

4. félévi beszámoló

Kálmán Szilárd (xilard1@gothard.hu)

Csillagászat és űrfizika PhD program

Témavezető: Dr. Szabó M. Gyula

A dolgozat címe: Exobolygó-rendszerek fotometriai vizsgálata

Bevezetés

A más naprendszerekhez tartozó – avagy extraszoláris – bolygók (röviden exobolygók) vizsgálata az első fősorozati csillag körül keringő exobolygó 2019-es fizikai Nobel-díjjal elismert detektálása (Mayor M. & Queloz D., 1995, *Natur*, 378, 355) után a csillagászat egyik húzóágazatává vált. Az exobolygók vizsgálatának tekintetében az elmúlt évtizedek egyértelműen igazolták, hogy az űrtávcsövek, pontosabban az nagyon precíz űrfotometriai mérések jelentik a tudományág jövőjének legfontosabb szempontját. Ennek megfelelően nagy hangsúlyt kell fektetni a jövő űrteleszkópjainak fejlesztésére. A kutatómunkám során én az Európai Űrügynökség Ariel és PLATO küldetéseiben veszek részt, algoritmikus fejlesztésekkel, tesztelésekkel és tudományos programok javaslatával, az NVKDP ösztöndíjam programjának megfelelően.

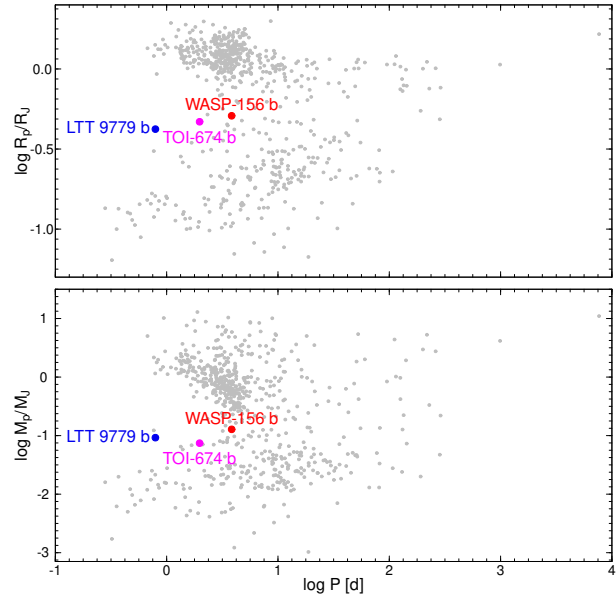
Az első három szemeszter kutatómunkájának összefoglalása

Az első három szemeszterben elvégzett kutatómunkám három elkülönülő osztályba sorolható. Egyrészt foglalkoztam az exobolygó-rendszerek keringési periódus – bolygósugár (és bolygótömeg) paraméterterekben vett eloszlásával, különös tekintettel az ún. szubjupiter-sivatagra (Szabó & Kiss, 2011, *ApJ*, 727, L44), azaz a csillagukhoz nagyon közel keringő, Földnél nagyobb, de Jupiternél kisebb méretű exobolygók látszólagos hiányára (1. ábra). Statisztikai vizsgálatok segítségével megállapítottuk, hogy a bolygók fotoevaporációjának kulcsszerep jut ezen régió kialakulásában (Szabó & Kálmán, 2019, 485, L116); Szabó, Kálmán et al., 2023, *A&A*, 671, 132). Továbbá, bilineáris összefüggéseket találtunk az exobolygók mérete és a csillagaik főbb paraméterei (pl. hőmérséklet, tömeg, elemgyakoriságok) között (Szabó, Kálmán et al., 2023, *A&A*, 671, 132). Az én feladatom itt a statisztikai vizsgálatok és különböző számolások elvégzése, valamint az eredmények értelmezése volt. Az utóbbi években egyre több exobolygót fedeztek fel a „sivatagban”, ami indokolja ezen régió átnevezését „szavannára”, amelyekben viszont „zsiráf” bolygók (amelyekre jó példák láthatók az 1. ábrán) vannak (Kálmán et al., 2023, *MNRAS*, 552, 488). Szintetikus, realiztikus Ariel (és PLATO) fénygörbék segítségével megállapítottam, hogy várhatóan jövőbeni űrtávcsövekkel közvetlen megfigyelésekkel is vizsgálhatóvá válik a fotoevaporáció jelensége ezen bolygóknál, amennyiben végbemegy. A szimulációkhoz kidolgoztam egy olyan algoritmust, amely segítségével a lehető legvalószínűbb fénygörbét készíthetjük el az Ariel misszió számára (Kálmán et al., 2023, *MNRAS*, 552, 488), ami várhatóan komoly szerephez jut majd későbbiekben a tényleges mérések tervezésekor.

Részt vettem továbbá a legkorszerűbb wavelet-technikás zajszűrést alkalmazó, tranzitos exobolygók fénygörbéjének modellezésére szolgáló Transit and Light Curve Modeler (TLCM; Csizmadia, 2020, 496, 4442) szoftver fejlesztésében és tesztelésében, különös tekintettel az időben korrelált zajok és a különböző fénygörbe-effektusok szeparációjára. Szintetikus adatsorok alapján megállapítottunk jel/zaj viszonyokat, amelyeknél kellő pontossággal nyerhetőek vissza a fénygörbét leíró paraméterek, a legkülönbözőbb nemparametrikus zajmodellek esetén (Csizmadia, Smith, Kálmán et al., 2023, *A&A*, elfogadott, megjelenés előtt). További szintetikus adatsorokon megállapítottam továbbá, hogy az egyes paraméterek hibája jól becsülhető

ezzel az eljárással, valamint, hogy a zajszűrés hiánya komoly problémákat okozhat az illesztések során (Kálmán et al., 2023, A&A, elfogadott, megjelenés előtt).

Elvégeztem továbbá két gyorsan forgó, pulzáló csillag körül keringő szubsztelláris kísérő analízisét is. A WASP-33 jelű csillagnál megerősítettük az ún. gravitációs sötétedés jelenségét, azaz sikerült modellezni a csillag gyors forgásából származó lapultság hatását a WASP-33b bolygó tranzitjaira. Ennél a rendszernél továbbá felvettem, hogy a bolygó árapály-ereje pertrubálja a csillag pulzációját (Kálmán et al., 2022, A&A, 660 L2). Ez lehet tehát az első olyan csillag-bolygó rendszer, ahol árapály-perturbált pulzációt látunk. A HD 31221 rendszer esetén szintén felvethető a csillagpulzáció befolyásoltsága, ám a HD 31221b jelű, általam konfirmált égitestről nem tudjuk eldönteni, hogy exobolygó, vagy barna törpe (Kálmán et al., 2023, A&A, 673, L14), csak azt, hogy nem csillag tömegű. A nagy geometriai albedója miatt ez az égitest jó célpont további fotometriai mérésekre a CHEOPS (CHAracterizing ExOPlanets Satellite) vagy a PLATO számára, különböző légköri jelenségek tanulmányozására.



1. ábra. Az ismert exobolygók eloszlása a periódus–sugár (felső panel) és periódus–tömeg (alsó panel) paraméterterekben. A 3 napnál rövidebb keringési periódusoknál látható „üres” régiót nevezük szubjupiter-sivatagnak. A három jelölt exobolygó (LTT 9779b, WASP-156b és TOI-674b) azt illusztrálja, hogy ez a tartomány nem teljesen üres, tehát helyesebb lehet „szavannának” nevezni, a benne lévő bolygókat pedig „zsiráfoknak”. Forrás: Kálmán et al., 2023, MNRAS, 552, 488

A negyedik szemeszter kutatómunkájának összefoglalása

A negyedik szemeszterben folytattam a TLCM fejlesztésében és tesztelésében betöltött szerepemet. Elsősorban az exobolygók légköre által okozott effektusok fotometriai megfigyelhetőségét vizsgáltuk, különböző szórásmodellek segítségével, különös hangsúlyt fektetve az időben korrelált zaj azonosítására és elkülönítésére. Az eredményeket tárgyaló cikk (Csizmadia, Smith, Cabrera, Klagyivik, Chausev, Lam, Nettelmann, Bernabò, Kálmán, 2023, A&A) revízió alatt áll – én a bolygó által kisugárzott és visszavert fényességváltozások megkülönböztetésén dolgoztam. Bemutattuk továbbá, hogy a csillagpulzáció nem okozhatja a WASP-33 és a HD 31221 rendszerek esetén látott aszimmetrikus tranzitokat (Bókon, Kálmán et al., 2023, A&A, elfogadva, megjelenés előtt) – az én feladatomban itt a fénygörbék modellezése volt.

Emellett, a CHEOPS űrtávcső nem publikus adataiban ún. tranzitos exoholdak jele utáni kutatást is vezetem. Az eljárás lényege, hogy azonosítsunk olyan exobolygókat, amelyek elegendően fényes csillag körül keringenek, valamint megfelelően távol vannak a csillaguktól ahhoz, hogy holdak kialakulhassanak és hosszú időskálán ne tűnjenek el. Az ilyen objektumok detektálása rendkívül nehéz, a bolygó tranzitjának jelenléténél egy legalább tízszer kisebb amplitúdójú fényességváltozást kell kimutatni. Ezen nehézségeknek tudható be, hogy az 5000-nél több ismert exobolygó közül csupán egy körül detektáltak vitathatatlanul holdat. Az én számításaim

arra összpontosítanak, hogy a szintetikus holdtranzitokat hogyan lehet minél nagyobb pontossággal és bizonyossággal kimutatni tényleges mérésekből.

Publikációk

Megjelent publikációk

- Szabó, Gy. M., **Kálmán, Sz.**: The sub-Jupiter/Neptune desert of exoplanets: parameter dependent boundaries and implications on planet formation, 2019, MNRAS, 485, L116
- **Kálmán, Sz.** et al.: Gravity darkening and tidally perturbed stellar pulsation in the misaligned exoplanet system WASP-33, 2022, A&A, 660, L2
- Szabó, Gy. M., **Kálmán, Sz.** et al.: Sub-Jovian desert of exoplanets at its boundaries. Parameter dependence along the Main Sequence, 2023, A&A, 641, 132
- **Kálmán, Sz.** et al.: Converting the sub-Jovian desert of exoplanets to a savanna with TESS, PLATO and Ariel, 2023, MNRAS, 522, 488
- **Kálmán, Sz.** et al.: Discovery of a substellar companion in the TESS light curve of the δ Scuti/ γ Doradus hybrid pulsator HD 31221, A&A, 673, L14

Elfogadott, megjelenés előtt álló cikkek

- Csizmadia, Sz., Smith, A. M. S., **Kálmán, Sz.** et al: Power of wavelets in analyses of transit and phase curves in the presence of stellar variability and instrumental noise. I. Method and validation, 2023, A&A
- **Kálmán, Sz.** et al.: Power of wavelets in analyses of transit and phase curves in the presence of stellar variability and instrumental noise. II. Accuracy of the transit parameters, 2023, A&A
- Bókon, A., **Kálmán, Sz.** et al.: Stellar pulsations interfering with the transit light curve. configurations and false positive misalignment, 2023, A&A

Revízió alatt álló cikkek

- Csizmadia, Sz., Smith, A. M. S., Cabrera, J., Klagyivik, P., Chausev, A., Lam, K. W. F., Nettelmann, N., Bernabò, L. M., **Kálmán, Sz.**, 2023, A&A

Tanulmányi tevékenység

- Fejezetek a többes csillag- és bolygórendszerek elméleti és megfigyelési kérdéseiből II. c. kurzus (FIZ/5/042, jeles)
- Bolygók és bolygórendszerek keletkezése (FIZ/5/045, jeles)

Konferenciák, szemináriumok az első négy szemeszterben

- Ariel Consortium Meeting, 2022. okt. 10–12., Bologna; előadó, előadás címe: Converting the sub-Jovian desert into a savanna
- Ariel Consortium Workshop, 2022. jún. 14–15., Orsay; társelőadó, előadás címe: Understanding the sub-Jovian savanna of exoplanets
- Ariel Science Consortium Hybrid Workshop, 2021. nov. 23–24., London; előadó, előadás címe: Accuracy of Transit Parameters in Presence of Stellar Noise: the Power of Wavelets
- Intézeti szeminárium, Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet, 2022. április 28., társelőadó, az előadás címe: Planet-to-star interactions
- Intézeti szeminárium, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institute of Planetary Research, 2022. nov. 11., az előadás címe: Using the power of wavelets in the analysis of transiting exoplanets
- Intézeti szeminárium, University of Bern, Center for Space and Habitability, 2023. márc. 2., az előadás címe: Discovery of a substellar companion in the TESS light curve of the δ Scuti/ γ Doradus hybrid pulsator HD 31221

Folyamatban lévő ösztöndíjak

- NVKDP-2021, 43 hónap