

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI ÉS INFORMATIKAI KAR
FIZIKA DOKTORI ISKOLA

NAPRENDSZERBELI KIS ÉGITESTEK FIZIKAI
TULAJDONSÁGAI FÖLDFELSZÍNI ÉS
ÚRFOTOMETRIAI MÉRÉSEK ALAPJÁN

PHD ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

SZAKÁTS RÓBERT
OKLEVELES CSILLAGÁSZ

Témavezető: *Dr. Kiss Csaba* tudományos tanácsadó
HUN–REN CSFK KTM Csillagászati Intézet
Konzulens: *Dr. Vinkó József* egyetemi docens
SZTE TTK Fizikus Tanszékcsoport Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

Szeged, 2024

Tudományos háttér

A Naprendszer fő kisbolygóövében az 1990-es évek végére, a 2000-es évek elejére, a Neptunuszon túli vidéken pedig mintegy egy évtizeddel később sikerült felfedezni a kisbolygópopulációk legmeghatározóbb égitestjeinek döntő többségét, és hasonló méretű égitestek felfedezése ezeken a területeken jelentős számban már nem várható (Gladman & Volk 2021). Bár ezen vizsgálatok alapján határozták meg a Naprendszer kis égitestjei által alkotott rendszerek dinamikai szerkezetét, az égitestek számának növekedésével párhuzamosan a hangsúly az égitestek felfedezéséről eltolódott az egyes objektumok fizikai tulajdonságainak meghatározása felé. Mindaddig mintegy tucatnyi kis égitestet látogattak meg űreszközök, amelyek a legtöbb információt tudják összegyűjteni, és így egy adott égitest lehető legjobb leírásához segíteni a szakembereket. A legtöbb égitest esetében földfelszíni vagy földközeli űreszközökről készült mérésekre kell hagyatkoznunk, és egy-egy ilyen mérés önmagában általában kevés az égitest átfogó jellemzéséhez (Müller et al. 2018; Ortiz et al. 2020). Az elmúlt évtizedben kivételes karriert befutó Neptunuszon túli égitestek csillagfedés-mérései esetében is, bár ez a módszer tudja a legpontosabb méret- és alakadatokat szolgáltatni, önmagában egy okkultációs mérés mindig csak egy pillanatfelvétel, viszont az égitest átfogó jellemzéséhez szükség van pl. a forgás miatti fényesség- és alakváltozás nyomon követésére, a felszínen található anyagok azonosítására és a felszín hőmérsékleti viszonyainak feltérképezésére is. Egy égitest ilyen méréseken alapuló koherens modellje nemcsak az égitest mai állapotának leírása, hanem az égitest keletkezéséről és fejlődéséről is fontos információkat szolgáltat; az égitestek összességének modelljei pedig a korai Naprendszer és a bolygókeletkezés időszakának viszonyairól árulkodnak.

A kis égitestek egyik legfontosabb jellemzője a forgás miatti fényességváltozás, közkeletű nevén a fénygörbe. Kisebb égitestek, tipikusan néhány száz kilométer alatti méret esetében a fénygörbék jellemzően az alakot tükrözik, és a Nap körüli keringés során különböző irányokból végzett mérésekből az égitest alakja is meghatározható ún. fénygörbe-inverziós módszerekkel. Nagyobb égitestek esetében azt várjuk, hogy a fénygörbe a felszín helyről helyre változó fényvisszaverő képességének megfelelően változik a forgás során egy közelítőleg gömb alakú égitestre, és a különböző hullámhosszakon megfigyelt fénygörbék különbözőek lehetnek a felszínt alkotó anyagok spektrális tulajdonságainak függvényében (Pravec et al. 2002). Kettős rendszerek esetében a fénygörbe, illetve az éppen aktuális forgási periódus a komponensek közötti árapály-kölcsönhatás legfontosabb nyomjelzője. A Neptunuszon túli vidék megismerése szempontjából kiemelt jelentősége van a legnagyobb törpebolygóknak, amelyek közül a nagy változatosságot mutató felszínnek mellett szinte mindegyiknek van kísérője. Ezek közül az Eris a legnagyobb tömegű, a Plutóhoz hasonló méretű törpebolygó. Az Eris esetében régóta kérdés volt a forgási periódusa, amire a földi mérések rendkívül eltérő, 3 óra és 14 nap közötti értékeket adtak (Lin et al. 2007; Roe et al. 2008; Rabino-

witz & Owainati 2014). A forgási periódus különleges jelentősége az Eris esetében ahhoz a kérdéshez kapcsolódott, hogy a Dysnomia nevű holdjával való árapály-kölcsönhatás milyen mértékben tudta lelassítani a fő égitest forgását, amiből következtetni lehet az Eris reológiai tulajdonságaira és belső szerkezetére. Az Eris esetében a látható tartományban mérhető kis amplitúdójú fényváltozás mellett a közeli infravörös visszavert fényben (elsősorban J és H fotometriai sávok) a korábbi, véletlenszerű időpontokban végzett mérések nagyon különböző közeli infravörös színeket mutattak (Fulchignoni et al. 2008; Perna et al. 2010; Snodgrass et al. 2010), ami potenciálisan a közeli infravörös albedót meghatározó, a felszínt borító anyagok koncentrációjának vagy szerkezetének helyről helyre történő változására utalhat.

A legnagyobb kisbolygók kivételével nincsenek elég nagy távcsöveink ahhoz, hogy felbontsuk a kisbolygók pontszerűnek látszó képét, és így meghatározzuk a méretüket és alakjukat. Bár az alak és a méret kisbolygók csillagfedéseiből is meghatározható, a módszer technikai korlátai és adott helyen történő előfordulásuk csekély gyakorisága miatt a módszert nem lehet sok kisbolygóra alkalmazni. A kisbolygók legtöbbször esetében a méretet és albedót radiometriai módszerekkel, azaz a felszín infravörös hősugárzásának elemzésével határozták meg, túlnyomórészt infravörös úrtávcsövek méréseiből. A radiometriai módszerekkel a méret és az albedó mellett a felszín hőtani jellemzőire is következtethetünk, pl. a hőtehetlenségre (Delbo et al. 2015). Ennek jelentősége, hogy a kisbolygók pályáját befolyásoló nem-gravitációs hatások, mint pl. a Jarkovszkij- és YORP-effektusok leginkább az égitestek hőtehetlenségétől függenek (Durech et al. 2015). A kisbolygók ilyen irányú komplex vizsgálatait megnehezítette, hogy a kisbolygók infravörös méréseinek többsége eltérő formátumú, különféle misszióspecifikus adatbázisokban volt megtalálható (Müller et al. 2018).

Kutatási módszerek

Doktori munkám során az Eris törpebolygót vizsgáltam optikai és infravörös fotometriai mérések alapján, másrészt segítettem létrehozni egy adatbázist, amelyben infravörös méréseket gyűjtöttünk össze és rendszereztük, valamint feldolgoztuk azokat.

A **termofizikai modellek** alkalmazása fontos a naprendszerbeli kis égitestek vizsgálatkor. A kisbolygókra érkező fény egy része elnyelődik, egy része pedig visszaverődik. Az elnyelt energia pedig infravörös sugárzásként távozik, amit detektálhatunk. Így, ha egy objektumot látható és infravörös tartományban egyaránt megfigyelünk, akkor az égitest mérete és albedója is meghatározható.

Ehhez becslést kell adni a termális emisszió mértékére, amit a felszíni hőmérséklet eloszlásából számíthatunk ki valamilyen radiometriai modelltől. Egy viszonylag gyakran használt, egyszerű modell a NEATM (Near-Earth Asteroid Thermal Model)(Harris 1998). Ebben a modellben feltételezzük, hogy az égitest gömb alakú, nem forog, és pillanatnyi sugárzási egyensúlyban van, tehát az elnyelt és kisugárzott hő ugyanannyi.

Az abszolút fényesség kapcsolatot teremt a méret és az albedó között, a nyalábparamétert pedig több hullámhosszon történő mérés esetén tudjuk illeszteni az összes fluxusra. Mivel ez a paraméter függhet a felszín termális tulajdonságaitól, a megfigyelési geometriától, a forgástengely irányától, a heliocentrikus távolságtól és akár a fázisszögtől is, ezért kijelenthetjük, hogy ez nem a kisbolygó fizikai tulajdonsága. A NEATM és a hozzá hasonló modellek ugyan elég hatékonyak lehetnek a méret és alapvető termális paraméterek becslésében, de ha egy adott objektumról csak kevés hullámhosszon van mérés, akkor ennél szofisztikáltabb modellekre van szükség.

A TPM (Thermophysical Modell), azaz termofizikai modellek esetén a P periódussal egy adott tengely körül forgó kisbolygó felületét kis méretű felületelemekkel írják le. Ehhez szükség van egy alakmodellre, amit vagy radarmérésekből, fénygörbe-inverzióval, in-situ űr-eszközös mérésekből, vagy okkultációs mérésekből határoznak meg. Bizonyos esetekben az égitest közelíthető gömb vagy ellipszoid alakkal is. A modell ekkor az adott észlelési geometriára jellemző értékekkel kiszámolja minden felületegységre a hőmérsékletet és a termális emissziót. A kis elemek közötti hővezetést általában elhanyagolják. Így egy egydimenziós, a felületre merőleges hővezetést kell csak leírni.

Termofizikai modellek esetén a hőtehetetlenség és a behatolási mélység az, amit figyelembe szoktak venni. A felszín érdekessége jelentősen tudja befolyásolni a termális emissziót. Ezt két egymásnak megfeleltethető módon lehet jellemezni, pl. a felszín kráterezettségével (Spencer et al. 1989) vagy a felszínen megtalálható sztochasztikus egyenetlenségekkel (Laguerros 1998). A felszín emiatt nem a Lambert-szórást követi, hanem a beérkező sugárzás irányába sugároz vissza többet. Ezt két folyamattal lehet magyarázni, egyrészt, bizonyos durva felületeken a felületelemek a Nap irányába néznek, így több sugárzást nyelnek el, másrészt, a durva felület miatt többszörösen szóró részek növelik az elnyelt sugárzás mennyiségét. Akár a NEATM (méret, albedó és a nyalábparaméter), akár a TPM (méret, albedó, hőtehetetlenség, felületi érdekesség, a forgástengely iránya stb.) alapján határozzunk meg paramétereket, ezeket a mért és a modellezett fluxusokból képzett χ^2 minimalizálásával tesszük meg. Ezen módszert a *Small Bodies: Near and Far termális infravörös adatbázis naprendszerbeli kis égitestekre* (Szakáts et al. 2020) c. publikációban használtam fel, és erre épül a 2. tézispontom.

Kutatásaim során az egyik legalapvetőbb módszer, amit alkalmaztam, a **csillagászati fotometria** volt, ezen belül is az apertúrafotometria. Mivel a téziseim alapjául szolgáló munkák egyikében sem kellett nagyon sűrű csillagmezőn fényességmérést végezni, ezért ez a módszer megfelelő volt minden esetben.

A *(136199) Eris kötött keringésének felfedezése hosszú távú földi és űrfotometria alapján* című publikációban (Szakáts et al. 2023), amely a 3. és 4. tézispontok alapja, három földfelszíni távcső archív adatait dolgoztam fel. Ezek a műszerek: az 1,5 méteres távcső a Sierra Nevada Observatóriumban, a Calar Alto-i 2,2 méteres teleszkóp, illetve a La Hita

obszervatórium 0,77 méteres távcsöve. Az archív adatok hosszú időt fednek le, az első mérés 2005. október 3-áról származik, míg az utolsó 2011. november 28-ról.

A méréseket a sztenderd lépések segítségével dolgoztam fel, azaz először elvégeztem a bias, dark és flat korrekciókat. Ezután elvégeztem a célpont és néhány kiválasztott csillag (ún. összehasonlító) apertúrafotometriáját. Mivel a mérések kvázi „blokkokban” készültek, azaz egy blokk átlagosan 4-5 napot ölelt fel, az összehasonlítókat csak egy ilyen blokkon belül tudtam használni, mert a következő blokkig a célpont jelentősen arrébb mozdult az égen. Ez főleg a 1,5 méteres távcső mérései esetén volt releváns, ahol évek is elteltek két mérés között. Mivel jó minőségű sztenderd fotometriát sem lehetett ezeken a méréseken elvégezni, vagy a sztenderd mezők mérésének hiánya miatt, vagy amiatt, hogy csak egy szűrő volt használatban (tipikusan Johnson R, vagy clear, szűrő nélkül), végül csak egyszerű differenciális fotometria készült. A periódusillesztésnél a sztenderd fényesség hiányát úgy oldottam meg, hogy az abszolút zéró pontot szabad paraméternek hagytam minden mérési blokk esetén. Ezen és más archív mérések segítségével sikerült végül az Eris forgási periódusát meghatározni.

Az 5. tézispontban összefoglalt eredmények *Az Eris törpebolygó forgástól függő J-H színe* (Szakáts & Kiss 2023) c. publikációra épülnek, amiben a hawaii Mauna Kea Obszervatórium Infrared Telescope Facility távcső SpeX műszerének¹ GuideDog kamerájával készült felvételeket elemeztem. A GuideDog közeli infravörös kamera, ami JHK_s szűrőkkel van felszerelve. A műszerrel 2023. augusztus 7. és 25. között végeztem távméréseket Budapestről. Ezen időszakban 9 éjszakán kaptam távcsőidőt, amiből végül 4 éjszakányi mérést tudtam felhasználni. Egy éjszaka a célponttól és három másik, közeli összehasonlító csillagról készültek felvételek. Mivel a kamera látómezeje nagyon kicsi volt, ezért a célpont és az összehasonlító nem fértek be a látómezőbe egyszerre, így oda-vissza kellett pozicionálni a távcsövet mérés közben. A célpontok mellé még készültek dark és skyflat képek is, ezenkívül minden szekvencia több, tipikusan 5 dither pozícióban lett lemérve. A mérések feldolgozását az Ábrahám Pétertől kapott instrukciók alapján végeztem el, mivel neki nagy tapasztalata volt már ezzel a műszerrel. A felvételek feldolgozása után elvégeztem a célpont és az összehasonlító apertúrafotometriáját több apertúrával is, amikből végül kiválasztottam egy ideálisat. Elvégeztem a célpont fényességének sztenderd kalibrációját az összehasonlító segítségével, ami egy egyszerű zérusponteltolás volt ebben az esetben. Végül az MKO rendszerben kapott sztenderd fényességeket az összehasonlíthatóság kedvéért a 2MASS rendszerbe konvertáltam.

Egy további általam alkalmazott módszer volt még a **reziduál minimalizációs technika** alapuló periódus- és amplitúdókeresés, amely a 3. tézisponthoz kapcsolódik. Itt egy a Levenberg–Marquardt-féle minimalizációs algoritmust használtam, hogy egy adott δm amplitúdóra és P periódusra megkeressem a legjobban illeszkedő fénygörbefázist. A δm és P értékeket egy rácson belül változtattam, ahol P maximális értéke 17 nap volt, a minimális pedig 1 nap. A feltételezés egyszerűen fogalmazva az volt, hogy ahol a modell- és a valódi

¹<http://irtfweb.ifa.hawaii.edu/~spex/>

fénygörbék különbsége minimális, az a megfelelő periódus és amplitúdó. Hogy teszteljem ezt, szintetikus adatsorokra is elvégeztem az elemzést, amiket hasonló paraméterekkel (méri pontok száma, mérések eloszlása, periódus stb.) hoztam létre, mint a valódi mérések. Ebből kiderült, hogy a módszer jól adja vissza a mesterséges adatsor paramétereit, ugyanis a minimum a megadott periódusnál és amplitúdónál volt a $(\delta m, P)$ térben. Ezt a módszert használtam a hosszú távú mérések esetén a periódus és amplitúdó keresésére (Szakáts et al. 2023).

A 4. tézispontához kapcsolódó módszer az **árapály-modellezés**. Ennek alapja Murray & Dermott (2000) publikációja, amit Hastings et al. (2016) feltevései alapján használtam én is. A modellel a hold keringését, ezen belül a fél nagytengely fejlődését tudjuk vizsgálni, valamint az Eris és a Dysnomia forgásának változását. Feltételezzük, hogy a hold keringési síkja és az Eris egyenlítői síkja egybeesik. A rendszer fő paramétereinek egy része a Dysnomia pályájából (Holler et al. 2021) származik, mivel ez adja meg a jelenlegi fél nagytengelyt (a_f), a keringési periódust (P_{orb}) és a rendszer össztömegét (M_{sys}). Azt gondoljuk, hogy az Eris majdnem tökéletesen gömb alakú, a sugara $R_p = 1163 \pm 6$ km, a V-sávbeli geometriai albedója pedig $p_{Vp} = 0,96$. Ezeket az értékeket pontosan ismerjük korábbi okkultációs mérésekből (Sicardy et al. 2011). A forgási periódus változásának mértéke a másodrendű Love-számtól és az árapályminőségi paramétertől (k_{2p}/Q_p) függ. A Q_p árapályminőségi paramétert 10 és 100 közé választottuk (Goldreich & Soter 1966; Murray & Dermott 2000), így egy nagyságrendnyi mozgást engedélyeztem az irodalmilag elfogadott $Q = 100$ értékhez képest. A k_2 másodrendű Love-számot a μ merevségből számoltam Hastings et al. (2016) alapján. A merevséget szintén egy tartományon belül, 10^9 és 10^{11} N m⁻² között engedtem mozogni, így le tudtam fedni a tipikus kő és jég belső szerkezeteket (Murray & Dermott 2000). Az R_s sugár értékét a HST F606W szűrős méréséből (Brown & Schaller 2007) becsültem, az albedót pedig $p_{Vs} = 0,02-0,8$ közé választottam a modellezéshez. A sűrűségparamétert ($\rho_s = 0,5-2,4$ g cm⁻³) tartományban hagytam, az Eris sűrűségét pedig a tömegarányból számoltam ki ez után. A kezdeti fél nagytengelyt a Roche-limit adta meg, az Eris kezdeti forgási periódusát pedig a szétesési limit.

Több esetre lefuttattam a modellező kódot, ahol a paraméterek (k_{2p} , Q_p , ρ_s , és p_{Vs}) a fentebb említett intervallumokba estek véletlenszerűen. Feltételeztem, hogy ha az Eris eléri a kötött keringést, akkor abban az állapotban marad, és a forgási periódus utána csak a fél nagytengely és a keringési periódus miatt változik. Ezen kód segítségével számos esetre modelleztem az Eris–Dysnomia-rendszer árapályfejlődését, és így, kötött keringést feltételezve, az Eris és a Dysnomia fizikai paramétereire tudtam határokat szabni.

Új tudományos eredmények

1. Az SBNAF infravörös adatbázis létrehozása

Vezetésemmel létrehoztuk a kisbolygók infravörös méréseinek „Small Bodies: Near and Far” (SBNAF) adatbázisát, amelynek végső célja a kisbolygókról készült összes termális infravörös mérés összegyűjtése. Munkám során elvégeztem az adatok rendszerezését, az adatokon a szükséges technikai korrekciókat, hozzárendeltem a szükséges további metaadatokat a JPL/Horizons rendszeréből, és ezeket integráltam az adatbázisba. Koordináltam az adatbázishoz kapcsolódó weboldal fejlesztését és az adatbázis-elérést, valamint létrehoztam az adatbázis automatikus feltöltéséhez és új adatok hozzáadásához szükséges eljárásokat. Az adatbázis jelenleg mintegy 170 ezer mérést tartalmaz, és közvetlenül a <https://ird.konkoly.hu/> címen, valamint a VESPA (Virtual European Solar and Planetary Access) virtuális obszervatórium felületen keresztül érhető el.

Kapcsolódó publikáció: **Szakáts, R.**; Müller, T.; Alí-Lagoa, V. et al., *Small Bodies: Near and Far Database for thermal infrared observations of small bodies in the Solar System*, 2020, A&A, Volume 635, id.A54, 14 pp.

2. Aszteroidapopulációk hőtehetetlensége

- Az SBNAF infravörös adatbázis több ezer kisbolygójának adatai alapján egy termofizikai modellen alapuló módszer segítségével megmutattam, hogy a modellezésből kapott hőtehetetlenségek erősen függenek attól, hogy milyen heliocentrikustávolság-függést tételezünk fel a kisbolygók hőtehetetlenségre, miközben a különböző illesztések hasonlóan jól leírják a mérési adatokat, egy adott kisbolygóméret-tartományra. Ugyanakkor a módszer lehetővé teszi különböző méretű kisbolygók relatív hőtehetetlenségének összehasonlítását, amely szerint a ~ 10 km-es kisbolygók hőtehetetlensége jelentősen, mintegy háromszor nagyobb, mint a ~ 75 km-es kisbolygóké.

Kapcsolódó publikáció: **Szakáts, R.**; Müller, T.; Alí-Lagoa, V. et al., *Small Bodies: Near and Far Database for thermal infrared observations of small bodies in the Solar System*, 2020, A&A, Volume 635, id.A54, 14 pp.

3. Az Eris törpebolygó forgása

- Összegyűjtöttem az elérhető fotometriai adatokat a (136199) Eris törpebolygóra a következő forrásokból: TESS, Gaia, GROND, Swift. Emellett feldolgoztam eddig nem kiadott archív méréseket három spanyolországi távcsőre, és elvégeztem a fotometriát.

-
- A rendelkezésemre álló fénygörbéket periódusanálízisnek vetettem alá, és meghatároztam az Eris forgási periódusát, ami 15,78 napnak adódott, így felfedeztem, hogy az Eris–Dysnomia rendszer kötött keringésű.
 - Összehasonlítottam az irodalomban fellelhető látható tartománybeli és $J - H$ színeket a GROND méréseiből származó értékekkel, és meghatároztam, hogy míg az optikai tartományban a színek jó közelítéssel hasonlóak, addig a közeli infravörösben bizonyos esetekben jelentősen eltérhetnek, ami arra utalhat, hogy az Eris $J - H$ színe időben változik.

Kapcsolódó publikáció:

Szakáts, R.; Kiss, Cs.; Ortiz, J. L. et al., *Tidally locked rotation of the dwarf planet (136199) Eris discovered via long-term ground-based and space photometry*, 2023, A&A, Volume 669, id.L3, 13 pp.

4. Az Eris–Dysnomia rendszer árapály-modellezése

- Elvégeztem az Eris–Dysnomia rendszer árapály-modellezését, amelynek segítségével mind az Eris, mind a Dysnomia fizikai paramétereire határokat szabtam.

Kapcsolódó publikáció:

Szakáts, R.; Kiss, Cs.; Ortiz, J. L. et al., *Tidally locked rotation of the dwarf planet (136199) Eris discovered via long-term ground-based and space photometry*, 2023, A&A, Volume 669, id.L3, 13 pp.

5. Az Eris törpebolygó forgástól függő $J - H$ színe

- Elsőként mértem meg a Mauna Kea Observatórium IRTF távcsövének GuideDog műszerével az Eris J és H színeket. Ezeket a méréseket feldolgoztam, és elvégeztem a fotometriát, ennek keretében a mért J és H magnitúdókat a 2MASS rendszerbe kovertáltam.
- Archív mérésekkel összevetve az új eredményeket megállapítottam, hogy az Eris $J - H$ színe a forgás fázisától függ.
- Összehasonlítottam az Eris $V - R$ és $J - H$ színeit más Neptunuszon túli égitestek színeivel, és arra jutottam, hogy a $J - H$ színtartomány a Haumea család tagjaiéhoz hasonlít.
- A megfigyelhető közeli infravörös színváltozást megpróbáltam megmagyarázni. Felvettem, hogy egy lehetséges ok a felszíni metán részecskeméretének változása, ami a

H sávban jelentős albedóváltozást okozhat, míg J-ben és az optikai tartományban ez a változás minimális, ami egybevág az eddigi megfigyelésekkel. Másik magyarázat lehet a metán mellett található nagyobb mennyiségű N_2 , ami szintén okozhat hasonló effektusokat, de ehhez nagymértékű különbségnek kellene lenni az Eris egyes felszíni részei között, amit az eddigi spektroszkópai mérések nem tudtak alátámasztani. Az e kérdés eldöntésére alkalmas mérést a James Webb űrtávcső NIRSpec műszere tudná elvégezni, mert az képes lenne a felszíni N_2 detektálására.

Kapcsolódó publikáció:

Szakáts, R.; Kiss, Cs., *Rotational Phase Dependent J - H Colour of the Dwarf Planet Eris*, 2023, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Volume 135, Issue 1054, id.124401, 7 pp.

Summary

By the late 1990s and early 2000s, the vast majority of the most significant celestial bodies in the asteroid populations of the main asteroid belt had been discovered. The discovery of similarly sized bodies in these regions is no longer expected in significant numbers (Gladman & Volk 2021). While these studies have defined the dynamic structure of systems formed by small Solar System bodies, the emphasis has shifted from the discovery of these bodies to determining the physical properties of individual objects.

One of the most important characteristics of small celestial bodies is the change in brightness due to rotation, or commonly known as the light curve. For smaller celestial bodies, typically those smaller than a few hundred kilometers in size, light curves typically reflect shape, and the shape of the celestial body can also be determined from measurements in different directions during its orbit around the Sun using so-called light curve inversion method. For larger celestial bodies, we expect the light curve to change during rotation according to the location dependent reflectivity of the surface on a nearly spherical celestial body, and light curves observed at different wavelengths may be different depending on the spectral properties of the materials forming the surface (Pravec et al. 2002). For binary systems, the light curve and the actual rotational period are the most important indicators of tidal interaction between the components.

The largest dwarf planets, which have highly diverse surfaces, almost all have companions, and are of particular importance for understanding the trans-Neptunian region. Of these, Eris is the most massive dwarf planet, similar in size to Pluto. The rotational period of Eris has long been a question, for which ground-based measurements have given extremely different values between 3 hours and 14 days (Lin et al. 2007; Roe et al. 2008; Rabinowitz & Owainati 2014). The special significance of the rotational period of Eris was related to

the question of how much tidal interaction with its moon Dysnomia could have slowed down the rotation of the main body, from which it is possible to infer the rheological properties and internal structure of Eris. In addition to the small-amplitude brightness changes measurable in the visible range for Eris, earlier measurements made at random times in the near-infrared reflected light (primarily J and H photometric bands) showed very different near-infrared colors (Fulchignoni et al. 2008; Perna et al. 2010; Snodgrass et al. 2010), which could potentially indicate a location-dependent change in the concentration or structure of the surface-covering materials that determine the near-infrared albedo.

With the exception of the largest asteroids, we do not have sufficiently large telescopes to resolve the point-like image of asteroids and thus determine their size and shape. Although shape and size can also be determined from asteroid occultations, the technical limitations of the method and the frequency of their occurrence in a given location do not make the method suitable for applying it to many asteroids. For most asteroids, size and albedo have been determined by radiometric methods, i.e., by analyzing the infrared thermal radiation of the surface, largely from measurements by infrared space telescopes. In addition to size and albedo, radiometric methods can also be used to infer the thermal properties of the surface, such as thermal inertia (Delbo et al. 2015). The significance of this is that the effects of non-gravitational influences, such as the Yarkovsky and YORP effects depend on the thermal inertia of the asteroid (Durech et al. 2015). Complex studies of asteroids in this way have been hampered by the fact that the majority of asteroid infrared measurements were scattered and in diverse formats, found in mission-specific databases (Müller et al. 2018).

During my PhD work I helped to create the SBNAF Infrared Database, which contains 170,446 thermal infrared measurements for selected asteroids and has a final goal to collect all available thermal infrared measurements for small bodies (Szakáts et al. 2020).

With the help of the SBNAF Infrared Database I showed that thermal inertias based on thermophysical modelling depend on what kind of heliocentric distance dependence we assume. The method allows us to compare the relative thermal inertia for different sized asteroids, where I found that the thermal inertia of a ~ 10 km asteroid is three times larger than a ~ 75 km asteroid (Szakáts et al. 2020).

I collected available photometric data for the dwarf planet (136199) Eris and processed archival data from three Spanish telescopes. After a period analysis I found that the rotational period of Eris is 15.78 days and I assumed that the Eris-Dysnomia system is tidally locked (Szakáts et al. 2023).

I collected and compared the optical and near-infrared $J - H$ values from the literature and from the photometric data from the GROND instrument and I noticed that the values in the optical are quite similar, but in the near-infrared sometimes they differ by a large margin. I hypothesized that the $J - H$ color of Eris varies (Szakáts et al. 2023).

I modelled the tidal evolution of the Eris-Dysnomia system and I defined limitations on physical parameters of both bodies (Szakáts et al. 2023).

For the first time I observed (136199) Eris with the IRTF telescope's GuideDog camera in J and H bands. I processed the data and performed aperture photometry and converted the brightness values to the 2MASS system. I compared the new values to the ones in the literature and I determined that the $J - H$ color of Eris is phase dependent. I compared the $V - R$ and $J - H$ colors of Eris to other trans-Neptunian objects and I found that they are similar to those of the Haumea family. I tried to explain the observed near infrared color variation and I proposed that it could be due to the size change of the surface CH_4 . Another possible explanation could be that N_2 on the surface can be found in larger quantities at different surface areas, but this is not yet observed with spectroscopy. The NIRSpec instrument on the James Webb telescope could measure the surface N_2 and answer this question (Szakáts & Kiss 2023).

Publikációk

MTMT azonosító: 10034696

Kumulatív impakt faktor (IF): 455,165

Összes hivatkozások száma: 894

Hirsch index: 18

Az értekezéshez felhasznált saját publikációk

1. **Szakáts, R.**; Muller, T.; Ali-Lagoa, V.; Marton, G.; Farkas-Takacs, A.; Banyai, E. & Kiss, C.: Small Bodies: Near and Far Database for thermal infrared observations of small bodies in the Solar System, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 635, id.A54, 14 pp. (2020) [IF: 5,802]
2. **Szakáts, R.**; Kiss, C.; Ortiz, J.; Morales, N.; Pal, A.; Muller, T.; Greiner, J.; Santos-Sanz, P.; Marton, G.; Duffard, R.; Sagi, P. & Forgacs-Dajka, E.: Tidally locked rotation of the dwarf planet (136199) Eris discovered via long-term ground-based and space photometry, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 669, id.L3, 13 pp. (2023) [IF: 6,5]
3. **Szakáts, R.** & Kiss, C.: Rotational Phase Dependent J - H Colour of the Dwarf Planet Eris, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Volume 135, Issue 1054, id.124401, 7 pp. (2023) [IF: 3,5]

Egyéb, az értekezés témájához kötődő anyagok

Poszterek, konferenciakiadványok:

-
1. **Szakáts, R.**; Kiss, Cs.; Marton, G. et al., *Serendipitous observations of asteroids in Herschel PACS and SPIRE maps*, 2017., European Planetary Science Congress 2017, szeptember 17-22., Riga, Lettország, id. EPSC2017-223
 2. **Szakáts, R.**; Kiss, Cs.; Müller, T.G. et al., *'Small Bodies: Near és Far' database for thermal infrared observations of Solar System small bodies*, 2019., EPSC-DPS Joint Meeting 2019., szeptember 15-20., Genf, Svájc, id. EPSC-DPS2019-1314
 3. **Szakáts, R.**; Kiss, Cs.; Farkas-Takács, A. et al., *Far-infrared flux densities of main belt asteroids from serendipitous Herschel/PACS observations*, 14th Europlanet Science Congress 2020, Online, szeptember 21-október 9., 2020., <https://www.epsc2020.eu/>, id. EPSC2020-727
 4. **Szakáts, R.**; Müller, T.G.; Alí-Lagoa, V et al., *SBNAF Infrared Database, Ground-Based Thermal Infrared Astronomy - Past, Present és Future*, Online, október 12-16., 2020. <https://www.eso.org/sci/meetings/2020/IR2020.html>, id.49
 5. **Szakáts, R.**; Kiss, Cs.; Müller, T.G. et al., *Update on the SBNAF Infrared Database*, 2021, 15th Europlanet Science Congress 2021, Online, szeptember 13-24., <https://www.epsc2021.eu/>, id. EPSC2021-686
 6. **Szakáts, R.**; Kiss, Cs.; Müller, T.G. et al., *Photometry of main belt asteroids from serendipitous Herschel/PACS observations*, 2021, 15th Europlanet Science Congress 2021, Online, szeptember 13-24., Online <https://www.epsc2021.eu/>, id. EPSC2021-761
 7. **Szakáts, R.**; Müller, T.G.; Alí-Lagoa, V et al., *Update on the SBNAF Infrared Database*, 2022, IR2022: An Infrared Bright Future for Ground-based IR Observatories in the Era of JWST. Online <https://zenodo.org/communities/ir2022>, id. 13
 8. **Szakáts, R.**; Kiss, Cs.; Pál, A. et al., *On the rotation of the dwarf planet (136199) Eris*, 2022, 16th Europlanet Science Congress 2022, szeptember 18-23., Palacio de Congresos de Granada, Spanyolország.

Referált angol nyelvű szakcikk:

1. Ali-Lagoa, V.; Muller, T.; Kiss, C.; **Szakáts, R.**; Marton, G.; Farkas-Takacs, A.; Bartczak, P.; Butkiewicz-Bak, M.; Dudzinski, G.; Marciniak, A.; Podlowska-Gaca, E.; Duffard, R.; Santos-Sanz, P. & Ortiz, J.: Thermal properties of large main-belt asteroids observed by Herschel PACS, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 638, id.A84, 19 pp. (2020) [IF: 5,802]

-
2. Mueller, T.; Marciniak, A.; Kiss, C.; Duffard, R.; Ali-Lagoa, V.; Bartczak, P.; Butkiewicz-Bak, M.; Dudzinski, G.; Fernandez-Valenzuela, E.; Marton, G.; Morales, N.; Ortiz, J.; Oszkiewicz, D.; Santana-Ros, T.; **Szakáts, R.**; Santos-Sanz, P.; Takacsne Farkas, A. & Varga-Verebelyi, E.: Small Bodies Near and Far (SBNAF): A benchmark study on physical and thermal properties of small bodies in the Solar System, *Advances in Space Research*, Volume 62, Issue 8, p. 2326-2341. (2018) [IF: 1,746]

Egyéb, az értekezéshez lazán kötődő publikációk

1. Pal, A.; Kiss, C.; Horner, J.; **Szakáts, R.**; Vilenius, E.; Mueller, T.; Acosta-Pulido, J.; Licandro, J.; Cabrera-Lavers, A.; Sarneczky, K.; Szabo, G.; Thirouin, A.; Sipocz, B.; Dozsa. & Duffard, R.: Physical properties of the extreme Centaur and super-comet candidate 2013 AZ_60, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 583, id.A93, 8 pp. (2015) [IF: 5,185]
2. Sarneczky, K.; Szabo, G.; Csak, B.; Kelemen, J.; Marschalko, G.; Pal, A.; **Szakáts, R.**; Szalai, T.; Szegedi-Elek, E.; Szekely, P.; Vida, K.; Vinko, J. & Kiss, L.: Activity of 50 Long-period Comets Beyond 5.2 au, *The Astronomical Journal*, Volume 152, Issue 6, article id. 220, 14 pp. (2016). [IF: 3,773]
3. Mueller, T.; Marciniak, A.; Butkiewicz-Bak, M.; Duffard, R.; Oszkiewicz, D.; Kaeufl, H.; **Szakáts, R.**; Santana-Ros, T.; Kiss, C. & Santos-Sanz, P.: Large Halloween asteroid at lunar distance, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 598, id.A63, 10 pp. (2017) [IF: 5,565]
4. Farkas-Takacs, A.; Kiss, C.; Pal, A.; Molnar, L.; Szabo, G.; Hanyecz, O.; Sarneczky, K.; Szabo, R.; Marton, G.; Mommert, M.; **Szakáts, R.**; Mueller, T. & Kiss, L.: Properties of the Irregular Satellite System around Uranus Inferred from K2, Herschel, and Spitzer Observations, *The Astronomical Journal*, Volume 154, Issue 3, article id. 119, 13 pp. (2017). [IF: 4,150]
5. Ortiz, J.; Santos-Sanz, P.; Sicardy, B.; ... ; **Szakáts, R.** et al.: The size, shape, density and ring of the dwarf planet Haumea from a stellar occultation, *Nature*, Volume 550, Issue 7675, pp. 219-223 (2017). [IF: 41,577]
6. Marciniak, A.; Ali-Lagoa, V.; Muller, T.; **Szakáts, R.**; et al.: Thermal properties of slowly rotating asteroids: results from a targeted survey, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 625, id.A139, 40 pp. (2019) [IF: 5,636]
7. Hanus, J.; Vernazza, P.; Viikinkoski, M.; ... ; **Szakáts, R.**; et al.: (704) Interamnia: a transitional object between a dwarf planet and a typical irregular-shaped minor body, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 633, id.A65, 17 pp. (2020) [IF: 5,802]

-
8. Vernazza, P.; Jorda, L.; Sevecek, P.; ... ; **Szakáts, R.**; et al.: A basin-free spherical shape as an outcome of a giant impact on asteroid Hygiea, *Nature Astronomy*, Volume 4, p. 136-141 (2020) [IF: 14,437]
 9. Pal, A.; **Szakáts, R.**; Kiss, C.; Bodi, A.; Bogнар, Z.; Kalup, C.; Kiss, L.; Marton, G.; Molnar, L.; Plachy, E.; Sarneczky, K.; Szabo, G. & Szabo, R.: Solar System Objects Observed with TESS, First Data Release: Bright Main-belt and Trojan Asteroids from the Southern Survey, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, Volume 247, Issue 1, id.26 (2020) [IF: 8,136]
 10. Szabo, G.; Kiss, C.; **Szakáts, R.**; Pal, A.; Molnar, L.; Sarneczky, K.; Vinko, J.; Szabo, R.; Marton, G. & Kiss, L.: Rotational Properties of Hilda Asteroids Observed by the K2 Mission, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, Volume 247, Issue 1, id.34 (2020) [IF: 8,136]
 11. Ortiz, J.; Santos-Sanz, P.; Sicardy, B.; ... ; **Szakáts, R.**; et al.: The large trans-Neptunian object 2002 TC_302 from combined stellar occultation, photometry, and astrometry data, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 639, id.A134, 14 pp. (2020) [IF: 5,802]
 12. Rommel, F.; Braga-Ribas, F.; Desmars, J.; ... ; **Szakáts, R.**; et al.: Stellar occultations enable milliarcsecond astrometry for Trans-Neptunian objects and Centaurs, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 644, id.A40, 15 pp. (2020) [IF: 5,802]
 13. Kalup, C.; Molnar, L.; Kiss, C.; Szabo, G.; Pal, A.; **Szakáts, R.**; Sarneczky, K.; Vinko, J.; Szabo, R.; Kecskemethy, V. & Kiss, L.: 101 Trojans: A Tale of Period Bimodality, Binaries, and Extremely Slow Rotators from K2 Photometry, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, Volume 254, Issue 1, id.7, 20 pp. (2021) [IF: 9,2]
 14. Marciniak, A.; Durech, J.; Ali-Lagoa, V.; Ogloza, W.; **Szakáts, R.**; et al.: Properties of slowly rotating asteroids from the Convex Inversion Thermophysical Model, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 654, id.A87, 32 pp. (2021) [IF: 6,24]
 15. Szabo, G.; Pal, A.; Szigeti, L.; Bogнар, Z.; Bodi, A.; Kalup, C.; Jager, Z.; Kiss, L.; Kiss, C.; Kovacs, J.; Marton, G.; Molnar, L.; Plachy, E.; Sarneczky, K.; **Szakáts, R.** & Szabo, R.: Rotation periods and shape asphericity in asteroid families based on TESS S1-S13 observations, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 661, id.A48, 10 pp. (2022) [IF: 6,5]
 16. Lee, H.; Kim, M.; Marciniak, A.; Kim, D.; Moon, H.; Choi, Y.; Zola, S.; Chatelain, J.; Lister, T.; Gomez, E.; Greenstreet, S.; Pal, A.; **Szakáts, R.**; et al.: Refinement of the

-
- convex shape model and tumbling spin state of (99942) Apophis using the 2020-2021 apparition data, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 661, id.L3, 14 pp. (2022) [IF: 6,5]
17. Vara-Lubiano, M.; Benedetti-Rossi, G.; Santos-Sanz, P.; ... ; **Szakáts, R.**; et al.: The multichord stellar occultation on 2019 October 22 by the trans-Neptunian object (84922) 2003 VS_2, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 663, id.A121, 17 pp. (2022) [IF: 6,5]
 18. Santos-Sanz, P.; Ortiz, J.; Sicardy, B.; ... ; **Szakáts, R.**; et al.: Physical properties of the trans-Neptunian object (38628) Huya from a multi-chord stellar occultation, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 664, id.A130, 18 pp. (2022) [IF: 6,5]
 19. KecsKemethy, V.; Kiss, C.; **Szakáts, R.**; Pal, A.; Szabo, G.; Molnar, L.; Sarneczky, K.; Vinko, J.; Szabo, R.; Marton, G.; Farkas-Takacs, A.; Kalup, C. & Kiss, L.: Light Curves of Trans-Neptunian Objects from the K2 Mission of the Kepler Space Telescope, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, Volume 264, Issue 1, id.18, 20 pp. (2023) [IF: 8,7]
 20. Kiss, C.; Muller, T.; Farkas-Takacs, A.; Moor, A.; Protopapa, S.; Parker, A.; Santos-Sanz, P.; Ortiz, J.; Holler, B.; Wong, I.; Stansberry, J.; Fernandez-Valenzuela, E.; Glein, C.; Lellouch, E.; Vilenius, E.; Kalup, C.; Regaly, Z.; **Szakáts, R.**; Marton, G.; Pal, A. & Szabo, G.: Prominent Mid-infrared Excess of the Dwarf Planet (136472) Makemake Discovered by JWST/MIRI Indicates Ongoing Activity, *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 976, Issue 1, id.L9, 16 pp. (2024) [IF: 7,9]

Egyéb publikációk

1. **Szakáts, R.**; Szabo, G. & Szatmary, K.: Does the Period of BE Lyncis Really Vary?, *Information Bulletin on Variable Stars*, 5816, 1. (2008)
2. Derekas, A.; Kiss, L.; Bedding, T.; Ashley, M.; Csak, B.; Danos, A.; Fernandez, J.; Furesz, G.; Meszaros, S.; Szabo, G.; **Szakáts, R.**; Szekely, P. & Szatmary, K.: Binariness and multiperiodicity in high-amplitude delta Scuti stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 394, Issue 2, pp. 995-1008. (2009) [IF: 5,103]
3. Kospal.; Abraham, P.; Acosta-Pulido, J.; Arevalo Morales, M.; Carnerero, M.; Elek, E.; Kelemen, J.; Kun, M.; Pal, A.; **Szakáts, R.** & Vida, K.: The outburst and nature of two young eruptive stars in the North America/Pelican Nebula Complex, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 527, id.A133 (2011) [IF: 4,587]
4. Kun, M.; Szegedi-Elek, E.; Moor, A.; Abraham, P.; Acosta-Pulido, J.; Apai, D.; Kelemen, J.; Pal, A.; Racz, M.; Regaly, Z.; **Szakáts, R.**; Szalai, N. & Szing, A.: A Peculiar

-
- Young Eruptive Star in the Dark Cloud Lynds 1340, *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 733, Issue 1, article id. L8 (2011). [IF: 5,526]
5. Borkovits, T.; Biro, I.; Hegedus, T.; Kiss, Z.; **Szakáts, R.**; Regaly, Z.; Patkos, L.; Klagyivik, P.; Simity, S.; Grezsa, T.; Gergely, G. & Lukacs, K.: New and Unpublished Times of Minima of Eclipsing Binary Systems, *Information Bulletin on Variable Stars*, 5979, 1. (2011)
 6. Vinko, J.; Sarneczky, K.; Takats, K.; Marion, G.; Hegedues, T.; Biro, I.; Borkovits, T.; Szegedi-Elek, E.; Farkas, A.; Klagyivik, P.; Kiss, L.; Kovacs, T.; Pal, A.; **Szakáts, R.**; Szalai, N.; Szalai, T.; Szatmary, K.; Szing, A.; Vida, K. & Wheeler, J.: Testing supernovae Ia distance measurement methods with SN 2011fe, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 546, id.A12 (2012) [IF: 5,084]
 7. Kospal.; Abraham, P.; Acosta-Pulido, J.; Arevalo Morales, M.; Balog, Z.; Carnerero, M.; Szegedi-Elek, E.; Farkas, A.; Henning, T.; Kelemen, J.; Kovacs, T.; Kun, M.; Marton, G.; Meszaros, S.; Moor, A.; Pal, A.; Sarneczky, K.; **Szakáts, R.**; et al.: Exploring the circumstellar environment of the young eruptive star V2492 Cygni, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 551, id.A62, 12 pp. (2013) [IF: 4,479]
 8. Kospal.; Abraham, P.; Acosta-Pulido, J.; Dunham, M.; Garcia-Alvarez, D.; Hogerheijde, M.; Kun, M.; Moor, A.; Farkas, A.; Hajdu, G.; Hodosan, G.; Kovacs, T.; Kriskovics, L.; Marton, G.; Molnar, L.; Pal, A.; Sarneczky, K.; Sodor.; **Szakáts, R.**; et al.: Multi-wavelength study of the low-luminosity outbursting young star HBC 722, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 596, id.A52, 15 pp. (2016) [IF: 5,014]
 9. Dhungana, G.; Kehoe, R.; Vinko, J.; Silverman, J.; Wheeler, J.; Zheng, W.; Marion, G.; Fox, O.; Akerlof, C.; Biro, B.; Borkovits, T.; Cenko, S.; Clubb, K.; Filippenko, A.; Ferrante, F.; Gibson, C.; Graham, M.; Hegedus, T.; Kelly, P.; Kelemen, J.; Lee, W.; Marschalko, G.; Molnar, L.; Nagy, A.; Ordasi, A.; Pal, A.; Sarneczky, K.; Shivvers, I.; **Szakáts, R.**; et al.: Extensive Spectroscopy and Photometry of the Type IIP Supernova 2013ej, *The Astrophysical Journal*, Volume 822, Issue 1, article id. 6, pp. (2016). [IF: 5,533]
 10. Szalai, T.; Vinko, J.; Nagy, A.; Silverman, J.; Wheeler, J.; Dhungana, G.; Marion, G.; Kehoe, R.; Fox, O.; Sarneczky, K.; Marschalko, G.; Biro, B.; Borkovits, T.; Hegedues, T.; **Szakáts, R.**; et al.: The continuing story of SN Iib 2013df: new optical and IR observations and analysis, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 460, Issue 2, p.1500-1518 (2016) [IF: 4,961]
 11. Drury, J.; Murphy, S.; Derekas, A.; Sodor.; Stello, D.; Kuehn, C.; Bedding, T.; Bogнар, Z.; Szigeti, L.; **Szakáts, R.**; Sarneczky, K. & Molnar, L.: Large amplitude change

-
- in spot-induced rotational modulation of the Kepler Ap star KIC 2569073, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 471, Issue 3, p.3193-3199 (2017) [IF: 5,194]
12. Abraham, P.; Kospal.; Kun, M.; Feher, O.; Zsidi, G.; Acosta-Pulido, J.; Carnerero, M.; Garcia-Alvarez, D.; Moor, A.; Cseh, B.; Hajdu, G.; Hanyecz, O.; Kelemen, J.; Kriskovics, L.; Marton, G.; Mezo, G.; Molnar, L.; Ordasi, A.; Rodriguez-Coira, G.; Sarneczky, K.; Sodor.; **Szakáts, R.**; et al.: An UXor among FUors: Extinction-related Brightness Variations of the Young Eruptive Star V582 Aur, *The Astrophysical Journal*, Volume 853, Issue 1, article id. 28, 16 pp. (2018). [IF: 5,58]
 13. Boyajian, T.; Alonso, R.; Ammerman, A.; ... ; **Szakáts, R.**; et al.: The First Post-Kepler Brightness Dips of KIC 8462852, *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 853, Issue 1, article id. L8, 14 pp. (2018). [IF: 8,374]
 14. Prentice, S.; Ashall, C.; Mazzali, P.; ... ; **Szakáts, R.**; et al.: SN 2016coi/ASASSN-16fp: an example of residual helium in a typeIc supernova?, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 478, Issue 3, p.4162-4192 (2018) [IF: 5,231]
 15. Vinko, J.; Ordasi, A.; Szalai, T.; Sarneczky, K.; Banyai, E.; Biro, I.; Borkovits, T.; Hegedues, T.; Hodosan, G.; Kelemen, J.; Klagyivik, P.; Kriskovics, L.; Kun, E.; Marion, G.; Marschalko, G.; Molnar, L.; Nagy, A.; Pal, A.; Silverman, J.; **Szakáts, R.**; et al.: Absolute Distances to Nearby Type Ia Supernovae via Light Curve Fitting Methods, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Volume 130, Issue 988, pp. 064101 (2018). [IF: 3,47]
 16. Li, W.; Wang, X.; Vinko, J.; ... ; **Szakáts, R.**; et al.: Photometric and Spectroscopic Properties of Type Ia Supernova 2018oh with Early Excess Emission from the Kepler 2 Observations, *The Astrophysical Journal*, Volume 870, Issue 1, article id. 12, 33 pp. (2019). [IF: 5,745]
 17. Dimitriadis, G.; Foley, R.; Rest, A.; ... ; **Szakáts, R.**; et al.: K2 Observations of SN 2018oh Reveal a Two-component Rising Light Curve for a Type Ia Supernova, *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 870, Issue 1, article id. L1, 16 pp. (2019). [IF: 8,198]
 18. Zsidi, G.; Abraham, P.; Acosta-Pulido, J.; Kospal.; Kun, M.; Szabo, Z.; Bodi, A.; Cseh, B.; Castro Segura, N.; Hanyecz, O.; Ignacz, B.; Kalup, C.; Kriskovics, L.; Meszaros, L.; Ordasi, A.; Pal, A.; Sarneczky, K.; Seli, B.; Sodor. & **Szakáts, R.**: The Weakening Outburst of the Young Eruptive Star V582 Aur, *The Astrophysical Journal*, Volume 873, Issue 2, article id. 130, 6 pp. (2019). [IF: 5,745]

-
19. Szalai, T.; Vinko, J.; Koenyves-Toth, R.; Nagy, A.; Bostroem, K.; Sarneczky, K.; Brown, P.; Pejcha, O.; Bodi, A.; Cseh, B.; Csoernyei, G.; Dencs, Z.; Hanyecz, O.; Ignacz, B.; Kalup, C.; Kriskovics, L.; Ordasi, A.; Pal, A.; Seli, B.; Sodor.; **Szakáts, R.**; et al.: The Type II-P Supernova 2017eaw: From Explosion to the Nebular Phase, *The Astrophysical Journal*, Volume 876, Issue 1, article id. 19, 24 pp. (2019). [IF: 5,745]
 20. Andrews, J.; Sand, D.; Valenti, S.; ... ; **Szakáts, R.**; et al.: SN 2017gmr: An Energetic Type II-P Supernova with Asymmetries, *The Astrophysical Journal*, Volume 885, Issue 1, article id. 43, 23 pp. (2019). [IF: 5,745]
 21. Podlowska-Gaca, E.; Marciniak, A.; Ali-Lagoa, V.; Bartczak, P.; Muller, T.; **Szakáts, R.**; et al.: Physical parameters of selected Gaia mass asteroids, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 638, id.A11, 23 pp. (2020) [IF: 5,802]
 22. Konyves-Toth, R.; Vinko, J.; Ordasi, A.; Sarneczky, K.; Bodi, A.; Cseh, B.; Csornyei, G.; Dencs, Z.; Hanyecz, O.; Ignacz, B.; Kalup, C.; Kriskovics, L.; Pal, A.; Seli, B.; Sodor, A.; **Szakáts, R.**; et al.: Constraints on the Physical Properties of SNe Ia from Photometry, *The Astrophysical Journal*, Volume 892, Issue 2, id.121 (2020) [IF: 5,874]
 23. Han, X.; Zheng, W.; Stahl, B.; Burke, J.; Vinko, J.; Jaeger, T.; Arcavi, I.; Brink, T.; Cseh, B.; Hiramatsu, D.; Hosseinzadeh, G.; Howell, D.; Ignacz, B.; Konyves-Toth, R.; Krezinger, M.; McCully, C.; Ordasi, A.; Pinter, D.; Sarneczky, K.; **Szakáts, R.**; et al.: SN 2017cfd: A Normal Type Ia Supernova Discovered Very Young, *The Astrophysical Journal*, Volume 892, Issue 2, id.142 (2020) [IF: 5,874]
 24. Jacobson-Galan, W.; Margutti, R.; Kilpatrick, C.; ... ; **Szakáts, R.**; et al.: SN 2019ehk: A Double-peaked Ca-rich Transient with Luminous X-Ray Emission and Shock-ionized Spectral Features, *The Astrophysical Journal*, Volume 898, Issue 2, id.166 (2020) [IF: 5,874]
 25. Szegedi-Elek, E.; Abraham, P.; Wyrzykowski, L.; ... ; **Szakáts, R.**; et al.: Gaia 18dvy: A New FUor in the Cygnus OB3 Association, *The Astrophysical Journal*, Volume 899, Issue 2, id.130 (2020) [IF: 5,874]
 26. Zhang, J.; Wang, X.; Jozsef, V.; Zhai, Q.; Zhang, T.; Filippenko, A.; Brink, T.; Zheng, W.; Wyrzykowski, L.; Mikolajczyk, P.; Huang, F.; Rui, L.; Mo, J.; Sai, H.; Zhang, X.; Wang, H.; Derkacy, J.; Baron, E.; Sarneczky, K.; Bodi, A.; Csornyei, G.; Hanyecz, O.; Ignacz, B.; Kalup, C.; Kriskovics, L.; Konyves-Toth, R.; Ordasi, A.; Pal, A.; Sodor, A.; **Szakáts, R.**; et al.: SN 2018zd: an unusual stellar explosion as part of the diverse Type II Supernova landscape, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 498, Issue 1, pp.84-100 (2020) [IF: 5,287]

-
27. Rho, J.; Evans, A.; Geballe, T.; ... ; **Szakáts, R.**; et al.: Near-infrared and Optical Observations of Type Ic SN 2020oi and Broad-lined Type Ic SN 2020bvc: Carbon Monoxide, Dust, and High-velocity Supernova Ejecta, *The Astrophysical Journal*, Volume 908, Issue 2, id.232, 21 pp. (2021) [IF: 5,521]
 28. Xiang, D.; Wang, X.; Lin, W.; ... ; **Szakáts, R.**; et al.: The Peculiar Transient AT2018cow: A Possible Origin of a Type Ibn/IIn Supernova, *The Astrophysical Journal*, Volume 910, Issue 1, id.42, 12 pp. (2021) [IF: 5,521]
 29. Pritchard, T.; Bensch, K.; Modjaz, M.; ... ; **Szakáts, R.** & Vida, K.: The Exotic Type Ic Broad-lined Supernova SN 2018gep: Blurring the Line between Supernovae and Fast Optical Transients, *The Astrophysical Journal*, Volume 915, Issue 2, id.121, 16 pp. (2021) [IF: 5,521]
 30. Szabo, Z.; Kospal, A.; Abraham, P.; Park, S.; Siwak, M.; Green, J.; Moor, A.; Pal, A.; Acosta-Pulido, J.; Lee, J.; Cseh, B.; Csornyei, G.; Hanyecz, O.; Konyves-Toth, R.; Krezinger, M.; Kriskovics, L.; Ordasi, A.; Sarneczky, K.; Seli, B.; **Szakáts, R.**; Szing, A. & Vida, K.: A Study of the Photometric and Spectroscopic Variations of the Prototypical FU Orionis-type Star V1057 Cyg, *The Astrophysical Journal*, Volume 917, Issue 2, id.80, 35 pp. (2021) [IF: 5,521]
 31. Wang, Q.; Rest, A.; Zenati, Y.; ... ; **Szakáts, R.**; et al.: SN 2018agk: A Prototypical Type Ia Supernova with a Smooth Power-law Rise in Kepler (K2), *The Astrophysical Journal*, Volume 923, Issue 2, id.167, 22 pp. (2021) [IF: 5,521]
 32. Nagy, Z.; Szegedi-Elek, E.; Abraham, P.; Kospal, A.; Bodi, A.; Bouvier, J.; Kun, M.; Moor, A.; Cseh, B.; Farkas-Takacs, A.; Hanyecz, O.; Hodgkin, S.; Ignacz, B.; Kiss, C.; Konyves-Toth, R.; Kriskovics, L.; Marton, G.; Meszaros, L.; Ordasi, A.; Pal, A.; Sarkis, P.; Sarneczky, K.; Sodor, A.; Szabados, L.; Szabo, Z.; **Szakáts, R.**; et al.: Dipper-like variability of the Gaia alerted young star V555 Ori, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 504, Issue 1, pp.185-198 (2021) [IF: 5,235]
 33. Armstrong, P.; Tucker, B.; Rest, A.; ... ; **Szakáts, R.**; et al.: SN2017jgh: a high-cadence complete shock cooling light curve of a SN IIb with the Kepler telescope, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 507, Issue 3, pp.3125-3138 (2021) [IF: 5,235]
 34. Cruz-Saenz de Miera, F.; Kospal, A.; Abraham, P.; Park, S.; Nagy, Z.; Siwak, M.; Kun, M.; Fiorellino, E.; Szabo, Z.; Antonucci, S.; Giannini, T.; Nisini, B.; Szabados, L.; Kriskovics, L.; Ordasi, A.; **Szakáts, R.**; Vida, K.; Vinko, J.; Zielinski, P.; Wyrzykowski, L.; Garcia-Alvarez, D.; Drozd, M.; Ogloza, W. & Sonbas, E.: Recurrent Strong

-
- Outbursts of an EXor-like Young Eruptive Star Gaia20eae, *The Astrophysical Journal*, Volume 927, Issue 1, id.125, 15 pp. (2022) [IF: 4,9]
35. Szabo, Z.; Kospal, A.; Abraham, P.; ... ; **Szakáts, R.**; Sodor, A.; Szing, A.; Vida, K. & Vinko, J.: A Multi-epoch, Multiwavelength Study of the Classical FUor V1515 Cyg Approaching Quiescence, *The Astrophysical Journal*, Volume 936, Issue 1, id.64, 20 pp. (2022) [IF: 4,9]
 36. Park, S.; Kospal, A.; Abraham, P.; Cruz-Saenz de Miera, F.; Fiorellino, E.; Siwak, M.; Nagy, Z.; Giannini, T.; Carini, R.; Szabo, Z.; Lee, J.; Lee, J.; Vitali, F.; Kun, M.; Cseh, B.; Krezinger, M.; Kriskovics, L.; Ordasi, A.; Pal, A.; **Szakáts, R.**; Vida, K. & Vinko, J.: Photometric and Spectroscopic Study of the EXor-like Eruptive Young Star Gaia19fct, *The Astrophysical Journal*, Volume 941, Issue 2, id.165, 19 pp. (2022) [IF: 4,9]
 37. Gupta, R.; Gupta, S.; Chattopadhyay, T.; ... ; **Szakáts, R.**; et al.: Probing into emission mechanisms of GRB 190530A using time-resolved spectra and polarization studies: synchrotron origin?, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 511, Issue 2, pp.1694-1713 (2022) [IF: 4,8]
 38. Csoranyi, G.; Szabados, L.; Molnar, L.; Cseh, B.; Egei, N.; Kalup, C.; Kecskemethy, V.; Konyves-Toth, R.; Sarnecky, K. & **Szakáts, R.**: Study of changes in the pulsation period of 148 Galactic Cepheid variables, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 511, Issue 2, pp.2125-2146 (2022) [IF: 4,8]
 39. Moor, A.; Abraham, P.; Kospal, A.; Su, K.; Rieke, G.; Vida, K.; Cataldi, G.; Bodi, A.; Bognar, Z.; Cseh, B.; Csoranyi, G.; Egei, N.; Farkas, A.; Hanyecz, O.; Ignacz, B.; Kalup, C.; Konyves-Toth, R.; Kriskovics, L.; Meszaros, L.; Pal, A.; Ordasi, A.; Sarnecky, K.; Seli, B.; Sodor, A.; **Szakáts, R.**; Vinko, J. & Zsidi, G.: Mid-infrared time-domain study of recent dust production events in the extreme debris disc of TYC 4209-1322-1, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 516, Issue 4, pp.5684-5701 (2022) [IF: 4,8]
 40. Reddy, V.; Kelley, M.; Dotson, J.; ... ; **Szakáts, R.**; et al.: Apophis Planetary Defense Campaign, *The Planetary Science Journal*, Volume 3, Issue 5, id.123, 16 pp. (2022) [IF: 3,8]
 41. Marsset, M.; Broz, M.; Vermersch, J.; Rambaux, N.; Ferrais, M.; Viikinkoski, M.; Hanus, J.; Jehin, E.; Podlowska-Gaca, E.; Bartczak, P.; Dudzinski, G.; Carry, B.; Vernazza, P.; **Szakáts, R.**; Duffard, R.; Jones, A.; Molina, D.; Santana-Ros, T.; Benkhaldoun, Z.; Birlan, M.; Dumas, C.; Fetick, R.; Fusco, T.; Jorda, L.; Marchis, F.;

-
- Vachier, F. & Yang, B.: The equilibrium shape of (65) Cybele: primordial or relic of a large impact?, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 670, id.A52, 18 pp. (2023) [IF: 6,5]
42. Barna, B.; Nagy, A.; Bora, Z.; Czavalinga, D.; Konyves-Toth, R.; Szalai, T.; Szekely, P.; Zsiros, S.; Banhidi, D.; Biro, I.; Csanyi, I.; Kriskovics, L.; Pal, A.; Szabo, Z.; **Szakáts, R.**; Vida, K.; Bodola, Z. & Vinko, J.: Three is the magic number: Distance measurement of NGC 3147 using SN 2021hpr and its siblings, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 677, id.A183, 16 pp. (2023) [IF: 6,5]
43. Rommel, F.; Braga-Ribas, F.; Ortiz, J.; ... ; **Szakáts, R.**; et al.: A large topographic feature on the surface of the trans-Neptunian object (307261) 2002 MS_4 measured from stellar occultations, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 678, id.A167, 25 pp. (2023) [IF: 6,5]
44. Marciniak, A.; Durech, J.; Choukroun, A.; Hanus, J.; Ogloza, W.; **Szakáts, R.**; et al.: Scaling slowly rotating asteroids with stellar occultations, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 679, id.A60, 43 pp. (2023) [IF: 6,5]
45. Ertini, K.; Folatelli, G.; Martinez, L.; ... ; **Szakáts, R.**; et al.: SN 2021gno: a calcium-rich transient with double-peaked light curves, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 526, Issue 1, pp.279-298 (2023) [IF: 4,8]
46. Kiss, C.; Muller, T.; Marton, G.; **Szakáts, R.**; Pal, A.; Molnar, L.; Vilenius, E.; Rengel, M.; Ortiz, J. & Fernandez-Valenzuela, E.: The visible and thermal light curve of the large Kuiper belt object (50000) Quaoar, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 684, id.A50, 11 pp. (2024) [IF: 6,5]
47. Fiorellino, E.; Abraham, P.; Kospal, A.; Kun, M.; Alcalá, J.; Caratti o Garatti, A.; Cruz-Saenz de Miera, F.; Garcia-Alvarez, D.; Giannini, T.; Park, S.; Siwak, M.; Szilagyi, M.; Covino, E.; Marton, G.; Nagy, Z.; Nisini, B.; Marianna Szabo, Z.; Bora, Z.; Cseh, B.; Kalup, C.; Krezinger, M.; Kriskovics, L.; Ogloza, W.; Pal, A.; Sodor, A.; Sonbas, E.; **Szakáts, R.**; et al.: The enigma of Gaia18cjb: A possible rare hybrid of FUor and EXor properties, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 686, id.A160, 19 pp. (2024) [IF: 6,5]
48. Fortier, A.; Simon, A.; Broeg, C.; ... ; **Szakáts, R.**; et al.: CHEOPS in-flight performance. A comprehensive look at the first 3.5 yr of operations, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 687, id.A302, 43 pp. (2024) [IF: 6,5]
49. Yadavalli, S.; Villar, V.; Izzo, L.; ... ; **Szakáts, R.**; et al.: SN 2022oqm: A Bright and Multi-peaked Calcium-rich Transient, *The Astrophysical Journal*, Volume 972, Issue 2, id.194, 27 pp. (2024) [IF: 4,9]

-
50. Bora, Z.; Konyves-Toth, R.; Vinko, J.; Banhidi, D.; Biro, I.; Bostroem, K.; Bodi, A.; Burke, J.; Csanyi, I.; Cseh, B.; Farah, J.; Filippenko, A.; Hegedus, T.; Hiramatsu, D.; Horti-David, A.; Howell, D.; Jha, S.; Kalup, C.; Krezinger, M.; Kriskovics, L.; McCully, C.; Newsome, M.; Ordasi, A.; Gonzalez, E.; Pal, A.; Pellegrino, C.; Seli, B.; Sodor, A.; Szabo, Z.; Szabo, O.; **Szakáts, R.**; et al.: Ejecta Masses in Type Ia Supernovae—Implications for the Progenitor and the Explosion Scenario, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Volume 136, Issue 9, id.094201, 29 pp. (2024) [IF: 3,5]

Irodalomjegyzék

- Brown, M. E. & Schaller, E. L. 2007, *Science*, 316, 1585
- Delbo, M., Mueller, M., Emery, J. P., Rozitis, B., & Capria, M. T. 2015, *Asteroid Thermophysical Modeling* (University of Arizona Press), 107–128
- Durech, J., Carry, B., Delbo, M., Kaasalainen, M., & Viikinkoski, M. 2015, in *Asteroids IV* (University of Arizona Press), 183–202
- Fulchignoni, M., Belskaya, I., Barucci, M. A., de Sanctis, M. C., & Doressoundiram, A. 2008, in *The Solar System Beyond Neptune*, ed. M. A. Barucci, H. Boehnhardt, D. P. Cruikshank, A. Morbidelli, & R. Dotson (University of Arizona Press), 181
- Gladman, B. & Volk, K. 2021, *ARAA*, 59, 203
- Goldreich, P. & Soter, S. 1966, *Icarus*, 5, 375
- Harris, A. W. 1998, *Icarus*, 131, 291
- Hastings, D. M., Ragozzine, D., Fabrycky, D. C., et al. 2016, *AJ*, 152, 195
- Holler, B. J., Grundy, W. M., Buie, M. W., & Noll, K. S. 2021, *Icarus*, 355, 114130
- Lagerros, J. S. V. 1998, *A&A*, 332, 1123
- Lin, H. W., Wu, Y. L., & Ip, W. H. 2007, *Advances in Space Research*, 40, 238
- Müller, T. G., Marciniak, A., Kiss, Cs., et al. 2018, *Advances in Space Research*, 62, 2326
- Murray, C. D. & Dermott, S. F. 2000, *Solar System Dynamics* (Cambridge University Press)
- Ortiz, J. L., Sicardy, B., Camargo, J. I. B., Santos-Sanz, P., & Braga-Ribas, F. 2020, in *The Trans-Neptunian Solar System*, ed. D. Prialnik, M. A. Barucci, & L. Young (Elsevier), 413–437
- Perna, D., Barucci, M. A., Fornasier, S., et al. 2010, *A&A*, 510, A53

- Pravec, P., Harris, A. W., & Michalowski, T. 2002, in Asteroids III (University of Arizona Press), 113–122
- Rabinowitz, D. L. & Owainati, Y. 2014, in AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts, Vol. 46, AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #46, 510.07
- Roe, H. G., Pike, R. E., & Brown, M. E. 2008, *Icarus*, 198, 459
- Sicardy, B., Ortiz, J. L., Assafin, M., et al. 2011, *Nature*, 478, 493
- Snodgrass, C., Carry, B., Dumas, C., & Hainaut, O. 2010, *A&A*, 511, A72
- Spencer, J. R., Lebofsky, L. A., & Sykes, M. V. 1989, *Icarus*, 78, 337
- Szakáts, R. & Kiss, C. 2023, *PASP*, 135, 124401
- Szakáts, R., Kiss, C., Ortiz, J. L., et al. 2023, *A&A*, 669, L3
- Szakáts, R., Müller, T., Alí-Lagoa, V., et al. 2020, *A&A*, 635, A54