

dc_493_12

Szabó M. Gyula

Szubsztelláris égitestek naprendszerekben

Az MTA doktora cím megszerzéséért készített értekezés tézisei

Budapest, 2012

dc_493_12

1. A kutatási téma előzményei és a kitűzött feladatok

Mint a csillagászat legtöbb ma művelt területe, a bolygórendszerek kialakulásával kapcsolatos nézetek is hosszú múltra tekintenek vissza: Descartes (1644), Kant (1755), Laplace (1795) bolygókeletkezéssel kapcsolatos fejtegetéseinek hatása a mai napig kimutatható a diszciplinában. Azonban a legutóbbi időkig mindössze egyetlen példán figyelhettük meg egy bolygórendszer állapotát: Naprendszerünk jelenét tudtuk vizsgálni. Mivel nem volt lehetőség számos rendszer átfogó megértésére, a tudományterület szigorúan véve nem illeszkedhetett az elmélet-jóslat-ellenőrzés általános tudományos módszertanába.

Éppen ebből a szempontból jelentettek a legutóbbi évek kisebbfajta tudományos forradalmat ezen a területen. A legújabb mérési technikáknak köszönhetően százával fedeztünk föl távoli naprendszereket, és ismerhettük meg ezek szerkezetét. Számos megfigyelés szolgáltat teljesen váratlan eredménnyel, pontosan fölfedve azokat a kérdéseket, amelyeket a korábbi modellek nem tudtak kielégítően magyarázni.

Az első ilyen jellegű váratlan megfigyelés a forró jupiterek nagy előfordulási gyakorisága; és újabban az a felismerés, hogy a forró jupiterek jellemzően magányos rendszerekben keringenek. Hasonlóan váratlan, és a mai napig egzakt magyarázatra váró megfigyelés a ferde pályán keringő exobolygók jelentős aránya, illetve a retrográd irányba keringő bolygók léte. Nagy érzékenységu infravörös mérések segítségével az is kiderült, hogy – bár nem szabályszerűen, de a csillagok kisebb hányadánál jellemzően – megtalálhatjuk a kis égitestek övét (esetleg övezetek komplex rendszerét) más naprendszerekben is. E megfigyelés természetszerűleg veti fel a vízrezervátumok létét ezen naprendszerekben, amely különösen fontos kérdés az élhető bolygók kialakulásának szempontjából is.

A távoli bolygórendszerek megfigyelése azonban a mai technikával sem egyszerű. Ezért a megismerési folyamat domináns eleme továbbra is az értelmezési tevékenység marad, a helyes értelmezés alapját pedig saját Naprendszerünk vizsgálata jelenti. Így szerveződnek egységbe a csillagászat olyan, korábban távolinak tűnő részterületei, mint a csillagkeletkezés, a bolygórendszerek felépítése, illetve a kis égitestek övezeteinek vizsgálata.

Értekezésem első fejezetében e folyamatot négy szempontból tekintem át. Az ismeretek bővülésének időbeli folyamatát egyrészt a megfigyelési programok, másrészt az új eredményeket leíró elméleti alapok felvázolásán keresztül mutatom be. A paradigmák gyors fejlődését mélységében tekintem át két részterület: a bolygórendszerek felépítésével és az égitestek ütközésének hatásaival összefüggő alapvetések elmúlt években lezajlott revíziójának folyamatán keresztül. Éppen az ütközési hatások rekonstrukciója mutatja szinte didaktikus módon, hogy új jelenségek megismerésével hogyan juthatunk el az eredeti paradigma („az ütközési hatások máig jelentősek a Naprendszerben”) ellentétének megfogalmazásáig pár év leforgása alatt. A kutatási terület közelmúltját és jelenét tárgyaló szakaszban kitérek saját kutatásaimra is, amelyek az értekezés Téziseiben foglalt eredmények konkrét előzményeit, vagy azok hátterét képezik.

A terület legfontosabb kérdései, amelyekkel téziseim is szoros kapcsolatban állnak, a kö-

vetkezők:

- A Naprendszer mely vonásai alapján lehet a kialakulás folyamatára következtetni, és melyek a későbbi fejlődési folyamatok megfigyelhető eredményei? Hogyan lehet az így rekonstruálható fejlődési szakaszokat datálni?
- Hogyan zajlott a víz transzportja a Naprendszerben és más naprendszerekben? Milyen megfigyelések alapján tárható fel a vízrezervátumok szerkezete? Mennyi víz van jelenleg a Naprendszerben, és ez hol található?
- Milyen egyedi jelenségek megfigyelésével lehet még részletesebb bepillantást nyerni egy távoli naprendszer szerkezetébe? Megfigyelhetőek-e holdak exobolygók körül?

Mivel még mindig a megismerési folyamat kezdetén vagyunk, a jól felépített megfigyelési stratégiák végrehajtása mellett is mindig készen kell állnunk a teljesen váratlan jelenségek felismerésére, és ezek helyes értelmezésére.

2. A kutatás módszerei

- A Sloan Digitális Égboltfelmérés Mozgó Objektumok Katalógusának (SDSS MOC) analízise vizsgálata két tézispont alapját képezi. Mindmáig ez a Naprendszer mozgó objektumainak legnagyobb homogén adatbázisa (több mint 400 000 bejegyzést tartalmaz), így leginkább alkalmas összehasonlító statisztikai vizsgálatok végzésére. A Princeton Egyetemen tett többszöri látogatásom során magasabb szintű statisztikai eljárásokkal (pl. szelekciós térfogaton alapuló adatbányászat), illetve feladat specifikus alkalmazások fejlesztésével (pl. adatvesztéses leképezés inverziója, súlyos alul mintavételezettség mellett) analizáltam a mozgó objektumok katalógusát, a különböző kisbolygó családok tulajdonságainak szintetikus értelmezését keresve.
- Közepes és nagy távcsövekkel (Australian National University Advanced Technology Telescope, Siding Spring Observatory; European Southern Observatory Max Planck Gesellschaft Telescope, Chile; ESO Very Large Telescope, Chile) hosszú időt lefedő megfigyelési sorozattal követtem a Hale-Bop-üstökös aktivitásának kialakulását kb. 30 csillagászati egység távolságban. Kistávcsöves megfigyelési hálózat létrehozását követően teljes láthatóságot (több mint 1 évet) lefedő megfigyelési kampányt szerveztem két, űrszondák által meglátogatott üstökös teljes napközelségének monitorozására.
- A Kepler űrtávcső adataiban kutattam tranzitos exobolygók fénygörbéjének váratlan torzulásai után. Az adatok kiértékelését döntően a klasszikus fénygörbe-analízis módszereivel végeztem, amit kiegészítettem néhány nem paraméteres alkalmazással, elsősorban pontos időmérés, és a fénygörbe alakban mutató asszimetriák kimutatására.

3. Eredmények

1. Kisbolygók alakjának fejlődése ütközési folyamatokban

A Naprendszer története során az eredetileg kialakult, néhány száz-ezer km méretű kisbolygók óriási ütközésekben kisebb-nagyobb fragmentumokra törtek, s azóta is számtalan kisebb becsapódás érte a felszínüket. Az alak vizsgálatához 11735 kisbolygót vizsgáltam a Sloan Digitális Égboltfelmérésben. Az adatok rendkívül alulmintavételezettek (általában összesen 2 fotometriai pont), ez alapján az egyedi kisbolygók fényességváltozása és alakja nem rekonstruálható. A vizsgálat céljára ezért terveztem és teszteltem egy robusztus statisztikai eljárást, amely >400 kisbolygót tartalmazó populációban már ilyen rossz mintavételezés mellett is megbízhatóan megmutatja az alak eloszlását. A vizsgált mintában a legnépesebb kisbolygócsaládok közel 1000 égitesttel képviseltetik magukat.

- Kifejlesztettem egy eljárást, amellyel nagy számú (legalább több száz) kisbolygó mindössze két, független forgási fázishoz tartozó SDSS fotometriájából rekonstruálható a vizsgált kisbolygók a/b elnyúltságának eloszlása. A módszert alkalmaztam az SDSS által megfigyelt legnépesebb kisbolygócsaládokra.
- Megállapítottam, hogy a kisbolygók alakja az idő eléréhaladtával fejlődik: a fiatal családokban inkább elnyúltabb, az idősebb családokban a gömb alakhoz közelebb álló égitesteket találunk.
- Igazoltam azt a hipotézist, hogy a kis becsapódások 2-3 milliárd év leforgása alatt „legömbölyítik” a kisbolygókat. A becsapódások rengéseket okoznak, amelyek hatására az anyag megmozdul, a csúcsokból a völgyekbe vándorol (Szabó és Kiss, 2008).
- Kimutattam, hogy egy másik folyamat is szerepet játszik a kisbolygók alakjának fejlődésében: a kis energiájú ütközések hatásával magyaráztam a számos kisbolygón úrszondás megközelítéssel felfedezett vagy fotometriai alapon közvetve megfigyelt kiterjedt lapos felszíneket. A végső alakot a két feltárt hatás eredője alakítja ki.

A tézispontához tartozó publikációk: 16, 17

2. A Jupiter trójai kisbolygócsaládjának szerkezete

A trójai kisbolygók a Jupiter pályáján, tehát a kisbolygók fővétől nagyobb naptávolságban keringenek. Dinamikai szimulációk alapján jó okunk van feltételezni, hogy ezen égitestek a Naprendszer egyik legősibb égitestcsoportját jelenítik meg, amelyek közel 4 milliárd éve meglehetősen elszeparálva fejlődnek a kis égitestek többi övezetétől (a legfiatalabb kisbolygócsaládok ≈ 100 millió évnél is fiatalabbak), naptávolságuk miatt pedig a trójai kisbolygók a nap-sugárzás hatásától is meglehetősen védettek. Anyaguk nagy mennyiségben tartalmaz hidrált kőzetet, szerves anyagokat és talán jegeket, így szerepük a kisbolygó-üstökös kapcsolatokban és a víz szerepének követésében is fontos. A Sloan Digitális Égboltfelmérés (SDSS) adataiban

410 ezer bejegyzés szerepel kisbolygók megfigyeléséről. Ezek közül kiválasztottam ismert 480 trójai kisbolygót, majd a mozgásuk alapján összeállítottam egy második mintát 1187 trójai pályán mozgó kisbolygóról, amelyek rajta vannak a megfigyeléseken, de még nem fedezték fel őket (Szabó és mtsai 2006). A minta statisztikus analízisével megállapítottam a következőket:

- A Jupiter trójai kisbolygóinak populációja aszimmetrikus eloszlást mutat, az L4 csomóban 1,6-szor több égitest található, mint az L5 csoportban. Ez a korábbi, kiegyenlített populációra vonatkozó paradigmát megdönti. Az eltérés valószínű magyarázatául a trójai kisbolygók kialakulásakor fellépő körülmények (por/gáz arány a protoplanetáris korongban) vagy a Szaturnusz perturbációs hatásai jöhetnek szóba.
- A Jupiter trójai kisbolygók darabszáma hasonló nagyságrendű, mint a főöv összes kisbolygócsaládja együttvéve. Az SDSS által megfigyelt 1187 darabos minta fényességeloszlásából extrapolálva az adódik, hogy 1 millió darab 1 km-nél nagyobb Jupiter trójai kisbolygó van (a becslés hibája az extrapoláció miatt egy kettes faktor). Ez a megfigyelés közvetve azt jelenti, hogy extraszoláris bolygórendszerekben is nagy tömegű kisbolygórajok alakulhattak ki, amelyek térbeli eloszlása nem forgásszimmetrikus – ellentétben az eddigi modellek föltételezéseivel.
- A trójai kisbolygók színindexei jellegzetes eloszlást mutatnak, és erősen különböznek a főövbeli kisbolygóktól. Kevert színindexet definiáltunk, amely a trójai kisbolygókra átlagosan 0. A trójai kisbolygók színeloszlása ezen színindexben bimodális, amely a rajok taxonómiai belső szerkezetére utal. Ezen megfigyelés nyomán Roig és mtsai. (2008) taxonómiai alcsaládokat azonosított a trójai rajokban.
- A nagyobb inklináción keringő trójai kisbolygók vörösebb színűek, ez az eltérés mindkét csomóban hasonlóan mutatkozik.

A tézisponthoz tartozó publikáció: 18.

3. A Deep Impact kísérlet támogatása a CARA megfigyelőhálózattal

Fölismerve, hogy az üstökösök folyamatos lefedettségű, homogén monitorozása még mindig megoldatlan feladata a csillagászatnak, továbbá hogy a nagy távcsöves és űrszondás üstökös-vizsgálatok interpretációs korlátjaként gyakran jelentkezik a hosszú időt lefedő, fotometriai és morfológiai „follow-up” megfigyelések hiánya, indítványoztam egy üstökösészlelő-hálózat kialakítását (Cometary Archives for Amateur Astronomers, CARA, amelyben a megfigyelések előállítása elsősorban technikailag jól felszerelt amatőr csillagászok feladata.

- Kidolgoztam és egységesítettem a képek redukálásához alkalmazandó algoritmusokat, illetve az adattárolás formátumát. A mindenkori legfényesebb üstökösök folyamatos megfigyelésén túl szorgalmaztam két, űrszondák által meglátogatott üstökösök, a 9P/Tempel-1 és a 103P/Hartley-2 kiemelt prioritású megfigyelését.

- A Deep Impact kísérlet előzményeit és következményeit kutatva, több, mint 1 éven keresztül figyeltük meg a 9P/Tempel-1-üstököst. A becsapódás a kóma anyagát nagyságrendileg megkétszerezte, a kidobódott anyagfelhő tágulása követte a porra vonatkozó szökőkút-modellt, portartalma azonban gyorsan csökkent. Az anyagtöbblet 4-5 napos időskálán nagyrészt feloszlott, új aktív terület nem jött létre a becsapódás során. Valódi meglepetést az okozott, hogy a becsapódás területén nem jött létre új aktív terület, annak ellenére, hogy a becsapódási kráter - az űrszondás megfigyelések alapján - az 50 méter mélységet is elérhette.

A tézisponthoz tartozó publikációk: 19, 20, 21.

4. Az üstökösaktivitás határa a Naprendszerben

Minden idők legfényesebb, a mag méretét tekintve pedig legnagyobb üstököse volt az 1997-ben itt járt Hale-Bopp-üstökös, melyet több mint egy éven át lehetett látni szabad szemmel. A Siding Spring Obszervatóriumban 11 évvel napközelsége után, 2007. október 20-án készített képek alapján detektáltuk az égitestet, amely minden idők legtávolabb megfigyelt aktív üstökösévé lépett elő (Szabó és mtsai, 2008). További megfigyeléseket végeztem 2010 decemberében és 2011 októberében az ESO 2,2-es és VLT távcsöveivel, valamint újraredukáltam a HST megfigyeléseit a láthatóság alatt; e megfigyelések után a Hale-Bopp-üstökös magja érdemelte ki a legnagyobb naptávolságban megfigyelt inaktív üstökös címet is. Az észlelések alapján a következőket állapítottam meg:

- Az üstökösnek még a napközelség után 11 évvel, az Uránuszon túl is kómája volt, amely példa nélküli megfigyelés. A kóma hasonló méretű volt, mint a Jupiter. Egyedül a Halley-üstököst sikerült a Hubble Űrtávcsővel hasonló naptávolságnál megfigyelni, akkor azonban az üstökös már inaktív volt. A Hale-Bopp-üstökös aktivitása 2010 nyarára állt le, 30 csillagászati egység naptávolságban.
- Modell illesztéssel kimutattam, hogy a Hale-Bopp esetében minden bizonnyal jéggé fagyott szén-monoxid szublimál, ami az üstökös poranyagát is magával ragadja, és ez okozza a távoli aktivitást.
- 2010 decemberében és 2011 októberében végzett megfigyelések alapján arra következtettem, hogy a Hale-Bopp perihélium utáni albedója meghaladja minden korábban ismert üstökös albedóját, és archív HST mérések újbóli kimérésével megállapítottam, hogy többszöröse a perihélium előtti albedónak. Az albedó növekedését jég újrakondenzálódásával magyaráztam. Megfigyeltem a mag forgását, és minimális becslést adtam az alak elnyúltságára. A kapott 1,7-es érték hasonlóan elnyúlt magot sejtet, mint a Halley-üstökös esetében.

A tézisponthoz tartozó publikációk: 22, 23, 30.

5. Holdak exobolygók körül

2005 nyarán kezdtem exobolygók holdjainak detektálhatóságával foglalkozni. Első eredményemet a Harvard Egyetem csillagászati szemináriumán mutattam be, ekkor neveztem először exoholdnak ezeket az égitesteket; a terminus először a Szabó és mtsai (2006) cikkben jelent meg leírva. Bár még nem ismerünk olyan exobolygót, amely körül hold kering, a terület rendkívül izgalmas. A nagy méretű exoholdak létezésének kérdése kulcskérdés a bolygókeletkezés folyamatának szempontjából, másrészt az életlehetőségek szempontjából is. Egy nagy méretű hold játszhat szerepet a bolygó klimatikus viszonyainak stabilizálásában, az ütközések elhárításában, sőt, akár maga a hold is lehet lakható. A munkába kezdettől fogva bevontam Simon Attilát, akkor még egyetemi hallgatóként, később fiatal kutatóként.

Még a Kepler űrtávcső tervezési fázisában vizsgáltuk Föld méretű bolygóholdak kimutathatóságát a Kepler várható fotometriai mintavételezésével és pontosságával. Eredményeink:

- Először alkalmaztam fénygörbe szimulációt a holdak tranzitra gyakorolt hatásának felderítéséhez. A Föld-Hold rendszer távolról megfigyelhető tranzitjai alapján megállapítottam, hogy a tranzit fénygörbét magányos bolygóval illesztve teljesen eltérő viselkedést kapunk, mint a korábbi jóslat (Sartoretti és Schneider 1999). A numerikus szimulációkban megfigyelt eltérések a jóslattal ellentétes irányban jelentkeztek, és jellemzően többszörösen meghaladták a jóslott értéket.
- Megállapítottam, hogy az ellentmondást a korábbi modell elégtelenségei okozzák. A tranzit időpontját nemparaméteres alakban újradefiniáltam, amely független a bolygóra és a csillagra illesztett modellektől, és a hold fotometriai hatását is tartalmazza. Kimutattam, hogy ez a formalizmus alkalmas a holdak hatásának kimutatására.
- Azonosítottam a hold paraméterterében azokat a rendszereket, amelyekben a hold kimutatására van lehetőség a *Kepler*-űrtávcsővel. Leginkább óriásbolygót tartalmazó konfigurációkat találtam, amelyben Föld méretű holdak keringtek. Szerencsés esetben azonban közel Föld méretű bolygó körül is ki lehetett mutatni holdat; a Föld-Hold rendszerben pl. egy távoli észlelő 20% eséllyel mutatná ki Holdunkat 4 évnyi Kepler adatsorból.
- A fázisgörbe szórásának analízisével további módszert javasoltam holdak közvetlen kimutatására. A módszer stabil a műszeres szisztematikussal és a csillag fényességének instabilitásával (jitter) szemben, amelyek a korábbi keresési algoritmusok fő hibaforrásai. Az analízishez nagyságrendileg 100 tranzit fénygörbére van szükség.

A tézisponthoz tartozó publikációk: 24, 25, 26, 27

6. Új alapjelenségek a bolygó-csillag kölcsönhatások terén A KOI-13.01 jelzésű szubszteláris kísérő először fénygörbe-anomáliájával hívta fel magára a figyelmet. Ennek felderítése közben két, korábban jóslott alapjelenségre is sikerült első megfigyelési példát adni, amelyek a csillag forgásával kapcsolatosak: a gyorsan forgó, inhomogén fényeloszlású csillag előtt tranzitoló kísérő fénygörbe-anomáliái, valamint a csillag forgásából eredő pályaprecesszió, illetve

közvetlenül, a tranzit időtartamok változása. Egy harmadik, váratlan - de azóta további megfigyelések által megerősített - jelenségre is fény derült, amely arra utal, hogy a bolygók keringése és a csillagok forgása szorosabb csatolásban állnak egymással, mint eddig gondoltuk. Ezek az eredmények a KOI-13 ultraprecíz *Kepler* fotometriájából, illetve különböző földi „follow-up” megfigyelésekből származnak.

- Felfigyeltem a tranzit fénygörbe 2,5% méretű aszimmetriájára, amelyet csillag gyors forgásával és gravitációs sötétedésével, valamint a bolygó pályájadóltásával magyaráztam. Ezzel kísérletileg igazoltam Barnes (2009) jóslatát. Az effektust Barnes-Szabó-jelenségként emlegették egy konferencián.
- A KOI-13 a BD+46 2629 jelű, 1'' szeparációjú kettőscsillag. Lucky imaging és fotometria ötvözésével kimutattam, hogy a bolygó a fényesebb csillag körül kering, és meghatároztam a halványabb csillag fényességjárulékát az összfényességhez (45%).
- Kimutattam, hogy a tranziton kívül egy 25,4 órás jel is ráakódik a fénygörbére, amely pontosan 3:5 arányban áll a kísérő keringésével. Ezt a jelet a csillag forgásaként értelmeztem, így a KOI-13 lett a prototípusa azon rendszereknek, amelyekben a csillag forgása és a bolygó keringése a kötött keringésnél magasabb rendű rezonanciában áll egymással.
- Kimutattam a tranzitok időtartamának növekedését, így a KOI-13 lett az első rendszer, amelyben tranzitidőtartam-változás volt megfigyelhető. A jelenség egyezésben van a csillag forgásából eredő J_2 momentum várható perturbációival, ezért valószínűleg pályaprecessziót látunk.

A tézisponthoz tartozó publikációk: 28, 29

Az értekezés témájával összefüggő publikációk:

1. Kiss, L. L., **Szabó, Gy. M.**, Sárneczky, K. 1999. CCD photometry and new models of 5 minor planets. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series* 140, 21-28.
2. Sárneczky, K., **Szabó, Gy. M.**, Kiss, L. L. 1999. CCD observations of 11 faint asteroids. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series* 137, 363-368.
3. **Szabó, Gy. M.**, Csák, B., Sárneczky, K., Kiss, L. L. 2001. Photometric observations of 9 Near-Earth Objects. *Astronomy and Astrophysics* 375, 285-292.
4. **Szabó, Gy. M.**, Csák, B., Sárneczky, K., Kiss, L. L. 2001. Photometric observations of distant active comets. *Astronomy and Astrophysics* 374, 712-718.
5. **Szabó, Gy. M.**, Kiss, L. L., Sárneczky, K., Sziládi, K. 2002. Spectrophotometry and structural analysis of 5 comets. *Astronomy and Astrophysics* 384, 702-710.
6. Michałowski, T., 9 társszerző, **Szabó, Gy. M.**, 2004. Photometry and models of selected main belt asteroids I. 52 Europa, 115 Thyra, and 382 Dodona. *Astronomy and Astrophysics* 416, 353-366.
7. **Szabó, Gy. M.**, Ivezić, Ž., Jurić, M., Lupton, R., Kiss, L. L. 2004. Colour variability of asteroids in the Sloan Digital Sky Survey Moving Object Catalog. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 348, 987-998.
8. Michałowski, T., 8 társszerző, **Szabó, Gy. M.**, 1 társszerző 2005. Photometry and models of selected main belt asteroids. II. 173 Ino, 376 Geometria, and 451 Patientia. *Astronomy and Astrophysics* 443, 329-335.
9. Simon, A. E., **Szabó, Gy. M.**, Szatmáry, K. 2009. Exomoon Simulations. *Earth Moon and Planets* 105, 385-389.
10. **Szabó, Gy. M.**, Simon, A. E. 2009. Asteroid Confusions with Extremely Large Telescopes. *Earth Moon and Planets* 105, 227-234.
11. Simon, A. E., **Szabó, Gy. M.**, Szatmáry, K., Kiss, L. L. 2010. Methods for exomoon characterization: combining transit photometry and the Rossiter-McLaughlin effect. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 406, 2038-2046.
12. **Szabó, Gy. M.**, and 12 colleagues 2010. A multi-site campaign to detect the transit of the second planet in HAT-P-13. *Astronomy and Astrophysics* 523, A84.
13. **Szabó, Gy. M.**, Haja, O., Szatmáry, K., Pál, A., Kiss, L. L. 2010. Limits on Transit Timing Variations in HAT-P-6 and WASP-1. *Information Bulletin on Variable Stars* 5919, 1.
14. Pál, A., Sárneczky, K., **Szabó, Gy. M.**, Szing, A., Kiss, L. L., Mező, G., Regály, Z. 2011. Transit timing variations in the HAT-P-13 planetary system. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 413, L43-L46.

15. **Szabó, Gy. M.**, Kiss, L. L. 2011. A Short-period Censor of Sub-Jupiter Mass Exoplanets with Low Density. *The Astrophysical Journal* 727, L44.

A tézispontokban szereplő publikációk:

16. **Szabó, Gy. M.**, Kiss, L. L. 2008. The shape distribution of asteroid families: Evidence for evolution driven by small impacts. *Icarus* 196, 135-143.
17. Domokos, G., Sipos, A. Á., **Szabó, Gy. M.**, Várkonyi, P. L. 2009. Formation of Sharp Edges and Planar Areas of Asteroids by Polyhedral Abrasion. *The Astrophysical Journal* 699, L13-L16.
18. **Szabó, Gy. M.**, Ivezić, Ž., Jurić, M., Lupton, R. 2007. The properties of Jovian Trojan asteroids listed in SDSS Moving Object Catalogue 3. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 377, 1393-1406.
19. Milani, G. A., **Szabó, Gy. M.** és 9 társszerző 2007. Photometry of Comet 9P/Tempel 1 during the 2004/2005 approach and the Deep Impact module impact. *Icarus* 191, 517-525.
20. **Szabó, Gy. M.**, Milani, G., Vinante, C., Ligustri, R., Sostero, G., Trabatti, R. 2010. Observations of Bright Comets in CARA Archives I: Years 2002-2006. *Earth Moon and Planets* 107, 253-265.
21. Milani, G. A., 31 társszerző, **Szabó, Gy. M.** 2012. Photometry and imaging of comet 103P/Hartley 2 in the 2010-2011 apparition. *Icarus EPOXI Mission különszám, közlésre elfogadva*
22. **Szabó, Gy. M.**, Kiss, L. L., Sárneczky, K. 2008. Cometary Activity at 25.7 AU: Hale-Bopp 11 Years after Perihelion. *The Astrophysical Journal* 677, L121-L124.
23. **Szabó, Gy. M.**, Sárneczky, K., Kiss, L. L. 2011. Frozen to death? Detection of comet Hale-Bopp at 30.7 AU. *Astronomy and Astrophysics* 531, A11.
24. **Szabó, Gy. M.**, Szatmáry, K., Divéki, Z., Simon, A. 2006. Possibility of a photometric detection of "exomoons". *Astronomy and Astrophysics* 450, 395-398.

25. Simon, A., Szatmáry, K., **Szabó, Gy. M.** 2007. Determination of the size, mass, and density of „exomoons” from photometric transit timing variations. *Astronomy and Astrophysics* 470, 727-731.
26. **Szabó, Gy. M.**, Simon, A. E., Kiss, L. L., Regály, Z. 2011. Practical suggestions on detecting exomoons in exoplanet transit light curves. *IAU Symposium* 276, 556-557.
27. Simon, A. E., **Szabó, Gy. M.**, Kiss, L. L., Szatmáry, K. 2012. Signals of exomoons in averaged light curves of exoplanets. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 419, 164-171.
28. **Szabó, Gy. M.**, Szabó, R., Benkő, J. M., Lehmann, H., Mező, G., Simon, A. E., Kővári, Z., Hodosán, G., Regály, Z., Kiss, L. L. 2011. Asymmetric Transit Curves as Indication of Orbital Obliquity: Clues from the Late-type Dwarf Companion in KOI-13. *The Astrophysical Journal* 736, L4.
29. **Szabó, Gy. M.**, Pál, A., Derekas, A., Simon, A. E., Szalai, T., Kiss, L. L. 2012. Spin-orbit resonance, transit duration variation and possible secular perturbations in KOI-13. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 421, L122-L126.
30. **Szabó, Gy. M.**, Kiss, L. L., Pál, A., Kiss, Cs., Sárneczky, K., Juhász, A., Hogerheijde, M. R. 2012. Evidence for fresh frost layer on the bare nucleus of comet Hale–Bopp at 32 AU distance. *The Astrophysical Journal*, 2012. December 1. kötet, nyomdában.