telescope”, Pertoferraio, Elba, Livorno, Italy, 8-12 Sept, 2008
- III. Szabó, Gy. M., Szatmáry, K., **Simon, A.**, Divéki, Zs., 2007, *On the possible discovery of "exomoons" in exoplanetary transits*, „Extreme Solar Systems”, Thira, Santorini, Greece, 25-29 July, 2007
- IV. Szabó, Gy. M., Szatmáry, K., **Simon, A.**, Divéki, Zs., 2005, *Light curve effects due to "exomoons" in exoplanetary transits*, „Astrophysics of Variable Stars”, Pécs, Hungary, 5-10 Sept, 2005