

dc_107_10

Tóth Imre

Az ekliptikai üstökösök fizikai tulajdonságai és eredete

Az MTA doktora cím megszerzéséért készített
értekezés tézisei

Magyar Tudományos Akadémia
Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete

Budapest

2011

dc_107_10

A kutatási téma előzményei és a kitűzött feladatok

Még jóval az űreszközök megjelenése előtt a csillagászati kutatások világitottak rá arra, hogy a Naprendszer kis égitesteinek tanulmányozása alapvetően fontos a Naprendszer kialakulása és fejlődése megértése szempontjából. A kis égitestek közül is az égitestek eredeti kémiai összetételét és szerkezetét megváltoztató átalakulásokon át nem esett, egyszerű felépítésű *primitív*, őseredeti *primordiális* kis égitestek különösen fontosak a Naprendszer kialakulási körülményeinek megismerésében, mert ezek a bolygórendszerünk kialakuláskori maradékanyagok, amelyek belsejükben nagyrészt még szinte érintetlenül megőrizték a képződésükkor az ősi Naprendszerben végbement fizikai és kémiai folyamatok lenyomatát. Ilyen egyszerű felépítésű, őseredeti kis égitestek az üstökösök, kentaurok, transzneptun-objektumok, az üstökösaktivitást mutató fő-öbéli kisbolygók, valamint az egyszerű felépítésű aszteroidák. Ezek közül is a legfontosabbak az üstökösök.

Egy üstökös tömegének legnagyobb része a kis méretű üstökösmagban koncentrálódik. Bármennyire is parányi ez a kis égitest, de tudományos szempontból mégis a legfontosabb, ugyanis ennek legnagyobb része azonos kémiai összetételű és szerkezetű a Naprendszer ősködének külső régióiban kialakult ősi kis égitestekével. Az üstökösmagok kutatása tehát bolygórendszerünk kialakulásának megértése szempontjából alapvető jelentőségű, sőt fontos ismereteket adhat más csillagok körüli bolygórendszerek (extraszoláris bolygórendszerek) kialakulásának megértéséhez is.

Annak ellenére, hogy már több üstököst űrszondák közelről is tanulmányoztak, illetve nagy földi és űrtávcsövekkel is megfigyeljük az üstökösöket és a hozzájuk fizikailag sok tekintetben hasonló és lehetséges evolúciós kapcsolatban levő kis- és törpebolygókat, még ma is elég keveset tudunk ezekről a parányi, de alapvetően fontos égitestekről. Nem ismerjük a méretüket, méreteloszlásukat, alakjukat, tengelyforgási paramétereiket, azaz egyszerű vagy összetett forgómozgást végeznek-e, mekkora a forgási periódusuk és van-e annak valamilyen időbeli változása, milyen a forgástengely térbeli iránya. Kérdés továbbá, hogy mekkora a mag felületi fényvisszaverő képessége, milyenek a fázisfüggvény paraméterei, színe, hővezetőképessége, hőtehetetlensége, aktivitási mechanizmusai, hogyan megy végbe az eróziója, mik lehetnek az üstökösök kitörésének és váratlan nagy mértékű tömegvesztésének okai, illetve a test részleges vagy teljes szétesésének mi a magyarázata. Az üstökösök és az egyszerű felépítésű aszteroidák kutatása tehát fontos és ma különösen időszerű.

Hosszú ideig egyszerűen nem volt elegendő megfigyelési anyag az üstökösök magjáról. Egy üstökösomagról, a Halley-üstökös magjáról az első közeli képfelvételeket három űrszonda (VEGA 1, 2 és Giotto) készítette 1986-ban. Az üstökösök magját közeli tanulmányozó űrszondák eredményei alapján ma már feltűnő az üstökösomagok diverzitása, ami ezeknek a kis égitestek méretének széles skálájában is megnyilvánul: méretük a kilométer alattitól a tíz kilométeresig terjed, továbbá alakjuk és felszíni morfológiájuk is rendkívül sokféle. Ezt mutatja, hogy az eddigi in-situ űreszközökkel megfigyelt legkisebb üstökösomag (103P/Hartley 2), valamint a legnagyobbak (1P/Halley, 9P/Tempel 1 és 19P/Borrelly) mérete és alakja közötti nagy különbség igen szembeeső.

Résztvettem a VEGA űrszondák fedélzeti televíziós képfelvevő rendszerének kifejlesztésében, földi optikai kalibrációjában, illetve a Halley-üstökös magjáról és közvetlen közeli kómájáról 1986-ban készített képfelvétel tudományos kiértékelésében. Ezután merült fel bennem, hogy érdemes lenne további üstökösomagokat csillagászati megfigyelésekkel vizsgálni, mert nyilvánvaló volt, hogy az üstökösomagok fizikai tulajdonságainak megismerése területén még sok a tennivaló és még sok nyitott kérdés vár megválaszolásra. Ez az ismerethiány motiválta az 1990-es évek elején kezdődött, az üstökösomagok részletes, átfogó űrcsillagászati megfigyelő eszközökkel történő kutatásaim. A disszertáció is részben az üstökösomagok fizikai tulajdonságainak megismerését tűzi ki célul sok objektum űrteleszkópokkal történő csillagászati megfigyelése által ([1] – [23]).

Egy másik kutatási szál az üstökösök és bizonyos kisbolygók közötti fejlődési kapcsolat meglétének kiderítésére irányuló vizsgálatok folytak és folynak ma is. Ehhez kapcsolódik a disszertáció másik tudományos célkitűzése, a Naprendszer üstökösei egyik típusának, az ekliptikai üstökösök¹ eredetének tisztázása csillagászati megfigyelési adatok alapján ([10], [22]). Ugyanis az üstökösök vizsgálata mellett a Naprendszer többi kis égiteste, a kisbolygóknak a bolygórendszerünk kialakulása és fejlődésében betöltött szerepének kutatása is előtérbe került. Kiderült, hogy az üstökösök egy részének, nevezetesen az ekliptikai üstökösöknek, bizonyos egyszerű felépítésű aszteroidák lehetnek az ősei, illetve az üstökösök por- és gázkibocsátási aktivitásának megszűnése után bizonyos típusú kisbolygóként élnek tovább. Azonban korábban ezt az evolúciós kapcsolatot alapvetően égi mechanikai módszerekkel, a kis égitestek mozgásának hosszú időtartamú végigkövetésével vizsgálták és csak kisebb részben az üstökösök és a velük kapcsolatos kisbolygók

¹Ekliptikai üstökösök azok, amelyek Jupiterre vonatkoztatott T_J Tisserand-paramétere $2 < T_J < 3$, valamint definíció szerint a 2P/Encke-üstökös is.

fizikai tulajdonságainak vizsgálatára alapozták ezen kis egyszerű felépítésű égitestek közötti szorosabb kapcsolat meglétét. A Kuiper-öv megfigyelésekkel történt felfedezése után ugyanis felmerült, hogy az ősi Naprendszernek ez a vidéke is a kis égitestek egymással való gyakori ütközésének színtere volt és az évmilliárdokat átfogó égi mechanikai szimulációk az ekliptikai üstökösök folyamatos utánpótlását mutatják a transzneptun-régióból. A kérdés az, hogy az erről a forrásvidékről származó üstökösök a régmúlt ütközések termékei vagy eleve nagyobb méretűvé össze nem állt és kis méretűnek maradt, tehát az eredeti kis méretüket is megőrzött őseredeti égitestek. A disszertációban az ekliptikai üstökösök méretének meghatározását és ezeknek a kis égitesteknek a méreteloszlását vizsgáltam, illetve fizikai tulajdonságuk, a megfigyelt színük közötti statisztikai összefüggések vizsgálata alapján megkerestem a lehetséges forrásvidékeiket a külső Naprendszerben.

Már korábbi égi mechanikai vizsgálatok, valamint a D/Shoemaker-Levy 9 üstökös példája is rámutattak arra, hogy az ekliptikai üstökösöknek nemcsak a Neptunuszon-túli övezetben, hanem a kisbolygók fő-övében is lehetnek forrásvidékei. Felmerült, hogy a fő kisbolygó-övezet Hilda-zónájában is érdemes lenne a pályájuk alapján valószínűsíthető üstökösöket keresni egyszerűbb égi mechanikai módszerekkel.

Az üstökösök fizikai tulajdonságainak vizsgálatát illetően is új eredményeket ismertet a disszertáció. A fő kisbolygó övezet üstökösei közé tartozó és ma még kevésbé ismert 133P/Elst-Pizarro aktivitásának lehetséges okait és előfordulási időszakait tanulmányoztam és vizsgáltam a kisbolygó forgástengelyének lehetséges térbeli irányát is ([25], [30]). Vizsgáltam azt is, hogyan függ össze a megfigyelésekből meghatározott üstökösök méret és tengely körüli forgási periódus az üstökösök belső szerkezeti összetartó erőnek és anyagi összetételének, szerkezetének és rugalmasságtani paramétereinek behatárolására ([32], [34]).

A disszertációban ismertetett tudományos kutatás célkitűzéseinek összefoglalása a következő:

1. Minél több ekliptikai üstökös magjának fizikai tulajdonságának, méret, alak, tengely körüli forgási periódus, felületi fényvisszaverőképesség (albedó), színindexek, fázisfüggvény meghatározása.
2. Az ekliptikai üstökösök eredetének, őseredeti típusainak, Naprendszerbeli forrásvidékeinek azonosítása az üstökösök erre alkalmas megfigyelésekből meghatározott fizikai paramétereinek felhasználásával matematikai statisztikai módszerek alkalmazásával.

3. Milyen kapcsolatban lehetnek a fő kisbolygó-öv üstökösei az ekliptikai üstökösökkel – e célból két kis égitest-csoportnak a vizsgálatával foglalkoztam: 1) az ekliptikai üstökösök egy lehetséges forrásvidékének, a fő kisbolygó-öv külső vidékén lévő Hilda-zóna tanulmányozásával, a Hilda-zóna lehetséges kvázi-ekliptikai üstököseinek azonosításával égi mechanikai módszerekkel; 2) a 133P/Elst-Pizarro fő-övbeli üstökös aktivitási vagy inaktív időszakainak pályabeli eloszlása a megfigyelések alapján: az MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete piszkés-tetői obszervatóriumának 1 méteres RCC teleszkópjával végzett CCD képalkotó és fotometriai megfigyeléseimre is alapozva.
4. A szétesett üstökösök magjának darabjai bepillantást engednek az üstökös-mag belsejébe és ez jó lehetőség az üstökös-magok felépítésének megismerésére. Szétesett ekliptikai üstökös magtöredékének űrtávcsöves megfigyelése: a 73P/Schwassmann-Wachmann 3 (73P/SW3) C magtöredékének HST megfigyelése annak 2001-es és 2006-os visszatérésekor.
5. Az ekliptikai üstökösök belső szerkezetére vonatkozó ismeretek bővítése az üstökös-magok tengelykörüli forgási ideje és mérete által adott mechanikai korlátozó feltételek alapján. Hasonló vizsgálatot el lehet végezni az őseiknek tekinthető kentaurok és transzneptun objektumokra.

Vizsgálati módszerek

1. Ekliptikai üstökösök megfigyelése a Hubble Űrteleszkóppal a látható fénytartományban, valamint az Infravörös Űrobszervatórium (ISO) teleszkópjával és később a Spitzer Űrtávcsővel a termális infravörös tartományban az üstökös-magok méretének, alakjának, tengelykörüli forgási periódusának, albedójának, színének, fázisfüggvényének, adott esetben hőtani paramétereinek, valamint porkibocsátási aktivitása mértékének meghatározása céljából.
2. Megbízható módszer kidolgozása az üstökös-mag fényének elválasztására az aktív és fényes kóma fényétől a megfigyelésekből. A módszer ellenőrzése és alkalmazhatósági korlátainak megállapítása, Az üstökös-mag fotometria és a belőle meghatározott paraméterek hibájának megadása.
3. Az ekliptikai üstökös-magok méreteloszlásának meghatározása. A kumulatív eloszlásfüggvény paramétereinek meghatározása. Az üstökös-magok lehetséges kialakulási, fejlődési körülményeinek és lehetséges

belső szerkezetének behatárolása a méret szerinti eloszlásfüggvény alapján, a ma rendelkezésre álló fizikai modellek figyelembevételével.

4. Az ekliptikai üstökösök eredetének, Naprendszerbeli lehetséges forrásvidékeinek, illetve a velük kapcsolatos ős-égitest típusoknak az azonosítása a kis égitestek csillagászati szélessávú fotometeriai színindexeinek statisztikai módszerekkel történő összehasonlító vizsgálatok alapján.
5. A fő kisbolygó-öv üstökösének kapcsolata az ekliptikai üstökösökkel: 1) A Hilda-zóna lehetséges kvázi-ekliptikai üstökösének azonosítása égi mechanikai módszerekkel; 2) a 133P/Elst-Pizarro fő-övbeli üstökös aktivitási vagy inaktív időszakainak pályabeli eloszlása a megfigyelések alapján: az MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete piszkés-tetői obszervatóriumának 1 méteres RCC teleszkópjával történt megfigyeléseimre is alapozva. A 133P/Elst-Pizarro aktivitásának egy lehetséges magyarázata alapján a kis égitest forgástengelye térbeli irányának meghatározása és az aktivitási időszakainak a napkörüli pályáján való térbeli eloszlásának vizsgálata.
6. Az üstökösök, kentaurok és transzneptun-objektumok elhelyezkedésének vizsgálata a rotációs periódus – effektív rádiusz síkon lehetővé teszi a túl gyors tengelykörüli forgás következtében történő szétesés elleni stabilitás vizsgálatát. Ebből az üstökösök és a velük evolúciós kapcsolatban lévő primitív kis égitestek belső szerkezete, a belső összetartó erők meghatározhatók.

Új tudományos eredmények – az értekezés tézisei

A disszertáció első két tézispontja az üstökösök és kóma fényének szeparálására alkalmas új és hatékony, az űrcsillagászatban elérhető nagy felbontás kihasználására épített módszer kidolgozásával és ennek az üstökösök űrtávcsöves megfigyelésekre történt alkalmazásaival elért eredményekkel kapcsolatos. A többi pont pedig az üstökösök méreteloszlására, a megfigyelésekből megismert fizikai tulajdonságaikra, az ekliptikai üstökösök eredetére vonatkozik.

1. *Új módszer az üstökösök fényének közvetlen detektálására és alkalmazása a HST megfigyelésekre.* Új eljárást dolgoztam ki az üstökösök fényének elkülönítésére a fényes és aktív kómájuk fényétől. A mag és kóma fényének nagy pontosságú izolálása lehetővé teszi az

üstökös-mag és kóma nagy pontosságú fotometriai vizsgálatát ([1] – [23]). A kidolgozott módszert a Hubble űrteleszkóp régi és új Bolygó-kamerái (WFPC1, WFPC2), valamint Advanced Camera for Surveys (ACS) nagyfelbontású csatornájával (HRC) 1991 és 2007 között megfigyelt harminc ekliptikai üstökös-magra, egy ekliptikai üstökös-mag-töredékre (73P-C/Schwassmann-Wachmann 3), valamint három, az Oort-féle üstökös-felhővel kapcsolatos üstökös-magra alkalmaztam és folyamatosan ellenőriztem, teszteltem. Három objektumot két napközelség idején is megfigyeltem a HST-vel: a 4P/Faye és a 9P/Tempel 1 üstökös-t, valamint a 73P-C mag-töredéket. Minden megfigyelt üstökös-magra meghatároztam annak effektív rádiuszát. Az üstökös-magok alakját elnyújtott forgási ellipszoid modellel közelítettem, amelynek fél-nagy-tengelyei: $a > b = c$ és a test a c tengelye körül forog. Teljes fénygörbe megfigyelésekből az üstökös-magok közelítő alakját ($a > b = c$) meghatároztam és alsó becslést adtam az elnyújtottság mértékét jellemző a/b fél-nagy-tengely arányra, valamint a mag tengelykörüli forgási periódusát is meghatároztam. Rész-fénygörbe megfigyelések esetén becslést adtam az elnyújtottság a/b mértékének alsó határára, valamint a lehetséges forgási periódusra is. Több fotometriai színszűrő alkalmazása esetén az üstökös-magok és a kóma szélessávú fotometriai színindexeit is meghatároztam. A HST-vel készült üstökös-mag fotometriai megfigyelések alapját képezték és képezik az üstökös-magok méreteloszlása, illetve az ekliptikai üstökösök eredetének vizsgálatában. A HST-vel végzett üstökös-mag megfigyelésekből kapott rádiuszokat és színindexeket összehasonlítottam az irodalomban rendelkezésre álló földi nagy teleszkópokkal végzett megbízható megfigyelések eredményeivel ([10], [22]). Több olyan ekliptikai üstökös magjának fizikai tulajdonságait határoztam meg, amelyek több NASA és egy ESA megvalósuló vagy tervezett űrprogram cél-objektumai: 9P/Tempel 1, 19P/Borrelly, 22P/Kopff, 45P/Honda-Mrkos-Pajdusakova, 46P/Wirtanen, 67P/Churyumov-Gerasimenko, 73P/Schwassmann-Wachmann 3 ([11] – [21]).

2. *Új eredmények az üstökösök termális infravörösben történt megfigyelésével kapcsolatban.* Új módszert dolgoztam ki az üstökös-magok infravörös megfigyelésének kiértékelésére. A termális infravörös tartományban végzett üstökös-megfigyelésekből meghatároztam több ekliptikai és Oort-felhővel kapcsolatos üstökös-mag infravörös fluxusát az ESA Infravörös Űrobszervatóriuma (ISO) és a NASA Spitzer űrtávcsőve megfigyeléseiből az üstökös-mag és a kóma fényének szétválasztása alapján ([8], [9], [10], [15], [16], [17]). Az üstökös-magok méretének meghatározását a Standard Hőmodell (Standard Thermal Model, STM)

alkalmazásával végeztem. Megjegyzem, hogy az infravörös üstökös-megfigyelési programban együttműködő kollégák más, speciális modell alkalmazásával függetlenül is meghatározták az magok rádiuszát a két különböző módszerrel kapott eredmények összehasonlítása céljából (l. példaként [9]). Azt találtuk, hogy az egyszerű Standard Hőmodellel és az új modellel kapott rádiuszok közötti relatív eltérés 5-15%, ami azt is jelenti, hogy az üstökös-magokra is első közelítésben elegendő a standard termális modell alkalmazása a mag méretének egyszerű és gyors meghatározására. Az ISO ISOCAM műszerével három ekliptikai és három Oort-felhővel kapcsolatos üstökös magját sikerült detektálni ([6], [8], [19]). A NASA Spitzer Űrteleszkópjával a termális infravörösben végzett nagyszabású üstökös megfigyelési SEPPCoN (Survey of the Ensemble Physical Properties of Cometary Nuclei) program keretében 2006-2007-ben 88 ekliptikai üstökös magjának infravörös fluxusát határoztam meg elválasztva az üstökös-magot az esetek többségében aktív üstökös porkómája infravörös sugárzásától. Az üstökös-magok rádiuszát a Spitzer űrteleszkóp megfigyelések esetén is a Standard Hőmodell (STM) alkalmazásával határoztam meg. Eddig ez a legnagyobb homogén megfigyelési anyag az ekliptikai üstökös-magok infravörös fotometriájára, méretére és albedójára ([16]). A 22P/Kopff, 46P/Wirtanen, 67P/Churyumov-Gerasimenko és 103P/Hartley 2 ekliptikai üstökösök termális infravörös tartományban történt megfigyelése több NASA és egy ESA helyszíni üstökös-szonda programjának előkészítését is segítette ([6], [8], [15], [18], [21], [19]).

3. *Az üstökös-magok méreteloszlásának meghatározása.* A HST megfigyelésekből kapott üstökös-mag méret adatokat kiegészítettem a szakirodalomban rendelkezésre álló földi nagy teleszkópokkal kapott megbízható megfigyelési adatokkal az ekliptikai és Oort-felhő üstökösök magja méreteloszlásának meghatározása, valamint az üstökös-magok ezen két alcsoportja méreteloszlásának összehasonlítása céljából ([10]). A HST, ISO és válogatott földi megfigyelési adatok együttesen 65 ekliptikai üstökös és 13 Oort-felhővel kapcsolatos üstökös magjának rádiuszát jelentik. Ebből a megfigyelési anyagból meghatároztam és vizsgáltam az ekliptikai és az Oort-felhővel kapcsolatos üstökös-magok kumulatív méreteloszlási függvényét. Rámutattam, hogy az Oort-felhő üstökös-magjainak méreteloszlása rosszul meghatározott, mert még túl kevés megfigyelési adat van az üstökösök ezen csoportjára nem úgy, mint az ekliptikai üstökösökre. Fontos következtetés az, hogy amíg a földi megfigyelésekből nem, de a HST megfigyelésekből kimutathatók a kilométeresnél kisebb átmérőjű, szubkilométeres ekliptikai üstökös-magok.

A kumulatív eloszlásfüggvény a kis méretű magok hiányát mutatja. Véleményem szerint a kis méretű üstökösök hiánya vagy megfigyelési bias – azaz műszereinkkel még nem figyelhetjük meg a túl kicsi üstökösöket, vagy pedig fejlődési effektus, vagyis az üstökösök hosszú idő alatt jelentős tömeget veszítenek gáz és poranyag formájában, ami méretcsökkenést eredményez. Az ekliptikai üstökösök méreteloszlása a földközeli objektumok, illetve a földközeli objektumok között található inaktív üstökösök méreteloszlásához áll közel és nem a kentaurokéhoz, illetve Kuiper-öv objektumokéhoz. Négy lehetőségre mutattam rá, amelyek akár egyenkénti, akár pedig együttes fennállása is magyarázhatja az ekliptikai üstökösök kumulatív méreteloszlás függvénye közel 2 körüli hatványkitevőjének. E szerint: 1) az ekliptikai üstökösök fejlődése során végbement tömegvesztés és méretcsökkenés lehet; 2) az üstökösök építoblokkokból épülnek fel és az ilyen testek egymással való ütközési termékei relaxált populációjának kumulatív méreteloszlása az O’Brien és Greenberg (2003) elméleti modellje alapján 2,04 hatványkitevőjű; 3) nem ütközésekkel, hanem adott esetben a gyors forgás miatt bekövetkezett szétesések, illetve 4) a Nap közelében történt hőeffektusok hatására történt szétesések is eredményezhetnek ilyen kitevőt. A HST, ISO, valamint a válogatott földi megfigyelésekkel kibővített ekliptikai üstökösök megfigyelési adatokból álló minta volt a legnagyobb megbízható minta az üstökösök méreteloszlásának meghatározására ([10]), azonban a NASA Spitzer infravörös űrteleszkópjával folytatott SEPPCoN program során még ennél is nagyobb megfigyelési anyagból sikerült meghatároznom az ekliptikai üstökösök méretét, amelyeket felhasználva közös munkában sikerült meghatározni azok méreteloszlását ([16]). A Standard Hőmodellt alkalmaztam és 0,04 albedót feltételeztem. A meghatározott üstökösök rádiuszok kumulatív eloszlásfüggvénye jól egyezik a korábban a látható fénytartományban végzett megfigyelésekből leszármaztatottal. A SEPPCoN programban az üstökösök fizikai paramétereinek meghatározásában az én munkámnál szélesebb körű és attól független eredmények is létrejöttek: ugyanis közös munkában az egyes üstökösökre meghatározott albedó és rádiusz egy újabb, független meghatározása történt, amelynek során a klasszikus Standard Hőmodell újabb változatát alkalmaztuk (ezzel a modellel nem én számoltam) és a kapott kumulatív méreteloszlás hatványkitevője $1,9 \pm 0,2$. Ez a hatványkitevő megfelel az O’Brien és Greenberg (2003) által modellezett méreteloszlásával. Az üstökösök termofizikai paramétereit nem én határoztam meg, mert azok meghatározására a Standard Hőmodellnél összetettebb modell áll rendelkezésre. A SEPP-

CoN programmal kapcsolatos közös munkában arra a következtetésre jutottunk, hogy az ekliptikai üstökösök méretére vonatkozó megfigyelési anyag még nem teljes, mert 1) a mintegy 3 CsE-nél távolabbi napközelségű üstökösök mintája nem teljes, továbbá a 3 km-nél kisebb, vagyis még a viszonylag nagy rádiuszokra sem teljes a minta.

4. *Az üstökösök fázisfüggvénye és albedója.* A rendelkezésre álló saját HST megfigyeléseket kiegészítettem a szakirodalomban lévő más földi megfigyelésekkel, amelyekből az üstökösök fázisfüggvény paramétereire (a fázisfüggvény lineáris részének együtthatója, illetve az oppozíciós effektus mértékét jellemző paraméter) megbízható adat van ([10], [13], [15], [23]). Korrekciót határoztam meg az 5 foknál kisebb fázisszögeknél végzett fotometriai megfigyelések látszó fényességek korrigálására az oppozíciós effektus figyelembevételére. A korrekció alkalmazásával az üstökösök rádiuszának meghatározása pontosabban végezhető el, mint a korrekció figyelembe vétele nélkül. Részletesen elemeztem a 9P/Tempel 1 (NASA Deep Impact cél-objektuma, HST megfigyelés is), 46P/Ashbrook-Jackson (HST megfigyelés) és 67P/Churyumov-Gerasimenko (ESA Rosetta cél-üstököse, HST megfigyelés is) fázisfüggvényét. Azt találtam, hogy a fénygörbe megfigyelések felhasználásával meghatározott fázisfüggvény jobban egyezik a légkör nélküli kis égitestek (pl. üstökösök) elméleti fázisfüggvényével, mint a csak egyszeri (snapshot) megfigyelési pontokból meghatározott fázisfüggvény ([23]). Az ekliptikai és Oort-felhővel kapcsolatos (pl. 55P/Tempel-Tuttle) üstökösök fázisfüggvénye durva, szemcsés felszínre utal, a legdurvább ilyen felszíne a 2P/Encke üstökös magjának van, ehhez hasonló a 45P/Honda-Mrkos-Pajdusaková és 48P/Johnson magja is ([10]). Egyszerű felépítésű (primitív) C-típusú aszteroidák fázisfüggvényére hasonló a 19P/Borrelly és a 28P/Neujmin 1 üstökösé (ez utóbbi a lineáris tartományban). Az üstökösök geometriai albedóját néhány üstökösre az ISO, Spitzer infravörös űrteleszkópokkal – ez utóbbival főleg a SEPPCoN program keretében vizsgáltuk egy nemzetközi kutatócsoportban, ahol az üstökösök fluxusát és rádiuszát határoztam meg, de az albedót nem. Az előzetes eredmények megerősítik a más, korábbi megfigyeléseken alapuló ismereteinket, hogy a geometriai albedó $0,04 \pm 0,02$ körül szór, továbbá az albedó nem függ az üstökösök rádiuszától ([16]). Az üstökösök albedójára kapott eredmények részletesebb vizsgálata még nem fejeződött be.
5. *Az ekliptikai üstökösök eredete.* Az ekliptikai üstökösök magjának csillagászati standard szélessávú fotometria színindexeit a Johnson-Kron-

Cousins fotometriai rendszerben, valamint ezeknek az üstökösöknek lehetséges őseinek tekinthető primitív kis égitest-típusoknak hasonló fotometriai színindexeit statisztikai módszerekkel összehasonlítottam az ekliptikai üstökösök lehetséges forrásvidékének azonosítása céljából ([10], [26]). A HST pontos fotometriai adatait kiegészítettem az irodalomban rendelkezésre álló válogatott, jó minőségű földi megfigyelésekből kapott színindex adatokkal. A Naprendszer primitív kis égitestjei közül az ekliptikai üstökösök lehetséges őseinek, illetve végállapotának tekinthető objektumok színindexeit is hozzávettem a vizsgálatokhoz: klasszikus Kupier-öv objektumok kis- és nagy pályahajlású alcsoportjait (CKBO-LI, CKBO-HI), plutinókat, Szórt-Korong objektumokat (SDO), kentaurok vörös és kék alcsoportjait (CEN-I, CEN-II), Jupiter-trójai kisbolygókat és földközeli kisbolygók inaktív üstökösmag alcsoportját. Minden egyes dinamikai csoport objektumai színindexeinek eloszlását szisztematikusan összehasonlítottam a lehetséges evolúciós kapcsolat, az "ős"–"leszármazott" fejlődési irány figyelembevételével. Azt találtam, hogy a transzneptun-objektumok színindex eloszlásai a Gomes-féle (Gomes, 2003, *Icarus*, 16, 414-418) dinamikai fejlődési elmélettel, illetve ennek Levison és mások (2008, *Icarus* 196, 258-273) által kidolgozott, a "Nice" modellnek is nevezett általánosításával, valamint a Jupiter-trójai kisbolygók eredetének modelljével (Morbidelli és mások 2005, *Nature*, 435, 462-465) teljes összhangban vannak. Továbbá arra a következtetésre jutottam, hogy a kentaurok mindkét alcsoportja a Neptunuszon-túli zónából került a Naphoz közelebbi pályákra, de a színben két alcsoportjuk egymáshoz képest dinamikailag eltérő fejlődési utat járt be a "Nice" modell alapján. E szerint a CEN-I (vörös) kentaurok a transzneptun régió kis inklinációjú (CKBO-LI) vidékéről származnak. A CEN-II (kék) kentaurok már régebben beljebb kerültek a transzneptun-zónából, de az óriásbolygók a Jupiter pályáján túlra, a kentaurok zónába szórták vissza ezeket. Az ekliptikai üstökösök színe széles tartományt fog át a kéktől a vörösig, amely a Kuiper-övbeli eredetre utal. A disszertációban a korábbi paradigmához képest új következtetés az, hogy az ekliptikai üstökösöknek az ősei valószínűleg nem a klasszikus Kuiper-öv objektumok, mint azt korábban gondolták, hanem a legvalószínűbb őseik a plutinók lehetnek. A földközeli objektumok inaktív üstökösei az ekliptikai üstökösök fejlődésének végállapotai lehetnek és még a Jupiter-trójai kisbolygóknál, valamint a kentaurok CEN-II (kék) alcsoportjánál is idősebbek.

6. *A kisbolygók fő-övezete és az ekliptikai üstökösök.* A kisbolygók fő-övének külső zónája az üstökösöknek egy nemrégiben felfedezett forrás-

vidéke. A Themis-zóna a 2006-ban felismert klasszikus fő-öv üstökösök zónája, de ezek a Jupiterre vonatkozó Tisserand-paraméter (T_J) alapján nem ekliptikai üstökösök (Hsieh és Jewitt, 2006, Science, 312, 561-565). A Themis-zónánál is nagyobb naptávolságban lévő Hilda-zóna külső pereme azonban olyan objektumokat is tartalmazhat, amelyek hosszú idő alatt elhagyhatják a Hilda-zónát és az ekliptikai üstökösök pályájához hasonló pályára kerülnek, miközben a Tisserand-paraméterük a klasszikus aszteroidák ($T_J > 3$) és az ekliptikai üstökösök ($2 < T_J < 3$) Tisserand-paramétere közötti átmeneti tartományba esik ($T_J \sim 3$). Vizsgáltataim előtt az irodalomban a Hilda-zónával kapcsolatos 15 üstökös volt ismert, de az újabb, modern megfigyelési technikákkal folytatott kisbolygó- és üstökös-kereső átvizsgáló programok eredményeként felfedezett újabb Hilda-zóna objektumok meglete kapcsán érdemesnek láttam újabb Hilda-zónával kapcsolatos üstökös-jelöltek után kutatni az égi mechanika eszközök segítségével. A Hilda-zóna ismert kisbolygóinak Jupiterre vonatkoztatott Tisserand-paramétere, a napköri pályájuk gerjesztettségi mértéke (Davis és mások 2002, Asteroids III, Univ. of Arizona Press, Tucson, pp. 545-558), valamint Lagrange-féle (h, k) pályaelemek terében olyan objektumokat kerestem, amelyek pályája ekliptikai üstökösszerű lehet és a keresés sikerrel járt. Ezeket az objektumokat az ekliptikai üstökösök kvázi-Hilda alcsoportjának neveztem el: 11 ilyen objektumot találtam, ezeken kívül a Lagrange-féle pályaelem-térben való elhelyezkedésük alapján még 23 objektum tartozhat az ekliptikai üstökösök kvázi-Hilda alcsoportjához ([28], [29]). Az általam talált kvázi-Hilda ekliptikai üstökös jelöltekről ma még nem tudni, hogy fizikai tulajdonságaik valóban lehetővé teszik-e, hogy üstökös viselkedést mutassanak (jegek szublimációja, permanens kóma meglete), azonban földi teleszkópokkal folytatott jövőbeli megfigyelési programokkal ez eldönthető. A kimutatott lehetséges kvázi-Hilda üstökösök jövőbeli megfigyeléséhez és üstökösszerű fizikai tulajdonságaik kimutatásához, a további vizsgálatokhoz egy kiindulási alapot képezhetnek a közzétett eredményeim ([29]).

7. *A 73P/Schwassmann-Wachmann 3 szétesett üstökös C magtöredékének megfigyelése 2001-ben és 2006-ban.* Az 1995-ben spontán, nem árapály erőhatásra darabjaira szétesett 73P/SW3 üstökös legnagyobb, C-jelű magtöredékét megfigyeltem a HST WFPC2 kamerájával 2001-ben és az ACS/HRC kamerájával 2006-ban ([27], [31], [33]). A 2001-es napközelsége évében csak pillanatfelvételek (snapshot megfigyelések) és nem fénygörbék készültek, de ezekből meghatároztam a magtöredék effektív rádiuszát, ami $0,68 \pm 0,04$ km-nek adódott. Figyelembe véve az eredeti

üstökös-mag szétesése előtt mások által végezett megfigyelésekből meghatározott mintegy 1,1 km-es üstökös-mag rádiuszt, a 2001-es HST megfigyelés alapján a C magtöredék térfogata csak mintegy 25%-a a szétesés előtti üstökös-mag térfogatának. Annak ellenére, hogy az üstökös a 2001-es HST megfigyelések idején már nagyon távol volt a Naptól, még mindig jelentős gáz- és porkibocsátást mutatott. Ebből arra következtettem, hogy az üstökös-mag-töredék friss, szublimációra képes felülete a napfény hatására intenzív szublimációra képes nagy heliocentrikus távolságban is. Prediktáltam ([27]), hogy az üstökös 2006-os napközelsége idején is megfigyelhető lesz a C magtöredék, amit a HST-vel sikerült is újra megfigyelni a 2006-os napközelsége idején ([31], [33]). A magtöredék effektív rádiusza $0,53 \pm 0,02$ km a 2006-os HST megfigyelésekből, ami kisebb, mint a 2001-ben meghatározott rádiusz. Ezt azzal magyaráztam, hogy itt csak egy látszólagos effektusról van szó, mert egy változatlan méretű és alakú, de elnyújtott forgó testet más rálátási szögnél és rotációs fázisnál figyeltem meg 2001-ben és 2006-ban. A magtöredék test alakját egy $a > b = c$ fél-nagytengelesű és a c tengelye körül forgó elnyújtott alakú ellipszoiddal modellezve a HST megfigyelésekből adott két rádiuszból meghatároztam az ellipszoid test a/b elnyújtottságának mértékét: $a/b > 1,8 \pm 0,3$. A magtöredék elnyújtott alakját megerősítik az arecibo-i óriás rádióantennával radar üzemmódban végzett megfigyelések is (Nolan és mások, 2006, BAAS, 38, [12.06], p. 504). A 2006-os HST megfigyelések csak töredék fénygörbét adtak, ezért a C magtöredék forgási periódusa ma még nem állapítható meg pontosan. Több módszerrel is meghatároztam a periódus közelítő értékét, ami 3,5–4 óra között szór a különböző módszerekkel. A megfigyelési pontokhoz legjobban illeszkedő szinusz függvényből a rotációs periódus (a szinusz periódusának kétszerese) $3,7 \pm 0,2$ óra. A rotációs periódus – rádiusz síkon vizsgáltam a C magtöredék helyzetét a annak eldöntése céljából, hogy a gyors tengelykörüli forgásnak lehet-e szerepe a magtöredék további szétagrozódásának. Azt találtam, hogy a magtöredék a gyors forgása ellenére még stabil a forgás miatt bekövetkező szétesés ellen, de a felszínéről anyagdarabok válhatnak le ([31], [33], [34]). A 2006-os HST fotometriából a C magtöredék színindexeit is meghatároztam, ami azt mutatja, hogy a kétszín diagramon kissé kívül esik az ekliptikai üstökösök fő trendjétől, hasonlóan mint például mint például a 45P/Honda-Mrkos-Pajdusakova és 106P/Schuster üstökösök. A 2001-es és 2006-os HST képfelvételeken C magtöredéken kívül más, kisebb magtöredékeket nem találtam. Felvettem, hogy a 73P/SW3 üstökösrel kapcsolatos tau-Herculida meteorraj a jövőben még aktív lehet mivel a C fragment még képes poranyagot beletáplálni, illetve a

Földről is megfigyelhető erős aktivitást mutathat a jövőben, amikor a raj pályája közel kerül a Földhöz.

8. *Az üstökösök alakja, forgása, belső szerkezete és szétesés elleni stabilitása.* A HST megfigyeléseim és a szakirodalomból gondosan válogatott, nagy földi teleszkópokkal végzett megfigyelésekből megállapítottam, hogy az ekliptikai üstökösök elnyújtottságát jellemző a/b fél-nagy tengely arány medián értéke 1,5, amiről feltehetjük, hogy nem torzít el a rálátási geometria (a legkülönbözőbb rálátási szögben megfigyelt 30 ekliptikai üstökös magról van szó). Néhány üstökös mag nagyon megnyúlt alakú, vagyis az a/b arány 2-nél nagyobb, a ma ismert legnagyobb 2,6 értékét a 29P/Schwassmann-Wachmann 1 kentauro-ekliptikai üstökös átmeneti objektumnál éri el ([10]). Az üstökösök tengely körüli forgási periódusa 4–70 óra közötti, amely a fő aszteroid-öv és földközeli objektumokéhoz hasonlít (eltekintve a monolitikus gyorsan forgó kis égitestektől). A rotációs periódus – a/b tengely arány diagram lehetőséget ad az üstökösök gyors forgás miatt bekövetkező szétesése elleni stabilitásának vizsgálatára és az átlagos tömegsűrűségük behatárolására. Először egy erősen leegyszerűsített modellt alkalmaztam ([10]), ami első közelítésben már tájékoztatást ad a forgási szétesés elleni stabilitásra. Ez a modell kritériumot ad a test szétesésének kezdetére az elnyújtott alakú gyorsan forgó ellipszoid test leghosszabb tengelye végpontjaiban a centrifugális erőhatás miatt a felszínről való anyag leszakadásra. Azt találtam, hogy ebben az egyszerű modellben a megfigyelhető üstökösök nem esnek szét, stabilak a gyors forgás miatt bekövetkező szétesés ellen. A leggyorsabban forgók átlagos tömegsűrűsége leglább 600 kg m^{-3} ([10]). A fenti leegyszerűsített modellhez képest a Davidsson (1999, Icarus, 142, 525-535; 2000, Icarus, 149, 375-383) jóval összetettebb modellt használtam a további vizsgálatokhoz ([32], [34]). A modell segítségével kiszámítható a rotációs periódus – effektív rádiusz síkon a szétesés ellen stabil és instabil tartományok elhelyezkedése és vizsgáltam, hogy a különböző primitív kis égitestek (üstökösök, kentaurok, transzneptun-objektumok) belső fizikai paramétereinek megváltoztatásakor hogyan változik a forgás elleni szétesési stabilitásuk. A Greenberg és mások (1995, Astron. Astrophys., 295, L35-L38) csillagközi jegesporos aggregátum modelljében változtattam a kémiai összetételre és jellemző paramétereket vizsgáltam, hogy az eredményül kapott belső szakítászilárdság és tömegsűrűség miként változtatja meg a szétesés elleni stabilitási tartományok elhelyezkedését a diagramon. Hasonló vizsgálatokat végeztem az előbbinél összetettebb, a Sirono és Greenberg

(2000, Icarus, 145, 230-238) által kifejlesztett jeges-poros aggregátum modellel. Megállapítottam, hogy az üstökösök, kentaurok, transzneptun-objektumok stabilak a gyors forgás miatt bekövetkező teljes szétesés ellen mindkét modell alkalmazásával. A fő-öv üstökösei szintén stabilak a gyors forgás miatt bekövetkező szétesés ellen, még a közöttük leggyorsabban forgó 133P/Elst-Pizarro is ([32], [34]). A NASA Deep Impact űrkísérletének kutatójával, C. M. Lisse-vel együtt összehasonlítottuk a Greenberg és mások (1995) és a Sirono-Greenberg (2000) modellt a primitív kis égitestek gyors tengelykörüli forgás elleni szétesésének vizsgálata alapján ([34]). Ennek a vizsgálatnak eredményeként azt találtuk, hogy a NASA Deep Impact űrkísérlet a 9P/Tempel 1 üstökös vizsgálatával azt erősíti meg, hogy az üstökösöket gyenge belső erők tartják össze, tehát a Greenberg és mások (1995) modellje áll közelebb az üstökösök belső szerkezetének leírásához. Ebben a közös munkában még azt is felvetettük, hogy a nagy méretű és elnyújtott alakú Haumea transzneptun-objektumhoz tartozó dinamikai család kialakulása egy nagyobb ős-égitest gyors tengelykörüli forgás miatt szétesés következtében alakult ki ([34]). Más elképzelés szerint ütközés következtében jött létre, tehát ez a kérdés ma még vita tárgyát képezi.

Az eredmények hasznosítása, továbbfejlesztése

Az értekezés tárgya felfedező jellegű, tudományos alapkutatás, ezért nem várható annak azonnali közvetlen gyakorlati, illetve anyagi hozadéka. Mivel azonban a disszertációban ismertetett eredmények a HST-vel végzett pontos fotometriai megfigyeléseken, illetve az ISO és Spitzer űrtávcsövekkel kapott infravörös fotometriai megfigyeléseken alapulnak, továbbá az üstökösmagok megfigyelése igen nehéz feladat, ráadásul nehéz műszeridőt kapni erre a célra, ezért a disszertáció eredményei várhatóan még hosszú ideig alapvetőek és egyedülállóak lesznek az üstökösmagokra vonatkozóan. Ezt az is mutatja például, hogy a 2004-ben megjelent Comets II könyv (University of Arizona Press, Tucson, Arizona) *"The sizes, shapes, albedos, and colors of cometary nuclei"* című könyvfejezetére 2011. első félévig történt független hivatkozások száma 61.

A disszertációban bemutatott eredmények a következő területeken hasznosultak, illetve használhatók fel a jövőben:

1. A megfigyelt üstökösök közül többet közvetlen közelről helyszíni űrszondák tanulmányoztak és a disszertációban tárgyalt vonatkozó eredményeket a szondák programjának tervezésekor figyelembe vették; tehát földközi pályán elhelyezett űrtávcsövekkel végzett optikai és infravörös csillagászati megfigyelések in-situ űrszondák programját segítették (NASA Deep Space 1, CONTOUR, Deep Impact/EPOXI, Stardust-NExT).
2. A jövőben megvalósuló helyszíni űrszondás programok cél-üstököseinek kiválasztásában és az űrprogram részleteinek kidolgozásában is fontosak a disszertációban ismertetett üstökös megfigyelések eredményei (NASA Comet Odyssey, ESA Rosetta, Marco Polo).
3. Az üstökösök fizikai modellezésére is felhasználhatók a disszertációban ismertetett adatok, mint például a 67P/Churyumov-Gerasimenko üstökös magjának modellezésére, az ESA Rosetta üstökösszondája programjának megtervezéséhez történt; az adatok természetesen konkrét űrprogramoktól független fizikai modellek elkészítésére is felhasználhatók.
4. Más földi megfigyelők a megfigyelési programjaik tervezésekor is figyelembe vették eredményeiket a megfigyeléseikre kiválasztott üstökösök esetében, illetve a kapott eredményeiket összehasonlíthatták a korábbi eredményeikkel. A Pan-STARRS földi nagytávcsöves égbolt felmérés (survey) program szoftverébe beépítették az ekliptikai üstökösök kvázi-Hilda alcsoportjához tartozó objektumai keresését az általam kifejlesztett módszer alapján (Ohtsuka és mások, 2008, *Astron. Astrophys.*, 489, 1355-1362, és DPS 2008).
5. A 133P/Elst-Pizarro üstökös viselkedést mutató fő-övbeli kisbolygóval kapcsolatos vizsgálataim ([25], [28], [30]) közvetlenül inspirálták Jewitt és Hsieh kutatásait az objektum újabb aktivitásának megfigyelésére, a kisbolygó ismétlődő (rekurrens) üstökös aktivitásának a felfedezésére, valamint további ilyen objektumok keresésére programot indítottak. Ennek következményeként felfedezték a fő-övbeli üstökösöket, az üstökösök egy új típusát és forrásvidékét (Hsieh, Jewitt, Fernández, 2004, *Astronomical Journal*, 127, 2997-3017; Hsieh és Jewitt, 2006, *Science*, 312, 561-565).
6. Az üstökösök méreteloszlása újabb megfigyelési mintákkal kiegészíthető és a disszertációban közölt üstökösök méretei, illetve a kapott méreteloszlás paraméterei összehasonlítási alapot képeznek a

mások által végzendő újabb vizsgálatokkal. Új eredmények várhatók az eddig kevésbé megfigyelt Oort-felhőből származó üstökösök méretének és egyéb fizikai paraméterének meghatározásában is. Az ekliptikai üstökösök méretének meghatározására kifejlesztett módszer további űrtávcsöves megfigyelésekre alkalmazható.

7. A Naprendszer primitív kis égitestek, különösen pedig az üstökösöknek tanulmányozása során kapott eredmények interdiszciplináris kutatásokhoz is fontosak a következő területeken:

- A Naprendszeren kívüli bolygórendszerek kialakulásának és fejlődésének megismerését, valamint az extraszoláris törmeléköröngök és bolygórendszerek egymás közötti, illetve a Naprendszerhez képest meglévő hasonlóságainak és különbségeinek (diverzitás) a feltárása, megismerése szempontjából is fontos a Naprendszer kisebb égitestek vizsgálata.
- A távlatokat tekintve pedig asztrokémiai és asztrobiológiai kutatásokhoz is alapvetően fontos a kis égitestek, azok alapvető fizikai és kémiai tulajdonságainak megismerése.

8. A kis égitestek, köztük az üstökösöknek a Földdel való lehetséges katasztrófális ütközési veszélyhelyzetének kezelésére az üstökösök mérete, méreteloszlása, aktivitásának mértéke és egyéb fizikai tulajdonságainak előzetes ismerete alapvető fontosságú. A disszertációval kapcsolatos eredmények ilyen irányú felhasználása is lehetséges.

A fenti 8. pont alapján a disszertáció kapcsolatos az üstökösök nagybolygókkal és azok holdjaival való ütközési veszély elhárításával, illetve az ilyen kozmikus katasztrófák hatásának csökkentésével is, hiszen az üstökösök mérete, méreteloszlása, forgási periódusa, aktivitása és belső szerkezetére vonatkozó következtetései e tárgykörben is alapvetőek. Ugyanis meg kell ismerni a veszély lehetséges forrását és fizikai mibenlétét a veszélyhelyzet kezelésére, illetve elkerülésére. Az, hogy indokolt erre a kozmikus katasztrófára reális lehetőségként gondolni mi sem mutatja jobban az, hogy a Naprendszer kis égitestek a nagybolygókkal, illetve azok holdjaival való ütközése napjainkban is lehetséges esemény. Erre a D/Shoemaker-Levy 9 üstökös magtöredékeinek a Jupiterbe való 1994-ben történt becsapódása az intő példa.

Bár a kisbolygókkal való ütközésnek nagyobb a valószínűsége, mint egy üstökösrel, de akár ekliptikai, akár pedig Oort-felhő eredetű üstökösökkel

való ütközés is lehetséges esemény. Egy ilyen kozmikus katasztrófának a bekövetkezése kis valószínűségű esemény, de a földtörténetben geológiai időskálán bolygónk felszínének alakítására, illetve az élővilág fejlődésére gyakorolt hatása nyilvánvaló. A jövőben is bekövetkezhet katasztrófális mértékű becsapódás, amelynek elhárítására, illetve a bekövetkező károk enyhítésére már most fel kell készülni a potenciálisan veszélyt jelentő objektumok megismerésével. Fontos megjegyezni, hogy ma nem ismerünk olyan konkrét természetes kis égitestet, amely becsapódna bolygónkba, azonban számolni kell a veszéllyel. Az ekliptikai üstökösök magjának méreteloszlása, belső szerkezete, belső összetartó erők jellege és nagysága, a napköri pályamozgásukat és tengelyköri forgásukat befolyásoló gáz- és porkibocsátási aktivitásuk ismerete alapvetően fontos a Földre vagy egy jövőben megvalósuló hold- vagy mars-bázisra nézve katasztrófális jövőbeli esetleges becsapódás elkerülésére tett döntések és intézkedések meghozatalánál.

A tézispontokhoz kapcsolódó publikációk

A tézispontokhoz kapcsolódó összesen 34 publikáció közül 11 egy, illetve elsőszerzős. A felsorolásban 23 referees SCI folyóiratcikk és 5 könyvfejezet szerepel. A felsorolás időrendi sorrendet követ, különválasztva a nem első szerzős és elsőszerzős tudományos közleményeket.

Hivatkozások

- [1] Lamy, P.L., Toth, I., 1995, Direct detection of a cometary nucleus with the Hubble Space Telescope. *Astron. Astrophys.*, **293**, L43-L45.
- [2] Lamy, P.L., Toth, I., Grün, E., Keller, H.U., Sekanina, Z., West, R.M., 1996, Observations of Comet P/Faye 1991 XXI with the Planetary Camera of the Hubble Space Telescope. *Icarus*, **119**, 370-384.
- [3] Lamy, P.L., Toth, I., Jorda, L., Weaver, H.A., A'Hearn, M., 1998. The nucleus and inner coma of Comet 46P/Wirtanen. *Astron. Astrophys.*, **335**, L25-L29.
- [4] Lamy, P.L., Toth, I., Weaver, H.A., 1998, Hubble Space Telescope observations of the nucleus and inner coma of comet 19P/1904 Y2 (Borrelly). *Astron. Astrophys.*, **337**, 945-954.
- [5] Lamy, P.L., Toth, I., A'Hearn, M.F., Weaver, H.A., 1999, Hubble Space Telescope observations of the nucleus of comet 45P/Honda-Mrkos-Pajdusakova and its inner coma. *Icarus*, **140**, 424-438.

- [6] Jorda, L., Lamy, P., Groussin, O., Toth, I., A'Hearn, M.F., Peschke, S., 1999, ISOCAM Observations of Cometary Nuclei. ESA-SP 455, 61-66.
- [7] Lamy, P.L., Toth, I., A'Hearn, M.F., Weaver, H.A., Weissman, P.R., 2001, Hubble Space Telescope observations of the nucleus of comet 9P/Tempel 1. *Icarus*, **154**, 337-344.
- [8] Lamy, P.L., Toth, I., Jorda, L., Groussin, O., A'Hearn, M.F., Weaver, H.A., 2002, The nucleus of comet 22P/Kopff and its inner coma. *Icarus*, **156**, 442-455.
- [9] Groussin, O., Lamy, P., Jorda, L., Toth, I., 2004, The nuclei of comets 126P/IRAS and 103P/Hartley 2. *Astron. Astrophys.*, **419**, 375-383.
- [10] Lamy, P.L., Toth, I., Fernández, Y.R., Weaver, H.A., 2004, Sizes, shapes, albedos, and colors of cometary nuclei. In Comets II, (Eds: M. Festou, H.U. Keller, H.A. Weaver), University of Arizona Press, Tucson, Arizona, pp. 223-264.
- [11] Belton, M.J.S., Meech, K.J., A'Hearn, M.F., Groussin, O., McFadden, L., Lisse, C., Fernández, Y.R., Pittichová, J., Hsieh, H., Kissel, J., Klaasen, K., Lamy, P., Prialnik, D., Sunshine, J., Thomas, P., Toth, I., 2005. Deep Impact: Working properties for the target nucleus-comet 9P/Tempel 1. In *Deep Impact Mission: Looking beneath the surface of a cometary nucleus*, (C.T. Russell, ed.), Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 137-160.
- [12] Lamy, P.L., Toth, I., Weaver, H.A., Jorda, L., Kaasalainen, M., Gutiérrez, P.J., 2006, Hubble Space Telescope observations of the nucleus and inner coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Astron. Astrophys.*, **458**, 659-678.
- [13] Lamy, P.L., Toth, I., A'Hearn, M.F., Weaver, H.A., Weissman, P.R., 2007a. Hubble Space Telescope observations of the nucleus of Comet 9P/Tempel 1. *Icarus*, **191**, 4-10.
- [14] Lamy, P.L., Toth, I., A'Hearn, M.F., Weaver, H.A., Jorda, L., 2007b, Rotational state of the nucleus of Comet 9P/Tempel 1: Results from Hubble Space Telescope observations in 2004. *Icarus*, **191**, 310-321.
- [15] Lamy, P.L., Toth, I., Davidsson, B.J.R., Groussin, O., Gutiérrez, P.J., Jorda, L., Kaasalainen, M., Lowry, S.C., 2007, A Portrait of the Nucleus of Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Space Sci. Rev.*, **128**, 23-66.
- [16] Fernández, Y.R., Kelley, M.S., Lamy, P.L., Toth, I., Groussin, O., A'Hearn, M.F., Bauer, J.M., Campins, H., Fitzsimmons, A., Licandro, J., Lisse, C.M., Lowry, S.C., Meech, K.J., Pittichová, J., Reach, W.T., Snodgrass, C., Weaver, H.A., 2008, Results from SEPPCoN, A Survey of Ensemble Physical Properties

- of Cometary Nuclei. *Asteroids, Comets, Meteors 2008*, ACM 2008: LPI No. 1405, paper id. 8307.
- [17] Lamy, P.L., Toth, I., Weaver, H.A., Noll, K.S., 2008a, Characterization of the Nucleus Fragment 73P/Schwassmann-Wachmann 3-C from Hubble Space Telescope Observation in 2001 and 2006. *Asteroids, Comets, Meteors 2008*, ACM 2008: LPI No. 1405, paper id. 8160.
- [18] Lamy, P.L., Toth, I., Groussin, O., Jorda, L., Kelley, M.S., Stansberry, J.A., 2008b, Spitzer Space Telescope observations of the nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Astron. Astrophys.*, **489**, 777-785.
- [19] Groussin, O., Lamy, P., Toth, I., Kelley, M.S., Fernández, Y.R., A'Hearn, M., Camopins, H., Licandro, J., Lisse, C., Lowry, S., Meech, K., Snodgrass, C., 2009, The size and thermal properties of the nucleus of Comet 22P/Kopff. *Icarus*, **199**, 568-570.
- [20] Lamy, P.L., Toth, I., Weaver, H.A., A'Hearn, M.F., Jorda, L., 2009a, Properties of the nuclei and comae of 13 ecliptic comets from Hubble Space Telescope snapshot observations. *Astron. Astrophys.*, **508**, 1045-1056.
- [21] Lamy, P., Toth, I., Davidsson, B.J.R., Groussin, O., Gutiérrez, Jorda, L., Kaasalainen, M., Lowry, S.C., 2009b, The nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. In "Rosetta - ESA's Mission to the Origin of the Solar System", R. Schulz, C. Alexander, H. Boehnhardt, K.-H. Glassmeier (eds.), Springer-Science, Berlin, pp. 21-54.
- [22] Lamy, P., Toth, I., 2009, The colors of cometary nuclei – Comparison with other primitive bodies of the solar system and implications for their origin. *Icarus*, **201**, 674-713.
- [23] Lamy, P.L., Toth, I., Weaver, H.A., A'Hearn, M.F., Jorda, L., 2011, Properties of the nuclei and comae of 10 ecliptic comets from Hubble Space Telescope multi-orbit observations. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **412**, 1573-1590.
- [24] Toth, I., 1999, On the detectability of satellites of small bodies orbiting the Sun in the inner region of the Edgeworth-Kuiper belt. *Icarus*, **141**, 420-425.
- [25] Toth, I., 2000, Impact-generated activity period of the asteroid 7968 Elst-Pizarro in 1996: Identification of the asteroid 427 Galene as the most probable parent body of the impactors. *Astron. Astrophys.*, **360**, 375-380.
- [26] Toth, I., Lamy, P.L., 2000, Spectral properties of the nucleus of short-period comets. *Bull. Amer. Astron. Soc.*, **32**, p. 1063.

- [27] Toth, I., Lamy, P., Weaver, H.A., 2005, Hubble Space Telescope observations of the nucleus fragment 73P/Schwassmann Wachmann 3-C. *Icarus*, **178**, 235-247.
- [28] Toth, I., 2006a, Connections between asteroids and cometary nuclei. Invited review talk. In *Proceedings of the 229th Symposium of the International Astronomical Union, "Asteroids, Comets, Meteors 2005"*, held in Rio de Janeiro, Brasil, August 7-12, 2005, (Eds: D. Lazzaro, S. Ferraz-Mello, J.A. Fernández), Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 67-96.
- [29] Toth, I., 2006b, The quasi-Hilda subgroup of ecliptic comets - an update. *Astron. Astrophys.*, **448**, 1191-1196.
- [30] Toth, I., 2006c, Search for comet-like activity in asteroid 7968 Elst-Pizarro and limitation of its rotational pole orientation. *Astron. Astrophys.*, **446**, 333-343.
- [31] Toth, I., Lamy, P., Weaver, H., A'Hearn, M., Kaasalainen, M., Lowry, S., 2006, HST observations of the nucleus fragment 73P/Schwassmann-Wachmann 3-C during its close approach to Earth in 2006. *Bull. Amer. Astr. Soc.*, **38**, p. 489.
- [32] Toth, I., Lisse, C.M., 2006, On the rotational breakup of cometary nuclei and centaurs. *Icarus*, **181**, 162-177.
- [33] Toth, I., Lamy, P.L., Weaver, H.A., Noll, K.S., Mutchler, M.J., 2008, Hubble Space Telescope observations of fragment C of the split comet 73P/Schwassmann-Wachmann 3 in 2001 and 2006. *Bull. Amer. Astr. Soc.*, **40**, p. 394.
- [34] Toth, I., Lisse, C.M., 2010, Effect of the tensile strength on the stability against rotational breakup of icy bodies. In *Proceedings of the 263th Symposium of the International Astronomical Union, "Icy Bodies of the Solar System"*, XXVIIth General Assembly of the IAU, held in Rio de Janeiro, Brasil, August 3 - 14, 2009, (Eds: D. Lazzaro, D. Prialnik, R. Schulz, J.A. Fernández), IAU Symposium Vol. 263, Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 131-140.

★ ★ ★

dc_107_10

dc_107_10