

KISS CSABA

INFRAVÖRÖS ŰRCSILLAGÁSZATI ÉSZLELÉSI TECHNIKÁK
ÉS ALKALMAZÁSUK NAPRENDSZERBELI KIS ÉGITESTEK
MEGFIGYELÉSÉRE

Az MTA doktori cím megszerzéséért készített értekezés tézisei

Budapest, 2016

1. A kutatások előzménye és helye a magyar csillagászatban

Az infravörös csillagászat szerepe jelentősen felértékelődött az elmúlt mintegy három évtized alatt. Az 1980-as évek közepén az IRAS műhold infravörös, különösen távoli-infravörös mérései még különlegesnek számítottak, és csak a legfényesebb égitestekre voltak elérhetőek. A mai nagy (> 4 m) földi távcsövek mindegyike rendelkezik már a közeli- és közép infravörös tartományban működő berendezésekkel, és az egymást követő infravörös űrtávcső missziókkal (ISO, Spitzer, Herschel) egyre halványabb égitestek megfigyelése vált lehetővé a távoli-infravörös tartományban is. Az infravörös csillagászat új tudományterületeket is nyitott, például lehetővé tette a csillagkeletkezés korai fázisainak tanulmányozását, a protoplanetáris- és törmelékcorongok felfedezését és megismerését, a távoli ($z \leq 1$) galaxisokban zajló csillagkeletkezés feltérképezését, és a korai galaxisok fejlődésének nyomonkövetését.

A jellemzően alacsony hőmérsékletének köszönhetően a csillagközi anyag hőmérsékleti sugárzása leginkább az infravörös tartományba esik, emiatt a csillagközi anyag az infravörös csillagászat egyik legfontosabb célpontja. Az MTA Csillagászati Kutatóintézetében, a csillagközi anyag tanulmányozásának hagyományaira alapozva, Balázs G. Lajos és Kun Mária irányításával az 1980-as évek végétől indult el az infravörös csillagászat az IRAS-műhold adatainak feldolgozásával, majd fiatal magyar kutatók részvételével európai szintű infravörös programokban (DENIS, ISO). 2001-ben alakult meg az Európai Űrhivatal és a Magyar Űrkutatási Iroda támogatásával az Ábrahám Péter¹ által vezetett infravörös csillagászati csoport, ami a jellemzően csillagközi és csillagköri anyaggal kapcsolatos tudományos témák mellett már funkcionális utókalibrációs munkákat és nagy pontosságot igénylő, különleges mérésiértékeléseket is végzett az ISO-űrtávcső ISOPHOT műszere számára. Az így keletkezett adattermékek ma is elérhetőek az ISO-űrtávcső archívumában és a virtuális obszervatóriumokban, és máig a legpontosabb kiértékelését jelentik az ISOPHOT adatainak. Ebben a munkában én is részt vettem 2001-től, az értekezés első részében ismertetett témák részben az ISOPHOT műszerrel végzett mérésekhez, illetve annak kalibrációjához kötődnek.

A 2000-es évektől az MTA Csillagászati Kutatóintézetében (illetve később az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Csillagászati Intézetében) megjelentek egyéb űrcsillagászati vonatkozású programok is, elsősorban az ESA PECS (Program for European Cooperating States) programjának támogatásával. Szabados László és csoportja a GAIA asztrometriai misszió munkáiba kapcsolódott be, Paparó Margit csoportja a CoRoT exobolygó-kutató és asztroszeizmológiai űrtávcső munkáiban, Kiss L. László csoportja pedig a CHEOPS exohold-kutató misszióban vett részt PECS támogatással. Az intézetben ugyancsak jelentős Kepler-űrtávcső csoport jött létre Szabó Róbert vezetésével.

Az ISO-űrtávcsővel kapcsolatos munkák természetes folytatása volt 2004-től a ESA Herschel infravörös és szubmilliméteres-űrtávcső programjába történő, ugyancsak PECS támogatással bekapcsolódás megvalósuló bekapcsolódás. Ez elsősorban az űrtávcső PACS kamera és spektrométer műszerének fejlesztésében és üzemeltetésében részt vett jelentette, később azonban egyéb, az űrtávcsőhöz kapcsolódó, funkcionális munkákat is. Ilyen volt a Herschel konfúziós zajt becsülő alkalmazásának feljesztése, illetve ilyen a jelenleg, az értekezés írásának időpontjában a mi vezetésünkkel készülő Herschel Pontforrás Katalógus is, ami a Herschel-misszió egyik legfontosabb öröksége lesz az elkövetkező évtizedekre. A Herschel-űrtávcsőhöz kapcsolódó témák az értekezésem részét képezik, részletesebb kifejtésük megtalálható a dolgozatban illetve a téziszűzet további részeiben. Ebben a témában Magyarországon még nem készült MTA doktori értekezés.

A Naprendszer kis égitestjeiről elsősorban üstökösökkel kapcsolatos MTA doktori értekezések születtek az elmúlt években. Tóth Imre² az ekliptikai üstökösöket vizsgálta a földi megfigyelések mellett a Hubble- és Spitzer-űrtávcsövekkel, valamint az ISO-űrtávcső ISOCAM kamerájával is. Ezek a mérések lehetővé tették üstökösök méretének, albedójának és hőtani jellemzőinek meg-

¹Ábrahám Péter: „Korongok a csillagfejlődés során: a korai anyagbefogástól az állatövi fényig”, értekezés az MTA doktori cím megszerzésért, 2007

²Tóth Imre: „Ekliptikai üstökösök fizikai tulajdonságai és eredete”, értekezés az MTA doktori cím megszerzésért, 2011

határozását, valamint a porkibocsátási ráta becslését aktív égitestek esetében. Szabó M. Gyula³ többek között a Hale-Bopp üstökös távoli aktivitását vizsgálta, és friss jégréteg kialakulását is megfigyelte az üstökös magján nagy naptávolságban.

A fenti eredmények mellett kutatócsoportunk munkája tette a hazai csillagászat egyik új, meghatározó irányává a Naprendszer kis égitestjeinek, elsősorban a Neptunuszon túli vidék objektumainak infravörös tartományban történő megfigyelését 2009-től kezdődően. A „TNOs are Cool!” Herschel nyílt kulcsprogramban végzett munkánk számos publikációt és nemzetközileg is fontos eredményt hozott, és az itt alkalmazott módszerek megalapozták az infravörös észlelési technikák alkalmazását üstökösökre és földszűrő kisbolygókra is, új kutatási irányokat nyitva. A Naprendszer kis égitestjeinek vizuálistól eltérő hullámhosszakon történő megfigyelése bekerült az egyetemi oktatásba (Kiss Csaba, ELTE TTK) és alapot jelentett diplomamunkák számára is (Takácsné Farkas Anikó, BSc diploma, 2013; MSc diploma, 2016). A Neptunuszon túli vidék kutatása szintén olyan új téma, amelyben korábban nem készült MTA doktori értekezés.

2. Célkitűzések – az értekezés témái és tudományos hátterük

Az infravörös technológia fejlődésével felszínre kerültek olyan jelenségek is, amelyek pl. a látható tartományban nem voltak jellemző velejárái a méréseknek. Az egyre érzékenyebb detektorok számára, a viszonylag kis méretű távcsövtükrök mellett, már komoly problémát jelentett a konfúziós zaj, az égi háttérforrásokból származó fotometriai bizonytalanság, amelyet hosszabb integrációs idővel sem lehetett kiküszöbölni. A konfúziós zaj ismerete és előrejelezhetősége fontossá vált az infravörös tartományban működő űrtávcsövek számára. A dolgozatomban bemutatott, távoli-infravörös csillagászathoz kapcsolódó témák közül az első rész az infravörös konfúziós zaj asztrofizikai komponenseihez kapcsolódó kutatásokat foglalja magában. Ezen munkáknak a célja az volt, hogy minél teljesebb képet kaphassunk az infravörös égi háttérről és előrejelezhetővé tegyünk a konfúziós zajt az ég eddig feltérképezetlen területein is, ezeken a hullámhosszakon. Ennek része volt a konfúziós zaj komponenseinek, a galaktikus cirrusz emisszió szerkezetének és a fővi kisbolygók hozzájárulásának vizsgálata. Az asztrofizikai komponensek előrejelezhetősége mellett alapvető fontosságú volt az infravörös űreszközök, pl. az ISO űrtávcső ISOPHOT kameráinak minél pontosabb kalibrációja is, ez alapján lehetett megfelelő becslést adni az egyéb távoli infravörös űreszközökön működő detektorok esetében várható konfúziós zajra (pl. a Herschel-űrtávcső PACS és SPIRE detektoraira).

A közelmúlt egyik legnagyobb hatású csillagászati programja az Európai Űrhivatal Herschel-űrtávcső missziója volt, amelynek aktív fázisa 2009 és 2013 között zajlott. A Herschel űrtávcső, a valaha az űrbe bocsátott legnagyobb, 3,5 m-es tükrével új fejezetet nyitott az infravörös csillagászat számtalan területén. A korábbi, elsősorban az ISO-űrtávcsőhöz kapcsolódó munkák után az MTA Csillagászati Kutatóintézetében általam vezetett csoport 2004-ben bekapcsolódott a Herschel infravörös- és szubmilliméteres-űrtávcső PACS kamera és spektrométer műszerének építésébe és üzemeltetésébe. Ezek az eszközök sikerrel működtek a misszió során és a legjelentősebb hozzájárulást adták a Herschel-űrtávcső tudományos eredményeihez. A detektorfejlesztésben, kalibrációban és a misszióhoz kapcsolódó egyéb fejlesztési feladatokban elért eredményeikkel megvalósítottuk azt a célt is, hogy a korábbiaknál magasabb szinten tudunk hozzájárulni csillagászati űrmissziók technológiai munkáihoz.

A korábbi konfúziós zaj eredmények illetve a PACS kamerák építése és kalibrációja közben szerzett tapasztalatok alapján építettem fel a Herschel-űrtávcső konfúziós zaj modelljét, amelynek célja egy tudományos értékelésen alapuló, alapvetően az égi háttér asztrofizikai komponenseit figyelembe vevő zajbecslő rendszer elkészítése volt, a mérések ideális megtervezésének érdekében. Az általam megvalósított rendszer sikerrel teljesítette ezt a feladatot és megfelelően működött a Herschel méréstervező programjának részeként a misszió teljes időtartama alatt.

A Naprendszer távoli, kis égitestjeinek fizikai tulajdonságairól keveset tudtunk az elmúlt időszakig, mivel a vizuális tartományban végzett megfigyelések a legalapvetőbb jellemzők – pl.

³Szabó M. Gyula, "Szubsztelláris égitestek naprendszerekben", értekezés az MTA doktori cím megszerzésért, 2012

méret, albedó – egyértelmű meghatározását sem tették lehetővé. A Herschel-űrtávcső új lehetőséget kínált ebben a tekintetben is, hiszen távoli infravörös detektorai éppen abban a hullámhossztartományban működtek, ahol a Naprendszer peremén, a Neptunuszon túli vidéken keringő égitestek hőszugárzásának túlnyomó részét várjuk. Dolgozatom harmadik része a Herschel-űrtávcső egyik legnagyobb kulcsprogramjához, a „TNOs are Cool!” programhoz kapcsolódik, amely elsősorban ilyen távoli kis égitestek fizikai tulajdonságainak meghatározását tűzte ki célul. A korábbi konfúziós zaj vizsgálata során szerzett tapasztalatokra építve olyan megfigyelési stratégiákat és adatkiértékelési módszereket dolgoztam ki, amelyeket sikerrel tudtunk alkalmazni naprendszerbeli égitestek megfigyelésére a Herschel űrtávcső PACS kamerájával. A dolgozat harmadik része olyan eredményeket mutat be, amelyeknél az észlelésekhez ezt az optimalizált megfigyelési és adatkiértékelési módszert sikerrel alkalmaztam. Az eredmények jelentős része közvetlenül kapcsolódik a „TNOs are Cool!” Herschel nyitott kulcsprogramhoz, amelynek keretében összesen mintegy 20 cikket publikáltunk a 2009-2015 közötti időszakban. Ezek az eredmények jelentősen hozzájárultak a Neptunuszon túli égitestek fizikai tulajdonságainak megismeréséhez, és fejlődésük megértéséhez. A kulcsprogram eredményei mellett ugyanezen technikákat sikerrel használtam egyéb naprendszerbeli égitestek, pl. a Siding Spring üstökös, földszűrő kisbolygók, illetve a Nereida Neptunusz-hold megfigyeléseire, és ezen égitestek fizikai jellemzésére. Az itt kifejlesztett technikák alkalmazhatóak lesznek majd a későbbi infravörös űrmissziók, pl. a James Webb-űrtávcső és a SPICA-űrtávcső naprendszeres mérései esetében is.

3. A kutatás módszerei és eszközei

Az értekezésben bemutatott eredmények alapvetően két űrtávcsőhöz, az Európai Űrügynökség ISO és Herschel-űrtávcsöveihez kapcsolódnak. Ezek az űrtávcsövek és műszereik mind technológiai mind tudományos értelemben a csillagászat számára elérhető csúcsszínvonalat képviselték a 2000-es évek környékén az ISO, illetve a 2010-es évek elején a Herschel esetében. Az ISO űrtávcsővel végzett vizsgálatoknál a munka fontos részét jelentette a műszerek repülés utáni kalibrációja, ami jelentős részben saját magam, illetve a dolgozatban ismertetett kutatásokban részt vevő kollégáim végeztek el. Mivel a vizsgálatokba a 2000-es évek elején, az ISO repülése után kapcsolódtam be, az itt felhasznált adatok korábbi, archív mérésekből származtak, amelyeket az új kalibrációs módszerekkel újraértékeltem a tudományos vizsgálatokhoz. Az egyéb felhasznált adatok (pl. a COBE műhold DIRBE műszerének mérései) publikus adatbázisokból származnak és felhasználásukhoz saját fejlesztésű kódok készültek.

A Herschel konfúziós zaj modell teljes mértékben saját fejlesztés, amelyhez hasonló alkalmazás korábban nem állt rendelkezésre.

A Herschel űrtávcsőhöz kapcsolódó tudományos vizsgálatok esetében az adatok jelentős része a „TNOs are Cool!: A Survey of the trans-Neptunian region” nyílt kulcsprogramhoz kapcsolódott, amelynek a kezdetektől fogva résztvevője voltam, illetve amelyben később az adatkiértékelést irányítottam. Mint ahogyan az az értekezésben részletesen bemutatásra kerül, ehhez a programhoz mérési stratégiát és kiértékelő programkörnyezetet fejlesztettem kollégáimmal, amely a mai napig a Naprendszer kis égitestjeinek legfontosabb kiértékelési módszerét jelenti a Herschel-űrtávcső PACS kamerájával készült mérések esetében. A kulcsprogram mérései mellett több alkalommal kértünk és kapunk DDT (director’s discretionary time) méréseket bizonyos fontos célpontokra (Siding Spring üstökös, 2012 DR₃₀, 2013 AZ₆₀, Apophis).

A saját magam és csoportom által kidolgozott megfigyelési és adatkiértékelési módszereken kívül a Naprendszer kis égitestjeinek infravörös tartományban történő vizsgálatánál az általánosan alkalmazott radiometriai módszereket (Near-Earth Asteroid Thermal Model illetve termofizikai modellek) használtunk saját magunk által írt kódokkal. A Siding Spring üstökös esetében a kóma termális emissziójának modellezéséhez készült kód szintén teljes egészében saját fejlesztés. Az égitestek dinamikai tulajdonságainak modellezésére szabadon hozzáférhető dinamikai kódokat használtunk fel.

4. Új tudományos eredmények

Az új tudományos eredményeket az értekezés tézispontjaiként foglalom össze a következőkben (a „T”-vel jelölt és sorszámozott tézispontokhoz tartozó, „P”-vel jelölt publikációkat a következő fejezet sorolja fel).

Infravörös űreszközök konfúziós zaj becslése és a felületi fényesség kalibrációja

T-1 Az ISO űrtávcső ISOPHOT műszerével végzett mérések alapján 13 cirrusz területen vizsgáltam meg a csillagközi anyag szerkezetét, és származtattam a Fourier teljesítményspektrum meredekségi paraméterét, a korábbiaknál pontosabb zajbecslés mellett. Részletes elemzésben vizsgáltam meg, hogy melyek azok a hatások, amelyek befolyásolják a teljesítményspektrumot. Az infravörös ég leghalványabb területein, hullámhossztól függetlenül, a cirruszra $\alpha = -2,3 \pm 0,6$ spektrális meredekség mérhető, ennek ismerete fontos a cirrusz emisszió és a kozmikus infravörös háttér fluktuációinak megfelelő szeparációjához. [P-1]

T-2 Véglegesítettem az ISO űrtávcső ISOPHOT C100 és C200 detektorainak abszolút felületi fényesség kalibrációját a lehetséges szennyező forrásokra történő korrekcióval, illetve a belső kalibrációs források és a pontforrás-leképezési függvény újrakalibrációjával. Az így létrehozott kiértékelő program verzió (PIA11.3) lehetővé tette az kozmikus infravörös háttér meghatározását a 90–180 μm -es hullámhossztartományban. A kozmikus infravörös háttér értékére 90 μm -en egy $2,3 \text{ MJy sr}^{-1}$ -s 2σ felső korlát volt megállapítható, 150 és 180 μm között a háttér értéke $1,08 \pm 0,32 \pm 0,30 \text{ MJy sr}^{-1}$ -nek adódott. A COBE/DIRBE és az ISOPHOT abszolút felületi fényesség fotometriai rendszerek összehasonlítása megmutatta, hogy a két fotometriai rendszer legfeljebb 9%-os eltérésen belül ekvivalens a 90–200 μm -es hullámhosszakon, és a két fotometriai rendszer egyedi kalibrációs bizonytalansága hasonló, az ISOPHOT rendszeré a vizsgált hullámhosszakon 10% alatt van. [P-2,P-3]

T-3 Elkészítettem a ISO űrtávcső ISOPHOT műszere fotometriai módban használt távoli-infravörös detektorainak (C100, C200, P3) részletes konfúziós zaj analízisét, minden releváns mérési konfigurációra és megfigyelési módra, a $90 \leq \lambda \leq 200 \mu\text{m}$ hullámhossztartományban. Ezen eredmények alapján cirruszkonfúziós becslést adtam a Spitzer-űrtávcső MIPS, az Akari-űrtávcső FIS és a Herschel-űrtávcső PACS műszerének fotometriai módjaira a felbontási határon. Az eredményeket később közvetlenül felhasználtam a Herschel-űrtávcső konfúziós zajt becslő alkalmazásának létrehozásában. [P-4]

T-4 A Statisztikus Aszteroida Modellre (SAM) építve létrehoztam ezen modell infravörös hullámhosszakra kiterjesztett változatát az 5–1000 μm -es hullámhosszakra, és ennek alapján megbecsültem a főövi kisbolygók hatását az ebben a hullámhossztartományban működő infravörös földi és űreszközök konfúziós zajára és a forrásszámlálások eredményeire. Az eredmények alapján a közép infravörös űreszközök (Spitzer/MIPS 24 μm , Akari/FIS 18 μm) méréseit jelentősen befolyásolja a kisbolygók termális emissziója az ég bizonyos területein, elsősorban az ekliptika közelében, ugyanakkor a kisbolygó konfúzió hatása elhanyagolhatónak adódott pl. a Herschel-űrtávcső PACS kamerájának méréseire. Az ekliptika közelében a halvány kisbolygók fényéből összeadódó térbeli fluktuációk lehetnek felelősek az állatövi fényben látott egyenetlenségek jelentős részéért. [P-5]

Magyar hozzájárulás az ESA Herschel-űrtávcső programjához

T-5 Létrehoztam és vezettem az MTA Csillagászati Kutatóintézetében 2004-től, illetve az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Csillagászati Intézetében 2012-től működő Herschel-csoportot, amely aktívan részt vett a Herschel-űrtávcső

PACS kamera és spektrométer műszerének megalkotásában illetve annak üzemeltetésében a misszió aktív időtartama alatt. A PACS berendezés az űrtávcső legsikeresebb műszere volt, amellyel a legtöbb mérést végezték, és amelynek használatával a legtöbb tudományos publikáció született. Munkatársaimmal közösen végzett munkámmal elsősorban a detektorok földi, laboratóriumi, majd pedig azok repülés közbeni tesztjeivel, kalibrációjával, a detektorok viselkedésének monitorozásával járultam hozzá a program sikeréhez [P-6,P-7]

T-6 Megalkottam a Herschel-űrtávcső konfúziós zaj becslő alkalmazását, amely az HSPOT méréstervező programba került beépítésre. A konfúziós zaj becslő algoritmus a misszió teljes élettartama alatt működött, és segítette a méréstervezést, illetve a távcsőidő-kérelmek elbírálását. A kezdeti becslésekhez képest a Herschel misszió korai fázisában kapott eredmények alapján új kozmikus infravörös háttér értékekkel és módosított cirruszkonfúziós zaj korrekciókkal módosítottam az alkalmazást két nagyobb frissítés alkalmával. [P-8,P-9,P-10]

A Naprendszer kis égitestjeinek tulajdonságai távoli-infravörös mérések alapján

T-7 A "TNOs are Cool!" Herschel-kulcsprogramhoz megfigyelési technikákat és adatkiértékelő környezetet fejlesztettem a PACS kamera fotometriai méréseire, amelyek sikerrel kerültek alkalmazásra mintegy 140 Neptunuszon túli égitest megfigyelési esetében. A kifejlesztett módszerekkel kiküszöbölhetővé vált a háttér hatása, így minden eddiginél halványabb objektumokat figyelhettünk meg a távoli-infravörös hullámhosszokon. A „TNOs are Cool!” adatkiértékelési környezet fejlesztése során kidolgozott technikák és algoritmusok jelentős része később átkerült a Herschel/PACS standard adatkiértékelő környezetébe is. Az itt kifejlesztett technikák és algoritmusok alkalmazhatóak voltak egyéb naprendszerbeli források, pl. üstökösök vagy földsúroló kisbolygók távoli-infravörös megfigyelésére is. [P-11]

T-8 A Herschel-űrtávcsővel végzett megfigyelésekkel meghatároztam 44 klasszikus Kuiper-övbéli égitest termális infravörös fluxusait, amelyből ezen égitestek alapvető fizikai tulajdonságai, méretük, albedójuk és a felszínük termális paraméterei is meghatározhatóvá váltak. Az ezekből kapott elfogultság-korrigált méreteloszlások jelentősen eltérnek a dinamikailag hideg és forró klasszikus égitestek esetében, a két eloszlás közötti különbség a két csoport eltérő ütközési fejlődésére utal. Ezzel első alkalommal sikerült valódi megfigyelések alapján megbízható méreteloszlásokat származtatni egy törmelékkorongban. [P-12,P-13]

T-9 A Herschel űrtávcső „TNOs are Cool!” kulcsprogramjának eredményei alapján két eltérő felszíntípust azonosítottam kollégáimmal a Neptunuszon túli közepes méretű égitestek populációiban. A színek és albedók alapján a Neptunuszon túli vidék égitestjei egy vörös, nagy albedójú és egy sötét felszínű, semleges színű (szürke) csoportot alkotnak. Minden olyan égitest, ami dinamikailag stabil pályákon kering a klasszikus Kuiper-övben vagy ennél távolabb, a fényes-vörös csoporthoz tartozik, ami a csoport felszíni összetételbeli eredetére utal. Ezek az égitestek valószínűleg távolabb keletkeztek a Naptól, mint a másik csoport objektumai, ami arra utal, hogy létezett egy összetételbeli különbség a külső és a belső (<20 CSE) vidékek között a korai Naprendszerben. [P-14]

T-10 Infravörös és látható tartománybeli mérésekkel vizsgáltam két, újonnan felfedezett, extrém pályákon mozgó égitestet, a 2012 DR₃₀-at és a 2013 AZ₆₀-at, amelyek üstökösszerű pályájuk ellenére nem mutattak aktivitást. A dinamikai analízis szerint mindkét égitest csak nemrégiben kerülhetett mai pályájára az Oort-felhőből, és nagy a valószínűsége annak, hogy néhány százezer éven belül kilökődnek a Naprendszerből. Az az extrém kentaur csoport, amelynek a 2012 DR₃₀ és a 2013 AZ₆₀ is tagjai, nagyon sok információt hordozhat a Naprendszer korai állapotáról, és arról is, hogy milyen potenciális veszélyt jelenthetnek az ebbe a csoportba tartozó égitestek a Földre. A 2012 DR₃₀ ~185 km-es méretével az

- öt legnagyobb kentaur között van, és átmeneti objektum lehet a Neptunuszon túli égitestek Lacerda-féle vörös-fényes és sötét-semleges csoportjai között. A 2013 AZ₆₀ a termális mérések szerint meglepően nagy, $\sim 50 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1/2} \text{ K}^{-1}$ hőtehetlenséggel, és nagyon alacsony, kb. 2,9% a geometriai albedóval rendelkezik – jelenleg ez a legsötétebb felszínű égitest, amit a kentaurok között és a Neptunuszon túli vidéken ismerünk. [P-15,P-16]
- T-11 **A Herschel-űrtávcső méréseire alapozva részletes porkibocsátási modellt dolgoztam ki a C/2013 A1 (Siding Spring) üstökösre.** Az üstökös a megfigyelések időpontjában, 6,48 CSE naptávolságban már egyértelműen aktív volt, a kóma mintegy 50000 km távolsáig követhető volt az infravörös-térképeken. Ugyanezen mérésekből megbecsülhető volt a kóma portömege és a porkibocsátás üteme is, a részletes pormodell pedig megmutatta, hogy a távoli-infravörös emissziót leginkább a nagy porszemcsék okozzák, ezek a poreloszlásban a várt aránynál jóval nagyobb számban fordulnak elő. A pormodell szerint az aktivitás 6 hónappal a Herschel-megfigyelések előtt kezdődhetett, kb. 8 CSE naptávolságban. [P-17]
- T-12 **A Herschel-űrtávcső méréseit földi megfigyelésekkel kiegészítve vizsgáltam a (308635) 2005 YU₅₅ és a (99942) Apophis potenciálisan veszélyes földsúroló kisbolygókat.** Mindkét égitestre részletes termofizikai modell készült, amelyek alapján az eddigieknél pontosabb becslést lehetett adni a kisbolygók méretére és a felszín termális tulajdonságaira. Az új eredmények szerint az Apophis tömege $4,4\text{--}6,2 \cdot 10^{10}$ kg, ami 2-3-szor akkora, mint a korábbi becslések, így lényegesen módosíthatja az erre az aszteroidára kidolgozott becsapódási forgatókönyveket is. A 2005 YU₅₅ felszíne a termális emisszió alapján nagyon hasonlít az Itokawa kisbolygóéra, azaz a felszín alacsony hővezetésű, finom regolit borítja, amibe nagyméretű és nagy hőtehetlenségű sziklák ágyazódnak be. [P-18,P-19]
- T-13 **Részletesen vizsgáltam a Nereida nevű irreguláris Neptunusz-holdat a Kepler-űrtávcső K2 missziójának 3. kampányában végzett mérésekkel, valamint a Herschel- és Spitzer-archívumokban talált infravörös adatok segítségével.** A korábbi mérésekkel ellentétben egyértelmű $\sim 11,59$ órás forgási periódust sikerült meghatározni – ennek a periódusnak a hasonlósága néhány korábbi periódushoz egyértelműen azt mutatta, hogy a Nereida ma alacsony fényváltozás-amplitúdójú állapotban van, de valószínűleg nagyobb amplitúdójú fényváltozásokat mutatott néhány évtizeddel ezelőtt. A mérések alapján a Nereida nem lehet nagyon elnyúlt, az eredmények kizárják a korábban feltételezett 1:1,9 tengelyarányt, így a Nereida fényváltozásait nem okozhatja a forgástengely árapály erői miatt fellépő gyors precessiója. A termális emisszió alapján a Nereida aktuális tengelyaránya közel van a fényességváltozásokból kapott maximális 1:1,3 arányhoz, és felszíne nagyon sűrűn kráterezett, a hold nagyon hasonló lehet a Szaturnusz Hyperion nevű holdjához. [P-20]

5. A tézisekhez kapcsolódó publikációk

- P-1 **Kiss, Cs.**; Ábrahám, P.; Klaas, U.; Lemke, D.; Héraudeau, Ph.; del Burgo, C.; Herbstmeier, U., Small-scale structure of the galactic cirrus emission, 2003, A&A, 399, 177
- P-2 **Kiss, Cs.**, Ábrahám, P., Laureijs, R. J., Moór, A., Birkmann, S. M., Constraints on the nature of dust particles by infrared observations, 2006, MNRAS, 373, 1213
- P-3 Juvela, M., Mattila, K., Lemke, D., Klaas, U., Leinert, C. & **Kiss, Cs.**, Determination of the cosmic far-infrared background level with the ISOPHOT instrument, 2009, A&A, 500, 763
- P-4 **Kiss, Cs.**, Klaas, U., Lemke, D., Determination of confusion noise for far-infrared measurements, 2005, A&A, 430, 343
- P-5 **Kiss, Cs.**, Pál, A., Müller, T.G., Ábrahám, P., The impact of main belt asteroids on infrared-submillimetre photometry and source counts, 2008, A&A, 478, 605
- P-6 Poglitsch, A.; Waelkens, C.; Geis, N.; Feuchtgruber, H.; Vandenbussche, B.; Rodriguez, L.; Krause, O.; Renotte, E.; van Hoof, C.; Saraceno, P.; Cepa, J.; Kerschbaum, F.; Agnèse, P.; Ali, B.;

- Altieri, B.; Andreani, P.; Augeres, J.-L.; Balog, Z.; Barl, L.; Bauer, O. H.; Belbachir, N.; Benedettini, M.; Billot, N.; Boulade, O.; Bischof, H.; Blommaert, J.; Callut, E.; Cara, C.; Cerulli, R.; Cesarsky, D.; Contursi, A.; Creten, Y.; De Meester, W.; Doublier, V.; Doumayrou, E.; Duband, L.; Exter, K.; Genzel, R.; Gillis, J.-M.; Grözinger, U.; Henning, T.; Herreros, J.; Huygen, R.; Inguscio, M.; Jakob, G.; Jamar, C.; Jean, C.; de Jong, J.; Katterloher, R.; **Kiss, Cs.**; Klaas, U.; Lemke, D.; Lutz, D.; Madden, S.; Marquet, B.; Martignac, J.; Mazy, A.; Merken, P.; Montfort, F.; Morbidelli, L.; Müller, T.; Nielbock, M.; Okumura, K.; Orfei, R.; Ottensamer, R.; Pezzuto, S.; Popesso, P.; Putzeys, J.; Regibo, S.; Reveret, V.; Royer, P.; Sauvage, M.; Schreiber, J.; Stegmaier, J.; Schmitt, D.; Schubert, J.; Sturm, E.; Thiel, M.; Tofani, G.; Vavrek, R.; Wetzstein, M.; Wieprecht, E.; Wiezorrek, E., 2010, *The Photodetector Array Camera and Spectrometer (PACS) on the Herschel Space Observatory*, *Astronomy & Astrophysics*, 518, L2
- P-7 Billot, N., Sauvage, M., Rodriguez, L., Horeau, B., **Kiss, Cs.**, Aussel, H., Okumura, K., Boulade, O., Altieri, B., Poglitsch, A., Agnèse, P., CEA bolometer arrays: the first year in space, 2010, *SPIE* 7741, 774102
- P-8 **Kiss, Cs.**, 2007, *The Herschel Confusion Noise Estimator Science Implementation Document*, *HERSCHEL-HSC-DOC-0886*
- P-9 **Kiss, Cs.**, Vavrek, R., 2007, *Herschel Confusion Noise Estimator update patch v015*, *HERSCHEL-HSC-MEM-0925*
- P-10 **Kiss, Cs.**, Vavrek, R., Ali, B., 2010, *Herschel Confusion Noise Estimator update patch v019*, *HERSCHEL-HSC-DOC-1678*
- P-11 **Kiss, Cs.**, Müller, T.G., Vilenius, E.; Pál, A.; Santos-Sanz, P.; Lellouch, E.; Marton, G.; Verebelyi, E.; Szalai, N.; Hartogh, P.; Stansberry, J.; Henry, F.; Delsanti, A., *Optimized Herschel/PACS photometer observing and data reduction strategies for moving solar system targets*, 2014, *Experimental Astronomy*, 37, 161
- P-12 Vilenius, E., **Kiss, Cs.**, Müller, T.G.; Santos-Sanz, P.; Pal, A.; Stansberry, J.; Mueller, M.; Peixinho, N.; Fornasier, S.; Lellouch, E.; Delsanti, A.; Thirouin, A.; Ortiz, J. L.; Duffard, R.; Perna, D.; Szalai, N.; Protopapa, S.; Henry, F.; Hestroffer, D.; Rengel, M.; Dotto, E.; Hartogh, P., „TNOs are Cool”: A survey of the trans-Neptunian region. VI. Herschel/PACS observations and thermal modeling of 19 classical Kuiper belt objects, 2012, *A&A*, 541, A94
- P-13 Vilenius, E., **Kiss, Cs.**, Müller, T.G.; Mommert, M.; Santos-Sanz, P.; Pál, A.; Stansberry, J.; Mueller, M.; Peixinho, N.; Lellouch, E.; Fornasier, S.; Delsanti, A.; Thirouin, A.; Ortiz, J. L.; Duffard, R.; Perna, D.; Henry, F., „TNOs are Cool”: A survey of the trans-Neptunian region. X. Analysis of classical Kuiper belt objects from Herschel and Spitzer observations, 2014, *A&A*, 564, A35
- P-14 Lacerda, P., Fornasier, S., Lellouch, E., **Kiss, Cs.**; Vilenius, E.; Santos-Sanz, P.; Rengel, M.; Müller, T.; Stansberry, J.; Duffard, R.; Delsanti, A.; Guilbert-Lepoutre, A., *The Albedo-Color Diversity of Transneptunian Objects*, 2014, *ApJ*, 793, L2
- P-15 **Kiss, Cs.**, Szabó, Gy., Horner, J., Conn, B.C.; Müller, T.G.; Vilenius, E.; Sárneczky, K.; Kiss, L.L.; Bannister, M.; Bayliss, D.; Pál, A.; Góbi, S.; Verebelyi, E.; Lellouch, E.; Santos-Sanz, P.; Ortiz, J.-L.; Duffard, R.; Morales, N., *A portrait of the extreme solar system object 2012 DR₃₀*, 2013, *A&A*, 555, A3
- P-16 Pál, A., **Kiss, Cs.**, Horner, J., Szakáts, R.; Vilenius, E.; Müller, T.G.; Acosta-Pulido, J.; Licandro, J.; Cabrera-Lavers, A.; Sárneczky, K.; Szabó, Gy. M.; Thirouin, A.; Sipőcz, B.; Dózsa, Á.; Duffard, R., *Physical properties of the extreme Centaur and super-comet candidate 2013 AZ₆₀*, 2015, *A&A*, 583, A93
- P-17 **Kiss, Cs.**, Müller, T.G., Kidger, M., Mattisson, P., Marton, G., *Comet C/2013 A1 (Siding Spring) as seen with the Herschel Space Observatory*, 2015, *A&A*, 574, L3
- P-18 Müller, T.G., Miyata, T., **Kiss, Cs.**; Gurwell, M. A.; Hasegawa, S.; Vilenius, E.; Sako, S.; Kamizuka, T.; Nakamura, T.; Asano, K.; Uchiyama, M.; Konishi, M.; Yoneda, M.; Ootsubo, T.; Usui, F.; Yoshii, Y.; Kidger, M.; Altieri, B.; Lorente, R.; Pál, A.; O'Rourke, L.; Metcalfe,

- L., Physical properties of asteroid 308635 (2005 YU₅₅) derived from multi-instrument infrared observations during a very close Earth approach, 2013, A&A, 558, A97
- P-19 Müller, T.G., **Kiss, Cs.**, Schreich, P.; Pravec, P.; O'Rourke, L.; Vilenius, E.; Altieri, B., Thermal infrared observations of asteroid (99942) Apophis with Herschel, 2014, A&A, 566, A22
- P-20 **Kiss, Cs.**; Pál, A., Farkas-Takács, A.I., Szabó, G.M.; Szabó, R.; Kiss, L. L.; Molnár, L.; Sárneczky, K.; Müller, T. G.; Mommert, M.; Stansberry, J., Nereid from space: rotation, size and shape analysis from K2, Herschel and Spitzer observations, 2016, MNRAS, 457, 2908