

dc_107_10

Tóth Imre

Az ekliptikai üstökösök fizikai tulajdonságai és eredete

Az MTA Doktora cím megszerzéséért készített disszertáció

Magyar Tudományos Akadémia
Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete

Budapest

2011

dc_107_10

dc_107_10

dc_107_10



Belső borítólap kép: *A West üstökösről (C/1975 V1-A1 = 1975 n) készített látványos asztrofotó. A felvételt 1976. március 9-én egy 135 mm-es teleobjektívvel 30 másodperces expozíciós idővel kisfilm fotóanyagot használva John Laborde készítette a kaliforniai Tierra Del Sol obszervatóriumban (San Diego megye). Bár ez az üstökös nem egy ekliptikai üstökös, hanem az Oort-felhővel kapcsolatos, de jól szemlélteti az üstökösök jellegzetes morfológiáját: az egyenes ioncsóváit (jobbra) és enyhén görbült széles porcsóváit (balra), valamint a diffúz kómáját a csillagos égi háttér előtt. A kép forrása (Co. 1995-2009): <http://www.solarviews.com/cap/comet/west2.htm>.*

Tartalomjegyzék

Előszó	I
Rövidítések jegyzéke	II
1. Bevezetés	1
2. Történeti visszatekintés	6
2.1. A kezdetektől a távolságmérésekig	6
2.2. Az üstökösök, mint égitestek: megfigyelések, égi mechanika	8
2.3. Az üstökösök és a megfigyelési, kísérleti asztrofizika	12
2.4. Az üstökös-mag koncepció és az első modellek	20
2.5. Üstökös-kutatás űreszközökkel – csillagászat, űrcsillagászat, űrfizika, helyszíni vizsgálatok	25
3. Az üstökösök új világa	30
3.1. Őseredeti kis égitestek	34
3.2. Csillagkörüli törmelékkorong maradványa és az ekliptikai üstökösök eredete	37
4. Kutatási célkitűzések és vizsgálati módszerek	42
4.1. Kutatási célkitűzések	42
4.2. A kutatás során alkalmazott vizsgálati módszerek	43
5. Módszerek az üstökös-magok megfigyelésére	44
5.1. Előzmények: A leggyakoribb módszerek	44
5.2. Új módszer az üstökös-mag fényének közvetlen detektálására	47
5.3. A mag fotometriája a látható és termális infravörös tartományban	55
5.4. Többszínfotometria: az üstökös-mag és kóma színe	59
5.5. A porkibocsátási aktivitás meghatározása	60
6. Az ekliptikai üstökösök megfigyelési eredményei	61
6.1. Helyszíni űrszondák cél-üstökösei	62
6.1.1. 4P/Faye	63
6.1.2. 9P/Tempel 1	64
6.1.3. 19P/Borrelly	67
6.1.4. 22P/Kopff	68
6.1.5. 45P/Honda–Mrkos–Pajdušaková	70
6.1.6. 46P/Wirtanen	70
6.1.7. 67P/Churyumov–Gerasimenko	72
6.1.8. 73P-C/Schwassmann–Wachmann 3	76
6.1.9. 103P/Hartley 2	83
6.2. 13 ekliptikai üstökös (HST 8. megfigyelési ciklus)	83
6.2.1. 4P/Faye	86
6.2.2. 10P/Tempel 2	86
6.2.3. 17P/Holmes	86
6.2.4. 37P/Forbes	89
6.2.5. 44P/Reinmuth 2	90
6.2.6. 50P/Arend	90

6.2.7.	59P/Kearns-Kwee	91
6.2.8.	63P/Wild 1	92
6.2.9.	71P/Clark	92
6.2.10.	84P/Giclas	93
6.2.11.	106P/Schuster	94
6.2.12.	112P/Urata-Niijima	94
6.2.13.	114P/Wiseman-Skiff	94
6.2.14.	HST 8. megfigyelési ciklusa – rövid összegzés: üstökös- magok mérete, aktivitása, színe és a porkóma színe	96
6.3.	10 ekliptikai üstökös (HST 9. megfigyelési ciklus)	99
6.3.1.	47P/Ashbrook-Jackson	101
6.3.2.	61P/Shajn-Schaldach	105
6.3.3.	70P/Kojima	106
6.3.4.	74P/Smirnova-Chernykh	107
6.3.5.	76P/West-Kohoutek-Ikemura	108
6.3.6.	82P/Gehrels 3	108
6.3.7.	86P/Wild 3	109
6.3.8.	87P/Bus	111
6.3.9.	110P/Hartley 3	111
6.3.10.	147P/Kushida-Muramatsu	113
6.3.11.	HST 9. megfigyelési ciklusa – rövid összegzés: üstökös- magok mérete, aktivitása, színe és a porkóma színe	115
7.	Az üstökös- magok fázisfüggvénye és albedója	115
8.	Az üstökös- magok méreteloszlása	118
9.	A SEPPCoN program eredményei	122
10.	Az ekliptikai üstökösök eredete	127
11.	A kisbolygók fő-övezete és az ekliptikai üstökösök	131
11.1.	Az ekliptikai üstökösök kvázi-Hilda alcsoportja	132
11.2.	A 133P/Elst-Pizarro, az első azonosított üstökös a fő kisbolygó-övben	136
12.	Gyors forgástól való szétesés elleni stabilitás	141
12.1.	Üstökös- magok forgási periódusa és elnyújtottsága a megfigyelések alapján	142
12.2.	Forgási egyenlítő mentén kezdődő anyagleválás	143
12.3.	Gömb alakú forgó test	144
12.4.	Elnyúlt alakú forgó ellipszoid	148
12.5.	A szakítószilárdság: a modell kulcs paramétere	148
12.5.1.	A szakítószilárdság 1995-ös modellje (Greenberg és mások 1995)	149
12.5.2.	A szakítószilárdság 2000-es modellje (Sirono & Greenberg 2000)	150
13.	Kitekintés – megoldatlan problémák és lehetőségek	155
14.	Az eredmények hasznosítása, továbbfejlesztése	156

15. Összefoglalás és az értekezés tézisei	159
15.1. Az új eredmények rövid összefoglalása	159
15.2. Tézisek	160
16. Köszönetnyilvánítás	168
Hivatkozások	170

Előszó

A doktori értekezés témája a természettudományi felfedező vagy alapkutatások, ezen belül is a fizika, csillagászat tárgykörébe tartozik és a Naprendszer kis égitestjeinek vizsgálatával foglalkozik. Ezeknek az apró égitesteknek a fizikai tulajdonságainak és eredetének kutatása földi és légkörön túli csillagászati megfigyelő eszközökkel, vagyis földi- és űrteleszkópokkal, valamint a kis égitestek közelébe küldött, azok mellett elrepülő, körülöttük keringő, sőt felszínükre leszálló űreszközökkel történik. Kétségtelen, hogy helyszíni (in-situ) űrszondás vizsgálatok derítették fényt a kis égitestek fizikai tulajdonságainak a Földről nem megfigyelhető finom részleteire, de ezek az eszközök igen korlátozott számban és mértékben alkalmazhatók a vizsgálandó objektumok sokfélesége (taxonómiai diverzitása) és egy-egy típusukon belüli igen nagy száma, illetve a nyilvánvalóan nagy távolságuk által behatárolt időbeli elérhetőségi korlát miatt – és nem utolsósorban az anyagi lehetőségek által szabott korlátok miatt is. Sőt, ma a kis égitestek újabb és újabb osztályait, altípusait azonosítják, illetve fedezik fel, ami újabb kihívást, új feladatokat jelent a megfigyelő csillagászat és az űrkutatás számára. Ezért tehát ma is csak a földi bázisú, illetve a földi légkörön kívülre telepített űrteleszkópokkal végzett távoli megfigyelések adnak a kis égitestekre statisztikailag jelentős mennyiségű és minőségű mintát, megfigyelési anyagot ezeknek az égitesteknek fizikai paramétereire, típusaik globális tulajdonságai jellemzésére, eredetüknek és fejlődéstörténetük tisztázására. Nyilvánvalóan még nagyon hosszú ideig csak a csillagászat eszközeivel és kutatási módszereivel tanulmányozható a sok Naprendszerbeli kis égitest. A dolgozat is a kis égitestekről a földi és űrcsillagászat eszközeivel kapott megfigyelések értelmezésén keresztül azok bizonyos típusai közötti evolúciós kapcsolat feltárásával foglalkozik. Nevezetesen, az ekliptikai üstökösök és más, velük kapcsolatban lévő egyszerű felépítésű kis égitestek közötti genetikai kapcsolat vizsgálatával ezen kis égitestek megfigyelt tulajdonságai alapján vizsgálni az ekliptikai üstökösök eredetét.

Budapest, 2011. szeptember 30.

Rövidítés	idegen nyelven	magyarul
ACS	Advanced Camera for Surveys	Fejlett technológiájú (Nagy teljesítményű) Átvizsgáló Kamera
ALMA	Atacama Large Millimeter Array	Atacama Nagy Milliméteres Antennarendszer
AO	Adaptive Optics	Adaptív Optika
APL	Applied Physics Laboratory	Alkalmazott Fizikai Laboratórium
AU	Astronomical Unit	Johns Hopkins Egyetem, Laurel, MD
$BV(RI)_c$	B, V, R_c, I_c	csillagászati egység (cs.e. vagy CsE)
CCD	Charge-coupled Device	B, V, R_c, I_c fotometriai rendszer
CEN	Centaur	Töltéscsatolt eszköz
CKBO	Classical Kuiper Belt Object	kentaur (égitest-csoport a Naprendszerben)
CKBO-HI	CKBO – High-Inclination	klasszikus Kuiper-öv objektum
CKBO-LI	CKBO – Low-Inclination	nagy inklinációjú CKBO
CsE	–	alacsony inklinációjú CKBO
DD/DDT	Discretary Director (Time)	Csillagászati Egység
DIXI	Deep Impact eXtended Investigation	Igazgatói rendelkezésű (távcső) idő
DS1	Deep Space 1	Deep Impact kiterjesztett kutatási program
EC	Ecliptic Comet	ekliptikai üstökös
EKBO	Edgewort-Kuiper Belt Object	Edgeworth-Kuiper-öv objektum
EPOXI	EPOXI = EPO(Ch) + (DI)XI, ahol EPOCH = Exoplanet Observing and Characterization DIXI = Deep Impact eXtended Investigation	Naprendszeren kívüli bolygó kutatási program és Deep Impact kiterjesztett kutatási program
ESA	European Space Agency	Európai Űgynökség
ESO	European Southern Observatory	Európai Déli Observatórium
HRI	High Resolution Instrument	Nagyfelbontású műszer/képalkotó eszköz
HMC	Halley Multicolour Camera	Halley Többszínsávú képfelvévő Kamera
HST	Hubble Space Telescope	Hubble Űrtávcső
HTC	Halley-type Comet	Halley-típusú üstökös
IDL	Interactive Data Language	Magasszintű interaktív program-környezet
ILM	Isothermal Latitude Model	Izotermális szélességi modell
IRS	InfraRed Spectrograph	Infravörös Spektrográf (NASA Spitzer)
ISO	Infrared Space Observatory	Infravörös Űrobservatórium
JPL	Jet Propulsion Laboratory	Sugárhajtómű Laboratórium
KBO	Kuiper Belt Object	Kuiper-öv objektum
KFFO	–	Kozmikus Fizikai Főosztály (MTA KFKI RMKI)
KHTP	–	korlátozott háromtest-probléma
KKHTP	–	kör korlátozott háromtest-probléma
LSST	Large Synoptic Survey Telescope	Nagy Szinoptikus Átvizsgáló Teleszkóp
LUT	(Color) Lookup table	Számítógépi szintáblázat, színskála, képelem – szín megfeleltetés
MCSE	–	Magyar Csillagászati Egyesület
MIPS	Multiband Imaging Photometer for Spitzer	Többsávú Képalkotó Fotométer a Spitzerre
NASA	National Aeronautics and Space Administration	Nemzeti Repülési és Űrhajózási Hivatal (USA)
NIC	Nearly-isotropic Comet	közel izotróp pályaeloszlású üstökös
Pan-STARRS	Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System	Nagylátómezejű Átvizsgáló Teleszkóp és Gyors Reagálási Rendszer
PC	Planetary Camera	Bolygókamera
PC2	Planetary Camera 2	Bolygókamera 2
–	prolate ellipszoid	$a > b = c$ fénagtengelyekkel leírható elnyújtott ellipszoid
PSF	Point Spread Function	pontszórási függvény
ROSAT	ROentgen SATellite	Röntgencsillagászati mesterséges hold
RMKI	–	Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet (MTA KFKI)
RXTE	Rossi X-ray Timing Explorer	Rossi nagy időfelbontású röntgencsillagászati mesterséges hold röntgen szatellit
SDO	Scattered Disk object	Szóró Korong Objektum
SEPPCoN	Survey of Ensemble Physical Properties of Cometary Nuclei	Az üstökösök magok együttes fizikai tulajdonságait vizsgáló kutatási program
SST	Spitzer Space Telescope	Spitzer Infravörös Teleszkóp
STM	Standard Thermal Model	Standard Hőmodell
STScI	Space Telescope Science Institute	Űrteleszkóp Tudományos Kutatóintézet
TFO	–	Technikai Főosztály (MTA KFKI/RMKI 1980-as évek)
VLT	Very Large Telescope (ESO)	Nagyon Nagy Teleszkóp-rendszer (ESO)
WFPC	Wide-Field Planetary Camera	Széleslátómezejű és Bolygókamera
WFPC2	Wide-Field Planetary Camera 2	Széleslátómezejű és Bolygókamera 2

1. Bevezetés

Az üstökösök, kisbolygók, meteoroidok a Naprendszer kisebb égitestei. Méretük a méterestől a mintegy 10^3 kilométeresig terjedő mérettartományba esik, amelynek alsó határán vannak a mintegy méteres – százméteres mérettartományba eső kis testek, a meteoroidok, a felső határon pedig a legnagyobb méretű aszteroidák. Az üstökösök magja, magtöredékek mérete a néhány száz méterestől, például a C/1999 S4 (LINEAR) és 73P/Schwassmann-Wachmann 3 üstökösök magtöredékei méretétől a mintegy 80 kilométer közötti mérettartományba esik (Hale-Bopp). Bár a Plútót és az eddig felfedezett legnagyobb méretű kisbolygókat a Nemzetközi Csillagászati Unió 2006-ban kelt határozatai¹ nyomán törpebolygóknak nevezzük (lásd még Green 2006), de a kis égitestek fizikai tulajdonságainak kutatása során együtt érdemes vizsgálni a Naprendszerbeli kis égitestek különböző osztályait az egyes égitest-típusok között lehetséges kapcsolatok feltárására.

Az üstökösök és az egyszerű felépítésű aszteroidák kutatása több szempontból is fontos és ma különösen időszerű a következők miatt. A kis égitestek közül az úgynevezett primitív kisebb égitestek, vagyis az üstökösök, kentaurok, transzneptun objektumok, az üstökösaktivitást mutató fő-övbeli kisbolygók, valamint más egyszerű felépítésű aszteroidák különösen fontosak a Naprendszer kialakulási körülményeinek megismerésében. Ezek az egyszerű felépítésű, őseredeti (primordiális) kis égitestek a bolygórendszerünk kialakulásakor maradványanyagok, amelyek belsejükben nagyrészt még szinte érintetlenül megőrizték a képződésükkor az ősi Naprendszerben végbement fizikai és kémiai folyamatok lenyomatát. Az 1. ábra a művész elképzelése szerint bepillantást enged a korai Naprendszerbe, a kialakult üstökösök és kisbolygók, mint építő- és maradványanyag-tömbök világába. A víznek alapvető fontossága van a földi élet kialakulásában és fenntartásában. Az üstökösök és kisbolygók általában fontosak lehettek a nagybolygók vízkészletének létrejöttében – bár a két kis égitest-típus szerepének aránya ebben a folyamatban ma még vitatott, sőt felmerül az is, hogy esetleg más módon is kerülhetett víz a nagybolygókba, de a vízkészlet egy részének bolygókra való eljuttatásában a kis égitestek szerepe jelentős lehetett. A kis égitestek a kezdetektől fogva egymással is és a nagybolygókkal, valamint azok holdjaival is ütköznek és az ilyen kozmikus katasztrófáknak maradandó következményei vannak: becsapódási nyomok, kráterek a felszínen, kémiai összetétel változása (például a vízkészlet növekedése, atmoszférikus tömegvesztés és átalakulások, stb.), a kisebb égitestek felaprózódása. Bolygónk geológiai múltjában több globális méretű katasztrófát okozó becsapódási esemény is történt, amely a földi élővilág evolúciójára is alapvető hatással volt. Üstökösök és kisbolygók meteoritikus törmelék-anyaga és poranyaga szolgáltatja a bolygóközi por legnagyobb részének az utánpótlását, aminek a földpálya közelében a legnagyobb forrása az úgynevezett Taurid-Encke Komplexum. Ebben a több kis égitestet magában foglaló csoportban egyaránt van aktív üstökös, sok aszteroida megjelenésű inaktív üstökösök és primitív aszteroida, valamint több meteorraj is. Egy további fontos modern kutatási irány az üstökösök semleges és ionizált gázanyagának napszéllel, illetve az interplanetáris mágneses térrel való kölcsönhatásának tanulmányozása, a mai úridőjárás hatásainak kimutatása az üstökösök távoli, földi vagy űrcsillagászati megfigyelések által vagy pedig bolygóközi űrszondák, helyszíni űreszközök segítségével.

¹Definition of a Planet in the Solar System, Resolution 5A ("Definition of 'planet'") and 6A ("Definition of Pluto-class objects") of the XXVIth General Assembly of the International Astronomical Union (IAU), Praha, 2006 August 24.

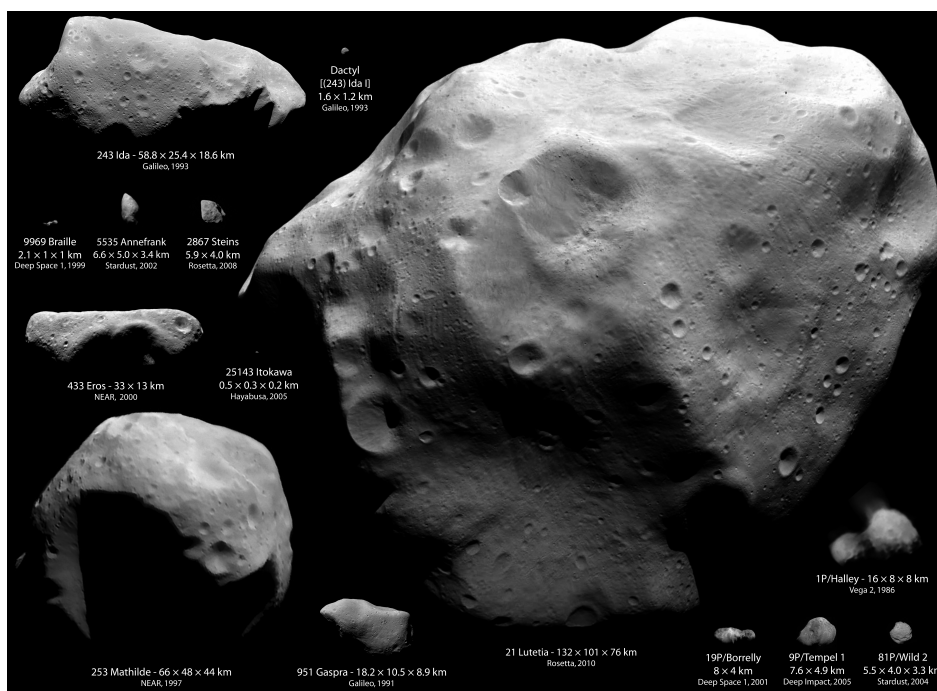


1. ábra. Festőművész elképzelése a korai Naprendszeréről – egy asztrofestészeti alkotáson. A Naprendszer ősköde a planetológus-csillagász és festő William K. Hartmann művészi elképzelése szerint így nézhetett ki a proto-Nap kialakulása után a formálódó bolygó- és üstökös-csírakkal (protoplanétákkal és kometezimálokkal), illetve a maradék-anyagként fennmaradó por- és meteoritikus anyaggal, valamint a már kialakult ősi aszteroidákkal és üstökösökkel. (A kép forrása: William K. Hartmann, http://www.astro.virginia.edu/class/whittle/astr124/matter/hartmann_disk.html).

Még jóval az üresközök megjelenése előtt a csillagászati kutatások világítottak rá arra, hogy a Naprendszer kis égitesteinek tanulmányozása, azon belül is az egyszerű felépítésű, őseredeti kis égitestek, mint az üstökösök, az egyszerűbb felépítésű kisbolygók és a meteoritikus, valamint a poranyagnak a vizsgálata, a fizikai és kémiai tulajdonságaiknak megismerése alapvetően fontos a Naprendszer kialakulása és fejlődése megértése szempontjából.

Egy másik kutatási szálon az üstökösök és bizonyos kisbolygók közötti fejlődési kapcsolat meglétének kiderítésére irányuló vizsgálatok folytak és folynak ma is. Ugyanis az üstökösök vizsgálata mellett a a Naprendszer többi kis égiteste, a kisbolygóknak a bolygórendszerünk kialakulása és fejlődésében betöltött szerepének kutatása is előtérbe került. Azonban a kisbolygók megismerése csak a Ceres² 1801-ben történt felfedezése után kezdődhetett meg és csak később derült fény arra, hogy a kisbolygók bizonyos típusai evolúciós kapcsolatban állhatnak az üstökösökkel. Felmerült, hogy az üstökösök egy részének, nevezetesen az ekliptikai üstökösöknek, bizonyos egyszerű felépítésű aszteroidák lehetnek az ősei a külső Naprendszerben, illetve az üstökösök por- és gáz kibocsátási aktivitásának megszűnése után bizonyos típusú kisbolygóként

²2006 után törpebolygónak nevezzük az addig kisbolygónak nevezett és a kisbolygók fő-övén a Nap körül keringő legnagyobb kis égitestet, az 1 Ceres-t.



2. ábra. Helyszíni űrszondákkal 2010. július 10-ig közvetlen közelről meglátogatott kis égitestek a Naprendszerben: ezek között egyaránt vannak összetett- és egyszerű felépítésű kisbolygók, valamint üstökösök. Az égitestek az eredeti méretükhöz igazított méretskálán szerepelnek a kép-mozaikon. Felülről lefelé haladva soronként a kis égitest, annak mérete (ellipszoid modell nagytengelyeinek hossza), az űrügynökség és űrszonda, valamint a közeli elrepülés éve a következő: 243 Ida 58,6 x 25,4 x 18,6 km és Dactyl nevű holdja ((243) Ida I) 1,6 x 1,2 km (NASA Galileo, 1993), 9969 Braille 2,1 x 1 x 1 km (NASA Deep Space 1, 1999), 5535 Annefrank 6,6 x 5,0 x 3,4 km (NASA Stardust, 2002), 2867 Steins 5,9 x 4,0 km (ESA Rosetta, 2008), 21 Lutetia 132 x 101 x 76 km (ESA Rosetta, 2010), 433 Eros 33 x 13 km (NASA NEAR-Shoemaker, 2000), 25143 Itokawa 0,5 x 0,3 x 0,2 km (ISAS/JAXA Hayabusa, 2005), 253 Mathilde 66 x 48 x 44 km (NASA NEAR-Shoemaker, 1997), 951 Gaspra 18,2 x 10,5 x 8,9 km (NASA Galileo, 1991), 1P/Halley 16 x 8 x 8 km (Szovjet-Interkozmosz-nemzetközi VEGA 2, 1986), 19P/Borrelly 8 x 4 km (NASA Deep Space 1, 2001) 9P/Tempel 1 7,6 x 4,9 km (NASA Deep Impact, 2005), 81P/Wild 2 5,5 x 4,0 x 3,3 km (NASA Stardust, 2004) (a képek forrása: NASA, ESA (Rosetta/OSIRIS), JAXA, RAS, JHUAPL, UMD, kép montázs: Emily Lakdawalla [Planetary Society] és Ted Styrk, APOD 2010. július 26., <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap100726.html>).

élnek tovább. Azonban ezt az evolúciós kapcsolatot nagyobb részt égi mechanikai módszerekkel, a kis égitestek mozgásának hosszú időtartamú végigkövetésével vizsgálták és csak kisebb részben az üstökösök és bizonyos kisbolygók fizikai tulajdonságainak vizsgálatára alapozták ezeknek a kis egyszerű felépítésű égitestek közötti szorosabb kapcsolatát. Hosszú ideig egyszerűen nem volt elegendő megfigyelési anyag az üstökösök magjáról, illetve azokról a kisbolygókról, amelyek fejlődési kapcsolatba hozhatók az üstökösökkel. Naprendszerünk első kis égiteste³ amelyet közelről űreszközök segítségével tanulmányozhattunk a 21P/Giacobini-Zinner-üstökös közeli

³A bolygóholdaktól, mint kis méretű égitestektől eltekintve, a Nap körül keringő kis égitesteket értve itt kis égitest alatt.

plazma környezete volt 1985-ben, de az első közeli képfelvételek a Halley-üstökös magjáról három űrszondával készültek 1986-ban. Majd 1991-től űrszonda által közelről vizsgált első fő-övbeli kisbolygó, a 951 Gaspra után sorra következtek egyszerű és összetettebb felépítésű aszteroidák, illetve több üstökös is. A 2. ábra a 2010. július 10-ig közelebből is megismert kis égitesteket mutatja méretükhöz igazított skálán. Ezen az ábrán jól látható a kis égitestek méretének széles skálája, alakjuk és felszíni morfológiájuk rendkívüli sokfélesége, diverzitása. A legkisebb üstökös- és aszteroidák (például 19P/Borrelly és 25143 Itokawa), illetve a legnagyobbak (1P/Halley és 21 Lutetia) mérete és alakja közötti nagy különbség igen szembeütő.

Az üstökösök lényegi alkotórészét jelentő magját azonban a földfelszíni teleszkópokkal nagyon nehéz megfigyelni. A földfelszíni csillagászati megfigyelések nehézségei miatt az üstökösökre megbízható adatok ritkasága, valamint statisztikailag jelentős, bővebb minta hiánya az 1990-es évek elején még jellemző volt. A Halley-üstökös 1986-ban történt helyszíni űrszondás vizsgálatáig nem ismertük közelebből az üstökösök magját és még ezután is évekig csak földi távcsöves megfigyelésekkel lehetett az üstökösöket tanulmányozni. Ez a megfigyelési adat hiány és az üstökösökről az 1990-es évek elején meglévő hiányos ismeretek motiválták a kutatómunkámat, amelyet a disszertációban ismertetek. A Hubble Űrteleszkóp (HST) működésének 1990-es kezdete után felmerült bennem, hogy az addig kevésbé ismert, de jól ismert pályájú, a megfigyelhetőségüket előre jól megtervezhető Jupiter üstököscsaládhoz tartozó vagy újabb elnevezésükkel ekliptikai üstökösöket (Levison 1996) érdemes lenne a földi légkörön túl keringő űrtávcsővel is megfigyelni, ugyanis ekkor bolygónk légkörének a csillagászati megfigyelésekre gyakorolt káros zavaró hatásai nem jelentkeznek.

A disszertáció alapvető tudományos célkitűzése az üstökös- és aszteroidák szerzett ismereteink korszerű csillagászati módszerekkel, űrtávcsövekkel történt megfigyelésekkel való bővítése, illetve az így kapott új megfigyelési anyag felhasználásával kibővült, statisztikailag jelentős mintának az elemzése, amely által az üstökös- és aszteroidák egyszerű felépítésű kis égitestek közötti fizikai és evolúciós kapcsolat újabb megfigyelési eszközökkel és adatelemzési módszerekkel történő kimutatása a korábbiaknál megalapozottabbá válik. Ezek a vizsgálataim a megfigyelések előre tervezhetőségét is figyelembe véve alapvetőem az ekliptikai üstökösökre irányultak.

A Hubble Űrteleszkóppal végzett üstökös megfigyelések tudományos interpretációjába 1993-ban kapcsolódtam be és a HST-vel ennek a disszertációnak megírása idején is tervezés alatt állnak a megfigyeléseink egy francia és amerikai kutatókból álló kutatócsoport keretében. Közben két infravörös űrobszervatórium, az Európai Űrügynökség Infravörös Űr-Obszervatóriuma (Infrared Space Observatory, röviden ISO) és a NASA Spitzer Űrteleszkópja (Spitzer Space Telescope, rövid. SST) üstökös-megfigyelési programjában is részt vettem az üstökös- és aszteroidák és azok belső kómájának megfigyelése és a kapott megfigyelési anyag tudományos feldolgozása, értelmezése területén. A munka során lehetőség volt több önálló elképzelés megvalósítására és saját kutatási tevékenységre is. Az üstökösök és a velük kapcsolatba hozható kis égitestek vizsgálatára irányuló, többféle kutatási program során önállóan elért tudományos kutatási eredményeim foglalom össze ebben az értekezésben. A disszertáció főleg a HST és a két infravörös űrteleszkóp megfigyeléseinek általam elvégzett kiértékeléséből kapott eredményeket mutatja be, de földi csillagászati megfigyelési adatokra támaszkodó új, saját eredményeket is ismertet.

A disszertáció a bevezető rész után a következő fejezetekre tagozódik. Az értekezés 2. fejezete azt a tudománytörténeti utat foglalja össze, amelynek során az üstökösökről alkotott mai tudásunk kialakult. Fontosnak tartom, hogy az üstökösök megismerésének önmagában is érdekes és tanulságos történetét, különösen pedig a disszertáció

központi tárgyát képező üstökösmagról, mint égitestről szerzett legfontosabb ismereteket bemutassam abból a célból is, hogy megállapítható legyen az, hogy az értekezésben alkalmazott kutatási módszerek és tudományos eredmények mennyiben újak és hogyan járultak hozzá a tudományterület fejlődéséhez. A történeti visszatekintés fontos része az üstökösök fizikai lényegét jelentő üstökösma, mint új égitest-típus felfedezéséhez vezető út bemutatása és az, ahogyan az üstökösök kutatásában egyáltalán felmerült a létezésük, azaz hogyan történt meg üstökösma-fogalom kialakulása. Általában a felismerések, felfedezések időrendi sorrendjét követem, de néhány esetben a szigorú időrendi sorrendtől eltérrek amikor egyes témákat, rész-témaköröket egybefüggően ismertetek.

A 3. fejezet az üstökösmaokról alkotott mai képet ismerteti és a modern üstökös-kutatás alapvető kérdéseit tárgyalja. A 3.1. alfejezetben azt ismertetem, hogy mennyiben őseredeti kis égitestek az üstökösök és a velük kapcsolatos egyszerű felépítésű kisbolygók. A 3.2. alfejezet a disszertáció témáját képező ekliptikai üstökösökkel kapcsolatos eddig megoldatlan vagy csak részben megoldott tudományos problémákat vázolja.

A 4. fejezet az értekezés tárgyát képező kutatás célkitűzéseit tartalmazza, valamint a kutatás során alkalmazott legfontosabb vizsgálati módszereket sorolja fel. A kutatási célkitűzések és azok megvalósítását elősegítő eszközök, módszerek kiválasztása természetes összhangban van tudományterület még megválaszolatlan vagy még vitatott kérdéseivel, a kutatás ezekre a kérdésekre kíván választ adni, illetve a korábbi ismereteket bővíteni, új megvilágításba helyezni.

A 5. fejezetben az üstökösmaokra és a belső kóma fotometriai paramétereinek meghatározására általam kifejlesztett módszert ismertetem, amely alkalmas a képalakító fotometriai megfigyelések feldolgozására a látható fénytartományban, valamint a termális infravörösben végzett megfigyelési adatok elemzésére. A módszer segítségével az üstökösma fénye elválasztható az aktív, fényes kómától és így a mag fénye közvetlenül is megfigyelhető. Az így kapott fotometria paramétereiből az üstökösma és a kóma (elsősorban a porkóma) alapvető fizikai tulajdonságai meghatározhatók: a mag mérete, közelítő alakja, színe (fotometriai színindexek), tengely körüli forgásidő, az aktív felszíni felület nagysága, a porkibocsátási aktivitás mértéke.

A 6. fejezetben a Hubble Űrteleszkóppal 1991-től, majd az ISO infravörös űrteleszkóppal 1998-tól az ekliptikai üstökösök fizikai tulajdonságainak megismerésére folytatott megfigyelési programok eredményeit ismertetem, kiemelve az általam elért új kutatási eredményeket. Ezekhez szorosan kapcsolódva később a 9. fejezetben bemutatam továbbá a Spitzer infravörös űrteleszkóppal a SEPPCoN (Survey of Ensemble Physical Properties of Cometary Nuclei) űrszillagászati program keretében 2007-ben vizsgált ekliptikai üstökösökről kapott megfigyelési eredményeket is.

A 7 – 12. fejezetekben az ekliptikai üstökösma megfigyelési eredmények értelmezéséből levont következtetéseket taglalom. Ezekben a fejezetekben kerül sor az ekliptikai üstökösök eredetére és néhány fizikai tulajdonságára vonatkozó új kutatási eredményeim ismertetésére.

A 13. fejezetben a közeljövőben az üstökösökkel és más, a Naprendszerhez tartozó őseredeti kis égitestek kutatásával kapcsolatos további terveket ismertetem.

A 14. fejezetben az értekezésben ismertetett tudományos kutatási eredmények eddigi hasznosítását, illetve a jövőbeli hasznosítási lehetőségeket ismertetem.

A 15. fejezetben összefoglaló tömören is és tézispontokban is a saját, illetve a kutatásban túlnyomórészt meghatározó szerepet betöltött saját kutatási eredményeim.

Az alábbiakban rövid történeti áttekintést adok arról, hogyan lettek az üstökösök és a velük evolúciós kapcsolatban lévő bizonyos kisbolygók a mai földi- és űrszillagá-

szati, valamint helyszíni űreszközökkel végzett kutatások fontos cél-objektumai.

2. Történeti visszatekintés

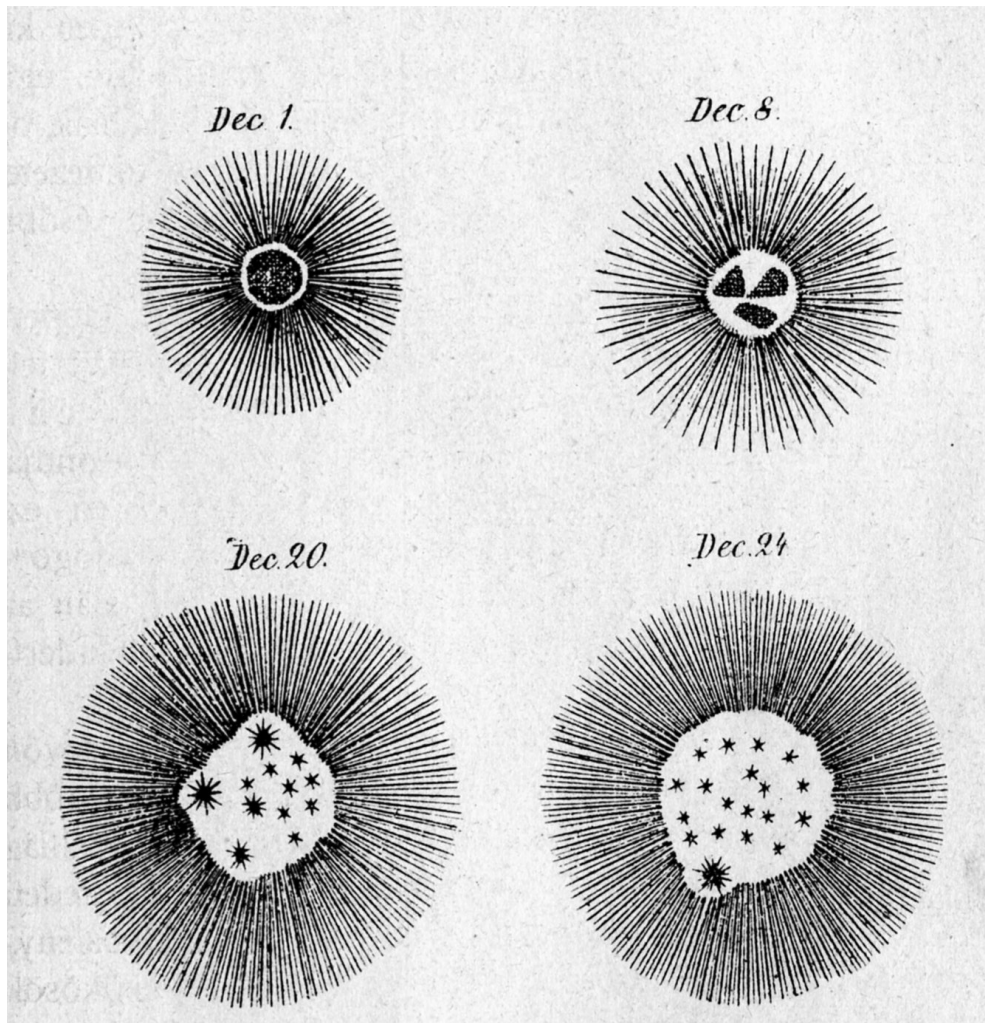
Az égitestekről érkező információ hordozója túlnyomórésztben a róluk érkező elektromágneses sugárzás. A beérkező elektromágneses hullámok jellemzői adott időpillanatban az irány, frekvencia (hullámhossz), amplitúdó, valamint a polarizáció típusa, jellege és annak mértéke, és ezek meghatározása, megmérése a kutatások feladata. Továbbá a részecskesugárzás, illetve a Földre közvetlenül érkező égitest-darabok (a légkörbe belépő meteorok) is információt hoznak a forrás-égitestről. A meteorok megtalálásuk esetén mint *meteoritok* laboratóriumban is vizsgálhatók. Ezenkívül helyszíni űreszközökkel a Naprendszer égitestei fel is kereshetők és akár az űreszköz fedélzeti laboratóriumi felszerelésével in-situ közvetlenül is tanulmányozhatók, sőt a kis égitestekről anyagminták a Földre is hozhatók és vizsgálhatók. Azonban a csillagászatnak hosszú utat kellett megtenni addig, hogy a Naprendszer kisebb égitestei közül az üstökösöknek és kisbolygóknak a fizikai tulajdonságait, kémiai összetételét tanulmányozhassuk, illetve eredetük titkára fényt derítsünk. Az üstökösökről szerzett tudományos ismereteink megszerzésének útja is szorosan kapcsolódik az égitestekről kapott információ összegyűjtésének és feldolgozásának fejlődési útjához, illetve a fizikai megfigyelési és kísérleti módszerek fejlődési útjától nem választható el.

A tudomány történetében az üstökösök vizsgálatának öt korszakát, fejezetét lehet megkülönböztetni. Ezeknek a korszakoknak a kiemelkedő eseményeit, mérföldköveit foglalom össze amennyire csak lehet röviden. Az ókortól Laplace-ig terjedő történeti részeket elsősorban Festou és mások (1993a), Heidarzadeh (2008) összefoglaló munkái alapján ismertettem, de erről az időszakról egyébként magyar nyelven többek között Wodetzky József (Wodetzky 1910) kitűnő és olvasmányos könyve ad összefoglalót. Marsden (1976), Wyckoff (1982), Delsemme (1982), Yeomans (1991), Festou és mások (1993a, 1993b) munkái pedig a modern üstökös kutatás kezdeteit foglalják össze. A magyar üstökös kutatás és a kibontakozó asztrofizika, valamint asztrokémia kapcsolata pedig Konkoly Thege Miklós és munkatársai tudományos közleményei alapján követhető nyomon (például Konkoly Thege 1873, 1910; Terkán 1910; lásd még Tóth 1992 összefoglaló munkáját).

2.1. A kezdetektől a távolságmérésekig

Az emberiség történelmében a fényesebb üstökösöket előrejelezhetetlen váratlan feltűnése, sejtelmes alakja, égi helyzete és mozgása alapján legtöbbször baljós események bekövetkezésének elő- vagy kísérőjeleként tartották és csak nagyon ritka esetben jó jelnek. Hosszú ideig azonban az üstökösöket nem is tekintették égitesteknek és ennek folytán rövid, krónika jellegű feljegyzéseken kívül nem is fordítottak túl sok gondot a csillagászati megfigyelésükre.

Az *első korszak* az ókortól a XV-XVI. századig terjed, amikor az üstökösöket nem is tartották égitesteknek eltekintve egy-két nagy ókori csillagásztól és filozófustól (Apollonios Myndius, Aristarchos és Seneca). Az ókori görög csillagászati távolságmeghatározások csak a Holdra és Napra korlátozódtak (Aristarchos), de az üstökösökre nem, mivel ezeket csak földi légköri jelenségeknek, de legalábbis szub-lunáris, vagyis a Hold és a Föld közötti jelenségnek tartották. Tehát az Aristoteles és Ptolemaios nyomdokain haladó ókori és középkori tudomány nem vett tudomást arról, hogy az üstökösök végülis csillagászati objektumok.



3. ábra. Cysatus (1619) rajza az 1618-ik évi üstökös szétaprózódásáról az 1618. december 1., 8., 20. és 24-i megfigyelések alapján. Mai ismereteink szerint a belső kóma fényesség-kondenzációi az eredeti üstökös-mag töredékei körül kialakult mini-üstökösök. A kép forrása: Cysatus (1619)).

Az üstökösök megfigyelőtől való távolságának és mozgásának meghatározása lehetővé tenné annak eldöntését, hogy égitestek-e vagy sem. Az üstökösök távolságának meghatározását célul kitűző első, úttörő jellegű megfigyelési munkát először Regiomontanus (Johannes Müller) és Paolo Toscanelli végezték a XV. században. Regiomontanus és munkatársa Bernhard Walther együtt figyelték meg az 1472-es üstököst. Regiomontanus számításai szerint az üstökös közelebb van a Földhöz, mint a Hold. Bár később Kepler és Hevelius is hibákat mutattak ki ezekben a számításokban és megfigyelésekben, de ezek ellenére Regiomontanus törekvése az üstökösök vizsgálatának egy új szemléletét, felfogását jelentette és jó példát mutatott a kortárs és későbbi korok csillagászainak. Toscanelli pedig 1433 és 1472 között összesen hat üstököst figyelt meg, köztük az 1456-os (később Halley-üstökösnek elnevezett üstököst), va-

lamint az 1472-es üstökös is; megfigyeléseit később is felhasználták (Celoria 1921). Az első parallaxis mérési kísérletek, amelyekkel az üstökösök távolságát próbálták meghatározni tehát még nem adtak pontos eredményt és így nem sikerült határozott állítást tenni, hogy az üstökösök távoli égitestek, de Regiomontanus és Toscanelli érdeme, hogy az belevonták az üstökösöket is a rendszeresen megfigyelt égitestek körébe. Az első távolságmeghatározási eredmények mellett egy további megfigyelési tény is kérdésessé tette az üstökösökről alkotott arisztotelészi képet. Fracastorius (Girolamo Fracastoro) és Peter Apianus észrevették⁴, hogy az üstökösök csóvái mindíg a Nappal ellenkező irányba mutatnak, ami nem volt érthető az arisztotelészi elképzelésből. A döntő fordulatot az üstökösök távolságának pontos meghatározása hozta el.

2.2. Az üstökösök, mint égitestek: megfigyelések, égi mechanika

Az első pontos méréseket Tycho de Brahe végezte az 1577-es fényes, nagy üstökösről és kimutatta, hogy az üstökös a Holdnál jóval távolabbi, mintegy 230 földugárnyi távolságra, vagyis csaknem 4-szeres Föld-Hold távolságra van, tehát valóban egy távoli égitestről van szó. Tycho eredményét független megfigyelők, köztük Michael Mästlin is megerősítették az üstökös hosszú időn keresztül folytatott megfigyelésével. Ezekből a mérésektől kezdődik a *második korszak*, amikor elsősorban pozíció méréseket végeztek az üstökösök látszó égi mozgásának nyomonkövetésére. Ezeknek a megfigyeléseknek később nagy fontossága lesz az üstökösök térbeli mozgásának leírására, illetve adott esetben később azt is ki lehetett mutatni, hogy egy vagy több korábbi megfigyelés esetleg egy és ugyanannak az objektumnak a többszöri láthatóságát, visszatérését jelenti.

Bár Kepler a bolygók mozgásának törvényeit megalkotta, de az üstökösök mozgását nem tudta helyesen leírni, mert csak igen kis pályáívet tudott megfigyelni az általa megfigyelt üstökös láthatósága alatt. Az üstökösök pályáját Nap fókuszpontú parabolával először Johann Baptist Cysat vagy ismertebb nevén latinul Cysatus írta le először és ő vizsgálta először az üstökösök fizikai természetét (Cysatus 1619). Egyébként a Cysatus által a témakörben bevezetett szakkifejezések legtöbbjét ma is használjuk. Továbbá Cysatus az üstökösök életének egy fontos mozzanatát rajzban dokumentálta, nevezetesen az 1618-as üstökös szétesését, vagyis az üstökös belső kómájában megfigyelt több fénycentrum, kómával körülvett magtöredékek időbeli változását is, ami egyedülálló volt a XVII. század elején (3. ábra). Természetesen akkor még nem tudtak az üstökösök magokról, de ez és a hasonló megfigyelések alapvetően fontosak az üstökösök fizikai tulajdonságainak megértéséhez (lásd még a 4. ábrát is).

Az üstökösök mozgásának leírását célzó első kísérletek (Kepler, Cysatus, Lower, Hooke, Borelli) után Dörffel kimutatta, hogy az 1680-as és 1681-es üstökös egy és ugyanaz az objektum és Nap, mint fókuszpont körül parabola pályán mozog. Newton (1687) a *Principia*⁵ című korszakalkotó jelentőségű művében a tömegvonzás törvényére alapozva kimutatta, hogy ez az üstökös nagyon elnyújtott ellipszis pályán kering a Nap körül és a pályája legközelebbi pontja mintegy 0,0016 CsE távolságra volt a Naptól. Kepler és Newton nyomdokán haladva, Newton gravitációs törvényének felhasználásával Halley (1705) 24 jól megfigyelt üstökös pályáját számította ki és

⁴A Halley-üstökös 1531-es visszatérésekor, valamint a fényes C/1532 R1 üstökös csóvájának megfigyelése alapján.

⁵Philosophiae Naturalis Principia Mathematica

kimutatta, hogy az 1531-ben Apianus, 1607-es Kepler és 1682-ben Newton által megfigyelt üstökös egy és ugyanazon objektum és kiszámította ennek az üstökösnek a legközelebbi napközelségének időpontját (1758), ezen felül az 1456-os üstököst is ezzel az égitesttel azonosította. Az üstökös sikeres megtalálása és a Halley által kiszámított pályán való mozgása alapján bizonyossá vált, hogy az üstökös a tömegvonzás által meghatározott pályán a Nap körül kering és rendszeresen visszatér (periódikus). A Halley által azonosított üstököst később róla nevezték el (mai hivatalos jelölése 1P/Halley, ahol "P" a periódikus, visszatérő üstökösre utal). Az üstökösöknek a tömegvonzás törvényei szerinti Nap körüli keringő mozgásának bizonyítása egyben a gravitáció törvényének a bolygókon és holdjaikon (például Jupiter-holdak) kívül bolygórendszerünk egészére való érvényességét is jelentette. Ezután az üstökösöket a Nap körül keringő égitesteknek tekintették és nagyobb figyelmet fordítottak a csillagászati megfigyelésükre.

A csillagászat hosszú ideig csak az égitestek irányának, égi pozíciójának a megmérést jelentette, majd egyre inkább a fizikai tulajdonságaik megismerése került előtérbe. Így történt ez az üstökösök esetében is. A XVIII-XIX. század fordulójáig a csillagászati megfigyelő eszközök, az asztrometriai, égi mechanikai módszerek – elsősorban a pálya- és perturbáció számítás, integrációs és iteratív eljárások tökéletesedése az égitestek mozgásának egyre pontosabb leírását tették lehetővé.

A XVIII-XIX. sz. fordulójának legkiemelkedőbb üstökös felfedezői és megfigyelői voltak Caroline Herschel, Charles Messier, Jean-Louis Pons, akiknek nevét mindenképp érdemes itt megemlíteni. Egyre több új üstököst fedeztek fel és ezek között voltak rövid keringési idejűek is, amelyeket időről-időre rendszeresen visszatértek, újra megtalálták és megfigyelték azokat. Ilyen volt például a 2P/Encke-üstökös 1786, 1795, 1805, 1818 és 1822-es visszatérése (Encke 1829). Egy üstökös felfedezésekor fontos eldönteni, hogy valóban új üstökösről van-e szó, vagy egy korábban megfigyeltről, amelynek pályaelemei időközben jelentősen megváltoztak, ugyanis például ha egy üstökös vagy más kis égitest elhalad valamelyik nagybolygó, például a Jupiter közelében, akkor a kis égitest pályaelemei jelentősen megváltozhatnak. Egy üstökös különböző időpontokhoz tartozó pályaelemei között teremt kapcsolatot a Tisserand-kritérium (Tisserand 1889), amely szükséges feltétel két üstökös azonosságára. A Tisserand-kritérium az égi mechanika kör korlátozott háromtest-probléma (KKHTP) mozgáselemletéből levezethető és a Nap – nagybolygó – üstökös esetében a következő alakban írható fel (Murray & Dermott 2000; Érdi 2001)

$$\frac{1}{2a} + \frac{n_b}{k} [a(1 - e^2)]^{1/2} \cos(i) = C, \quad (1)$$

ahol C állandó és dimenziója $1/\text{CsE}$. Ebben a, e, i az üstökös pályaelemei, n_b a nagybolygó, például a Jupiter középmozgása, k a Gauss-féle gravitációs állandó. A Tisserand-kritérium bár közelítő összefüggés, jól használható az üstökösök azonosítására. Ugyanis ha egy üstökös elhalad például a Jupiter mellett, pályája igen megváltozhat. A Jupiter megközelítése előtti és azutáni pályaelemekkel C értékét kiszámítva ennek közelítő állandósága mutatja az üstökös azonosságát a különböző pályák (pályaelemek) ellenére. A C paraméter csak a szoros megközelítés időszakában mutat jelentős változást és a gyakorlati tapasztalatok szerint a Tisserand-kritérium ennek ellenére jól használható: a szoros megközelítések időszakától eltekintve az üstököspálya nagy részén C közelítőleg állandó marad. Sőt, Levison & Duncan (1997) által készített, egy milliárd év időtartamra kiterjedő, a valós Naprendszerre vonatkozó numerikus szimuláció szerint a figyelembe vett nagybolygókra vonatkoztatott Tisserand-paraméter csak kis oszcillációt mutat a kis égitestekre, vagyis hosszú időtartam

alatt is közelítőleg állandó marad (lásd Levison & Duncan (1997) 6a ábráját).

A Tisserand-paramétert a számításokban a leggyakrabban a Jupiterre vonatkoztatjuk, mert a bolygóóriás nagy tömegéből adódó gravitációs tere alapvetően befolyásolja a kis égitestek mozgását. Jupiterre vonatkoztatott Tisserand-paraméter a rendszer μ' tömegparaméterének nagyságrendjébe eső közelítéssel (Murray & Dermott 2000)

$$T_J = \frac{a_J}{a} + 2 \left[\frac{a}{a_J} (1 - e^2) \right]^{1/2} \cos(i_k) + O(\mu') \quad (2)$$

dimenziótlan mennyiség, ahol a $\mu' = m_J/(m_\odot + m_J) = 0,0009538 \approx 0,001$ a KHTP tömegparamétere (nem tévesztendő össze a $\mu = k^2(m_\odot + m_J)$ kéttest-probléma tömegparaméterével), itt $m_\odot$ a Nap, m_J a Jupiter tömege. Az $a_J = 5.208$ CsE a Jupiter pálya fél nagytengelye, a, e az üstökös vagy más kis égitest pályájának fél nagytengelye, excentricitása, és $i_k = i - i_J$ az üstökös és a Jupiter pályasíkjának kölcsönös szöge (kölcsönös inklinációja), rendre. A kölcsönös inklináció meghatározása a kis égitest és Jupiter pályája felszálló csomó hossz pálya-elemeinek felhasználásával

$$\cos i_k = \cos i_J \cos i + \sin i_J \sin i \cos(\Omega - \Omega_J) \quad (3)$$

alakban írható, ahol Ω a kis égitest felszálló csomó hossz szög-pálya-elme, Ω_J a Jupiter pálya felszálló csomó hossza. A gyakorlatban i_k helyett az üstökös inklinációját (i) elegendő figyelembe venni, mert a Jupiter inklinációja az ekliptika síkjához kicsi ($i_J = 1,305^\circ$) és az üstökösöké általában ennél jóval nagyobb (Kresák 1982).

A Tisserand-kritérium csak a kör korlátozott háromtest-probléma égi mechanikai modell keretében létezik, mely a nagybolygó (például a Jupiter) pályájára körpályát tételez fel, ami megszorítás a nagybolygó pályájára. Bár a Jupiter pálya excentricitása kicsi (0,048) és így körrel a pályája közelíthető, de a valóságban viszont a Jupiter pályája ellipszissel jobban közelíthető és a Jupiter pályája maga is lassan változik a többi bolygó perturbáló hatására.

A Tisserand-paraméter másik alkalmazása a nagybolygó (Jupiter) és a kis égitest relatív napköri keringési sebességének (U) összehasonlítása, ami egyben a bolygónak a kis égitestre gyakorolt perturbáció erősségét, hatását is méri

$$U = v_J \sqrt{3 - T_J}, \quad (4)$$

ahol v_J a Jupiter pályabeli sebessége (ez körsebesség a KKHTP feltételezésével). A Tisserand-paraméter a Jupiterhez való kötődés alapján az üstökösök egy korszerű, égi mechanikai alapon történő osztályozását teszi lehetővé, amelyet Levison (1996) munkája mutat be. Régebben ugyanis az üstökösöket a pályájuk szerint a napköri keringési idők alapján sorolták be: a 20 évnél rövidebb periódusúakat rövid keringési idejűeknek, 20 és 200 év közöttieket közepes (átmeneti) keringési idejűeknek, illetve a 200 évnél hosszabbakat hosszú keringési idejűeknek nevezték, valamint a Naprendszer belső térségeit először meglátogató hosszú keringési idejűeket pedig dinamikailag új üstökösöknek. Tehát a régebbi osztályozásban a napköri keringési idő alapján önkényesen éles határok szerint sorolták rövid, hosszú periódusú, valamint dinamikailag új üstökösök osztályába az üstökösöket, de a Levison-féle taxonómia az égi mechanikai KKHTP alapján egy megalapozottabb klasszifikációt tesz lehetővé. Amikor $T_J > 3$, nincs erős csatolás a Jupiter és a kis égitest között és a kis égitest pályája nem metszi a Jupiter pályáját. A kentaurok esetében $T_J > 3$. A kentaurok precíz definícióját Jewitt & Kalas (1998) adta meg, e szerint $q \geq q_J$ CsE és $a \leq a_N$ CsE, ahol $q_J = 5$ CsE a Jupiter perihélumtávolsága és $a_N = 30$ CsE a Neptunusz pályájának

félnagy tengelye. Ilyen például az üstökös aktivitást mutató 2060 Chiron kentaur, valamint a kentaur – ekliptikai üstökös átmeneti objektum, a 29P/Schwassmann-Wachmann 1 (29P/SW1) pályája. A Jupiterre $T_J = 3$. Amikor $T_J \approx 3$, akkor nagyon erős a Jupiter hatása, nagyon erős a csatolás, mint például a Jupiter-trójai kisbolygók és még a 2P/Encke üstökös esetében is, amelyre $T_J = 3,026$ (lényegében 3-hoz még nagyon közeli a T_J) és $a < a_J$. A $2 < T_J < 3$ tartományban nagyon erős a Jupiter hatása és ebbe a paraméter tartományba esik a Jupiter üstökös-családja (Jupiter Family Comets, JFC a szakirodalomi elnevezésük). Érdekességgé megjegyzem, hogy a Jupiter üstökös-család elnevezést Lagrange (1814) használta először, aki szerint ezeket az égitesteket folyamatosan a Jupiter löveli ki. Ehhez képest Laplace (1816) az óriásbolygó által dinamikai befogással az eredeti napköri pályájukról eltérített, a Jupiter pályájához koncentrálódó üstökösökről tesz említést. A rövid keringési idejű és a földpálya síkjához kis pályahajlású pályán keringő Jupiter-család üstökösein kívül az Encke-üstökös és a hozzá hasonló pályájú üstökösök is az ekliptika síkjához közel keringenek. Az Encke-üstökös Tisserand-paramétere (3,03) a Jupiter-család Tisserand-paraméter tartományának felső határához nagyon közeli, ezért az Encke-üstökössel kibővített Jupiter-családot ekliptikai üstökösöknek (Ecliptic Comets, ECs) nevezzük. Tehát az ekliptikai üstökösök = JFC + Encke-típusú üstökösök. Az ekliptikai üstökösök tanulmányozása ennek a disszertációnak a témája és ezért itt részletesebben fejtettem ki a Tisserand-paraméterrel és az azon alapuló új üstökös klasszifikációt.

Kevésbé ismert és kutatott tartomány a kisbolygók fő övének külső tartománya, a Hilda-zónában, amelynek objektumaira T_J csak kissé nagyobb, mint 3 és $a < a_J$, vagyis mozgásukra a Jupiternek még hatása van és a Jupitert gyakran megközelíthetik (a klasszikus Hilda-zóna többi objektuma elkerüli a Jupiterrel való szoros közelségeket). A Hilda-zóna azon objektumai, amelyekre a Jupiternek többször és hosszú ideig erős perturbáló hatása van, kvázi-Hilda üstökösöknek nevezzük (Kresák 1979; Tancredi és mások 1990; l. még Toth 2006a, 2006c). Ezek az objektumok gyakran válnak a Jupiter időlegesen befogott holdjaivá, illetve beleütközhetnek a bolygóóriásba, mint az a D/Shoemaker-Levy 9 üstökös darabjaival történt 1994-ben.

A $T_J < 2$ Tisserand-paraméterűek a közel-izotróp pályaeloszlású üstökösök, mint például a Halley-üstökös család, illetve az Oort-felhő üstökösei. A szakirodalom ezekre a NIC (Nearly-isotropic Comets) rövidítést használja (Levison és mások 2002). Az Oort-felhővel kapcsolatos üstökösöknek retrográd pályája is lehet és ezeknek Tisserand-paramétere negatív, mivel pályahajlásuk az ekliptikához $90^\circ < i < 180^\circ$, vagyis $\cos(i_k) < 0$.

Az üstökösök pályatípusainak mai modern, a Tisserand-paraméter segítségével történő osztályozása kiküszöböli a keringési idő alapján – bár megfigyelési tapasztalatokon alapuló, de mégis csak önkényes felosztását és a KKHTP keretében égi mechanikailag megalapozottabb taxonómiát tesz lehetővé. Az ekliptikai üstökösökkel foglalkozó kutatómunkám során a Tisserand-paramétert használtam fel az ilyen üstökösök kiválasztására, besorolására.

A Tisserand-paraméterrel, mint a dinamikailag különböző üstökös-típusokat megkülönböztető paraméterrel összefüggésben itt említtem meg, hogy az üstökösök eredetere, Naprendszerbeli származási helyükre, forrásvidékeire nézve csak a XX. század közepén alakultak ki az első, ma is elfogadott elképzelések. Oort (1950) kimutatta, hogy létezik a Nap körül egy mintegy 50000 csillagászati egység távolságra kiterjedő⁶

⁶A Nap gravitációs tere által utalt gömbalakú tér-rész rádiusza mintegy 1,5 fényév, tehát az Oort-felhő legfeljebb ilyen távolságig terjedhet.

gömbszimmetrikus üstökösfelhő, amely még központi csillagunk gravitációs hatása alatt áll és benne az üstökösök a Nap körül keringenek. Ebből, a később Oort-felhőnek elnevezett üstökösfelhőből a közeli csillagok vagy nagytömegű csillagközi molekulafelhők gravitációs perturbáló hatására bekerülhetnek a Naprendszer belső térségeibe és a földi megfigyelő számra dinamikailag új, illetve nagyon hosszú keringési idejű üstökösként tűnnek fel. Még Oort vizsgálatai előtt Öpik (1932) már kimutatta, hogy a Nap körül egy ilyen távoli hipotetikus felhő a Naprendszer élettartamán keresztül stabilan létezhet. Azonban az Oort-felhővel kapcsolatos üstökösök Jupiter által történt befogása nem magyarázta kielégítően az ekliptikai üstökösök folyamatos utánpótlását. Ugyanis egyre több égi mechanikai számítás és numerikus szimuláció megmutatta, hogy ezeknek az üstökösöknek az eredete nem az Oort-felhő, hanem a Naprendszer más régiója lehet a forrásvidéke. Az ekliptikai üstökösök eredetének kutatásához a Plútó felfedezése jelentős lépés volt. Ugyanis még a Plútó felfedezése után rögtön még abban az évben Leonard (1930) felvetette, hogy a Neptunusz pályáján túl égitestek sokasága kering a Nap körül, amelyek közül az akkor felfedezett Plútó csak az egyik. Ezzel bevezette a Neptunuszon túli objektumok, vagyis transzneptun-objektumok fogalmát. Később Edgeworth (1943, 1949) és 1950-ben Kuiper (1951) egymástól függetlenül, számításokkal megalapozta egy, a Neptunusz bolygó pályáján túli törmelékcorong létezését, amelynek anyaga nem tudott egy vagy több nagybolygóvá összeállni. A transzneptun-övezet létezésének elméleti megalapozása egyben az ekliptikai üstökösök valószínű forrásvidékének beazonosítását is jelentette. Azonban a transzneptun-objektumok felfedezése és ezzel együtt a kis égitestek külső zónájának megfigyelésekkel történő kimutatása csak a XX. század utolsó évtizedében vált lehetségessé (l. még a 3.2 fejezetet). Addig is az üstökösfizikának és a megfigyelő műszertechnikának jelentős fejlődésen kellett átmenni, továbbá egyáltalán az üstökösök lényegét jelentő magjáról való első elképzeléseknek is fel kellett merülni, illetve a mag fizikai tulajdonságainak megfigyelésekkel történő megismerésének kezdeti lépéseit is meg kellett tenni. Az ehhez vezető utat ismerteti a következő, 2.3. fejezet.

2.3. Az üstökösök és a megfigyelési, kísérleti asztrofizika

Az égi mechanika töretlen fejlődése mellett XVIII-XIX. század fordulóján új lehetőségek nyíltak meg az üstökösök és más kis égitestek tanulmányozására. Az üstökösök napköri keringő mozgásának tanulmányozása mellett azonban már ezeknek az égitesteknek a fizikai mibenlétének vizsgálata is felmerült. A XVIII. század végétől kezdődik ugyanis az üstökösök megismerésének *harmadik fejezete*, ami az égitestek fizikai tulajdonságai és kémiai összetétele vizsgálatának kezdeteit jelenti.

Az üstökösmagokról való első közvetett ismeretünket az üstökösök mozgását befolyásoló nem-gravitációs erőhatások kimutatása jelentette. Encke (1820) (l. még Marsden 1976) megállapította, hogy a legrövidebb, 3,3 éves keringési idejű üstökös egymás utáni napközelségeinek időpontja szisztematikusan az előrejelzethez képest 0,1 nappal korábban következett be a nagybolygók perturbációinak figyelembe vétele ellenére is. Tehát valamilyen, a tömegvonzáson kívüli erőhatásnak kellett hatni a később Encke-ről elnevezett (2P/Encke) üstökös napköri keringésére. Később a Halley 1835-ös láthatósága idején Bessel az üstökös kómájának Nap felőli oldalán megfigyelt anyagkiáramlások (5. ábra) fékező hatásának tulajdonította az üstökösök keringési idejének csökkenését és az Encke-féle üstökösnél megfigyelt "sietést" ezzel az úgynevezett nem-gravitációs erőhatással magyarázta (Bessel 1836a, 1836b). Ezeket a repulzív, vagyis "visszalökő", fékező erőhatások okát akkor még nem ismerték, mert ehhez a szilárd, monolitikus üstökösmag modell kellett, amit majd csak több mint száz

év múlva dolgoz ki részletesen Whipple (1950). A monolitikus üstökös mag felszínének aktív területeiről gáz és por áramlik ki és a kiáramlások rakétaszerű fékező vagy gyorsító hatásai okozzák a mag gyorsítását vagy fékezését a napkörüli keringésben.

A már égitestnek tekintett üstökösök anyagára, kémiai összetételére vonatkozó első állítások az üstökösök és meteorok, illetve meteoritek eredetével kapcsolatos. Chladni (1794) javasolta, hogy a meteoritok a világűrben származnak, de ez a felvetést akkoriban inkább elvetették, mint elfogadták, mert a meteoritokat földi vulkáni aktivitási termékeknek tekintették, de Biot (1803) megerősítette Chladni feltevését a meteor–meteorit kapcsolatról. Ugyanis Biot a meteoritok korának legpontosabb kémiai összetétel meghatározását végezte el az 1803-ban Normandiában megfigyelt meteorzápor megtalált darabjaira kimutatva, hogy a meteoritok nem földi vulkáni tevékenység termékei. Itt említem meg, hogy konkrétan az üstökös–meteor fizikai kapcsolatra elsősorban Konkoly Thege Miklós csillagászati és laboratóriumi színpompás vizsgálatai mutattak rá (Konkoly Thege 1910; Tóth 1992). Konkoly Thege kutatásaira az értekezés 17-19. oldalán még visszatérek.

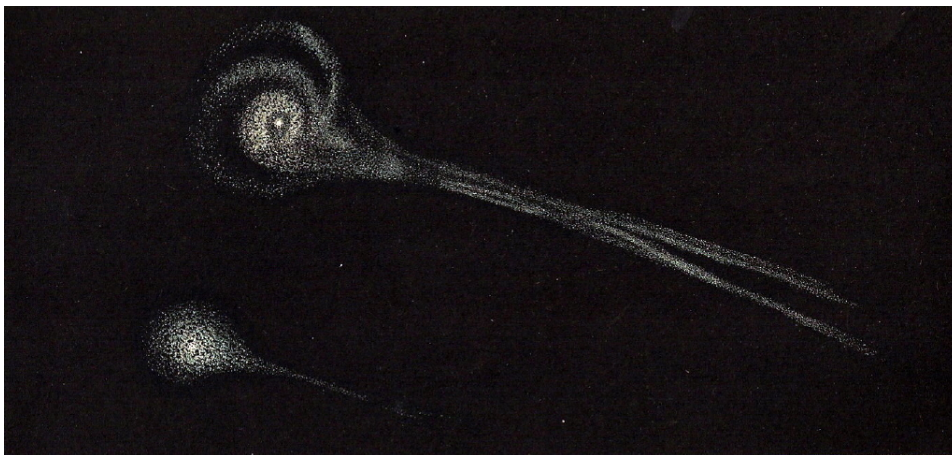
Schiaparelli (1866, 1867) mutatta ki először azt, hogy a Perseida meteorraj egy üstökösrel, az 1862-ben megfigyelt 109P/Swift-Tuttle üstökösrel kapcsolatos, valamint a Leonida meteorraj az 55P/Tempel-Tuttle üstökösrel van szoros kapcsolatban. A meteorokat, meteoriteket egészen az 1960-as évekig üstökös eredetűnek tekintették és ezért helyénvaló itt Chladni és Biot munkáit említeni mivel a meteorok egy része valóban üstökösöktől származik. Ugyanis csak később merült fel és bizonyosodott be az, hogy a meteorok forrás-égitestei nem csak az üstökösök, hanem az kisbolygók is lehetnek (Anders 1964; Wood 1968; Drummond 1982).

Az üstökösök magjáról, mint egy tömbből álló, monolitikus testről alkotott elképzelést Laplace (1813) fogalmazta meg azóta szinte teljesen elfelejtett művében. Laplace szerint az üstökös kómája, mint "pára felhő" naptávolban visszafagy és egy jégtömböt alkot. A meteorok, meteoritikus por, valamint az üstökösökben lehetséges jegekről összegyűlt megfigyelések alapján Laplace után csak több, mint egy évszázaddal került ismét a figyelem középpontjába az üstökös mag azon modellje, amely szerint meteoritikus anyag és jegek konglomerátumából körülbelül 1 kilométeres tömbökből állt össze az üstökösök magja. Robert Grant 1852-ben megjelent könyvében az üstökös kóma legfényesebb részét, az optikai centrumot ("optikai magot") egyben az üstökös szilárd alkotórészének, magjának tartotta⁷. A szilárd, jégből álló (jeget is tartalmazó) üstökös mag modell kidolgozásáig azonban még több fontos megfigyelésnek kellett történni.

Az üstökösösmagból hirtelen, rövid idő (órák, napok) alatt történő nagy mennyiségű anyag kiáramlása, az üstökös hirtelen kifényesedése (outburst, fényességkitörés), valamint az üstökösösmagokról nagyobb darabok leválása, illetve a mag teljes szétesése a mai napig nem tisztázott okokból és folyamatok következtében megy végbe (Boehnhardt 2002, 2004). A kifényesedéseket sokszor követi a mag szétesése, de nem mindig, illetve a mag szétesése nem jár fényességkitöréssel. Ezeknek az eseményeknek kulcsszerepe lehet az üstökösösmagok fiziko-kémiai folyamatainak megértésében, tehát nagyon fontos a megfigyelésük. Az egyik legnevezetesebb és már jól dokumentált ilyen esemény volt a Biela üstökös szétesése 1846-ban (lásd Weiss (1888) összefoglaló művét és a 4. ábrát).

A nagyobb méretű és a Földre hullott, megtalálható, begyűjthető meteoritikus anyagon kívül kisebb méretű szilárd poranyag is van. Olbers 1811-ben (Olbers 1812)

⁷ "It has been stated that within the head of a comet there is usually a bright point termed the nucleus. This is the only part of its structure that excites any suspicion of a solid substance." (Grant 1852).



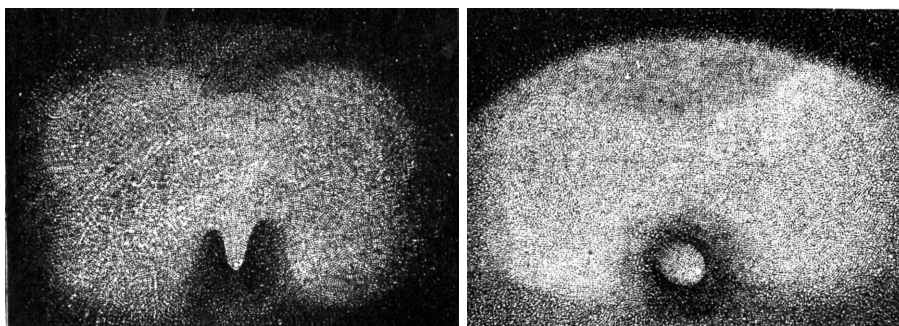
4. ábra. A 3D/Biela üstökösről 1846 februárban, nemsokkal a két darabra történt szétesése után készült metszet (Weiss 1888). Figyelemre méltó a felső komponensnél megfigyelhető spirális jet-szerkezetet mutató porkóma, amit a tengelye körül forgó üstökös-magból kiszabaduló poranyag rajzol ki. A mag forgástengelye csaknem párhuzamos a látóiránnyal, vagyis csaknem merőleges a kép síkjára. A kép forrása: Weiss (1888).

és Bessel 1835-ben (Bessel 1836b) állította először azt, hogy az üstökösökben por van annak alapján, hogy a porcsóvák szilárd porszemcséit a Nap sugárnyomása mozgatja a Nap–üstökös rádiuszvektorral közel párhuzamosan, a Nappal közelítőleg ellentétes irányban a csóvában kifelé. Az üstökös belső kómájától távolodva a porcsóva kiszélesedik, legyezőszerűen szétterül, görbül. A porcsóva alakja, görbülete a porszemcsék tömegétől, sugárnyomási hatáskeresztmetszetétől függ. Az üstökösök porcsóvája kialakulásának a Nap sugárnyomásával történő magyarázatával a fizika történetében korukat megelőző megállapítást tett Olbers és Bessel. Ugyanis az elektromágneses sugárnyomás elméletét Maxwell 1871-ben (Maxwell 1873) és Bartoli 1876-ban (Bartoli 1884) később dolgozta ki és kísérletileg csak a 1900/1901-ben sikerül kimutatni (Arrhenius 1900; Lebedev 1901; Nichols & Hull 1903). A sugárnyomás elméletét később Karl Schwarzschild (1901) továbbfejlesztette, illetve Debye (1909) kiterjesztette atomokra és molekulákra is. A porcsóvához hasonlóan a gázkóma is eltorzul, elgörbül a sugárnyomás hatására. Ezt később az üstökösök hidrogénkoronájának alakjában is megfigyelték az ultraibolya tartományban (Lyman-alfa hullámhossznál) az OAO⁸, OGO⁹ csillagászati mesterséges holdakkal (Keller 1976).

Az üstökös-por a porkómában különböző koncentrációban van jelen, ami kómán belül különböző szerkezeti részek formájában figyelhető meg, jetek, halok, por sűrűsödések (5. ábra). Egyébként a gáz is koncentrálnálódhat ilyen alakzatokban a kómában, ami a kómában lokálisan fényesebb tartományokat, például gáz-jeteket jelent. A Halley-üstökös 1835-ös visszatérése idején igen részletesen vizsgálták a kómáját, a kóma morfológiáját, és benne anyagkiáramlás különböző megnyilvánulásait, jeteket, kúp alakú fényesség növekedést és csökkenést, valamint fényes anyagáramokat figyeltek meg (John Herschel, Bessel, Friedrich G. W. Struve; lásd Donn és mások 1986). Feltűnő volt a Nap felőli oldalon megfigyelt "szökőkút-szerű" kúpos anyagáramlás, amelynek parabola alakú burkolója volt és a parabola tengelye a Nappal közel ellen-

⁸Orbiting Astronomical Observatory

⁹Orbiting Geophysical Observatory

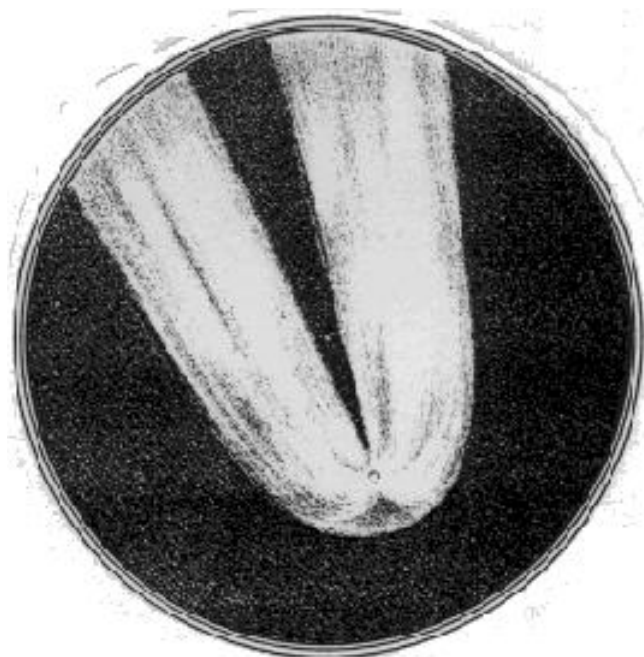


5. ábra. Bessel a megfigyeléseit rajzban is megörökítette a Halley 1835-ös visszatérése idején. A két kép a Halley-üstökös porkómájában megfigyelt "szökőkút-szerű" porkiáramlás 1835 október 8-án (balra) és október 13-án (jobbra) rajza. A két megfigyelés között jelentősen változott az Föld-üstökös rálátási geometria: míg október 8-án oldalról lehetett rálátni a kómára, addig 13-án csaknem szemből (Bessel 1836a). A kép forrása: Bessel (1836a).

tétes irányú volt a belső kómában (5. ábra, lásd még a 6. ábrát Konkoly Thege Miklós megfigyelését a Coggia-üstökösről). Bessel (1836b) ezek alapján posztulálta, hogy az üstökös kómájában az anyag a Nap felé áramlik majd visszafelé fordul egy általa akkor még nem ismert erő hatására. Feodor A. Bregyihin (Bredichin 1903; lásd még Jaegermann 1903) majd Eddington (1910) továbbfejlesztették ezt a mechanikai modellt (Bessel-Bregyihin modell) a belső kóma anyagáramlásának és morfológiájának leírására.

Az üstökösök poranyagának egyik lehetséges vizsgálati módszere a fénypolarizáció megfigyelése. Az üstökösök fényének polarizációját Arago fedezte fel a fényes üstökösökön végzett polarimetriai megfigyelései során. A polarimetriai vizsgálatokhoz egyszerű polariszkóppal nagyobb távcső nélkül fényes objektum kellett és ehhez Arago idejében legalább két fényes üstökös megfigyelésére is alkalom nyílt. Arago a maga készítette kézi polariszkóppal az 1819 II üstökös (C/1819 N1 (Tralles)) majd pedig a fényes Halley-üstökös (1835 III) 1835-ös visszatérése idején fényének polarizáltságát mutatta ki (Arago 1855). Egyébként az üstökösök porkomponensének fénye a legtöbb esetben lineárisan polarizált és a polarizáció fokát megmérték Arago első megfigyeléseit követően. Később Secchi (1861, 1865) azt találta, hogy az üstökösön belül a polarizáció helyfüggő, vagyis a kóma különböző részeiben más-más a polarizáció foka. Arago és Secchi üstökösfizikai megfigyelései már kétségtelenül a megfigyelési asztrofizika irányába tett első fontos lépések voltak. Jóval később Wright (1881) pedig üstökösönként más és más polarizációs fokot talált, mint például az 1881 III esetében 23%-os, az 1881 IV üstökösre pedig 13,8%-ot.

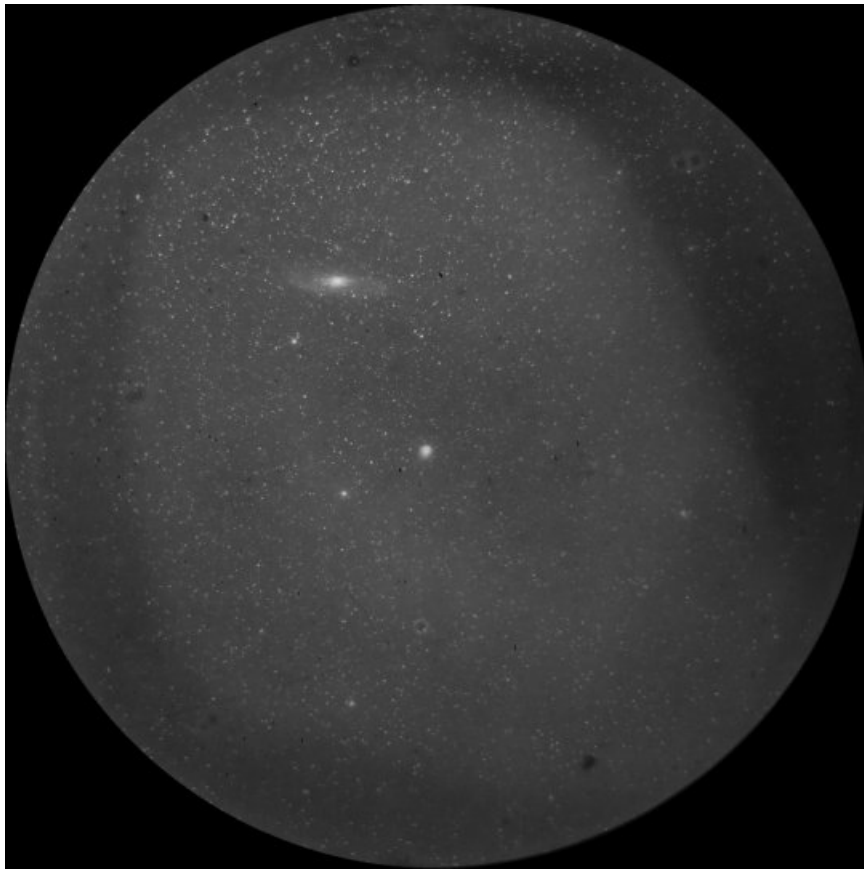
Az üstökösök kémiai összetételének vizsgálatát a színeképelemzés csillagászatba történő bevezetése tette lehetővé. Az égitestekről érkező elektromágneses sugárzás a legfőbb és legkönnyebben megfigyelhető információhordozó, ezért először a látható fény, majd később az elektromágneses színekép többi tartományának a vizsgálata került sorra. A színeképelemzés felé tett első lépések a látható fénytartomány vizsgálatával Newton (1687) valamint a Nap infravörös sugárzása hőhatásának 1800-ban történt felfedezésével Herschel (1800) nevéhez fűződnek. A Nap színeképének első kvalitatív tanulmányozását Wollaston végezte 1802-ben (Hearnshaw 1986). A spektroszkópot 1814-ben készítette el Fraunhofer (1817), amelyet többek között a Nap színeképének kvalitatív leírására is felhasználta, továbbá a diffrakciós rács feltalálásával és a szín-



6. ábra. Konkoly Thege Miklós rajza a Coggia 1874 III (C/1874 H1) üstökösről 1874-ből. Az üstökös porkómájának parabola burkolóval határolt "szökőkút-szerű" szerkezete jól látszik. Konkoly Thege erről az üstökösről készítette az első üstökös-színkép megfigyelését az ógyallai csillagvizsgálójában (forrás: MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézet könyvtára, Budapest).

képelemzésbe való bevezetésével már kvantitatív vizsgálati módszerré tette a spektroszkópiát. Azonban a kvantitatív spektroszkópia 1859-ben Kirchhoff & Bunsen (1860) által történt bevezetése jelenti az asztrofizika kezdetét, ugyanis ekkor vált lehetővé az egyes kémiai elemeknek, molekuláknak a spektrumban a színkép elemeivel, vonalakkal, sávokkal való azonosítása, többek között a Nap Fraunhofer-vonalainak magyarázata. Ezzel lehetővé vált az égitestek spektrálanalízise, a távoli objektumok kémiai összetételének meghatározása és új korszak kezdődött a csillagászatban. Ezután több mint fél évszázadnak kellett eltelti ahhoz, hogy a pontosan kimért csillagászati és laboratóriumi színképeket meg tudták magyarázni, ugyanis az elméleti fizikai háttér csak később állt rendelkezésre, amely jelentette a sugárzás elméletét és törvényeit, a termodinamikai törvényeket, valamint feltárta az anyag és sugárzás kölcsönhatásait, illetve létrejött az atom- és molekulafizika, valamint a kvantummechanika.

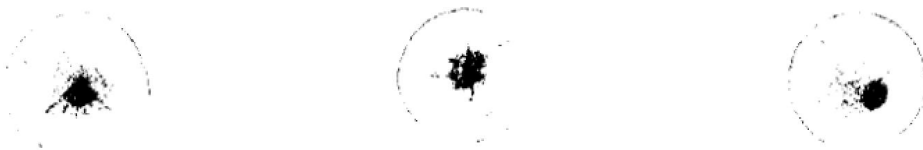
Az első üstökös színképi megfigyelést Donati (1864) végezte az 1864 II Tempel (C/1864 N1) üstökösről, majd nemsokkal ezután Huggins (1868) készítette az 1868 II Winnecke (C/1868 L1) üstökösről. Donati és Huggins a megfigyelt üstökös-színképeket laboratóriumi láng-spektrummal hasonlították össze vizuálisan. Kimutatták a szén jellegzetes, később William Swan brit spektroszkópus tiszteletére Swan-sávoknak nevezett sávjait. A fotografikus megfigyelési módszereknek a csillagászatba, ezen belül is az üstökösök megfigyelésére történő bevezetésével 1858-tól az üstökösfotók készítése, majd később az üstökösök színképének a fotografikus rögzítése és pontos kimérése, dokumentálása, archiválása vált lehetővé.



7. ábra. Gothard Jenő felvétele Holmes-üstökös 1892-es szuperkitörésekor készült a Szombathely mellett lévő obszervatóriumában, Herényben. A kép közepén az üstökös egy kör alakú fényes diffúz folt, tőle balra felfelé az Androméda-köd ($M31 = NGC\ 224$) extragalaxis látható a nagylátómezejű felvételen (a kép forrása: ELTE Gothard Asztrofizikai Obszervatóriuma, Szombathely, Kovács József (2008) és http://hirek.csillagaszat.hu/egyeb_temak_20071229-az-ev-hirei-2007.html).

A színeképelemzés a csillagászatban standard megfigyelési módszerré vált és az üstökösök vizsgálatában is fontos szerepet kapott, mint például a Halley-üstökös 1910-es visszatérése idején. A fluoreszcencia mechanizmusát, amely az üstökösök gázkómájának a fényét okozza épp a Halley spektroszkópiai megfigyelésekből mutatta ki Schwarzschild & Kron (1911). Az 1920-as évekre már mintegy 40 üstökös színeképi vizsgálatát végezte el Baldet (1926) az 1864-től spektroszkópiailag is megfigyelt üstökösökre.

Az üstökösök kémiai összetételének, valamint a meteorok spektroszkópiai vizsgálatában, illetve az üstökösök és meteorok kapcsolatának csillagászati megfigyelésekkel történő kimutatásában jelentős magyar kutatási eredmények születtek a XIX. század második felében. Konkoly Thege Miklós obszervatóriuma 1871-ben kezdte meg működését Ógyallán (Komárom megye) és az 1874-es esztendőben kezdődött el az üstökösök spektroszkópiai megfigyelése (6. ábra), majd egy évvel később a meteoroké. Igen fontos eredmény volt, hogy a spektroszkópiai eredmények rávilágítottak az üstökösök és



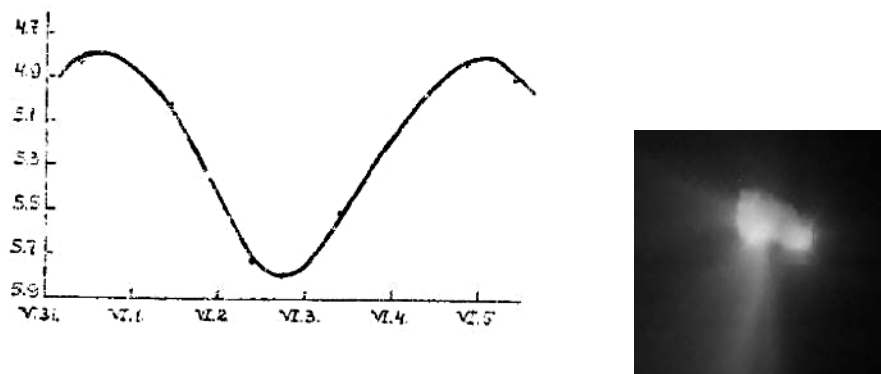
8. ábra. A Halley-üstökös kómájában megfigyelt jetek Terkán Lajos 1910. május 23., 25. és 26-án az ógyallai csillagvizsgálóban készült rajzai (a kép forrása: Terkán 1910).

a meteorok közötti rokonságra (Konkoly Thege 1910; Tóth 1992; Vargha 2001).

A magyar csillagászat és a csillagászati fotográfia másik kiemelkedő személyisége, Konkoly Thege barátja, kollégája, Gothard Jenő felvételen örökítette meg 1892-ben a titokzatos, szuperkitörést mutató 17P/Holmes (17P/1892 V1) ekliptikai üstökös (7. ábra). Ez azért is fontos megfigyelés, mert a Holmes-üstökös 2007-ben ismét látványos szuperkitörést produkált, aminek a pontos okát még ma sem ismerjük, de az üstökös magját HST-vel is sikerült megfigyelnem az üstökös két különböző napközelsége idején (l. még a 6.2.3. pontot és ott a 40., 41., valamint 42. ábrákat is).

A Halley-üstökös 1910-es láthatósága idején Konkoly Thege Miklós Ógyallán nagyszabású megfigyelési kampányt szervezett. Ennek során sikerült a Halley kóma szerkezetének finom részleteit is megfigyelní: kifényesedéseket és jeteket (Terkán 1910; lásd 8. ábra). Terkán a Halley-üstökös kóma fényességének periódikus változását is megfigyelte. Az üstökös fényességének több napon keresztül tartó megfigyeléséből kapott fénygörbét a 9. ábra mutatja (Terkán 1910). Terkán azzal magyarázta a fénygörbét, hogy "a mag alakja talán körte alakú, mely a hossztengelyére valamelyik ferde fekvésű tengely körül forog. A minimum akkor áll be, mikor a mag hegyesebb vége fordul felénk..." (Terkán 1910). Ez egy úttörő javaslat volt abban a korban, mert i) szilárd, monolitikus üstökös magot tételez fel, ii) a mag forgása, a Nap és a földi megfigyelő geometriai helyzete adja a megvilágított és látható felszín fényességét, illetve a fényváltozást. Ma már tudjuk, hogy a Terkán által megfigyelt fénygörbe nem közvetlenül az üstökös mag fényességének változása a tengely körüli forgás miatt lép fel a látszó megvilágított felület periódikus változásából, hiszen az akkori kis távcsövekkel a mag fényét közvetlenül nem lehetett megfigyelní. Minden bizonnyal a Halley kómájába a magból periódikusan kikerült poranyag okozta periódikus fényességváltozásról lehet szó, ugyanis a mag aktív részét forgási periódusonként megvilágítja a Nap és onnan periódikusan por kerül a kómába, miközben a mag felszínének többi része nem aktív. A későbbi csillagászati fotometriai megfigyelések kimutatták, valamint a helyszíni űrszondás vizsgálatok megerősítették (pl. a Halley-üstökös magjáról készült felvételek), hogy a kisbolygók és üstökös magok periódikus fényességváltozása, fénygörbéje a Nap által megvilágított elnyúlt, szabálytalan alakú, tengelye körüli forgása következtében periódikusan változó látszó felület következménye. A disszertációmban bemutatott üstökös mag fénygörbék is jól szemléltetik és alátámasztják Terkán Lajos közel száz esztendővel előtti elképzelését.

A magyar csillagászat tehát a kor színvonalának megfelelő jelentős eredményeket ért el a XIX-XX. század fordulóján többek között az üstökösök kutatása területén színképelemzéssel, fotometriával, valamint korszerű műszerek és módszerek alkalmazásával. Konkoly Thege Miklós és munkatársai nevéhez fűződik az üstökösök és a



9. ábra. A Halley-üstökös belső kómájának periódikus fényességváltozása Terkán Lajos ógyallai megfigyelései alapján (balra), valamint illusztrációként a "körte" alakú üstökösrag a VEGA 2 űrszonda által készített képfelvétel (jobbra). Az elnyújtott alakú forgó test fényváltozást mutat, amelynek fénygörbéje megfigyelhető (a kép forrásai: a fénygörbe megfigyelés 3. kép Terkán 1910-es közleményéből, valamint a "körte" vagy "földimogyoró" alakú üstökösragról a VEGA 2 űrszonda a Halley-üstökös magjáról 1986. március 9-én készített legközelebbi képfelvétele).

Naprendszer egyéb égitesteinek – főleg a Nap és Jupiter – rendszeres megfigyelése, a csillagászati színképelemzés és fotometria, a megfigyelési asztrofizika, valamint az asztrokémia hazai úttörő jelentőségű művelése. A fizika, kémia, asztrofizika, a megfigyelt színképek értelmezése nagyívű fejlődésnek indult a világon az 1920-as évektől. Az üstökösök kutatásának újabb korszakába az átmenetet az üstökösök színképének, kémiai összetételének egyre alaposabb megismerése, az első üstökösrag modellek megalkotása, valamint a rövid keringési idejű üstökösök eredetének kiderítésére irányuló kutatások jelentették.

Az üstökösök látható fénytartományban megfigyelt spektruma részleteinek vizsgálata (Swings 1941; Greenstein 1958) nyomán egyre többféle atom és molekula, ion, valamint molekula-ion kimutatása vált lehetővé az egyre nagyobb teljesítőképességű csillagászati megfigyelési technika fejlődésével. Kiderült, hogy az üstökösök kómájában lévő molekulák, ionok kémiaiilag nem stabilak, hanem fotokémiai folyamat (fotodisszociáció) során bonyolultabb "szülő" molekulákból keletkeztek. Ezt először Wurm (1934) mutatta ki, majd a molekulák kómabeli sűrűségét és a kóma megfigyelhető fényességét Haser (1957) modellezte először részletesebben és modellje ma is használható, illetve összetettebb modellek alapjául szolgált. Wurm (1943) és Swings (1943) azt is felvetették, hogy ezek a bonyolultabb molekulák csak nagyon alacsony hőmérsékleten lehetnek stabilak és kell lenni egy "hűtőszekrénynek", ahol hosszú ideig megőrződtek – és ahogy azt Swings (1948) és Vsekhsviatsky (1948) javasolta az üstökösrag egy olyan szilárd test, amely hordozója ezeknek a jegeknek. Ez azt is jelenti, hogy ez a test hosszú időn keresztül nagy naptávolságban tartózkodik és csak rövid időre kerül napközelségbe úgy, hogy a belsejében a jegek megőrződnek, nem szublimálnak, nem fogynak el. Ezen felül Swings (1942) még azt is javasolta, hogy az üstökös molekulák hasonlóak bizonyos meteoritekben zárványokban talált molekulákhoz. Az előzőekben már utaltam rá, hogy Konkoly Thege Miklós az üstökösök és meteorok spektroszkópiai megfigyelései és szénhidrogén-színképek laboratóri-

umi vizsgálatai alapján már kimutatta az üstökös gázok és meteorok színképének hasonlóságát és ezt Swings megerősítette meteoritok laboratóriumi vizsgálatára alapozva 1942-ben. Swings vizsgálataitól függetlenül Levin (1943) laboratóriumban meteoritokból gázokat szabadított fel és kidolgozta a szilárd meteoritikus anyag felszínéről való gázfelszabadulás, a deszorpció¹⁰ elméletét. A deszorpció a szilárd testekből, azok felszínéről, felszín-közi rétegeiből való gázfelszabadulás, amelyet Levin a meteoritokkal megvalósított és ezen túlmenően még kidolgozta az üstökösökből szublimációval, vagyis szilárd-gáz fázisátalakulással történő gázfelszabadulás első modelljét. Levin szerint az üstökösök egy meteoritikus anyagból álló "homokzátony", "homoksziget" vagy "porsziget". Az üstökösöknek ez a modellje az üstökös kómájának legbelsőbb anyagsűrűsödése, amely gravitációsan kötött por- és meteoritikus anyag halmaza, amit jég tartalmú, szublimációra képes porszemcsék és meteor darabok alkotnak. Ezt az elképzelést Russell (1929) számításai is alátámasztották, amely szerint a meteoritikus anyag szemcséi közötti tömegvonzás megakadályozza a raj ("homoksziget") túl gyors felbomlását. Azonban Russell és mások (1926) már rámutattak arra, hogy a Naphoz túl közel került "napsúrló" üstökösök mintegy 30 cm-es darabjai rövid idő alatt elpárolognak, de ennek ellenére mégis több ilyen üstökös szétaprózódás nélkül vészeli át a napközelséget, vagyis nem biztos, hogy a "homoksziget" modell megfelelő az üstökösök magjaira. Tehát a "homoksziget" modell már a létrejöttékor vitatható volt. Fontos lépés volt a mai üstökösök modellek létrejöttéhez az, hogy az üstökösök "homoksziget" modelljéhez képest Vorontsov-Velyaminov (1926) nem porszemcsékből, hanem 160 m átmérőjű építőblokkokból álló, a tömegvonzásuk által összetartott testet képzelt el, amely elérheti a 25-60 kilométeres kiterjedést is. A megfigyelések szerint (lásd ezen disszertáció 8. fejezetét) az üstökösök magok zöme ennél jóval kisebb, de a törmelékhalmoz vagy építőblokk modell különböző változatai ma is érvényes üstökösök modellek.

Még a "homokzátony" modell koncepció létrejötte előtt felmerült az egy tömbből álló üstökösök mag test, a *monolitikus üstökösök* koncepciója. A Halley-üstökös 1910-es földközelsége idején május 18-án a Nap és Föld között haladt át és látszólag átvult a Nap korongján. Ezt az átvonulást például a Hawaii-szigeteken, Egyiptomban és Oroszországban is megfigyelték (Ellerman 1910; Evershed 1910; Cesarski 1911) és azt is feltételezték, hogy az esetleg az üstökös magja egy monolitikus test és ennek a nyoma Nap korongján egy sötét folt lesz. Ennek megfigyelésével a test mérete meghatározható. Azonban nem látták ezt a sötét foltot és úgy becsülték, hogy ha létezik is ilyen mag, akkor annak 320 km átmérőnél (mintegy 200 angolszász mérföld) kisebbnek kell lenni. Baldet (1927) és Slipher (1927) szerint a P/Pons-Winnecke üstökös magja valószínűleg egy monolitikus test, amelynek átmérője legfeljebb 1,6–4,8 km (2–3 angolszász mérföld) lehet (lásd még Vorontsov-Velyaminov 1926). Ezzel el is érkeztünk a modern üstökösfizikához, a üstökösök mag, mint monolitikus test koncepció létrejöttéhez.

2.4. Az üstökösök koncepció és az első modellek

Az üstökösök kutatás *negyedik korszaka* az első monolitikus üstökösök modellek megalkotásával vette kezdetét az 1940/50-es évek fordulóján. Az üstökösök Levin által felvázolt "homokzátony" modelljét Lyttleton (1948, 1952, 1952) tökéletesítette és a mag kialakulását a Nap gravitációs tere fókuszáló hatására a csillagközi anyag

¹⁰A deszorpció során szilárd anyag, porszemcsék is és gázok is kiszabadulhatnak a felszínről, míg a szublimáció a szilárd-gáz fázisátalakulást jelenti.

összeállásával keletkezett csomóknak tekintette. Az így kialakult a "homoksziget" kis porszemcsékből áll Lyttleton szerint és nem áll össze egy tömbből álló, monolitikus testté. A Levin-Lyttleton-féle "homoksziget" modell erősen vitatható volt és azonnal több kritika érte (Whipple 1950, 1960, 1961), ugyanis:

1. A Nap gravitációs fókuszáló hatása nem eredményez ilyen porszigetet, amit végülis az üstökös "magjának" lehetne tekinteni.
2. A porszemcsék és nagyobb meteoritikus anyag, mint alkotórészei között a tömegvonzás nem tudja hosszú időn keresztül stabilan összetartani.
3. A porszemcséknek túl nagy méretűnek kellene lenni az üstökösök lehetséges méretének és tömegének előállításához – ezt a tömeget a megfigyelt meteorok átlagsűrűsége és a meteorrajok becsült össztömege határolja be.
4. A Napnak a porszemcsékre gyakorolt sugárnyomása instabillá teszi és szétszedi a porszigetet.
5. Az üstökös napköri mozgásában megfigyelt nem-gravitációs erők sem fejthetnék ki hatásukat egy porszigetre úgy, hogy az üstökös pályája a megfigyeléseknek megfelelően változzon, sőt, a porsziget alakja idővel eltorzulna, elnyújtott lenne az eredeti, koncentrált, kompakt alakzatnak feltételezethez képest, vagyis nem lenne "magszerű" kompakt objektum.
6. Az üstökösökben megfigyelt periódikus anyagkiáramlásokat, jeteket, gyűrű alakú halokat, fényváltozásokat nem lehet ezzel a modellel megmagyarázni. Ezeket a jelenségeket egy tengelye körül forgó monolitikus jeges-poros test jól magyarázza, de egy porsziget a legkevésbé.
7. Nagy naptávolságban lévő üstökösöknél, mint például a 29P/Schwassmann-Wachmann 1 üstökösénél megfigyelt anyagkiáramlással és fényesség megnövekedéssel járó kitöréseket sem lehetett a "porsziget" modellel elképzelni.
8. Az üstökösök szétesését, amely a pályájuk bármely pontjában előfordulhat, sem lehetett ezzel a modellel megmagyarázni. Különösen a Naphoz nagyon közel kerülő üstökösök porszemcséi elpárolognának, de a megfigyelések szerint a napközelség után sem történik ez meg, legfeljebb egyes üstökösök szétesnek, de a magtöredékek, mint diszkrét fénycentrumok megfigyelhetők. Hasonlóan, a Naphoz vagy nagybolygókhoz túl közel került üstökösökre az árapályerők hatására szétesnek, de nem úgy, mint egy porsziget, hanem inkább mint egy tömbből álló test (monolitikus üstökösök).
9. Továbbá, az üstökösökből származó meteorok megfigyelése kis átlagsűrűségükre és kis mértékű, de belső összetartó erőre, belső szilárdságra utalt. Az üstökös eredetű meteorok és porszemcsék egymáshoz is tapadtak ami arra utal, hogy egy nagyobb testből származnak, a monolitikus üstökösökből.

Egy nagyon hosszú időn keresztül stabil "homokzátony" üstökösök kialakulása tehát nem volt lehetséges az ősi Naprendszerben és ez a modell ellentétben állt a megfigyelésekkel. Whipple (1950) az Encke-üstökösökből származó Taurida meteoráram eredetének modellezése, illetve az üstökös nem-gravitációs erők hatására történő mozgásának magyarázatára alkotta meg a monolitikus üstökösök "piszkos hógolyó" (a nemzetközi szakirodalomban "dirty snowball") modelljét. Az Encke-üstökös pályája



10. ábra. Művész elképzelése az üstökös mag első, Whipple-féle "piszkos hógolyó" modelljéről a Halley-üstököst meglátogató űrszondák küldetése előtt 1985-ből (lásd még a 12. ábrát is). A jeges-poros monolitikus üstökös magból intenzív gáz- és porkiáramlás történik napközben, amelyek elsősorban a képen is jól látható a jetek formájában valósulnak meg (kép: NASA JPL és ESA Science & Technology <http://gaia.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=13830>)

mentén keringő Taurida meteorraj az üstökös többszáz keringése alatt is aktív. A meteorraj porszemcsékből áll, az üstökös színképe azonban gázanyagot mutat. Továbbá a Levin-féle deszorpcióval a poranyagból kiszabaduló gáz néhány keringés alatt "elfogyna", ezért Whipple a vízjégből álló jeges-poros üstökös mag modellt tételezett fel és a deszorpció helyett a szublimációra alapozta az üstökös aktivitását. A vízjégbe cementált porszemcsék a vízjég szublimáció hatására elhagyják a mag felszínét és a bolygóközi térben az üstökös pályája mentén szétszóródva meteorrajt alkotnak. Whipple üstökös mag modellje igen impresszív, mert az üstökösök sok megfigyelt jelenségére magyarázatot adott és az üstökös magokkal kapcsolatos és a mai napig is fennálló standard paradigmát megalapozta. A modell azt is megmagyarázza, hogy a kiáramló anyag a mag napköri keringését és tengelyköri forgási idejét is befolyásolja. Ennek az üstökös mag modellnek egyik első, művész által festményen való ábrázolása a 10. ábrán látható, amely igen szemléletes és jól érzékelteti jég-por konglomerátum mag napközben történő kigázosodással járó gáz- és poranyag kibocsátási aktivitását. A Whipple-féle üstökös mag-modell hatásosan magyarázta az üstökösök megfigyelt tulajdonságait: 1) a szublimációval történő nagymértékű gáz kibocsátást, ugyanis korábban a deszorpcióra alapozott modell a kómában megfigyelt gázmennyiséget nem tudja előállítani, 2) a jet-aktivitást, illetve az üstökös kitöréseket, 3) a nem-gravitációs erőkre visszavezethető pályaváltozásokat, 4) a Naphoz túl közel került üstökösök közül soknak az egyben maradását, 5) az üstökös magok a meteorrajok forrásai. A Whipple-féle üstökös mag-modell a szakmai közösség gyorsan elfogadta



(a) Kéreg – mag-belső modell



(b) Por- és meteoritikus anyag

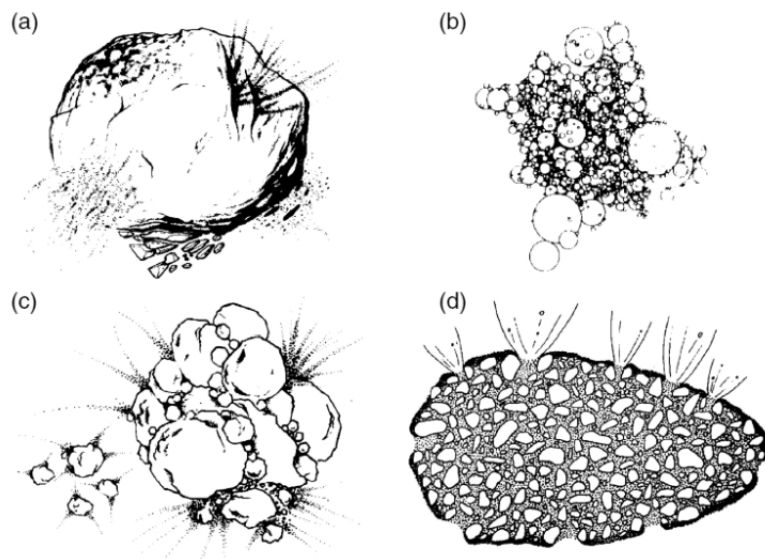
11. ábra. Az üstökös-mag lehetséges réteges szerkezetéről alkotott korai elképzelések egyike Hartmann és mások (1982) alapján. A modell szerint a mag két fő alkotórészből áll: felszíni poros-jeges kéregből és alatta jeges-poros mag-belsőből (balra). Az üstökös aktivitása idején a kéreg repedései a jeges-poros mag-belsőből gáz- és poranyag kiszabadulását teszik lehetővé. Az aktív üstökös-magból kisebb porszemcsék és nagyobb meteoritikus anyagdarabok szabadulnak ki (jobbra) (a kép forrása: Hartmann és mások (1982)).

és a következő évtizedekben sokat finomodott.

A Whipple-féle üstökös-mag modell után annak továbbfejlesztett változatai is megjelentek. A mag lehetséges réteges szerkezetéről alkotott korai elképzelések egyike a Hartmann és mások (1982) által közétett modell, amelyet a 11. ábra szemléltet. A modell szerint a mag két fő alkotórészből áll: felszíni poros-jeges kéregből és alatta jeges-poros mag-belsőből. Az üstökös aktivitása idején a kéreg repedései a jeges-poros mag-belsőből gáz- és poranyag kiszabadulását teszik lehetővé. Az aktív üstökös-magból kisebb porszemcsék és nagyobb meteoritikus anyagdarabok szabadulnak ki.

A helyszíni űrszondák vizsgálatok előtt az 1980-as évek közepéig a Whipple-féle jeges-poros üstökös-mag modellel számoltak, azt fejlesztették tovább és erre a modellre alapozták az újabb, a mag belső szerkezetét, kémiai összetételét és hőmodelljeit érintő számításokat. A jeges-poros modell első részletes továbbfejlesztése során a mag gáz- és porkibocsátásának mértékének kiszámítását finomította Huebner (1965), Huebner & Weigert (1966), de ezekben a modellekben még a vízjég szublimációjával számoltak. A fényes West-üstökös (C/1975 V1-A = 1975 n) megfigyelése többféle jég kimutatását is lehetővé tette, többek között a szuperillékony széndioxid jeget (A'Hearn és mások 1977; A'Hearn & Cowan 1979; Cowan & A'Hearn 1979). Ma már tudjuk, hogy az alacsony hőmérsékleten erősen szublimáló CO és CO₂ jég az üstökösök nagy naptávolságban előforduló aktivitására is magyarázatot ad.

Fanale & Salvail (1984, 1987, 1990) részletesen modellezte az üstökös-mag aktivitását olyan esetekre is, amelyeknél nem csak a vízjég, hanem a széndioxid, illetve a szénmonoxid szublimációja dominál. Rámutattak, hogy egy poros köpeny alakulhat ki az aktivitás során, amely képes leállítani a szublimációs aktivitást. A széndioxid vagy szénmonoxid rétegekben fordulhat elő az üstökös-mag belsejében már közvetlenül a felszín alatt is és így ezek a szuperillékony gázok az üstökös aktivitásában nagy szerepet kaphatnak például akkor, amikor az üstökös nagy naptávolságban tartózkodik. Ezeken a modelleken kívül az üstökös-magok belső szerkezetére és ezzel összefüggésben a termofizikai tulajdonságaira, az aktivitás előrejelzésére még több jelentős modellt megalkottak, de ezek ismeretete túlmutat ezen disszertáció kerete-



12. ábra. A Halley-üstökös magjának megismerése előtt és közvetlenül utána megalkotott üstökösmodell művészi elképzelés szerint rajzokkal érzékeltetve: a) Whipple (1950) által megalkotott első monolitikus üstökösmodell, a jeges-konglomerátum vagy "piszkos hólabda" modell Weissman & Kieffer (1981) művéből, (lásd még a 10. ábrát is), b) fraktál aggregátum modell (Donn és mások 1985), c) őseredeti építoblokk-halmaz modell (angol nyelvű szakirodalmi kifejezéssel "primordial rubble pile model", Weissman (1986)), d) az üstökösmodell jeges-ragasztóanyag modelljét már a Halley-üstökös magjáról közvetlen közletről készült űrszondás felvételek figyelembe vételével alkotta meg Gombosi & Houppis (1986) (kép: Weissman és mások (2004)).

in. Ezekről részletes áttekintés, ismertetés található Whipple (1989), Keller (1990a), valamint Festou és mások (1993b) munkáiban.

Az 1980-as évek első felében a Halley-üstökös űrszondákkal történő közeli vizsgálata előkészítéseként az üstökösfizika fejlődése nagy lendületet vett. A nemzetközi VEGA üstökösprogramban való magyar részvétel jelentős magyar üstökös kutatási eredményeket hozott az üstökösmodell aktivitásának modellezésében, valamint az űrfizikában a bolygóközi plazma és mágneses tér üstökös gázanyag kölcsönhatása témakörében. A mag belső szerkezete és aktivitása első új modellje a Horányi & Kecskeméty (1983) által kidolgozott perkolációs modell. Az üstökösmodell "omlós, porló szivacs" (szaknyelven "friable sponge") modelljét Horányi és mások (1984) dolgozták ki a magbelső-köpeny szerint strukturált, réteges szerkezetű modellre alapozva. Ebben a modellben a mag köpeny hővezetését új módszerrel számolták és a korábbiakhoz képest új hőmérséklet eloszlás adódott a köpenyben. Vizsgálták gázkibocsátás mértékét a köpeny hővezetése, vastagsága, valamint a naptávolság függvényében. A modell a poros-jeges üstökösmodell por/jég tömeg-arányára 30%-ot jelzett, ami össz-

hangban van Greenberg (1983) laboratóriumi kísérleti eredményeivel.

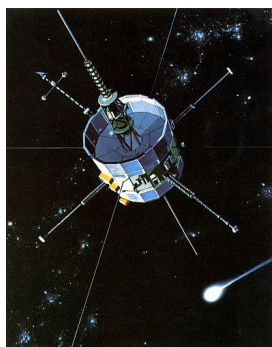
A Halley-üstökös magját közvetlen közelről meglátogató űrszondák küldetése előtti években az üstökösök magjának belső szerkezeti felépítéséről még két új modell jelent meg szinte egyidőben. Az egyik a "vattaszerű részecskehalmaz" vagy "aggregátum" (a szakirodalomban "fluffy aggregate" a neve) modell, a másik pedig a "törmelékhalom" modell. Az aggregátum modellben (Donn és mások 1985; Donn & Hughes 1986) kisebb-nagyobb alkotóelemek, építőblokkok fraktálszerű elrendeződése alkotja az üstökös magot. Ennek a modellnek egy vázlatos megjelenítését mutatja a 12. ábra b) panelje. Nemsokkal azelőtt, hogy a Halley-üstökös közelében elhaladtak volna az a vizsgálatára küldött űrszondák Weissman (1986) közzétette az üstökös mag őseredeti törmelékhalom vagy építőblokk modelljét (a szakirodalomban "rubble pile" modell az elnevezése). A modell vázlatát a 12. ábra c) panelje mutatja be.

2.5. Üstököskutatás űreszközökkel – csillagászat, űrcsillagászat, űrfizika, helyszíni vizsgálatok

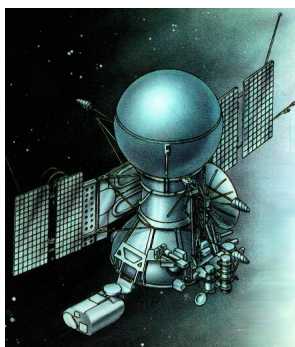
Az üstökösök kutatásának ötödik és egyben *ma is tartó korszaka* az üstökösök közvetlen közelében űrszondákkal végzett vizsgálatokkal kezdődött, nevezetesen a Halley-üstökös mellett elrepülő (flyby) űrszondák küldetésével 1986-ban, amikor a tudomány történetében először közeli felvételek készültek egy üstökös magjáról a VEGA 1 és 2, valamint a Giotto üstökös-szondák képfelvévő kamerái által. Bár ez előtt nem sokkal, 1985-ben a NASA ICE (International Comet Explorer, korábbi nevén ISEE-3, International Sun-Earth Explorer) szondája átrepült a 21P/Giacobini-Zinner ekliptikai üstökös kómáján és plazmafizikai méréseket végzett a napszél-üstökös kölcsönhatás tanulmányozására, de fedélzeti képfelvévőrendszer hiányában nem készített felvételeket az üstökös magjáról, tehát az igazi áttörést egy üstökös mag, illetve egy üstökös megismerésében a VEGA és Giotto Halley-szondák közeli felvételei jelentették. A Halley-üstökös közelébe küldött VEGA 1 és 2, Giotto, a japán Sakigake ("Úttörő"), Suisei ("Üstökös"), illetve a távolabbról plazmafizikai méréseket végző ICE és Pioneer Venus Orbiter NASA űrszondákat a 13. ábrán mutatja be ("Halley Armada").

A Halley-üstökössel kapcsolatos eredményeket több összefoglaló munka is ismerteti (Whipple 1989; Keller 1990a, 1990b; Sagdeev & Szegő 1990; Szegő 1991; Festou és mások 1993b; Keller és mások 2004). A nagyobb összefoglaló munkákban nem csak az üstökös magról szerzett új ismeretekről van szó, hanem az üstökös semleges gáz, plazma, valamint mágneses környezetéről, valamint a napszél-üstökös kölcsönhatásról is. Ezzel kapcsolatban is sok jelentős magyar eredmény született, hiszen a VEGA szondák fedélzetén lévő energikus részecske-detektor (TÜNDE-M), plazma detektor (PLAZMAG-1) jelentős magyar részvétellel készült (Apathy és mások 1986), illetve a magnetométer mérései eredményei is rendelkezésre álltak. A semleges gáz molekulák eloszlásáról és kinematikájáról (Erdős & Kecskeméty 1987), valamint a nagy görbületi sugarú lökéshullámfronton (bow-shock-on) kívül detektált nagyenergiájú ion fluxus (pick-up ionok) kimutatásáról születtek egyedülálló eredmények (Somogyi és mások 1986; Kecskeméty és mások 1989). Az üstökös környezetében végbemenő részecske gyorsítási folyamatokról egyébként Somogyi és mások (1990) összefoglaló munkája ad ismertetést.

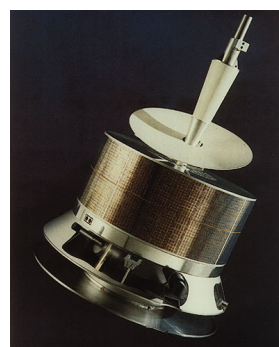
A nemzetközi VEGA programban 1981-től személyesen is részt vettem a magyar fővállalkozásban készített Televíziós Képfelvévő Rendszer (TVS) elkészítésében és földi, valamint repülés közbeni optikai kalibrációs méréseiben. A tudomány történetében az első közeli képfelvételeket a VEGA űrszondák készítették 1986-ban és a sikeres program során a sok képfelvétel tudományos elemzésében és a képfelvételek



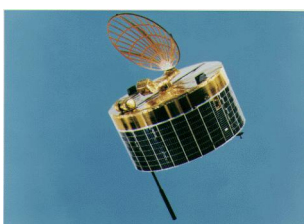
(a) ICE (ISEE-3)



(b) VEGA 1 és 2



(c) Giotto



(d) Suisei ("Üstökös")



(e) Sakigake ("Úttörő")



(f) Pioneer Venus Orbiter

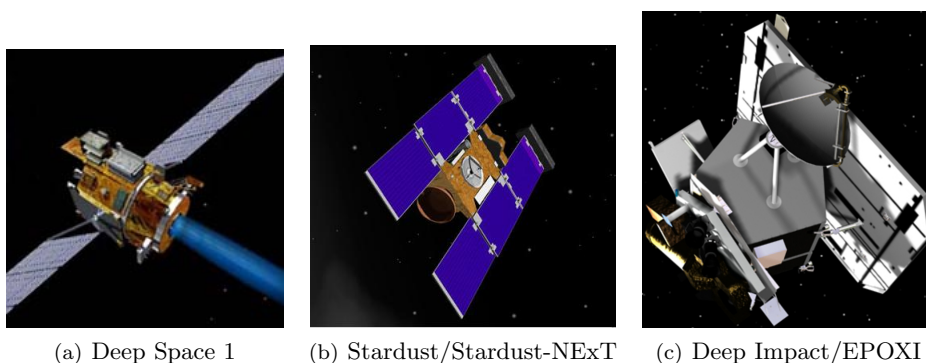
13. ábra. A "Halley Armada" űrszondái: (a) ICE (International Comet Explorer), (b) az egyforma felépítésű VEGA 1 és 2 (VENyera-GAllej, a képen a Vénuszra leszállógység gömbjével), (c) Giotto, (d) Suisei ("Üstökös", Planet A), (e) Sakigake ("Úttörő" vagy MS-T5), (f) Pioneer Venus Orbiter (PVO) vagy más elnevezésekkel Pioneer-12 (Pioneer Venus 1) (forrás: NASA, ESA, IKI, ISAS (JAXA)).

archiválásában vettem részt az MTA KFKI RMKI koordinálásában¹¹ az MTA Csillagászati Kutatóintézetében¹² (Sagdeev és mások 1986). Az üstökös mag mérete, alakja, valamint forgómozgási paramétereinek meghatározásában vettem részt (lásd Sagdeev és mások 1986; Sagdeev & Szegő 1990; Merényi és mások 1990 összefoglaló munkáit, amelyekben társszerzőként működtem közre). A Halley-üstökös magjának és magközeli kómájának fotometriájával (Tóth 1984), valamint a kóma térbeli szerkezetének közeli megfigyelésekből tomográfiai módszerrel történő előállításával is foglalkoztam (Tóth & Balázs 1982). A VEGA 2 űrszonda közeli képfelvételei alapján pedig a Halley-üstökös magjából kiinduló porjetek mag felszíni kiindulási helyei, talppontjai koordinátáit, illetve a jetek térbeli irányát, valamint fényességeloszlását határoztam meg (lásd Smith és mások (1986) összefoglaló cikkét). A porjetek magtól kiinduló, képsíkbeli radiális irányú fényességfutasának elemzése alapján kimutattam, hogy az üstökös magtól mintegy 40 km távolságra hirtelen meredekebben csökken a fényesség, amit a magból kiszabadult jeges porszemcsék hősokk következtében történő szétaprózásával, szétaprózódásával lehet magyarázni (Tóth és mások 1987; Szegő és mások 1989).

A Halley-üstökösrel való találkozása után a Giotto űrszonda 1992-ben a 26P/Grigg-Skjellerup üstökös közvetlen közelében végzett méréseket, de addigra sajnos már nem működött a képfelvévő rendszere, így az üstökös magjáról nem készülhettek közeli felvételek. Ezután kilenc évet kellett várni a következő űrszonda-üstökös közvetlen

¹¹Magyar Tudományos Akadémia Központi Fizikai Kutató Intézete Részecske- és Magfizikai Kutatóintézetében Dr. Szegő Károly vezetésével.

¹²Az intézet hivatalos elnevezése az 1980-as évek közepén.

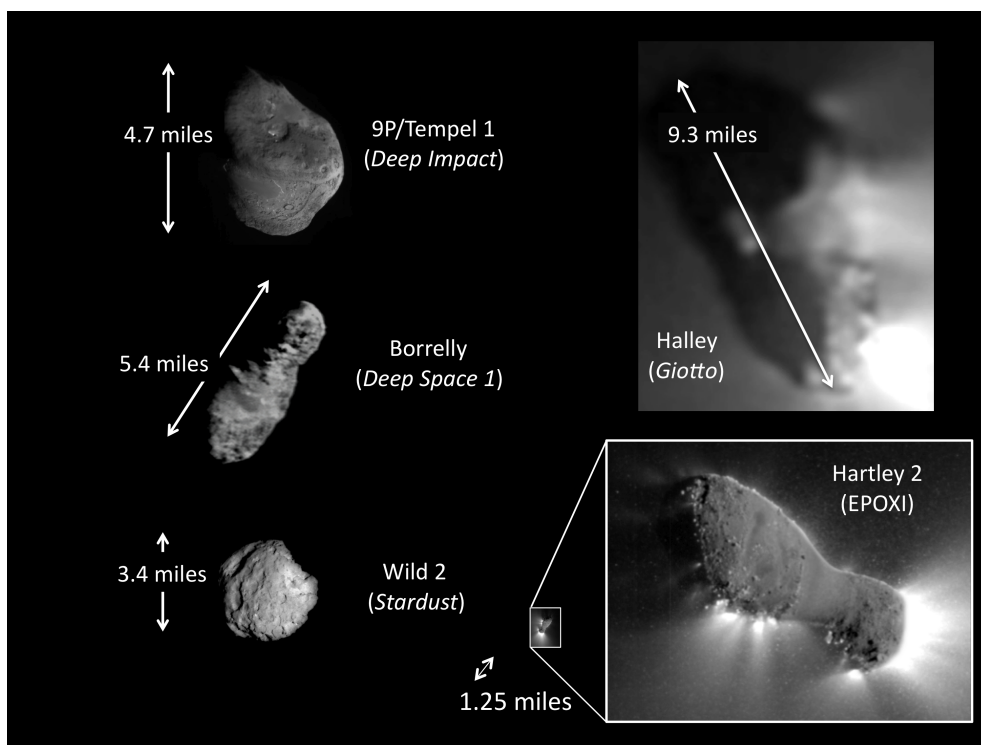


14. ábra. A Halley-üstökös utáni üstökös-kutatási korszak 2011-ig már egy vagy több üstökös közelében járt helyszíni (in-situ) űrszondái – mindegyikük alapvetően NASA űrprogram. A Deep Space 1 a 19P/Borrelly-üstököst látogatta meg 2001-ben (a), a Stardust a 81P/Wild 2 üstököst kereste fel 2004-ben és a Földre küldött pormintát az üstökös kómájából (b), majd pedig 2011-ben a 9P/Tempel 1 üstököst kereste fel, amely még 2005-ben a Deep Impact (c) űrkísérelt cél-üstököse volt és másodszor is helyszíni űrszonda látogatta meg. A Deep Impact szonda a DIXI/EPOXI (c) program keretében egy másik üstököst, a 103P/Hartley 2 üstököst is közelről megvizsgálta 2010-ben (képek: NASA).

közeli találkozássra. A Halley utáni in-situ üstökös-szondákat a 14. ábra mutatja be. A NASA Deep Space 1 űrszondája 2001-ben a 19P/Borrelly-üstökös közelében repült el és ez volt a második üstökös, amelynek magjáról közeli részletes felvételeket sikerült készíteni (lásd még az 6.1.3. pontot is). A 2010. november 4-ig helyszíni űrszondákkal meglátogatott üstökös-magokat mutatja be a 15. ábra, amelyen a magok méretének, alakjának és felszínének nagyfokú diverzitása jól látható.

Erdemes megemlíteni a következő érdekesebb űrfizikai eredményeket a bolygóközi anyag – üstökös kölcsönhatása területéről. A bolygóközi tér és üstökös-csóva kölcsönhatás egy különleges példáját mutatta a C/1996 B2 (Hyakutake) üstökös, ami megzavarta a bolygóközi mágneses teret, amely zavarait az Ulysses szonda detektálta (Jones és mások 2000) 3,73 CsE távolságra a Naptól, miközben az üstökös napközben volt. Továbbá a szonda a csóva pick-up ionjait is detektálta, valamint a napszél protonok csökkenését is (Jones 2002). Az Ulysses még egy üstökös, a C/2006 P1 (McNaught) üstökös csóváján is áthaladt. Az üstökösök poranyaga a bolygóközi por utánpótlásához járul hozzá, amelyet a C/2006 P1 (McNaught) üstökös kiterjedt porcsóvái is jól mutatnak (16. ábra).

Az űrfizika és az üstökösök fizikája szempontjából fontos megemlíteni, hogy az üstökösök megfigyelése az űrkorszakban az asztrofizika ezen részterületeinek egy egészen váratlan felfedezést adott, amely részben az üstökös-mag aktivitására, részben pedig a Nap aktivitási szintjének távoli megfigyelésekkel történő jellemzésére ad lehetőséget. Ugyanis a légkörön túlra telepített űrszillagászati megfigyelő meseterséges holdaknak köszönhetően teljesen váratlan felfedezés történt 1996-ban a C/1996 B2 (Hyakutake) üstökös földközelsége idején: a földközelségéhez közeli napokban röntgenszillagászati mesterséges holdak is megfigyelték a Hyakutake üstököst és ekkor a rendkívüli és váratlan eredmény volt az, hogy ennél az üstökösnél kimutatták a kóma Nap felőli oldaláról eredő röntgensugárzást a ROSAT röntgenszillagászati mesterséges hold segítségével a körülbelül 100 eV – 1 keV energiatartományban a HRI nagyfelbontású képfelvévővel, valamint a ROSAT-WFC nagylátómezejű kamerával (Lisse és mások 1996). Ezen kívül a Rossi (RXTE = Rossi X-ray Timing

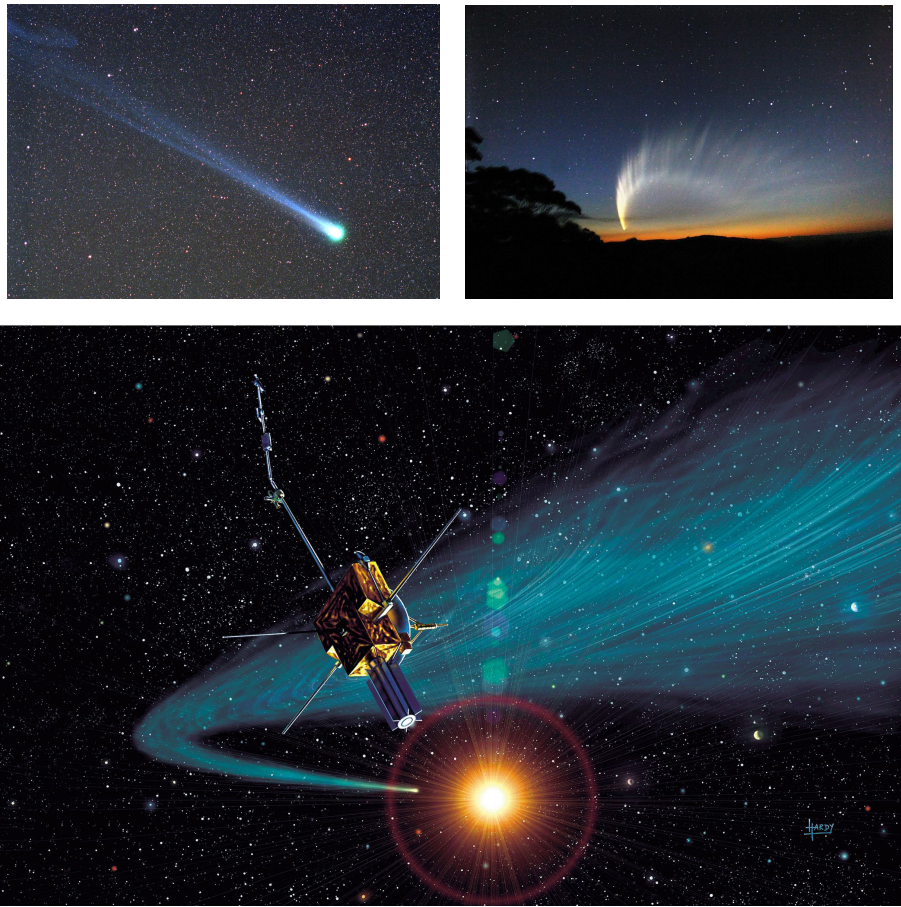


15. ábra. A 2010. november 4-ig helyszíni űrszondákkal közelről tanulmányozott öt üstökös méretének, alakjának és főbb felszíni jellemzőinek összehasonlítása. Az üstökösök méretére az ábrán megadott közelítő méret: 9P/Tempel 1 7,6 km (4,7 mérföld), 19P/Borrelly 8,7 km (5,4 mérföld), 81P/Wild 2 5,5 km (3,4 mérföld), 1P/Halley 15,0 km (9,3 mérföld) és 103P/Hartley 2 2,0 km (1,25 mérföld). A méret átváltáshoz: 1 angolszász szárazföldi mérföld (1 statute mile, land mile) közelítőleg 1609,3 méter. Az egyes űrszondák elnevezése zárójelben látható (kép: NASA EPOXI 103P/Hartley 2 sajtókonferencia, 2010. november 18., Houston, TX, NASA/JPL-Caltech/UMD).

Explorer) röntgenszámláló hold proporcionális számláló detektora (PCA) a 2000-60000 eV tartományban, valamint az EUVE (Extreme Ultraviolet Explorer) Extrém Ultraibolya Megfigyelő hold spektrométerei is észlelték a jelenséget a 70-180 eV energiatartományban.

Az üstökösök lágy röntgensugárzásának felfedezése új röntgenforrás típus létét mutatta ki az égbolton, valamint a Naprendszerben a Napon kívül is, a már ismert röntgenforrások (Föld, Jupiter, Mars) felsőlégköri övezeteiben keletkező röntgensugárzás, illetve a Hold röntgenemisszióján kívül. A felfedezést részben a földközeli kerület aktív Hyakutake-üstökös, valamint a légkör zavaró, elnyelő tartományain kívül keringő űrszámláló mesterséges holdak fedélzetén elhelyezett csúcstechnológiával készült eszközök alkalmazása tette lehetővé.

Mivel az üstökösökről érkező lágy röntgensugárzást azelőtt még nem észlelték – és csak a Hyakutake röntgensugárzásának felfedezése után keresték meg visszamenőleg, hogy mely üstökösöknél volt hasonlóan kimutatható sugárzás – ez a jelenség mindenekelőtt a gerjesztési folyamatok magyarázatát igényli. Mindenképp fontos azon megfigyelési, adatgyűjtési és számítási munkáknak a létrejötte, amelyek az üstökösök



16. ábra. Az Ulysses űrszonda küldetése során két hosszú üstökös-csóván is áthaladt a bolygóközi térben: a C/1996 B2 (Hyakutake) üstökös csóváján 1996-ban (balra fent) és a C/2006 P1 (McNaught) üstökös csóváján 2006-2007-ben (jobbra fent). A bolygóközi tér Parker-spirálisa mentén görbült, ahhoz igazodó ioncsóva és az Ulysses űrszonda művész által elképzelt helyzetét érzékelteti az alsó kép. Az illusztrációként bemutatott Hyakutake-üstökös fotót Doug Zubenel (TWAN, The World at Night) készítette 1996. március 26-án, a McNaught-üstökös fotót pedig Takács István, Kiss László, Szabó M. Gyula és Derekas Aliz készítették 2007. január 20-án az ausztráliai Blue Mountains Nemzeti Parkban Katoomba város mellett (képek forrása: Magyar Csillagászati Egyesület http://hirek.csillagaszat.hu/a_het_csillagaszati_kepe/20070128_hetkepe.html, APOD <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap091216.html>, D. Hardy, ESA-NASA http://www.esa.int/esaCP/SEMLHXUG3HF_index_mg_14_s.html).

röntgensugárzásának a forrását kísérlük megmagyarázni. Tehát a felfedezett jelenség továbbgondolkodásra készítette a szakembereket; az addig már esetleg meglévő modellek felújítására, tovább finomítására, új modellek kidolgozására. Mai ismereteink szerint a több lehetséges fizikai folyamat közül a töltéscserés kölcsönhatás során fellépő fékezési röntgen sugárzás adja a megfigyelt lágy röntgen, illetve extrém ultraibolya sugárzást (Krasnopolsky és mások 2004).

A nagyobb mértékű lágy röntgenfluxus növekedés egy egyébként kisebb gáz- és

porkibocsátást mutató üstökösnél – valószínű indikátora a bolygóközi térben lokálisan ott és akkor végbenő mágneses és plazma viharoknak (szubsztorm eseménynek). Tehát az üstökös mint egy bolygóközi "űrszonda" jelzést ad az interplanetáris tér távoli térségében végbemenő – esetleg viharos – plazma és mágneses térbeli viszonyokról. Miután a napszél erőssége és a Nap röntgensugárzásának időbeli alakulása szorosan összefügg a naptevékenységgel, így ez alakulásának következményeit is jelzi az üstökösök lágy röntgensugárzásának megfigyelése. Természetesen az adott üstökös aktivitásától (gáz- és porkibocsátás mértéke) is függ a megfigyelhető röntgenfluxus nagysága ami egyébként csak a kómában figyelhető meg a Nap felőli oldalon. A kóma a víz kibocsátásban aktív üstökösök esetében csak mintegy 2,8 CsE naptávolságon belül fejlődik ki, ez egy határt jelent a naptávolságot illetően az interplanetáris plazma-üstökös kölcsönhatásnak a lágy röntgen-tartományban való megfigyelhetőségében. További korlátozó tényező, hogy az üstökös által "érezhető" napszél, illetve a Nap elektromágneses sugárzása a naptávolság növekedésével csökken. A mintegy 2,8 CsE naptávolságon belül azonban lehetőség nyílik a lágy röntgensugárzás megfigyelésével a bolygóközi tér aktuális "időjárásai" viszonyairól is képet alkotni távolról, a földközeli térségben keringő űrteleszkópok segítségével a lágy röntgen, illetve az extrém ultraibolya tartományban végzett megfigyelések által.

3. Az üstökösök új világa

A helyszíni űrszondás vizsgálatok ellenére még ma is több alapvető kérdésre nem ismerjük teljes bizonyossággal a választ. Az üstökösök fizikájának ma is időszerű kulcskérdése az üstökösök felszínének és belső szerkezetének megismerése, az üstökösök gáz- és porkibocsátási aktivitási mechanizmusainak megértése, az üstökös kitérőerők és nem árapály erők hatására történő teljes szétesési eseményeinek magyarázata, valamint az üstökösök Naprendszerbeli forrásvidékeinek azonosítása és részletesebb megismerése.

Az üstökösök aktivitásának és belső szerkezeti felépítésének megértéséhez fontosak azok a vizsgálatok, amelyek az üstökösök csillagászati megfigyelő eszközökkel, illetve űrszondák műszereivel az elektromágneses spektrum látható fénytartományában és a termális infravörösben (hősugarak) történnek. Ezekből a megfigyelésekből a mag termofizikai tulajdonságai mint például a hővezető képesség, hőtehetetlenség modell feltevések mellett meghatározható. Ezek a fontos paraméterek, mert a test hőmérséklet eloszlására és ezáltal a szublimációval történő gázkibocsátásnál, illetve a gáz által mozgatott por kiáramlásánál van szerepük. Egy, a tengelye körül forgó test "délutáni" oldala általában magasabb hőmérsékletű, mint a "reggeli" oldala, mert a felszín alá hatoló hőhullám ("heat wave") csak időkéssel hatol egyre mélyebbre, illetve a test csak időkéssel lassan hűl le. Ez a test anyagának hőtehetetlenségétől függ. A hőtehetetlenség (Wesselink 1948)

$$\Gamma = \sqrt{\kappa \rho c} , \quad (5)$$

ahol, κ a felszín anyagának hővezető képessége, ρ a tömegsűrűsége és c a fajhője. Nullától különböző hőtehetetlenség csökkenti a hőmérséklet kontrasztot a forgásból adódó napi hőmérséklet ingadozásban. A test tengely körüli forgása, illetve a nap körüli keringési ideje alatt a hővezetés által a hő a test belsejébe áramlik, de a hőhullám lecsillapodik egy bizonyos mélységben, ahol állandó hőmérséklet áll be. A napi hőhullám felszín alá való behatolását jellemző skálahossz való csökkenésének mélysége (a hő "behatolási mélysége", angol szaknyelvi kifejezéssel "thermal skin depth") is

meghatározható és az üstökösök esetében jellemzi a napi, illetve hosszabb időtartam alatt, mint például a napköri keringések alatt bekövetkezett tömegvesztést és a felszíni eróziót. Az időben szinuszos hőmérséklet változás amplitúdója e -ed részére csökkenésének skálahossza, a behatolási mélység a következőképpen fejezhető ki a test termofizikai paramétereivel és a tengelyköri forgási periódusával (Spencer és mások 1989)

$$d = \sqrt{\frac{\kappa}{\rho c \omega}}, \quad (6)$$

ahol ω a tengelyköri forgás szögsebessége. Más időtartamra, (5) és (6) figyelembe vételével (lásd még Spencer és mások 1989)

$$d = \sqrt{\frac{\kappa \tau_d}{2\pi \rho c}}, \quad (7)$$

illetve

$$d = \frac{\Gamma}{\rho c} \sqrt{\frac{\tau_d}{2\pi}}, \quad (8)$$

ahol τ_d egy vizsgált időtartam, amely alatt a hő d mélységig hatol a felszíntől a test belsejébe: ez lehet a mag tengelyköri forgási periódusa, illetve a napköri keringési ideje (zárt, ellipszis keringési pályát feltételezve). Az eddig megfigyelt, illetve űrszondákkal közről megfigyelt üstökösök magjaira a hőhullám napi behatolási mélysége ~ 1 cm. Míg egy tipikus ekliptikai üstökös teljes keringési ideje ~ 6 év alatt ez mintegy 70 cm, ami kisebb, mint a mag felszínének gáz- és porkibocsátási aktivitással egy keringés alatt elvesztett réteg-vastagsága, ami általában mintegy 2 méter körül szokott lenni.

A Halley-üstökös magjának közvetlen közeli megfigyelése után kezdődött helyszíni űrszondás vizsgálatok eredményeképp az üstökösök jellemzésére a következőket lehetett megállapítani.

- Az üstökösök nagyon sötét jeges-poros, valamint szerves vegyületeket is tartalmazó kis égitestek a Naprendszerben, nagyon kicsi fényvisszaverő képességűek: a geometriai albedójuk 0,04 körüli.
- Az üstökösök porózus szerkezetű (nagy makroszkópikus porozitású), kis átlagos sűrűségű és kicsi belső összetartó erővel egybetartott kis égitest.
- Az üstökösök teljes felszíne sokkal nagyobb, mint ami a megfigyelt gáz- és porkibocsátáshoz szükséges aktív felület nagysága, vagyis a szublimációs aktivitás csak a mag egy kis felszíni hányadára korlátozódik.
- Annak ellenére, hogy napközben a vízkibocsátás a domináns aktivitás, az üstökösökön nem vagy csak igen nehezen mutathatók ki (lásd Tempel 1, Deep Impact) a vízjeget tartalmazó aktív területek.
- A mag felszíni hőmérséklete sokkal magasabb, az adott naptávolságban az abszolút fekete test hőmérsékletéhez közeli, ami a a vízjég szublimációjához szükséges hőmérsékletnél jóval magasabb hőmérséklet.

Ezeket a paradigmákat a Deep Impact, Stardust űrszondák eredményei teljesen megerősítették. Az üstökösök gáz- és porkibocsátási aktivitása ezeknek a kis égitesteknek alapvető tulajdonsága, de még ma sem ismerjük ennek részleteit. Az üstökösaktivitás részleteit illetően tehát nem ismertek a következők:

1. A vízen kívül milyen üstökösökknál, mikor, milyen naptávolságban dominál a széndioxid (9P/Temepl 1) vagy szénmonoxid (Hale-Bopp) által hajtott aktivitás.
2. Van-e valóban amorf vízjég, amely nagy naptávolságban működtetheti az üstökös aktivitását, illetve kitöréseket okozhat?
3. A kitöréseket és a mag teljes szétesését mi okozza?
4. Ma még nem ismertek a porszemcsék felszínről való kiszabadulásának mikrofizikai részletei.
5. Valóban általánosan igaz-e az eddig általánosan elfogadott paradigma, hogy az üstökösök felszínéről lokálisan, jól behatárolható helyekről történik a gáz és por kiszabadulása – például gáz- és porjetek formájában vagy pedig a teljes mag felületéről történhet anyagkiáramlás.

Az előbb felsorolt kérdések közül az 5. kérdés felvetésének az az alapja, hogy az üstökösök, annak legfelső rétege és a kóma átmeneti tartományban korrekten kell figyelembe venni a gáz, sőt a poros-gáz áramlását, vagyis a Knudsen-réteg megfelelő figyelembevétele szükséges, amelynek első következtetés alkalmazása üstökösökre Crifo & Rodionov (1997), valamint Crifo (1997) publikációiban jelent meg először (lásd még az új modell Halley-üstökösre vonatkozó alkalmazását Szegő és mások (2001) által, illetve a Rodionov és mások (2002) által készített összefoglaló munkát).

A Halley, Borrelly, Wild 2 és Tempel 1 magjából kijövő jetek és általában az üstökösök aktivitása az űrszondák közeli felvételein a jelenség fizikájának nem nyilvánvaló mivolta és bonyolultsága miatt egy újszerű modell megalkotására készítette Crifo, Rodionov és Szegő űrfizikusokat. Ugyanis eddig a hagyományos, régen elfogadott és használt modellekben a mag felszíne közelében a szublimáló anyag részecskéinek sebességeloszlását termodinamikai egyensúly feltételezésével határozták meg, de ez nem helyes. Ugyanis amikor a szublimáció során szilárd-gáz fázisátmenet történik a vákuumba, vagy legalábbis igen ritka gáz közegbe, a sebességeloszlást nem-egyensúlyi folyamat feltételezésével kell figyelembe venni: ez a Knudsen-áramlás, és az a felszínközeli tartomány, ahol ez végbemegy, a Knudsen-réteg. Ennek korrekt figyelembevételét tették meg az említett kutatók korrekt és részletes 3-dimenziós poros gáz hidrodinamikai számítási apparátus felhasználásával, az üstökösök szabálytalan alakjából következő felszíni morfológiájuk figyelembevételével és szuperszámítógépek (pl. Cray) segítségével. A modellnek az a következménye, hogy a jetek nem a mag lokalizált kis aktív területeiről kiáramló kollimált (jól összetartott) gáz- és poráramlások, mint azt a régi paradigma állítja, hanem a jetekhez nem is kellenek lokalizált aktív területek. A jetek tulajdonképpen a mag felszíni domborzatától függő, a felszín felett bizonyos magasságban létrejövő anyagsűrűsödések, amelyek bonyolult hidrodinamikai áramlási folyamatok és a felszín geometriájának összehatásaként alakulnak ki. Ezek fényét látjuk jetnek. Tehát nem lehet bármilyen domborzat esetén jeteket megfigyelni, például túl sík felület felett nem jönnek létre ilyen sűrűsödési helyek. A modell készítői a Halley-üstökös magjára ható nem-gravitációs erőhatások időbeli változását számították ki és a megfigyelt forgó- és keringő mozgással jól egyező eredményeket kaptak (Szegő és mások 2001). Az új modell paradigmaváltást jelenthet az üstökösök

anyagkiáramlási mechanizmusának magyarázatára, ha több esetben is és minden szempontból sikerül igazolni a modell helyességét. Lehet, hogy a 9P/Tempel 1 üstökös magjának „nem látható” felszíni aktivitását¹³ is ezzel a modellel lehetne magyarázni?

Az üstökösöket közelről meglátogató helyszíni űrszondák eredményei után ma van *biztosnak vehető* tudásunk az üstökösök több fizikai tulajdonságainak egy részéről, de vannak olyan fizikai tulajdonságok, amelyeket ma még csak *valószínűsíteni* lehet, sőt több olyan tulajdonság, régebbi ismereteken alapuló állítás is van, amelyeket az újabb ismeretek fényében el kell vetni és csak a *„legendák”* világába tartoznak. Ez a három kategória a következőképpen foglalható össze:

1. Mi tűnik biztosnak?

- Az üstökösök kis átlagos tömegsűrűségű, nagy porozitású és kis belső összetartó erőkkel egybetartott kis égitestek.
- A lokalizált aktivitás koncepciója érvényes, vagyis az üstökösök felszínének jól behatárolható, lokalizálható kis területei az aktív területek (VEGA 1 és 2, Giotto, Stardust, Deep Impact).
- A szublimáció a felszín közelében történik, néhány centiméteres mélységig (Hale-Bopp, Deep Impact).
- Nagymértékű diverzitás: az üstökösök nagymértékben eltérnek egymástól (alak, felszíni szerkezet, aktivitás, por/gáz tömegarány, stb.). Ezt földi megfigyelések, valamint a helyszíni űrszondák, különösen a Deep Impact és Stardust-NExT eredményei is megerősítik.
- Több éve még úgy gondoltuk, hogy az üstökösök teljesen „érintetlenül” megőrizték a kialakulási ősi állapotokat, de ma ezt úgy kell módosítani, hogy a felszínük átalakulhatott (Stardust, Deep Impact). Mindenképp továbbra is igaz, hogy a mag legnagyobb része megőrizte az őseredeti állapotok lenyomatát.

2. Mik tűnnek csak valószínűnek, de nem teljesen biztosnak?

- Az üstökösök anyagának kicsi a hőtehetetlensége: kisebb, mint $50 \text{ W m}^{-2} \text{ s}^{-1/2} \text{ K}^{-1}$ (Hale-Bopp, Deep Impact: 9P/Tempel 1), következésképp az üstökösök anyagának alacsony a hővezető képessége ($0,001\text{--}0,1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, mint például a Hale-Bopp, 9P/Tempel 1 üstökösök esetében). Nyilván még több üstökösömről kell adat a mag hővezetési paramétereinek meghatározására.
- Vízjég aktivitás csak a felszín legfelső, mintegy 1 milliméteres – 1 centiméteres rétegében megy végbe.
- Van egy felszín alatti 1 méternél vékonyabb széndioxid határréteg (Deep Impact).
- Bizonyos esetekben esetleg nem csak jól lokalizálható helyekről történik gáz és por kiáramlás az üstökösök felszínéről, hanem a Crifo–Rodionov–Szegő modell koncepció is működhet esetenként és ezt csak helyszíni űrszondás vizsgálatok mutathatják ki a jövőben.

¹³A disszertáció írásakor még nem tették közzé a Stardust-NExT űrszonda Tempel 1 találkozásának eredményeit, mert a kutatócsoportoknak erre még nem volt idejük, ugyanis egyszerre két flyby adatain is dolgoznak (102P/Hartley 2 EPOXI 2010 és 9P/Tempel 1 Stardust-NExT 2011).

3. Ma nem helytálló, "felejtető" állítások, vagyis mik tekinthetők csak "legendának" az üstökösökkel kapcsolatban?

- Ismerjük az üstökösök alapvető fizikai tulajdonságait (átlagos sűrűség, belső összetartó erők, hőáramlási tulajdonságok, aktivitás mechanizmusai,...).
- A legutóbbi helyszíni űrszondák eredményei után értjük az üstökösök aktivitási mechanizmusát.

Az előzőekből kitűnik, hogy az üstökösöket közvetlen közlől helyszíni űrszondákkal végzett kutatások már több kérdésre választ adtak, de ennek ellenére még ma is sok nyitott kérdés maradt. Mik ezek a kérdések és miért egyedülállóan és különösen fontosak és érdekesek ma is a tudományos kutatás szempontjából az üstökösök? Ezek a kérdések tehát a következők:

1. Az üstökösök aktivitása fizikai és kémiai alapjainak részletei még ma sem ismertek

- Mi az aktivitás pontos mechanizmusa?
- Hogyan valósul meg az egyensúly az erózió és a hővezetés között?

2. Az üstökösök eredete, forrásvidékei a Naprendszerben – vagy azon kívül, valamint vannak-e és ha igen, akkor miért vannak a kémiai összetételben hasonlóságok és eltérések?

- Mik voltak a korai Naprendszer fizikai és kémiai viszonyai?
- Lehetnek-e az Oort-felhőben más csillagok körüli üstökösfelhőkből befogott üstökösök?

3.1. Őseredeti kis égitestek

Az üstökösöknek ma négy forrásvidékét, *rezervoárját* ismerjük a Naprendszerben (Duncan és mások 2004; Jewitt 2009). Az Oort-felhőt azok az üstökösök alkotják, amelyek az óriásbolygók gravitációs szóróhatására kerültek ki a Naptól távol gömb-szimmetrikusan körülvéő térségbe még a Naprendszer korai szakaszában. A másik nagy forrásvidék a Szórt Korong Objektumok (SDO-k) csoportja, amelyben a kis égitestek nagy inklinációjú ($0^\circ - 40^\circ$) elnyújtott ellipszis pályán (max. $e \sim 0,8$) keringenek és a transzneptun-objektum övezet nagy naptávolságokra és inklinációkra való kiterjesztését jelentik. Égi mechanikai numerikus szimulációk szerint az ekliptikai üstökösök túlnyomó többségének a forrásvidéke a transzneptun-övezet elsősorban egy szűkebb tartománya, a Kuiper-övezet, ami a harmadik rezervoárt jelenti. A Jupiter-trójai kisbolygók közül is kerülhetnek ekliptikai üstökös pályára kis égitestek, de a becslések szerint az ekliptikai üstökösöknek legfeljebb csak mintegy 10%-a lehet ilyen eredetű, ezért a Jupiter-trójai régiót nem tekintjük külön forrásvidéknek. A negyedik forrásvidék a fő-övbeli kisbolygók között van: ezek a fő-övbeli üstökösök (Main Belt Comets, MBC). Ennek a forrásvidéknek a kutatása igen nehéz feladat és ma még csak néhány objektumát ismerjük, ráadásul nem is mindegyik objektum aktivitási mechanizmusát ismerjük, illetve tudjuk azonosítani az ismert szokásos üstökösaktivitással. Ugyanis vannak az MBC-k között klasszikus üstökösaktivitást mutató objektumok, de például a 133P/Elst-Pizarro esetében nem figyelték meg közvetlenül a gázkibocsátási aktivitás jeleit és a megfigyelt porkibocsátás magyarázatot igényel (Hsieh és mások 2004; Hsieh & Jewitt 2006; Toth 2000, 2006b).

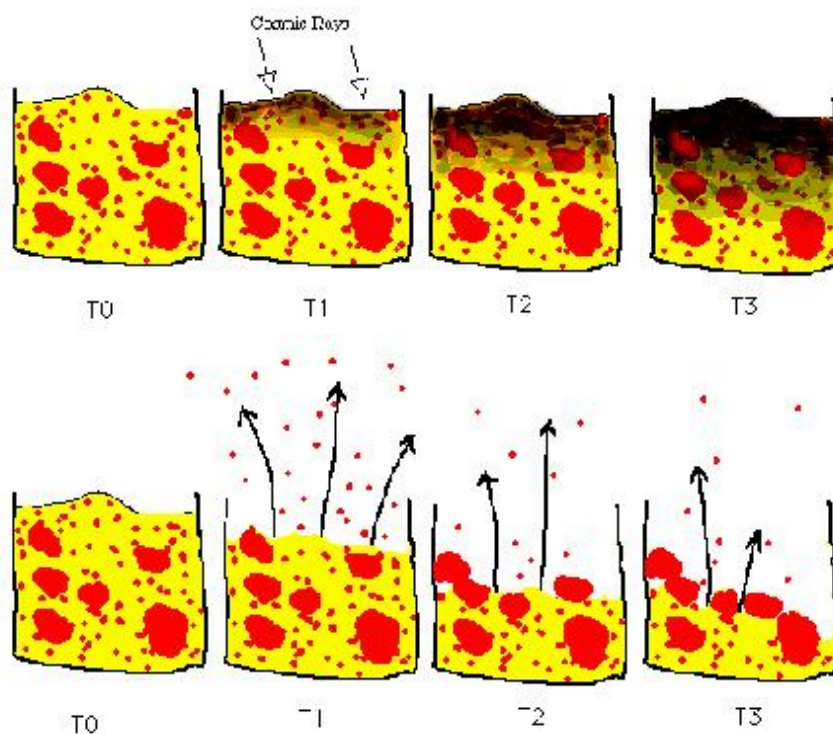
Az üstökösök belsejének hőmérséklete mintegy 50–200 K, és a körülbelül 200 K körüli felső határt csak a napközelség rövid időszakában éri el (Thomas 2009). A Naptól mindig távoli, például a 29P/Schwassmann-Wachmann 1-üstökös¹⁴ magja, illetve még a forrásvidéken tartózkodó üstökösök magja mintegy 50 K. Ez az alacsony hőmérséklet teszi lehetővé az üstökösanyag őseredeti, változatlan állapotban való megmaradását. Így például mintegy 150 K alatt a vízjég amorf állapotában is megmaradhat. Nagyobb transzneptun-objektumok és üstökösök esetén felmerül a belső rádióaktív fűtés lehetősége, amely átalakítja az őseredeti anyagot, ilyen esetekben már nem őrizték meg a kialakuláskori ősköd eredeti kémiai összetételét. sőt belső szerkezetükben is módosulhattak ezek a nagyobb méretű kis égitestek. Az általunk eddig ismert üstökösök közül csak a Hale-Bopp mintegy 70–80 km átmérőjű magja volt a legnagyobb, a többi Oort-felővel kapcsolatos, illetve ekliptikai üstökös magja ennél jóval kisebb, tehát az üstökösök a primitív kis égitestek közül is a legkisebbek.

Az üstökösök magját a kialakulásuk óta eltelt mintegy 4,6 milliárd év alatt különböző hatások érték. A Nap körül keringő kis testekkel, meteoroidokkal, illetve más üstökösökkel való ütközésük csak a kialakulásuk időszakában volt jelentős, mert utána a becsapódások valószínűsége elhanyagolhatóvá vált. A légkörnélküli primitív kis égitest (üstökösök, transzneptun-objektum, kentaur) felszínét a sugárzások és meteoritikus anyag akadálytalanul eléri. Így minden üstökösök felszínét akadálytalanul éri a galaktikus kozmikus sugárzás, illetve a Nap elektromágneses és részecske sugárzása, de a Naptól távoli vidékeken, mint például az Oort-felhő és a Kuiper-övben a Nap elektromágneses sugárzása és a napszél hatása kevésbé érvényesül, mint a Naprendszer belső térségeiben. Azonban a nagy naptávolság ellenére a forrásvidéken töltött hosszú idő alatt a galaktikus kozmikus sugárzás, illetve a helioszféra kiterjedése miatt a napszél hatása átalakította az üstökösök felszínének legkülső rétegét. Emellett több milliárd év alatt a bolygóközi por- és meteoranyag is nyomot hagyott az üstökösök felszínén, amit a közeli űrszondák felvételei is mutatnak: a mélyedések egy része becsapódási kráter. A mélyedések többsége azonban nem becsapódási kráter, hanem az üstökösök anyagkibocsátási aktivitásának következtében létrejött felszíni alakzat.

Az üstökösök felszínét tehát elsősorban az elektromágneses és kozmikus sugárzás, illetve az anyagkibocsátási aktivitás alakítja. Ezek a folyamatok az üstökösöknek a látható fénytartományban megfigyelhető színét is megváltoztatják. A sugárzások hatására hosszú idő alatt besugárzási köpeny alakul ki, amelynek sötét, alacsony albedójú, sötét vöröses-barna színt ad a kis égitest felszínének. A felszíni anyagkibocsátás pedig a nagyobb méretű porszemcsék, törmelékdarabok felhalmozódását idézi elő, amelyek viszonylag nagy tömegük miatt a szublimáló és kiáramló gáz nem képes felgyorsítani és a kis égitest felszínéről eltávolítani. Így egy törmeléktakaróval borított felszín alakul ki, amelynek a Naphoz képest semleges (szürke), illetve kék színe lesz. Ezek a hatások, illetve az anyagkibocsátás miatt bekövetkező felszíni erózió, mélyedések kialakulásában, valamint a felszín legkülső néhány deciméteres – méteres rétegének elvesztésében mutatkoznak meg. Az üstökösök legkülső, de viszonylag vékony rétege tehát már nem őseredeti, hanem átalakult, azonban ennél mélyebben az üstökösök anyag és a mag szerkezete még őseredeti és ez nagyon fontos tény ezeknél a kis égitesteknél.

A besugárzási és törmeléktakaró kialakulása röviden Jewitt (1992, 2009b) alapján a következőképpen megy végbe. A besugárzási köpeny kialakulásának főbb szakaszai

¹⁴Kentaur – ekliptikai üstökös átmeneti objektum kis excentricitású (0,044) pályán kering és mindig a Jupiter pályáján túl tartózkodik, napközben 5,72 CsE-re van a Naptól.



17. ábra. Egy primitív kis égitest (üstökösmag, primitív aszteroid) felszínének átalakulása a kozmikus sugárzás ("cosmic rays" felíráttal folyamatsor fent) és az üstökös aktivitás következtében kiszabadult és a felszínre visszahullott felhalmozódó nagyobb törmelékdaraboktól (folyamatsor lent). A részleteket illetően lásd a 3.1. pontot (a kép forrása: Jewitt 1992).

a következők (lásd a 17. ábrát is). Kezdetben (T0) az üstökösmag jeges és poros, törmelékes anyagból áll. Később (T1) a kozmikus részecskesugárzásnak kitett jeges-poros felszín jegeiben megkezdődik a molekuláris kötések felbomlása. Az idő előrehaladtával (T2) a jéganyagban a kötések felbomlása egyre nagyobb mértékű lesz. Részecskegyorsítókban végzett kísérletek szerint a besugárzás hatására a hidrogén elszökik és a visszamaradt anyag összetettebb szerkezetű lesz, mert sokféle komplex szénvegyület képződik, például polimerek jönnek létre, a felszín sötét és vörös színű lesz. Végül (T3) a folyamat telítésbe megy, vagyis a felszín közelében már nem képződik több komplex szénvegyület. Néhányszor 100 MeV több GeV közötti kozmikus sugárzás okozza a legkiterjedtebb és a felszín alá a legmélyebben kiterjedő ilyen átalakulásokat. Ezek az átalakulások a jeges felszín alatti néhány méteres mélységig mennek végbe, tehát a besugárzási réteg is ilyen vastag lesz. A T3-T0 időtartam mintegy 100 millió év, vagyis a besugárzási réteg ennyi idő alatt alakul ki.

A törmelék-köpeny (felszíni kéreg) kialakulásának főbb állomásai a következők (lásd a 17. ábrát is). Kezdetben (T0) az üstökösmag jeges és poros, törmelékes anyagból áll. Később (T1) a Nap melegíti a felszínt és jegek szublimálnak, közben a kisméretű porszemcséket a gáz felemeli a felszínről (T1-T2). A nagyobb tömbök (nagy porszemcsék, meteoritikus anyag, szikladarabok) túl nehezek ahhoz, hogy a gáz felemelje azokat és a felszín felét borítják (T3). Végül a teljes felszínt nagyobb méretű törmelék borítja (T4 > T3). A T4-T0 időtartam viszonylag rövid, egy teljes

keringés alatt kialakulhat a törmelék-köpeny (felszíni kéreg¹⁵).

Az imént vázolt folyamatnak az egyik következménye az, hogy a primitív kis égitest színe a kozmikus sugárzással sötét vörös lesz hosszú idő alatt a Naptól távoli forrásvidéken. A másik következmény pedig az, hogy amint égi mechanikai okokból a kis égitest pályája napközelpontja és naptávpontja is egyre közelebb kerül a Naphoz, a beinduló szublimációs aktivitás következtében kialakul a törmelék-köpeny. Az aktivitás és a törmelék-köpeny kialakulása pedig az égitest színének a Naphoz képest semlegessé (szürkülés), illetve kékebbé válását eredményezi.

3.2. Csillagközi törmelékkorong maradványa és az ekliptikai üstökösök eredete

A megfigyelések azt mutatták, hogy a Jupiter-családjához tartozó üstökösöknek folyamatos az utánpótlása, ami egy forrásvidék meglétére utalt, de ezt a forrásvidéket hosszú ideig nem sikerült azonosítani. A Plútó felfedezése után már felmerült, hogy égitestek sokasága lehet túl a Neptunusz pályáján, a transzneptun-régióban (Leonard 1930). A transzneptun-övezet létezésének elméleti megalapozása (Leonard 1930; Edgeworth 1943, 1949; Kuiper 1951; Fernández 1980; Duncan és mások 1988) egyben az ekliptikai üstökösök valószínű forrásvidékének beazonosítását is jelentette (l. még 2.2 pont végét a 12. oldalon), de megfigyelésekkel történő kimutatása csak 1992-ben történhetett meg. A Kuiper-övezet kutatásában fordulópontot jelentett amikor 1992-ben Jewitt & Luu (1992, 1993) felfedezték az első klasszikus Kuiper-öv objektumot (1992 QB1). Egyébként a Kuiper-övezet elnevezést Duncan és mások (1988) használta először, de tudjuk, hogy valójában három névhez is szorosan kötődik a Naprendszer ezen külső vidékének elméleti megalapozása, ezért ennek megfelelően Leonard-Edgeworth-Kuiper-övnek is szokták említeni (Luu & Jewitt 2002), de a Kuiper-öv rövid elnevezés terjedt el. A Kuiper-öv naptávolságban egy viszonylag élesen behatárolt övezet mintegy 30 CsE-től 50 CsE-ig terjed és az objektumai pályasíkja közel esik az ekliptika síkjához ($i < 40^\circ$). A Kuiper-öv kiterjedését és objektumainak mozgását az óriásbolygók, de elsősorban a Neptunusz tömegvonzása határozza meg. Meglepetés volt 1996-ban az 1996 RQ20 és 1996 TL66, az első elnyújtott és nagy inklinációjú, 30 CsE-nél nagyobb perihélium távolságú ellipszis pályákon keringő objektumok, a Szórt Korong Objektumok (Scattered Disk Objects, SDO) felfedezése (Luu és mások 1997).

A Kuiper-öv, illetve a Szórt Korong Objektumok felfedezésével a Naprendszer architektúrájának egy új nagy szerkezeti alkotórésze kezdett kibontakozni előttünk. Ezek a megfigyeléseken alapuló felfedezések nagyon jelentősek, hiszen a transzneptun-zóna és benne a Kuiper-öv egy főszorozati csillag, mint a Nap is, körül kialakult úgynevezett főszorozati por- vagy törmelékkorong ma megfigyelhető maradványa. Más csillagok körüli ilyen korongokat közvetlenül először az 1983-ban működött IRAS infravörös csillagászati mesterséges hold által történt felfedezésekkel kezdtük megismerni (Smith & Terrile 1984). Az extraszoláris törmelékkorongok tulajdonképpen más csillagok körül kialakulásuk kezdeti szakaszában lévő, vagyis számunkra archaikus Kuiper-övek. Naprendszerünk Kuiper-öve, valamint Szórt Korongja megismerése általában a csillagok körüli bolygórendszerek kialakulásáról és fejlődéséről is ismereteket ad, illetve fordítva: extraszoláris bolygórendszerek és csillagok körüli korongok

¹⁵Az angol nyelvű szakirodalom a "rubble(-pile) mantle" elnevezést használja, de a "crust" (kéreg) elnevezés is előfordul, ez utóbbi itt szerencsésebb lenne, mert a legkülső rétegről van szó és erre a "kéreg" szó használatos a planetológiában, geofizikában. A köpeny viszont egy mélyebb réteget jelent.

megismerésén keresztül bolygórendszerünk múltjáról és fejlődési állapotairól is képet alkothatunk. Sőt, a feltételezések szerint a transzneptun-zónából eredtő ekliptikai üstökösök, mint őseredeti primitív kis égitestek tanulmányozásával a Naprendszer törmelékkegységének kezdeti állapotába és fejlődésébe is bepillanthatunk.

A korábban Jupiter üstökös-családjához tartozónak nevezett, majd a Levison (1996) által javasolt taxonómia alapján ekliptikai üstökösnek meghatározott üstökösök és a felfedezett transzneptun-övezet közötti kapcsolatot elsősorban égi mechanikai numerikus szimulációk segítségével lehetett vizsgálni (Duncan & Levison 1997; Levison & Duncan 1997).

A Kuiper-öv első égi mechanikai vizsgálatai kiderítették annak dinamikai csoportjait: a klasszikus Kuiper-öv objektumokat, valamint a rezonáns objektumok több csoportját, amelyeknek legnevezetesebb képviselői a plutinók, amelyek a Plútóhoz¹⁶ hasonlóan 2:3 középmozgás rezonanciában vannak a Neptunusszal. Egyéb középmozgás rezonanciák is léteznek a Kuiper-övben, amelyek között vannak hosszú időn, évszázmilliók, évmilliárdokig stabilak, illetve vannak instabil rezonanciák és tartományok is, ahonnan rövid idő (néhány tízmillió év) után eltávoznak az addig ott tartózkodott objektumok.

A Kuiper-öv dinamikai feltérképezése során még az is kiderült, hogy a klasszikus Kuiper-öv objektumok két alcsoportra oszthatók a pályájuk dinamikai gerjesztettsége alapján (Kuchner és mások 2002; Gomes 2003). E szerint az alacsony a kevésbé gerjesztett objektumok alacsony inklínációjú és kis excentricitású pályákon keringenek (dinamikailag "hideg", "cold" objektumok, jelölésük a továbbiakban CKBO-LI), illetve a dinamikailag gerjesztett objektumok nagy inklínációjú és elnyúltabb ellipszis pályán keringenek (dinamikailag "forró", "hot" objektumok, CKBO-HI).

A Kuiper-öv klasszikus és rezonáns objektumait tartalmazó régióit egyaránt alkalmasnak gondolták az ekliptikai üstökösök forrásvidékeinek. Morbidelli szerint a kaotikus diffúzióval elhagyhatják a rezonáns zónákat, így például plutinók is szóbajöhetnek a kentaurok, majd pedig az ekliptikai üstökösök őseiként. A klasszikus Kuiper-öv dinamikailag "hideg" (CKBO-LI) objektumai hosszú idő alatt képesek elhagyni eredeti kis excentricitású, alacsony pályahajlású pályájukat és kentaur, majd ekliptikai üstökös pályára állni, ahogyan azt még Levison & Duncan (1997) felvetette a klasszikus Kuiper-öv objektumokra.

A régmúltban a Kuiper-öv objektumai között az ütközések nagyon gyakoriak lehetnek és erre körülményre Stern (1995) hívta fel a figyelmet, hiszen például extraszoláris törmelékkegységekben is megfigyelhetjük az ütközések következményeit, nyomait. Az ütközések következtében az ütközési törmelékdarabok olyan sebességtöbbletre tettek szert, hogy elszökhettek a Kuiper-övből (Farinella & Davis 1990; Davis & Farinella 1997). Az ütközési törmelékek a Kuiper-öv erősen kaotikus régióiba kerültek és azt rövid idő múlva elhagyva kentaur, majd ekliptikai üstökös pályákra álltak rá, sőt a diffúzió önmagában is képes a Kuiper-övből objektumok eltávolítására. Davis & Farinella (1997) becslése szerint a diffúzió és az ütközések azonos hatásokkal hoznak létre ekliptikai üstökösöket a Kuiper-övből kis égitestek eltávolításával a Naphoz közelebbi pályákra. Azonban a klasszikus Kuiper-öv objektumok dinamikai élettartama csak mintegy egytizede a Szórt Korong Objektumokénak és ez felveti, hogy a klasszikus Kuiper-öv nem adja hosszú időtartamra az ekliptikai üstökösök hatékony utánpótlását.

A Szórt Korong Objektumok eredetére utal ennek a dinamikai csoportnak az elnevezése és ez közelebb visz az ekliptikai üstökösök eredetének dinamikai úton

¹⁶A Plútó 2006 óta törpebolygó, tulajdonképpen a Kuiper-öv legnagyobb objektumainak egyike.

történő megértéséhez. A nagybolygók, különösen pedig a Kuiper-övre közvetlen hatást gyakorló Neptunusz migrációja következtében a klasszikus Kuiper-öv objektumai nagy inklinációjú és excentricitású pályára kerültek, kialakítva a CKBO-HI alcsoportot, illetve a Szórt Korongot. Végülis tehát a Szórt Korong Objektumok egykor klasszikus Kuiper-öv objektumok voltak (Levison és mások 2008) és ez az alábbi vizsgálatokból látható.

A Szórt Korong Objektumok felfedezését követően Duncan & Levison (1997) 4 milliárd éves időtartamra elvégzett numerikus integrációs számításaira alapozva felvetette, hogy az ekliptikai üstökösök ősei a Szórt Korong Objektumok között lehetnek. Ebben a modellben az SDO-kból nem közvetlenül lesznek ekliptikai üstökösök, hanem először az SDO-k pályája az óriásbolygók hatására fokozatosan egyre kisebb félnagy tengelyű és napközeli távolságú, a külső óriásbolygók (Szaturnusz–Neptunusz) pályáját metsző lesz, és végül kentaurok pályára állnak. A kentaurok legtöbbjének pályája kaotikus és instabil, naptávolságuk tovább csökken míg majd a Jupiter hatása fogja dominálni mozgásukat és ezzel a Jupiter-család üstökösök lesznek. A kentaurok kaotikus mozgására jellemző, hogy mintegy egyharmaduk elhagyja a Naprendszer, illetve az Oort-felhőbe lökődik ki. Több esetben még a kentaurok zónában az üstökösaktivitás is már megjelent ezeken a jeges-poros kis égitesteken és kentaurok-üstökös átmeneti objektumként mutatkoznak és megfigyelhetők (pl. 29P/SW1). A kentaurok tehát SDO – ekliptikai üstökös átmeneti objektumok. Duncan & Levison (1997) modelljüket tovább tesztelték és finomították megerősítették az SDO-k előbb vázolt dinamikai fejlődési útját. Fontos körülmény az, hogy Levisonék a világon a legfejlettebb hosszú időtartamokra, milliárd évekre is jól működő numerikus integrációs technikát fejlesztették ki (Levison és mások 2008). Tehát más dinamikai modelleknek is hasonló eredményt kell adni, mai ismereteink szerint összhangban kell lenni a Levison-féle modellből kapott eredményekkel. Volk & Malhotra (2008) ugyanis azt javasolták, hogy az SDO-k közvetlen ősei az ekliptikai üstökösöknek, vagyis a kentaurok dinamikai állapot kihagyásával a Szórt Korong populáció objektumainak pályaváltozásai ekliptikai üstökösöket eredményezhetnek. Ez a kép azonban ellentétben áll Modbidelli és mások (2005) (l. még Levison és mások (2008) "Nice" modelljével¹⁷, a Naprendszer ma legalaposabb és több milliárd éves időskálára kidolgozott dinamikai modelljével. Úgy tűnik tehát, ma az égi mechanikai numerikus szimulációk különböző eredményei miatt vitatott, hogy az ekliptikai üstökösöknek lehetnek-e közvetlen ősei a Szórt Korong Objektumok. Az mindenképp figyelemre méltó, hogy a Szórt Korong Objektumok elsődleges forrás-objektumai, ősei a kentauroknak a "Nice" dinamikai modell szerint és az ekliptikai üstökösök végső soron a Szórt Korong Objektumok dinamikai leszármazottai, de a "Nice" modellel konkurrens Volk-Malhotra-féle modellt is figyelembe véve a kérdés az, hogy közvetlenül vagy a kentaurokon keresztül. A "Nice" modellben a Szórt Korong Objektumok viszont még az ősidőkben a klasszikus Kuiper-övből származtak, tehát ebben a modellben az ekliptikai üstökösök ősei az archaikus Kuiper-övből elszármazott és SDO pályára került objektumok.

A Naprendszer "Nice" dinamikai modelljében Modbidelli és mások (2005) több milliárd évre visszamenőleges numerikus szimulációval azt vizsgálták, hogy a mintegy 3.8 milliárd évvel ezelőtti történet utolsó heves becsapódási eseménysorozat (a szakirodalomban Late Heavy Bombardment, LHB) hogyan ment végbe és milyen következményei voltak a ma megfigyelhető Naprendszerre, különösen a kis égitestek populációinak mozgására és Naprendszerbeli új helyzetükre. Az óriásbolygók a mai

¹⁷A "Nice" modell elnevezés a franciaországi Nizza (Nice) városának nevét őrzi, ahol Alessandro Morbidelli professzor dolgozik és ahol a modellt kifejlesztette az Observatoire de la Côte d'Azur C.N.R.S. kutatóintézetben és egyben a modell kiváló minőségére is utalhat az angol "nice" jelzővel.

pályájuk eléréséig „vándoroltak”, migráltak, és ennek során elsősorban a pályájuk félnagy tengelye változott és a migrációs mozgásuk folyamán szinte „összerázták” a kis égitestek csoportjait, miközben maguk is rövid ideig meghatározó rezonanciákba kerültek egymással, amely még fokozta is a kis égitestek eredeti pályájukról való eltérítését. Ennek következtében ezek egy része kiszoródott a külső Naprendszerbe, más részük pedig a Naprendszer belseje felé vette útját. Az így útrakelt kis égitestek jó része a bolygókba és holdjaikba ütközött és különböző becsapódási formák, medencék, kráterek alakultak ki régen és adnak hírt ma az ősidőkben megtörtént heves becsapódásokról (LHB).

A Naprendszer "Nice" dinamikai modelljének egy további, a szakmai közvéleményt felrázó és vitákat gerjesztő következtetése is volt. Morbidelli és mások (2005) meglepően új következtetése ugyanis az volt, hogy a transzneptun-övezetből a Naprendszer belseje felé tartó kis égitestek egy részét az ún. kaotikus befogási mechanizmussal a nagy tömegvonzású Jupiter-trójai kisbolygó pályára fogta be (Jupiter-trójai kisbolygók). Ezek az új vizsgálatok is nagy kiterjedésű stabil tartományokat mutatnak a Jupiter-trójai régiókban csakúgy, mint az ettől függetlenül mások általa végzett égi mechanikai vizsgálatok, így a "Nice" modellben is sok trójai kisbolygó maradhatott ott a régmúltból, de eredetileg a transzneptun övezetből kerülhettek oda. A modell következménye az, hogy az ekliptikai üstökösök egy kis része a Jupiter-trójai pályáról került ki később, de a belsejükben megőrizték a transzneptun égitestek anyagát.

Morbidelli és mások (2005) (l. még Levison és mások 2008) imént említett modelljének közzétételével egyidejűleg azonban kétségek is felmerültek ezzel az elképzeléssel kapcsolatban. Az LHB eseménysorozat részletes modellezését elfogadják, de a kutatók többsége nem osztja Morbidelli és Levison azon következtetését, hogy a Jupiter-trójai kisbolygók befogott transzneptun objektumok lennének. Nem bizonyul ugyanis elég hatékonynak a kaotikus befogási folyamat és főleg emiatt nehéz elfogadni ezt az elképzelést. Mint fentebb említettük, nagyon nehéz trójai pályára kerülni és úgy tűnik, hogy még a kaotikus befogási mechanizmussal sem. E sorok írásakor tehát nem következett be paradigmaváltás a Jupiter-trójai kisbolygók eredetét, és ennek esetleges következményeként az ekliptikai üstökösök egy részének eredetét illetően.

A transzneptun-objektumok és az ekliptikai üstökösök közötti lehetséges összefüggésről a fizikai tulajdonságai megismerésével is meg kell alapozni. Megfigyelésük azonban a halványságuk miatt még nagy földi távcsövekkel is igen nehéz feladat és nagy kihívást jelent akár fotometriai akár színképi vizsgálatokról legyen szó.

A külső Naprendszer egymással feltételezhetően eredet és evolúciós kapcsolatban álló primitív kis égitestek közötti evolúciós kapcsolat megállapítása ma még nagy távolságból, csillagászati megfigyelésekkel történhet csak, mert közvetlen űrszondás vizsgálatuk csak egy-két esetben lehetséges és ez nem ad statisztikailag jelentős mintát. Fel lehet azonban használni az eredetük, forrásvidékük meghatározására a primitív kis égitestek felszínének megfigyelt színét, fotometriai színindexeit, illetve színképét a különböző populációk közötti összehasonlítás céljából a 3.1. fejezetben ismertetett folyamat figyelembevételével. Ennek a folyamatnak során a kis égitest felszínét a kozmikus sugárzás sötétté és vörössé teszi a Naptól nagyon távol töltött nagyon hosszú idő alatt, de amikor a kis égitest pályája hosszú idő alatt bekövetkező változása miatt egyre közelebb kerül a Naphoz a felszíni szublimációs aktivitás és anyagkibocsátás következtében a színe a Napéhoz képest semlegessé, illetve kékebbé változik meg. Ez a lassú folyamat egyfajta trendet, időbeli és fejlődési sort állít fel a primitív kis égitestek között, tehát a primitív kis égitestek különböző populációi a színindexekben

rendezettséget mutatnak és ebből a sorrendiségből, fejlődési irányból megállapítható az ős – leszármazott viszony. Tehát a primitív kis égitestek fotometriai színindex, illetve spektrofotometriai megfigyelése alapján meg lehet kísérelni az eredetük, forrásvidékük meghatározását. A fotometriai és színképi megfigyelési adatok azonban csak nehezen gyűltek.

Az 1990-es években még csak néhány ekliptikai és Oort-felhővel kapcsolatos üstökösmagról, illetve csak néhány transzneptun-objektumról és kentaurról volt fotometriai és színképi megfigyelési adat. Jewitt & Luu (1990) 32 Jupiter-trójai kisbolygót, mint üstökösökkel spektrálisan analóg objektum színképi megfigyelését közölte, majd Luu (1993), Luu & Jewitt (1996) kiszélesítette az összehasonlítást néhány kentaur, Kuiper-öv objektum és üstökösmaag színképével. A Hubble Űrteleszkóppal folytatott ekliptikai üstökösmaag megfigyelési program első eredményeként kapott fotometriai színindexekre alapozott statisztikai vizsgálataim első eredményeit 2001-ben közöltem (Toth & Lamy 2000) 13 üstökösmaag megfigyelésére alapozva. Az első nagy megfigyelési program az ESO Transzneptun-objektum fotometriai programja, amely több tucat transzneptun-objektum és kentaur, valamint 12 üstökösmaag fotometriai színindexeinek meghatározását eredményezte (Hainaut & Delsanti 2002). Jewitt (2002a, 2002b) végezte az első vizsgálatokat a külső Naprendszer primitív kis égitestei közötti kapcsolat megállapítására 28 Kuiper-öv objektum, 9 kentaur, 12 ekliptikai üstökösmaag, 12 inaktív üstökösmaag (földközeli objektum, NEO) és 32 Jupiter-trójai kisbolygó elsősorban a Hawaii Mauna Kea-n lévő teleszkópokkal folytatott fotometriai, illetve spektrofotometriai megfigyelési adataira alapozva. Az ESO és Hawaii megfigyelési adatok szerint az üstökösmaagok kékebben, mint a Naprendszer többi primitív kis égiteste, ami megfelel a modellnek (3.1. fejezet). Doressoundiram és mások (2005) Meudon Többszínfotometriai Átvizsgáló program (Meudon Observatórium, Párizs) keretében 58 KBO és 9 kentaur, valamint a HST-vel megfigyelt (Lamy és mások 2004) üstökösmaag fotometriai adatai figyelembevételével a kis égitestek színindexei, fizikai paraméterei és pályadatai közötti korrelációkat kerestek, de nem adtak határozott következtetéseket tekintettel a statisztikailag kis mintára. A kentaurok két különálló, diszjunkt csoportra oszthatók a kétszín-diagramon (Peixinho és mások 2003), de a Kuiper-öv objektumok nem alkotnak két különálló csoportot, amint azt az első kis megfigyelési minta alapján Tegler & Romanishin (1998) állította. Peixinho és mások (2003) szerint a kentaurok két elkülönült alcsoportra oszthatók a $(B - R)$ színindexben fennálló bimodalitás alapján: $(B - R) > 1,7$, "vörös" (CEN-I) és $(B - R) < 1,4$, "kék" (CEN-II) alcsoportokra. A kentaurok színindex eloszlásának bimodalitását érdemes lesz majd figyelembe venni a kentaurok őseinek, illetve a kentaur – ekliptikai üstökös evolúciós kapcsolat vizsgálatánál (l. a 10. fejezet).

A kis égitestek, köztük a transzneptun-objektumok és kentaurok között kettős vagy többszörös rendszerek is előfordulnak és ezeknek felfedezése, a komponensek pályamozgásának és méretének meghatározása alapján kiszámítható az átlagos tömegsűrűségük, amiből a belső szerkezetükre, kémiai összetételükre lehet következtetni. Ezáltal az ekliptikai üstökösök és őseik fizikai tulajdonságai megismerhetők. Még 1999-ben felvettem, hogy a kentaurok és az Kuiper-öv objektumai közt is lehetnek kettős rendszerek és ezek keringési stabilitási tartományával és detektálhatóságának lehetőségével foglalkoztam (Toth 1999). A Szebehely-féle stabilitási kritérium alapján a kettős kisbolygó rendszerek stabilitását vizsgáltam ismert Kuiper-öv objektumokra és Kentaurokra. Ez a kritérium ugyanis szigorú (konzervatív) határt ad meg a keringési stabilitási tartomány kiterjedésére. Megadtam a Szebehely-féle kritérium alapján a maximális szeparációs lineáris- és látszó szögtávolságokat és keringési időket. Taglaltam az ilyen kettős rendszerek felfedezhetőségének, megfigyelhetőségének lehe-

tóségeit is. Vizsgáltam a forgás/keringés szinkronizáció eléréséhez szükséges időtartamokat a Kuiper-öv Objektumok lehetséges belső anyagi paraméter értékeire: közepes tömegsűrűség és húzófeszültség, disszipációs paraméter (Q_{dis}), amelyek meghatározóak a szinkronizáció elérésének folyamatában. Az 1999-es cikkem inspirálóan hathatott az ilyen kettős rendszerek keresésére irányuló kutatásokra. 2000/2001. fordulóján fedezték fel az első kettős rendszert a Kuiper Övben (1998 WW1). Tehát valóban léteznek kettős transzneptun-objektumok. Sőt, mint azt a megfigyelési eredmények mutatják a 2001-2007 közötti időszakban 38 kettős vagy többszörös TNO és 2 kentaurendszert fedeztek fel. A ma ismert mintegy 1200 Kuiper Öv Objektum számának figyelembevételével ez azt jelenti, hogy a Kuiper Öv Objektumoknak legalább 3%-a kettős rendszert alkot. Az eddig talált transzneptun-objektumok átlagos tömegsűrűsége $0,3\text{--}1,5\text{ g cm}^{-3}$, ami alacsony és lefedi az üstökösök átlagos tömegsűrűségét, de a TNO-k mérete és ezzel térfogata bizonytalanul ismert. A kettős transzneptun-objektumokra és kentaurokra vonatkozó eredményeim csak megemlítettem és ebben az értekezésben nem tárgyalom tézispontként, mert nem közvetlenül üstökösfigyelésekkel kapcsolatos, de megemlítem, mert adalék a kentaurok és transzneptun-objektumok és közvetve az üstökösök fizikai tulajdonságai vizsgálatára irányuló kutatások előbbreviteléhez.

A fentiek alapján látható, hogy ma még vitatott kérdés az ekliptikai üstökösök eredete akár az elsődleges forrásvidék pontos azonosítását illetően, akár a másodlagos forrásvidékeket tekintve, vagyis a Kuiper-öv – Szórt Korong forrásvidékeket illetően. Ezen disszertáció egyik tézispontja lesz az erre vonatkozó új kutatási eredményeim ismertetése. A kutatási célkitűzéseket, az általam kifejlesztett vizsgálati módszereket a következő, 4. fejezetben ismertetem.

4. Kutatási célkitűzések és vizsgálati módszerek

4.1. Kutatási célkitűzések

A Halley-üstökös magjának űrszondákkal közvetlen közletről történt vizsgálata után merült fel bennem, hogy érdemes lenne további üstökösök csillagászati megfigyelésekkel vizsgálni, mert nyilvánvaló volt, hogy az üstökösök 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 üstökösök részletes, átfogó űrcsillagászati megfigyelő eszközökkel történő kutatásaim. A disszertáció alapvetően az üstökösök fizikai tulajdonságainak megismerését tűzi ki célul sok objektum űrteleszkópokkal történő csillagászati megfigyelése által.

Az értekezésben ismertetett tudományos kutatási célokat a tudományterület kevésbé kutatott problémái, a kevés vagy egyáltalán nem megfigyelt objektum, valamint a rendelkezésre álló, illetve elérhető műszerek határozták meg. E szerint az ekliptikai üstökösök magjának fizikai tulajdonságainak megismerése, az üstökösök ezen típusa eredetének, Naprendszerbeli forrásvidékeinek azonosítása fontos és új tudományos ismereteket, felismeréseket ígérő kutatási program. A disszertációban ismertetett tudományos kutatás célkitűzéseinek összefoglalása a következő:

1. Minél több ekliptikai üstökös magja fizikai tulajdonságának, méret, alak, tengely körüli forgási periódus, felületi fényvisszaverőképesség (albedó), színindexek, fázisfüggvény meghatározása.

2. Az ekliptikai üstökösök eredetének, ős-égitest 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 üstökösének 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 üstökösök 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 üstökösök tengelykörüli forgási ideje és mérete által adott mechanikai korlátozó feltételek alapján. Hasonló vizsgálatot el lehet végezni az őseiknek tekinthető kentaurok és transzneptun objektumokra.

4.2. A kutatás során alkalmazott vizsgálati módszerek

A kitűzött kutatási célok a következő kutatási, vizsgálati módszerekkel valósíthatók meg:

1. Ekliptikai üstökösök megfigyelése a Hubble Űrteleszkóppal a látható fénytartományban, valamint az Infravörös Űrobszervatórium (ISO) teleszkópjával és később a Spitzer Űrtávcsövel a termális infravörös tartományban az üstökösök méretének, alakjának, tengelykörüli forgási periódusának, albedójának, színének, fázisfüggvényének, adott esetben hőtani paramétereinek, valamint porkibocsátási aktivitása mértékének meghatározása céljából.
2. Megbízható módszer kidolgozása az üstökösök fényének elválasztására az aktív és fényes kóma fényétől a megfigyelésekből. A módszer ellenőrzése és alkalmazhatósági korlátainak megállapítása, az üstökösök fotometria és a belőle meghatározott paraméterek hibájának megadása.
3. Az ekliptikai üstökösök méreteloszlásának meghatározása. A kumulatív eloszlásfüggvény paramétereinek meghatározása. Az üstökösök 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 fotometriai 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 üstökösmagok, 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 üstökösmagok és a velük evolúciós kapcsolatban lévő primitív kis égitestek belső szerkezete, a belső összetartó erők meghatározhatók.

5. Az üstökösmagok detektálásának és fizikai jellemzésének módszerei

Ebben a fejezetben az általam kifejlesztett új módszert ismeretilem, amely alkalmas az üstökösök kisméretű magja fényének közvetlen detektálására és a mag, valamint az üstökös kóma fotometriájára. Ez a módszer és az alkalmazásával az üstökösmagokra kapott új eredmények az érdekezés tézispontjai között szerepelnek. Először röviden ismertetem az üstökösmagok csillagászati eszközökkel történő vizsgálatára alkalmazott más, korábbi módszereket, majd pedig az általam kifejlesztett módszert mutatom be a 5.2. pontban. Ez az új módszer és alkalmazásai tézispontokként is szerepelnek.

5.1. Előzmények: A leggyakoribb módszerek

Az üstökösmagok csillagászati módszerekkel mindenképp a legnehezebben megfigyelhető objektumok a Naprendszerben. A megfigyelhetőségüket két tényező is megnehezíti nevezetesen az, hogy i) ezek a kis égitestek igen kis méretűek, felszínük fényvisszaverő képessége alacsony, tehát sötétek és halványak, illetve ii) napközben aktív fényes kóma is zavarja az üstökösmag fényének detektálását. Ennek a két nehézségnek a kiküszöbölésére két vizsgálati módszer alakult ki az üstökösmagok távoli tehát csillagászati megfigyelésekkel történő közvetlen detektálására.

Az első módszer kóma nélküli üstökösmag fényének, mint egy aszteroid fényének megfigyelését jelenti a kisbolygók fényének, időbeli fényváltozásának elemzésére már több évtizede kidolgozott és még ma is egyre finomodó megfigyelési, adatfeldolgozási és értelmezési eljárásokkal. Ez a módszer jól alkalmazható a nagy érzékenységű és nagy megbízhatóságú csillagászati CCD detektorokkal a távoli kis üstökösmagokról visszavert napfény detektálására a látható fény tartományban. Ez a technika nagy méretű nagyon távoli vagy kisebb, de aktív kóma nélküli üstökösmagok fényének közvetlen megfigyelésére is alkalmas.

A második módszer megoldást ad arra az esetre, amikor az üstökösmag aktív és a detektálását megnehezítő, zavaró kóma veszi körül: ez a mag-kóma fényének szétválasztását lehetővé tevő eljárás, amelyet Hubble Űrtávcsővel készült üstökös-megfigyelésekhez készült először. Ezeket a módszereket, illetve alkalmazásuk előnyeit és hátrányait a következő alfejezetekben taglalom.

A fenti két módszer egyaránt alkalmazható a látható fény tartományban, illetve a termális infravörösben (hősugarak tartománya) végzett megfigyelésekre. Különösen fontosak az ugyanarról az üstökösma gról a látható és infravörös tartományban közel egyidőben végzett megfigyelések, mert ezekből független albedó és méret meghatározás válik lehetővé, vagyis a mag méretének meghatározásához nem kell albedót feltételezni, hanem a módszer alkalmazásakor automatikusan kiadódik.

Az üstökösma g által kibocsátott hősugárzás termális infravörös megfigyelése a mag által visszavert napfény látható fényben történő megfigyeléséhez képest jóval nagyobb nehézségekbe ütközik, mert a mag termális infravörös fluxusa igen kicsi (infravörösben halvány), a termális infravörös háttérzaj igen nagy különösen a 60-100 mikronnál nagyobb hullámhosszakon (például a 60 mikron az IRAS, 100 mikron a Spitzer és Herschel infravörös űrteleszkópok egy-egy megfigyelési tartománya). Ráadásul a földi légkör pedig a termális infravörös tartomány nagy részén nem áteresztő. További nehézséget jelent, hogy a látható fény tartományban működőkhöz képest az infravörös detektorok érzékenysége és szögfelbontása jelentősen elmarad. Az üstökösma g termális infravörösben való megfigyelését is zavarja az aktív és infravörösben is fényes kóma, ezért az üstökösök infravörös megfigyeléseinek kezdetén csak halványabb, kevésbé aktív üstökösöknél sikerült a mag fényét megfigyelni, de később az ISO és Spitzer infravörös Űrtávcsövek csúcstechnikájú érzékelőivel jobb szögfelbontás és érzékenység elérése vált lehetővé és ezáltal a megfigyelhető üstökösma gok köre jelentősen kibővült. Tehát a halványabbakról azaz kisebb, távolibb, aktív, kómás üstökösök magjáról és kómájáról pontosabb képalkotó fotometriai megfigyelések végzése vált lehetővé az újabb infravörös Űrtávcsövekkel az utóbbi tizenöt évben.

Az üstökösma g hősugárzásának a rádiótartományba eső része is megfigyelhető, de ezek a megfigyelések az infravörösben végzettekhez képest is nagyobb nehézségekbe ütköznek mivel a magokról kisugárzott és a Földről érzékelhető rádiójel igen kicsi. Eddig a C/1983 H1 (IRAS-Araki-Alcock) földközeli és a C/1985 O1 (Hale-Bopp) nagyon nagy méretű maggal rendelkező üstökös magját, illetve annak közvetlen közeli por- és törmelékfelhőjét sikerült ezzel a módszerrel megfigyelni.

Az égitesteket távolról is meg lehet figyelni a radarsillagászati technika eszközeivel. Ezzel a módszerrel dolgozik a bolygó vagy planetáris radarsillagászat (Ostro 1993). A megfigyelésekből a cél objektumok mérete (radar keresztmetszete), alakja, forgási paraméterei, esetleg felszíni alakzatai, a felszín elektromos tulajdonságai (dielektromos állandó, polarizáció) meghatározhatók, továbbá a radar albedó és a felszínen az anyag tömegsűrűsége is megbecsülhető. Ezenkívül az égitest pontos távolsága és térbeli sebessége, valamint pozíciója is meghatározható, és mindezekből a napközeli keringési pályája is kiszámítható.

Radarsillagászati módszerekkel is lehetséges az üstökösma g megfigyelése (Ostro 1993; Harmon és mások 2004) méretük, alakjuk és tengely körüli forgási paraméterek (forgási idő és a forgástengely térbeli iránya) meghatározása. Amennyiben az üstökösma g-ot por- vagy törmelékfelhő veszi körül centiméteres – deciméteres méretű szemcsékből, akkor az abban levő porszemcsék méreteloszlása és össz tömege is megbecsülhető. Azonban a Földhöz elég közelinek kell lenni a megfigyelt üstökösnek ahhoz, hogy elegendően nagy jel érkezzon vissza a csillagászati radarhoz, ugyanis a rádiótávcső által kibocsátott, az üstökösma gról visszavert, a radar üzemmódban működő rádiótávcső által felfogott radarjel erőssége a Föld-üstökös távolság negyedik hatványával fordítottan arányos. A radarsillagászati megfigyelések nehézsége a közvetkezőképpen érzékeltethető. Egy kis méretű égitestről is elegendő radar visszhang jelet kell visszakapni a zajhoz képest a kiértékeléshez. A jel/zaj viszony (SNR) a

visszhang jel teljesítménye a vevő r.m.s. zajához viszonyítva (Ostro 1993):

$$(SNR) \sim R_{\text{tar}}^{-4} D_{\text{tar}}^{3/2} A^2 P_{\text{tx}} P_{\text{rot}}^{1/2} \Delta t^{1/2} \quad (9)$$

ahol R_{tar} a cél objektum (target) távolsága, D_{tar} a cél objektum karakterisztikus radar átmérője, A a rádióteleszkóp (radar antenna) apertúrája, P_{tx} a kibocsátott jel teljesítménye, P_{rot} a céltárgy forgási periódusa, Δt az integrációs idő. Látható, hogy a távolabbi objektumokra adott apertúrájánál ugyanakkora jel/zaj viszony eléréséhez az integrációs idő megnő $\Delta t \sim R_{\text{tar}}^8 A^{-4}$ szerint. Ezért a kis radar jelet adó objektumok (üstökösmagok, kisbolygók) esetén a radar megfigyeléseket kis földtávolságban, nagy apertúrájú és teljesítményű antennával, hosszú integrációs idővel lehet csak végezni. Az első, radarral megfigyelt üstökös a 2P/Encke volt (1980), amelyet az arecibo-i 305 méteres rádióteleszkóppal figyeltek meg radar üzemmódban az S-sávban (12,8 cm). Ráduszára akkor 2,2 km-t határoztak meg. 1980–2002 között kilenc üstököst is megfigyeltek, de csak két esetben érte el az $(SNR) = 4$ -et: C/1983 H1 (IRAS-Araki-Alcock) ráduszára 4,4 km és C/1996 B2 (Hyakutake) ráduszára 2,1–2,4 km adódott. Az utóbbi években arecibo-i radart jelentősen modernizálták, amelynek következtében például 1/20-ad részére csökkent a szükséges integrációs idő (Δt). 2003 novemberében a 2P/Encke üstököst újból megfigyelték a földközelsége idején a felújított arecibo-i radarral az S-sávban. A radar keresztmetszetre 0,84 km²-t kaptak, hasonlóan az 1980-ban mért értékhez. A radar albedója 0.055 (hasonló az látható színek tartománybelihez), a forgási periódusa 11,1 óra. A radar megfigyelések egy 9,2 km hosszú (elnyújtott alakú) magot jeleznek. Felszínén az anyag tömegsűrűsége 0,5–1,0 g cm⁻³, ami megfelel az üstökösmagokra feltételezett átlagos sűrűségnek. A maghoz közel nem volt radarral kimutatható porszemcse felhő. Radar módszer bár elég pontos eredményt ad, de segítségével csak néhány üstökös vizsgálható. A jövőben újabb és újabb radarsillagászati módszereket alkalmaznak a jel/zaj viszony és a felbontás növelésére.

Tehát csak földközeli üstökösmagok figyelhetők meg sikeresen csillagászati radarral és a biztos megfigyeléshez igen nagy apertúrájú rádióteleszkóp szükséges (Harmon és mások 2004). A technikai fejlődés új, érzékeny detektorok és egyéb hardver eszközöket ad a rádió- és radarsillagászatnak, amellyel ma már a földközeli és kisméretű üstökösök magja megfigyelhető. Legutóbb például a 8P/Tuttle, Oort-felhővel kapcsolatos üstökös magját sikerült az arecibo-i óriás rádióteleszkóppal radar üzemmódban megfigyelni és kimutatni az üstökös elnyúlt bifurkált alakú ("kuglibábu?" vagy "földimogyoró?") magját (Harmon és mások 2010), illetve a NASA Deep Impact - EPOXI űrszonda cél-üstökösének, a 103P/Hartley 2 magját (Harmon és mások 2011). Azonban a túl aktív, tehát túl sok centiméter–deciméter–méteres törmelék kibocsátó üstökösmag körüli ilyen méretű darabokból álló törmelékfelhő egyaránt zavarja az üstökösmag rádió- illetve radarmegfigyelését (például a Hale-Bopp esetében 1997-ben, Jewitt & Matthews 1999).

Nyilvánvalóan a legközvetlenebb és legalaposabb ismereteket adó módszer az üstökösmag közelébe küldött űreszközökkel a mag közvetlen közlől történő helyszíni (in-situ) vizsgálata. Azonban még az üstökösmagok közelébe küldött, mellettük elrepülő, illetve a jövőben hosszabb ideig körülöttük keringő, valamint a felszínükre leszálló űreszközök programjának tervezése és kivitelezése is rendkívüli nehézségeket jelent és nagy körütekintést igényel. Annak ellenére, hogy minden távolról végzett megfigyeléshez képest nyilvánvalóan a helyszíni űrszondás vizsgálatok adják az alapvetően új és a legrészletesebb ismereteket a felkeresett kis égitestről, de az in-situ űrszondás üstökös vizsgálatok igen ritkák. Az üstökösmagok helyszíni űrszondás vizsgálatait

ezen dolgozat keretében nem tárgyaljuk csak azoknak a dolgozat tárgyához kapcsolódó szükséges eredményeit ismertetjük a megfelelő helyen. Egyébként az üstökösöket közvetlen közletről 2005-ig meglátogatott űrszondák programjáról és tudományos eredményeit a következő összefoglaló munkák adnak részletesebb ismertetést: a Halley-üstökös 1986-os vizsgálatáról Keller és mások (1986), Keller (1990a), Keller és mások (2004), Sagdeev és mások (1986), Sagdeev & Szegő (1990), a NASA Deep Space 1 űrszondája 19P/Borrelly 2001-es elrepüléséről, Soderblom és mások (2002) a NASA Stardust űrszondája 81P/Wild 2 2004-es tanulmányozásáról Brownlee és mások (2004), a NASA Deep Impact 9P/Tempel 1 találkozásáról A'Hearn és mások (2005), A'Hearn (2007) és a NASA Deep Impact – EPOXI programja 103P/Hartley 2 eredményeiről A'Hearn és mások (2011).

Végül a legtrikábban alkalmazott, az üstökös-csillagfedés (okkultáció) módszert említem, ami alkalmas a mag méretének azaz egy fedési húrnak a meghatározására, de a fedés láthatóságának több meglfigyelőhelyről történt meglfigyelése esetén a mag sziluettjének (a látóírányra merőleges síkba eső vetületi alakzata) méretének becslésére több húr hosszának meghatározásával. A fedéskor a belső kóma optikai mélysége is megbecsülhető a kóma anyaga által a csillag fényének a fedés miatt bekövetkező kismértékű csökkenéséből (Combes és mások 1983; Larson & A'Hearn 1984; Lecacheux és mások 1984; Ninkov 1994; Fernández és mások 1999). A csillagfedési módszer alkalmazása nyilván igen ritka lehetőség az esemény bekövetkezésének ritkasága miatt.

5.2. Új módszer az üstökösmađ fényének közvetlen detektálására

Az üstökösmađról visszavert napfény detektálása a leghatékonyabb meglfigyelési módszer a mađ fotometriájára a látható színekptartományban. A módszer sok objektum meglfigyelését teszi lehetővé, mert nagyon halvány kis égitestek is elérhetők általa és így sok üstökösmađ mérete és fizikai jellemzője is meghatározható. Kizárólag csak a visszavert fény meglfigyelésére alapozott fotometriából a mađ méretének meghatározásához az albedót és a fotmetriai fázis törvényét, vagyis a a fényesség fázisszögöl (Nap–üstökösmađ–meglfigyelő szögtről) való függését is ismerni kell, amelyeket az alábbiakban részletesebben tárgyalom.

Még a nagy földi teleszkópok, illetve űrtávcsövek (HST és infravörös űrműszerek) alkalmazása előtt úgy gondolták, hogy az üstökösmađok körül nincs kóma, mert nem aktívak nagy naptávolságban a vízjég szublimációs határán túl mintegy 2,8 CsE távolságra a Naptól és nincs a mađ körül zavaró kóma vagy legalábbis az esetleges alacsony aktivitás miatt még nagy naptávolságban (3-4 CsE vagy azon túl) meglévő kóma fénye zavarja a mađ fotometriáját: a kóma fényességjáruléka elhanyagolható. E feltevés szerint nagy naptávolságban, például az üstökös naptávólontja körül végzett fotometriai meglfigyelésekből a "csupasz", aszteroid-szerű mađ fénye mérhető és ebből kiindulva sok fotometriai meglfigyelést végeztek korábban. Azonban ezzel a meglfigyelési gyakorlattal két probléma is felmerült: i) a nagy naptávolságban az üstökösmađ nagyon halvány és kis mérhető jelet ad, a jel/zaj viszony kedvezőtlen, a meglfigyeléshez nagy távcsövek és jó légköri viszonyok szükségesek; ii) az újabb, nagy teleszkópok és űrtávcsövek meglfigyelései szerint sok üstökös a nagy naptávolság ellenére is aktív és a kóma fényesség-járuléka nem hanyagolható el. Ugyanis a csillagszerűnek (kóma-nélkülinek) tekintett mađ, de valójában meglévő és figyelemlen kívül hagyott kóma jelentős fényesség-járulékot jelent még nagy heliocentrikus távolság ellenére is és ennek figyelmen kívül hagyása hamis eredményt ad az üstökösmađ fényességére és méretére. Erre a legismertebb példa a 2P/Encke-üstökös, amely

szinte minden megfigyelt afhéliumban fényes és aktív kómát mutatott (Fernández és mások 2002). Bár nem ekliptikai üstökös, hanem az ekliptikai üstökösök és a kentaurok közti átmeneti objektum, a 29P/Schwassmann-Wachmann 1, amely a Jupiter pályáján túl szinte folyamatosan aktív és megfigyelhető kómát mutat, sőt összfényességben 4-5 magnitúdós kitöréseket mutat szabálytalan időközönként (legutóbbi megfigyelt kitörése 2010. elején történt, Trigo-Rodríguez és mások (2010)).

A közel izotróp pályaeloszlású (NIC), Oort-felhővel kapcsolatos üstökösök igen nagy, 5-10 CsE vagy annál is nagyobb naptávolságban is aktívak és jól megfigyelhető kómát mutatnak minden jel szerint a bennük lévő, a víznél jóval illékonyabb anyagok, főleg a szénmonoxid (CO) alacsony hőmérsékleten is meglévő erős szublimációs képessége miatt (Senay & Jewitt 1994; Jewitt és mások 1996; Biver és mások 1996; Licandro és mások 2000; Lowry & Fitzsimmons 2001). Sőt, a megfigyelések szerint 10 CsE-nél is nagyobb naptávolságban is aktívak az Oort-felhővel kapcsolatos üstökösök (Meech 1992; Meech és mások 2009). Az ekliptikai és Oort-felhővel kapcsolatos üstökösök egyaránt váratlanul fényességkitörést és időlegesen kómát fejleszthetnek nagy távolságra Naptól, mint például az 1P/Halley-üstökösnél is történt 11 CsE-re a Naptól 1991-ben (West és mások 1991). A Hale-Bopp-üstökös felfedezését az erős CO aktivitása által kifejlesztett fényes és nagy kómája tette lehetővé 1995-ben, amikor az üstökös a Jupiter és Szaturnusz pályájái között volt a pályája Naphoz közeledő szakaszán (Hale, Bopp, Stevens 1995). Egyébként a Halley-üstökös eddigi legtávolabbi megfigyelésekor 25 CsE-re a Naptól is még megfigyelhető kómát mutatott 2003-ban (Hainaut és mások 2004). A ma ismert rekorder a Hale-Bopp (C/1995 O1), ami 28,1 CsE, illetve 30,7 CsE is még aktív volt a 2008-ban és 2010-ben végzett földi nagy teleszkópokkal végzett megfigyelések alapján (Szabó és mások 2008, 2011).

Kis felbontással történő megfigyelések esetén a meglévő, vagyis a mag körüli kóma lehetetlenné teszi az üstökösmag fényének közvetlen megfigyelését, a mag és a kóma fénye nem különíthető el egymástól. Ilyenkor ugyanis nem is mutatható ki a kóma fényességprofilja, de a fényesség-járuléka benne van fotometriai mérésekben. A másik probléma az, hogy a napközelségben aktív üstökös aktivitása nagy naptávolságban lecsökken vagy megszűnik és a nagyon halvány, kóma nélküli üstökösmag megfigyelésekor kicsi lesz a jel/zaj viszony, ezért csak nagy teleszkópokkal van remény a kielégítő fotometriai pontosság elérésére. Továbbá még nagy távcsövekkel is hosszú expozíciós idők szükségesek a megfelelő jelszint eléréséhez, ezért csak legfeljebb egy vagy két fotometriai színszűrő (pl. V vagy R) alkalmazásával van idő, sőt sok esetben a mag teljes forgási fénygörbéjének felvételére sincs elég idő. A halvány üstökösmag V és R fényessége is nagy mérési hibával lehet terhelt, ami a (V-R) színindexet bizonytalanná teheti. Ezenkívül a hosszú expozíciós idők alatt az üstökösmag jelentősen elfordulhat, ami más és más látszó keresztmetszetet jelent a V és R mérések alatt, így a (V-R) színindex nem a mag egy adott, a megfigyelő felé forduló oldalának színét jelenti, hanem különböző keresztmetszetű oldalak V és R fényességének különbségét, ami nem értelmezhető a felszín színéként.

A távoli halvány és aktív üstökösmagok mai megfigyelését segíti az, hogy a mai modern földi nagy teleszkópokkal adaptív optikával nagyfelbontású képfelvételek készíthetők, illetve új spektrográfokkal egyre halványabb objektumokról készíthetők el színekpfelvételek a látható és a közeli infravörös tartományban. Már több, az ekliptikai üstökösök őseinek tekinthető kentaur és a Neptunusz pályáján túli (transzneptun) objektumról sikerült a felszíni vízjég kimutatására alkalmas elegendően részletes színeképeket megfigyelni: például a 2060 Chiron (Foster és mások 1999; Luu és mások 2000) és 10199 Chariklo kentaurok (Brown és mások 1998), valamint az (19308) 1996 TO66 (Brown és mások 1999) és az 50000 Quaoar transzneptun objektumon sikerült kimu-

tatni a kristályos vízjeget (Luu & Jewitt 2004), ami a primitív kis égitestek, köztük az ekliptikai üstökösök magjának kémiai összetételbeli hasonlóságát támasztja alá.

Az imént vázolt technikai fejlődés ellenére azonban még a mai földi nagy teleszkópokkal sem figyelhető meg közvetlenül sok halvány és aktív üstökös mag fénye. Még a nagyfelbontású nagy földi teleszkópokkal sem mindig lehet elválasztani az üstökös mag fényét az aktív kómától, hiszen például a földi megfigyelések felbontási és detektálási határát jelentősen lerontja a földi légkör. Az űrcsillagászat megfigyelő eszközei azonban nagyban segítenek ezen a helyzeten. A Hubble Űrtávcső kitűnő, nagyfelbontású és a földi légkör zavaró hatásaitól mentes megfigyelései óriási előnyt és jelentős haladást jelentettek az üstökösök megfigyelésében a mag és a zavaró kóma fényének szétválasztásában. Ezért a "csillagszerű" aszteroidák fotometriájához képest az aktív, kómás üstökösök magjának közvetlen detektálására hosszú évek alatt kifejlesztett, sok üstökösre alkalmazott és ellenőrzött, finomított módszert dolgoztam ki egy nemzetközi kutatócsoportban a Hubble Űrteleszkóppal végzett üstökös-felvételek elemzésére. Ez a módszer az üstökös mag, mint pontforrás fényét elkülöníti a kómától és az üstökös ezen két fizikai szerkezeti alkotórészének fotometriai vizsgálatát teszi lehetővé, vagyis a pontforrás (mag), illetve kiterjedt objektum (kóma) fotometriai analízisét. Ezt, a látható fénytartományban végzett megfigyelésekre általam kifejlesztett eljárást a termális infravörös tartományban az infravörös űrteleszkópokkal végzett üstökös megfigyelésekre is alkalmazhatóvá tettem az infravörös megfigyelő-eszközök képalkotó (pl. PSF) és fotometriai (fotometriai és fluxus kalibráció) tulajdonságainak megfelelő figyelembevételével és eddig már több üstökösre sikerrel alkalmaztam amelyeket az ISO és Spitzer infravörös űrteleszkópok figyeltek meg.

Ennek, az üstökösök kutatásában úttörő jelentőségű munkának, a kifejlesztett adatfeldolgozási és tudományos kiértékelési módszereknek, illetve eredményeknek a tudományos közleményekben megjelent dokumentálása a HST-vel, illetve az ISO és Spitzer űrteleszkópokkal történt megfigyelésekkel kapcsolatban a Lamy & Toth (1995, 2009), Lamy és mások (1996, 1998a, 1998b, 1999, 2001, 2002, 2004, 2006, 2007a, 2007b, 2008a, 2009, 2010, 2011), valamint Groussin és mások (2004, 2009), Fernández és mások (2008a, 2008b, 2011), illetve Toth és mások (2005) munkáiban található. Ezekben a közleményekben a módszer kifejlesztése, finomítása és ellenőrzése is nyomkövethető, illetve ezek a publikációk egyben a történetileg is végigkövetik az üstökösök korszerű, űrcsillagászati eszközökkel való közvetlen detektálásának, megfigyelésének történetét, annak kezdetétől napjainkig. A kifejlesztett módszer hatékonysága a Hubble Űrtávcső nagyon nagy felbontású csúcstechnikájú CCD detektorain és kitűnő minőségű javított optikáján, illetve az ISO és Spitzer infravörös űrteleszkópok a mintegy két évtizeddel régebbi infravörös földi- és űrműszerekhez képest nagyobb felbontásán alapul. A módszer alapelve, hogy az üstökös magról érkező jelet a teleszkóp optikai rendszere valamint a CCD detektor által együttesen meghatározott pont-szórás függvény (Point Spread Function PSF) tartalmazza, vagyis annak megfelelően skálázott változata. A fotometriai megfigyelésekhez a HST kameráinak (PC2 és ACS/HRC) nemzetközi fotometriai rendszerekhez illeszkedő fotometriai színszűrőkészlete van, amelyekből az üstökös megfigyelésekre a 1. és 2. táblázatokban feltüntetett szűrők a legmegfelelőbbek (Johnson-Kron-Cousins rendszer, Holtzman és mások (1995), Sirianni és mások (2005), Lamy & Toth (2009)).

Az üstökös mag fényének szétválasztására a következő eljárást alkottam meg. Az üstökös mag és a kóma fényességjárulékainak összegéből alkotott fényességeloszlási modellt hasonlítjuk össze a megfigyelt fényességeloszlással és keressük a mag, valamint a

1. táblázat. A HST PC2 színszűrők			2. táblázat. A HST ACS színszűrők		
Szűrő	$\bar{\lambda}$	$\Delta\lambda$	Szűrő	$\bar{\lambda}$	$\Delta\lambda$
F439W	423	47	F435W	431,9	30,9
F555W	540	123	F555W*	535,9	35,7
F675W	670	89	F625W	629,5	41,5
F814W	792	149	F606W**	588,8	66,5
			F814W	811,5	70,3

$\bar{\lambda}$, közepes hullámhossz (nm).
 $\Delta\lambda$, ekvivalens szélesség (nm).
 A definíciókat Biretta és mások (1996) munkája adja meg.

$\bar{\lambda}$, közepes hullámhossz (nm).
 $\Delta\lambda$, ekvivalens szélesség (nm).
 * A fotometriai rendszerbeli V szűrő.
 ** Kiszélesített sávú V szűrő ("Broad-V").
 Sirianni és mások (2005) 2. táblázata alapján.

kóma fényességét leíró paramétereket a következő összefüggés alapján:

$$B(\rho) = k_n \delta(\rho) \otimes PSF + \text{coma} \otimes PSF \quad (10)$$

ahol ρ egy tetszőleges pontnak az üstökös-magtól a látóirányra merőleges síkban mért, vagyis a képsíkba vetített távolsága, $\delta(\rho)$ a Dirac delta függvény, $\otimes$ a konvolúció operátora és PSF a pont-szórási függvény, amely egyébként energiában normált. A (10) képlet jobb oldalán a pontforrásnak feltételezett mag fényességjárulék $k_n \delta(\rho) \otimes PSF$, amelyben a k_n skálafaktor az üstökös-mag fényességét jellemzi és egyben a PSF-et is skálázza.

A pont-szórási függvény (PSF), ami a HST esetében modellezhető, szintetikusán előállítható a teleszkóp, szűrőrendszer, és a detektor ismert, esetleg időben lassan változó paramétereinek, így az optikai paraméterek, jitter¹⁸ ismeretében az űrteleszkóp Intézet (STScI) TinyTIM szoftvere segítségével (Krist 1995). Egy HST képelemnek (pixelnek) az üstökös távolságába vetített méretén belüliek a megfigyelt üstökös-magok, tehát egy pixelen belül lokalizáltak.

A (10) képletben kóma fényesség-járulékát a $\text{coma} \otimes PSF$ tag írja le, amely az aktuális coma modelltől függ. Kóma modellként minden olyan fényességeloszlási modell alkalmas, amely megbízhatóan leírja az aktuális üstökös kómájának megfigyelt fényességeloszlását.

A legtöbb üstökös kómájának megfigyelhető legegyszerűbb fényességeloszlási modelljéhez a következőképp juthatunk el. Tegyük fel, hogy két-dimenziós képalkotó eszközzel (CCD) képfelvételt készítünk az üstökösről, amelynek porkómája is van. A por komponens R -ben és I -ben látszik a legjobban, ahol egyébként nem zavarja az üstökös kóma folytonos színekét a molekuláktól eredő spektrális elem és a por fénye (a Nap szórt fénye) dominál ezekben a fotometriai tartományokban.

A radiális felületi fényességprofil egy optikailag vékony kóma esetében (Jewitt

¹⁸Jitter jelenség: a teleszkóp termomechanikai rezgései, vibrációi miatt a PSF kiszélesedik, torzul, az energiát nem a centrumba koncentrálja. Ezt a PSF generálásakor figyelembe lehet venni.

& Meech 1987)

$$B(\rho) = K_1 \int_{-\infty}^{+\infty} N dl , \quad (11)$$

ahol K_1 konstans, amely a porszemcsék fényszórási hatásosságától és méretétől függ, $N \text{ m}^{-3}$ a részecskék számsűrűsége a látóirányban, dl egy hosszúságelem a látóirány mentén. (1)-ben $\rho = (r^2 - l^2)^{1/2}/\Delta$ a képsíkban a magtól mért radiális távolság, r egy tetszőleges pont magtól való térbeli radiális távolsága a kómában, l a pontig a látóirány mentén mért távolság a maghoz helyezett képsíktól mérve, Δ az üstökös mag távolsága a megfigyelőtől. Az integrálás a látóirány egyenes vonala mentén történik és az integrandusz ott nem zérus, ahol van kóma anyag ($N > 0$).

Idézzük fel most azt a fontos és ismert eredményt, hogy milyen megfigyelhető fényességeloszlást kapunk adott térbeli sűrűség és anyagáramlási sebességtér esetén, egy gyakran előforduló esetben, amikor speciális feltételt tehetünk a sebességeloszlásra. Általános esetben a kontinuitási egyenlet az $N(\mathbf{r}, t)$ térbeli sűrűségű és $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$ áramlási sebességű anyagra

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \text{div}(N\mathbf{v}) = 0 \quad (12)$$

alakú, ahol $\mathbf{r}$ egy tetszőleges pont helyvektora a kómában, és $r = |\mathbf{r}|$ a radiális távolság. Itt feltételeztük, hogy a kómában nincsenek egyéb források és nyelők, és az anyag a pontforrásnak feltételezhető üstökös magból áramlik ki. Tegyük fel, hogy a sűrűség és a sebesség nem függ az időtől, így az egyenlet a $\text{div}(N\mathbf{v}) = \nabla \cdot (N\mathbf{v}) = 0$ alakra egyszerűsödik. Gömbszimmetrikus esetben, szögfüggést (irányfüggést) nem tartalmazó áramlás esetén a kontinuitási egyenlet gömbi koordinátákban az $N(r)$ és $v(r)$ függvényekkel felírva

$$\frac{1}{r^2} \frac{d(r^2 N v)}{dr} = 0 . \quad (13)$$

Ebből a göbszimmetrikusan az időben állandó v sebességű ($dv/dt = 0$) áramlásra a térben a magtól r radiális távolságra a következő egyszerű egyenlet írható fel

$$\frac{d(r^2 N(r))}{dr} = \frac{-r^2 N(r)}{v} \frac{dv}{dr} . \quad (14)$$

Minden irányban egyenletes kiáramlásra $dv(r)/dr = 0$, és a magból állandó v sebességgel történő anyagkiáramlás esetén a kontinuitási egyenletből $N(r)vr^2 = \text{konstans}$ adódik. Ez a részecskesűrűsége $N(r) \propto r^{-2}$ összefüggést jelent, azaz a térben a magtól mért távolság négyzetével fordítottan arányos a térbeli sűrűség. Ez a lokális felületi fényességre az (1) egyenlet alapján a $B(\rho) = K_2/\rho$ függést adja (ahol K_2 állandó), vagyis a nyugodt ($v(r, t) = \text{állandó}$) gömbszimmetrikus kiáramlást mutató kóma esetében a felületi fényesség a képsíkba vetített radiális távolsággal fordítottan arányos (Jewitt & Meech 1987).

Általánosan egy $B(\rho) \propto \rho^p$ összefüggést lehet feltételezni a kóma radiális fényességeloszlására, és logaritmikus deriválással ez

$$p = \frac{d \ln(B(\rho))}{d \ln(\rho)} \quad (15)$$

szemléletesen mutatja a felületi fényességprofil menetét a $\log(B) - \log(\rho)$ síkon. A log-log skálán ugyanis a p hatványkitevő egy egyenessel szemléltethető (l. 18. ábrát).

A kanonikus esetben¹⁹ $p = -1$, de ennél meredekebb fényesség lefutás is előfordulhat, például akkor, amikor a porrészecskékre a Nap sugárnyomása hat, ekkor a p szélsőértéke $-1,5$ lehet.

A meredekebb fényességlefutás vagy a sugárnyomás miatt van, vagy a méretcsökkenés miatt elhalványodó porszemcsék (*fading grains*), illetve fragmentálódó (széteső, szétdarabolódó) porszemcsék miatt. Tudjuk, hogy a sugárnyomás hatása a porkóma sűrűségeloszlására mintegy 3000–5000 kilométernél nagyobb térbeli radiális távolságban kezd dominálni. Előfordulhat, hogy a kis fázisszögnél történt megfigyelések csak mintegy $\sim 10^4$ kilométeres képsíkba vetített radiális távolságot jelentenek, tehát a sugárnyomás hatása vagy valóban jelen van és ez mutatkozik meg a meredekebb fényesség lefutásban, vagy pedig ezt a kis radiális távolság miatt nem látjuk, és más okozza a meredekebb lefutást, például az elhalványodó vagy fragmentálódó porszemcsék.

A kómában végbemenő porszemcse fragmentálódásra példa lehet az, hogy a teljesen szétesett Tabur (C/1996 Q1) üstökösénél a megfigyelt fényességeloszlást vagy a porszemcsék fragmentálódásával vagy pedig a jeget is tartalmazó porszemcsékből a jég szublimációja miatt bekövetkező méretcsökkenéssel (elfogyás) magyarázták (Lara és mások 1999, 2001). Továbbá, a C/1999 S4 (LINEAR) üstökös kómájának CCD polarimetriai megfigyeléseit végezte Hadamcik & Levasseur-Regourd (2002) abban az időszakban, amikor az üstökös magjának szétesési folyamata elérte a csúcspontját 2000. július 24–28. között. Ezek a vizsgálatok összetett porszemcse-aggregátumok szétesését mutatták ki. Nagyon porózus, laza, "vattaszerű" (*fluffy*) kis porszemcsékről van szó. A Halley-üstökösénél a helyszíni vizsgálatok szerint is ilyen az üstökös (Tóth és mások 1987, Szegő és mások 1989, Thomas & Keller 1990, Konno és mások 1993, Oberc 1996, 2004), (Toth és mások 1987; Szegő és mások 1989; Thomas és Keller 1990; Konno és mások 1992; Oberc 1996, 2004), illetve a földi sztratoszféra repülőgépek meteoritikus porcsapdáiba is került már hasonló üstökös (Brownlee 1979; Brownlee és mások 1987; Bradley & Brownlee 1986).

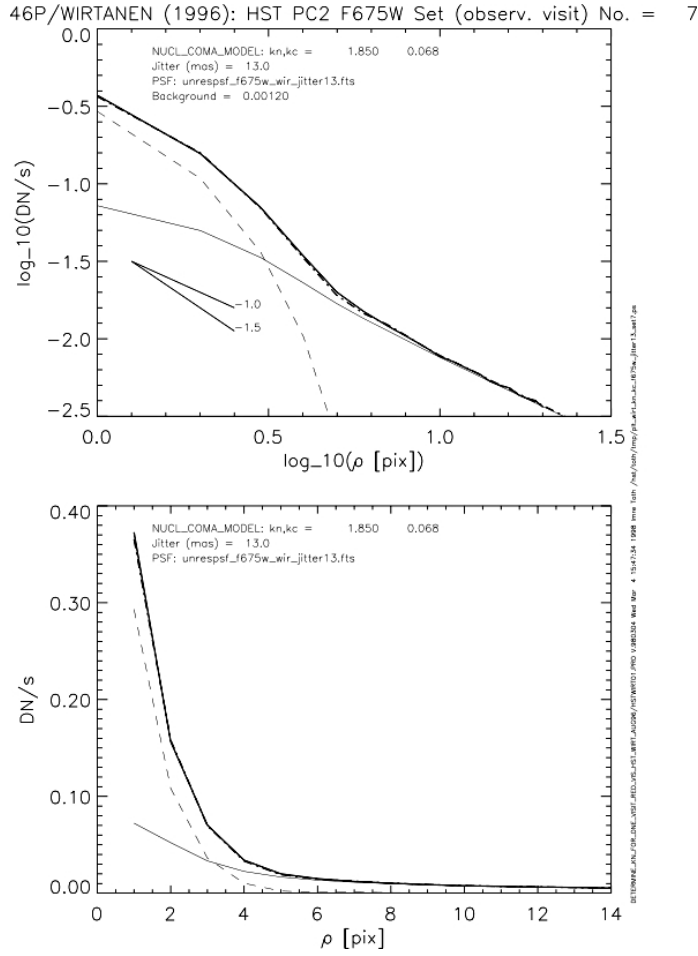
Tehát a megfigyelések szerint lehet porszemcse fragmentálódás az üstökösök porkómájában. Fontos új lehetőség az, hogy szétesett üstökösmag fragmentumok körüli kómában is végbemehet ilyen folyamat, és azok a porszemcsék, amelyek szétesnek tulajdonképpen por-aggregátumok, olyan por-aggregátumok, amelyek a csillagközi anyagban, illetve a Naprendszer ősködében álltak össze, ahol ezek az üstökösök keletkeztek. A kóma poranyagának vizsgálata tehát betekintést adnak az eredeti mag belsejébe, továbbá a megfigyelések arra mutatnak rá, hogy a szétesett magok fragmentumainak szerkezete és por-összetétele emlékeztet a csillagközi anyagára, illetve a bolygórendszerünk ősködére.

A megfigyelések szerint például egyszerű esetben az üstökösmag fényességeloszlása a mag közvetlen környezetében, a ρ szerint egy $p \leq -1$ hatványkitevővel való függéssel írható le.

$$\text{coma} = k_c \rho^p \quad (16)$$

illetve a teleszkóp optikai és detektorrendszere által megfigyelhető fényesség járuléka a pontszórási függvény figyelembevételével $k_c \rho^p \otimes PSF$, ahol k_c a kóma fényességsparamétere, amely leírja a kóma fotometriáját. A legegyszerűbb esetben a kóma fényessége a magtól a képsíkban mért távolsággal fordítottan arányos: k_c/ρ , azaz $p = -1$ és

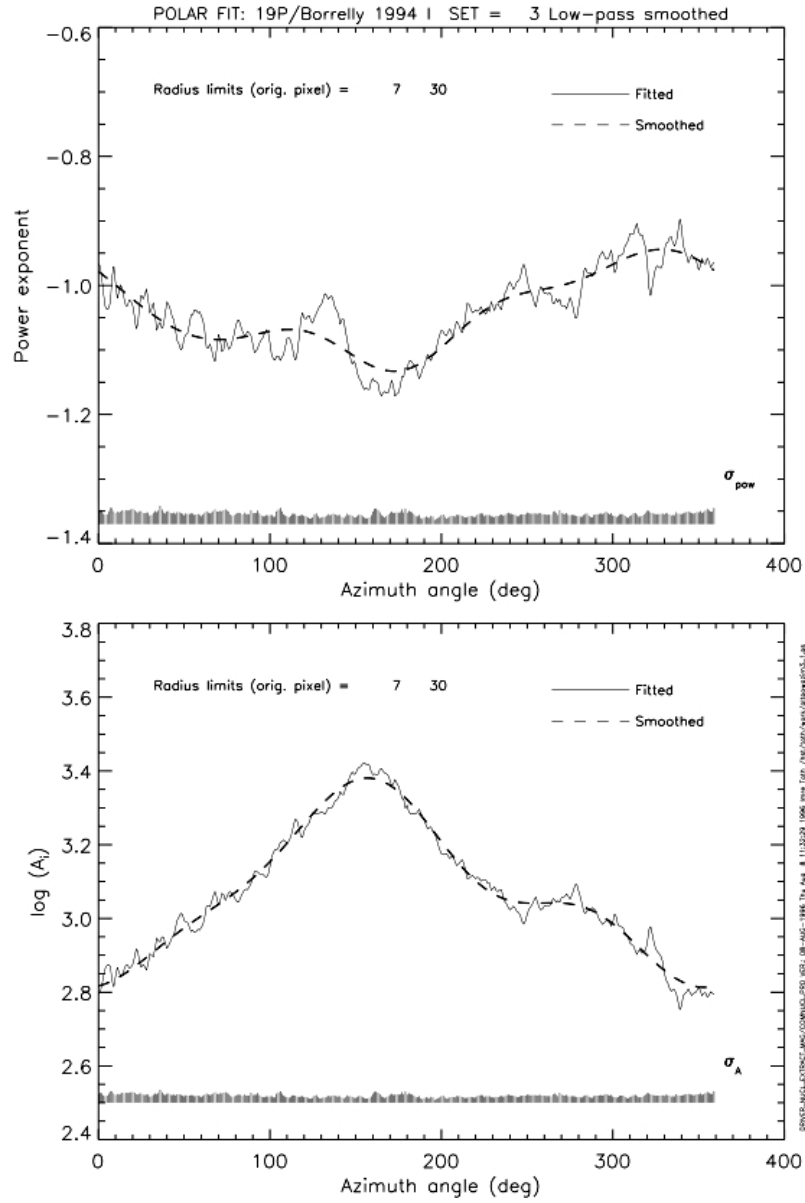
¹⁹"Canonical coma" kifejezés terjedt el az angol nyelvű szakirodalomban a $p = -1$ kitevőnek megfelelő $1/\rho$ modell szerinti kóma fényességlefutás esetén.



18. ábra. A 46P/Wirtanen ekliptikai üstökös modell radiális fényességprofil illesztése a megfigyelt radiális fényességprofilhoz: a HST PC2 műszerével egy F675W (R) 1996. augusztus 28-án készült megfigyeléshez. A felső panelen a fényességprofilok jelölése: megfigyelt profil (folytonos vastag vonal), mag (szaggatott vonal), kóma (folytonos vékony vonal), modell (szaggatott-pont-vonal). A vízszintes tengelyen a képsíkban pixelekből mért radiális távolság tízesalapú logaritmus, a függőleges tengelyen a pixelek mért fényességértékei (DN/s) tízesalapú logaritmus van feltüntetve. A logaritmikus skálán egyenesek jelzik a fényességlefutás $p = -1,0$ és $p = -1,5$ hatványkitevőit (l. még (15) és (16)). Az alsó panelen mindkét tengelyen lineáris skálán ábrázolva a felső panelen látható fényességprofilok (kép: a szerző által készített ábra, l. még Lamy és mások (1998a).

a szakirodalomban meghonosodott kifejezés szerint azt mondjuk, hogy a kóma fényességeloszlása, lefutása "kanonikus". Ez egyébként a magból göbszimmetrikusan és egyenletesen, időben állandó sebességgel kiáramló anyag megfigyelhető fényességeloszlását jelenti (steady state outflow). Az a távolságtartomány, amelyben a (16) szerinti kóma fényességeloszlás érvényes a magtól mért néhány ezer kilométeres távolságot jelent és ebben az űrtávcsövek detektorának látómezeje bőven benne van (HST és az üstökös-megfigyelésre használt ISO és Spitzer infravörös űrtávcsövek esetén).

Vannak olyan üstökösök, mint például a HST-vel 1994-ben a megfigyelt 19P/Bor-



19. ábra. A 19P/Borrelly-üstökös kóma paramétereinek azimutszögtől (Θ) való függése: a hatványkitevő $p_i(\Theta)$ (fent), az amplitudó $A_i(\Theta)$ (lent) a HST PC2 1994. november 28.68 UT-kor készült felvételén. A simított függvénygörbék (szaggatott vonalak), valamint a paraméter fit reziduálok szögfüggése ($\sigma_{\text{pow}}, \sigma_A$) is feltüntetve (kép: a szerző által készített ábra, l. még Lamy és mások (1998b).

relly, illetve az 1996-ban és 1997-ben megfigyelt C/1995 O1 (Hale-Bopp) amelyeknél a kóma fényességeloszlása az előbb leírtakhoz képest jóval összetettebb. Nevezetesen, ez a képsíkban nem csak a magtól való távolságtól (ρ) függ, hanem a képsíkban mért Θ polárszögtől (más elnevezéssel azimutszögtől) is, amely a hatványkitevőben szerepel közvetetten a $p = p(\Theta)$ függvény szerint. Ennek a fényességeloszlásnak a

leírásához egy, a képsíkban definiált polár koordinátarendszert használhatunk, amelynek origója az üstökös mag, a radiális távolság ρ , a Θ polárszög pedig a képsíkban egy megállapodás szerinti rögzített iránytól pozitív irányban mért szög. Mivel az üstökös megfigyelésekre használt űrtávcsövek detektorainak kis látómezején belül a p hatványkitevő nem függ a ρ radiális távolságtól, vagyis $p(\rho) = \text{állandó}$, ezért a kitevőnek csak a polárszögtől való függését kell figyelembe venni. A kóma model ekkor a

$$\text{coma}(\rho, p(\Theta)) = k_c \rho^{p(\Theta)} \quad (17)$$

alakú. Az azimutszög szerinti diszkét lépésekben ez a $B_i(\rho) = A_i \rho^{p_i}$, $i \in [1, 360]$ ($^\circ$) alakba írva, ahol az azimutszögtől való függést az i index jelzi, ettől függ az amplitúdó (A_i) és a hatványkitevő (p_i). Erre mutat példát a 19. ábra, amely a 19P/Borrelly-üstökös belső kómája fényességeloszlását leíró függvénybeli p hatványkitevő és fényességparaméter polárszögtől (azimutszögtől) való függését szemlélteti a HST PC2 1994. november 28-i megfigyelései alapján.

A mag k_n fényességi skála-faktora, a mag (x_n, y_n) szubpixel koordinátái, valamint a kóma fényességmodel paraméterei (k_c és p) a fényességmodell megfigyelésekhez való illesztési feladatban meghatározandó paraméterek. Az illesztést és paraméter-meghatározást a reziduálok minimalizálásával lehet megtenni külön-külön az egyes megfigyelt képeken.

A finomabb felbontású skáláról az eredeti pixel skálára történő visszatérés integrálással történik, amikor a szubpixeleket felösszegezzük az eredeti pixelre, és a Q mennyiség minimalizálásával kapjuk a legjobb paraméter illesztést:

$$Q(x_n, y_n, k_n, k_c) = \left| \int \int_{(x,y)} \left\{ [k_n \delta(\rho) + \text{coma}] \otimes PSF \right\} dx dy - \text{adatok} \right|. \quad (18)$$

Itt coma a (16), illetve (17) szerint megadott kóma modelleket, adatok pedig a megfigyelt képet jelenti. Az illesztés alkalmazható az (X, Y) képelem síkon, valamint a kép (ρ, θ) polártranszformáltjában felvett fényességprofilokra is, ahol ρ a magot tartalmazó pixeltől (optocentertől) mért távolság, θ a síkbeli polárszög. Mindkét módszerrel igen jó illesztés érhető el amit a HST, ISO vagy Spitzer űrtávcsövekkel megfigyelt sok üstökös példái is mutatnak. A HST-vel történt megfigyelésekben az üstökös mag fényességének meghatározásában jelentkező hibák közül az illesztési hiba dominál a k_n -ben ez általában 5% alatti. A detektor zajból adódó hiba ennél kisebb, valamint a fotometriai kalibráció hibája pedig 0.01 magnitúdó²⁰ körüli. A kóma fényétől elkülönített (tőle szeparált, "kihúzott") üstökös mag látszó fényességének és effektív rádiuszának a meghatározása a feladat. A tipikus fotometriai hiba kb. 0.01 magnitúdó, akkor ez például 1 km-es rádiuszban mintegy 0.02 km hibát jelent.

5.3. A mag fotometriája a látható és termális infravörös tartományban

A kóma fényétől elkülönített (tőle szeparált, "kihúzott") üstökös mag látszó fényességének és effektív rádiuszának a meghatározása a feladat. A tipikus fotometriai hiba kb. 0.01 magnitúdó, akkor ez például 1 km-es rádiuszban mintegy 0.02 km hibát jelent.

Ezután az üstökös mag effektív rádiusza a geometriai keresztmetszetből számítható ki a geometriai albedó, a fázisfüggvény, valamint a Nap adott fotometriai színtartományban való látszó fényessége ismeretében (Russell 1916; Keller 1990a; Lamy és

²⁰Csillagászati fényességskála: az I_1/I_2 intenzitásarány logaritmikus megfeleltetése: a magnitúdó különbség $m_1 - m_2 = -2.5 \log_{10}(I_1/I_2)$ (Pogson-képlet a magnitúdó különbségre).

mások 2004):

$$p_R \bar{C} = \frac{2.238 \times 10^{22} \pi r_h^2 \Delta^2 10^{0.4(m_\odot - m_R)}}{10^{-0.4\beta\alpha}}, \quad (19)$$

ahol p_R a geometriai albedó az adott spektrális sávban (itt R -ben), $\bar{C} = \pi R_{\text{eff}}^2$ a test effektív geometriai keresztmetesze (m^2), R_{eff} az effektív rádiusza (méter); r_h, Δ a helio- és geocentrikus távolsága (CsE); $m_\odot$ a Nap látszó fényessége az adott sávban, és m_R az objektum látszó fényessége az adott sávban; β a lineáris fázisfüggvény együtthatója (mag/fok), valamint α a Nap-fázisszög (fok), azaz a Nap-égítést-megfigyelő által alkotott háromszögben az égítéstől levő szög. Az üstökösök magjára a tapasztalat szerint a geometriai albedó az optikai tartományban 0.04, illetve fázistörvény együtthatója 0.04 mag/fok. Független albedó és fázisfüggvény meghatározás hiányában ezekkel az értékkel számolva a valósággal jól egyező üstökösök méret határozható meg. Mivel a méret fordítottan arányos a geometriai albedó négyzetgyökével, így például egy ~ 3 -szor nagyobb albedó $1/\sqrt{3} \approx 0.86$ -szoros eltérést jelent a méretben. Amennyiben a fázistörvény együtthatója 2-es faktorról változik, akkor ez közel 2-es faktort jelent a méretben is. Bár az üstökösök albedóját nem sok üstökösre határozták meg, de értékük a 0.04 ± 0.02 tartományban van. Ezzel a behatárolással megegyeznek az eddigi helyszíni üstökös-szondás vizsgálatok albedó meghatározásai is: az 1P/Halley magjára, valamint a 19P/Borrelly magjára a 4% albedó feltételezésével 1994-ben meghatározott méret és alak megegyezik a NASA Deep Space 1 űrszondának a Borrelly magja közelében 2001-ben végzett helyszíni vizsgálatainak eredményeivel. A Borrelly magja mintegy fele akkora, mint a Halley-üstökösé.

Az üstökösök is forognak: vagy egyszerűen a legnagyobb főtengelytelenségi nyomtaték tengelyük körül vagy a kigázosodási, tömegvesztési folyamatok miatt gerjesztett állapotban, általában erőmentes szabadon forgó pörgettyűként. A forgás a mérhető fénygöréből kimutatható. Ugyanis az üstökösök optikai és infravörös fotometriai megfigyelései alapján a fénygörbe nem foltosságtól ered (tehát nem a különböző albedójú vagy hőmérsékletű alakzatok okozta "foltosság" miatt van), hanem az elnyújtott, szabálytalan alakú test megfigyelő felé eső látható megvilágított felületének forgás miatt bekövetkező változásából adódik. A tapasztalat szerint az elnyúlt, szabálytalan alakú üstökösök és kisbolygok tengelykörüli forgásuk miatt bekövetkező fényváltozása első közelítésben jól modellezhető egy a legrövidebb tengelye körül forgó elnyújtott (prolate) forgási ellipszoiddal, amelynek fél nagytengelyeire $a > b = c$ és a test c körül egyenletesen forog. A fényváltozást a megfigyelő felé forduló időben periódikusan változó nagyságú látható megvilágított vetület területe (S) adja (Lowry & Weissman 2003; Lamy és mások 2004)

$$S(\phi) = \pi ab^2[(\sin^2 \phi/a^2 + \cos^2 \phi/b^2) \sin^2 \xi + \cos^2 \xi/b^2]^{1/2}, \quad (20)$$

ahol $\phi = (2\pi/P)(t - t_0)$ a forgás fázisszöge, P a forgási periódus, t és t_0 az idő és kezdőfázis időpontja, ξ a testtől a megfigyelő felé mutató vektor és a forgástengely iránya által bezárt szög, a rálátás szöge. A fenti képletben feltettünk, hogy a Nap mögöttünk van ($\alpha = 0^\circ$). Megjegyzem, hogy a fénygörbék nem csak a megfigyelhető megvilágított vetületi területet jelentik, hanem test felszíni fényszórási paramétereitől való függést is a látható tartományban, infravörösben pedig a felszíni hőmérsékleti eloszlástól is. Szabálytalan alakú test felületén a domborzat, árnyékok és kitakarások is bonyolítják a valósághű fénygörbe modellezést. Teljes fénygörbe megfigyelése esetén az a/b tengelyarány csak egy alsó határ lesz, mert nem ismert a rálátási szög, ugyanis nem feltétlenül merőlegesen nézzük a forgástengelyt. Csak a látóirányra merőleges

forgástengely esetén figyelni meg az igazi a/b arányt: amikor a test a legnagyobb kiterjedését mutatja, akkor egy $S_{max} = \pi ab$ területű ellipszist mutat felénk (fényesség maximum), amikor a legkisebb kiterjedését mutatja ("csúcsa" látszik a fényesség minimumkor), akkor egy $S_{min} = \pi b^2$ területű ellipszist, tehát $S_{max}/S_{min} = a/b$. Ez a speciális geometriai helyzet azonban igen ritka. Statisztikai vizsgálatok szerint tetszőleges ξ rálátási szögre különböző a/b arányú elnyúltság esetén a $\kappa\pi ab$ legnagyobb terület κ hányada a következő: $a/b = 1.5$ -re $\kappa = 0.924$, $a/b = 2$ -re $\kappa = 0.892$, és $a/b = 3$ -ra $\kappa = 0.866$. Sokszor nem ismert a fénygörbe, legfeljebb csak egy-két pontja. A pillanatnyi vetület területéből kiszámított effektív rádiusz $r_{n,a} = \sqrt{S/\pi}$, $S = \kappa\pi ab$ esetén $\sqrt{\kappa}$ -val skálázható. Egy tipikus $a/b = 2$ tengelyirányú testre egy megfigyelés $r_{n,a} = 0.945\sqrt{ab}$ effektív rádiuszt ad, vagyis ez 5.5%-on belül van a maximális $\sqrt{ab}$ értékhez. A kis égitestek méreteloszlásának statisztikai vizsgálatára a térfogat-ekvivalens effektív rádiuszt használtam, amelyre $r_{n,v}^3 = ab^2$. Az $r_{n,v}/r_{n,a}$ arány 1-hez közeli marad: $a/b = 1.5$ -re 0.972, $a/b = 2$ -re 0.943, és $a/b = 3$ -ra 0.895, tehát a megfigyelt látszó vetületből leszarmaztatott $r_{n,v}$ igen jó becslés a térfogat-ekvivalens gömb alakú test effektív rádiuszára.

A méret (effektív rádiusz) és albedó egyidejű meghatározását teszik lehetővé a látható és termális infravörösben (IR) végzett megfigyelések és ilyenkor nem szükséges az albedót feltételezni, hanem az albedó és rádiusz független meghatározása válik lehetővé. Egy, a műszer által fel nem bontott r_n rádiuszú testre, mint pontforrásra a megfigyelő által mért termális kontinuum fluxus-sűrűség F_{th} adott λ hullámhosszon (Lagerros 1996; Campins & Fernández 2000; Groussin és mások 2004):

$$F_{th}(\lambda) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \epsilon_{th} B_\lambda[\lambda, T(r_h, pq, \eta, \epsilon_{th}, \theta, \phi)] \frac{\Phi_{th}}{\pi} \Omega dS_b, \quad (21)$$

ahol a térszög

$$\Omega = \frac{1}{\Delta^2} \cos \theta \cos(\phi - \alpha) \quad (22)$$

és a felületelem az origótól r_n távolságra²¹ a szubszoláris ponttól mért ϕ hosszúságnál, θ szélességnél

$$dS_b = r_n^2 \cos \theta d\theta d\phi, \quad (23)$$

továbbá Δ a megfigyelőtől való távolság, α a fázisszög, Φ_{th} a fázisfüggvény a termális IR tartományban, p a geometriai albedó a visszavert látható fényben, q a fázis integrál, amely a geometriai és Bond albedót²² kapcsolja össze: $A_B = pq$. T az abszolút hőmérséklet, B_λ a Planck függvény, ϵ_{th} emisszivitás a termális tartományban, θ és ϕ koordináták a test felületén. Az η factor az infravörös sugárzási hatások.

Tehát a megfigyelhető infravörös fluxus kiszámításához az emisszivitással figyelembe vett Planck-függvényt, $\epsilon_{th} B_\lambda(\lambda, T)$ integráljuk a test felületére, a megfigyelő által látható részre, amelyre a $\cos(\phi - \alpha) > 0$ feltétel teljesül. A hőmérsékletet pedig különböző modellek segítségével lehet kiszámítani.

²¹Gömb esetén a gömb középpontjától r_n rádiusz távolságra, más esetben alkalmasan választott koordinátarendszer origójától mért r_n távolságra.

²²Egy test felületének A_B Bond albedója az, hogy a teljes beeső napfény energia – az összes hullámhosszon – hányad részét veri vissza vagy szórja szét a térbe (George Phillips Bond (1825–1865) amerikai csillagászlól elnevezve).

A legnagyobb hibalehetőségek a Φ_{th} és η megválasztásában vannak. A tapasztalat szerint kielégítő eredményt ad $\Phi_{th}(\alpha)$ -ra ha a Planck emissziót felintegráljuk a testnek a megfigyelő felé eső felületén. Az η nem ismert pontosan az üstökös magokra, de az üstökös mag méretű kilométeres szub-kilométeres földközeli kisbolygók IR megfigyelésével összhangban levő $\eta \lesssim 1$ értékeket lehet használni. A mag IR fluxusát a megfigyelésekből hasonlóan lehet meghatározni, mint azt fentebb ismertettük a látható fényben végzett megfigyeléseknél: a mag + kóma fényesség modell alapján az IR teleszkóp pontszórási függvényének ismeretében a mag fluxusa elkülöníthető a kómától. Az eddig megfigyelt üstökös magok infravörös fluxusa ~ 10 – 100 millijansky²³ között volt.

Kérdés, hogy a mag megfigyelt IR fluxusát milyen rádiuszú és albedójú testtel lehet előállítani. Az IR fluxus a test felület $T(\theta, \phi)$ hőmérséklet eloszlásának modellezésével számítható ki: a) standard hőmodell (STM), amelyben a test tengely körüli forgása lassú, a hőtehetetlensége kicsi, a felszín minden pontja termális egyensúlyban van a beeső napfény energiájával; b) gyors forgás esetére alkalmazott izotermális szélességi modell (ILM), amelyben a hőtehetetlenség olyan nagy, hogy a felület eleme nem hűl ki, addig sem amíg az éjszakai oldalon van; c) bonyolultabb, az üstökös magok gáz és portartalmát, részletes hőtani paramétereit, és szabálytalan alakját figyelembe vevő modellek. Az a) és b) modellek felteszik, hogy a forgástengely merőleges a Nap–megfigyelő–üstökös mag síkra, a c) modellben viszont a tengelyirány tetszőleges. A "gyors" vagy "lassú" forgás kissé félrevezető, mert például két azonos periódussal lassan forgó, de lényegesen különböző hőtehetetlenségű üstökös mag esetén az egyik nem felel meg a szó szerinti "lassú" rotátor modellnek. A HST-vel a látható tartományban készített fotometriai eredményeket az üstökös magok termális infravörösben való megfigyelésében résztvevő kollégáimmal kiegészítettük az IR megfigyelésekkel és a Standard Termális Modellt, illetve a mag termális paramétereit részletesen figyelembe vevő modellt is alkalmaztuk a 22P/Kopff valamint 55P/Tempel–Tuttle üstökösök magjára. A geometriai albedó – rádiusz síkon egy keskeny tartomány jelölhető ki az STM modell alapján a lehetséges albedóra és méretre. Tehát az űrteleszkópokkal a látható fényben és termális infravörösben végzett megfigyelései ugyanarról az üstökös magról pontos méret és albedó meghatározást tesznek lehetővé, a kis égitestek méreteloszlása pontosabb lesz az ilyen megfigyelésekből.

A tapasztalat szerint aszteroidákra is és üstökös magokra is a leggyakrabban használt és a megfigyelésekkel jól egyező eredményt ad a Standard Hőmodell (Standard Thermal Model, STM). Én ezt a modellt használtam a termális infravörösben megfigyelt üstökös magok méretének meghatározásához. Megjegyzem, hogy bonyolultabb, az üstökös magok felszínének mikrofizikai tulajdonságait (porszemcsék tulajdonságai, porszemcsék egymástól való távolsága, hőcsatolása, ami a hővezetőképességgel függ össze, jég-por keverék szublimáció részletei, stb.) is figyelembe vevő modelleket kollégáim használtak és az eredményeket közös munkákban tettük közzé. Azt tapasztaltam, hogy az üstökös magokra a látható fénytartományban végzett HST megfigyelésekből 0,04 geometriai albedó feltevessel meghatározott rádiusz és a Standard Hőmodell alkalmazásával meghatározott rádiusz jól egyeztek (mintegy 10%-on belül). A különböző hőmodellekkel és a látható fényben végzett megfigyelések összekombinálásával meghatározott albedó is az üstökös magokra ismert 0,04 értékhez közelinek adódott kollégáim következtetései szerint.

²³1 jansky (1 Jy) = 10^{-26} W m⁻² Hz⁻¹ a fényességi fluxus egysége.

5.4. Többszínfotometria: az üstökös mag és kóma színe

Az üstökös mag és a kóma színét, amelyet a csillagászati standard fotometriai rendszerekben a színindexekkel számszerűsíthetünk, önmagában még csak kevés információt ad az égitest felszínének fizikai viszonyairól és kémiai összetételéről, de sok objektum színindexének (színének) statisztikai vizsgálata az egyes objektum-csoportok között lehetséges fizikai kapcsolatokra deríthet fényt. A színek más paraméterekkel (például méret, pálya-paraméterek, üstökösök aktivitásának mértékét jellemző mennyiségek, stb.) való korrelációja például a csak égi mechanikai módszerek alkalmazásához képest potenciálisan független megalapozást jelent a különböző típusú objektumok eredetére és fejlődésére. Az, hogy a színindexek mégis fontosak az is mutatja, hogy korábban sokszor csak égi mechanikai alapon lehetett ezeket vizsgálni, de a szín-eloszlások összehasonlítása egy független módszer megerősítheti vagy új megvilágításba helyezheti a korábban égi mechanikai vizsgálatok alapján kapott következtetéseket.

A kis égitestekről csillagászati megfigyelő eszközökkel színképi, spektrofotometriai, illetve keskeny-, közepes vagy szélessávú fotometriai adatokat lehet kapni, amelyekből fotometriai vizsgálatokat lehet végezni. A legrészletesebbek a színképi és spektrofotometriai vizsgálatok, de ezen disszertáció elsősorban a látható fénytartományban végzett szélessávú fotometriai adatokat használ fel a HST-vel végzett üstökös megfigyelésekből. Kétféle mennyiséggel is lehet jellemezni az égitestek színét: a már említett színindexszel, valamint a spektrális reflektivitással²⁴.

Adott hullámhosszon a spektrális reflektivitás azt fejezi ki, hogy a felületre beérkező fénynek hányad része a visszavert fény, vagyis a test adott hullámhosszon mérhető fényvisszaverőképességét (albedóját) jelenti. A csillagászati fotometriai gyakorlatban egy adott hullámhosszra normalizált spektrális reflektivitást használunk. A normalizált reflektivitás spektrum $S(\lambda)$ a megfigyelt fotometriai színindexből számítható ki a Nap megfelelő színindexének levonásával és a szélessávú standard csillagászati fotometriai V sáv effektív hullámhosszánál $\lambda_{\text{eff}} = 550$ nm-nél értéket 1-re normalizáljuk. A spektrális reflektivitás az égitest színének Naphoz képest mért színét jellemzi (mennyire "kékebb", "vörösebb" vagy semleges, "szürke").

A normalizált reflektivitás gradiens, S' méri kontinuum spektrális erősségének százalékos változását 1000 Å-re²⁵ normálva (%/1000 Å vagy %/kÅ), amelynek definíciója Jewitt & Luu (1990) alapján

$$S'_{\lambda}(\lambda_1, \lambda_2) = dS/d\lambda / \langle S_{\lambda} \rangle, \quad (24)$$

ahol S a reflektivitás adott $\lambda \in [\lambda_1, \lambda_2]$ hullámhosszon az objektum fluxussűrűsége osztva a Nap fluxussűrűségével, $\langle S_{\lambda} \rangle$ a reflektivitás átlagértéke abban a hullámhossz tartományban, amelyben $dS/d\lambda$ -t számoljuk. Amennyiben a fotometriai színindex két sávjának teljes hullámhossz tartományában i) egy gradiens létezik (a spektrum egy egyenessel közelíthető), illetve ii) nincsenek zavaró spektrális elemek, mint például gáz emissziós sávok, akkor a színindex és a spektrális reflektivitás gradiens S' között a következő kapcsolat áll fenn (Jewitt & Luu 1990):

$$(V - R) = (V - R)_{\odot} + 2,5 \log \frac{2 + S' \Delta \lambda}{2 - S' \Delta \lambda}, \quad (25)$$

ahol példa gyanánt $(V - R)$ és $(V - R)_{\odot}$ az égitest és a Nap színindexei és $\Delta \lambda = \lambda_R - \lambda_V > 0$ a két fotometriai szűrő, a sárga V és vörös R effektív hullámhossza közötti

²⁴Az angol nyelvű szakirodalomban *reflectivity* vagy *reflectance*.

²⁵1Å = 10^{-10} m = 0,1 nm, a csillagászati megfigyelő gyakorlatban gyakran az ängström egységet is használják, amely része az SI-nek.

különbség. A spektrális reflektivitás, illetve a normalizált spektrális gradiens főleg akkor érdekes, ha a spektrum nagy részében állandó, a példánkban a V és R sávok által átfogott $[540, 650]$ nm között. Azonban ez csak ritka esetben teljesül és szűkebb spektrális intervallumokban tekinthető csak állandónak és ezeket mind fel kell tüntetni, ezért tehát a használatuk nehézkes, de mégis ezekben a szűkebb intervallumokban a színindex és S' ekvivalens a (25) összefüggés alapján. Például a Halley-üstökös magjára a Giotto HMC felvételei alapján a $440\text{--}810$ nm hullámhossz tartományban a kontinuum lineáris menete alapján $S' = 6 \pm 3/1000\text{\AA}$, amiből $(B - V) = 0,72 \pm 0,04$, $(V - R) = 0,41 \pm 0,03$, $(V - I) = 0,80 \pm 0,09$ és $(R - I) = 0,39 \pm 0,06$ (Thomas & Keller 1989). Jewitt (1992) szerint az üstökösök normalizált spektrális gradiense széles tartományban szór: a Halley-üstökös $S' = 6 \pm 3/\text{k\AA}$ és a 10P/Tempel 2 $S' = 20 \pm 3/\text{k\AA}$ értékei között.

Az üstökös kóma színének jellemzésére is alkalmas a spektrális reflektivitás és a színindex, azonban a látható színek nem minden tartománya mentes a kóma gázanyagának spektrális elemeitől. A kóma esetén nem egy testfelület fényvisszaverőképességével kapcsolatos a spektrális reflektivitás, hanem a porkómát alkotó porrészecskéktől szórt és visszavert fény és a beérkező összes fénymennyiség arányát fejezi ki. A legnagyobb gáz emissziótól mentes a HST PC2 F675W (vörös) színszűrő által lefedett tartomány, de az F555W (sárga) tartalmazhat a kétatomos szénmolekula (C_2) több sávját, a közeli ultraibolya tartomány szűrői (F336W, F439W) pedig a háromatomos szén (C_3) sávjait. Tehát a porkóma vizsgálatára a HST vörös – sárgás-vörös szűrői a legalkalmasabbak: PC2 F675W és ACS/HRC F606W ("broad-V"). (1. az 1. és 2. táblázatokat). Például a HST PC2 megfigyelések szerint (Lamy és mások 2006) a Rosetta űrszonda cél-üstökösöse, a 67P/Churyumov-Gerasimenko ekliptikai üstökös porkómájának normalizált spektrális reflektivitási gradiense az $540\text{--}670$ nm tartományban $S'[540, 670] = 32 \pm 6 \text{ \%}/\text{k\AA}$. A disszertáció témája elsősorban az üstökösök fizikai tulajdonságaival kapcsolatos, így a porkóma fotometriai adataival és színeivel kapcsolatos eredményekre az értekezésben nem térek ki, azok a publikációs és referencia listában megtalálhatók, de a porkóma fotometriája fontos az üstökösök porkibocsátási aktivitásának meghatározásához, amelyet a következő, 5.5. fejezetben ismertetek.

5.5. A porkibocsátási aktivitás meghatározása

A HST üstökösfigyelésekből nem csak a mag és a kóma fotometriáját lehet elvégezni és a mag méretét, színindexeit meghatározni, illetve a kóma színét és radiális fényességlefutását tanulmányozni, hanem a porkóma fotometriájából az üstökös porkibocsátási aktivitásával összefüggő $Af\rho$ paramétert is meg lehet határozni. A'Hearn és mások (1984) által definiált $Af\rho$ (cm) mennyiség jellemzi az üstökös kómájában egy adott diafragmán belüli por mennyiségét. Az $Af\rho$ mennyiség a porkibocsátási aktivitás kiszámításához alapvetően fontos paraméter, de fontos azt szemelötte tartani, hogy nem mindig arányos a porkibocsátás mértékével, hiszen több, a megfigyelés körülményeitől függő paramétertől összetett módon függ: a kóma fényességlefutásától, az alkalmazott apertúrától, hullámhossztól, a nap- és megfigyelőtől való távolságtól, valamint a fázisszögtől is. Ezt a mennyiséget használjuk a porkibocsátás mértékének, vagyis az egységnyi idő alatt a mag felszínét elhagyó por tömegének a meghatározásához. A porkóma fotometriájához a színek gáz emisszió által legkevésbé zavart kontinuum tartományát, a HST PC2 F675W és ACS/HRC F625W, esetenként F606W ("broad-V") szűrőivel készült képeket használtam.

Szükség van a gázkibocsátás mértékének (fokának, rátájának²⁶) ismeretére is. Mivel $r_h \lesssim 2.8$ AU naptávolságban a vízjég szublimációja dominál, ezért vagy a hidroxil Q_{OH} , vagy közvetlenül a víz $Q_{\text{H}_2\text{O}}$ (molekula s^{-1}) kibocsátása mértékének ismerete szükséges, amelyek főleg rádiócsillagászati vagy ultraibolya tartományban végzett mérésekből határozhatók meg. Az üstökösök porkibocsátás mértékének Q_d (kg s^{-1} vagy g s^{-1}) meghatározására a Newburn & Spinrad (1985) által kifejlesztett módszert felújítva, kissé módosítva, átformulázva, több üstökös spektrofotometriai megfigyeléséből kapott adatokra alkalmazták Singh és mások (1992). Ennek a módszernek az alkalmazásával határoztam meg több, a HST-vel megfigyelt üstökös porkibocsátási aktivitását Lamy és mások (1996, 1998a, 1998b, 1999), A következőkben a Q_d kiszámítását ismertetem. Jó közelítéssel feltételezve, hogy a kibocsátott porszemcsék gömb alakúak, a por tömegvesztési ráta

$$Q_d = \int_{a_0}^{a_m} \frac{4\pi}{3} a^3 \rho_d(a) f(a) da \quad (\text{g s}^{-1}) \quad (26)$$

formában írható fel, ahol $\rho_d(a)$ egy a rádiuszú porrészecske tömegsűrűsége, és $f(a)$ a porrészecskék méreteloszlás függvénye (valószínűségi sűrűség függvény)

$$f(a) = k(1 - a_0/a)^M (a_0/a)^N \quad (\text{cm}^{-1}\text{s}^{-1}). \quad (27)$$

A fenti eloszlás paraméterei $N = 4.2$ és az M függ az r_h (AU) heliocentrikus távolságtól (a Halley-üstökös esetén meghatározva)

$$\log(M) = 1.13 + 0.62 \log(r_h). \quad (28)$$

A por méreteloszlásában szereplő k normálási tényező (Singh és mások 1992)

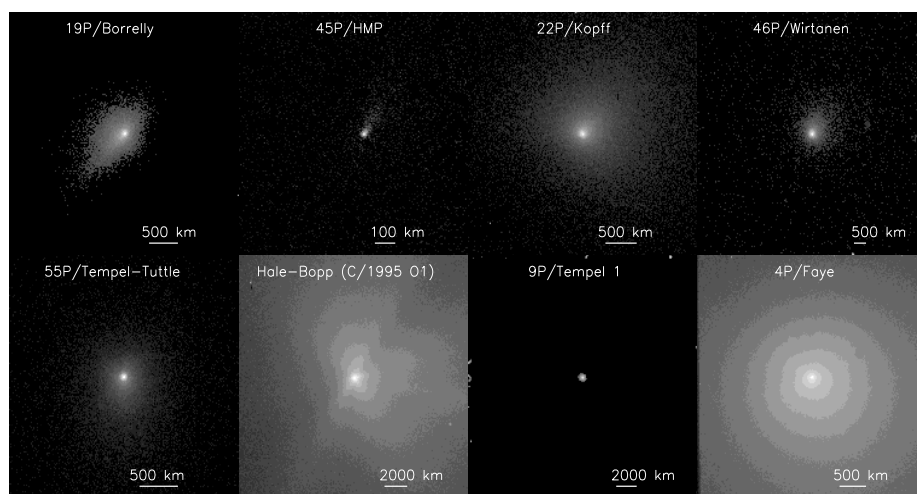
$$k = \frac{2(Ap(\lambda))}{\pi^2 s p_d(\lambda)} \left[\int_{a_0}^{a_m} \frac{a^2}{v_d(a)} \left(1 - \frac{a_0}{a}\right)^M \left(\frac{a_0}{a}\right)^N da \right] \quad (\text{cm}^{-1}\text{s}^{-1}), \quad (29)$$

ahol $(Ap(\lambda))$ a "megfigyelt" felület és geometriai albedó szorzata, $p_d(\lambda)$ a porszemcse geometriai albedója (a méretre nem érzékeny), $p_d(\lambda) = 0.04$, s a kör alakú diafragma rádiusza az üstökös mag távolságába vetítve (cm), amelynek centruma a mag, és amelyben a kóma összfényességét mérjük. A porszemcséket a kiáramló gáz gyorsítja fel, $v_d(a)$ végsebességre, amelyet Newburn & Spinrad (1985) (16–18) egyenletei alapján lehet kiszámítani. Az integrálási határok az a_0 és a_m porszemcse mérethatároknak felelnek meg: $a_0 = 10^{-15}$ cm, míg az a_m maximum rádiuszt a mag mérete (gravitációja) és a gyorsító gáz paraméterei határozzák meg.

6. Az ekliptikai üstökösök megfigyelési eredményei

Ebben a fejezetben a Hubble, ISO, valamint részben a Spitzer űrteleszkópokkal folytatott üstökös megfigyelési programok eredményeit, elsősorban az üstökös magok legfontosabb tulajdonságainak meghatározását részletezem. Külön-külön sorra veszem az egyes üstökös magokat, először az űrtávcsöves megfigyelésekre alapozott saját eredményeimet mutatom be, majd pedig esetenként kitérek a nagy földi teleszkópokkal mások által ugyanarról az üstökösről kapott eredményekre abból a célból, hogy összehasonlíthatók legyenek a különböző megfigyelési körülmények között és módszerekkel

²⁶"Gas production rate, gas release rate, mass-loss rate" az angol nyelvű szakirodalomban használt kifejezések.



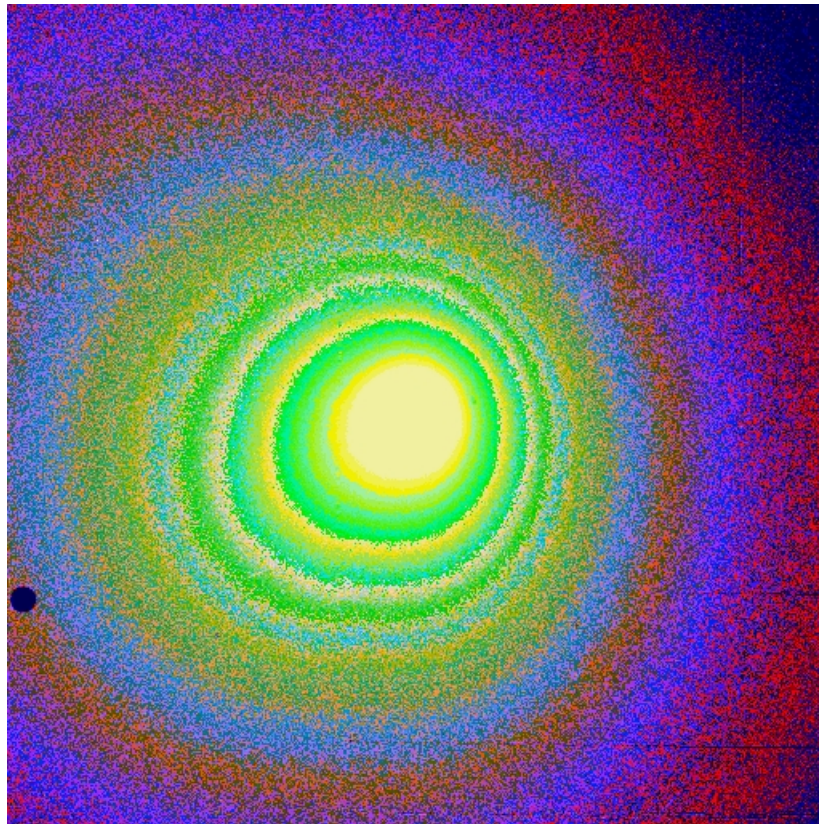
20. ábra. A HST-vel folytatott üstökösfigyelési program első éveiben, 1991. és 1999. között megfigyelt üstökösök az első WFPC, majd a WFPC2 (PC2) új kamerával felvett képekből az üstökös közvetlen környezetét mutatja a mozaik montázs. A 4P/Faye (1991) megfigyelése a WFPC első kamerával történt, a többi az új, PC2-vel. Az 55P/Tempel-Tuttle és C/1995 O1 (Hale-Bopp) üstökösök az Oort-felhővel kapcsolatos üstökösök, a többi üstökös az ábrán ekliptikai üstökös (kép: a szerző által a HST megfigyelésekből készített ábra).

kapott eredmények. Az eredmények bemutatásának ezen módszere azért fontos és érdekes, mert egy-egy üstökös mag távolról, csillagászati módszerekkel történő megismerésének nehézségeit is érzékelteti, illetve egy-egy objektumot többféle megfigyelési szempontból is bemutat. A Spitzer Űrtávcsővel végzett nagyszabású üstökös megfigyelési program, a SEPPCoN (Survey of Ensemble Physical Properties of Cometary Nuclei) eredményeit pedig a 9. pont alatt ismertetem. A látható fénytartományban a HST-vel, valamint a termális infravörösben az ISO és Spitzer Űrteleszkópokkal végzett üstökös megfigyelésekből kapott eredményeim a disszertáció tézispontjai között is szerepelnek.

Az üstökös magok detektálását a 5.2. fejezetben ismertetett új módszer segítségével végeztem. Először a különböző tervezett és folyamatban lévő helyszíni űrszondás programok cél-üstököseivel kapcsolatos megfigyeléseket részletezem (6.1. pont), majd ezután több üstökös megfigyelését célul kitűzött programok eredményeit ismertetem. A HST és ISO megfigyelési eredményeket együtt a 6.2. és 6.3. pontokban.

6.1. Helyszíni űrszondák cél-üstökösei

Ebben a fejezetben a különböző helyszíni űrszondák cél-üstököseinek legnagyobbbrészt a Hubble Űrteleszkóppal végzett megfigyeléseit foglalom össze. Esetenként az ISO és Spitzer infravörös űrobszervatóriumok segítségével is történtek megfigyelések ezekről az üstökösökről. Az HST-vel folytatott üstökösfigyelési program során az első években, 1991. és 1999. között megfigyelt üstökösök közvetlen környezetének képeit a 20. ábra mutatja be. Ezek közül csak az 55P/Tempel-Tuttle és C/1995 O1 (Hale-Bopp) Oort-felhővel kapcsolatos üstökösök nem helyszíni űrszondás vizsgálatok cél-objektumai. Az ábrán szereplő többi ekliptikai üstökös vagy tervezett, vagy folya-



21. ábra. A 4P/Faye (1991 $n = 1991$ XXI) az első üstökös volt, amely magjának fényét a Hubble Űrteleszkóppal sikerült közvetlenül detektálni. A képen a HST WFPC1 régi Bolygókamerája négy CCD chipjével F702W szűrővel készült felvételekből összeillesztett mozaik látható mesterséges színskálán (IDL LUT Pepper). A kóma fényességeloszlása és izofótái jól láthatók. A kép bal oldalán alul az ún. "Baum spot" látható, amely nagyon fényes objektumok kitakarására szolgál, amelynek következtében az azok körüli halvány objektumok, ködök detektálása lehetővé válik (kép forrása: a szerző által készített kép, l. még a további információkat illetően Lamy & Toth 1995; Lamy és mások 1996).

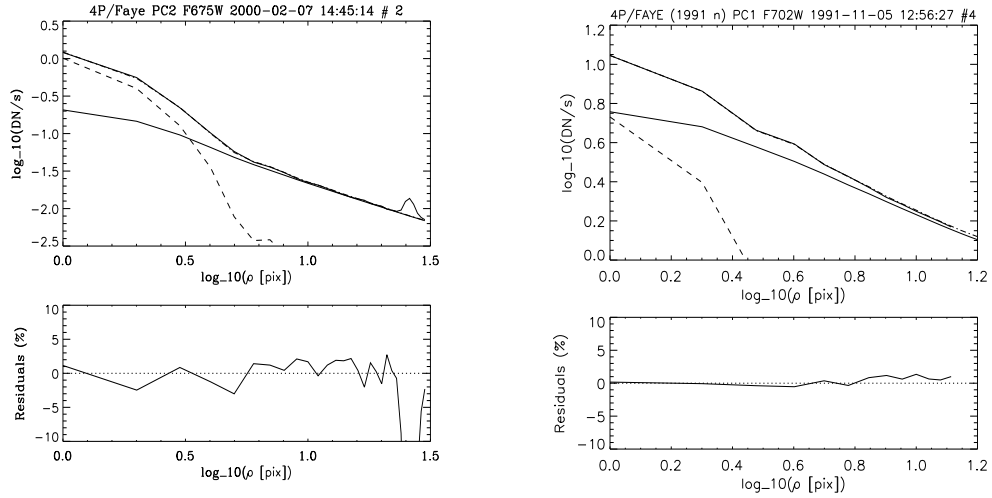
matban lévő, vagy pedig meghiúsult űrprojekt cél-üstököse.

Minden HST képet az Űrteleszkóp Tudományos Kutatóintézet Adatfeldolgozó Rendszere (Space Telescope Science Institute, STScI, Data Processing System) által történt előfeldolgozás után kerültek a tudományos projekt felhasználóihoz.

A kutatómunkám során megfigyelt képeken az üstökös mag és kóma fényének szétválasztása, illetve az üstökös mag fotometriájának elvégzése, a fényesség és adott esetben a színindexek meghatározása az általam kifejlesztett és a 5.2. fejezetben leírt módszerek alkalmazásával történt.

6.1.1. 4P/Faye

Ez volt az első üstökös a Hubble űrtávcsővel folytatott üstökösfigyelési programban amelynek során az üstökösök magjának közvetlen megfigyelése volt az elsődleges cél. A 4P/Faye magja fényét sikerült is közvetlenül detektálni és a mag méretét

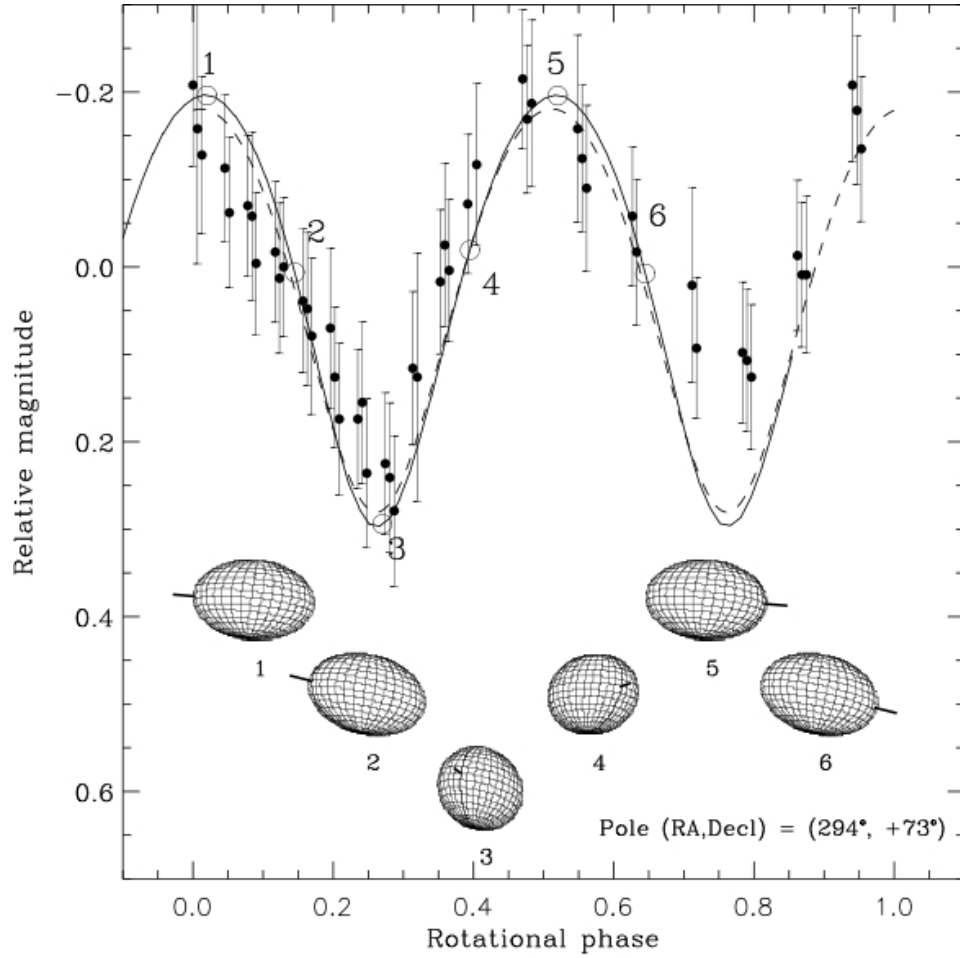


22. ábra. A 4P/Faye üstökös modell radiális fényességprofil illesztése a megfigyelt radiális fényességprofilhoz: a HST nyolcadik megfigyelési ciklusa (Cycle 8) alatt a PC2 műszerrel 2000-ben egy F675W (R) készült megfigyeléshez (balra), illetve a WFPC1 (PC1) kamerával 1991-ben F702W szűrővel végzett megfigyeléshez (jobbra). A felső paneleken a fényességprofilok jelölése: megfigyelt profil (folytonos vastag vonal), mag (szaggatott vonal), kóma (folytonos vékony vonal), modell (szaggatott-pont-vonal). Az alsó paneleken a folytonos görbe vonal a reziduálokat jelöli a megfigyelt-modell eltérést a megfigyelt jel százalékában. A nulla százalékot folytonos vízszintes vonal jelzi. A vízszintes tengelyen a képsíkban pixelekből mért radiális távolság tízesalapú logaritmus, a függőleges tengelyen a pixelekből mért fényességértékei (DN/s) tízesalapú logaritmus van feltüntetve (kép: a szerző által készített ábrák, l. még Lamy és mások 1996, 2009).

meghatározni az aktív üstökönél jelenlévő fényes, aktív kóma ellenére is (Lamy & Toth 1995). A HST első Bolygókamerájával 1991 október-november folyamán (Lamy & Toth 1995; Lamy és mások 1996), valamint a HST javított, második Bolygókamerájával (PC2) 2000 novemberében történt megfigyelések alapján (Lamy és mások 2010) az üstökös mag effektív radiusza 1,8 km. Megemlítem, hogy újra megvizsgálva a régi bolygókamerával 1991-ben végzett megfigyeléseket a szférikusan aberrált HST optikával történt fotometria során a mag fényességének meghatározása a javított kamerával történt megfigyelésekhez képest pontosabb volt, az üstökös mag méretét az első megfigyelések nagyobbak adták meg. A 4P üstökös aktív porkómáját a HST WFPC1 régi Bolygókamerájának látómezejében a 21. ábrán látható mozaik mutatja be az F702W szűrővel (effektív hullámhossz 702 nm, FWHM 220 nm) készített felvételen. Az 1991-es és 2000-ben készült megfigyelés- és model-profilok illesztését a 22. ábra két panelje szemlélteti.

6.1.2. 9P/Tempel 1

A 9P/Tempel 1 üstökös a NASA Deep Impact űrszondájával sikeresen végrehajtott aktív űrkísérletnek volt a cél-objektuma 2005-ben (A'Hearn és mások 2005). Az első tervek szerint a NASA Space Technology 4/Champion program űrszondájának és felszíni leszállóegységének lett volna cél-objektuma a 9P üstökös (Weissman és mások 1999), de ezt a programot törölték és egy új programot, a NASA Deep Impact űrkísérletét valósították meg a Tempel 1 üstökös, mint célpont helyszíni meglátogatá-



23. ábra. A NASA Deep Impact űrkísérletének cél-üstököse, a 9P/Tempel 1 ekliptikai üstökös HST ACS/HRC műszerével 2004. május 7,9 – 9,5 UT közötti időszakban megfigyelt és a tengelykörüli forgási fázis szerint ábrázolt F606W ("broad-V") szűrővel megfigyelt fénygörbéje. Az $a > b = c$ félnagytenyegelyű és a c tengely körül forgó elnyújtott (prolate) forgási ellipszoid modell test a megfelelő rotációs fázisokban van ábrázolva. A megfigyelési pontokhoz illesztett szinusz görbét folytonos vonal, a forgó test modellből adódó szintetikus fénygörbét szaggatott vonal jelzi. A test melletti és számok a fénygörbén is feltüntetett megfelelő pontnak felelnek meg. A forgástengely térbeli iránya égi ekvatoriális koordinátái is fel vannak tüntetve (kép: a szerző által készített ábra, l. még Lamy és mások 2007a; Belton és mások 2011).

sával. Elsősorban a helyszíni űrszodás vizsgálatok céljára kiválasztás motiválta ennek az üstökösnek a HST-vel történt megfigyelését még 1997-ben a HST PC2 kamerájával Lamy és mások (2001), majd 2004-ben, a Deep Impact űrkísérlet előtti évben a HST ACS műszerével (Lamy és mások 2007a). Mindkét megfigyelési időszakban végzett megfigyelésekből a 9P üstökösrag rádiuszára a két extrém látszó keresztmetszetből 2,8 km és 3,2 km adódott.

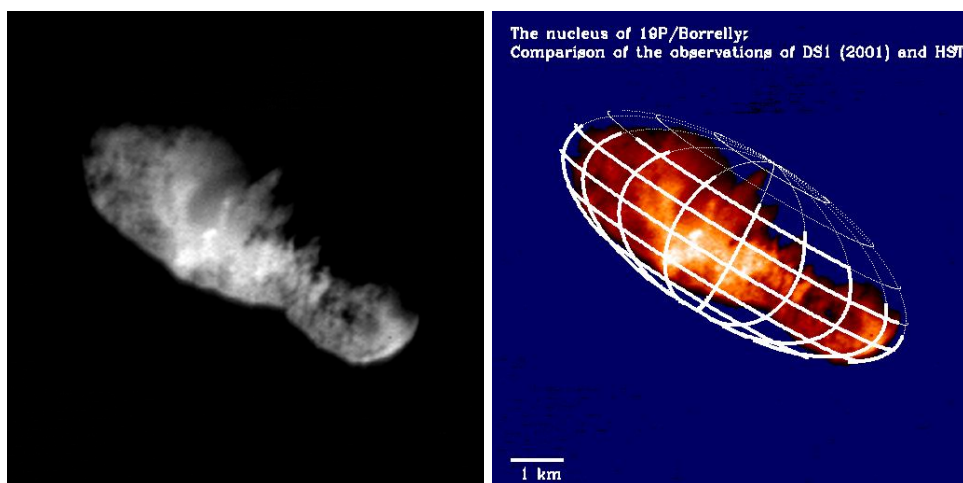
Összehasonlítva ezeket az értékeket a válogatott, jó minőségű és nagy földi teleszkóppal végzett megfigyelésekből adódott rádiusszal az a következtetés vonható

le, hogy még egy nagy földi teleszkóppal, jó földi légköri viszonyok mellett sem mindig lehetséges levonni az aktív kómás üstökös kómájának fényességjárulékát és a földi megfigyelésekből kapott mag fényességében még benne van valamennyi a kóma fényéből, aminek következtében a mag méretére a valóságosnál nagyobb méret adódik. Vannak azonban jó földi megfigyelések is, mint például Meech (2003) V-ben végzett földi megfigyelései szerint a mag rádiuszának felső határa $3,2 \pm 0,1$ km. Ez onnan is látszik, hogy a HST-vel R-ben végzett fotometriai méréseket az ekliptikai üstökösök átlagos $(V-R)=0,52$ magnitúdó színindexével V-be transzformálva és ezzel kiszámítva az üstökösrag rádiuszát 3,07 km-t kapunk, ami közel van a Meech és mások (2004) által adott felső határhoz, vele jól összeegyeztethető, vagyis ez a földi megfigyelés elfogadható eredményt ad az üstökösrag méretére.

Ellenben a szintén nagy földi teleszkóppal Lowry & Weissman (2003) által végzett megfigyelések kiértékelésénél nem vették figyelembe a bár halvány, de mindenképp jelenlévő kóma hatását és így 2,3 km rádiuszt kaptak a 9P/Tempel 1 üstökös magjára. Ez bizonyosan nem elfogadható hiszen 1) nem számoltak a jelenlévő kómával, nem vonták le annak fényességjárulékát, 2) a kóma fényével együtt viszont nagyobb fényességet és nagyobb rádiuszt kellett volna kapni azokból a földi megfigyelésekből, tehát két probléma is van azokkal a megfigyelésekkel és azok kiértékelésével.

A részleges fénygörbe megfigyelésekből meg lehetett becsülni az üstökösrag alakját egy $(a > b = c)$ félnagy tengelyekkel rendelkező elnyúlt ellipszoid ("prolate" ellipszoid) test alak modell feltételezésével, amelynek legrövidebb (c) tengelye körül forog a test és a látszó keresztmetszet időbeli változása okozza a megfigyelt fényváltozást. Lamy és mások (2001, 2007a), valamint Weissman és mások (1999) szerint a mag forgástengelyét a látóirányra merőlegesnek feltételezve a félnagy tengelyekre $a = 3,8 - 3,9$ km és $b = 2,8 - 2,9$ km adódik – a két független megfigyelő csoport szerint egybehangzóan. Ezek a félnagy tengely hosszak csupán minimális értékek, mert a valóságban test forgástengelye nem feltétlenül merőleges a látóirányra és ekkor csak a tengelyek vetületi hosszát adják a megfigyelések.

Az üstökösrag méretének és fényvisszaverő képességének együttes meghatározására is sor került. Fernández és mások (2003) látható fénytartományban, illetve a közeli infravörösben szimultán végzett földi megfigyelései szerint a 9P üstökös magjának rádiusza 2,55 km pontszerű fényforrást tételezve fel. Azonban a megfigyeléseik idején az üstökös a napközelpontja után a Naptól távolodó pályaszakaszon volt és még igen aktív. Ekkor a kóma fényesség-járuléka mintegy 15%-os volt. A kóma fényességjárulékának levonása után adódó üstökösrag rádiusz a maximális látszó keresztmetszet (fénygörbe maximum) elérése idején $3,0 \pm 0,2$ km. Lamy és mások (2007a) által adott HST fotometriai eredményt is figyelembe véve, az üstökösrag geometriai albedójára $p_R = 0,048 \pm 0,007$, ami megfelel az üstökösragokra ismert 0,04 geometriai albedó értéknek (vagyis az üstökösök magja sötét, kis fényvisszaverőképességű). Ehhez képest Fernández és mások (2003) jóval nagyobb, bár még mindig az elfogadható alacsony albedót határozott meg: $p_R = 0,072 \pm 0,016$. Ez az üstökösragokra szokatlanul nagy geometriai albedó minden bizonnyal a látható fényben végzett földi megfigyelések idején meglévő nagy kóma fényességjárulék nem elégséges mértékű levonásának a következménye. Figyelembe véve a Lamy és mások (2007a) által meghatározott $p_R = 0,048$ geometriai albedót, valamint a Lamy és mások (2001) és Weissman és mások (1999) maximális fotometriai keresztmetszeteket az $a > b = c$ (prolate) ellipszoid test model félnagy tengelyeinek hosszára $a = 3,5$ km és $b = 2,6$ km adódott. A térfogat-ekvivalens effektív rádiusz pedig $r_{n,v} = 2,9$ km. A 2004-es HST ACS megfigyelésekből adódó teljes fénygörbe alapján az üstökösrag egyszerű (nem gerjesztett) forgómozgást végez a legnagyobb főtehetlenségi tengelye körül. A

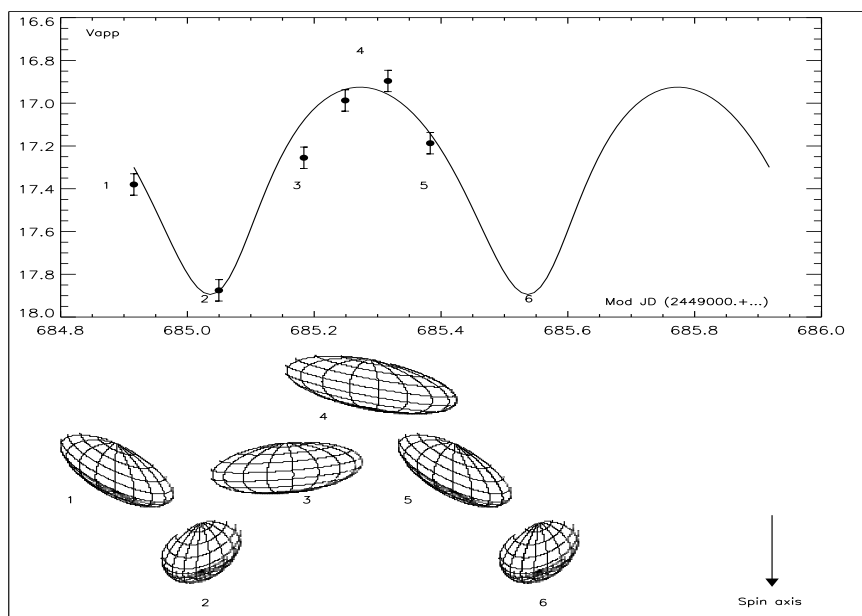


24. ábra. A 19P/Borrelly üstökös magjáról a NASA Deep Space 1 (DS1) űrszondája által készített legközelebbi kép a 2001. szeptember 22-i elrepüléskor készült (bal oldali panel). A HST 1994-es megfigyelései alapján a Borrelly magját egy elnyújtott (prolate) forgási ellipszoiddal közelítve, amely a rövidebb tengelye körül forog, a mag fél nagy- és kistengelyeire $a = 4,4 \pm 0,3$ km és $b = c = 1,8 \pm 0,15$ km adódott (koordináta háló vonalak). Azaz a tengelyek teljes hossza ($2a \times 2b$) mintegy $8,8$ km $\times$ $3,6$ km, ami jól egyezik a DS1 űrszonda képfelvételeiből kapott mérettel: $a = 4,0 \pm 0,05$ km, $b = c = 1,6 \pm 0,04$ km, azaz a tengelyek teljes hossza ($2a \times 2b$) = $8,0$ km $\times$ $3,2$ km. A megfigyelt test és az ellipszoid modell együtt mesterséges színezéssel ábrázolva a jobb oldali panelen látható. (kép: a szerző által készített ábra. A DS1 megfigyelés forrása: Soderblom és mások 2001, 2002; Oberst és mások 2002; az ellipszoid modellt az általa meghatározott üstökösma g méret alapján ennek az értekezésnek a szerzője készítette).

HST ACS/HRC-vel 2004-ben felvett fénygörbét a 23. ábra mutatja be. A HST ACS megfigyelésekből meghatározott tengelykörüli forgásidő 41 óra (1,71 nap) amivel jól egyezik a Fernández és mások (2003) által három különböző megfigyelési sorozatból talált 41 óra (1,71 nap). A 9P/Tempel 1 üstökösma g méretének, alakjának (ellipszoid test modell félnagy tengelyek hossza) ismeretén kívül a test tengelykörüli forgásidőjének ismerete is alapvetően fontos nem csak a Naprendszer kis égitestjeinek fizikai paramétereit illetően, hanem a Deep impact űrkísérlet tervezésében is, nevezetesen az üstökösma gba becsapódó test navigálása és a becsapódás helyének a szonda általi későbbi megfigyelése tervezésében is.

6.1.3. 19P/Borrelly

A 19P/Borrelly üstökös megfigyelése 1996-ban történt a HST PC2-vel. A kapott R fénygörbéből az üstökösma g alakját egy $a > b = c$ (prolate) ellipszoid alakú testtel modellezve a félnagy tengelyek méretére $a = 4,4 \pm 0,3$ km és $b = 1,8 \pm 0,5$ km adódott 0,04 geometriai albedót feltételezve. A 19P/Borrelly üstökös a NASA Discovery Programja Deep Space 1 (DS1) űrszondájának cél-üstököse volt és a szonda sikeresen végrehajtotta tudományos megfigyelési programját az üstökös ma gja közvetlen közelében való elrepülése során 2001-ben. A DS1 helyszíni megfigyeléseiből a fenti ellipszoid alakú modellt feltételezve a ma g méreteire $a = 4,0 \pm 0,05$ km és $b = 1,6 \pm 0,04$ km adódott (Soderblom és mások 2002; Buratti és mások 2004). A



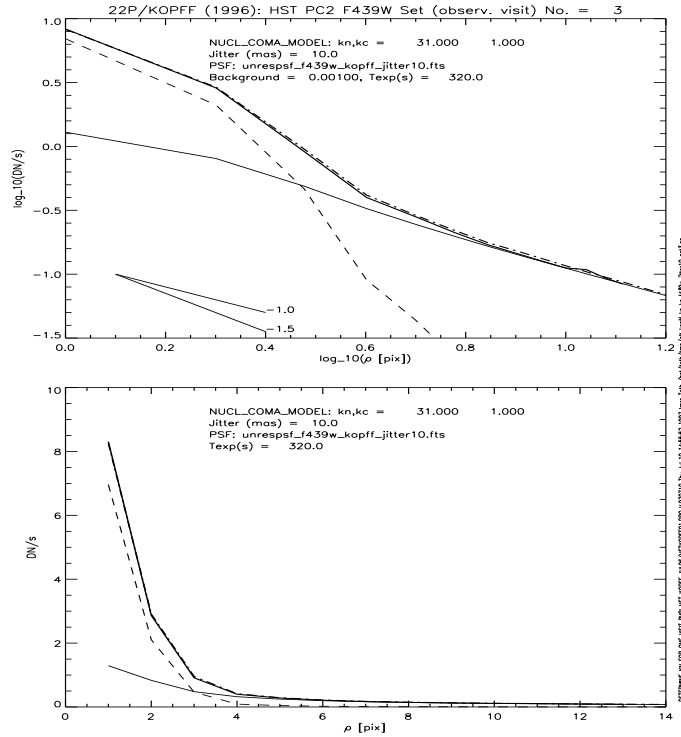
25. ábra. A NASA Deep Space 1 űrkísérletének cél-üstököse, a 19P/Borrelly ekliptikai üstökös HST PC2 műszerével 1994. november 28-án egy ~11 órás időszakban megfigyelt és a tengelykörüli forgási fázis szerint ábrázolt F675W szűrővel megfigyelt R fénygörbéje. Az $a > b = c$ félnagytenyeggelű és a c tengely körül forgó elnyújtott (prolate) forgási ellipszoid modell test a megfelelő rotációs fázisokban van ábrázolva. A megfigyelési pontokhoz illesztett szinusz görbét folytonos vonal, a forgó test modellből adódó szintetikus fénygörbét szaggatott vonal jelzi. A test melletti és számok a fénygörbén is feltüntetett megfelelő pontnak felelnek meg. A forgástengely irány a képsíkba eső vetülete lefelé nyíl jelöli (kép: a szerző által készített ábra, l. még Lamy és mások 1998b).

19P magjának a DS1 és a korábbi HST megfigyelésekből meghatározott mérete és alakja jó egyezést mutat (24. ábra).

Ezekből a méretekből a mag forgástengelyére való merőleges rálátás esetén a maximális látszó keresztmetszethez tartozó rádiusz 2,5 km és a térfogat-ekvivalens rádiusz pedig 2,2 km. Ezekkel a rádiuszokkal jól egyeznek Lowry és mások (2003) valamint Weissman és mások (1999) földi megfigyeléseiből kapott mag rádiusz értékek (2,4 km és 2,5 km). A HST megfigyelésekből a 19P magjának tengelykörüli forgásideje $25,0 \pm 0,5$ óra, amivel Mueller & Samarasinha (2001) földi megfigyeléseiből kapott 26 óra forgási periódus kitűnően egyezik. A HST PC2-vel 1994-ben felvett fénygörbét a 25 ábra mutatja és ez egyben a HST-vel megfigyelt első üstökösrag fénygörbe.

6.1.4. 22P/Kopff

A 22P/Kopff üstökös a NASA Comet Odyssey programja űrszondájának cél-üstököse. A 22P üstökös megfigyelése a HST PC2, valamint az ESA ISO (Infrared Space Observatory) ISOCAM műszerekkel került sor 1996/1997-ben (Lamy és mások 2002). A HST PC2 megfigyelésekből kapott egyik képen az üstökösrag és kóma szétválasztását a 26 ábra mutatja. A látható és infravörös tartományban közel egyidőben végzett megfigyelésekből az üstökösrag mérete és geometriai albedójának független meg-



26. ábra. A 22P/Kopff üstökös modell radiális fényességprofil illesztése a megfigyelt radiális fényességprofilhoz a HST PC2 műszerével a F439W (B) 1996-ban készült megfigyeléshez. A felső paneleken a fényességprofilok jelölése: megfigyelt profil (folytonos vastag vonal), mag (szaggatott vonal), kóma (folytonos vékony vonal), modell (szaggatott-pont-vonal). A vízszintes tengelyen a képsíkban pixelekből mért radiális távolság tízesalapú logaritmus, a függőleges tengelyen a pixelek mért fényességértékei (DN/s) tízesalapú logaritmus van feltüntetve. Az alsó panelen a skála mindkét tengelyen lineáris (kép: a szerző által készített ábra, l. még Lamy és mások 2002).

tározására volt lehetőség. A HST és ISO megfigyelésekből a mag effektív rádiusza $1,67 \pm 0,18$ km és $p_V = 0,042 \pm 0,006$, valamint $p_R = 0,047$ (a geometriai albedó V-ben és R-ben csak kevéssé tér el egymástól).

A 22P/Kopff ISO infravörös megfigyelésében is résztvettem egy közös munkában, amelynek során meghatároztam az üstökös mag méretét a thermális infravörös megfigyelésekből is. A mag fenti rádiusztól kissé különböző, 1,52 km értéket kaptunk ugyanazoknak a HST és ISO adatoknak a még kevésbé kidolgozott módszerekkel történő elemzéséből (Jorda és mások 2000; Lamy és mások 2002). A HST megfigyelésekből kapott fénygörbe mintegy 12 órás időtartamot fed le és egy $0,14 \pm 0,07$ mag minimum-maximum amplitúdójú fényváltozást mutat. A 22P üstökös 5,11 CsE nap-távolságban egyszeri (snapshot) megfigyeléséből Lowry & Fitzsimmons (2001) $1,65 \pm 0,1$ km rádiuszt határozott meg a HST megfigyelésekből ismert 0,047 geometriai albedó (R-ben) feltételezésével. Tancredi és mások (2000) a mag rádiuszára ezzel jól egyező 1,8 km értéket kapott a földi megfigyeléseiből. A HST-vel megfigyelt fénygörbe időbeli rövidsége nem teszi lehetővé az 22P magja forgómozgási állapotának, illetve egyszerű esetben a tengely körüli forgásidőnek a meghatározását.

Hosszabb időtartamot átfogó földi megfigyelésekből, amikor az üstökös elég távol, 4,49 CsE naptávolságban volt Lowry & Weissman (2003) $12,30 \pm 0,8$ óra tengelyköri fogásidőt határozott meg, ami egy elnyújtott alakú forgó test időben változó látszó keresztmetszetével hozható összefüggésbe. Bár Lowry & Weissman (2003) csak fénygörbe szakaszokat tudott megfigyelni, de a teljes földi megfigyelési időintervallum elegendően hosszú volt a megbízható periódus-meghatározáshoz. A földi távcsöves megfigyelésekre általában hosszabb időtartam (hosszabb műszeridő) áll rendelkezésre, mint az űrteleszkópok esetében. Műszeridő tekintetében tehát a földi megfigyelések sokszor előnyösek. A 22P üstökös magjának forgási fénygörbe minimum-maximum amplitúdójára Lowry & Weissman (2003) $0,55 \pm 0,07$ magnitúdót figyelt meg, amiből a $a > b = c$ félnagy tengelyekkel leírható (prolate) ellipszoid test a/b félnagy tengelyarányának minimális értékére $1,66 \pm 0,11$ adódott. Az üstökös mag rádiuszára ezekből a megfigyelésekből Lowry & Weissman (2003) $2,76 \pm 0,12$ km közepes effektív rádiuszt határozott meg 0,047 geometriai albedó (R-ben) és az üstökös magokra általánosan érvényes $\beta = 0,04$ mag fok^{-1} lineáris fázis együttható feltételezésével.

6.1.5. 45P/Honda–Mrkos–Pajdušaková

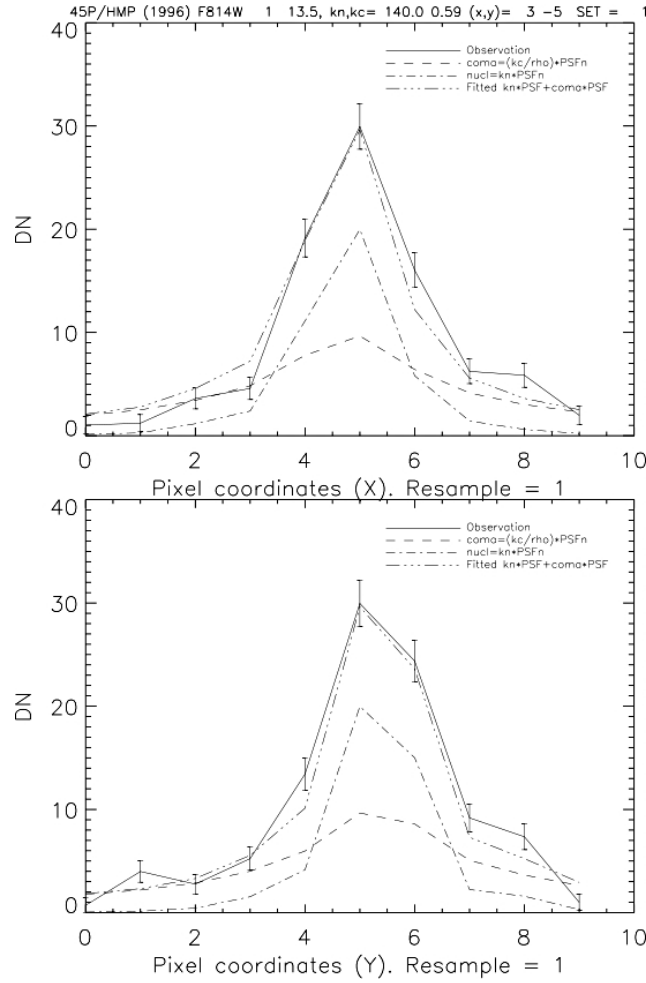
A 45P/Honda–Mrkos–Pajdušaková (45P/HMP) üstökös a Japán Űrkutatási és Űrhatározási Intézet (ISAS), valamint az Európai Űrügynökség (ESA) Giotto üstökös-szondái Halley-üstökös meglátogatása utáni új, kiterjesztett programjának cél-üstököse lett volna 1996-ban, valamint az ESA Rosetta programjának egy korábbi változatának cél-üstököse 2006-ban azonban ezek az űrszonda-üstökös találkozások nem valósultak meg.

A HST PC2-vel 1996-ban két egymást követő napon végzett megfigyelésekből a mag közepes effektív rádiuszára $0,34 \pm 0,01$ km-t határoztam meg, ami az jelenti, hogy ez az üstökös a mai ismereteink alapján egyik legkisebb, szubkilométeres mérettartományba eső üstökös (Lamy és mások 1999). Azonban a HST megfigyelések idején az üstökös fázisszöge (a Nap-üstökös-HST szög) közel 90° volt és ilyenkor a fényesség fázisszögtől való függésének helyes figyelembevétele igen fontos. Az adódott, hogy a 45P/HMP magjának fényessége gyorsabban csökken, mint a többi ekliptikai üstökösé, vagyis a 45P a lineáris fázisfüggvény együtthatója (β) 0,06 magnitúdó/fok, szemben a többi üstökösre szokásos 0,04 mag/fok értékkel. Ezt a nagyobb együtthatóval számolva a 45P magjának közepes effektív rádiusza 0,78 km. A HST megfigyelések csak nagyon halvány üstökös-kómát mutattak a mag körül, amiből a porkibocsátás felső határa csak mintegy $1,0 \text{ kg s}^{-1}$ volt. A HST PC2 megfigyelésekből kapott egyik képen az üstökös mag PSF-illesztését a magot tartalmazó képelemen átmenő X- és Y-irányú fényességprofilok segítségével a 27. ábra mutatja.

Egyszeri (snapshot) megfigyelésükből Lowry és mások (1999) ennél jóval nagyobb $1,34 \pm 0,55$ km-es rádiuszt állapított meg, de a nagy hibahatár miatt 0,82 km a rádiusz, ha a HST megfigyelésekkel jól egyező 0,06 mag/fok lineáris fázis együtthatót vesszük figyelembe. Összefoglalva, a 45P/HMP ma ismert közepes effektív rádiusza mintegy 0,8 km és az üstökös mag fázisfüggvénye gyorsan sötétté teszi a magot nagy (90°) fázisszögek esetén Ehhez hasonló lefutást mutat a 2P/Encke és 48P/Johnson üstökösök fázisfüggvénye is.

6.1.6. 46P/Wirtanen

A 46P/Wirtanen üstökös az ESA Rosetta űrszonda programjának eredeti cél-objektuma volt 2003-ig, illetve a NASA Comet Odyssey programjának tartalék cél-üstököse.

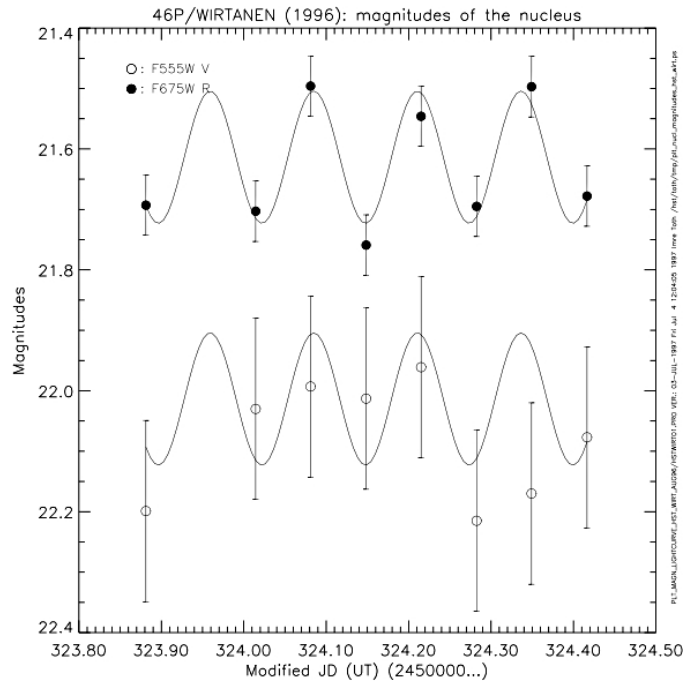


27. ábra. A 45P/Honda-Mrkos-Pajdusakova (45P/HMP) üstökös magját tartalmazó képlemen keresztül felvett (X) és (Y) irányú fényességprofilok (DN) (jobbra). A megfigyelt profilt folytonos vonal mutatja a hibahatárok feltüntetésével, az illesztett modellt szagatott vonal –három pont – vonal, a kóma járulékát szagatott vonal, a mag járulékát pont-vonal jelzi (kép: a szerző által készített ábra, l. még Lamy és mások 1999).

A HST és ISO megfigyeléseket megelőzően is már voltak földi megfigyelések a 46P magjának nagy naptávolságban (4,6 CsE) történő megfigyelésére, de csak egy felső határt, 0,69 km-t, sikerült megadni ezekből a megfigyelésekből a rádiuszra (Boehnhardt és mások 1997).

A 46P üstökös magjának első egyértelmű detektálása a HST PC2-vel történt 1997-ben, amikor R szűrővel kapott megfigyelésekből az effektív rádiuszára $0,62 \pm 0,02$ km és adódott (Lamy és mások 1998a). Az üstökös-mag és kóma szétválasztását a 18 ábra mutatja az 53. oldalon. A $a > b = c$ félnagy tengelyű (prolate) ellipszoid test modellt feltételezve a tengelyarány minimális értéke $a/b = 1,2$ és a tengelykörüli forgásidő $6,0 \pm 0,3$ óra (Lamy és mások 1998a; Groussin & Lamy 2003). A HST PC2 R (F675W) és V (F555W) szűrőivel felvett fénygörbét a 28. ábra mutatja.

Az ESO VLT műszerével Boehnhardt és mások (2002) a 46P rádiuszára $0,56 \pm$

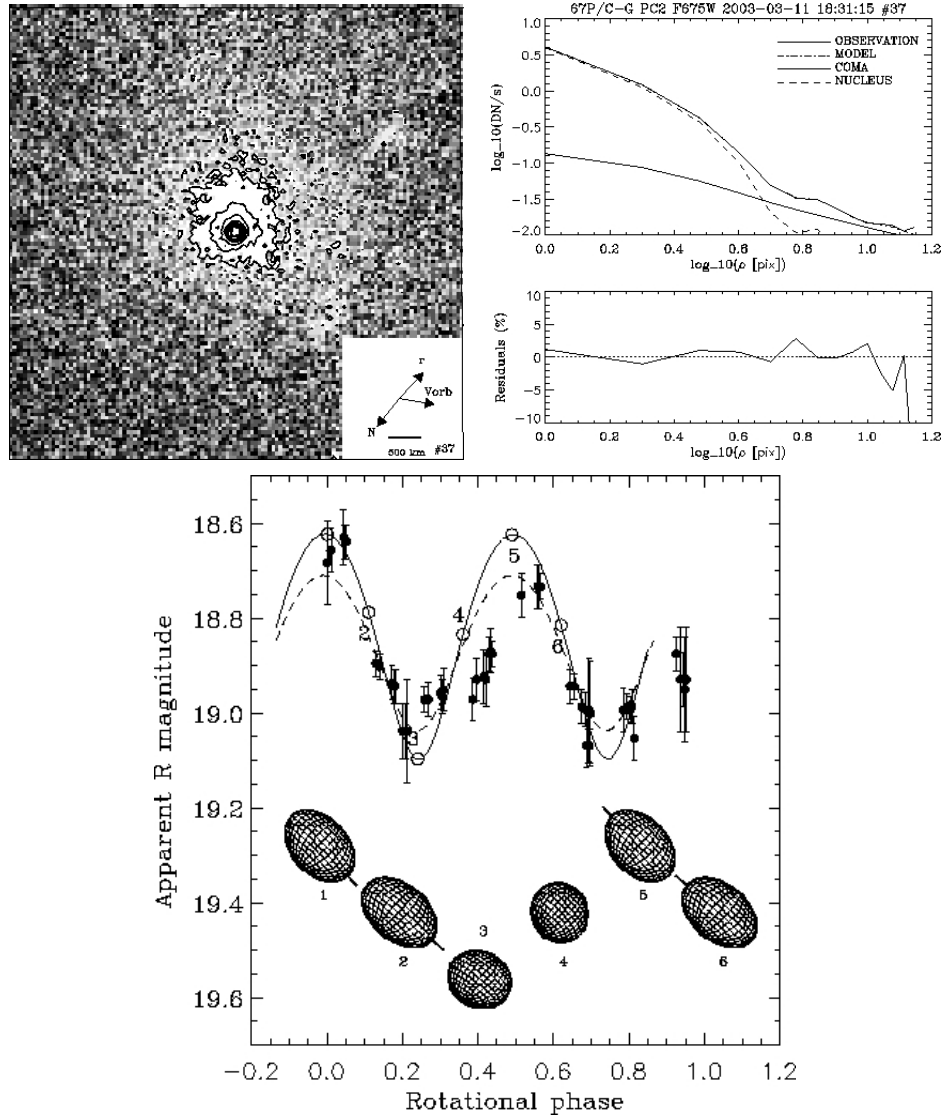


28. ábra. A 46P/Wirtanen üstökös magja tengelykörüli forgásból adódó fénygörbéi a HST PC2 R (fent) és V szűrővel (lent) 1996. augusztus 28-án készült megfigyelések alapján. A vízszintes tengelyen az időskála UT JD 2450000-től eltelt napokat jelenti. A folytonos vonalak a forgási periódus ismeretében illesztett szinusz görbék (kép: a szerző által készített ábra, l. még Lamy és mások 1998b)

0,04 km és a minimális tengelyarányra $a/b = 1,4 \pm 0,01$ adódott, továbbá a forgási fénygörbe-szakaszokból a forgási periódusra a HST-vel kapott értékhez nagyon közelállót kaptak. Meech és mások (2000) valamint Tancredi és mások (2006) a 46P mag rádiuszára 0,7 km-t határoztak meg, ami kissé nagyobb, mint a HST megfigyelésekből ismert érték. A 46P mag rádiuszára Lowry és mások (2003) és Meech és mások (2004) CCD fotometriával csak felső határt adtak meg a nagy heliocentrikus távolságban is még aktív, kómás üstökösre. A 7,6 órát javasoltak a mag tengelykörüli forgási idejére (Meech és mások 1997).

6.1.7. 67P/Churyumov–Gerasimenko

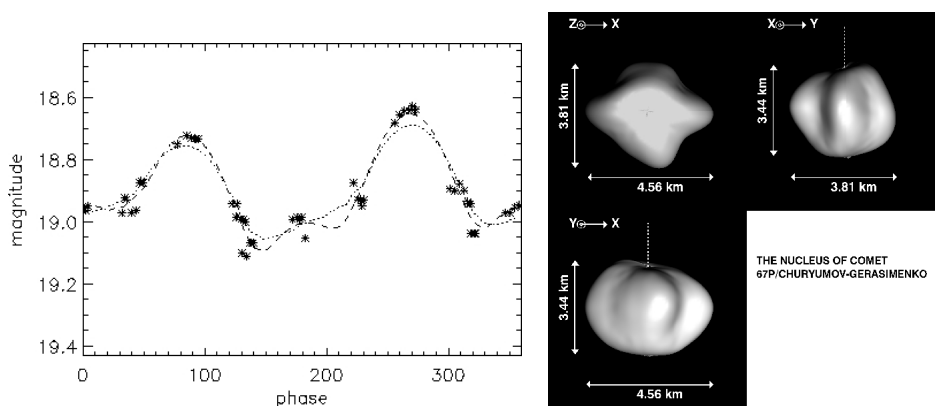
A 67P/Churyumov-Gerasimenko (67P/CG) üstökös az Európai Űrügynökség (ESA) Rosetta űrprogramjának cél-üstököse. A Rosetta alapvetően üstökös kutatásra kifejlesztett nagy hatótávolságú és hosszú időtartamú bolygóközi útra felkészített űreszköz, amely 2004. március 2-án indult útnak és elsődleges uticélja a 67P/Churyumov-Gerasimenko ekliptikai üstökös 2014-től kezdődő és legalább egy évig tartó részletes helyszíni vizsgálata, amelynek során a tervek szerint a Philae elnevezésű leszállóegység az üstökös mag felszínén fog majd méréseket végezni. A Rosetta-programban jelentős a magyar űrtechnológiai és tudományos kutatási részvétel, amelynek döntő hányada a Philae leszállóegységhez kötődik. A fedélzeti energiaellátó rendszeren (BME SZHRT fejlesztése) és a központi számítógépen (KFKI RMKI fejlesztése) kívül



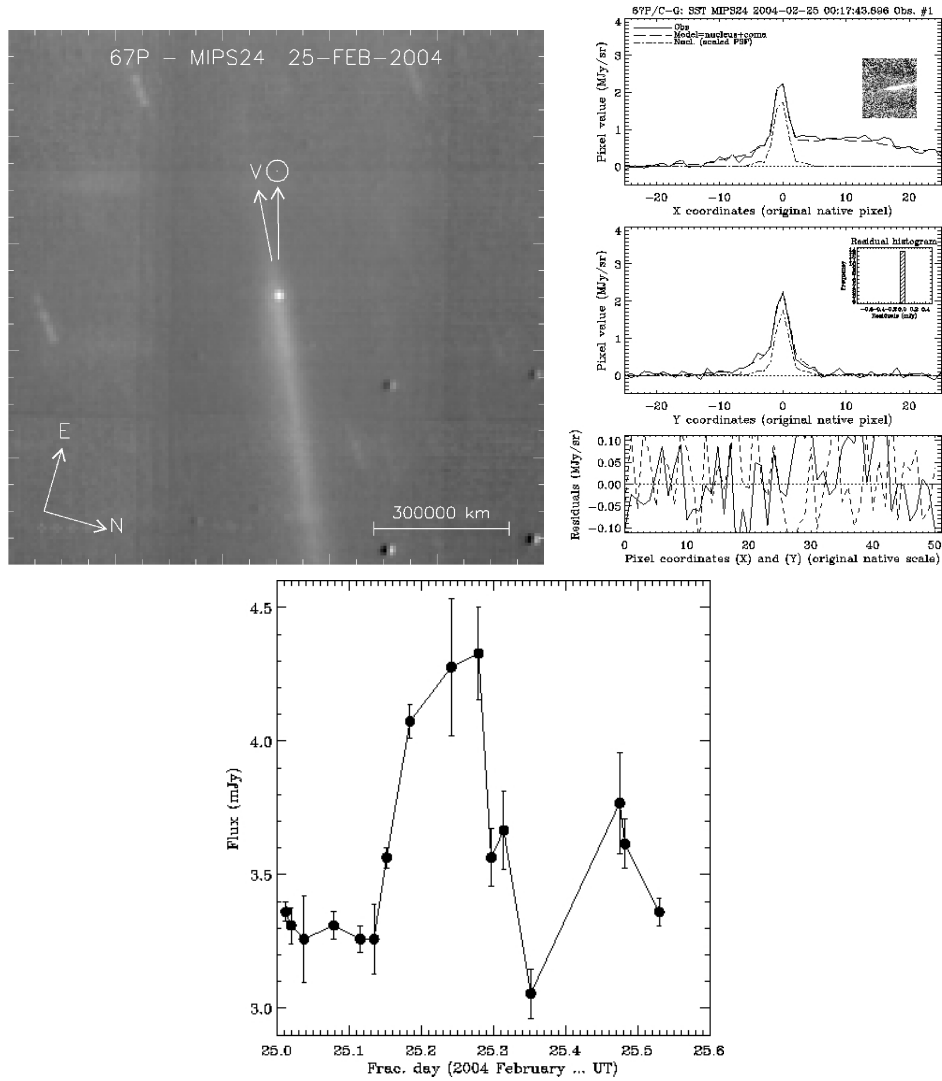
29. ábra. A 67P/Churyumov-Gerasimenko ekliptikai üstökös a HST PC2-vel 2003. március 11/12-én történt megfigyelése (balra fent), valamint az üstökösrag és kóma fényének szétválasztásának eredménye (jobbra fent) látható. A megfigyelt képen a méretskála, valamint a Nap-üstökös rádiuszvektor, a napköri keringési sebességvektor ellentettje, valamint az ekvatoriális északi irány képsíkba eső vetületét nyilak jelzik (balra fent). Az azimutálisan átlagolt radiális fényességprofil illesztés eredménye (jobbra fent) látható (l. még 22. ábrát). A 67P/CG üstökös magjának HST PC2 műszerével 2003. március 11,4–12,3 UT közötti időszakban megfigyelt és a tengelykörüli forgási fázis szerint ábrázolt R fénygörbéje (lent). Az $a > b = c$ félnagytenyegelyű és a c tengely körül forgó elnyújtott (prolate) forgási ellipszoid modell test a megfelelő rotációs fázisokban van ábrázolva. A megfigyelési pontokhoz illesztett szinusz görbét folytonos vonal, a forgó test modellből adódó szintetikus fénygörbét szaggatott vonal jelzi. A test melletti és számok a fénygörbén is feltüntetett megfelelő pontnak felelnek meg (kép: a szerző saját készítésű ábrája, l. még Lamy és mások 2006).

két mérőműszer-együttes (ROMAP, SESAME) egyes műszereit, vagy azok részegységeit is hazai kutatóhelyen, a Magyar Tudományos Akadémia KFKI Atomenergia Kutatóintézetében fejlesztették, illetve készítették. Az MTA KTM Csillagászati Kutatóintézetből pedig az OSIRIS kamerái által készített képek tudományos elemzésében veszek részt nemzetközi munkacsoportban.

Az eredeti tervek szerint a 46P/Wirtanen ekliptikai üstökös lett volna a Rosetta cél-üstököse, de a hordozórakéta meghibásodása miatt az űrszonda nem indulhatott el ehhez az üstököshöz és a késés miatt nem is érhetette azt el, ezért egy új üstököst kellett keresni a Rosetta program számára. A 67P/CG üstökösnek a Rosetta új cél-objektumaként való kijelölése után 2003-ban a HST PC2 műszerével az űrteleszkópra kapott rendkívüli űrtávcsőidőben (STScI DD) nemzetközi kutatócsoportban megfigyeltem az üstököst és meghatároztam a mag méretét, ellipszoidallal modell feltevésével közelítve a kis égitest alakját, tengelykörüli forgásidejét. A HST megfigyelésekből a mag közepes effektív rádiusza $1,98 \pm 0,02$ km, a (prolate) ellipszoid modell minimális tengelyarány $a/b = 1,55$ és a tengelykörüli forgás idejére $12,41 \pm 0,41$ óra adódott. A 67P egy HST képfelvételét, illetve az üstökös mag fényének a kómáétól való szétválasztását a 29. ábra két felső panelje mutatja. Az üstökös mag tengelykörüli forgása következtében megfigyelhető fényváltozás fénygörbéjét a 29. ábra alsó panelje mutatja be. A HST megfigyelésekből általam előállított fénygörbe invertálásával (inverz probléma megoldásából) a 67P magjának egy 3-dimenziós modelljét állította elő Mikko Kaasalainen, amit közös publikációkban jelentettünk meg (Lamy és mások 2006, 2007b). Az invertálás során egyszerre kiadódik a 3-dimenziós alak-modell, a forgási periódus, valamint az egyszerű tengelykörüli forgást végző test forgástengelyének térbeli iránya is. A fénygörbe invertálásból 12,69 óra rotációs periódus adódott, ami 0,28 órával hosszabb, mint a HST megfigyelésből kapott $12,41 \pm 0,41$ óra, de belefér annak hibahatárába. Ez a modell természetesen csak egy első próbálkozásnak tekinthető, amelyből előállított



30. ábra. A 67P/Churyumov-Gerasimenko üstökös magjának 12,69 óra forgási periódussal feltekert R fénygörbéje (balra), valamint a fénygörbe inverziós technikával előállított 3-dimenziós alak modell M . Kaasalainen munkája az általam meghatározott HST PC2 fénygörbén alapul (jobb). A legjobb illeszkedés 79° rálátási szögnél van (szaggatott vonal), míg egy másik lehetséges megoldás 60° rálátási szögnél lehetséges (pontosított vonal), de ez utóbbinál a megfigyelésekre való illeszkedés kissé rosszabb. A modellnek a derékszögű koordináta-rendszer tengely irányai szerinti vetületei láthatók (jobb). A 67P magjának ez a 3-dimenziós modellje ma még csak egy első közelítés és távolról sem tekintendő végleges modellnek (kép: Lamy és mások 2006).



31. ábra. A 67P/Churyumov-Gerasimenko üstökös 2004. február 25-én a Spitzer űrteleszkóp MIPS detektorával 24 mikronon történt megfigyeléseiből egy kép (balra). A méretskála feltüntetve, valamint a nyílak a Nap-üstökös rádiuszvektor, a napközi keringés sebességvektorával ellentétes irány, valamint az ekvatoriális északi irány képsíkba eső vetületeit nyílak jelzik. Az üstökös és a fényes porkóma, porösvény szétválása a magot tartalmazó képlemen átmenő (X) és (Y) profilok illesztésével (jobbra). A kapott termális infravörös fluxusgörbe (lent), amelyen a hibahatárok is fel vannak tüntetve (képek: a szerző által készített ábrák, l. még Lamy és mások 2006).

szintetikus fénygörbe egyezik a megfigyelt fénygörbével (30. ábra). Nyilvánvaló azonban még több fénygörbe megfigyelés kell az üstökös valódi alakjának modellezéséhez. Mindenesetre ezt a 3-dimenziós modellt már fel lehet használni a Rosetta űrszonda programjának tervezéséhez, az üstökös körüli pályáraállítás megtervezéséhez, a test gravitációs terének első modelljéhez, a leszállóegység útjának tervezéséhez, illetve az üstökös aktivitásának modellezéséhez is.

A Spitzer infravörös űrteleszkóppal 2004-ben végzett megfigyelésekből előállítottam az üstökös mag termális infravörös fluxusgörbéjét és meghatároztam a 67P magjának méretét és szinódikus tengely körüli forgásidejét. A mag minimális infravörös fluxushoz (IR fluxusgörbe) tartozó rádiusza 1,93 km, a maximális fluxushoz pedig 2,03 km. A szinódikus forgásidő 14 óra, ami nem adódott ki olyan pontosan, mint a látható fényben végzett HST fénygörbe esetén, mert Spitzerrel sokkal rövidebb, 12,5 órás, míg a HST-vel 21 órás megfigyelési időtartam állt rendelkezésre. A Spitzer MIPS detektorával 24 mikron készített megfigyelésekből egy példát mutat a 31. ábra, amelyen az üstökös mag és porkóma, porösvény fényének különválasztásának eredménye, valamint a kapott termális infravörös fluxus-görbe is látható.

Ami a nagy földi teleszkópokkal mások által végzett megfigyeléseket illeti, a 67P afhéliuma közelében, 5,72 CsE-re volt a Naptól Lowry és mások (2003) megfigyeléseiből a mag rádiuszának felső határa 2,9 km. Korábban Mueller (1992) a 67P mag rádiuszára $2,8 \pm 0,1$ km-t adott meg R-ben végzett megfigyeléseiből és 0,04 geometriai albedót feltételezve. A 67P heliocentrikus, hosszú időszakot átfogó és az üstökös mag aktivitását mutató fénygörbéje alapján az üstökös 4,5 CsE-nél nagyobb naptávolságban már inaktív. Tancredi és mások (2000) megfigyelései szerint a mag rádiusza 2,0 km, ami jól egyezik a HST megfigyelésekből általam kapott értékkel (Lamy és mások 2006).

6.1.8. 73P-C/Schwassmann–Wachmann 3

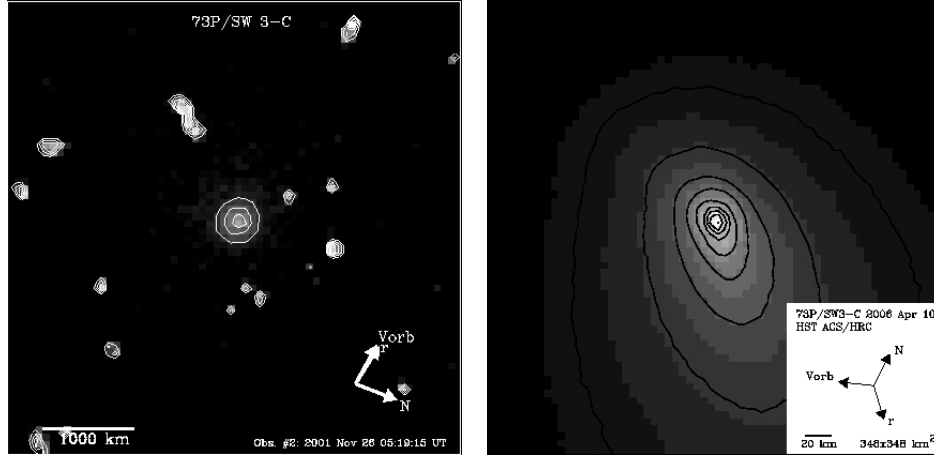
A NASA CONTOUR (COmet Nucleus TOUR) űrszonda több ekliptikai üstökös, a 2P/Encke, 6P/d'Arrest és a 73P/Schwassmann–Wachmann 3 üstökös (ez utóbbi szétesett üstökös mag-töredékeinek) helyszíni vizsgálatát tűzte ki célul és 2002. július 3-án indult útjára. Sajnos azonban az űrszondával a bolygóközi pályára való rátérést célzó hajtómű beindítás után azonnal megszakadt a kapcsolat és utána nem is állt helyre, így a program nem valósulhatott meg.

A 73P üstökös két komponensből álló "magjáról", ami valójában két kómas fénycentrumot jelent, közölt megfigyelést Schuller (1930) még az üstökös felfedezése évében, de ezen a megfigyelésen kívül nincs más beszámoló. Az üstökös 1994-ben 3,03 CsE naptávolságban aktív és Boehnhardt és mások (1999) 1,26 km felső határt adott meg a mag rádiuszára. A 73P üstökös magja spontán, nem árapály erőhatásra legalább három komponensre esett szét 1995-ben. Lowry & Fitzsimmons (2001) nem figyelték meg 1998-ban csak egy 0,9 km-es felső határt adtak meg a legnagyobb (C) komponens rádiuszára, amikor az üstökös 5,03 CsE naptávolságban járt.

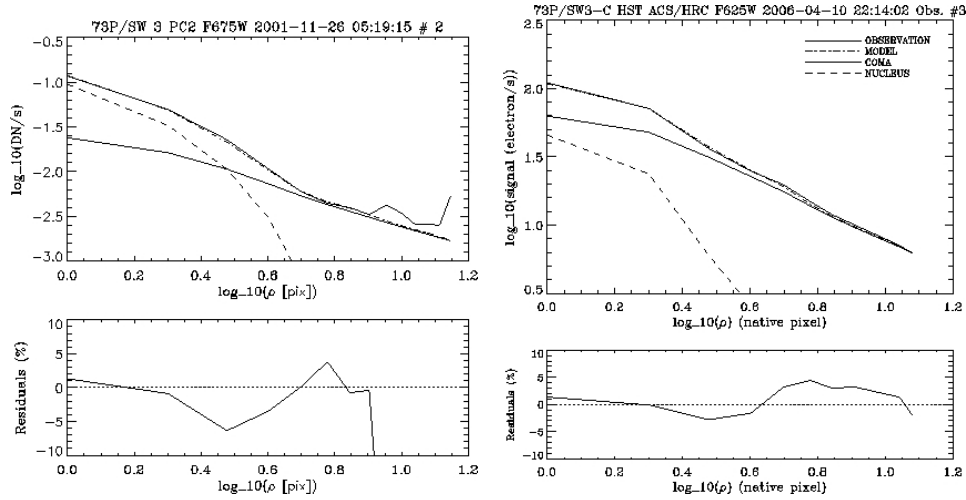
A 73P üstökös legnagyobb, C-jelű magtöredékét megfigyeltem a HST WFPC2 kamerájával 2001-ben és ACS/HRC kamerájával 2006-ban (Toth és mások 2005, 2006, 2008). A 2001-es és 2006-os HST megfigyelésekből egy-egy képet mutat be a 32. ábra, illetve a mag-kóma szétválasztását a megfigyelt profilokra történő modell illesztések eredményességét szemlélteti a 33. ábra.

A HST PC2 műszerével 2001-ben 3,25 CsE naptávolságban a C komponens megfigyelhető a nagy naptávolságban is meglévő aktív kóma ellenére is a HST nagy felbontásának és érzékenységének köszönhetően. Fénygörbe megfigyelés 2001-ben nem volt csak egyedi (snapshot) megfigyelések R-ben, amelyekből a rádiusz $0,68 \pm 0,04$ km-nek adódott és a (prolate) ellipszoid modell test minimális tengelyarányára kapott érték $a/b = 1,16$ (Toth és mások 2005).

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

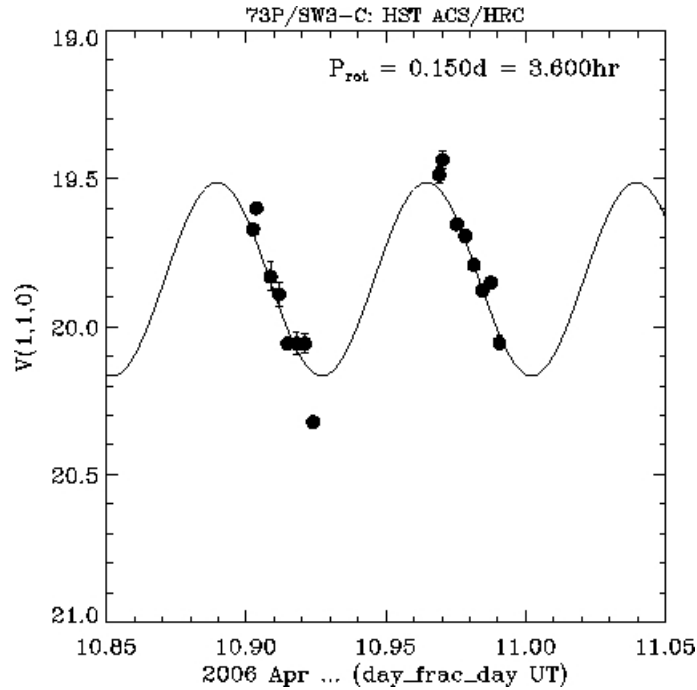


32. ábra. A 73P-C/Schwassmann-Wachmann 3 szétesett üstökös magtöredéknek a HST-vel 2001. november 26-án a PC2-vel (balra) és 2006. április 10-én (jobbra) az ACS/HRC-vel történt megfigyeléseinek összehasonlítása. A 2001-es PC2 R szűrővel (F675W) megfigyelések összeadásával készült kép, a 2006-os ACS/HRC "broad-V" (F606W) szűrővel készült képek egyike látható. A 2001-es képen az üstökösök kívül a látómezőben lévő egyéb asztrofizikai objektumok is láthatók. A képek síkjában a Nap-üstökös rádiuszvektor vetülete ($\mathbf{r}$), a heliocentrikus sebességvektor vetülete ($\mathbf{v}_{\text{orb}}$), valamint az ekvatoriális északi irány (N) is jelölve van (kép: Toth és mások 2005, 2006, 2008).



33. ábra. A 73P-C/Schwassmann-Wachmann 3 szétesett üstökös magtöredéknek a HST-vel 2001. november 26-án a PC2-vel (balra) és 2006. április 10-én (jobbra) az ACS/HRC-vel történt megfigyelésekre kapott modell illesztések összehasonlítására példák: PC2 R (F675W) és ACS/HRC R (F625W) szűrőkkel készült képekre, rendre (l. még a 22. ábrát) (kép: Toth és mások 2005, 2006, 2008).

előtt mások által végzett megfigyelésekből meghatározott mintegy 1,1 km-es üstökösrag rádiuszt, a 2001-es HST megfigyelés alapján a C magtöredék térfogata csak mintegy 25%-a a szétesés előtti üstökösrag térfogatának. Az üstökös a 2001-es HST

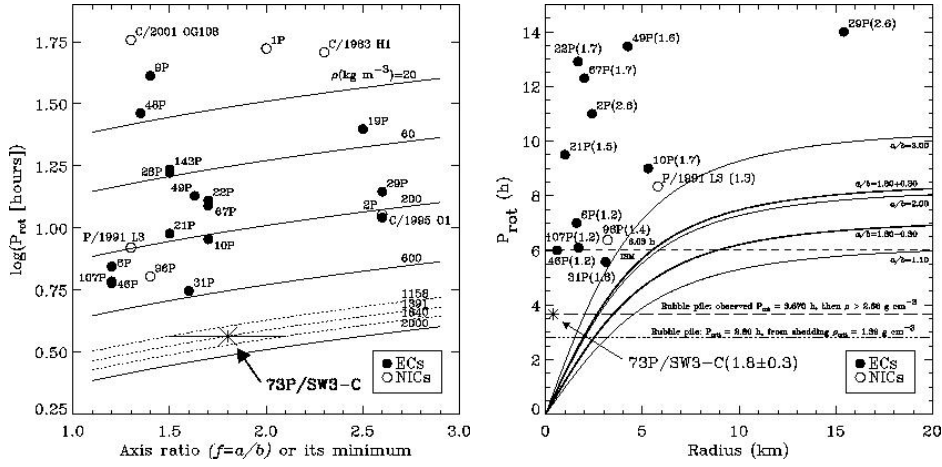


34. ábra. A 73P-C/Schwassmann-Wachmann 3 üstökös-magtöredék tengelykörüli forgásából adódó fénygörbéje a HST ACS/HRC "broad-V" (F606W) szűrővel 2006. április 10-én készített megfigyelések alapján. A megfigyelési pontokhoz tartozó hibahatárok is fel vannak tüntetve, több esetben nem is látszanak, mert kicsik (0,05 magnitúdónál is kisebbek). A megfigyelési pontok egy 3,6 órás forgási periódussal leírható fénygörbére illeszkednek, azonban ez a periódus még nem tekinthető véglegesnek a kevés megfigyelés miatt (kép: a szerző által készített ábra és Toth és mások 2006, 2008).

megfigyelések idején jóval a napközelsége után már 3,26 CsE naptávolságban volt, amikor még mindig nagy gáz- és porkibocsátási aktivitást mutatott: a HST megfigyelések alapján mintegy $1,5 \text{ kg s}^{-1}$ (napi 130 tonna) a porkibocsátása, ami nagy szublimációra és ennek következtében nagy porvesztésre utal a nagy heliocentrikus távolság ellenére. Ebből arra következtettem, hogy az üstökös-magtöredék friss, szublimációra képes felülete a napfény hatására intenzív szublimációra képes nagy heliocentrikus távolságban is. Prediktáltam, 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.

Rendkívül kedvező megfigyeléseket tett lehetővé az, hogy az üstökös 0,29 CsE-re került földközelsébe 2006-ban és ekkor hat HST keringés idején összesen 21 órán keresztül sikerült megfigyelni a C magtöredéket többszínfotometriai rendszerben. A 73P következő, 2006-os visszatérésekor ismét a HST-vel, de annak a PC2-nél nagyobb felbontású és érzékenységgű ACS műszerével ismét megfigyeltük ennek az üstökösnek a C magtöredékét amikor az kivételes földközelségben 0,29 CsE közelre került bolygónktól (és a HST-től), miközben 1,24 CsE-re járt a Naptól igen aktív volt. A C komponens effektív rádiuszára $0,53 \pm 0,02 \text{ km}$ -t és a (prolate) ellipszoid test modell minimális tengelyarányára $a/b = 1,8 \pm 0,3$ kaptam.

A 2001-ben megfigyelt nagyobb és a 2006-ban meghatározott kisebb rádiusz közötti

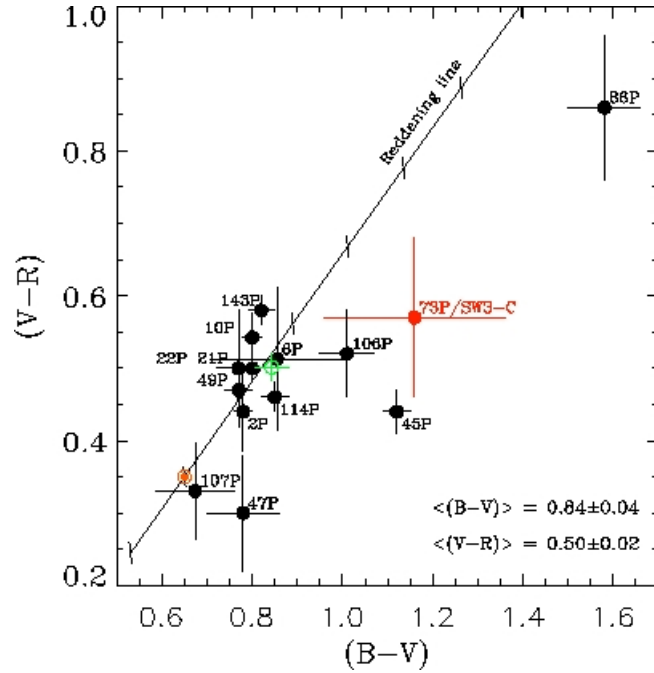


35. ábra. A 73P-C üstökös-magtöredék túl gyors tengelykörüli forgás miatt bekövetkező szétesés elleni stabilitásának vizsgálata két diagramon. Elnyújtott (prolate), $a > b = c$ félnagy tengelyű ellipszoid modell test c tengelye körül forog. A rotációs periódus – tengelyarány diagramon (bal oldali panel) a C magtöredék csak nagy belső tömegsűrűségeknél marad stabil, azaz a test felszínéről anyagdarabok válhatnak le ennél kisebb sűrűségeknél. A görbesereg az állandó sűrűségeket jelöli. A rotációs periódus – effektív rádiusz diagramon a C magtöredék stabil a forgás miatt bekövetkező szétesés ellen. A görbesereg az állandó a/b félnagy tengely-arányokat jelöli ki. A vízszintes vonalak különböző sűrűségű törmelék-halom modellekre vonatkozó kritikus forgási periódusokat jelölik meg. A részleteket illetően l. még a 12. fejezetet (kép: a szerző által készített ábra és Toth és mások 2006, 2008).

eltérés magyarázatára három lehetőséget vetettem fel: 1) mivel egy szétesett üstökös-mag legbelső magja a C komponens, elképzelhető, hogy a geometriai albedója nagyobb (friss jég), mint az üstökösök külső felszínére jellemző 0,04, ekkor 0,12 albedónak kell lenni a kisebb rádiuszhoz; 2) a friss magbelső erősen szublimál, igen aktív és sok anyagot veszített, tovább töredezett 2001 és 2006 között; 3) a legvalószínűbb ok: csak 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. Ugyanis egy elnyúlt alakú forgó test egyszeri (snapshot) megfigyelése, illetve a forgástengelyre való rálátás szöge miatt nagyon különböző lehet a megfigyelt látszó keresztmetszet 2001 és 2006 között. Ez lehet a legvalószínűbb oka a megfigyelt rádiuszok közötti különbségnek.

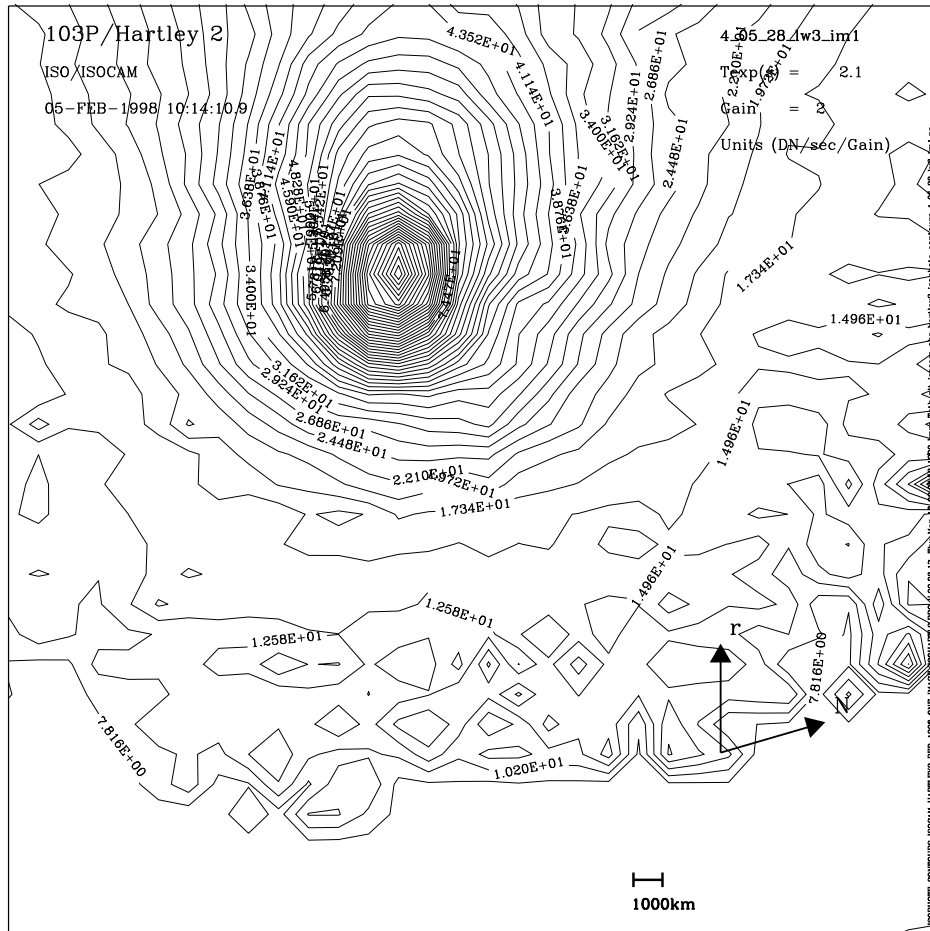
Mintegy 21 órán át 6 HST keringés alatt B, V és R szűrőkkel megfigyelve R-ben sikerült egy nem teljes fénygörbét felvenni az ismeretlen tengelykörüli forgásidejű magtöredékről aminek valószínű rotációs periódusa 3,5–4 óra között lehet. A a 73P-C magtöredék HST-vel 2006-ban megfigyelt rész-fénygörbéje a 34. ábrán tekinthető meg. A HST megfigyelésekből kapott periódust egyébként a a HCN molekula szub-milliméteres rádió megfigyelései is megerősítik (Drahus és mások 2007).

A magtöredék test alakját egy $a > b = c$ félnagy tengelyű 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). A 2006-os HST megfigyelések csak töredék fénygörbét adtak, ezért a C magtöredék forgási periódusa ma

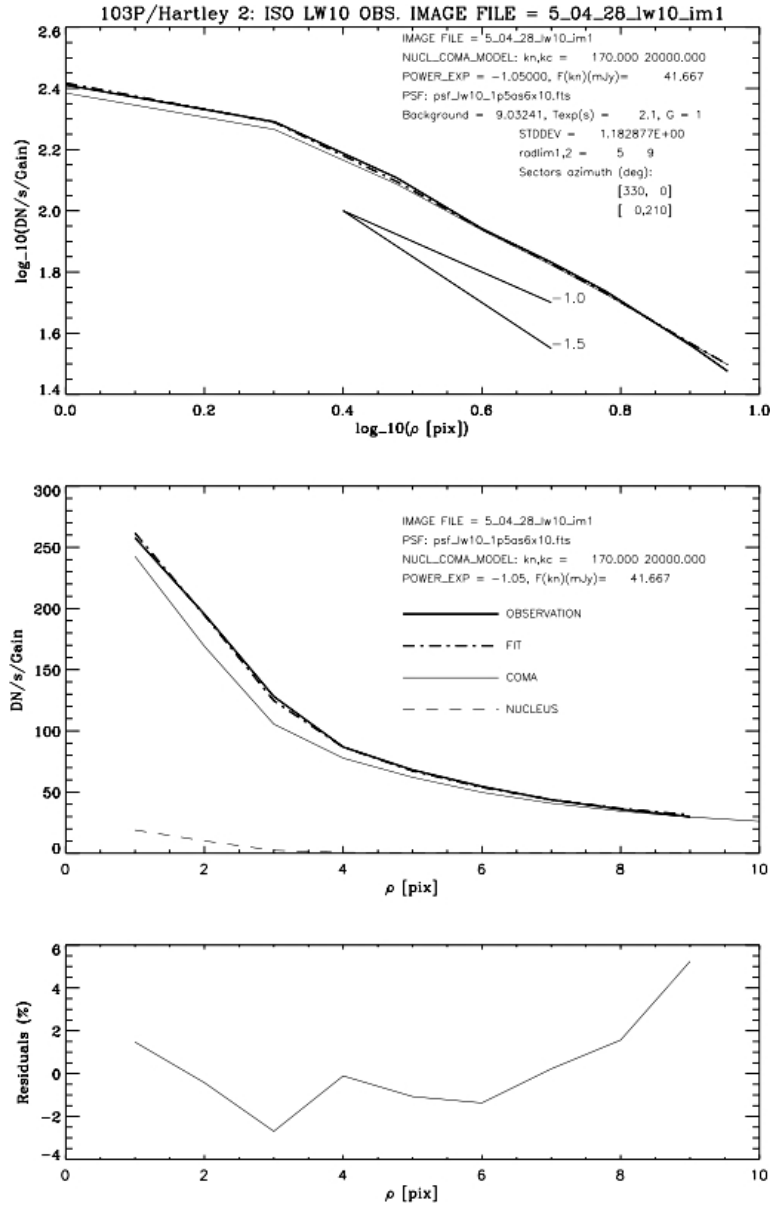


36. ábra. A 73P-C/Schwassmann-Wachmann 3 üstökösmagtöredék elhelyezkedése a $(V - R)$, $((B - V))$ kétszíndiagramon ekliptikai üstökösmagok környezetében. Az ekliptikai üstökösmagok közepes színindexeit is feltünteti az ábra. A 73P-C üstökösmagtöredék helyzete jelentősen eltér az ekliptikai üstökösök zömétől a diagramon és csak néhány ekliptikai üstökössel mutat hasonlóságot a színindexekben: 45P/HMP, 86P/Wild 3, 106P/Schuster üstökösökkel. A vörösedési vonal, valamint a Nap helyzete (☉) is fel van tüntetve (kép: a szerző által készített ábra és Toth és mások 2006, 2008).

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. Tehát a C magtöredék alakját és forgómozgásának jellemző paramétereit ma még nem ismerjük és a jövőben ezek meghatározására van lehetőség a rövid keringési idejű üstökös jövőbeli visszatérései alkalmával. 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. A modellek részleteit 12. fejezetben ismertetem (l. még Toth & Lisse 2006). Azt találtam, hogy a magtöredék a gyors forgása ellenére még stabil a forgás miatt bekövetkező szétesés ellen, de a felszínéről anyagdarabok válhatnak le (Toth és mások 2006, 2008; Toth & Lisse 2010). A 73P-C magtöredék túl gyors tengelykörüli forgása miatt bekövetkező szétesés elleni stabilitását mutatja a 35. ábra (Toth és mások 2006, 2008; Toth & Lisse 2010). A 2006-os HST megfigyelések idején 1,26 CsE naptávolságban C magtöredék másodpercenkénti porkibocsátása 40 kg volt Newburn & Spinrad (1985) és Singh és mások (1992) modellje alapján, illetve 50 kg a Weaver és mások (1981) modelljéből, ez utóbbi esetén mintegy 3 mikron rádiuszú porszemcsékre (a számításokban a víz kibocsátásra $5,9 \times 10^{27}$ molekula s^{-1} mért értéket vettem figyelembe Blake és mások (2006) közeli infravörös tartományban végzett megfigyelései alapján.



37. ábra. A NASA DIXI/EPOXI programja Deep Impact űrszondája második cél-
üstökösének, a 103P/Hartley 2 ekliptikai üstökösnek izofótái az ISO ISOCAM LW10 szűrővel
10 mikronon az 1998. február 5-én történt megfigyelése alapján. A nyílak a nappal ellentett
irányt (**r**), és az égi ekvatoriális északi irányt (**N**) jelzik (kép: a szerző által készített ábra,
l. még Groussin és mások 2004).



38. ábra. A 103P/Hartley 2 üstökös magja és porkómája termális infravörös fényének szátválasztásának eredménye: az azimutálisan átlagolt radiális profilok a megfigyelt profilhoz a modell profil illesztés minőségét mutatják. A felső panelen a fényességprofilok jelölése: megfigyelt profil (folytonos vastag vonal), mag (szaggatott vonal), kóma (folytonos vékony vonal), modell (szaggatott-pont-vonal). A vízszintes tengelyen a képsíkban pixelekben mért radiális távolság tízesalapú logaritmus, a függőleges tengelyen a pixelek mért fényességértékei (DN/s) tízesalapú logaritmus van feltüntetve. A középső panel a felső panel lineáris skálázással ábrázolva. Az alsó panelen a reziduálok szemléltethetők (mindkét tengelyen a skála lineáris) (kép: a szerző által készített ábra, l. még Groussin és mások 2004).

A 2006-os HST fotometriából a C magtöredék színindexeit is meghatároztam: $(B - V) = 1,16 \pm 0,20$ és $(V - R) = 0,57 \pm 0,11$, ami azt mutatja, hogy a kétszín diagramon kissé kívül esik az ekliptikai üstökösök fő trendjétől, de néhány ekliptikai üstököséhez, mint például a 45P/Honda-Mrkos-Pajdusakova és 106P/Schuster üstökös magjához hasonló a színe. A 2001-es és 2006-os HST képfelvételeken C magtöredéken kívül más, kisebb magtöredékeket nem találtam. Mivel a C magtöredék az eredeti mag tömegének mintegy 25%-a, a fennmaradó 75% a többi magtöredékben, illetve nem észlelhető kisebb magtöredékek formájában maradt fenn, amelyek mintegy 200 méternél kisebb sugarúak lehetnek csak (a detektálási határ figyelembevételével). Felvetettem, 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.

6.1.9. 103P/Hartley 2

A 103P/Hartley 2 üstökös a NASA Deep Impact űrszonda kiterjesztett DIXI/EPOXI²⁷ programjának cél-üstököse. Az üstökös közvetlen közelében elrepülve a Deep Impact/EPOXI űrszonda sikeresen végrehajtotta tudományos megfigyelési és adatgyűjtési programját 2010-ben.

A 103P üstököst termális infravörösben az ISO által végzett megfigyelésekben is részt vettem az üstökös mag és az infravörösben fényes porkóma fényének az általam kifejlesztett módszer alkalmazásával történő szétválasztásában és mag méretének meghatározásában. A 103P magjának és magközeli porkómájának infravörös izofótáit a 37. ábra mutatja. Az üstökös mag és porkóma fényének szétválasztásának eredményét a 38. ábra szemlélteti. Az ISO ISOCAM műszerével a 11,5 mikronon megfigyeltük az üstökös mag termális fluxusát (hősugárzását) és az előzetes eredmények mag rádiuszára 1,58 km-t kaptunk (Jorda és mások 2000), majd ezt javítva $0,71 \pm 0,13$ km lett a végleges eredmény (Groussin és mások 2004).

A mag ISOCAM mérete összeegyeztethető a látható fénytartományban végzett földi megfigyelések által megadott rádiusz felső határokkal: 5,3 km (Licandro és mások 2000) és 5,8 km (Lowry és mások 2003).

6.2. A HST 8. megfigyelési ciklusa: 13 ekliptikai üstökös megfigyelése

Az aktív, kómával rendelkező üstökösök magjának a HST-vel történt első sikeres közvetlen detektálásán és a mag méretének, több esetben közelítő alakjának, színének, esetenként a termális infravörösben végzett megfigyelésekből az albedójának a meghatározására alapozva új, nagyobb szabású üstökös megfigyelési programot kezdtünk el. A megfigyelési program megvalósítására a HST nyolcadik megfigyelési ciklusa keretében (Cycle 8) 1999 júliusa és 2000 júniusa között került sor a javított Bolygókamera 2 (PC2) alkalmazásával. A program célja az ekliptikai üstökösök és főleg azok magja fizikai tulajdonságainak a megismerése egy nagyszámú objektumot tartalmazó mintára. Ennek a programnak a sikeres befejezése után pedig újabb, szintén nagyszámú üstökösre kiterjesztve a HST-vel való, földi légkörön túli megfigyeléseket az üstökös magokra és a kómákra pontos fotometria adatokat kaphatunk. Ezután pedig így nagyszámú

²⁷EPOXI = EPO(Ch) + (DI)XI, ahol EPOCh = Extrasolar Planet Observing Program, illetve DIXI = Deep Impact eXtended Investigation.

objektumra statisztikailag megbízható mintát kaphatunk főleg az üstökösök méretére, az ekliptikai üstökösök méreteloszlásának meghatározása céljából.

Az ebben a ciklusban (HST Cycle 8) történt üstökös-megfigyeléseknek az a sajátossága, hogy csak egy HST keringésen belüli (egy "vizit") egyszeri (snapshot) észlelésekről és nem fénygörbe megfigyelésekről van szó. Ennek következtében sem az üstökösök tengely körüli forgás idejét, sem pedig a fénygörbe minimuma, maximuma alapján meghatározható minimális, illetve maximális látszó keresztmetszetet nem lehetett kiszámítani, és így a (prolate) ellipszoid modell tengelyarányát sem ismerjük, vagyis a testek alakját, elnyúltságuk minimális értékére sem tudtunk becslést adni. Az egyedi (snapshot) megfigyelési programnak az elsődleges célja az üstökösök effektív rádiuszának meghatározása egy adott tengely körüli forgási fázisban. Elsősorban tehát az üstökösök addig teljesen ismeretlen méretéről való első ismeretszerzés volt a cél ebben a HST megfigyelési ciklusban. A megfigyelési programba felvett mind a 13 üstökösnek a magja detektálható volt és az effektív rádiuszukat meghatároztam a geometriai albedó és fázisfüggvény feltételezésével. Azokra az üstökösökre, amelyekről legalább két színszűrővel történtek megfigyelések, a megfelelő színindexeket (pl. $(V - R)$, $(B - V)$, $(R - I)$) is meghatároztam. A HST nyolcadik ciklusában megfigyelt üstökösöket, a megfigyelés geometriai körülményeit, az alkalmazott fotometriai szűrőket, valamint az üstökös távolságába vetített PC2 CCD képelem méretét a 3. táblázat foglalja össze. leírt módszerek alkalmazásával történt. Minden HST képet az Űrteleszkóp Tudományos Kutatóintézet Adatfeldolgozó Rendszere (Space Telescope Science Institute, STScI, Data Processing System) által történt előfeldolgozás után kerültek

3. táblázat. A HST-vel 1999-2000 között (Cycle 8) megfigyelt 13 üstökös

Üstökös	Dátum (UT)	Szűrők	r_h (CsE)	Δ (CsE)	α (°)	Skála (km/pix)
4P/Faye	2000 febr. 07,618	V, R	2,956	1,998	5,6	66,0
10P/Tempel 2	1999 jún. 23,432	B, V, R, I	1,669	0,681	12,8	22,5
17P/Holmes	1999 jún. 15,527	V, R	3,116	2,176	8,5	71,8
37P/Forbes	1999 okt. 29,326	V, R, I	2,270	1,389	14,8	45,8
44P/Reinmuth 2	2000 jún. 12,638	V, R	2,727	1,732	5,3	57,2
50P/Arend	2000 jan. 11,854	V, R, I	2,374	1,468	11,8	48,4
59P/Kearns-Kwee	2000 jan. 15,542	V, R, I	2,516	1,539	3,3	50,8
63P/Wild 1	2000 ápr. 22,212	V, R, I	2,266	1,299	9,2	42,9
71P/Clark	2000 már. 12,701	V, R	2,715	1,764	7,5	58,2
84P/Giclas	2000 jan. 13,444	V, R	2,209	1,368	16,9	45,2
106P/Schuster	1999 okt. 18,708	B, V, R, I	1,666	0,780	23,0	25,8
112P/Urata-Nijima	1999 szept. 08,618	V, R	2,296	1,501	19,2	49,5
114P/Wiseman-Skiff	2000 jan. 14,444	B, V, R, I	1,569	0,836	33,2	27,6

Dátum: a megfigyelési időintervallum közepe (HST orbit, "vizit") UT-ben.

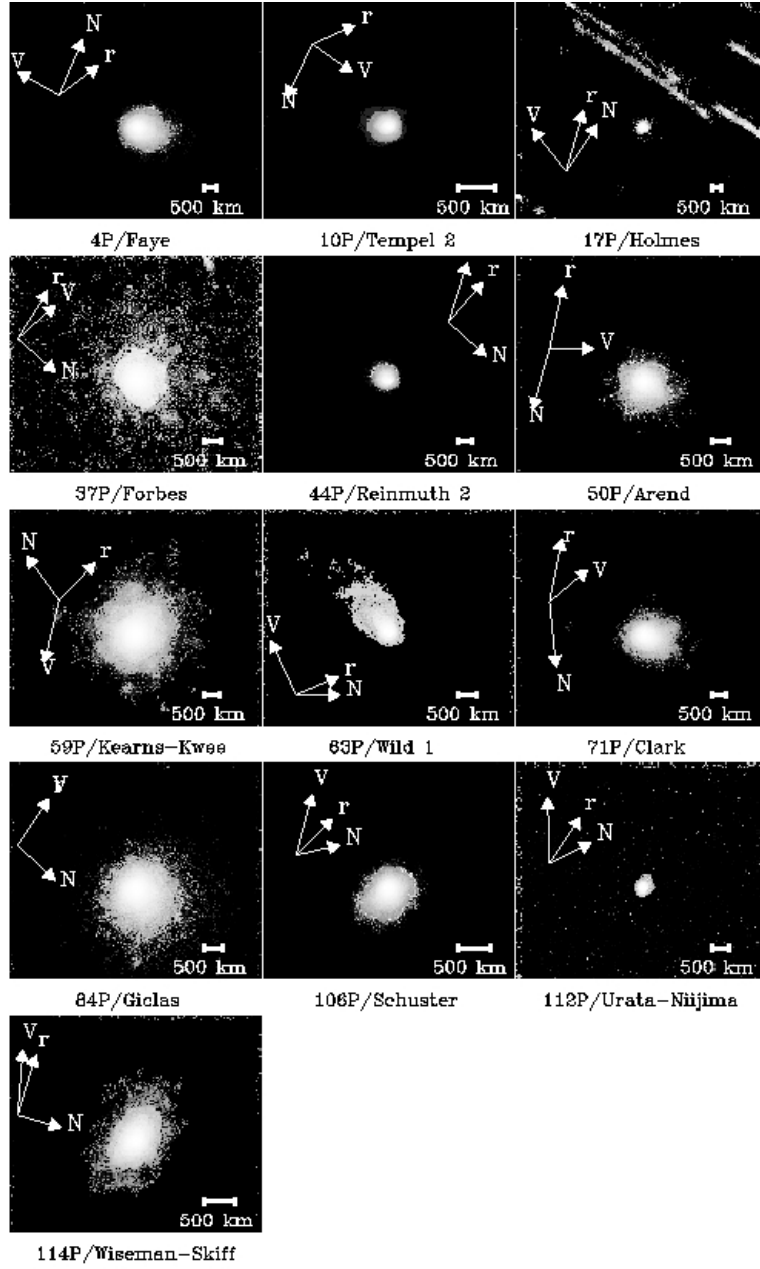
HST fotometriai szűrők: $(B, V, R, I) = (F439W, F555W, F675W, F814W)$.

r_h : Naptól való távolság.

Δ : földtávolság (az objektum nagyon távol van, ezért nem kell a HST-től mért távolság)

α : Nap fázisszög (Nap-üstökös-megfigyelő szög).

Skála: az üstökös távolságában egy HST PC2 képelem (pixel) mérete (km).



39. ábra. A HST nyolcadik megfigyelési ciklusa (Cycle 8) alatt 1999 július – 2000 június között megfigyelt 13 ekliptikai üstökös. A mozaik-kockák mindegyike egy-egy üstököst mutat az eredeti CCD felvételtől az üstökös környezetét kiemelve. A felvételek idején a HST az üstökös látszó mozgását követte. Így például a 17P/Holmes üstökösénél látható csíkok a hosszú expozíciós idő miatt vonallá húzódtott háttérsillagok nyomai. A nyilak a következő vektorok képsíkba eső vetületei: N égi egyenlítői koordinátarendszer északi iránya, r a Nap-üstökös rádiuszvektor iránya és V az üstökös napköri keringő mozgása (heliocentrikus) sebességvektorának ellentettje. A képsíkban a méretskála (km) is fel van tüntetve (l. még a 49. ábrát a HST nyolcadik ciklusa (Cycle 9) 2000-2001-ben megfigyelt üstökösökről (kép: a szerző által készített ábra, l. még Lamy és mások 2009).

a tudományos projekt felhasználóihoz.

A megfigyelt képeken az üstökös mag és kóma fényének szétválasztása, illetve az üstökös mag fotometriájának (fényesség és színindexek) meghatározása az 5.2. fejezetben leírt módszerek alkalmazásával, az 5.4. pont figyelembe vételével történt.

6.2.1. 4P/Faye

Ezt az üstököszt a HST nyolcadik megfigyelési ciklusában is megfigyeltem és a magjának méretét pontosabban sikerült meghatározni az üstökös korábbi, 1991-es HST WFPC1 megfigyeléseihez képest. A régi és új megfigyelések és a kapott mag rádiuszok összehasonlítása a 6.1.1. pontban található (1. még 4. táblázat).

6.2.2. 10P/Tempel 2

Ez egy viszonylag fényes üstökös: kómája aktív és fényes üstökös volt a HST megfigyelés idején. Az üstökös kóma fényességének lefutása $1/\rho$ szerinti, ahol ρ a képsíkban mért távolság az üstökös magtól. A kóma fényességjáruléka könnyen figyelembe vehető és a mag fénye szétválasztható az aktív kómától. Az F675 szűrővel készült képekből meghatározott mag rádiusz átlaga $4,63 \pm 0,03$ km. Tehát a 10P üstökösnek igen nagy méretű magja van és egyik legnagyobb az eddig ismert ekliptikai üstökösök között (48. ábra). A mag színindexei pedig $(B - V) = 0,80 \pm 0,02$, $(V - R) = 0,49 \pm 0,03$ és $(R - I) = 0,52 \pm 0,03$ (4. táblázat).

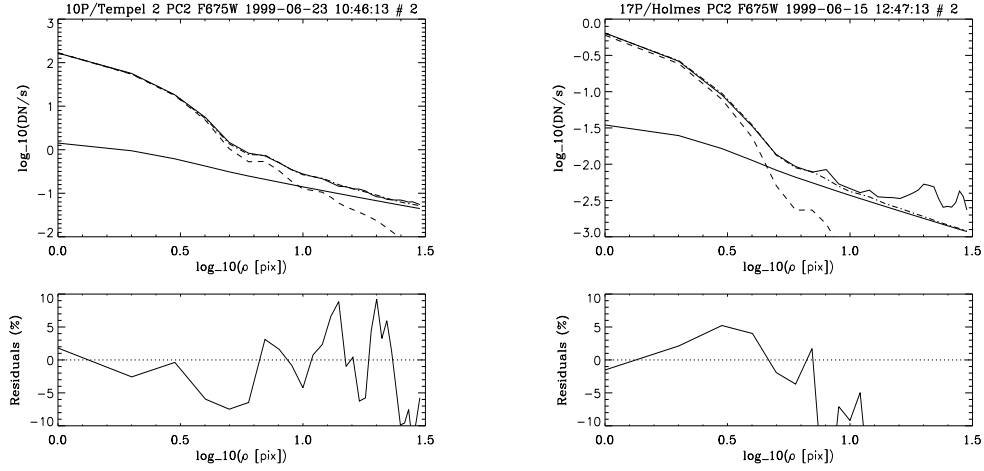
A 10P üstökös magját infravörösben sikerült megfigyelni napközben (A'Hearn és mások 1989) és az infravörös fotometriai eredményeket ki lehetett egészíteni a látható fénytartományban kapott fotometriai eredményekkel. Ugyanis az üstökös közel az afféliumához nagy naptávolságban is Földi teleszkóppal CCD fotometriai megfigyeléseket végeztek (Jewitt & Luu 1989), amikor csak halvány kómája volt és a mag fényét el tudták választani a kómától. Ezekből a megfigyelésekből egy (prolate) ellipszoid mag-modellt feltételezve ennek félnagyengelyeire $a = 8 - 3,15$ km, $b = c = 4 - 4,3$ km-t adtak meg és a mag geometriai albedója R-ben $0,024 \pm 0,005$. A mag látszó keresztmetszetéből az effektív rádiuszára $5,7 - 5,9$ km-t, az effektív térfogatból pedig $r_{n,v} = 5,0 - 5,3$ km-t. Ezt átskálázva a HST megfigyeléseknél figyelembe vett $0,04$ geometriai albedó helyett az újabb $0,024$ értékre, a 10P magjának effektív rádiuszára $r_n = 5,98 \pm 0,04$ km-t kaptam, ami jól egyezik a földi megfigyelésekből kapott rádiusszal. Ez megerősíti Lowry & Weissman (2003) azon megállapítását, hogy az egyszeri (snapshot) megfigyelések rendszerint jó becslést adnak az üstökös magok effektív rádiuszára.

Későbbi infravörös megfigyelésekből (Campins & Fernández 2000) meghatározott rádiusz is a fentiekkel egyezik. Több egyszeri (snapshot) megfigyelés is történt, amelyekből kapott rádiusz értékeket a $0,024$ geometriai albedóra átskálázva a következő eredményeket kapjuk: $5,9$ km (Mueller 1992), $6,4$ km (Meech és mások 2004) végül $5,2$ km, amelynél $0,022$ albedót vett figyelembe Mueller & Ferrin (1996). A Tancredi és mások (2006) által adott rádiusz még $0,024$ albedó figyelembevételével sem egyezik a földimogyoró és HST megfigyelésekből kapott értékekkel.

A 10P magjának forgási idejét ma még nem ismerjük: Jewitt & Luu (1989), valamint A'Hearn és mások (1989) ~ 9 órát becsültek.

6.2.3. 17P/Holmes

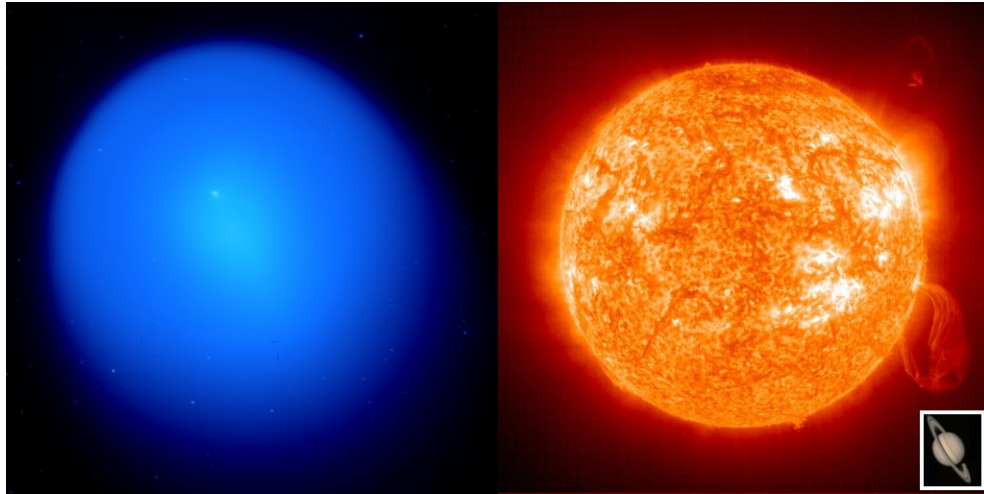
A 17P üstökös 2000 június 11-én került napközbe és még 1999 június 15-én a Naphoz közeledő pályaszakaszán $3,12$ CsE naptávolságban és $2,18$ CsE földtávolságban $8,5^\circ$



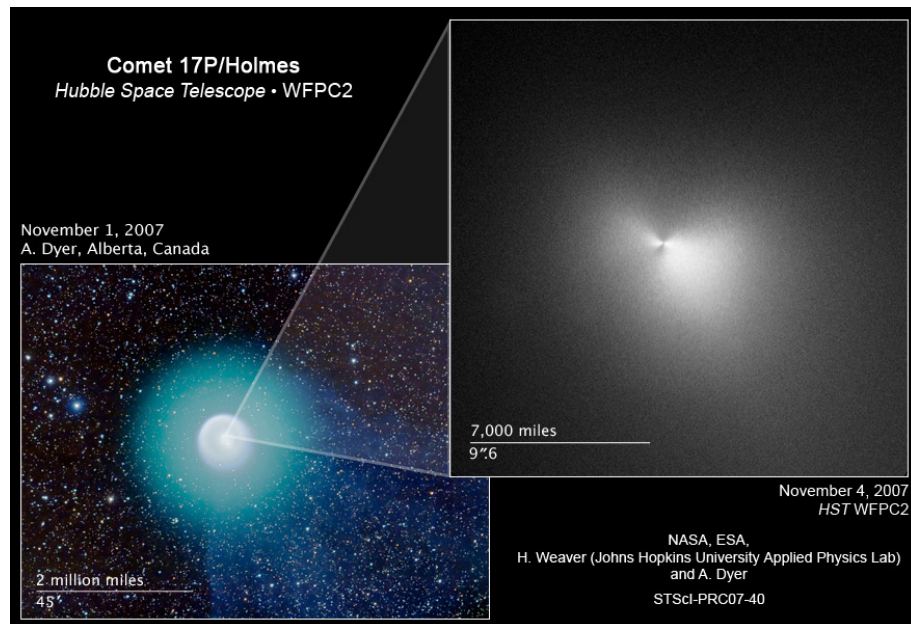
40. ábra. Üstökös modell radiális fényességprofil illesztése a megfigyelt radiális fényességprofilhoz a HST nyolcadik megfigyelési ciklusa (Cycle 8) alatt a PC2 műszerrel megfigyelt üstökösökre: 10P/Tempel 2 (balra) és 17P/Holmes üstökös (jobbra). A felső paneleken a fényességprofilok jelölése: megfigyelt profil (folytonos vastag vonal), mag (szaggatott vonal), kóma (folytonos vékony vonal), modell (szaggatott-pont-vonal). Az alsó paneleken a folytonos görbe vonal a reziduálokat jelöli a megfigyelt-modell eltérést a megfigyelt jel százalékában. A nulla százalékot folytonos vízszintes vonal jelzi. A vízszintes tengelyen a képsíkban pixelekből mért radiális távolság tízesalapú logaritmusa, a függőleges tengelyen a pixelekből mért fényességértékei (DN/s) tízesalapú logaritmusa van feltüntetve (kép: a szerző által készített ábra, l. még Lamy és mások 2009).

fázisszögnél történt egyszeri (snapshot) megfigyelése a HST PC2 műszerével. A kómája kanonikus volt ($p = -1$) és a halvány kómának köszönhetően az üstökös mag fénye igen jó kontraszttal elkülíthető volt a kómától. A HST PC2 F675W (R) szűrőjével készült képek elemzéséből a mag rádiuszára $1,71 \pm 0,07$ km a színindexére $(V - R) = 0,56 \pm 0,02$ adódott.

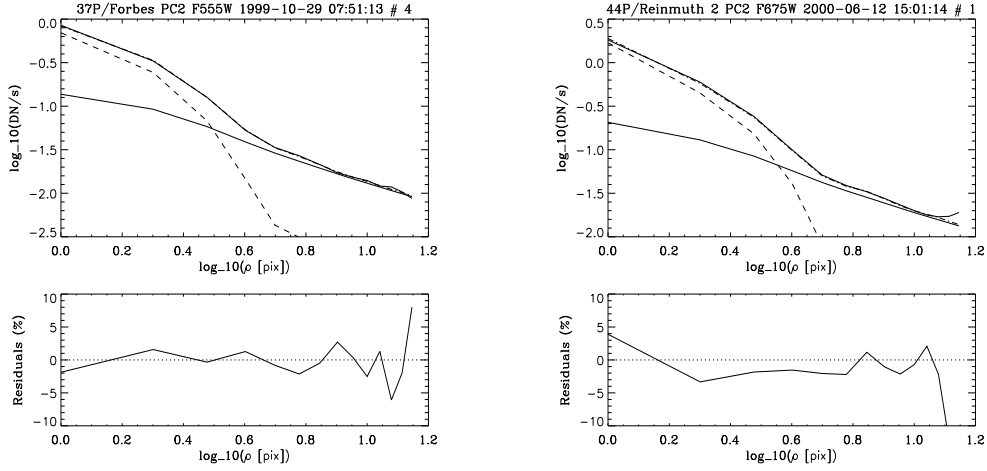
Az üstökös kutatás történetében addig egyedülálló módon a 17P/Holmes üstökös váratlanul és rövid idő alatt egy napon belül 15,5 magnitúdóval, vagyis a kitörés előtti fényességének mintegy egymilliószorosára fényesedett ki 2007 október 24-én amit a szakirodalomban szuperkitörésnek, illetve megakitörésnek is neveznek (Buzzi és mások 2007). Ekkor az eredeti 17 magnitúdóról mintegy 1,5 magnitúdóra fényesedett fel, vagyis néhány óra alatt szabadszemmel is jól megfigyelhetővé vált ez az ekliptikai üstökös. A HST tizenhatodik megfigyelési időszakában (Cycle 16, 2007. július 1.–2008. június 30.) a HST PC2 műszerével rendkívüli teleszkópidőben (DD) ismét megfigyeltük a kitörésben levő 17P/Holmes üstökös magját (Weaver HST Proposal 11418) és a mag effektív rádiuszára 1,7 km adódott. A méret meghatározás ellenőrzésében e sorok írója is részt vett (Weaver és mások 2007: STScI PR-2007-40, 2007 november 15.). A HST 2007-es megfigyelései szerint a 17P üstökös magjának effektív rádiusza 0,02 km hibahararon belül megegyezik az 1999-ben meghatározott értékkel. Továbbá a 2007-es szuperkitörés után a HST-vel nem látszott vele összemérhető méretű magtöredék, vagyis az üstökös magja nem esett szét a kitörés során. Időben a legutolsó HST megfigyelésig, 2007. november 4-ig és más megfigyelések sem mutattak nagy méretű magtöredékeket csak kisebb, porméretű meteoritikus anyagot, illetve meteoroid darabokat.



41. ábra. A 2007. október 24-én szuperkitörésen átesett 17P/Holmes ekliptikai üstökös (balra) kómájának mérete a kitörést követő két héten belül már a Nap átmérőjét is meghaladta (jobbra), tehát bőven nagyobb volt egymillió kilométernél. A felvétel 2007. november 9-én készült a Hawaii-szigeteken lévő Mauna Kea csúcsán lévő 3,6 méteres CFHT (Canadian French Hawaii Telescope) távcsővel. Összehasonlításként a Nap a SOHO napfizikai űrobszervatórium LASCO koronográfjával készült felvétel látható, illetve a jobb alsó sarokban a Szaturnusz méretarányos képe érzékelteti a méret-skálát (forrás: D. Jewitt és R. Stevenson, Hawaii Egyetem, valamint NASA Voyager, illetve NASA, NRL, LAM/CNRS SOHO/LASCO).



42. ábra. A 2007. október 24-én szuperkitörésen átesett 17P/Holmes ekliptikai üstökös Hubble Űrteleszkóppal 2007. november 4-én készült képfelvétele (jobbra). Összehasonlításként egy földi amatőr csillagászati asztrofotó látható a bal oldali képen (forrás: Weaver és mások STScI-2007-40, 2007. november 15., NASA STScI, ESA).



43. ábra. Üstökös modell radiális fényességprofil illesztése a megfigyelt radiális fényességprofilhoz a HST nyolcadik megfigyelési ciklusa (Cycle 8) alatt a PC2 műszerrel megfigyelt üstökösökre: 37P/Forbes (balra) és 44P/Reinmuth 2 üstökös (jobbra). A részleteket illetően l. a 40. ábra aláírást (kép: a szerző által készített ábra, l. még Lamy és mások 2009).

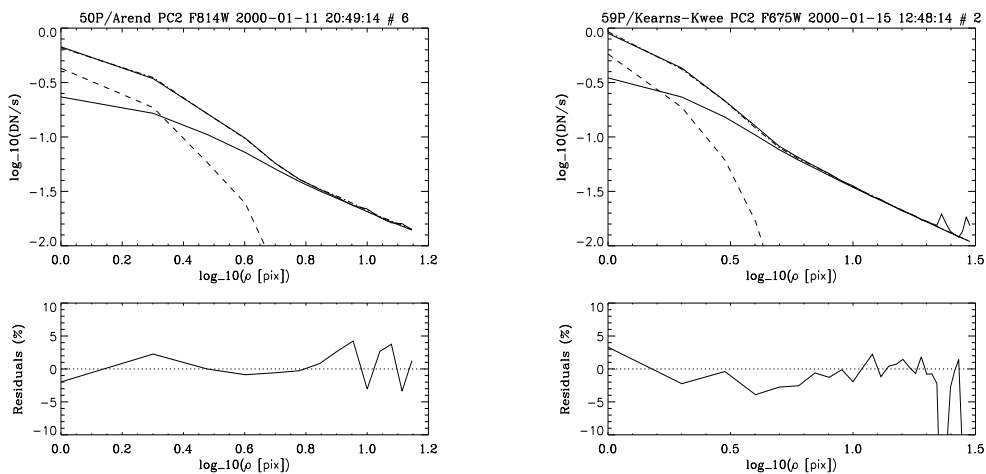
6.2.4. 37P/Forbes

A 37P üstökös az 1999 október 29-én készült HST PC2 megfigyelések idején a Naptól 2,27 CsE-re a Földtől pedig 1,39 CsE távolságban és $14,8^\circ$ fázisszögnél volt. A megfigyelésekre az üstökös napközelsége (1999 május 4-i) utáni pályaszakaszon került sor. A kóma radiális fényességprofilja kanonikua ($p = -1$).

Az üstökös magot jó kontrasztal sikerült elválasztani a kóma fényétől és a megfigyelt, valamint üstökös modell radiális fényességprofilok kitűnően illeszkednek. A HST PC2 F675W (R) szűrővel készült megfigyelésekből meghatározott mag rádiusz $0,81 \pm 0,04$ km. Az F814W (I) szűrővel készült megfigyeléseket is figyelembe véve a színindexek $(V - R) = 0,29 \pm 0,03$, illetve $(R - I) = 0,66 \pm 0,06$.

Licandro és mások (2000) nagy távcsővel 3,59 CsE naptávolságban készült megfigyelései szerint a 37P üstökösnek csillagszerű megjelenése és ebből arra következtettk, hogy már nincs körülötte kóma a nagy naptávolságban vagy pedig hatása a mag fényére elhanyagolható, tehát teljes egészében az üstökös magot figyelik meg (így írják le a megfigyelést: "bare nucleus", vagyis kóma nélküli mag²⁸). A mag effektív rádiuszára 1,1 km-t adnak meg, ami eltér a HST megfigyelésekből előbb említett értéktől, de a földi megfigyelések vagy tartalmazzák a mag körül esetleg meglévő halvány kómát vagy pedig az elnyúlt alakú üstökös magot más forgási fázisát, más látszó keresztmetszetét figyelték meg a Földről. A tengelykörüli forgást végző üstökös mag megfigyelhető látszó keresztmetszetének két szélső értékét feltételezve, vagyis azt feltételezve, hogy a HST-vel a minimális, a földi megfigyelések idején pedig a maximális látszó keresztmetszetet láttuk, a (prolate) ellipszoid alakú testet feltételezve a félnagy tengelyekre $a = 1,38$ km és $b = c = 0,8$ km adódik, illetve az a/b tengelyarányra 1,73.

²⁸A "bare" angol szó jelentése kopasz, csupasz, borítás nélküli. A "bare nucleus" szokásos kifejezés az asztrofizikában.



44. ábra. Üstökös modell radiális fényességprofil illesztése a megfigyelt radiális fényességprofilhoz a HST nyolcadik megfigyelési ciklusa (Cycle 8) alatt a PC2 műszerrel megfigyelt üstökösökre: 50P/Arend (balra) és 59P/Kearns-Kwee üstökös (jobbra). A részleteket illetően l. a 40. ábra aláírást (kép: a szerző által készített ábra, l. még Lamy és mások 2009).

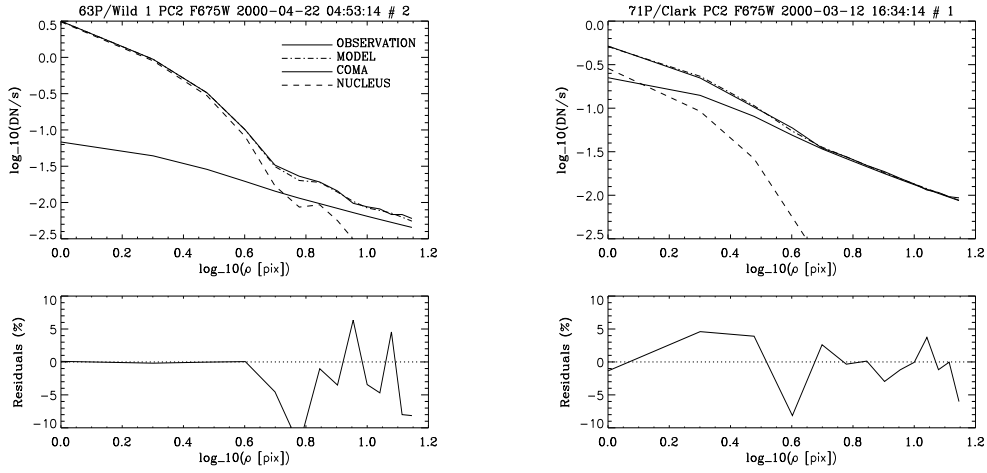
6.2.5. 44P/Reinmuth 2

A 44P üstökös a 2000 június 12-én végzett HST PC2 megfigyelések idején a napközelsége előtti pályaszakaszán 2,73 CsE naptávolságban, 1,73 CsE földtávolságban és $5,3^\circ$ fázisszögnél volt (perihéliumátmenete 2001 február 19-én következett be).

A kóma kanonikus volt ($p = -1$) és az üstökös mag fényét jó kontraszttal lehetett elválasztani a kómától. A HST PC2 F675W (R) szűrővel egy HST keringés alatt készült (snapshot) képfelvételekből a mag effektív rádiuszára $1,61 \pm 0,07$ km adódott. A HST F555W (V) szűrővel készült megfigyeléseket is figyelembe véve az üstökös mag színindexe $(V - R) = 0,62 \pm 0,08$. A látható fénytartományban készült földi megfigyelésekből Lowry és mások (2003) a mag rádiuszának felső határára 3,1 km-t adott meg, ami összeegyeztethető a HST megfigyelésekből meghatározott effektív rádiusszal.

6.2.6. 50P/Arend

Az 50P üstökös a 2000 január 11-én készült HST PC2 megfigyelések idején már a Naptól távolodó pályaszakaszán 2,37 CsE naptávolságban és 1,47 CsE földtávolságban és $11,8^\circ$ fázisszögnél volt. Napközelségét 1999 augusztus 3-án érte el 1,93 CsE legkisebb távolságra a Naptól. A HST PC2 F555W (V), F675W (R) és F814W (I) szűrőivel egy HST keringés alatt készült (snapshot) megfigyelések a kanonikustól eltérő radiális fényességfutású kómát mutattak V-ben és I-ben: $p = -1,15$ (F555W) (V), $p = -1,10$ (F814W) (I), míg F675W (R-ben) kanonikus volt a kóma $p = -1,0$. A mag fénye közepes kontraszttal válik el a kómától. A HST PC2 F675W (R) megfigyelésekből az üstökös mag effektív rádiuszára $0,95 \pm 0,03$ km, a színindexekre pedig $(V - R) = 0,81 \pm 0,10$ és $(R - I) = 0,26 \pm 0,09$ adódott. A látható fénytartományban készített földi megfigyelésekből Lowry & Weissman (2003) az üstökös mag rádiuszának felső határára 5,16 km-t határozott meg, ami összeegyeztethető a HST megfigyelésekből meghatározott effektív rádiusszal.

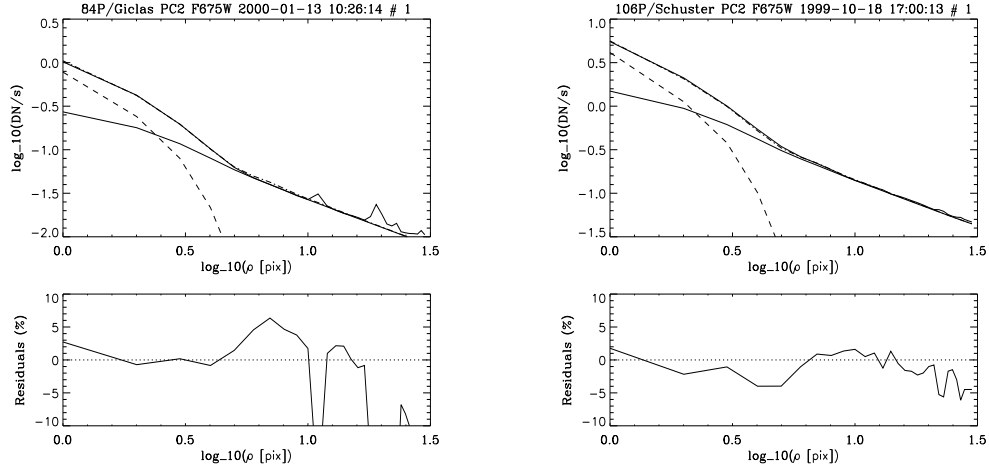


45. ábra. Üstökös modell radiális fényességprofil illesztése a megfigyelt radiális fényességprofilhoz a HST nyolcadik megfigyelési ciklusa (Cycle 8) alatt a PC2 műszerrel megfigyelt üstökösökre: 63P/Wild 1 (balra) és 71P/Clark üstökös (jobbra). A részleteket illetően l. a 40. ábra aláírást (kép: a szerző által készített ábra, l. még Lamy és mások 2009).

6.2.7. 59P/Kearns-Kwee

Az 59P üstökös a 2000 január 15-én készült HST PC2 megfigyelések idején már a Naptól távolodó pályaszakaszán $2,52$ CsE naptávolságban, $1,54$ CsE földtávolságban és $3,3^\circ$ fázisszögnél volt. Napközelségét 1999 szeptember 16-án érte el $2,34$ CsE legkisebb távolságra a Naptól. A kóma nagyon fényes volt és a radiális fényességprofilja lefutása kanonikus ($p = -1$) volt. A kóma fényességjáruléka olyan nagy volt, hogy az üstökös mag fényét tartalmazó (fényességprofil-csúcs) PC2 CCD képelem fényességének 60% -át teszi ki, de a modell fényességprofil megfigyeléshez való illesztése egészen jó. A HST PC2 F675W (R) szűrővel készült megfigyelésekből meghatározott mag rádiusz átlaga $0,79 \pm 0,03$ km. Azonban a megfigyelések idején a $3,3^\circ$ fázisszög kicsi ahhoz, hogy a lineáris fázisfüggvény közelítés érvényes legyen, ugyanis $\sim 5^\circ$ -nál kisebb fázisszögekre már az oppozíciós effektus hatása érvényesül. Ilyenkor a lineáris fázisfüggvény közelítésből kapott üstökös mag rádiuszt korrigálni kell a kis fázisszögekre érvényes fázisfüggvény figyelembe vételével. Ehhez a korrekcióhoz egy másik ekliptikai üstökösre, a 19P/Borrelly üstökösre földi és a NASA Deep Space 1 helyszíni űrszondája által meghatározott fázisfüggvényt (Li és mások 2007) érdemes figyelembe venni. A korrekció szerint az 59P magjának R fényessége $0,04$ magnitúdóval fényesebb, ami a rádiuszban mintegy $0,03$ km-t jelent, vagyis a fázisfüggvény oppozíciós effektussal korrigált rádiusz $0,76$ km lett. A HST PC2 F555W (V), F675W (R) és F814W (I) szűrőkkel történt megfigyelésekből az üstökös mag színindexei $(V - R) = 1,62 \pm 0,07$ és $(R - I) = 0,27 \pm 0,08$.

Ennek az üstökösnek a HST megfigyelése is jól példázza a légkörön túli (extrateresztikus) csillagászati megfigyeléseknek a jelentőségét még abban az esetben is, ha csak rövid ideig tartó, egy HST keringés alatt elvégzett (snapshot) megfigyelésekről van szó. Ugyanis az 59P üstökös $4,2$ CsE naptávolságban is aktív magját igen nehéz lett volna pontosan kifotometrálni földi megfigyelésekből, de a földi légkör zavaró hatásait kiküszöbölő HST, annak kitűnő optikája és PC2 kamerája ezt lehetővé tette.



46. ábra. Üstökös modell radiális fényességprofil illesztése a megfigyelt radiális fényességprofilhoz a HST nyolcadik megfigyelési ciklusa (Cycle 8) alatt a PC2 műszerrel megfigyelt üstökösökre: 84P/Giclas (balra) és 106P/Schuster üstökös (jobbra). A részleteket illetően l. a 40. ábra aláírást (kép: a szerző által készített ábra, l. még Lamy és mások 2009).

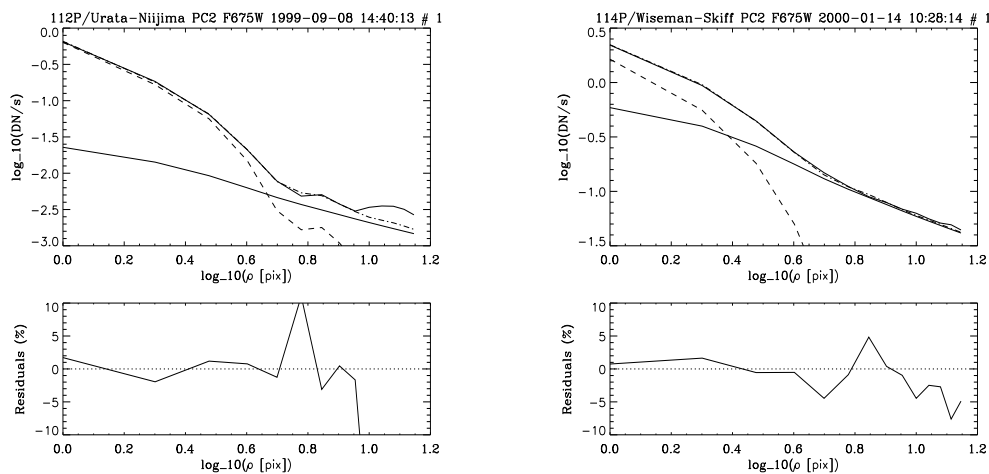
6.2.8. 63P/Wild 1

Az 63P üstökös a 2000 április 22-én készült HST PC2 megfigyelések idején már a Naptól távolodó pályaszakaszán 2,27 CsE naptávolságban, 1,30 CsE földtávolságban és $9,2^\circ$ fázisszögnél volt. Napközelségét 1999 december 27-én érte el 1,96 CsE legkisebb távolságra a Naptól. A 63P kómája nagyon halvány volt és a radiális fényességprofil lefutása kanonikus ($p = -1$). Az üstökös mag fényét kitűnő kontraszt mellett lehetett elválasztani a kómától és a modell radiális fényességprofil illesztése a megfigyelt profilhoz csaknem tökéletes. A HST PC2 F675W (R) szűrővel készült megfigyeléseiből meghatározott üstökös mag rádiuszok átlaga $1,46 \pm 0,03$ km. Az F555W (V), F675W (R) és F814W (I) szűrőkkel készült megfigyelésekből az üstökös mag színindexei $(V - R) = 0,50 \pm 0,05$ és $(R - I) = 0,42 \pm 0,04$.

Lowry & Fitzsimmons (2001) földi megfigyelései során az üstökös a detektálási limit alatt volt (túl halvány volt) és ennek alapján a mag rádiuszának felső határára 0,6 km-t adtak meg. Ez a méret a HST megfigyelésekből adódottal összevetve nagyon kis méret, hacsak nem tételezzük azt fel, hogy a földi megfigyelések idején a forgó üstökös mag a legkisebb látszó keresztmetszetével fordult a Föld felé, ami egy (prolate) ellipszoid alakú testet feltételezve valószínűtlenül nagy $a/b = 8$ vagy ennél is nagyobb félnagy tengely arányt jelentene, de ennyire elnyújtott alakú kis égitest nem valószínű. Mindenesetre egy biztos rádiusz meghatározás a HST megfigyelésekből ismert a 63P/Wild 1 üstökös magjára.

6.2.9. 71P/Clark

A 71P üstökös a 2000 március 12-én készült HST PC2 megfigyelések idején még a Naphoz közeledő pályaszakaszán 2,72 CsE naptávolságban, 1,76 CsE földtávolságban és $7,5^\circ$ fázisszögnél volt. Napközelségét 2000 december 2-án érte el 1,56 CsE legkisebb távolságra a Naptól. A 71P kómája nagyon fényes volt és radiális fényességprofil lefutása eltért a kanonikustól ($p = -1,17$). A HST nyolcadik megfigyelési ciklusa



47. ábra. Üstökös modell radiális fényességprofil illesztése a megfigyelt radiális fényességprofilhoz a HST nyolcadik megfigyelési ciklusa (Cycle 8) alatt a PC2 műszerrel megfigyelt üstökösökre: 112P/Urata-Nijima (balra) és 114P/Wiseman-Skiff üstökös (jobbra). A részleteket illetően l. a 40. ábra aláírást (kép: a szerző által készített ábra, l. még Lamy és mások 2009).

(Cycle 8) üstökösei közül a 71P üstökös esetében volt a legalacsonyabb a fényességkontraszt a mag és a kóma között (25% a magot tartalmazó képelem, csúcs-pixel fényességében). A HST PC2 F675W (R) képekből meghatározott mag rádiuszok átlaga alapján a 71P üstökös rádiusza $0,68 \pm 0,04$ km. Lowry & Fitzsimmons (2001) földi teleszkóppal nem detektálták az üstökösöt, amiből a mag rádiuszának felső határára $0,9$ km-t adtak meg és ez a HST megfigyeléssel összhangban van. Ehhez képest az üstökös naptávpontja közelében $4,67$ CsE naptávolságban készített megfigyelésekből Meech és mások (2004) a mag rádiuszára $1,31 \pm 0,04$ km-t adott meg. A látszó keresztmetszet legkisebb és legnagyobb értékeivel kapcsolatos rádiuszok (HST és Meech és mások 2004, rendre) figyelembevételével (prolate) ellipszoid alakmodell feltételezéssel a félnagy tengelyekre $a = 2,13$ km és $b = 0,75$ km adódik. Ebből a mag a/b tengelyarányának legalább $2,85$ -nek kell lenni, ami nagyon nagy, vagyis egy nagyon elnyújtott alakú testről lenne szó. Mindenesetre a feltehetően nagyon elnyújtott alakja miatt a 71P/Clark üstökös magja további megfigyelésre érdemes kis égitest az üstökösök világában. A HST PC2 F555W (V) és F675W (R) színszűrőkkel kapott megfigyelésekből a 71P üstökös magjának színindexe $(V - R) = 0,64 \pm 0,07$.

6.2.10. 84P/Giclas

A 84P üstökös a 2000 január 13-án készült HST PC2 megfigyelések idején már a Naptól távolodó pályaszakaszán $2,21$ CsE naptávolságban, $1,37$ CsE földtávolságban és $16,9^\circ$ fázisszögnél volt. Napközelségét 1999 augusztus 25-én érte el $1,85$ CsE legkisebb távolságra a Naptól. A 84P kómája radiális fényességprofil lefutása kanonikus volt ($p = -1$).

A mag fénye jó, mintegy 3-szoros kontraszttal különült el a kómától a magot tartalmazó képelem (csúcs-pixel) fényességeket figyelembe véve. A modell radiális fényességprofil illesztése a megfigyelt profilhoz csaknem tökéletes. A HST PC2 F675W (R) szűrővel készült megfigyeléseiből meghatározott rádiuszok átlaga $1,90 \pm 1,05$ km.

Az F555W (V) és F675W (R) szűrőkkel történt megfigyelésekből a 84P üstökös magjának színindexe $(V - R) = 0,32 \pm 0,03$.

6.2.11. 106P/Schuster

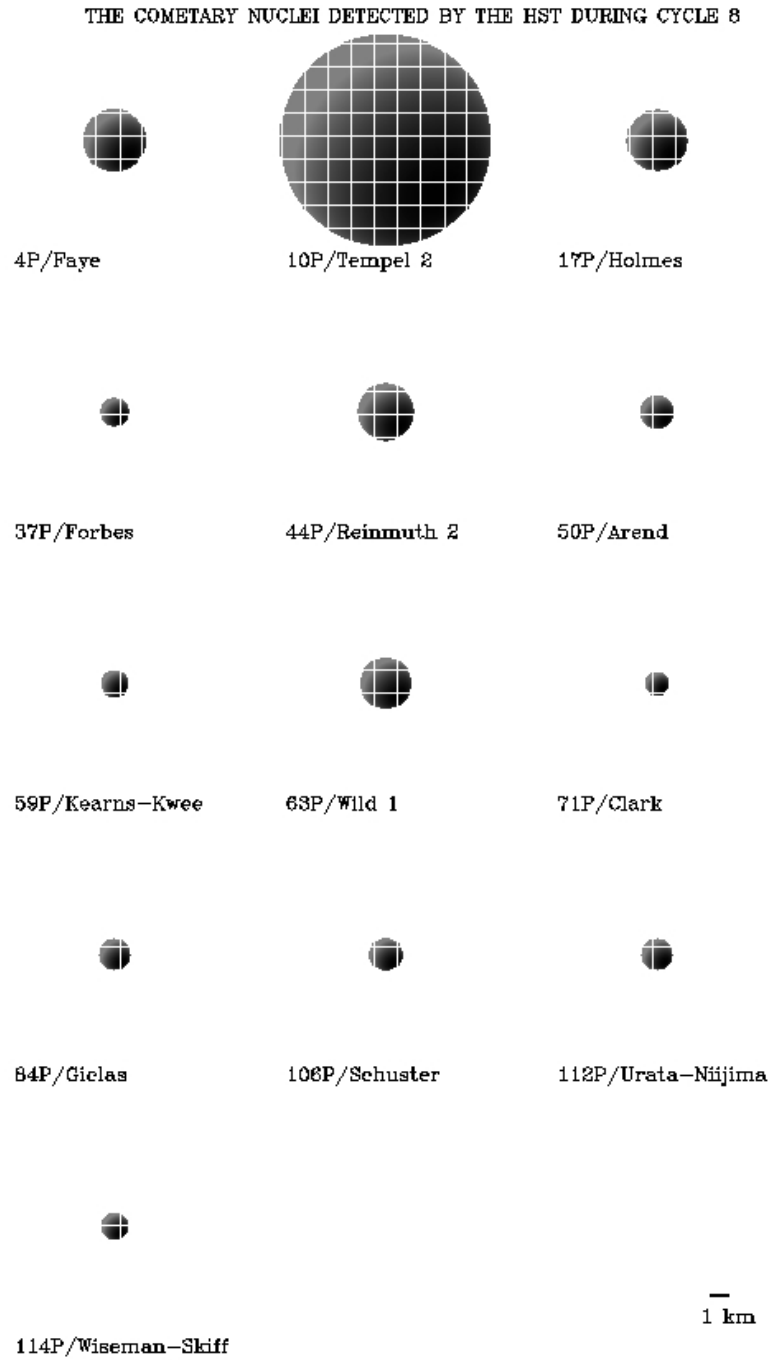
A 106P üstökös a 1999 október 18-án készült HST PC2 megfigyelések idején még a Naphoz közeledő pályaszakaszán 1,67 CsE naptávolságban, 0,78 CsE földtávolságban és $23,0^\circ$ fázisszögnél volt. Napközelségét 1999 december 16-án érte el 1,56 CsE legkisebb távolságra a Naptól. A kóma nagyon fényes volt és a radiális fényesséprofil lefutása kanonikus ($p = -1$). A mag fénye jó, mintegy 2,5-szeres kontraszttal különült el a kómáétól a magot tartalmazó képelem (csúcs-pixel) fényességeket figyelembe véve. A modell radiális fényesséprofil illesztése a megfigyelt profilhoz csaknem tökéletes. A HST PC2 F675W (R) szűrővel készült megfigyeléseiből meghatározott rádiuszok átlaga $0,94 \pm 0,05$ km. Mivel a HST PC2 F439W (B) kék szűrőjével is történtek megfigyelések, valamint az F555W (V), F675W (R) és F814W (I) szűrőkkel is ezért az üstökösmagnak a látható fénytartomány rövid, valamint hosszú hullámhosszhoz tartozó színindexeit is meg lehetett határozni: $(B - V) = 1,01 \pm 0,06$, $(V - R) = 0,52 \pm 0,06$ és $(R - I) = 0,45 \pm 0,06$.

6.2.12. 112P/Urata-Nijima

A 112P üstökös a 1999 szeptember 8-án készült HST PC2 megfigyelések idején még a Naphoz közeledő pályaszakaszán 2,30 CsE naptávolságban, 1,50 CsE földtávolságban és $19,2^\circ$ fázisszögnél volt. Napközelségét 2000 március 4-én érte el 1,46 CsE legkisebb távolságra a Naptól. A kóma nagyon halvány volt és a radiális fényesséprofil lefutása kanonikus ($p = -1$). A 106P üstökös nagyon halvány volt, de az alacsony jel ellenére a mag könnyen detektálható volt, fénye jól elkülöníthető a kómáétól mintegy 27-szeres – igen magas kontraszttal a magot tartalmazó képelem (csúcs-pixel) fényességeket figyelembe véve. A modell radiális fényesséprofil illesztése a megfigyelt profilhoz kitűnő. Egyébként a mag R-ben $20,96 \pm 0,04$ magnitúdójú volt a HST egy keringése során történt (snapshot) megfigyelések idején.

6.2.13. 114P/Wiseman-Skiff

A 114P üstökös a 2000 január 14-én készült HST PC2 megfigyelések idején már a Naptól távolodó pályaszakaszán 1,57 CsE naptávolságban, 0,84 CsE földtávolságban és $33,2^\circ$ fázisszögnél volt. Napközelségét 2000 január 11-én érte el 1,56 CsE legkisebb távolságra a Naptól néhány nappal a HST megfigyelések előtt. A 114P kómája radiális fényesséprofil lefutása kanonikus volt ($p = -1$). A mag fénye jó, mintegy 2,6-szoros kontraszttal különült el a kómáétól a magot tartalmazó képelem (csúcs-pixel) fényességeket figyelembe véve. A modell radiális fényesséprofil illesztése a megfigyelt profilhoz kitűnő. Mivel a HST PC2 F439W (B) kék szűrőjével is történtek megfigyelések, valamint az F555W (V), F675W (R) és F814W (I) szűrőkkel is ezért az üstökösmagnak a látható fénytartomány rövid, valamint hosszú hullámhosszhoz tartozó színindexeit is meg lehetett határozni: $(B - V) = 0,85 \pm 0,03$, $(V - R) = 0,46 \pm 0,02$ és $(R - I) = 0,54 \pm 0,02$.



48. ábra. A HST nyolcadik megfigyelési ciklusa (Cycle 8) alatt megfigyelt üstökösök méretarányos gömb-modelljei a megfigyelésekből meghatározott effektív rádiusz figyelembevételével. Az ábra érzékelteti, hogy ezek az üstökösök egymáshoz képest milyen méretűek (kép: a szerző által készített ábra, l. még Lamy és mások 2009).

4. táblázat. A 13 üstökös tulajdonságai (HST 8. megfigyelési ciklus)

Üstökös	R_{app} (mag)	r_n (km)	$(V - R)$	$(B - V)$	$(R - I)$
<i>Nap színindexei:</i>			0,35	0,65	0,28
4P/Faye	20,12±0,03	1,77±0,04	0,45±0,04	–	–
10P/Tempel 2	14,77±0,03	5,98±0,04*	0,49±0,03	0,80±0,02	0,52±0,03
17P/Holmes	20,61±0,04	1,71±0,07	0,56±0,02	–	–
37P/Forbes	20,83±0,04	0,81±0,04	0,29±0,03	–	0,66±0,06
44P/Reinmuth 2	19,83±0,05	1,61±0,07	0,62±0,08	–	–
50P/Arend	20,58±0,04	0,95±0,03	0,81±0,10	–	0,26±0,09
59P/Kearns–Kwee	20,86±0,05	0,79±0,03	0,62±0,07	–	0,27±0,08
63P/Wild 1	19,17±0,02	1,46±0,03	0,50±0,05	–	0,42±0,04
71P/Clark	21,83±0,07	0,68±0,04	0,64±0,07	–	–
84P/Giclas	20,59±0,04	0,90±0,05	0,32±0,03	–	–
106P/Schuster	18,91±0,03	0,94±0,03	0,52±0,06	1,01±0,06	0,45±0,06
112P/Urata–Nijima	20,96±0,04	0,90±0,05	0,53±0,04	–	–
114P/Wiseman–Skiff	19,73±0,04	0,78±0,05	0,46±0,02	0,85±0,03	0,54±0,02

R_{app} : a mag látszó fényessége R-ben Johnson–Kron–Cousins fotometriai rendszerben.

r_n : effektív rádiusz feltételezve, hogy $p_R = 0,04$, $\beta = 0,040$ mag/fok, kivétel: 10P/Tempel 2 ($V - R$), ($B - V$), ($R - I$): színindexek.

* felhasználva a $p_R = 0,024$ független mérést.

6.2.14. HST 8. megfigyelési ciklusa – rövid összegzés: üstökösök mérete, aktivitása, színe és a porkóma színe

A HST 8. megfigyelési ciklusában megfigyelt 13 üstökös méretét és színindexeit a 4. táblázat foglalja össze. Érdeklődéssel az üstökösöket egy méretskálán ábrázolva mutatja be a 48. ábra. Ebben a ciklusban megfigyeltek közül a legnagyobb magja a 10P/Tempel 2 üstökösnek volt ($r_n = 5,98$ km), a legkisebb pedig a 71P/Clark üstökösnek ($r_n = 0,68$ km) és hasonlóan még a 114P/Wiseman–Skiff üstökösnek van ($r_n = 0,78$ km).

A 4. táblázatból az is kiolvasható, hogy a Nap $(V - R)_\odot = 0,35$ magnitúdójú színindexéhez képest mennyire "vörösebbek" vagy "kékebbek" a megfigyelt üstökösök. Így például az 50P/Arend $(V - R) = 0,81 \pm 0,10$ mag színe "ultravörös"²⁹. A 37P/Forbes $(V - R) = 0,29 \pm 0,03$ mag színe pedig kissé "kék". Az égi mechanikai vizsgálatok szerint a transzneptun régióból Jupiter üstökös családjába nemrég átkerült 59P/Kearns–Kwee magja pedig ha nem is a legvörösebb, de elég vörös $(V - R) = 0,79 \pm 0,03$ mag, (l. még a 3.1 pontot és a 17. ábrát ugyanott). A 13 üstökösre a $(V - R)$ színindex átlaga $0,52 \pm 0,02$. Legutóbb az üstökösök HST megfigyeléseiből és földi nagy teleszkópokkal mások által kapott jó minőségű megfigyelésekből a $(V - R) > 0,54 \pm 0,03$ súlyozott középértéket határoztam meg (Lamy & Toth 2009), tehát a 13 üstökösre kapott átlagérték egy jóval nagyobb mintából meghatározott átlaggal jól egyezik, ami jelzi a HST üstökös-fotometria kiváló minőségét. Egyébként az

²⁹"Ultrared color" vagy "ultrared matter" elnevezést Jewitt (2002a) alkalmazta a primitív kis égitestek színére.

5. táblázat. 13 ekliptikai üstökös porkibocsátása és spektrális gradiense (HST 8. megfigyelési ciklusa)

Üstökös	r_h (AU)	Tipikus		Hiányos		S' (%/kÅ)	Megj.
		Q_{H_2O} (mol s ⁻¹)	Q_d (kg s ⁻¹)	Q_{H_2O} (mol s ⁻¹)	Q_d (kg s ⁻¹)		
4P/Faye	2,956 ^O	–	–	$2,2 \times 10^{26}$	0.8		
	1,604 ^I	–	–	$6,9 \times 10^{27*}$	127		L+96
	1,594 ^O	–	–	$6,9 \times 10^{27*}$	153		L+96
10P/Tempel 2	1,669 ^I	$1,8 \times 10^{27}$	2	–	–	12,4±2,9	
17P/Holmes	3,116 ^I	$1,4 \times 10^{27}$	4	$4,4 \times 10^{26}$	1		
37P/Forbes	2,270 ^O	$2,6 \times 10^{27}$	11	$8,1 \times 10^{26}$	4	16,1±3,0	
	2,06 ^I		$Q_d = 9,81$				NS85
44P/Reinmuth 2	2,727 ^I	$6,3 \times 10^{27}$	9	$1,9 \times 10^{27}$	3		
50P/Arend	2,374 ^O	$4,2 \times 10^{27}$	11	$1,3 \times 10^{27}$	4	9,3±3,3	
59P/Kearns-Kwee	2,516 ^O	$9,7 \times 10^{26}$	5	–	–	10,5±2,1	
	2,27 ^I		$Q_d = 24,75$				NS85
63P/Wild 1	2,266 ^O	$1,0 \times 10^{27}$	4	$3,1 \times 10^{26}$	1	27,0±3,3	
71P/Clark	2,715 ^I	$4,9 \times 10^{27}$	13	$1,5 \times 10^{27}$	5		
84P/Giclas	2,209 ^O	$4,4 \times 10^{27}$	13	$1,3 \times 10^{27}$	5		
106P/Schuster	1,666 ^I	$7,5 \times 10^{27}$	20	$2,3 \times 10^{27}$	8	12,1±2,9	
112P/Urata-Nijima	2,296 ^I	$3,6 \times 10^{26}$	4	$1,1 \times 10^{26}$	1		
114P/Wiseman-Skiff	1,569 ^O	$3,1 \times 10^{27}$	17	$9,4 \times 10^{26}$	6	14,1±2,9	

 r_h : heliocentrikus távolság. I : perihélium előtt, O : perihélium után. Q_{H_2O} , Q_d : víz és por kibocsátási ráták.

* IUE mérésekből (Festou és mások).

 S' [670, 792 nm]: normalizált spektrális reflektivitási gradiens.

L+96: Lamy et al. (1996).

NS85: Newburn és Spinrad (1985).

üstökösök színét, azok statisztikai vizsgálatát, eloszlásukat, kétszíndiagramokat és más, a pálya és fizikai paramétereikkel való korrelációk vizsgálatát részletesebben Toth & Lamy (2000, 2005), Toth (2005), Lamy és Toth (2009) mutatják be.

A porkómák normalizált spektrális reflektivitási gradiensét a [670, 972] nm tartományban határoztam meg, a 670 nm-re normálva, mert ebben a tartományban várhatóan a legkisebb a gáz emisszió hatása, illetve HST PC2 vörös szűrő effektív hullámhosszától az infravörös (F814W) szűrőt is tartalmazza. A HST 8. ciklusában megfigyelt üstökös porkómák spektrális gradienseinek átlagértéke $15,2 \pm 2,3$ %/kÅ, de ebből kihagytam az 59P/Kearns-Kwee üstökösöt, mert a por R (F675W) kontinuum spektruma rendkívüli, mert erős NH₂ emissziót tartalmaz. Kihagyva az R tartományt és csak a V (F555W), valamint I (F814W) tartományt véve figyelembe, erre az üstökösre is a többivel összhangban levő $10,6 \pm 2,1$ %/kÅ gradiens adódott. Egyébként a korábbi HST megfigyelések között a 45P/HMP üstökös kómájában volt a legnagyobb szín gradiens, S' [670, 792 nm] = 35 ± 5 %/kÅ. A 22P/Kopff kómájában S' [670, 792 nm] = 17 ± 3 %/Å. A legkisebb szín gradiens pedig a 46P/Wirtanen

kómájában volt (kissé különböző tartományban) $S'[540, 670 \text{ nm}] = 8,3 \text{ \%}/\text{k}\text{\AA}$, de ez valószínűleg alsó határ, mert a V (F555W) sávban zavaró C_2 emisszió lehet. Megjegyzem, hogy az egyes porkómák normalizált reflektivitási gradiensei, azok átlagértéke közeláll az üstökösök normalizált spektrális reflektivitás gradienseihez, illetve azok Jewitt (1992) által meghatározott átlagértékéhez ($17\%/ \text{k}\text{\AA}$). Nem vizsgáltam a porkóma és üstökösök színének kapcsolatát. ez egyébként egy későbbi kutatás tárgya lehet majd.

A HST 8. ciklusában megfigyelt üstökösök porkibocsátási aktivitását, valamint a kóma normalizált spektrális reflektivitási gradiensét a 5. táblázat foglalja össze. A porkibocsátás mértékének kiszámítása az 5.5. pontban, a kóma színének, valamint a normalizált spektrális gradiensének meghatározását a 5.4. pont ismerteti. Az időegységenként kibocsátott portömeg meghatározásához a kóma fotometriából meghatározott $Af\rho$ mennyiség (A'Hearn és mások 1984) ismerete, valamint víz szublimációját feltételezve az üstökösokból időegységenként kibocsátott vízmolekulák számának megfigyelésekből adott értéke szükséges.

A HST megfigyelésekre a kóma fotometriából meghatározott $Af\rho$ (cm) két nagyságrenden belül szór. A HST megfigyelésekre ez legkisebb a 112P/Urata-Nijima üstökösnek, $5 \pm 1 \text{ cm}$, a legnagyobb a 4P/Faye esetében, $129 \pm 6 \text{ cm}$. Mint tudjuk (1. 5.5. fejezetet), az $Af\rho$ mennyiség a porkibocsátási aktivitás kiszámításához alapvetően fontos paraméter, de nem mindig arányos a porkibocsátás mértékével, hiszen több, a megfigyelés körülményeitől függő paramétertől összetett módon függ, de mint az alábbiakban látható, ezeknél az üstökösöknek a porkibocsátási aktivitás mértékét jelzi.

A vízkibocsátási ráta adatának a HST megfigyelésekhez lehetőleg minél közelebbi időpontbeli ismerete szükséges. A probléma azonban az, hogy nincs mindig ilyen mérési adat, például földi keskenysávú fotometriai mérés, rádiócsillagászati, esetleg ultraibolyában űrcsillagászati megfigyelés. Ezért a vízkibocsátás ütemét közvetett úton kell meghatározni, amelyben nagy segítséget ad nagyon sok üstökös aktivitásának heliocentrikus távolságtól való függésének meghatározása (A'Hearn és mások 1995). A'Hearn és mások (1995) még azt is megállapították³⁰ hogy az üstökösök vízkibocsátásának mértéke függ attól, hogy az üstökösben szénmolekulákból átlagos, "tipikus" mennyiség van, illetve túl kevés van, azaz "hiányosak". Ezek alapján a legkisebb vízkibocsátása a 112P/Urata-Nijima üstökösnek volt $1.1 - 3.6 \times 10^{26}$ molekula s^{-1} , 2,296 CsE naptávolságban, míg a 4P/Faye üstökösnek, $6,9 \times 10^{27}$ molekula s^{-1} , 1,604 CsE-re a Naptól. Az eredményül kapott porkibocsátás a 4P/Faye esetében $127 - 153 \text{ kg s}^{-1}$, a többi üstökösre ennél jóval kisebb, $1 - 20 \text{ kg s}^{-1}$ közötti. Figyelembe véve a porkibocsátás naptávolságtól való függésére A'Hearn és mások (1995) által megállapított relációt, a HST-vel megfigyelt üstökösökre a porkibocsátás mértéke 2-3-szoros szorzófaktoron belül egyezik más, földi megfigyelésekből kapott értékekkel (Lamy és mások 2009). Ennél pontosabb egyezés nem is várható, mert egy adott üstökösre a megfigyelések i) különböző visszatéréskor készültek, vagyis nem minden visszatéréskor várható ugyanakkora aktivitás a pálya ugyanazon pontjában, ii) a naptávolságtól való függés objektum és visszatérés szerint is változhat, iii) az $Af\rho$ fázisszögtől (α) való függése egy 2-es faktor eltérést is okozhat, mert oppozíció közelében ($\alpha \lesssim 5^\circ$) a porrészecskékről a fény erős visszaszórása³¹ effektust mutat.

³⁰"Typical", "depleted" alcsoportok A'Hearn és mások (1995) VI. és VII. táblázatában.

³¹Backscattering.

6.3. A HST 9. megfigyelési ciklusa: 10 ekliptikai üstökös megfigyelése

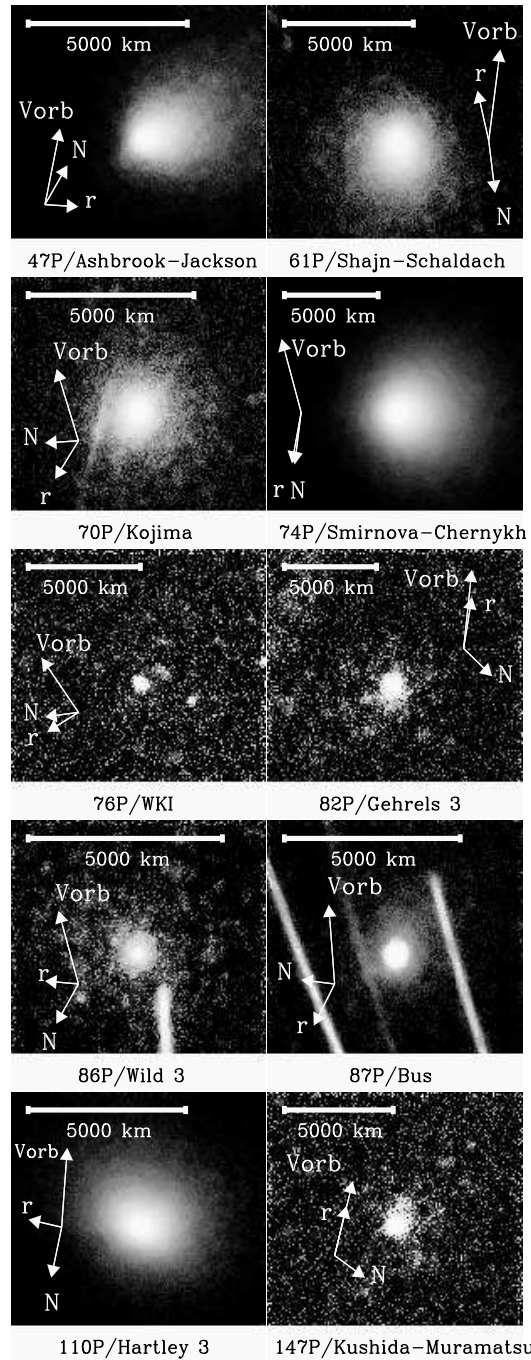
A HST-vel 1991-től végzett üstökösfigyelésektől kezdődően a megfigyelési és adatfeldolgozási módszerek fejlődése, tökéletesedése és folyamatos tesztelése lehetőséget adott arra, hogy sok ekliptikai üstökösre egyenként több HST keringés alatt sok fotometriai megfigyelést végezve pontos fotometriai fénygörbét lehessen felvenni és az üstökös magjának fényváltozását nyomonkövetni (l. például a 19P/Borely, 22P/Kopff és 47P/Wirtanen ekliptikai üstökösök, valamint az 55P/Tempel-Tuttle és C/1995 O1 (Hale-Bopp) Oort-felhővel kapcsolatos üstökösök HST-vel megfigyelt fénygörbéit).

A HST nyolcadik megfigyelési ciklusa során 1999-2000-ben megfigyelt 13 ekliptikai üstökös magjának sikeres közvetlen detektálása és annak a ciklusnak a megfigyelési eredményeinek feldolgozása (l. 6.2 fejezetet) után egy újabb ígéretes üstökösfigyelési programra került sor a HST következő, kilencedik megfigyelési ciklusa idején 2000 júliusa és 2001 júniusa között. A HST kilencedik megfigyelési ciklusában 10 olyan ekliptikai üstökös került földközelségbe, amelynek magja elegendően nagy jelet adott a pontos fotometriához az aktív fényes kóma ellenére is és maximalizálni lehetett az üstökös mag képsíkba eső látszó keresztmetszetét is a legnagyobb mag/kóma fényességkontraszt eléréséhez. Egyébként minden megfigyelt üstökös mag egy HST PC2 képelemen belül volt, ezért a mag/kóma fényességkontraszt jellemezhető a magot tartalmazó képelem mag, kóma fényének különválasztása utáni fényességek arányával ennek a képelemnek a figyelembevételével. Ebben a megfigyelési ciklusban a 10 ekliptikai üstökös magjának effektív rádiusza, a fénygörbe alapján a prolate ellipszoid alak feltételezésével a test a/b félnagy- és kénagy-tengely-arányának lehetséges minimális értéke, valamint amennyiben azt a fénygörbe időbeli lefedettség a tengely körüli forgásidejének meghatározása volt az elsődleges cél. Több fotometriai szűrővel készült megfigyelés esetén pedig az üstökös mag színindexeit is sikerült meghatározni.

A 10 üstökös mindegyikét a HST nyolc egymást követő keringése ideje alatt keringésként mintegy 30 perces láthatósági időintervallumban összesen 11 órán keresztül sikerült megfigyelni a WFPC2 új Bolygókamera (PC2) üzemmódjában. Ez a viszonylag hosszú HST műszeridő teljes vagy rész-fénygörbe megfigyelést tett lehetővé egy-egy objektumra. Azonban még ez a hosszú teleszkópidő sem biztosította minden esetben azt, hogy az üstökös mag tengely körüli forgásidejét egyértelműen, illetve elegendően pontosan (3-4 tized-napos pontossággal³² a periodogramból) meg lehessen határozni. Ezért néhány esetben több lehetséges forgási periódus értéket lehetett csak megadni.

Minden üstökösre F675W (R) szűrővel történtek a megfigyelések, de több esetben, amikor az expozíciós időnek nem kellett túl hosszúnak lenni (egy-egy HST keringést és láthatósági ablakot figyelembe véve), akkor más fotometriai szűrők is alkalmazásra kerültek. Az F675W vörös (R) szűrőn kívül az F555W (V) szűrővel 4 üstökös, az F439W (B) szűrővel 2 üstökös sikerült megfigyelni és ezek magjának színindexeit meghatározni. A PC2 CCD képelem mérete (pixel skála) az üstökös távolságába vetítve tipikusan 50 km a következő szélsőértékekkel: 43,0 km (86P) és 90,7 km (82P) (6.3. táblázat). Minden HST képet az Űrteleszkóp Tudományos Kutatóintézet Adatfeldolgozó Rendszere (Space Telescope Science Institute, STScI, Data Processing System) által történt előfeldolgozás után kerültek a tudományos projekt felhasználóihoz. Az így kapott és a tudományos vizsgálatokra elemzésre előkészített megfigyelt üstökösök mag körüli belső kómáját a 49. ábra mutatja mozaikokban.

³²Kisbolygók, üstökösök forgási periódusa ennél pontosabban is meghatározható.



49. ábra. A HST kilencedik megfigyelési ciklusa (Cycle 9) alatt 2000 július – 2001 június között megfigyelt 10 ekliptikai üstökös. A mozaik-kockák mindegyike egy-egy üstököst mutat az eredeti CCD felvételtől az üstökös környezetét kiemelve. A felvételek idején a HST az üstökös látszó mozgását követte. Így például a 86P/Wild 3 és a 87P/Bus üstökösöknél látható csíkok a hosszú expozíciós idő miatt vonallá húzódtott háttérsillagok nyomai. A nyilak a következő vektorok képsíkba eső vetületei: N égi egyenlítői koordináta-rendszer északi iránya, r a Nap–üstökös rádiuszvektor iránya és V az üstökös napköri keringő mozgása (heliocentrikus) sebességvektorának ellentettje. A képsíkban a méretskála (km) is fel van tüntetve. (L. még a 39. ábrát a HST nyolcadik ciklusa (Cycle 8) 1999–2000-ben megfigyelt üstökösökről.) (kép: a szerző által készített ábra, l. még Lamy és mások 2011).

6. táblázat. A HST-vel 2000-2001 között (Cycle 9) megfigyelt 10 üstökös

Üstökös	Dátum (UT)	Szűrők	r_h (CsE)	Δ (CsE)	α (°)	Scale (km/pix)
47P/Ashbrook–Jackson	2000 júl. 26,542	B,V,R	2,572 ^I	1,588	7,16	52,4
61P/Shajn–Schaldach	2000 aug. 05,538	R	2,959 ^I	1,956	3,58	64,5
70P/Kojima	2001 márc. 29,446	V,R	2,517 ^O	1,529	4,30	50,5
74P/Smirnova–Chernykh	2001 ápr. 12,349	R	3,559 ^O	2,691	9,29	88,8
76P/WKI*	2001 ápr. 12,891	R	3,094 ^O	2,260	12,08	74,6
82P/Gehrels 3	2000 nov. 30,776	R	3,733 ^I	2,748	0,82	90,7
86P/Wild 3	2001 máj. 26,257	B,V,R	2,316 ^I	1,304	1,81	43,0
87P/Bus	2001 jún. 07,762	R	2,447 ^O	1,435	2,42	47,4
110P/Hartley 3	2000 nov. 24,705	V,R	2,578 ^I	1,607	5,06	53,0
147P/Kushida–Muramatsu	2001 jan. 02,261	R	2,825 ^I	2,299	18,76	75,9

Dátum: a megfigyelési időintervallum közepe (HST orbit, "vizit") UT-ben.

HST fotometria szűrők: (B, V, R, I) = (F439W, F555W, F675W, F814W).

r_h : Naptól való távolság.

r_h^I : napközelpont felé közeledőben (inbound), r_h^O : napközeltől távolodóban (outbound).

Δ : földtávolság (az objektum nagyon távol van, ezért nem kell a HST-től mért távolság)

α : Nap fázisszög (Nap–üstökös–megfigyelő szög).

Skála: az üstökös távolságában egy HST PC2 képelem (pixel) mérete (km).

*76P/WKI: 76P/West–Kohoutek–Ikemura.

A HST kilencedik ciklusa során végzett üstökösfigyelések időpontját, geometriai körülményeit, az alkalmazott fotometriai szűrőket, valamint egy HST PC2 képelemnek az üstökös távolságába kivetített méretét a 6.3. táblázat foglalja össze.

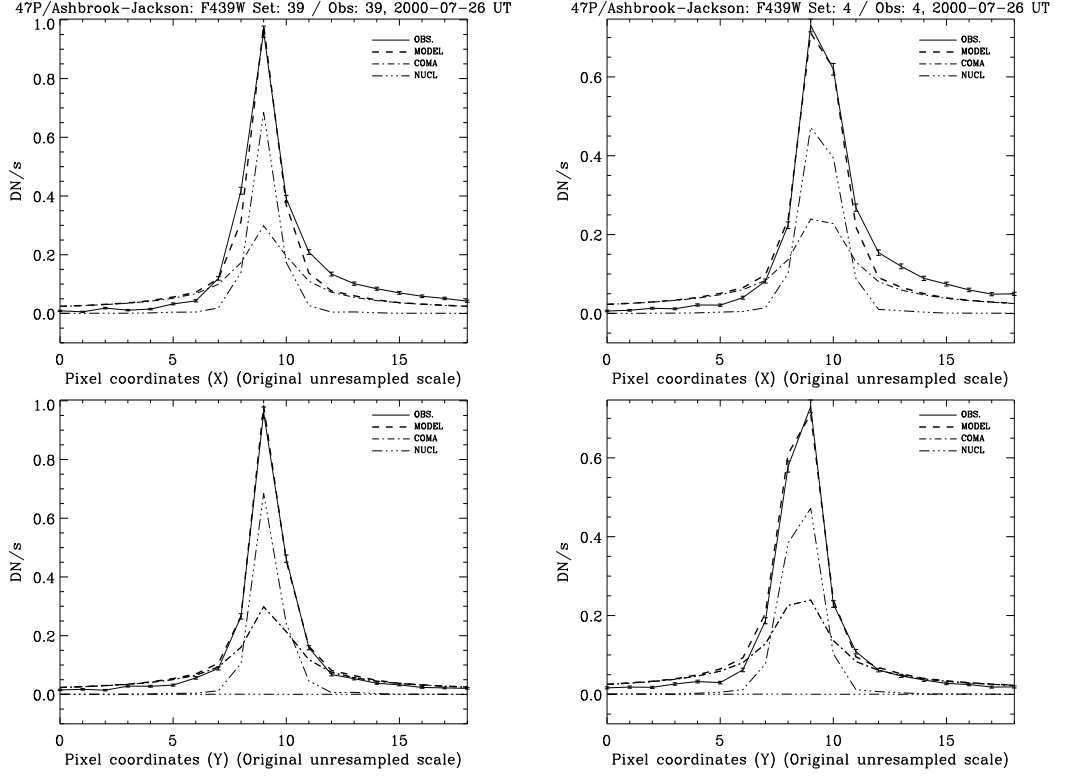
A megfigyelt képeken az üstökös- és kóma fényének szétválasztása, illetve az üstökös- és kóma fotometriájának (fényesség és színindexek) meghatározása az 5.2. fejezetben leírt módszerek alkalmazásával történt az 5.4. pont figyelembe vételével.

6.3.1. 47P/Ashbrook–Jackson

A 47P üstökös a 2000 július 26-án készült HST PC2 megfigyelések idején még a Naphoz közeledő pályaszakaszán 2,57 CsE naptávolságban, 1,59 CsE földtávolságban és 7,16° fázisszögnél volt. Napközelségét 2001 január 6-án érte el 1,56 CsE legkisebb távolságra a Naptól közel hat hónappal a HST megfigyelések után. Egy HST keringés alatt hat kép készült a színszűrők következő sorrendjében az expozíciós idők feltűntetésével: F675W (R) (120 s), F555W (V) (120 s), F439W (B) (2 darab 500 s, összesen 1000 s), F675W (R) (60 s), F675W (R) (120 s), így az összesen a nyolc HST keringés alatt 48 kép készült.

A 47P kómája radiális fényességprofil lefutása nem volt kanonikus ($p = -1,07$). A mag fénye jó, mintegy 2,5-szoros kontraszttal különült el a kómától a magot tartalmazó képelem (csúcs-pixel) fényességeket figyelembe véve. A modell radiális fényességprofil illesztése a megfigyelt profilhoz nagyon jó (51. ábra).

Az üstökös- és kóma magot tartalmazó képelemen keresztül felvett, a PC2 CCD detektorra oldalaival párhuzamosan, X és Y irányban felvett fényességprofilok láthatók a

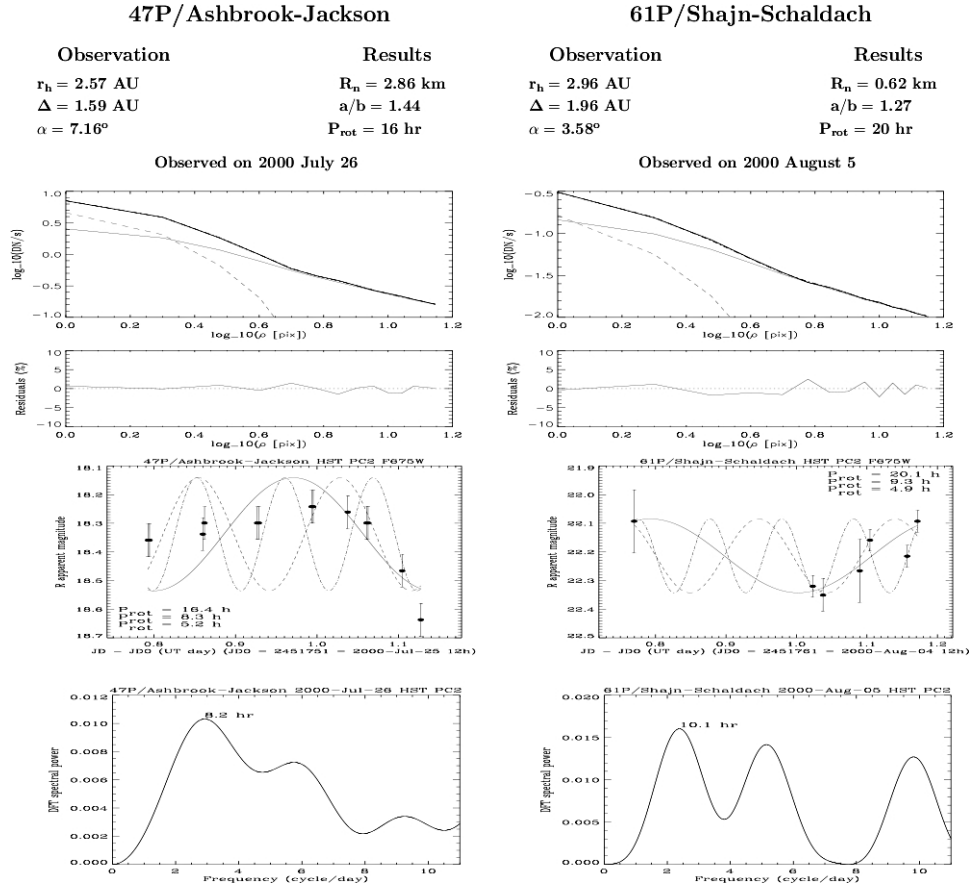


50. ábra. A HST kilencedik megfigyelési ciklusa (Cycle 9) idején megfigyelt 47P/Ashbrook-Jackson üstökös magját tartalmazó képelemen keresztül felvett fényességprofilok példák arra, hogy az üstökös a képelem közepén vagy pedig attól távolabb, a pixel széléhez közelebb van. A bal oldalon levő két panel az üstökös a HST PC2 CCD képelemének a közepére esik (jól centrált eset) míg a jobb oldalon levő két panelen az üstökös nincs a képelem közepén, hanem a képelem valamelyik széléhez esik közelebb X és Y irányban, rendre. A felső két panelen az X irányú (CCD képelemek sora), az alsó két panelen az Y irányú (CCD képelemek oszlopa) mentén kiolvasott megfigyelt fényességértékek láthatók. A megfigyelt fényességprofil folytonos vastag vonal, a modell-profil szaggatott vonal, a kóma-profil vonalpont-vonal, az üstökösprofil vonal – három pont – vonal jelöli. Ezek az esetek az üstökös fényességeloszlás-modelljének szubpixel felbontásban történő illesztésének fontosságára hívják fel a figyelmet (kép: a szerző által készített ábra, l. még Lamy és mások 2011).

50. ábrán. Egy pontosan centrált és egy nem centrális elhelyezkedésű fénycentruma mutat be példát az ábra. Ezek az esetek az üstökös fényességeloszlás-modelljének szubpixel felbontásban történő illeszkedésének fontosságára hívják fel a figyelmet és alátámasztják az üstökös fényének a fényes kómától való elválasztására, az üstökös fotometriájára kifejlesztett és több éven át több objektumra is kipróbált módszerem alkalmazhatóságát, hatékonyságát.

A 19 F675W (R) képből egy nem teljes fénygörbét, vagyis a teljes rotációs periódust nem lefedő rész-fénygörbét sikerült meghatározni és ezért az üstökös forgási periódusát nem lehetett egyértelműen meghatározni (51. ábra).

A megfigyelt fénygörbe pontokhoz az egyes periódus-jelöltekkel előállított szintetikus fénygörbét illesztve a 47P üstökös magjának lehetséges forgási periódusai a



51. ábra. A HST kilencedik megfigyelési ciklusa (Cycle 9) idején megfigyelt üstökösök PC2 fotometriai megfigyeléseiből meghatározott tulajdonságainak összefoglalása a 47P/Ashbrook-Jackson (balra) és 61P/Shajn-Schaldach üstökösök esetén (jobbra). Felül a felíratok a heliocentrikus és geocentrikus távolságokat, illetve a fázisszöget tüntetik fel a megfigyelési idő-intervallum közepére, továbbá az üstökösök effektív rádiuszát, a prolate ellipszoid modell test közelítésben az a/b félnagyitgengely arány minimális értékét, valamint a mag lehetséges tengelyforgási periódusát. A legfelső panel felett feltüntetett megfigyelési dátum alatt felülről lefelé haladva az egyes paneleken az azimutálisan átlagolt radiális fényességprofilok illesztése, alatta az illesztés minőségét számszerűsítő reziduál-görbe van, a következő panelen a kapott fénygörbe megfigyelt pontjai (látszó R fényesség magnitúdókban) és az illesztett fénygörbe vonala, valamint a megfigyelési pontokból adódó diszkrét Fourier spektrum (DFT) látható, rendre. A fit profilok rendre: a vékony vonal a kóma, a szagatott vonal a mag, a vonal-pont-vonal pedig az illesztett (mag + kóma) modell (kép: a szerző által készített ábra, l. még Lamy és mások 2011).

valószínűségük csökkenő sorrendjében: 16 ± 8 óra (a legvalószínűbb), $8, 4 \pm 0, 2$ óra és $5, 2 \pm 0, 1$ óra (a legkevésbé valószínű). A szintetikus fénygörbe és a megfigyelési pontok rotációs fázis-szerinti összehangolását illetően itt egy fontos megjegyzést kell tenni. Az egyes szintetikus fénygörbék feltételezik, hogy a forgó üstökösöt a fényességének minimumának idején kezdtük megfigyelni (a mérési pontok ezt jelzik). Ezt azonban nem tudhatjuk teljes bizonyossággal. Ezért a leghosszabb periódus (16 óra) a

legvalószínűbb és a valódi alsó határ is lehet a lehetséges forgásidőkre.

A 47P magja rádiuszának középértéke $2,86 \pm 0,08$ km és a prolate ellipszoid test modell a/b félnagy tengely arány legkisebb lehetséges értéke 1,44. Ennek alapján a 47P üstökös magja egy nagyobb méretű test az eddig ismert ekliptikai üstökösök között (56. ábra). Az üstökös mag színindexei $(B - V) = 0,78 \pm 0,08$, $(V - R) = 0,40 \pm 0,08$.

A 47P üstökösre a HST-n kívül több földi megfigyelés is készült a 2000-es, valamint a 2005/2006. évi láthatósága idején. Most ezeket a földi megfigyeléseket ismeretlem és hasonlítom össze a HST-vel kapott megfigyelési eredményekkel. Licandro és mások (2000) megfigyelték az üstököst, amikor az 4,70 CsE naptávolságban a Naphoz közeledőben és $2,0^\circ$ fázisszögnél volt. Egyszeri (snapshot) megfigyelésük szerint az üstökösnek nem volt kómája és 1 CsE heliocentrikus, valamint 1 CsE geocentrikus távolságra korrigálva, adott α fázisszögnél a mag fényessége vörös szűrővel $R(1, 1, \alpha) = 14,88 \pm 0,14$ magnitúdó volt és a színindexe $(V - R) = 0,40 \pm 0,3$. Ez a színindex megegyezik a HST megfigyelésekből adódóval. A mag rádiuszának meghatározásakor általában feltételezett geometriai albedót (0,04) és lineáris fázisszög függést (0,040 magnitúdó/fok) alkalmazva a 47P üstökös mag rádiuszára $3,1 \pm 0,2$ km adódik Licandro és mások (2000) fotometriai adataira. Meg kell jegyezni, hogy ez a megfigyelés olyan kis fázisszögnél volt, amikor a fázisfüggvény lineáris közelítése nem érvényes. Az oppozíciós effektus figyelembevételével az üstökös mag rádiuszára $3,0 \pm 0,2$ km adódott, ami bár csak kisség különbözik a lineáris fázisfüggvény feltételezésével kiszámított értéktől, de kis fázisszögre mindenképp figyelembe kell venni az oppozíciós effektus hatását. Végülis Licandro és mások (2000) fotometriai megfigyeléséből kapott mag rádiusz jól egyezik a HST-vel a 47P üstökös kómás aktív állapotában megfigyelt fotometriából adódó rádiusszal.

Snodgrass és mások (2006) két egymást követő éjszakán, 2005 március 5-én és 6-án éjjel teljes fénygörbéket figyelt meg a 47P üstökösre. Az üstökösnek nem volt kómája és a tengely körül forgó mag közvetlen fotometriai megfigyelését tudták végezni, amikor az üstökös nagy naptávolságban 5,42 CsE-re volt a napközelsége felé közeledőben. A fázisszög a megfigyelések idején $3,5^\circ$ és $3,2^\circ$ között csökkent, vagyis a fázisfüggvény nem-lineáris szakaszán történtek a megfigyelések. Az üstökös mag egységnyi helio- és geocentrikus távolságra korrigált közepes R fényessége $R(1, 1, \alpha) = 14,756 \pm 0,007$ magnitúdó, a fénygörbe maximum-minimum amplitúdója 0,45 magnitúdó volt. A mag színindexei $(V - R) = 0,45 \pm 0,03$ és $(R - I) = 0,38 \pm 0,03$ magnitúdó. Tekintettel arra, hogy a kis fázisszögnél nem érvényes a lineáris fázisfüggvény közelítés, ezért a mag rádiuszát az oppozíciós effektusra korrigálás után $3,35 \pm 0,01$ km adódott. A mag alakját egy prolate ellipszoiddal közelítve a test a/b félnagy tengely arányának legkisebb értéke $1,5 \pm 0,1$.

A fentiekből látható, hogy a 47P üstökösre Snodgrass és mások (2006) földi nagy teleszkóppal végzett megfigyelései igen pontosak. Snodgrass és mások (2006) fénygörbe megfigyelése a 47P magjának fényváltozásáról szintén nem adott egyértelmű választ a mag tengely körüli forgásidejére. Több lehetséges értéket is megadtak a periódusra: 11,2, 15,5 és 44,0 óra. Csak az általuk megadott 15,5 órás forgásidő egyeztethető össze a HST megfigyelésekből adódó legvalószínűbb, 16 órás periódussal. A HST és a Snodgrass és mások (2006) megfigyelt fénygörbék maximum-minimum amplitúdói rendre 0,4 és 0,45 magnitúdó, jól egyeznek. Ennek ellenére Snodgrass és mások (2006) által számolt szinusz illesztés 1,45 magnitúdó maximum-minimum amplitúdót ad, ami az előbbiekkal nem egyezik csakúgy, mint az 1,45 magnitúdó amplitúdóhoz tartozó prolate ellipszoid alakú test a/b félnagy tengely-arány legkisebb értéke, 3,8 sem.

Igen figyelemre méltó és a 47P üstökös mag alakja és felszíni részletei szempontjából

ból érdekes, hogy a HST és Snodgrass és mások (2006) által megfigyelt fénygörbének az egyik minimuma hirtelen meredek lefutású, igen mély és éles (l. 51. ábrát). Lehetséges, hogy ez a test igen szabálytalan alakjára, illetve összetett fény-árnyék hatásokra utal, tehát ennek az üstökösnek a későbbi fénygörbe megfigyelései igen fontosak a mag felszíni sajátosságainak tanulmányozására.

Snodgrass és mások (2008) 2006 március 1-jén és 2-án ismét megfigyelték a 47P üstökösöt, amikor az 5,11 CsE-re volt a Naptól a perihéliuma felé közeledő pályaszakaszon, rendre $8,9^\circ$ és $8,8^\circ$ fázisszögnél. Azonban az üstökös már aktív volt és halvány kómát és csóvát is mutatott, tehát a mag fényéhez hozzájárult a kóma fénye is, ami megnehezítette az üstökös mag fotometriai vizsgálatát. A két egymást követő éjszakai megfigyelésből az üstökös mag egységnyi helio- és geocentrikus távolságra átszámozt R fényessége $R(1, 1, \alpha) \geq 15,23$ magnitúdó, tehát csak egy korlát adódott, ami a mag rádiuszára egy felső határt jelent: $r_n \leq 3,02 \pm 0,05$ km R geometriai albedo 0,04 és lineáris fázistörvény $\beta = 0,04$ mag/fok feltételezéssel számolva. A prolate ellipszoid test alakot feltételezve a test a/b félnagyitengelyének legkisebb lehetséges értéke pedig 1,4. Snodgrass és mások (2008) szerint a 47P üstökös magjának színindexei $(V - R) = 0,29 \pm 0,06$ és $(R - I) = 0,79 \pm 0,07$ magnitúdó és meg is jegyzik, hogy különösen a $(V - R)$ színindex "rendkívüli, összehasonlítva a tipikus üstökös mag ugyanezen színindexével". Ennek valószínűleg a megfigyeléseik idején a 47P üstökös magja körüli kóma nem elhanyagolható mértékű hozzájárulása a mag fotometriájához, vagyis Snodgrass és mások (2008) nem tudták határozottan különválasztani az üstökös mag fényét a kómától. Valóban, ki is hagytam a Snodgrass és mások (2008) által a 47P magjára adott $(V - R)$ színindexet az üstökös magok színét tárgyaló munkában (Lamy & Toth 2009).

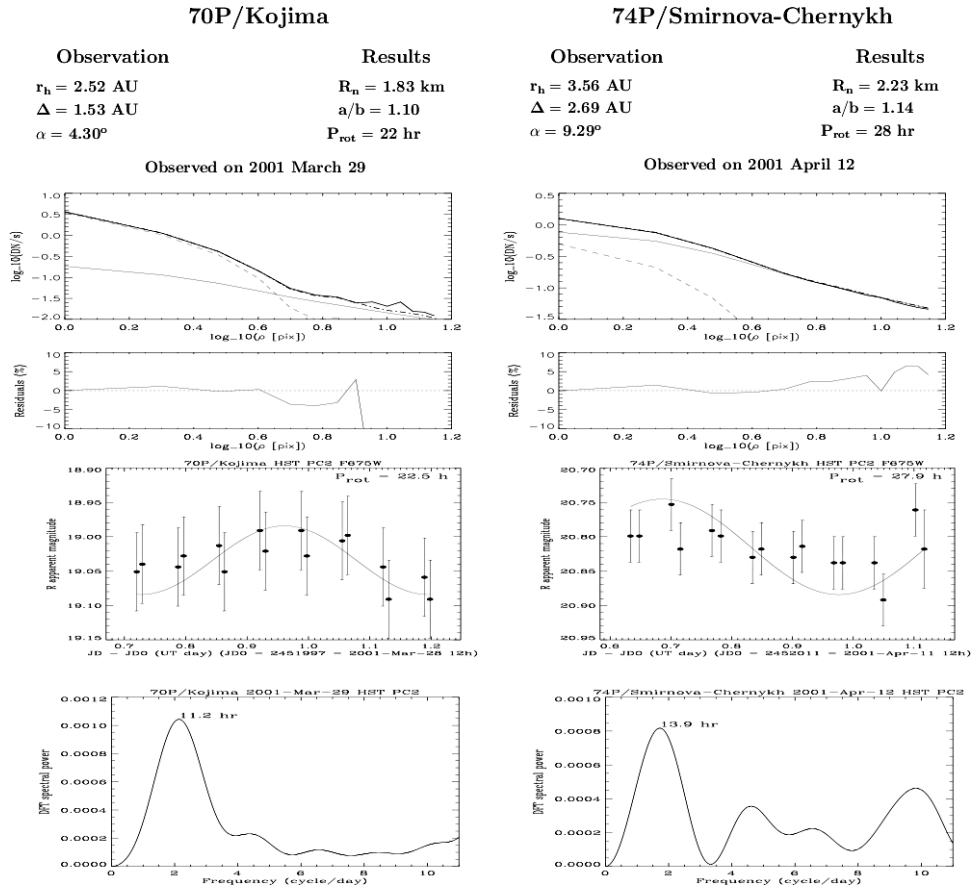
6.3.2. 61P/Shajn-Schaldach

A 61P üstökös a 2000 augusztus 5-én készült HST PC2 megfigyelések idején még a Naphoz közeledő pályaszakaszán $2,96$ CsE naptávolságban, $1,96$ CsE földtávolságban és $3,6^\circ$ fázisszögnél volt. Napközelségét 2001 május 9-én érte el $2,33$ CsE legkisebb távolságra a Naptól mindegy nyolc hónappal a HST megfigyelések után. A HST PC2 F675W (R) szűrővel párban készültek 1100 s epozícióval felvételek, mind a 8 HST keringése idején, de sajnos a nyolcból 4 keringés elveszett (a 2., 3., 4. és 5.) és csak az 1., 6., 7. és 8. keringésben felvett képek vannak meg.

A 61P kómája radiális fényességprofil lefutása nem volt kanonikus ($p = -1,06$). Azonban a mag és a kóma fénye jól elkülöníthető egymástól. A modell radiális fényességprofil illesztése a megfigyelt profilhoz nagyon jó (51. ábra).

A kapott rész-fénygörbe nagyon ritka mintavételezésű és az R -ben rendelkezésre álló kevés megfigyelési pont időbeli eloszlása nem egyenletes. Így sajnos a 61P üstökös magjának tengelykörüli forgásidejét sem lehet egyértelműen, illetve pontosan meghatározni. A periodogram alapján (51. ábra) a lehetséges rotációs periódusok a valószínűségük szerinti csökkenő sorrendje: 20 ± 4 óra (a legvalószínűbb), $9,3 \pm 0,8$ óra és $4,9 \pm 0,2$ óra. Azonban a megfigyelési pontok fotometriából adódó hibáit is figyelembe véve (51. ábra) az a $4,9 \pm 0,2$ óra forgásidőhöz tartozó szintetikus fénygörbe illeszkedik legjobban a megfigyelésekhez. Meg kell jegyezni – hasonlóan mint 47P üstökös esetében (l. 6.3.1), hogy a megfigyelt és a szintetikus fénygörbe fázis-szerinti összeillesztésekor feltételeztem, hogy a fénygörbe minimuma és maximuma az adatsor (rendelkezésre álló mérési pontok) kezdetével és végével esik egybe.

Az adatsorból számított rádiusz középértéke $0,61 \pm 0,03$ km és a prolate ellipszoid alakú test feltételezésével az a/b félnagyitengely arány legkisebb lehetséges értéke 1,3.



52. ábra. A HST kilencedik megfigyelési ciklusa (Cycle 9) idején megfigyelt üstökösök PC2 fotometriai megfigyeléseiből meghatározott tulajdonságainak összefoglalása a 70P/Kojima (balra) és 74P/Smirnova-Chernykh üstökösök esetén (jobbra). A részleteket illetően l. még a 51. ábrát (kép: a szerző által készített ábra, l. még Lamy és mások 2011).

Lowry és mások (2003) földi megfigyeléseket végeztek, amikor a 61P üstökös 4,4 CsE naptávolságban volt. A nem fotometriai minőségű légköri viszonyok közepette elvégzett megfigyelésekből az üstökös magjának rádiuszára $1,98 \pm 0,24$ km-t kaptak, ami a megadott hibahatárt figyelembe véve (alsó végpont) 0,68 km-es rádiuszt jelent és ez összhangban van a HST légkörön kívül végzett megfigyeléseiből kapott rádiusszal. Valószínűsíthető, hogy a földi megfigyelések idején a 61P üstökösnek halvány kómája volt a nagy heliocentrikus távolság ellenére, így a kóma fényességjáruléka benne maradt a mag fényességében az egyébként is nem fotometriai minőségű földi atmoszférikus körülmények között végzett megfigyelésekben.

6.3.3. 70P/Kojima

A 70P üstökös a 2001 március 29-én készült HST PC2 megfigyelések idején már a Naptól távolodó pályaszakaszán 2,52 CsE naptávolságban, 1,53 CsE földtávolságban és $4,30^\circ$ fázisszögnél volt. Napközelségét 2000 szeptember 14-én érte el 2,00 CsE legkisebb távolságra a Naptól mintegy hat hónappal a HST megfigyelések előtt. HST ke-

ringésenként (vizit) összesen 4 képfelvétel készült a PC2-vel, ezekből 2 kép az F675W (R) szűrővel egyenként 600 s expozíciós idővel, valamint 2 kép az F555W (V) szűrővel egyenként 300 s expozíciós idővel. A nyolc HST keringés (vizit) alatt összesen 32 képfelvétel készült az új Bolygókamerával (PC2).

A 70P kómája radiális fényességprofil lefutása nem volt kanonikus ($p = -1,07$). Azonban a mag fénye jó, mintegy 3-szoros kontraszttal különült el a kómától a magot tartalmazó képelem (csúcs-pixel) fényességeket figyelembe véve. A modell radiális fényességprofil illesztése a megfigyelt profilhoz nagyon jó (52. ábra).

Csak rész-fénygörbét lehetett meghatározni, amiből a 70P üstökös magjának tengelykörüli forgási periódusa nem határozható meg. Ugyanis formálisan a periodogram alapján 25 ± 5 óra forgási periódus adódna, de a fénygörbén a megfigyelési pontok hibáját is figyelembe véve ennek a jelölt periódussal készített szintetikus fénygörbe nem illeszkedik kielégítően a megfigyelésekhez.

A megfigyelési pontokból meghatározott közepes rádiuszra $1,82 \pm 0,09$ km adódott, a prolate ellipszoid alái testet feltételezve az a/b félnagy tengely-arány lehetséges legkisebb értéke 1,1. A 70P üstökös magjának színindexe $(V - R) = 0,60 \pm 0,09$ magnitúdó.

Snodgrass és mások (2008) földi megfigyelései idején a 70P üstökös magja igen halvány volt és közelében egy fényes csillag is volt, ami feltehetően zavarta az üstökös mag kifotometrálását. Snodgrass és mások (2008) azt feltételezve, hogy az üstökös mag fotometriáját nem zavarja a detektoron a közelében lévő fényes csillag, illetve nincs fényességjárulék az üstökös kómájától sem, a mag rádiuszára $2,18 \pm 0,15$ km-t adtak meg. Snodgrass és mások (2008) még hivatkoztak arra, hogy a HST megfigyelésekből a prolate ellipszoid alakúnak feltételezett üstökös mag a/b félnagy tengely-arányának csak a minimális lehetséges (1,1) értéke ismert, így a földi megfigyeléseiből erre 1,4-et adnak meg, ami egyébként elfogadható és tipikus érték az ekliptikai üstökösök magjának elnyújtottságára.

6.3.4. 74P/Smirnova-Chernykh

A 74P üstökös a 2001 április 12-én készült HST PC2 megfigyelések idején már a Naptól távolodó pályaszakaszán 3,56 CsE naptávolságban, 2,69 CsE földtávolságban és $9,3^\circ$ fázisszögnél volt. Napközelségét 2001 január 14-én érte el 3,55 CsE legkisebb távolságra a Naptól mindegy három hónappal a HST megfigyelések előtt. Egy HST keringés alatt két hosszú expozíciós, egyenként 1100 másodperces felvétel készült az F675W (R) szűrővel, így a nyolc keringés során 16 kép keletkezett.

A 74P kómája radiális fényességprofil lefutása nem volt kanonikus ($p = -1,08$). A mag fénye jól elkülöníthető az aktív üstökös fényes kómájától annak ellenére, hogy a magot tartalmazó képelem kóma fényességjáruléka közel azonos a mag fényességjárulékéval. A modell radiális fényességprofil illesztése a megfigyelt profilhoz nagyon jó (52. ábra). A megfigyelt rész-fénygörbe periodogramja szerint a 74P üstökös magjának lehetséges forgási periódusa 28 ± 6 óra, de megfigyelési pontok egy kivételével lényegében egy vízszintes vonal mentén sorakoznak fel a hibáikat is figyelembe véve. Ezért a 74P üstökös magjának tengelykörüli forgási periódusa a 2001-es HST megfigyelésekből még nem állapítható meg. A HST megfigyelésekből adódó üstökös mag rádiusz középértéke $2,25 \pm 0,1$ km és a prolate ellipszoid alakúnak feltételezett test a/b félnagy tengely-arány lehetséges legkisebb értéke 1,1.

Licandro és mások (2000) földi megfigyelési idején a 74P üstökös nagy, 4,57 CsE naptávolsága ellenére nagyon aktív volt és fényes kóma vette körül a magját, csak úgy, mint Lowry és mások (1999) 4,61 CsE naptávolságban készített megfigyeléseikor.

Ezért a 74P üstökös magjának rádiuszára csak alsó határt adtak meg: 11,2 km-t, illetve $7,1 \pm 1,1$ km-t, rendre.

6.3.5. 76P/West-Kohoutek-Ikemura

A 76P üstökös a 2001 április 12/13-án készült HST PC2 megfigyelések idején már a Naptól távolodó pályaszakaszán 3,09 CsE naptávolságban, 2,26 CsE földtávolságban és $12,1^\circ$ fázisszögnél volt. Napközelségét 2000 június 1-én érte el 1,60 CsE legkisebb távolságra a Naptól mintegy tíz hónappal a HST megfigyelések előtt. A nyolcból az első hat HST keringésében keringésenként két hosszú expozíció, 1100 s-os felvétel készült az F675W (R) szűrővel. Az utolsó két keringés alatt összesen négy felvétel valamilyen okból (feltehetően rosszul tervezett vagy előkészített földi parancs miatt) 0,5 s túl rövid expozícióval készült és az üstökös tanulmányozására használhatatlan, egy további és jó expozícióval készült felvételen pedig az üstökös magot tartalmazó képelem közvetlen közelében (2 pixelen belül) kozmikus sugárzási részecske nyom keletkezett, ami az üstökös magnak és a mag-körüluli belső kómának a szerkezetét és fotometriáját erősen torzítja, így sajnos ezt a felvételt sem lehetett felhasználni.

A 76P kómája radiális fényességprofil lefutása nem volt kanonikus ($p = -1,07$). Azonban a mag fénye nagyon jó, mintegy 7-szeres kontraszttal különült el a kómától a magot tartalmazó képelem (csúcs-pixel) fényességeket figyelembe véve. A modell radiális fényességprofil illesztése a megfigyelt profilhoz nagyon jó (53. ábra). Teljes fénygörbét sikerült megfigyelni, amelynek alapján a 76P üstökös magjának tengelykörüli forgási ideje $6,6 \pm 1$ óra. A megfigyelésekből az üstökös magjának rádiusza $0,31 \pm 0,01$ km és prolate ellipszoid test alakot feltételezva annak legkisebb félnagy-tengely-aránya 1,45. Megjegyzem, hogy a 76P üstökös magja a kisebb méretűek közé tartozik, mégha a minimális a/b arány miatt elnyúlt is az alakja, ráadásul ez a kis üstökös mag nagyon aktív, ami miatt további megfigyelése fontos.

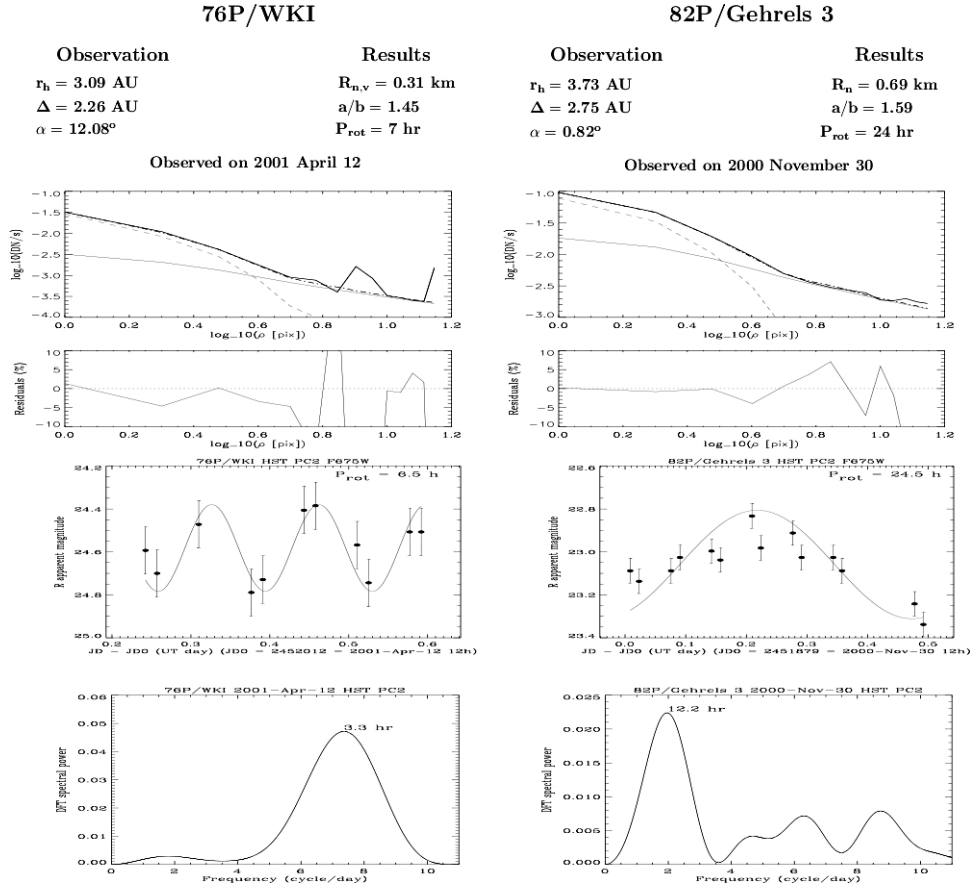
6.3.6. 82P/Gehrels 3

A 82P üstökös a 2000 november 30-án készült HST PC2 megfigyelések idején még a Naphoz közeledő pályaszakaszán 3,73 CsE naptávolságban, 2,75 CsE földtávolságban és $0,8^\circ$ fázisszögnél volt. Napközelségét 2001 szeptember 3-án érte el 3,62 CsE legkisebb távolságra a Naptól mintegy tíz hónappal a HST megfigyelések után.

A nyolc HST keringésből az első hat és az utolsó, nyolcadik keringés során egyenként két 1100 s hosszú expozíció készült, összesen 14 képfelvétel, de a hetedik keringés alkalmával a két kép 0,5 s expozícióval készült, így ezek nem voltak alkalmasak az üstökös tanulmányozására.

A 82P kómája radiális fényességprofil lefutása kanonikus volt ($p = -1$). A mag fénye nagyon jó, mintegy 5-szörös kontraszttal különült el a kómától a magot tartalmazó képelem (csúcs-pixel) fényességeket figyelembe véve. A modell radiális fényességprofil illesztése a megfigyelt profilhoz nagyon jó (53. ábra).

A megfigyelt rész-fénygörbe periodogramja szerint a 82P üstökös magjának lehetséges forgási periódusa 24 ± 5 óra. A 53. ábra alapján – a 6.3.1. pontban leírtakhoz hasonlóan – a 82P üstökös magjának tengelykörüli forgásidejére ez a periódus csak alsó határ. A HST megfigyelésekből adódó üstökös mag rádiusz középértéke $0,59 \pm 0,04$ km és a prolate ellipszoid alakúnak feltételezett test a/b félnagy-tengely-arány lehetséges legkisebb értéke 1,59. Megjegyzem, hogy a 82P üstökös magja a kisebb méretűek közé tartozik, mégha a minimális a/b arány miatt elnyúlt is az alakja.



53. ábra. A HST kilencedik megfigyelési ciklusa (Cycle 9) idején megfigyelt üstökösök PC2 fotometriai megfigyeléseiből meghatározott tulajdonságainak összefoglalása a 76P/West-Kohoutek-Ikemura (76P/WKI) (balra) és 82P/Gehrels 3 üstökösök esetén (jobbra). A részleteket illetően l. még a 51. ábrát (kép: a szerző által készített ábra, l. még Lamy és mások 2011).

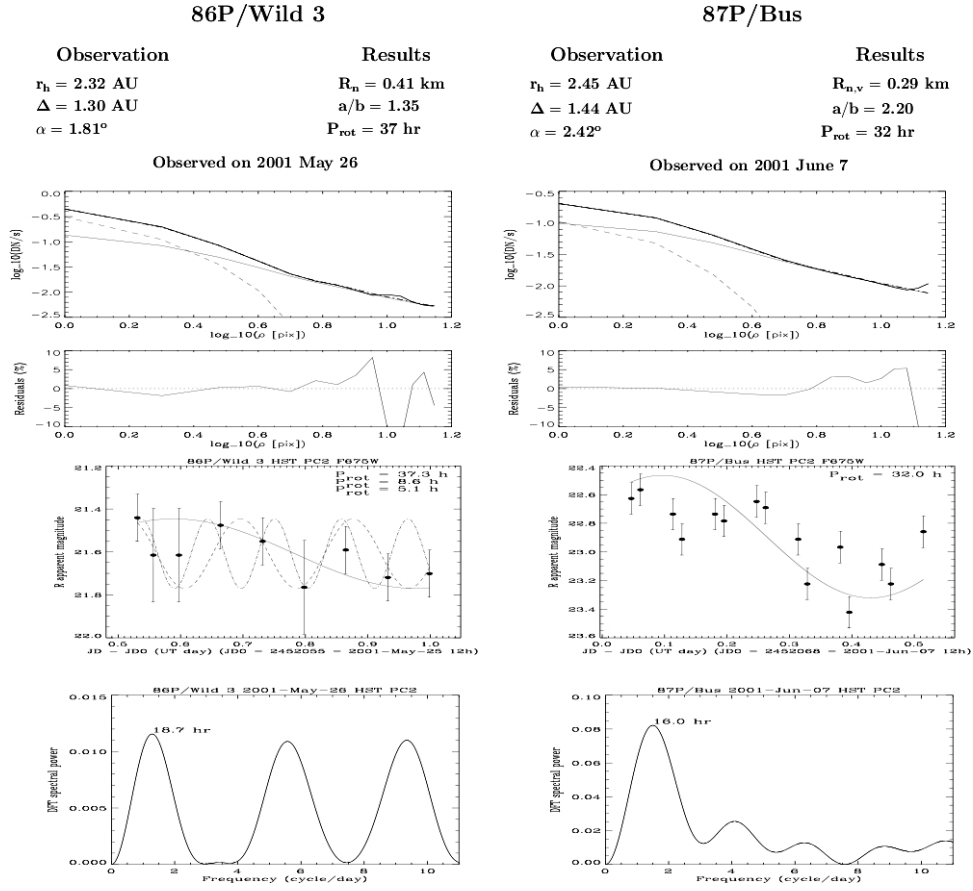
Licandro és mások (2000) földi megfigyelései szerint a 82P üstökös a teljes pályáján aktív. Ezért az üstökösök rádiuszára csak felső határt állapítottak meg, ami 3,0 km.

6.3.7. 86P/Wild 3

A 86P üstökös a 2001 május 26-án készült HST PC2 megfigyelések idején még a Naphoz közeledő pályaszakaszán 2,32 CsE naptávolságban, 1,30 CsE földtávolságban és $1,8^\circ$ fázisszögénél volt. Napközelségét 2001 június 18-án érte el 2,31 CsE legkisebb távolságra a Naptól a HST megfigyeléseket követően egy hónapon belül.

Egy HST keringés alkalmával 5 felvétel készült, a nyolc keringés alatt összesen 40 kép. Egy keringés alatt az 5 felvétel sorrendje a következő volt: F675W (R) 200 s, F555W (V) 200 s, két F439W (B) egyenként 500 s és ismét F675W (R) 200 s expozíciós idővel.

A 86P kómája radiális fényességprofil lefutása a kanonikustól jelentősen eltért ($p = -1.20$). A mag fénye nagyon jó, mintegy 1.5–3-szoros kontraszttal különült el



54. ábra. A HST kilencedik megfigyelési ciklusa (Cycle 9) idején megfigyelt üstökösök PC2 fotometriai megfigyeléseiből meghatározott tulajdonságainak összefoglalása a 86P/Wild 3 (balra) és 87P/Bus üstökösök esetén (jobbra). A részleteket illetően l. még a 51. ábrát (kép: a szerző által készített ábra, l. még Lamy és mások 2011).

a kómaától a magot tartalmazó képelem (csúcs-pixel) fényességeket figyelembe véve. A modell radiális fényességprofil illesztése a megfigyelt profilhoz nagyon jó a képek többségénél (54. ábra). Azonban sok képen, köztük hét F675W (R) szűrővel készült képen nem lehetett a fényességeloszlás modellt pontosan illeszteni az ürteleszkóp nagymértékű berezgése (jitter) miatt és ezeket a képeket ki kellett hagyni az üstökösök fotometria vizsgálatából, illetve a fénygörbéről.

A rész-fénygörbe nem teszi lehetővé az üstökösök forgási periódusának meghatározását, ugyanis a periodogram alapján a következő periódusok lehetségesek a valószínűségük szerinti csökkenő sorrendben: 37 ± 10 óra, $8, 6 \pm 0, 6$ óra és $5, 1 \pm 0, 2$ óra. Egyébként a helyzet nagyon hasonló a 74P esetéhez (l. 6.3.4. pontot), ugyanis a 86P rész-fénygörbe megfigyelési pontjai – azok hibáját is figyelembevéve – egy pont kivételével egy egyenes mentén sorakoznak. Ezért a 2001-es HST megfigyelésekből nem lehet egyértelműen a 86P magjának tengely körüli forgási idejét meghatározni.

A 86P üstökös magjának közepes rádiusza $0,37 \pm 0,01$ km, a prolate ellipszoid alakú test feltételezésével az a/b félnagy-tengelyarány legalább 1,35. Az üstökösök

színindexei $(B - V) = 1,58 \pm 0,08$ és $(V - R) = 0,86 \pm 0,10$ magnitúdó.

A 86P üstökös megfigyelésére földi megfigyelési kísérletek és sikeres megfigyelések is történtek 2000-2001-ben. Lowry & Fitzsimmons (2001) nem figyelték meg a 4,69 CsE naptávolságban lévő 86P üstökösöt adott CCD határmagnitúdóig és ezért csak egy felső határt tudtak megadni a mag rádiuszára, 0,9 km-t. Meech és mások (2004) megfigyelték az üstökösöt és a mag rádiuszára $0,65 \pm 0,03$ km-t határoztak meg. Azonban ezen megfigyelések idején az üstökös fénycentruma (a magot tartalmazó CCD képelem) nagyon közel volt egy fényes háttércsillaghoz, ami jelentősen befolyásolta, torzította az üstökös fotometriai vizsgálatát. Ezért a Meech és mások (2004) által közölt üstökös-mag rádiusz értéke és a mag túlságosan kék színe nem korrekt.

6.3.8. 87P/Bus

A 87P üstökös a 2001 június 7-én készült HST PC2 megfigyelések idején már a Naptól távolodó pályaszakaszán 2,45 CsE naptávolságban, 1,43 CsE földtávolságban és $2,4^\circ$ fázisszögnél volt. Napközelségét 2000 december 29-én érte el 2,18 CsE legkisebb távolságra a Naptól mintegy hét hónappal a HST megfigyelések előtt. A nyolc HST keringés alatt összesen 16 képfelvétel készült, keringésenként egy pár, egyenként 1100 s hosszú expozíciójú felvétel.

A 87P kómája radiális fényességprofil lefutása erősen eltért kanonikustól ($p = -1,20$). A mag fénye jól elkülöníthető az aktív üstökös fényes kómájától annak ellenére, hogy a magot tartalmazó képelem kóma fényesség-járuléka közel azonos a mag fényességjárulékéval. A modell radiális fényességprofil illesztése a megfigyelt profilhoz nagyon jó (54. ábra).

A megfigyelt rész-fénygöréből meghatározott tengelykörüli forgási periódus 32 ± 9 óra realitását alátámasztja az ezzel a periódussal készített fénygörbe illesztés az egyébként csak kis hibával terhelt pontos megfigyelésekhez. A 87P üstökös magjának közepes rádiusza $0,26 \pm 0,01$ km és prolate ellipszoid alakú test feltételezésével az a/b félnagy-tengely-arány legalább 2,2.

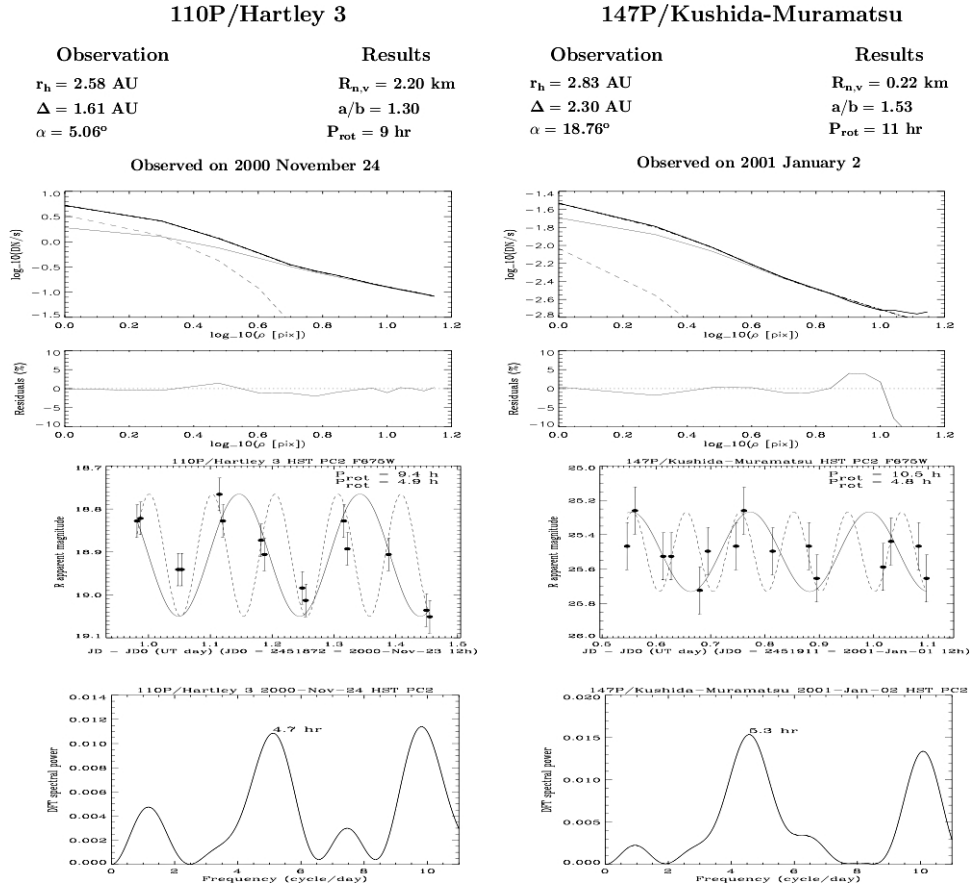
Lowry & Fitzsimmons (2001) földi megfigyeléseik során nem detektálták a 87P üstökösöt, amikor az 4,32 CsE naptávolságban volt és a mag rádiuszára csak felső határt adtak meg, 0,6 km-t, míg amikor már 4,77 CsE naptávolságban a naptávpont (afhélium) közelében volt az üstökös, akkor pedig 3,42 km-t adtak meg a mag rádiuszának felső határára. Meech és mások (2004) sikeresen megfigyelték az üstökösöt, de csak annak kómájáról számoltak be és nem detektálták az üstökös magját. Ezek szerint tehát a 87P üstökös kis méretű magját nem figyelhették meg még nagy földi teleszkópokkal sem 2000-2001-ben, tehát csak a Hubble Űrtávcső tette lehetővé a parányi üstökös-mag fényének közvetlen megfigyelését.

6.3.9. 110P/Hartley 3

A 110P üstökös a 2000 november 24-én készült HST PC2 megfigyelések idején még a Naphoz közeledő pályaszakaszán 2,58 CsE naptávolságban, 1,61 CsE földtávolságban és $5,06^\circ$ fázisszögnél volt. Napközelségét 2001 március 21-én érte el 2,48 CsE legkisebb távolságra a Naptól a HST megfigyeléseket követően négy hónapon belül.

A nyolc HST keringés alatt összesen 40 képfelvétel készült a 110P üstökösről. Egy-egy keringés alatt a következő sorozatban készültek a felvételek, mindegyik 300 s expozíciós idővel: két F675W (R), két F555W (V) és végül egy F675W (R) felvétel.

A 110P kómája radiális fényességprofil lefutása a kanonikustól jelentősen eltért ($p = -1,17$). Azonban a mag fénye nagyon jó, mintegy 1,5-szeres kontraszttal



55. ábra. A HST kilencedik megfigyelési ciklusa (Cycle 9) idején megfigyelt üstökösmagok PC2 fotometriai megfigyeléseiből meghatározott tulajdonságainak összefoglalása a 110P/Hartley 3 (balra) és 147P/Kushida-Muramatsu üstökösök esetén (jobbra). A részleteket illetően l. még a 51. ábrát (kép: a szerző által készített ábra, l. még Lamy és mások 2011).

különült el a kóráétól a magot tartalmazó képelem (csúcs-pixel) fényességeket figyelembe véve. A modell radiális fényességprofil illesztése a megfigyelt profilhoz nagyon jó a képek többségénél (55. ábra). Azonban sok kép, köztük kilenc F675W (R) szűrővel készült képen nem lehetett a fényességeloszlás modellt pontosan illeszteni az űrteleszkóp nagymértékű berezgése (jitter) miatt a model fényesség-profil illesztése a megfigyelésekhez a szokásos 2-5% relatív hibánál nagyobb, mintegy 10%-os pontossággal sikerült csak, de a fotometriai pontosság így is elegendő és a hiba legfeljebb csak néhány század magnitúdó a mag fényességében R-ben.

A 110P üstökös magjának teljes körebefordulásával kapcsolatos fénygörbét sikerült megfigyelni, de a mag forgási periódusa nem határozható meg egyértelműen a megfigyelési pontok időbeli ritka mintavételezése miatt. A forgási periódusra két lehetőség is adódott: $9,4 \pm 1$ óra és $4,9 \pm 0,2$ óra. Mindkét periódussal készített fénygörbe jól illeszkedik a megfigyelési pontokhoz. A 110P üstökös magjának közepes rádiusza $2,20 \pm 0,1$ km és prolate ellipszoid test alak feltételezésével az a/b félnagy tengely-arány legalább 1,3. Az üstökösmag színindexe $(V - R) = 0,67 \pm 0,09$.

6.3.10. 147P/Kushida-Muramatsu

A 147P üstökös a 2001 január 2-án készült HST PC2 megfigyelések idején még a Naphoz közeledő pályaszakaszán 2,83 CsE naptávolságban, 2,30 CsE földtávolságban és $18,8^\circ$ fázisszögnél volt. Napközelségét 2001 április 28-án érte el 2,75 CsE legkisebb távolságra a Naptól a HST megfigyeléseket követően négy hónapon belül.

A nyolc HST keringés alatt összesen 16 képfelvétel készült, keringésenként kettő, egyformán 1100 s expozíciós idővel és F675W (R) szűrővel. A 147P kómája radiális fényességprofil lefutása a kanonikus volt ($p = -1$). Azonban a mag fénye nagyon jó, mintegy 2-szeres kontraszttal különült el a kómáétól a magot tartalmazó képelem (csúcs-pixel) fényességeket figyelembe véve. A modell radiális fényességprofil illesztése a megfigyelt profilhoz nagyon jó a képek többségénél (55. ábra).

A nem elegendően sűrűn mintavételezett fénygörbe periodogramja alapján egy $10,5 \pm 1$ óra a valószínű tengelykörüli forgásidő, de a fénygörbe megfigyelt pontjai alapján $4,8 \pm 0,2$ óra is lehetséges. A 147P üstökös magjának közepes rádiusza $0,21 \pm 0,02$ km és prolate ellipszoid test alakot feltételezve az a/b félnagy-tengely-arány legkisebb értéke 1,53. Az eddigi ismereteink szerint a 147P üstökös magja a megfigyelt legkisebb üstökösmag (eltekintve a szétesett üstökösök még kisebb magtöredékeitől).

7. táblázat. A HST-vel 2000-2001-ben megfigyelt üstökösmagok tulajdonságai

Üstökös	R_{app} (mag)	Δm (mag)	P_{rot} (h)	$\langle r_{n,a} \rangle$ (km)	a/b	$a \times b$ (km $\times$ km)	$r_{n,v}$ (km)	$(V-R)$	$(B-V)$
47P/Ashbrook-Jackson	18.34 ± 0.06	0.40	$16 \pm 8^*$	2.86 ± 0.08	1.44	3.76×2.61	2.95 ± 0.16	0.40 ± 0.08	0.78 ± 0.08
61P/Shajn-Schaldach	22.21 ± 0.07	0.26	4.9 ± 0.2	0.62 ± 0.02	1.27	0.74×0.59	0.64 ± 0.03	–	–
70P/Kojima	19.03 ± 0.06	0.12	U	1.83 ± 0.05	1.10	1.96×1.79	1.84 ± 0.09	0.60 ± 0.09	–
74P/Smirnova-Chernykh	20.81 ± 0.04	0.14	U	2.23 ± 0.04	1.14	2.46×2.16	2.25 ± 0.10	–	–
76P/WKI ^{**}	24.58 ± 0.11	0.56	6.5 ± 0.6	0.30 ± 0.02	1.45	0.40×0.28	0.31 ± 0.01	–	–
82P/Gehrels 3	23.06 ± 0.06	0.58	$24 \pm 5^*$	0.69 ± 0.02	1.59	0.97×0.61	0.71 ± 0.04	–	–
86P/Wild 3	21.61 ± 0.15	0.40	U	0.41 ± 0.03	1.35	0.51×0.38	0.42 ± 0.02	0.86 ± 0.10	1.58 ± 0.08
87P/Bus	22.89 ± 0.11	0.94	32 ± 9	0.27 ± 0.01	2.20	0.49×0.22	0.29 ± 0.01	–	–
110P/Hartley 3	18.91 ± 0.04	0.40	9.4 ± 1	2.15 ± 0.04	1.30	2.61×2.01	2.20 ± 0.10	0.67 ± 0.09	–
			4.9 ± 0.2						
147P/Kushida-Muramatsu	25.50 ± 0.14	0.40	10.5 ± 1	0.21 ± 0.01	1.53	0.29×0.19	0.22 ± 0.01	–	–
			4.8 ± 0.2						

R_{app} : az üstökösmag látszó R magnitúdója a Johnson-Kron-Cousins fotometriai rendszerben

Δm : az üstökös távolsága látszó R_{app} idején

P_{rot} : rotációs periódus, az első adat a legvalószínűbb, ha több is van (*: csak alsó határ, U: nem meghatározható)

$\langle r_{n,a} \rangle$: a mag effektív rádiusza a közepes R_{app} -ból (l. geom. albedó, fázis együttható)

a/b : minimális félnagy-tengely-arány prolate ellipszoid modellre

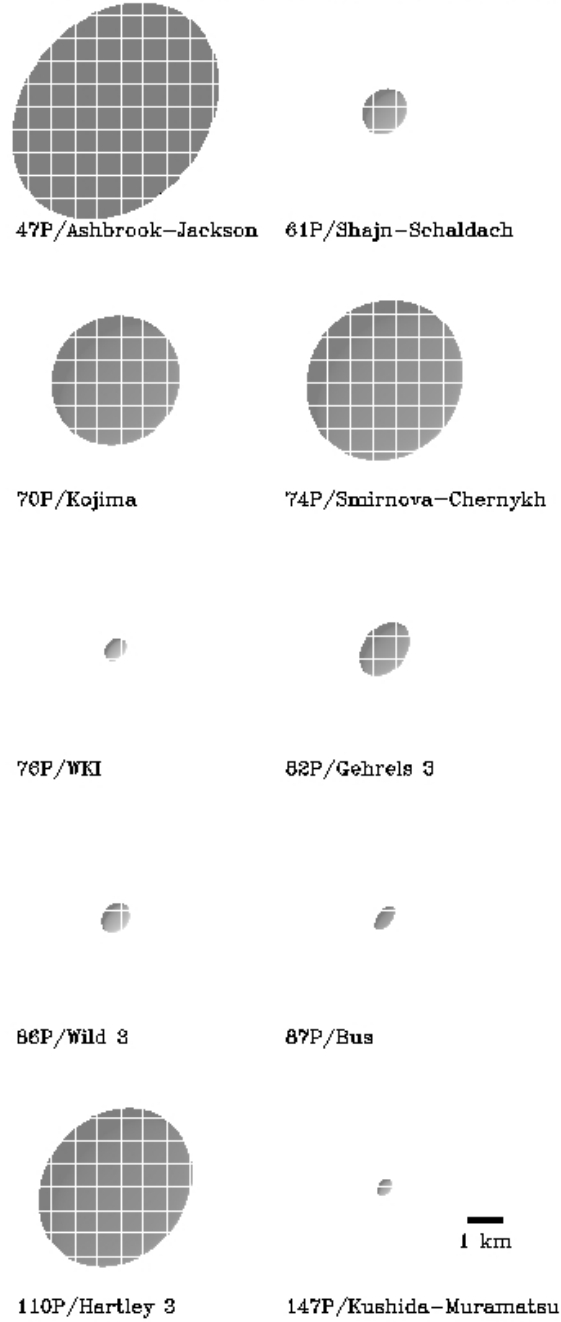
$a \times b$ (km²): a prolate ellipszoid félnagy-tengelyei

$r_{n,v}$: a mag térfogat ekvivalens rádiusza

$(V-R)$, $(B-V)$: a mag színindexei

^{**}76P/WKI: 76P/West-Kohoutek-Ikemura

THE COMETARY NUCLEI DETECTED BY THE HST DURING CYCLE 9



56. ábra. A HST kilencedik megfigyelési ciklusa (Cycle 9) alatt megfigyelt üstökösök méretarányos gömb-modelljei a megfigyelésekből meghatározott effektív rádiusz figyelembevételével. Az ábra érzékelteti, hogy ezek az üstökösök egymáshoz képest milyen méretűek (kép: a szerző által készített ábra, l. még Lamy és mások 2011).

6.3.11. HST 9. megfigyelési ciklusa – rövid összegzés: üstökös-magok mérete, aktivitása, színe és a porkóma színe

A HST 9. ciklusa során megfigyelt 10 üstökös-mag méretét és amelynél van mérés, színindexeit és tengelykörüli forgásidejét vagy annak becsült értékét a 7. táblázat foglalja össze. Érdekességképpen az üstökös-magokat egy méretskálán ábrázolva mutatja be a 56. ábra. Ebben a ciklusban megfigyeltek közül a legnagyobb magja a 47P/Ashbrook-Jackson üstökösnek volt ($r_n = 2,86$ km), a legkisebb pedig a 147P/Kushida-Muramatsu üstökösnek ($r_n = 0,21$ km), ami valóban egy szubkilométeres átmérőjű (0,42 km, vagyis 420 méteres) kis üstökös-mag.

A 7. táblázatból az is kiolvasható, hogy a Nap ($V - R$) $_{\odot} = 0,35$ magnitúdójú színindexéhez képest mennyire "vörösebbek" vagy "kékebbek" a megfigyelt üstökös-magok. A négy, színindex méréssel is rendelkező üstökös-mag közül a "legvörösebb" a 86P/Wild 3 magja, $(V - R) = 0,86 \pm 0,10$, a naphoz képest csak kissé "vörösebb" a 47P/Ashbrook-Jackson magja, $(V - R) = 0,40 \pm 0,08$.

A porkómák normalizált spektrális gradiensének meghatározásakor figyelembe vettem, hogy a B (F439W) szűrő CN, a V (F555W) C_2 sávokat tartalmaz, a R (F675W) a legtöbb esetben mentes a gáz emissziótól, de időnként NH_2 sávokat tartalmazhat. A 47P és 86P kómájára van normalizált reflektivitás spektrum és mindkét esetben a [423, 540] nm-es tartományban a Napénál vörösebb színt mutat, ami megfelel az üstökös-pontra érvényes általános szabálynak (Jewitt & Meech 1986)

A 10 üstökös porkóma fotometriájából meghatározott $Af\rho$ mennyiségek (A'Hearn és mások 1984; és l. még 5.5. pontot) konzisztensek a régebben nagy földi teleszkópokkal ugyanarra az üstökösre kapott értékekkel. A HST 9. ciklusában megfigyelt 10 üstökösre nem volt a megfigyelési időponthoz közeli vízkibocsátási mérés, illetve az A'Hearn és mások (1995) adatait sem használtam az ott szereplő egy-két HST üstökösre, mert túl bizonytalan lett volna a "tipikus" vagy "hiányos" altípusba sorolásuk (l. még 6.2.14. pontot). Sőt, a helyzetet bonyolította volna az, hogy az üstökösök aktivitási szintje más és más perihélium előtt és után és a HST megfigyelésekre nem volt ilyen információ. Ezekre az üstökösökre tehát nem határoztam meg a porkóbocsátás mértékét csak az $Af\rho$ értékeket adtam meg (Lamy és mások 2011).

7. Az üstökös-magok fázisfüggvénye és albedója

Ebben a fejezetben először az üstökös-magok kis fázisszögnél való megfigyelésekor fellépő oppozíciós effektussal foglalkozom az effektus következtében fellépő fényesség növekedés figyelembe vételével és ennek a rádiusz meghatározásához szükséges korrekció kiszámításával. Utána pedig a HST és mások által nagy földi teleszkópokkal végzett megfigyelésekből kapott fázisfüggvény adatokat hasonlítom össze (Lamy és mások 2004). Ezeket az eredményeket tézispontra is összefoglalja.

Korrekciót határoztam meg az 5 foknál kisebb fázisszögeknél végzett fotometriai megfigyelések látszó fényességek korrigálására az oppozíciós effektus figyelembevételére. A probléma ugyanis az, hogy a fázisfüggvény lineáris részének üstökös-magokra általában érvényes β együtthatójával számolt fázisfüggvény halványabb mag fényességet eredményez $\alpha < 5^\circ$, mint a megfigyelt, a fázisfüggvény nem-lineáris szakaszán lévő fényesség. Az oppozíciós effektus korrekciója

$$\Delta m = \Phi_{\text{nonlin}}(\alpha) - \Phi_{\text{linear}}(\alpha), \quad (30)$$

ahol $\Phi_{\text{nonlin}}(\alpha)$ a fázisfüggvény nem-lineáris részének helyettesítési értéke a megfigyelés α fázisszögénél, $\Phi_{\text{linear}}(\alpha)$ a fázisfüggvény lineáris részének értéke ugyanennél a fázisszögnél:

$$\Phi_{\text{linear}}(\alpha) = \Phi_{\text{nonlin}}(5^\circ) + \beta (\alpha - 5^\circ), \quad (31)$$

amelyben az üstökös magokra általánosan érvényes lineáris rész együtthatója $\beta = 0.04$ mag/fok. A fázisfüggvény oppozíciós effektust tartalmazó nem lineáris részét legalkalmasabban az ekliptikai üstökösöket közelről meglátogató helyszíni űrszondák eredményei alapján lehet megkonstruálni.

$$\Phi_{\text{nonlin}}(\alpha) = \Phi_{\text{Hapke}}(\alpha, \omega_0, g, h, B_0, \bar{\Theta}), \quad (32)$$

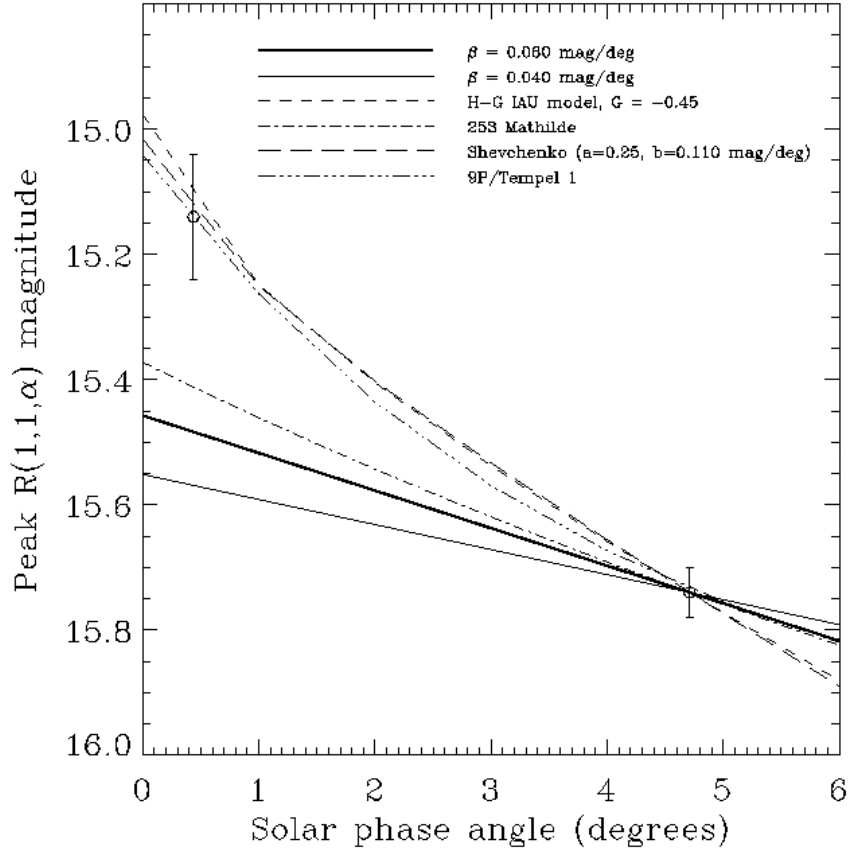
ahol Φ_{Hapke} a légkör nélküli égitestek, köztük az üstökös magok felszínének fényszórási modelljére alkalmas Hapke-féle modell (Helfenstein & Veverka 1989) fázisfüggvénye, amelynek paraméterei ω_0 az egyszeres fényszórási albedó, g a Henyey-Greesntein-féle asszimetria faktor, h az oppozíciós effektus karakterisztikus szélssége, B_0 az oppozíciós effektus teljes amplitúdója. $\bar{\Theta}$ a felszíni makroszkópikus érdesség ("durvaság") paramétere, az átlagos topografikus meredekségi szög,³³. A (32) képlet mögött meglehetősen összetett számítási séma húzódik meg, ezért ennek részleteinek ismertetésétől itt eltekintek, de erről egyébként Helfenstein & Veverka (1989) kitűnő munkája ad részletes összefoglalást. A Deep Space 1 űrszonda 19P/Borrelly üstökös magjának helyszíni megfigyelése alapján Li és mások (2007) által meghatározott Hapke-paramétereket használtam a (32) képletben az oppozíciós effektus korrekcióhoz. A Hapke-paraméterek a következők voltak: $\omega_0 = 0,057 \pm 0,011$, $g = -0,46$, $h = 0,039$, $B_0 = 1,0$ és $\bar{\Theta} = 26^\circ$. Felvethető, hogy mennyire általános érvényűek ezek a paraméterek az ekliptikai üstökösökre. A mai megfigyelési adatok alapján a Naprendszer primitív kis égitestekre ezek tipikus értékek, amit Li és mások (2007) 1. táblázata összefoglal.

Az oppozíciós effektus korrekció alkalmazásával az üstökös mag rádiuszának meghatározása pontosabban végezhető el, mint a korrekció figyelembe vétele nélkül kis fázisszögeknél történt megfigyelések esetén. Az oppozíciós fényességnövekedés eléri a 0,25 magnitudót ($\alpha = 0^\circ$), de a gyakorlatban nincs ilyen fázisszögél megfigyelés, általában $0^\circ < \alpha \lesssim 5^\circ$ fázisszögek fordulnak elő. A rádiuszokban a korrekció csak néhány százalékos, a 82P/Gehrels 3 esetén volt a legnagyobb 6,2%-kal, amikor $\alpha = 0,82^\circ$ volt (Lamy és mások 2004; Lamy és mások 2011).

Az üstökös magok fázisfüggvényének általános vizsgálatát illetően a rendelkezésre álló saját HST megfigyeléseket kiegészítettem a szakirodalomban meglévő, mások által nagy teleszkópokkal végzett földi megfigyelésekkel, amelyekből az üstökös magok fázisfüggvény paramétereire, a fázisfüggvény lineáris részének β együtthatójára, illetve az oppozíciós effektus mértékét jellemző paraméterre megbízható adat áll rendelkezésre van (Lamy és mások 2004, 2007a, 2007b, 2011).

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. A 67P üstökös magjának fotometriai megfigyelései (HST és ESO NTT, Lamy és mások 2007a) jól illeszkednek a 9P/Tempel 1 üstökös magjára Belton és mások (2005) által meghatározott fázisfüggvényhez, ami az ekliptikai üstökösök magjának fotometriai tulajdonságainak hasonlóságára utal (57. ábra). A fotometriai hasonlóság alapján a

³³"Average topographic slope angle of macroscopic roughness" a szakirodalomban, ami a makroszkópikus "lejtők, emelkedők" átlagos meredekségi szöge (domborzat, topográfia).



57. ábra. A 67P/Churyumov-Gerasimenko ekliptikai üstökös magja $R(1,1,\alpha)$ 1 CsE nap- és földtávolságra redukált fényességéből előállított fázisfüggvényének különböző modellekkel való közelítései. A HST megfigyelési pont ($\alpha = 4,6^\circ$), az ESO NTT megfigyelés pedig $\alpha = 0,44^\circ$ fázisszögénél készült (a megfigyelési hibák feltüntetve). Az IAU H-G és Shevchenko (Belskaya és Shevchenko 2000) modellek illeszkednek legjobban a megfigyelési pontokra. Az oppozíciós effektus kis fázisszögeknél dominál, amit a $\beta = 0,40$ és $0,60$ mag/fok lineáris együtthatókhoz tartozó egyenesektől való eltérés is szemléltet. A 67P fázisfüggvénye kitűnő egyezést mutat a 9P/Tempel 1 üstökös magjának fázisfüggvényével (Belton és mások 2005) (kép: a szerző által készített ábra, l. még Lamy és mások 2007).

különböző ekliptikai üstökösök magjainak fotometriai paraméterei első közelítésben azonosnak vehetők, mint például a geometriai albedó és az egyszeres szórásfüggvény paraméterei (ω_0, g), de eltérések lehetnek az oppozíciós effektus mértéke (g, B_0), valamint a felszín simaságában/durvaságában, amit a Θ meredekségi szög fejez le.

Továbbá, azt találtam, hogy a fénygörbe megfigyelések felhasználásával meghatározott fázisfüggvény jól egyezik a légkör nélküli kis égitestek (pl. üstökösök) elméleti fázisfüggvényéhez, mint a csak egyszeri (snapshot) megfigyelési pontokból meghatározott fázisfüggvény (Lamy és mások 2011). 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, eh-

hez hasonló a 45P/Honda-Mrkos-Pajdusaková és 48P/Johnson magja is (Lamy és mások 2004). 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 én 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 (Fernández és mások 2008a,b, 2011). Az üstökösök albedójára kapott eredmények részletesebb vizsgálata még nem fejeződött be, mert az infravörös megfigyelési adatok feldolgozása és közzététele még folyamatban van.

8. Az üstökösök méreteloszlása

Az üstökösök méreteloszlásának meghatározása az űrteleszkópokkal (HST, ISO, majd Spitzer) végzett üstökösök megfigyelések egyik legfontosabb eredménye, amelyet a HST + ISO + földi megfigyelésekre alapozott, illetve a Spitzer megfigyelésekkel foglalkozó egy-egy külön tézispont is összefoglal.

Az objektumok különböző fizikai paramétereinek statisztikus eloszlásának vizsgálatára nagyon alkalmasak a kumulatív eloszlásfüggvények, mert előállításukhoz nem kell binelés, így a szerkezetük nem függ a binelési intervallum hosszától, mint a histogramok esetében. A kis égitestek esetében a luminozitásuk, nevezetesen abszolút fényességük, illetve méretük (rádiuszuk) eloszlását érdemes vizsgálni. A kis égitestek kumulatív luminozitás-függvénye (CLF) és kumulatív méreteloszlásfüggvénye (CSD) a leggyakrabban használt eszköz a populációk statisztikai vizsgálatában. Egy kis égitest abszolút fényessége, abszolút magnitúdója az 1 CsE nap- és földtávolságban zero fázisszög esetén látszó fényessége. A kis égitest kumulatív luminozitás-függvénye megadja adott H_0 abszolút magnitúdónál fényesebb objektumok számát:

$$N_L(H < H_0) \propto 10^{q_L H}, \quad (33)$$

ahol q_L hatványkitevő a kumulatív luminozitás-eloszlásra jellemző paraméter. A rádiuszok kumulatív eloszlásfüggvényét $N_S(r > r_0)$ alakú reprezentációban vizsgáltam, ahol r_0 egy adott rádiusz, N_S pedig az objektumok száma $r > r_0$ méret felett. A kumulatív eloszlásfüggvényt

$$N_S \propto r^{-q} \quad (34)$$

alakban illesztjük a megfigyelésekhez: keressük a legjobban illeszthető hatványfüggvény q kitevőjét. Egyébként az azonos albedójú kis égitestek esetén a CLF és CSD hatványkitevői között fennáll a $q = 5q_L$ összefüggés (Lowry & Weissman 2003). Az ekliptikai üstökösökre eddig meghatározott CLF és CSD hatványkitevőket a 8. táblázat foglalja össze.

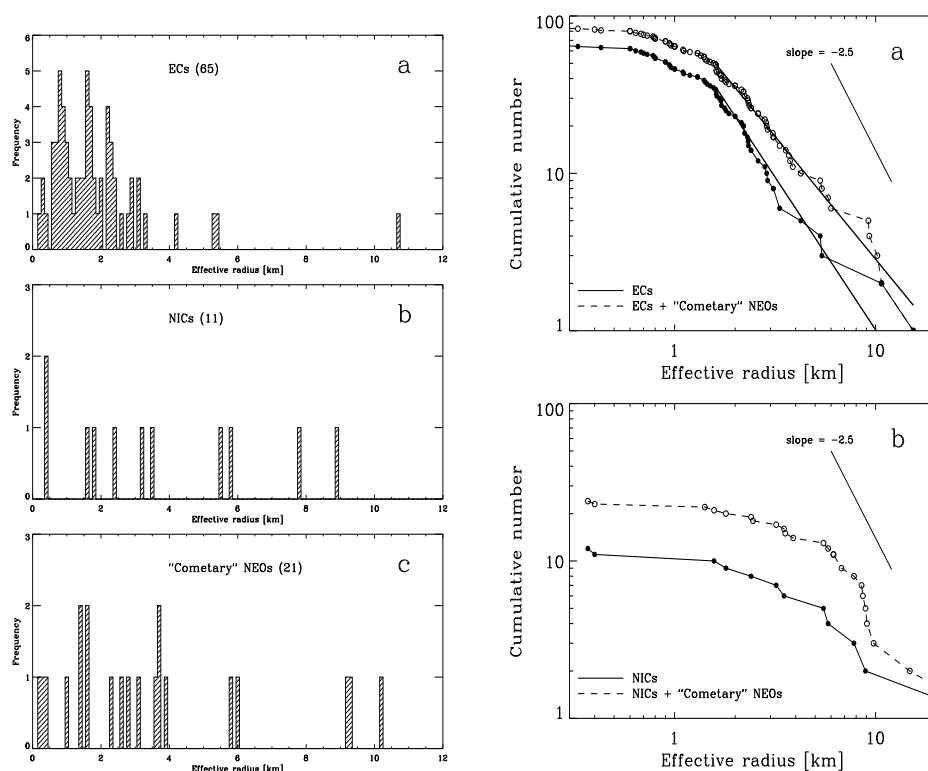
A méreteloszlás q hatványkitevője egyúttal utal az eloszlások lehetséges fizikai magyarázatára is. Ugyanis elméleti megfontolásból (Dohnányi 1969) egy ütközésekből eredő relaxált mintára $q = 2.5$, de az ütközési modell, amelyből ez a kitevő kiadódott még csak aszteroida szerű (közet monolit) testek ütközésén alapult. Azonban a gyakorlatban az üstökösökra a probléma sokkal összetettebb, ma még nem ismert a szerkezetük és az ütközési termékek méreteloszlása (talán a helyszíni űrszondás

vizsgálatok közelebb visznek majd a pontosabb modellezéshez). A 58. ábrán látható, hogy az ekliptikai üstökös-magból kevés a nagy méretű (több kilométeres rádiuszú), továbbá az eloszlás függvény laposabb lesz a mintegy 1.6 km-nél kisebb rádiuszokra. Ma még nem tudjuk, hogy ez a méret határ csupán megfigyelési effektus, azaz nem tudtuk még megfigyelni a kisebb szubkilométeres magok legtöbbszörét, vagy pedig a magok szerkezetével, illetve evolúciójával van összefüggésben. Ugyanis a mag keringési pályája, forgása, kezdeti mérete, alakja, termális tulajdonságai és kémiai összetétele is hatással van az aktivitására, fejlődésére. Az üstökös-magok élettartama annál hosszabb, minél nagyobb méretűek: a több szublimálható anyag hosszabb ideig tart. Egy adott méret alatt a mag belsejében a hővezetés időskálája kisebb, mint a szublimációs időskála. Ennek következtében a mag közepe hamarabb felmelegszik, mint egy nagyobb méretű magé, tehát a kisebb magok aktivitása megnövekszik, gyorsabban veszítik el gáz- és poranyagukat, méretük gyorsan lecsökken, kevesebb lesz a megfigyelhető szubkilométeres üstökös-mag.

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 magjának méreteloszlásának meghatározása és az üstökösök ezen két alcsoportja méreteloszlásának összehasonlítása céljából (Lamy és mások 2004). A HST és ISO ekliptikai üstökös méréseink ezidáig legpontosabb, nagy és homogén mintája biztosítja a méret szerinti eloszlásfüggvény megbízhatóságát. A HST és más 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.

Az üstökösök méreteloszlásának meghatározására irányuló vizsgálataim eredményeként a HST, ISO és megfelelően pontos, földfelszíni teleszkópokkal meghatározott üstökös-mag méret eloszlásokat mutat be az 58. ábra, ezen különválasztva az ekliptikai és az Oort-felhő üstökösöket. Ugyanezen az ábrán az üstökös mintához hozzávettem az üstökös eredetűnek tartott (inaktív) földközeli aszteroidák méret adatait is. Az 58. ábrán az is látszik, hogy a megfigyelt ekliptikai üstökös-magok rádiusza 0,2–15 km közötti, az Oort-felhővel kapcsolatos megfigyelt üstökös magok rádiusza 1,6–37 km közötti. Látszik az is, hogy az Oort-felhő üstökös-magjaira kapott méreteloszlás rosszul meghatározott, mert még túl kevés megfigyelési adat van az üstökösök ezen csoportjára nem úgy, mint az ekliptikai üstökösökre.

A rádiuszok kumulatív eloszlásfüggvényének hatványkitevőjét q és a CSD függvényben meglévő töréspont r_c rádiusznál lévő helyzetét a (34) képlet alapján analitikusan ismert alakú eloszlásfüggvényre alkalmazott Kolmogorov-Szmirnov teszttel határoztam meg (Lamy és mások 2004). Ezzel a módszerrel a töréspont helyzetére $r_c = 1,6$ km-t, valamint a csak az ekliptikai üstökösöket tartalmazó mintára $r > 1.6$ km méretekre $q = 1.9 \pm 0.3$ kaptam. Kiegészítve ezeket a földközeli üstökös-aszteroidákkal a kitevőre $q = 1.6 \pm 0.2$ adódott. A CSD és CLF hatványkitevők különböző kis égitest populációra a 9. táblázat segítségével hasonlíthatók össze. Összehasonlításképpen, a 20 km-nél nagyobb rádiuszú Kuiper-öv objektumokra a különböző megfigyelési adatok alapján $q = 3.20 \pm 0.10$ és 3.15 ± 0.10 , az ismert kentaurok-ra $q = 2.70 \pm 0.35$, illetve $q = 3.0$, az összes ismert földközeli aszteroidára pedig $q = 1.75 \pm 0.10$ és 1.96 értékeket adnak meg. A Kuiper-öv objektumok és kentaurok esetében a q közel azonos, ezek az objektumok valószínűleg evolúciós kapcsolatban állnak egymással. Arra a következtetésre jutottam, hogy ma még nehezebb megtalálni a kapcsolatot a Kuiper-öv – kentaurok – ekliptikai üstökös evolúciós teljes láncon, mert míg a Kuiper-öv objektumok és kentaurok közül csak a nagyobbakra (20–50 km



58. ábra. A jobb oldalon: az ekliptikai üstökösök (EC) (a), az Oort-felhővel kapcsolatos üstökösök magjának (b), valamint a földközeli objektumok (NEO) rész-populációját alkotó inaktív üstökösök (c) méreteloszlása hisztogram reprezentációban. A bal oldalon: az ekliptikai üstökösök, illetve ezek kiegészítve az inaktív üstökös NEO populáció adataival kumulatív eloszlásfüggvény reprezentációban. A rádiusz adatok a HST, ISO, valamint válogatott földi megfigyeléseken alapulnak, illetve néhány esetben helyszíni űrszondák adatait tartalmazzák. Mivel az Oort-felhővel kapcsolatos Hale-Bopp üstökös kivételesen túl nagy méretű a magja, ezért nem szerepel itt a 12 km-es rádiusz a határú az ábrákon (kép: a szerző által készített ábra, l. még Lamy és mások (2004)).

rádiuszra) van statisztikai minta, addig az ekliptikai üstökösökre csak a kilométeres – szubkilométeres tartományra (Lamy és mások 2004). A jövő nagy csillagászati átvizsgáló programjaitól (Pan-STARRS, LSST) reméljük, hogy a külső Naprendszerben, a kentaur és transzneptun régiókban a kisebb, kilométeres mérettartományra is kiterjeszthető lesz a méreteloszlások vizsgálata.

Fontos eredménynek tartom, hogy csak a HST megfigyelések mutatták ki a kilométeresnél kisebb üstökösöket és ezek eredeti, vagyis nem derabjaira szétesett ekliptikai üstökös magjai. Átmérőben tehát ezek szubkilométeres kis üstökösök és nem üstökösök szétesési törmelékei, amik természetesen kisebbek is tudnak lenni. A 65 ekliptikai üstökösök közül csak 5 mag rádiusza nagyobb 5 km-nél, a többi a kisebb, sok esetben a kilométer alatti tartományba esik. A kumulatív méreteloszlás hatványfüggvénnyel jól leírható a rádiuszban 1,6 km-nél nagyobb magokra $q = 1,9 \pm 0,3$ hatványkitevővel. Az 1,6 km egy választó határ rádiusz, amelynél kisebb rádiuszokra

8. táblázat. Az ekliptikai üstökösök kumulatív luminozitás függvénye és a kumulatív méreteloszlás-függvénye hatványkitevői

Referencia	CLF	CSD
J. Fernández és mások (1999)	$0,53 \pm 0,05$	$2,65 \pm 0,25$
Lowry és mások (2003a)	$0,32 \pm 0,02$	$1,6 \pm 0,1$
Meech és mások (2004)	–	2,5*
Weissman and Lowry (2003)	$0,32 \pm 0,01$	$1,59 \pm 0,03$
Weissman (közlése 2003)	$0,36 \pm 0,01$	$1,79 \pm 0,05$
Ebben a munkában	$0,38 \pm 0,06$	$1,9 \pm 0,3$

*Monte Carlo szimulációból és a kis rádiuszok levágásával.

9. táblázat. Különböző kis égitest populációk kumulatív méreteloszlás-függvényének és luminozitás függvényének hatványkitevője

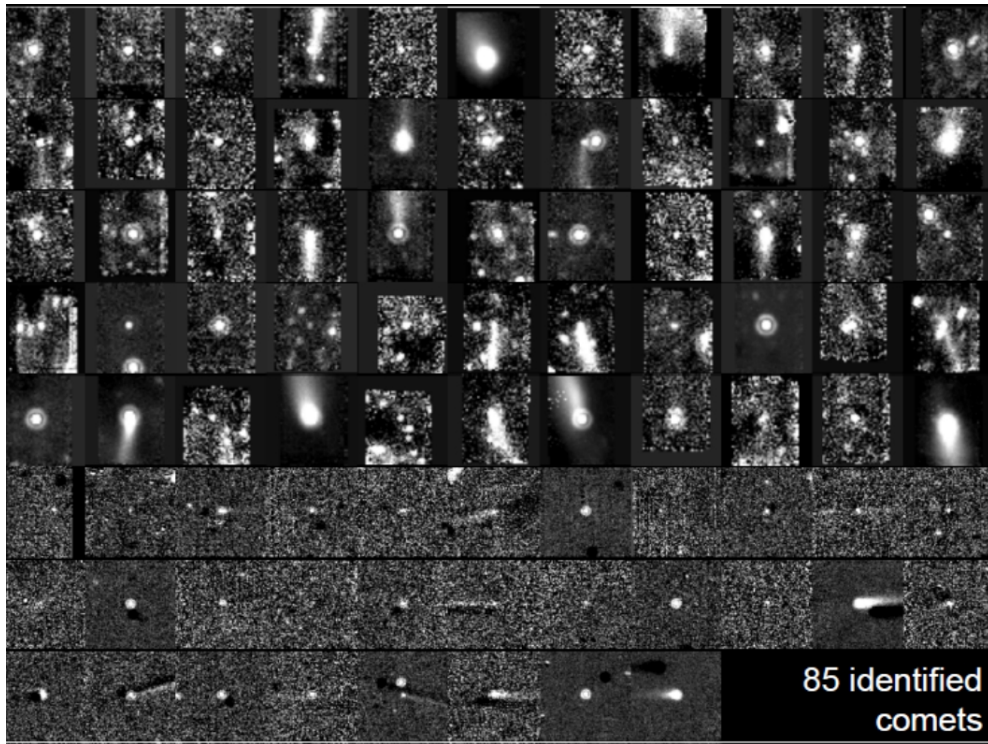
Populáció	CSD	CLF	Referencia
KBOs ($r > 20$ km)	3,45	0,69	Gladman és mások (2001)
	$3,20 \pm 0,10$	$0,64 \pm 0,02$	Larsen és mások (2001)
	$3,15 \pm 0,10$	$0,63 \pm 0,06$	Trujillo és mások (2001)
Centaurs	$2,70 \pm 0,35$	$0,54 \pm 0,07$	Larsen és mások (2001)
	3,0	0,6	Sheppard és mások (2000)
ECs	$1,9 \pm 0,3$	$0,38 \pm 0,06$	Ebben a munkában
ECs + "cometary" NEOs	$1,6 \pm 0,2$	$0,32 \pm 0,04$	Ebben a munkában
NEOs	$1,75 \pm 0,10$	$0,35 \pm 0,02$	Bottke és mások (2002)
	1,96	0,39	Stuart (2001)
Fő-öv aszteroidák	1,25–2,80	0,25–0,56	Jedicke & Metcalfe (1998)

a kumulatív eloszlásfüggvény kisebb meredekségű, mint a nagyobb rádiuszokra kapott és a kis méretű magok hiányát jelzi. A kis méretű üstökösök hiányának magyarázatára a következőket javasolom: 1) megfigyelési bias, azaz műszereinkkel még nem figyelhetjük meg a kis üstökösöket; 2) fejlődési effektus, vagyis az üstökösök hosszú idő alatt jelentős tömeget veszítenek gáz és poranyag formájában, ami méretcsökkenést eredményez; 3) valódi deficit van kis méretű üstökösökből, de ez utóbbi nem valószínű, mert szétesett ekliptikai üstökösök magtöredékei kilométer alattiak és több napközelséget is túlélhetnek, tehát megfigyelhetők. Az első két lehetőséget tartom valószínűnek, akár mindkét eset egyidejű érvényességével. A ekliptikai üstökösöket kiegészítve az ismert rádiuszú földközeli inaktív ekliptikai üstökösökkel, akkor az 1,6 km-nél nagyobb objektumokra $q = 1,6 \pm 0,2$ hatványkitevő érvényes. Az aktív és inaktív ekliptikai üstökösökre kapott hatványkitevők (1,9 és 1,6) a hibahatárait is figyelembe véve jelentősen eltérnek a monolitikus testek relaxált ütközési populációja elméleti kumulatív méreteloszlásfüggvénye 2,5 kitevőjétől, valamint a kentaurok $2,70 \pm 0,35$ és a 20 km-nél nagyobb Kuiper-öv objektumok $3,15 \pm 0,10$ kumulatív méreteloszlás kitevőjétől, de az ekliptikai üstökösök méreteloszlását leíró kitevővel egybeesnek a földközeli objektumokra két különböző vizsgálatból kapott

$1,75 \pm 0,35$ és $1,96 \pm 0,39$ kitevők. 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 méreteloszlásfüggvénye közel 2 körüli hatványkitevőjének. E szerint: 1) az ekliptikai üstökösök fejlődése során végbement tömegvesztés és méretcsökkenés lehet; 2) az üstökösök építóblokkokból épülnek fel és az ilyen testek egymással való ütközési termékeinek relaxált populációjának kumulatív méreteloszlása az O'Brien & 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 megfigyelések és a válogatott földi megfigyelésekkel kibővített ekliptikai üstökösök megfigyelési adatokból álló minta volt a legnagyobb megbízható minta az üstökösök méreteloszlásának meghatározására (Lamy és mások 2004), azonban a NASA Spitzer infravörös űrteleszkópjával folytatott SEPPCoN program során még ennél is nagyobb megfigyelési anyagból sikerült meghatároznom az ekliptikai üstökösök méreteloszlását (Fernández és mások 2008a,b, 2011). A Standard Hőmodellt alkalmaztam és $0,04$ albedót feltételeztem. Az így kapott üstökösök rádiuszok kumulatív eloszlásfüggvénye jól egyezik a korábban a látható fénytartományban végzett megfigyelésekből leszámaztatottal. 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 & Greenberg (2003) által modellezett méreteloszlásával. Az üstökösök termofizikai paramétereit nem én határoztam meg, mert azok meghatározására a Standard Hőmodellnél összetettebb modell áll rendelkezésre. Ebben a 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.

9. Az ekliptikai üstökösök megfigyelése a SEPPCoN programban

Új módszert dolgoztam ki az üstökösök infravörös megfigyelésének kiértékelésére, a mag infravörös fluxusának meghatározására, elválasztva a mag által adott infravörös sugárzását az infravörösben is fényes kómaétól (5.3. és 5.2. fejezetek). A módszer kifejlesztése még az ISO által történt üstökös megfigyelések idején történt, majd a Spitzer űrteleszkóppal folytatott megfigyelésekre is alkalmaztam a megfelelő módosításokkal (pl. a PSF, valamint az infravörös fluxus kalibrációk figyelembe vételével). A termális infravörös tartományban végzett üstökös megfigyelésekből meghatároztam több ekliptikai és néhány Oort-felhővel kapcsolatos üstökösök infravörös fluxusát az ESA Infravörös Űrobszervatóriuma (ISO) és a NASA Spitzer űrtávcsőve megfigyelései alapján. Az ISO üstökös megfigyelési eredményeit már az előző fejezetekben ismerttettem



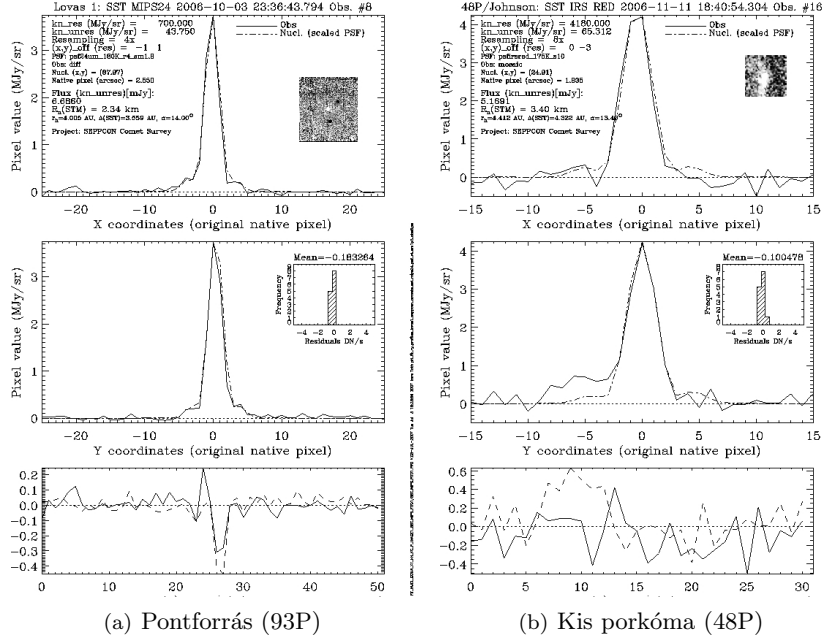
59. ábra. A Spitzer űrteleszóppal a SEPPCoN üstökösmegfigyő program során azonosított 85 üstökös. Felül lefelé öt sorban az IRS detektorral, az alsó három sorban pedig a MIPS detektorral (24 mikronon) megfigyelt üstökösök láthatók. Vannak pontforrás-üstökösök (üstökösmagok), csak gyenge porkómát kifejlesztett üstökösmagok, illetve erős, zavaró porkómával körülvett üstökösmagok is (kép: a kis mozaikok a mag/kóma szétválasztási procedura során a szerző által elkészítve, majd Fernández és mások (2008a,b, 2011), valamint Kelley és mások (2008), illetve újabb, megjelenés alatt álló publikációkban közzétéve).

(1. a 6. és 8. fejezeteket).

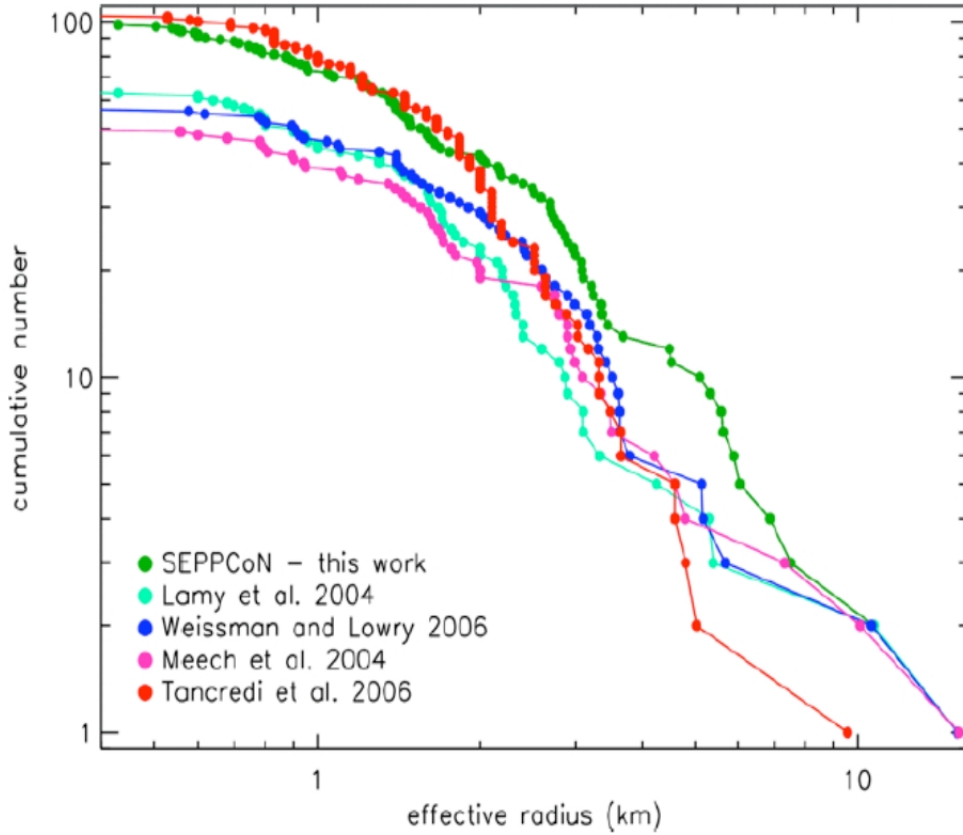
Megemlítem, hogy a SEPPCoN programon kívül, de s Spitzer űrtávcsővel az ESA Rosetta üstökösszondájának cél-üstökösét (1. még 6.1.7. pontot is), a 67P/Churyumov-Gerasimenko üstökösét is megfigyeltem 2004-ben és meghatároztam az üstökösmag méretét és az infravörös fluxus-görbét is megszerkesztettem (Lamy és mások 2006, 2007b, 2008a). Azonban az üstökösmagnak a kómától, sőt az üstökös nagy kiterjedésű és fényes infravörös porösvényétől – vagyis a hosszan elnyújtott porcsóva-rész az üstökös pályája mentén, való szétválasztása új kihívást jelentett az infravörösben készített üstökösmegfigyelések feldolgozásában. Ezért a nagyon aktív és az egész detektor területet kitöltő, kiterjedt porkómájú (kiterjedt porösvényű) 67P/CG üstökösre a kiterjedt porkóma, mint termális infravörös háttér levonására speciális módszert kifejlesztettem ki (Lamy és mások 2007b, 2008a).

A NASA Spitzer űrteleszkójjal folytatott SEPPCoN üstökösmegfigyelési programban általam elért eredményeket külön tézispont foglalja össze.

Az üstökösmag és a kóma fényének szétválasztására a HST megfigyelések esetében alkalmazott eljárást a termális infravörös detektorokra megfelelően módosítottam, ami az infravörös detektor pont szórási függvénye (PSF) sajátosságainak figyelembevétel-



60. ábra. A Spitzer űrteleszkóppal a SEPPCoN programban a termális infravörösben megfigyelt üstökösökre egy-egy példa a porkóma infravörös fényének erőssége alapján: pontforrás, vagyis a porkóma elhanyagolható (93P/Lovas 1) (a), minimális porkóma (48P/Johnson) (b), közepes porkóma (37P/Forbes) (c) és erős porkóma (22P/Kopff) (d). Az egyes paneleken felül és középen az (X), illetve (Y) fényességprofilok az vannak az üstökösmagot tartalmazó képelemen keresztül, az alsó kis paneleken az (X) és (Y) profilok illesztési reziduáljai láthatók (kép: a szerző által készített ábrák, l. még Fernández és mások 2008a,b, és 2011, előkészületben)).



61. ábra. A SEPPCoN infravörös üstökösmegfigyelési program eredményeként kapott ekliptikai üstökösmag kumulatív méreteloszlásfüggvény (zöld). Összehasonlításként korábbi jelentős, földi teleszkópokkal folytatott üstökösmag megfigyelési programokban kapott kumulatív méreteloszlás függvények is szerepelnek: Weissman és Lowry (2006), Meech és mások (2004), Tancredi és mások (2006). A SEPPCoN görbén a ~ 5 km – 8 km közötti rádiusz tartományban váratlanul viszonylag sok üstökösmag van (kép: a HST CSD, valamint a SEPPCoN üstökösmag infravörös fluxusok és STM rádiuszok meghatározása a szerző munkája, továbbá Lamy és mások 2004; a többi függvény eredete: Fernández és mások 2008, (2011, előkészületben)).

lét jelenti (Lamy és mások 2002; Groussin és mások 2004; Lamy és mások 2004; Fernández és mások 2008a,b, 2011).

A SEPPCoN program üstököseinek a Spitzer űrteleszkóp IRS és MIPS detektoraival készült infravörös képfelvételeit a 59. ábra mutatja be (88 ekliptikai üstökös megfigyelésből 85 üstököst). A megfigyelt üstökösök négy nagyobb csoportba oszthatók a porkóma infravörös fényességjárulékának nagysága szerint néhány példát is megemlítve:

1. Nagyon minimális a porkóma, az üstökösmag szinte pontforrásnak mutatkozik: 7P/Pons-Winnecke, 14P/Wolf, 93P/Lovas (93P/Lovas 1)³⁴.

³⁴Comet Lovas 1980 p = P/1980 X1 = P/1989 XIII = P/1989 N2: Lovas Miklós fedezte fel 1980. december 5,06 UT-kor készült fotografikus felvételen az MTA Csillagvizsgáló Intézete piszkéstetői obszervatóriuma 60/90/180 cm-es Schmidt-teleszkópjával folytatott szisztematikus szupernóvakeresőprogramja során. Az üstököst 1989-ben ismét megfigyelték, ekkor végleges elnevezést kapott.

2. Kis porkóma: 48P/Johnson, 62P/Tsuchinshan (62P/Tsuchinshan 1), 118P/Shoemaker-Levy (118P/Shoemaker-Levy 4), P/2005 K3 (McNaught 4).
3. Közepes porkóma: 37P/Forbes, 119P/Parker-Hartley, 121P/Shoemaker-Holt (121P/Shoemaker-Holt 2), P/2004 H2 (Larsen 3).
4. Nagyon sok por (erős porkóma), a mag infravörös fénye nehezen különíthető el a kómaétól: 22P/Kopff, 32P/Comas Solá, 74P/Smirnova-Chernykh, P/2004 A1 (LONEOS 8).

A fenti kóma erősségek szerinti esetekre egy-egy példát mutat be a 60. ábra.

Az üstökösök 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 a magok rádiuszát a két különböző módszerrel kapott eredmények összehasonlítása céljából (l. példaként Groussin és mások 2004). Azt találtuk, hogy az egyszerű Standard Hőmodellel és az új modellel kapott rádiuszok közötti relatív eltérés 5-15%, ami azt is jelenti, hogy az üstökösökra 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 (Jorda és mások 2000; Lamy és mások 2002; Groussin és mások 2009). A 22P/Kopff, 46P/Wirtanen, 67P/Churyumov-Gerasimenko és 103P/Hartley 2 ekliptikai üstökösök termális infravörös tartományban történt megfigyelése több NASA és egy ESA űrprogram előkészítését is segítette. A NASA Spitzer Űrteleszkópjával a termális infravörösben végzett nagyszabású üstökös megfigyelési SEPPCoN (Survey of Ensemble Physical Properties of Cometary Nuclei) program keretében 2006-2007-ben 88 ekliptikai üstökös magjának infravörös fluxusát határoztam meg elválasztva az üstökösök magját a többiségében aktív üstökös porkómájának infravörös sugárzásától. Az üstökösök rádiuszát a Standard Hőmodell (STM) alkalmazásával határoztam meg. Eddig ez a legnagyobb homogén megfigyelési anyag az ekliptikai üstökösök infravörös fotometriájára, méretére és albedójára (Fernández és mások 2008a,b, 2011).

Az egyéni eredményeket adó munka után és a kapott eredmények integrálása céljából SEPPCoN üstökösök méret meghatározás eredményeit munkacsoportban elemeztük. A SEPPCoN infravörös üstökös megfigyelési program eredményeként kapott ekliptikai üstökösök kumulatív méreteloszlásfüggvényét mutatja be a 61. ábra (Fernández és mások 2008a,b, 2011) és a CSD hatványkitevője $q = 1,9$, amivel jól egyezik a korábban a HST + ISO + válogatott földi megfigyelési adatokból kapott $1,9 \pm 0,3$ kitevő (l. 8. fejezetet és a 8. táblázatot). Összehasonlítás végett a 8. táblázatban korábbi jelentős, földi teleszkópokkal folytatott üstökösök megfigyelési programokban kapott kumulatív méreteloszlás függvények is szerepelnek: Weissman & Lowry (2006), Meech és mások (2004), Tancredi és mások (2006). A SEPPCoN ekliptikai üstökösök CSD görbe hullámos szerkezetet mutat a közepes vagy annál nagyobb rádiuszokra (5–8 km között). A SEPPCoN CSD görbén a ~ 5 km – 8 km közötti rádiusz tartományban váratlanul viszonylag sok üstökösök van: 10 ilyen nagyobb méretű üstökösöt találtam, a munkacsoport ezen felül arra következtetett, hogy az ekliptikai üstökösök populációját 4-5 km rádiusz alatt még nem ismerjük teljesen.

10. Az üstökösök színe és az ekliptikai üstökösök eredete

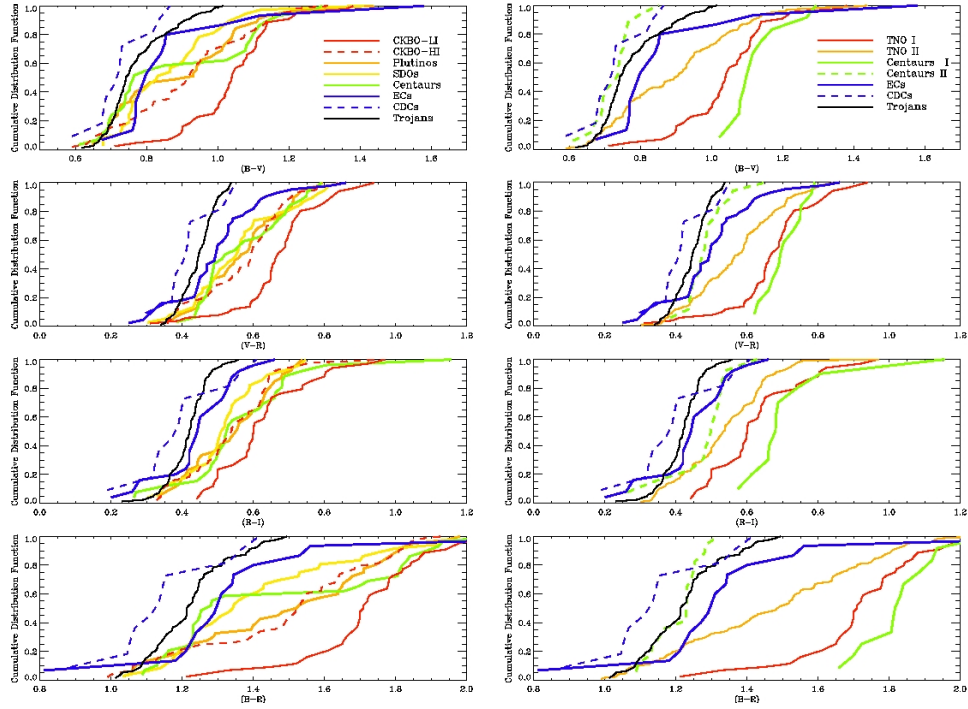
Az ekliptikai üstökösök magjának csillagászati standard szélessávú fotometria színindexeit a Johnson-Kron-Cousins fotometriai rendszerben, valamint ezeknek az üstökösöknek lehetséges őseinek tekinthető primitív kis égitest-típusoknak hasonló fotometriai színindexeit statisztikai módszerekkel összehasonlítottam az ekliptikai üstökösök lehetséges forrásvidékeinek azonosítása céljából (Toth & Lamy 2000; Lamy és mások 2004; Lamy & Toth 2009).

A vizsgálat fizikai alapját az adja, hogy a Naprendszer külső vidékein a kialakulásuk óta a Nap körül keringő légkör nélküli kis égitestek felszínét akadálytalanul érő kozmikus sugárzás vörös színű polimerizált szerves anyagokból álló kérget hoz létre és amikor ezek a kis égitestek pályabeli fejlődésük során egyre beljebb kerülnek a Naphoz a bennük lévő szublimációra képes illékony anyagok szublimációjának következtében üstökös aktivitást mutatnak. Ennek következményeként a Naphoz képest egyre kékebb vagy semleges lesz a színük, ami jelzi fejlődési állapotukat. Az eredeti vörös színüket lényegében a ma megfigyelt színindexnek egy konstanssal való korrekciójával vissza-korrigálva kaphatjuk meg. Az így kapott színeloszlásnak meg kell egyeznie a valódi ős-égitest csoport ma megfigyelhető színeloszlásával. Tehát amennyiben az ekliptikai üstökösök színeloszlását egybevetjük a különböző jelölt ős-égitest csoportjaikkal, a legjobb egyezés valószínűsíti evolúciós kapcsolatukat. Ehhez a vizsgálathoz azonban minél több megbízhatóbb fotometriai színindexekre van szükség.

A HST-vel végzett üstökösök megfigyelési anyag jó alapot nyújtott ehhez. A HST pontos fotometriai adatait kiegészítettem az irodalomban rendelkezésre álló válogatott, jó minőségű földi megfigyelésekből kapott színindex adatokkal. Összehasonlítás céljából az Oort-felhővel kapcsolatos üstökösökra rendelkezésre álló színindex adatokat is összeválogattam. Az üstökösök színindex adatai, azok forrásai részletesen Lamy és Toth (2009) munkájában találhatók. Így összesen 51 üstökösökből álló mintát sikerült összeállítani, amelyben 44 ekliptikai üstökös és 7 Oort-felhővel kapcsolatos üstökös szerepel.

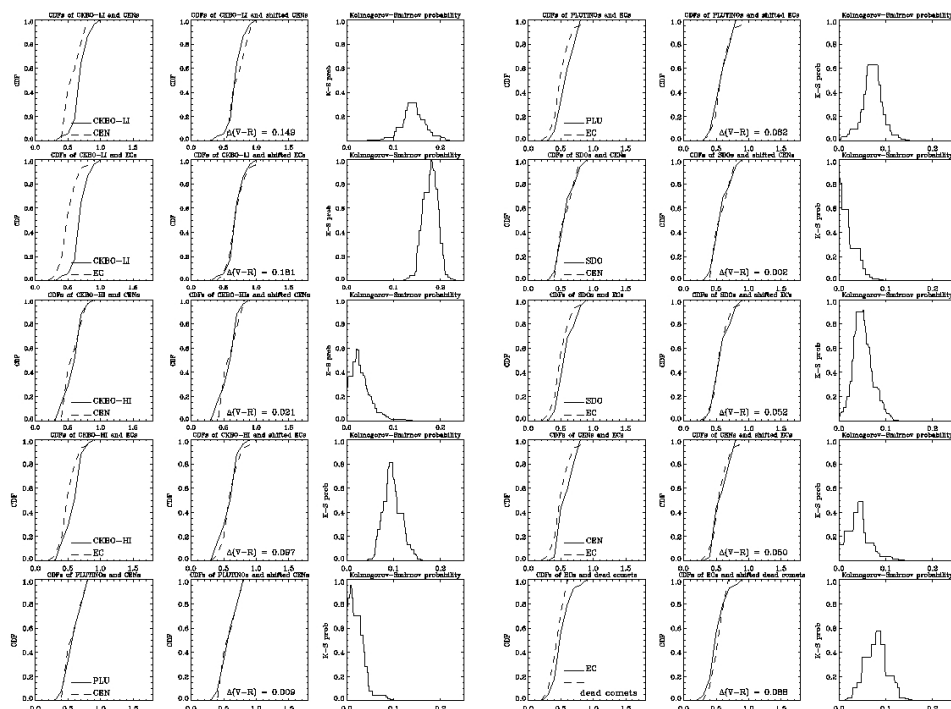
Üstökösökön kívül különböző dinamikai populációkhoz tartozó objektum földi megfigyelésekből rendelkezésre álló színindexeit is összegyűjtöttem: Neptunuszon-túli objektumét és kentaurét, összesen 232 objektumét. A külső Naprendszer primitív égitestjeinek mintáját még 85 Jupiter-trójai kisbolygóval is kiegészítettem, amelyekre földi fotometriai színindex adatok vannak. A Neptunuszon-túli régióból klasszikus Kuiper-öv objektumok alacsony inklinációjú (CKBO-LI), illetve nagy pályahajlású (CKBO-HI) alcsoportjait különválasztottam: 59 CKBO-LI, 52 CKBO-HI. A transz-neptun-zónában megkülönböztettem a rezonáns Kuiper-öv objektumokat (49 plutínó), valamint Szórt-Korong objektumokat (40 SDO) is. A 32 kentaurt két alcsoportra osztottam a $(B-R)$ színindexben fennálló bimodalitás alapján CEN-I ($(B-R) > 1,7$, "vörös") és CEN-II ($(B-R) < 1,4$, "kék") jelöléssel. Az ekliptikai üstökösök lehetséges végállapotának feltételezett 12 földközeli objektumot is hozzávettem a vizsgált mintához. A Naprendszer ezen primitív kis égitestjei színindex adatait, azok forrásait Lamy & Toth (2009) munkája ismerteti.

A 62. ábra a primitív kis égitestek különböző osztályai megfigyelt színindexeinek kumulatív eloszlásfüggvényeit mutatja. Az ábrán a Kuiper-öv objektumok pályabeli gerjesztettségének mértéke alapján különválasztott két alcsoportja (CKBO-LI és CKBO-HI) különválasztva szerepel (1. még a 3.2. pontot is). Érdekes a következő őslészármazott eredet/evolúciós kapcsolatok lehetőségét megvizsgálni: plutínó-kentaur,



62. ábra. Kumulatív szín eloszlásfüggvények a primitív kis égitest osztályok $(B-V)$, $(V-R)$, $(R-I)$ és $(B-R)$ színeire. A bal oldali ábrán a Kuiper-öv objektumok CKBO-LI és CKBO-HI alcsoportjai szétválasztva szerepelnek, de a kentaurok egy csoportot alkotnak és nincsenek a szín alapján két csoportra, a "vörös" és "kék" kentaurokra szétválasztva, mint az a jobb oldali ábrán látható. A jobb oldali ábrán a transzneptun-objektumok egy másik csoportosításban szerepelnek: TNO-I a CKBO-LI alcsoport, de a TNO-II csoportba a CKBO-HI, plutinó és SDO osztályokat egy csoportba vontam össze. Egyéb rövidítések (l. még a 3.2. pontot is): SDO – Szórt Korong Objektum, EC – ekliptikai üstökös, CDC ("candidate dead comet") – inaktív üstökös-aszteroid földközeli objektum (NEO) (forrás: a szerző által készített ábra, l. még Lamy és Toth (2009)).

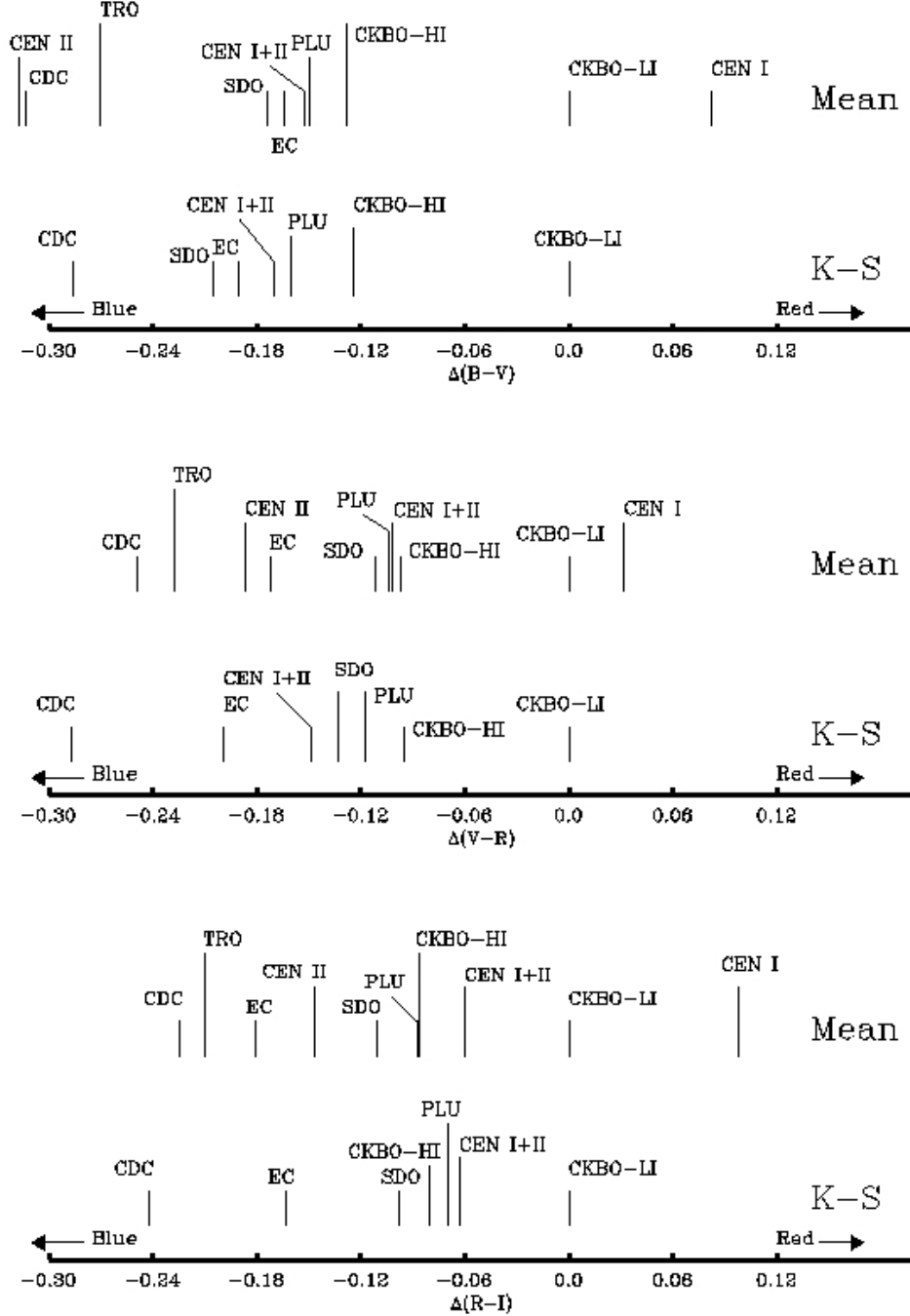
SDO-kentaur, CKBO-HI-kentaur. Ezért az ábra másik részén a transzneptun-objektumok egy másik csoportosításban szerepelnek: TNO-I a CKBO-LI alcsoport, de a TNO-II csoportba a CKBO-HI, plutinó és SDO osztályokat egy csoportba vontam össze. Együtt is és különválasztva is szerepelnek a kentaurok, nevezetesen a "vörös" és "kék" alcsoportra osztásuk szerint (Peixinho és mások 2003; Lamy & Toth 2009). A $(V-R)$ színindex alapján a kentaurok CEN-I csoportja nagyon vörös színű populációja a Naprendszer kis égitestei között. A $(V-R)$ színindexben a vöröstől a kékebb színű populációk felé a sorrend: CEN-I, TNO-I (CKBO-LI), TNO-II, ekliptikai üstökösök, CEN-II, Jupiter-trójai kisbolygók és a földközeli objektumok (NEO) inaktív üstökös csoportja. A többi színindexet tekintve az ős-leszármazott eredet/evolúció hierarchiában említésre méltó, hogy a CEN-II az SDO és inaktív üstökösök között van. Különösen fontos lehet, hogy a CEN-II csoport a Jupiter-trójaiakhoz igen közel helyezkedik el a $(B-R)$ színindexben, valamint a CEN-II csoport az inaktív üstökösökhöz van közel a $B-V$ színindexben (Lamy & Toth 2009). Egyébként a $(B-R)$ színindex a naprendszer kis égitest populációinak vizsgálatában igen hatékony eszköz, mert az



63. ábra. A primitív kis égitest osztályok ($B - V$), ($V - R$), ($R - I$) és ($B - R$) színindexeinek eloszlása histogram reprezentációban. A mintaközép értékek is fel vannak tüntetve a histogramok mellett (bal oldalon). A függőleges vonalak a Nap ($\odot$) szimbólummal a Nap megfelelő színindexét jelölik. A jobb oldalon a primitív kis égitestek egy-egy osztályának összehasonlítása szerepel annak megállapítása céljából, hogy mennyivel kell eltolni az adott színindexüket, hogy a kumulatív eloszlásfüggvényeik a legjobban illeszkedjenek. Egy-egy sor egy adott színindexet ábrázol. A bal oldali kis panelen az eredeti megfigyelt kumulatív eloszlásfüggvény van, a középső kis panel az eltolt és megfigyelt eloszlásfüggvények illeszkedését mutatja, a jobb oldali kis panelen a Kolmogorov-Szmirnov teszt maximum helye megadja a legjobb illeszkedéshez szükséges eltolás mértékét. Egyéb rövidítések (l. még a 3.2. pontot is): SDO – Szórt Korong Objektum, EC – ekliptikai üstökös, CDC (”candidate dead comet”) – inaktív üstökös-aszteroid földközeli objektum (NEO) (forrás: a szerző által készített ábra, l. még Lamy és Toth (2009)).

égitest színének robusztus indikátora, de sajnos a B szűrővel rövid hullámhosszakon nagyon kevés megfigyelés van, mert ebben a sávban a kis égitestek már nagyon halványak. A CEN-II – Jupiter-trójai kisbolygó kapcsolat utalhat arra, hogy kentaurok bizonyos csoportjaiból Jupiter-trójai kisbolygó válhat, de erre még nincs égi mechanikai alátámasztás, csak a Modbidelli és mások (2005), Levison és mások (2008) által végzett numerikus szimulációk, amelyek a Kuiper-öv – Jupiter-trójai dinamikai, pályabeli fejlődési kapcsolatot lehetségesnek mutatják. Szerintem ebben az irányban a jövőben érdemes lesz kutatásokat folytatni égi mechanikai eszközökkel és a kentaurok, valamint Jupiter-trójai kisbolygók fizikai tulajdonságai vizsgálata alapján.

A 63. ábra bal oldalán a primitív kis égitest osztályok megfigyelt ($B - V$), ($V - R$), ($R - I$) és ($B - R$) színindexeinek eloszlását mutatja histogram reprezentációban. A külső Naprendszer kis égitesteinek osztályairól és csoportosításáról a 3.2. pont ad rövid összefoglalót. A 3.1. pontban bemutatott fizikai folyamatot feltételezve megkerestem



64. ábra. A primitív kis égitest osztályok elhelyezkedése a $(B - V)$, $(V - R)$ és $(R - I)$ relatív színindex-skálán a kumulatív eloszlásfüggvényeik eltolása után. A relatív színindexeket mutatja az ábra, ahol a CKBO-LI csoport a skálákon a nullpont és ehhez a csoporthoz képest hol helyezkedik el a többi csoport. A színindex különbségek (az eltolások mértéke) meghatározása két módszerrel történt: középvértékek segítségével ("Mean" sorok), illetve a Kolmogorov-Szmirnov teszten alapul, a kumulatív eloszlásfüggvények legjobb illeszkedésének meghatározásán ("K-S" sorok) (forrás: a szerző által készített ábra, l. még Lamy és Toth (2009)).

11. A KISBOLYGÓK FŐ-ÖVEZETE ÉS AZ EKLIPTIKAI ÜSTÖKÖSÖK 131

azt, hogy a színindexben mennyit "kékült, szürkült" a primitív kis égitest csoport, hogy egy adott másik kis égitest csoport azonos színindex kumulatív eloszlásfüggvényéhez a legjobban illeszkedjen. A 63. ábra jobb oldalán a primitív kis égitestek egy-egy osztályának összehasonlítása szerepel annak megállapítása céljából, hogy mennyivel kell eltolni az adott színindexüket, hogy a kumulatív eloszlásfüggvényeik a legjobban illeszkedjenek. Egy-egy sor egy adott színindexet ábrázol. A bal oldali kis panelen az eredeti megfigyelt kumulatív eloszlásfüggvény van, a középső kis panel az eltolts és megfigyelt eloszlásfüggvények illeszkedését mutatja, a jobb oldali kis panelen a Kolmogorov-Szmirnov teszt maximum helye megadja a legjobb illeszkedéshez szükséges eltolás mértékét.

A 64. ábrán megkíséreltem szemléletesen összefoglalni, hogy a ma rendelkezésre álló megfigyelési adatokra alapozva (Lamy & Toth 2009) a Naprendszer primitív kis égitestei hol helyezkednek el egymáshoz képest a különböző színindexekben. A CKBO-LI csoportot referenciának tekintve (az adott relatív színindex-skála nullpontjába helyezve) két módon is meghatároztam az egyes csoportok elhelyezkedését a relatív színindex-skálákon: 1) a mintaközepek közötti különbség alapján, 2) a Kolmogorov-Szmirnov a kumulatív eloszlásfüggvények legjobb illeszkedésének meghatározásán alapuló módszerrel (l. még a 63. ábrát is). Ez a két módszer egymáshoz képest konzisztens képet adott a kis égitestek csoportjainak egymáshoz képest való elhelyezkedésében mindegyik színindexben. Ezek alapján a következő öt – leszármazott kapcsolat látszik a színindexek alapján és a dinamikai vizsgálatokból adódó képpel is összhangban.

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 dinamikai fejlődési elmélettel (Gomes 2003), illetve ennek Levison és mások (2008) által kidolgozott, a "Nice" modellnek is nevezett általánosításával, valamint a Jupiter-trójai kisbolygók eredetének modelljével (Modbidelli és mások 2005) 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 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.

11. A kisbolygók fő-övezete és az ekliptikai üstökösök

Ebben a fejezetben az ekliptikai üstökösök kvázi-Hilda alcsoportjával, valamint a kisbolygók fő-övének üstököseivel kapcsolatos új, saját eredményeim mutatom be. Az ebben a fejezetben bemutatott eredményeim tézispontként is szerepelnek.

11.1. Az ekliptikai üstökösök kvázi-Hilda alcsoportja

A kisbolygók fő-övének külső zónája az üstökösöknek egy nemrégiben felfedezett forrásvidéke. A Themis-zóna a 2006-ban felismert klasszikus fő-öv üstökösök zónája, de ezek a Jupiterre vonatkozó Tisserand-paraméter (T_J) alapján szigorúan véve nem ekliptikai üstökösök (Hsieh & Jewitt 2006). A Themis-zónánál is nagyobb naptávolságban lévő Hilda-zóna³⁵ külső pereme azonban olyan objektumokat is tartalmazhat, amelyek hosszú idő alatt elhagyhatják a Hilda-zónát és az ekliptikai üstökösök pályájához hasonló pályára kerülhetnek, miközben a Tisserand-paraméterük a klasszikus aszteroidák ($T_J > 3$) és az ekliptikai üstökösök ($2 < T_J < 3$) Tisserand-paramétere közötti átmeneti tartományba esik ($T_J \sim 3$).

A Hilda-zóna kis égitestei a Jupiterrel 3:2 középmozgás rezonanciában állnak, a csoport tagjainak pályáit $3,70 \leq a \leq 4,20$ CsE fél nagytengely, $e < 0,30$ (főleg $e = 0,1 - 0,2$) excentricitás és $i \leq 20^\circ$ jellemzi (Zellner és mások 1985). A pályák naptávpontja így közel esik a Jupiter pályájához, de a Hilda kisbolygók és a Jupiter együttállása nem a kisbolygópályák aféliumánál, hanem azok perihéliumánál következnek be, így a kisbolygók elkerülik a Jupiter erős perturbációit (Schubart 1968).

Érdekes felvetéshez vezet az a tény, hogy a 3:2 középmozgás rezonancia szerkezete igen hasonló az egyébként instabil 2:1 rezonanciához, azonban a 3:2 rezonanciánál a reguláris tartomány lényegesen kisebb, mindössze $e = 0,25$ -ig terjed, de mégis ebben a szűk reguláris tartományban találhatók a Hilda-csoport tagjai hosszú ideje, miközben a 2:1 rezonanciánál a kis égitestek – kisbolygók és üstökösök – pályái instabilak (l. Érdi (2001) összefoglaló munkáját). A 2:1 és 3:2 rezonanciák közti ellentmondást, vagyis azt, hogy a 2:1 rezonancia fázisterének szerkezete regulárisabb, mint a 3:2 rezonanciáé, mégis az előbbinél van üresedés, utóbbinál kisbolygó-csoportusolás, nem könnyű megmagyarázni. Ennek az ellentmondásnak a feloldására több megoldás is született (Moons 1996) és a megoldás irányába azok a numerikus integrálások vihetnek, amelyek azt mutatják, hogy a diffúziós sebesség a 3:2 rezonanciánál kisebb, mint a 2:1 rezonanciánál. Ennek alapján a 2:1 rezonanciánál már lezajlott az elnéptelenedési folyamat, a 3:2 rezonanciánál viszont erre még nem volt elég idő (Moons 1996; Érdi 2001).

Így a 2:1 és 3:2 rezonanciák reguláris tartományai közötti különbség érdekes felvetéshez vezet: a Hilda-zónából ma is elkerülhetnek kis égitestek, mivel a pályaelhagyási diffúziós folyamat még nem ért véget, tehát a Hilda-zóna kis égitestek forrásvidéke a kisbolygók fő-övében. Az értekezés témájához kapcsolódva pedig az a kérdés, hogy ezek között lehetnek-e üstökösök, illetve időnként üstökös, időnként pedig ilyen aktivitást nem mutató kisbolygók, úgynevezett üstökös-aszteroid átmeneti objektumok. A megfigyelések szerint a Hilda-zónában kisbolygók és üstökösök is egyaránt tartózkodnak. A legnevezetesebb ilyen objektum a D/Schoemaker-Levy 9, amely a Hilda-zónából elkerült és a Jupiterhez túl közel került objektum (Chodas & Yeomans 1994; Yeomans & Chodas 1994; Benner & McKinnon 1995; Tancredi & Sosa 1996), amelyet a Jupiter árapály hatása darabjaira szedett szét 1992-ben bekövetkezett bolygó megközelítéskor, 1993-ben a darabjait felfedezték, majd 1994-ben ezek az óriásbolygóba ütköztek sorra egymás után. A D/Schoemaker-Levy 9 kisbolygó vagy üstökös mivoltáról vita folyt, de például Weissman (1996), Weissman és mások (2002) szerint üstökös lehetett (l. még Noll és mások által szerkesztett (1996) áttekintő munkát). A Hilda-zónában már korábban is ismertek néhány üstökös, amelyet kvázi-Hilda objektumoknak neveztek el (Kresák 1979). Di Sisto és mások (2005)

³⁵A csoport névadója a 153 Hilda kisbolygó.

numerikus szimulációval követték végig a Hilda-zónát elhagyott objektumok dinamikai fejlődését. Eredményei szerint ezek 8%-a a Jupiterbe ütközik és a 98,7%-uk legalább ezer évig Jupiter családhhoz tartozó üstököspályára áll, amelynek dinamikai élettartama $1,4 \times 10^6$ év (a Jupiter család tagjai is ütközhetnek a Jupiterbe, illetve kiszóródhatnak a külső vagy belső Naprendszer felé). Nemcsak égi mechanikai diffúzióval, hanem ütközések következtében is gerjesztett pályára kerülhetnek kisbolygók vagy azok ütközési törmelékei a Hilda-zónában, illetve el is hagyhatják a zónát. Az ütközések a Naprendszer régmúltjában voltak gyakoriak, amelyek ilyen pályákat eredményezhettek.

Egyébként a megfigyelések szerint a Hilda-zóna kisbolygói és az üstökösmagok felszíni fizikai és kémiai tulajdonságai nagyon hasonlóak (Dahlgren & Lagerkvist 1995; Dahlgren és mások 1997). ami az ekliptikai üstökös – Hilda-aszteroid kapcsolatát az égi mechanikai mellett fizikai alapon is erősíti, alátámasztja.

Ezeknek az előzményeknek alapján felmerült bennem, hogy az ekliptikai üstökösök kvázi-Hilda alcsoportjának további tagjait keressem és a meglévő kisbolygó pályaadatbázisban azonosítsam (Toth 2006a,c). A kisbolygók oszkuáló pályaelemeit használtam a számításokban, mivel az ezeknél jobb, hosszú időre átlagolt saját pályaelemek nem álltak rendelkezésre. Vizsgáltataim előtt ugyanis 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 mechanikai eszközök segítségével. Az első feltűnő jelzés arra, hogy a Hilda-zóna pályaelem-terében hol helyezkednek el a már ismert üstökösök, az (e, a) és $(e, \sin(i))$ síkokban a Hilda-zóna zömét alkotó kisbolygóktól való távoli elhelyezkedésük (l. Toth (2006c) 3. ábrát), azonban további, a pályaelemekkel kapcsolatos paraméterek felhasználásával is megkísérletem "kilógó" Hilda-zóna objektumokat keresni.

A Hilda-zóna ismert kisbolygóinak Jupiterre vonatkoztatott Tisserand-paramétere, a napkörüli pályájuk gerjesztettségi mértéke (Stern 1996; Hainaut & Delsanti 2002; Davis és mások 2002), valamint Lagrange-féle (h, k) pályaelemek (Murray & Dermott 2000) terében olyan objektumokat kerestem, amelyek pályája ekliptikai üstökösszerű lehet.

Az ütközések is gerjeszthetik az objektum pályáját és a törmelékek instabil pályákra kerülhetnek és elhagyhatják az alrendszer (például a Hilda-zónát). A pályák gerjesztettsége nem csak ütközések következménye lehet, hanem égi mechanikai perturbációkkal és rezonanciákkal kapcsolatosak is lehetnek. Ezeknek a folyamatoknak a következményei figyelembe vételére felhasználtam a pálya gerjeszttségének mértékét leíró paramétert (Stern 1996; Hainaut & Delsanti 2002)

$$\mathcal{E} = \sqrt{e^2 + \sin^2(i)}, \quad (35)$$

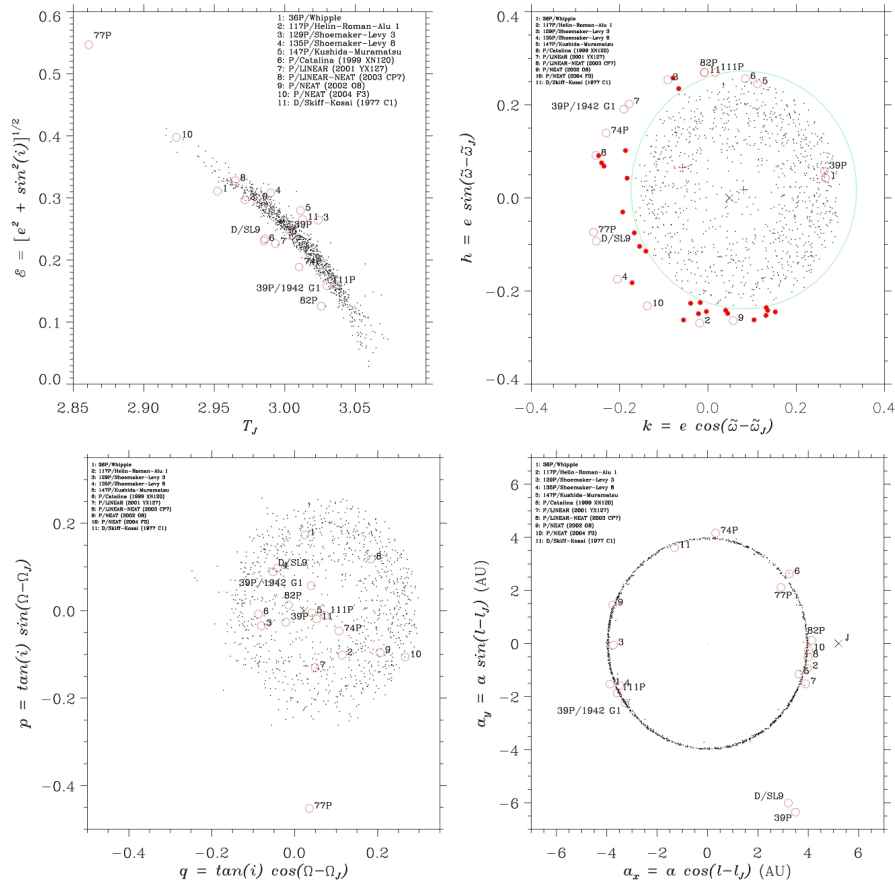
ahol e az objektum pálya excentricitása, i az pályahajlása.

A Lagrange-féle pályaelemek (Murray & Dermott 2000) terében vizsgáltam a Hilda-zóna aszteroidáinak eloszlását, nevezetesen a következő síkokban: az excentricitással összefüggő (k, h) komponensek, az inklinációval összefüggő (q, p) komponensek, valamint a fél nagytengellyel (a_x, a_y) komponensek által kifeszített síkokon:

$$k = e \cos(\varpi - \varpi_J), \quad h = e \sin(\varpi - \varpi_J), \quad (36)$$

$$q = \tan(i) \cos(\Omega - \Omega_J), \quad p = \tan(i) \sin(\Omega - \Omega_J), \quad (37)$$

11. A KISBOLYGÓK FŐ-ÖVEZETE ÉS AZ EKLIPTIKAI ÜSTÖKÖSÖK 134



65. ábra. A Hilda-zóna kisbolygói (háttér objektumok fekete pontokkal jelölve), valamint a kvázi-Hilda üstökös-jelöltek eloszlása. A Jupiterre vonatkoztatott Tisserand-paraméter és pálya-gerjesztettség mértéke ($T_J, \mathcal{E}$) (bal felső panel), a Lagrange (h, k) pályaelemek (jobb felső panel), (q, p) (bal alsó panel), valamint (a_x, a_y) (jobb alsó panel) síkokon a piros körök a lehetséges kvázi-Hilda üstökösöket jelölik. A körök sugara $2 \times \text{Max}(\sigma_k, \sigma_h)$ (l. a leírást). A Jupiter helyét "X" jelöli (kép: Toth (2006c)).

$$a_x = a \cos(l - l_J), \quad a_y = a \sin(l - l_J), \quad (38)$$

ahol ϖ, ϖ_J a kisbolygó és a Jupiter pericentrum argumentuma, i a kisbolygó pálya inklinációja, Ω, Ω_J a kisbolygó és a Jupiter pálya felszálló csomó hossza, a a kisbolygó pálya fél nagytengelye, l és l_J a kisbolygó és a Jupiter pálya közepes pályamenti hosszúsága. A (37) képletben $\tan(i)$ szerepel i helyett (l. még Murray és Dermott 2000 (7.19) képletét).

Először a pálya gerjesztettsége és a Jupiterre vonatkoztatott Tisserand paraméter által meghatározott síkban vizsgáltam a Hilda-zóna objektumait (65. ábra). Feltűnő, hogy 11 objektum "kilóg" a Hilda-aszteroidák közül, sőt $0,5 < \mathcal{E} < 0,6$ között is vannak erősen gerjesztett pályán objektumok, mint például a 77P/Longmore üstökös. A keresés tehát az új kvázi-Hilda üstökös jelöltekre sikerrel járt. Ezeket még csak jelölteknek tekintem, mert további részletes numerikus vizsgálatok szükségesek ezek kvázi-Hilda üstökös égi mechanikai alapon történő igazolására. Megemlítem, hogy a

10. táblázat. Hilda-aszteroidák extrém pozícióban a (k, h) síkban

Objektum	a (CsE)	e	i ($^{\circ}$)	q (CsE)	Q (CsE)	P_{orb} (év)	T_J	$\mathcal{E}$	k	h	Taxon. osztály
4446 Carolyn	3.98	0.282	7.2	2.86	5.10	7.94	2.972	0.309	0.10	-0.26	?
39266 2001 AT2	3.97	0.252	7.0	2.97	4.97	7.91	2.993	0.280	0.04	-0.25	?
70032 1999 CZ13	3.75	0.264	9.4	2.76	4.73	7.25	3.008	0.310	-0.25	0.09	?
85142 1981 EO29	3.99	0.196	5.0	3.21	4.78	7.98	3.011	0.214	-0.19	-0.03	?
94299 2001 DB108	3.99	0.187	11.9	3.24	4.73	7.96	2.990	0.279	-0.15	-0.10	?
1998 HP43	3.93	0.183	2.6	3.21	4.65	7.80	3.032	0.188	-0.17	-0.08	?
2000 OE9	3.98	0.225	6.5	3.08	4.87	7.93	3.003	0.252	-0.02	-0.22	?
2001 PC54	3.98	0.270	2.2	2.91	5.06	7.95	2.989	0.273	0.13	-0.24	?
2001 RN145	3.95	0.277	5.6	2.86	5.05	7.85	2.982	0.294	0.14	-0.24	?
2001 SD255	3.97	0.288	5.1	2.82	5.11	7.91	2.976	0.302	0.15	-0.24	?
2001 TQ85	3.95	0.244	8.7	2.99	4.91	7.85	2.983	0.287	-0.00	-0.24	?
2002 CF140	3.82	0.253	11.5	2.85	4.78	7.46	2.988	0.322	-0.24	0.08	?
2002 KM4	3.94	0.181	3.1	3.23	4.66	7.83	3.031	0.189	-0.14	-0.11	?
2003 CR4	3.99	0.244	8.5	3.01	4.96	7.96	2.982	0.285	-0.07	0.23	?
2003 FK28	3.95	0.245	10.6	2.98	4.91	7.84	2.985	0.306	0.04	-0.24	?
2003 KB11	3.98	0.250	4.0	2.98	4.97	7.93	2.998	0.259	-0.02	-0.25	?
2004 BU122	3.72	0.269	0.8	2.72	4.73	7.19	3.027	0.270	-0.08	0.26	?
2004 CS16	3.95	0.213	7.3	3.11	4.79	7.85	3.003	0.248	-0.19	0.10	?
2004 FM24	3.95	0.250	17.4	2.96	4.94	7.84	2.919	0.390	-0.17	-0.18	?
2004 NZ18	3.96	0.285	5.0	2.84	5.09	7.89	2.980	0.298	0.13	-0.25	?
2004 QS3	3.99	0.230	8.1	3.07	4.91	7.97	2.988	0.270	-0.04	-0.23	?
2004 QS14	3.97	0.268	10.4	2.90	5.03	7.90	2.959	0.323	-0.06	-0.26	?
2005 GO136	3.95	0.188	8.0	3.20	4.69	7.84	3.015	0.234	-0.18	0.04	?

Megjegyzés: a, e, i : fél nagytengely, excentricitás, inklináció. q, Q : perihélium és aphélium távolságok. P_{orb} : keringési idő. T_J : Jupiterre vonatkoztatott Tisserand-paraméter. $\mathcal{E} = \sqrt{e^2 + \sin^2(i)}$: a pálya gerjesztettségi paramétere. (k, h) : Lagrange-elemek; Összes Hilda-aszteroid száma = 1056, "kilógók" száma = 23, 2.18%.

HST 9. ciklusában megfigyelt 147P/Kushida-Muramatsu ekliptikai üstököséről (l. a 6.3.10. pont) ezt japán kutatók igazolták (Ohtsuka és mások 2008).

Ezek az objektumok az ekliptikai üstökösök kvázi-Hilda alcsoportjához tartozó jelöltek és 11 ilyen objektumot találtam, ezeken kívül a Lagrange-féle pályaelem-térben való elhelyezkedésük alapján még 23 objektum tartozhat az ekliptikai üstökösök kvázi-Hilda alcsoportjához. Ezeket és pályadataikat a 10. táblázat foglalja össze. A 23 objektum elhelyezkedését a Lagrange-féle pályaelemek által meghatározott síkokban a 65. ábra három panelje mutatja. Ezeken a síkokon a Hilda-aszteroidák zöme vagy egy körön belül vagy pedig egy kör meántén helyezkedik el, míg ezekhez képest vannak "kilógó" objektumok. A (k, h) síkon azokat az objektumokat tekintetem

”kilógó” objektumoknak, amelyek az általam $2 \times \text{Max}(\sigma_k, \sigma_h)$ rádiusszal definiált körön kívül helyezkednek el, ahol σ_k és σ_h a k és h koordináták standard deviációját jelöli. A határ-rádiusz standard deviációkkal történő ezen definiálása túrást enged meg az excentricitásokban és az egyes objektumok által definiált (h, k) pontokhoz tartozó körök sugarában a (36) képletek szerint. Azt találtam (l. még 65. ábrát), hogy a (q, p) és (a_x, a_y) síkokon ezek az objektumok teljesen a Hilda-zóna többi objektumai között helyezkednek el és nem tér el a pozíciójuk azokétól. Ennek oka a (k, h) koordináták az excentricitásonj keresztül a pálya elnyújtottságát, gerjesztettségét mutatják és a (q, p) elemekben az inlinációban való gerjesztettség, illetve az (a_x, a_y) elemekben a fél nagytengely gerjesztettsége kevésbe mutatkozik meg (középmozgás rezonancia a Jupiterrel a fél nagytengelyt egy szűk tartományon belül tartja). Tehát a Lagrange-féle (k, h) elemek síkjának vizsgálatával a kvázi-Hilda üstökös jelöltek első közelítésben jól látszanak, kijelölhetők.

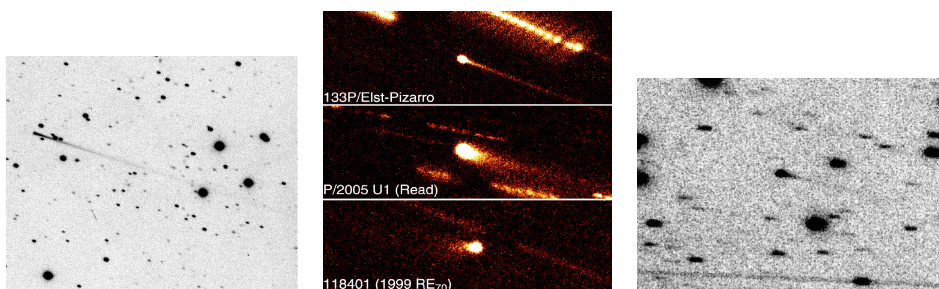
Tehát az ekliptikai üstökösök kvázi-Hilda alcsoportjának leltára ezekkel bővült (Toth 2006a,c). Azonban az általam talált kvázi-Hilda ekliptikai üstökös jelöltekről ma még nem tudni, hogy fizikai tulajdonságaik valóban lehetővé teszik-e, hogy üstökös viselkedést mutassanak (jegek szublimációja, permanens kóma megléte), 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 (Toth 2006c).

11.2. A 133P/Elst-Pizarro, az első azonosított üstökös a fő kisbolygó-övben

Váratlan felfedezés történt 1996-ban: a kisbolygók fő-övének Themis-zónájában egy ott keringő kis égitest hosszú egyenes csóvát eresztett, mint egy üstökös (Elst és mások 1996). A kis égitest közelítő pályaelemei: $a = 3,158$ CsE, $e = 0,165$ és $i = 1,38^\circ$, tehát tipikus fő-övbeli kisbolygó pályán kering a Nap körül. Az égitest a megjelenése alapján a P/1996 N2 (Elst-Pizarro) üstökös-elnevezést kapta. A csóva jelenség több hónapig tartott, majd kis égitest ”rendes, csillagszerű” aszteroida megjelenést mutatott, mint a többi kisbolygó a Themis-zónában. Sok évvel korábbi fotografikus felvételeket átvizsgálva kiderült, hogy az objektum azonos az 1979 OW7 kisbolygóval, így a 7968 Elst-Pizarro kisbolygó elnevezés, illetve a 133P/Elst-Pizarro rövid keringési idejű üstökös elnevezés egyaránt érvényben van jelezve a kis égitest üstökös-aszteroida kettős természetét. Az objektum kutatásának korai szakaszának történetét Toth (2000, 2006a,c) és Hsieh és mások (2004) foglalják össze.

Az a különlegessége a 133P/Elst-Pizarro üstökös-kisbolygónak, hogy aktivitása idején nem figyeltek meg gáz emissziót és gáz kómát, ami egy klasszikus üstökös fizikailag üstökössé tesz, hanem csak porcsóvát lehetett megfigyelni. Ez alapján felvettem (Toth 2000), hogy a fő-kisbolygó övben egy másik aszteroidával vagy meteoroiddal történt ütközés következtében poranyag szabadult ki a kis égitest felszínközeli rétegeiből és ez okozta a kis égitest rövid ideig, néhány hét – néhány hónapig tartó porcsóváját. Rámutattam, hogy a 133P a Themis-kisbolygócsalád tagja, ahol az ütközések különösen gyakoriak voltak a múltban és a jelenben is előfordulhatnak ilyen események. Sőt, egy régmúltbeli ütközés törmelékei, mint Themis-zónabeli meteorraj keringenek és a 133P egy ilyen törmelékdarabbal találkozhatott. Azt, hogy esetleg az ütközés a felszín alatt esetleg meglévő szublimációra képes fagyott gázok jegeit felszínre hozza, ami üstökösaktivitást mutatott volna, azért zártam ki, mert nem volt gázkóma és megfigyelt gázemisszió. A fő-övben ma végbement ütközés

11. A KISBOLYGÓK FŐ-ÖVEZETE ÉS AZ EKLIPTIKAI ÜSTÖKÖSÖK 137



(a) 133P aktivitása 1996-ban (b) 133P aktivitása 2002-ben (c) 133P aktivitása 2007-ben és más MBC-k

66. ábra. A 133P/Elst-Pizarro és más, a fő kisbolygó-övbeli üstökösök aktivitása. A 133P visszatérő (rekurrens) aktivitást mutatott 1996. után 2002-ben és 2007-ben az eddigi megfigyelések szerint (a képek forrásai: a) ESO Photo 1996-36: Eric Elst és Guido Pizarro által készített felfedezési fotografikus megfigyelés, b) Hsieh, Jewitt és Fernández (2004), c) Jewitt és mások (2007).

feltételezése nem is volt annyira túl merész elképzelés, hiszen mint utóbb kiderült, a kisbolygók fő-övében ma is történhetnek kisbolygók közötti, illetve kisbolygók és meteoroidok közötti ütközések, amit a P/2010 A2 (Jewitt és mások 2010) és az 596 Schelia kisbolygók példái is mutatnak (Jewitt és mások 2011).

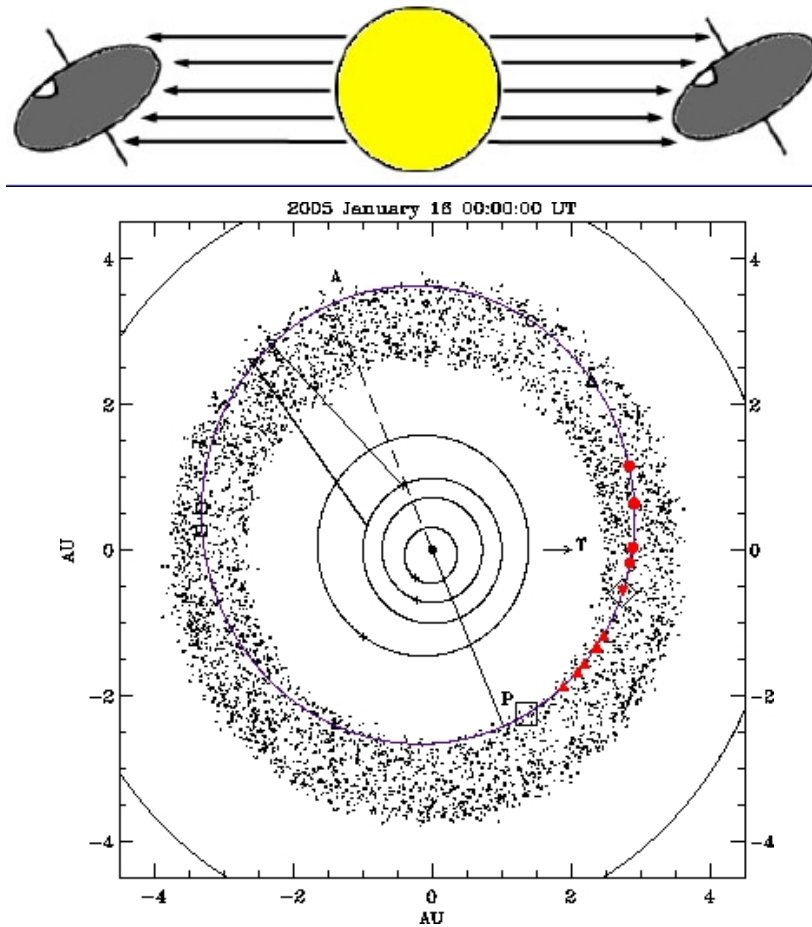
A 2000-ben írt (Toth 2000) cikkem felkeltette az érdeklődést a fő-övben üstökös-aktivitást mutató kisbolygók keresésére, illetve magának a 133P/Elst-Pizarro további megfigyelésére. Így ebből a célból Hsieh & Jewitt (2005) 2002-től megindították a SAMBA (Search for Active Main-Belt Asteroids) projektet, amely ma a "Hawaii Trails Project" új néven fut tovább (Hsieh 2009).

A 133P üstökösaktivitásainak ismételt többszöri visszatérése 2002-ben (Hsieh és mások 2004), illetve 2007-ben (Jewitt és mások 2007; Hsieh és mások 2008) megcáfolta az egyszeri ütközéssel történő aktivitás gerjesztés feltételezését. Azonban egy múltbeli ütközés következtében a felszínre, illetve a Nap által megvilágított helyzetbe kerülhetett korábban elfedett jeges-poros aktív terület, ami magyarázata lehet a kisbolygó visszatérő (rekurrens) aktivitásának.

A 133P visszatérő aktivitásának 2002-es megfigyelése után (Hsieh és mások 2004) felvetették a kis égitest szezonális aktivitásának lehetőségét, nevezetesen, hogy a napköri pályája mentén lehet olyan szakasz, amelyen a szublimációra képes aktív terület a Nap felé fordul és a Nap fénye akadálytalanul meg tudja világítani, fel tudja fűteni. Az ilyen aktív terület létrejöttének okául nem zártak ki egy korábbi ütközést, amely a felszín alatt lévő szublimációra képes vízjég felszínre kerülését lehetővé tette. Tehát a forgástengely Nap felé fordulásának idején az aktív területet tartalmazó féltekét világítja meg a Nap, vagyis egy, a 133P "évszakaitól" függő, szezonális aktivitásról lehet szó az elképzelés szerint. Ezt a helyzetet a 67. ábra felső panelje mutatja be szemléletesen.

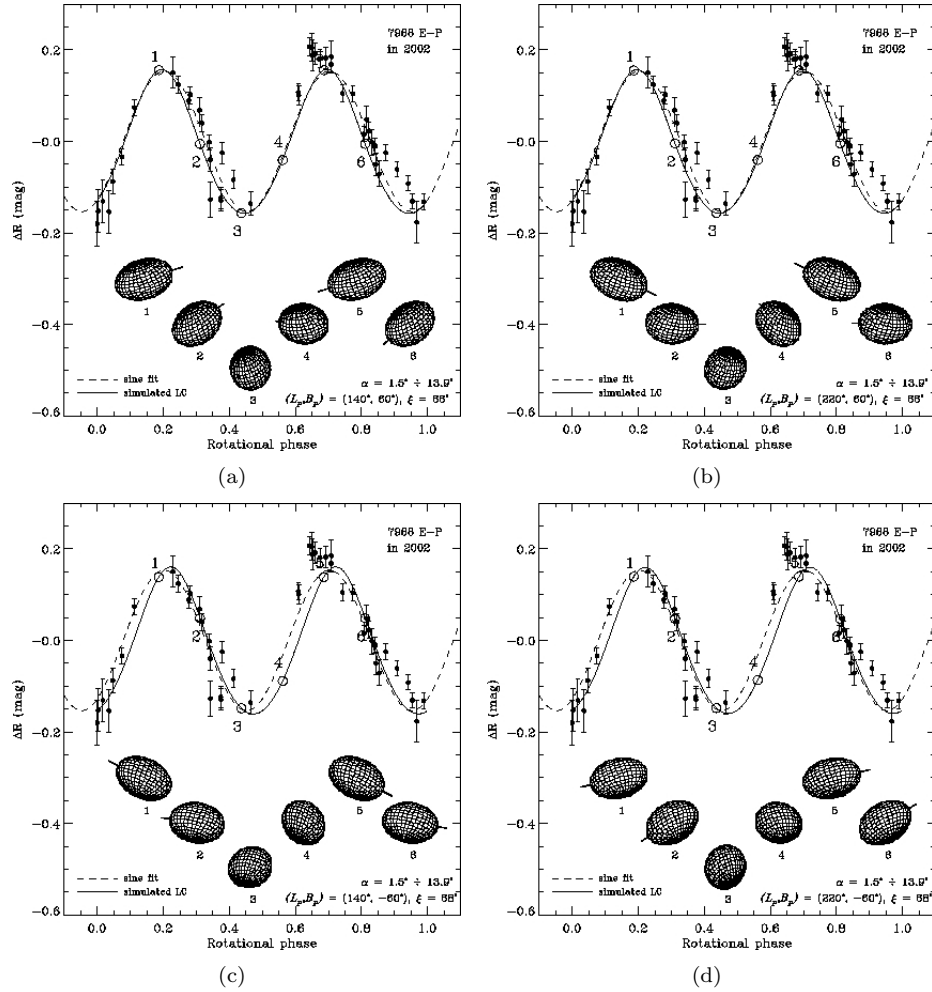
A 133P/Elst-Pizarro fő-övbeli üstökös szezonális aktivitási koncepciója mellett maradván, annak alátámasztására két kérdésre kerestem a választ: i) milyen az üstökösaktivitási vagy inaktív időszakainak eloszlása a pályája mentén az MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete piszkés-tetői obszervatóriumának 1 méteres RCC teleszkópjával történt megfigyeléseimre is alapozva, illetve ii) fénygörbe megfigyelés felhasználásával behatárolni a tengelyköri forgás tengelyének térbeli

11. A KISBOLYGÓK FŐ-ÖVEZETE ÉS AZ EKLIPTIKAI ÜSTÖKÖSÖK 138



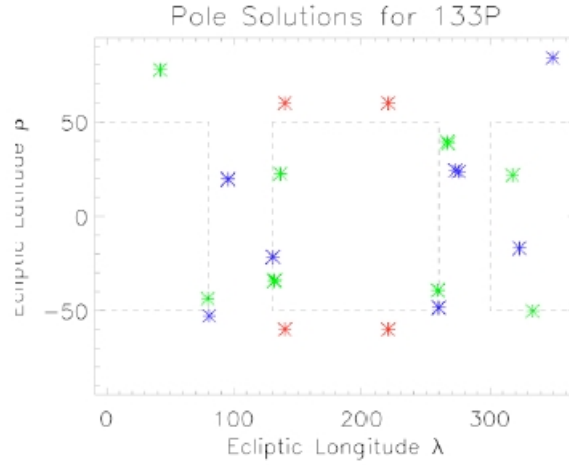
67. ábra. A 133P/Elst-Pizarro szezonális aktivitása (felső panel): akkor mutat az objektum üstökösaktivitást, amikor az aktív terület a Nap felé fordul. A megfigyelt aktivitás (piros tele háromszögek és korongok) eloszlása a napköri pálya mentén (alsó panel). A 133P pályájának az ekliptika síkjába eső vetületét folytonos vonal, a perihéliumot "P" és az afhéliumot "A" jelöli (apszisvonal PA). A piszkás-tetői megfigyeléseim idején a Földtől és aszteroidáig húzott vonalszakaszok is jelölve. A négyzet a kisbolygó 1979-es felfedezésekor helyzetét jelöli (1979 OW7). A Themis-zóna kisbolygói helyzetét pontok jelölik 2005. január 16. 0 óra UT-kor. A nagybolygók helyzetét "+" jelöli. Az X és Y tengelyek az ekliptika síkjában CsE-ben a skálát jelölik (a képek forrása: Hsieh & Jewitt (2005) (felső panel), Toth (2006c) (alsó panel)).

irányát. A 133P aktivitásának szezonális aktivitása ugyanis azt is jelenti, hogy a forgástengely térbeli iránya a térben olyan, hogy a felszín aktív területe Nap felé fordulását lehetővé tegye. Tehát a kis égitest forgástengelye térbeli irányának behatárolását i) az aktivitási időszakainak a napköri pályáján való térbeli eloszlásának vizsgálata, valamint ii) a megfigyelt fénygörbe alapján végeztem. A megfigyelt fénygörbe alakja ugyanis a forgó test alakjától, valamint a forgástengely térbeli irányától függ, a test, Nap és a megfigyelő kölcsönös térbeli elhelyezkedése által meghatározott rálátási geometriától.



68. ábra. A 133P/Elst-Pizarro megfigyelt fénygörbéjéhez illesztett ellipszoid alakú forgó test modellezett fénygörbéje a test forgástengelyének különböző térbeli irányát feltételezve az (a) – (d) paneleken. A fénygörbe megfigyelést Hsieh és mások (2004) készítette. A vízszintes tengelyen a rotációs fázis, a függőleges tengelyen ΔR relatív magnitúdók vannak, a test helyzetének megfelelő forgási fázis szerinti pontokat a test mellett is és a fénygörbe mellett feltüntetett számok jelzik. A forgástengely ekliptikai hosszúság és szélesség koordinátái (L, B) az egyes ábrák feltüntetetik (kép: Toth 2006c).

Az MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete piszkés-tetői 1 méteres RCC teleszkópjával CCD kamerával fotometriai R szűrővel 2005. január 15/16., február 28/március 1. és március 1/2. éjszakáin megfigyeltem a 133P fő-öbéli üstökös, annak nagy naptávolságban előforduló esetleges üstökös aktivitásának ki-mutatása céljából. A megfigyelések nem sokkal a kis égitest naptávól pontja után történtek, amikor 3,65–3,62 CsE csökkenő, de még igen nagy naptávolságban volt, 2,07–2,77 CsE földtávolságban és $4,8^{\circ}$ – $9,1^{\circ}$ fázisszögnél (a részleteket illetően l. még Toth (2006c)). A 133P a megfigyelési időszakban nem mutatott aktivitásra utaló jeleket, például a jellegzetes porcsóvát. A 133P napköri pályája mentén feltüntettem



69. ábra. A 133P/Elst-Pizarro forgástengelyének lehetséges térbeli iránya a különböző módszerek alkalmazásával történt meghatározásának eredményei ekliptikai koordinátákban. A Toth (2006) javaslatok piros színnel jelölve. A halvány szaggatott vonalakkal jelölt tartomány szintén egy becslés eredménye (Kaluna és mások 2010) (kép: Kaluna és mások 2010).

a már mások által megfigyelt aktivitással, illetve inaktivitással összefüggő pontokat, valamint az általam az afélium közelében lévő üstökösaktivitás szempontjából inaktív pályaszakaszt. Ezeknek a pontoknak a 133P pályáján való elhelyezkedését az 67. ábra mutatja be. Látható, hogy a 133P megfigyelt aktivitási időszakai a napközelpontja után sorakoznak a pályája mentén. Ebből arra következtettem, hogy i) a napközelség utáni hőeffektus, ii) az apszisvonalhoz közeli irányú, a perihéliumban a Nap felé forduló egyik forgási pólus közelében lévő, esetleg a perihélium közelében néhány hétig – hónapig állandóan megvilágított aktív területről van szó, illetve az két eset együttes bekövetkezéséről van szó. A 133P szezonális aktivitási koncepciójával összhangban van az utóbbi feltétel.

Az aktív üstökösmaagok forgómozgásának és napköri keringésének összefüggéseit Samarasinha & Belton (1995), Samarasinha (1997) tanulmányozták. Samarasinha (1997) következtetése szerint az üstökösmaagok forgási impulzusnyomatékának térbeli iránya asszimptotikusan beáll a pálya apszisvonalának az irányába: vagy a perihélium vagy az afélium irányának közelébe. Nem ismert a 133P aktivitásának hosszú időskálájú, több ezer éves története, de feltehető, hogy üstökösként viselkedett azelőtt és a forgástengelye asszimptotikusan állt be (a kisbolygó dinamikai élettartama mintegy $10^6 - 10^7$ év). Ennek alapján a forgástengely térbeli irányát változtatva, valamint a test alakját elnyújtott (prolate) ellipszoidnak feltételezve modell fénygörbéket számoltam ki és összehasonlítottam a Hsieh és mások (2004) által megfigyelt fénygörbével. A test alakját a Hsieh és mások (2004) által megadott (prolate) ellipszoid modellnek tételezem fel, de a jövőben ezt újabb megfigyelésekkel pontosítani kell. A megfigyelés és modellek legjobb illeszkedésének eseteit a 68. ábra mutatja (részleteket illetően l. még Toth (2006c)). Azt találtam, hogy 133P pólusa ekliptikai koordinátái $L = 140^\circ$, de $B = +60^\circ$ vagy -60° . Ez csupán azt jelenti, hogy ezen irányok közelében a legvalószínűbb a forgástengely térbeli iránya és ezektől az irányoktól 20-30 fokok félkúpszöggel is eltérhet a valódi forgástengely.

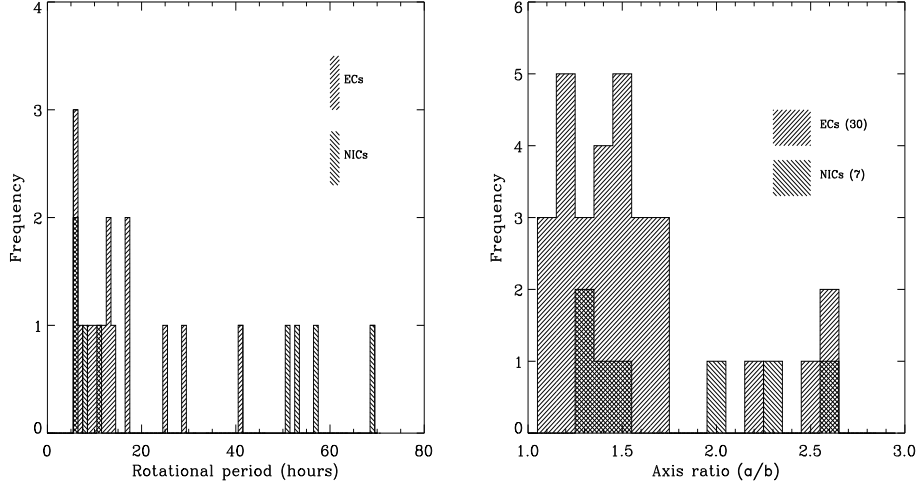
Természetesen a 133P alakja és a forgástengelyének irányának előbb ismertetett

becslése csak egy nagyon előzetes eredmény és csak egy javaslat különböző számításokhoz, modellekhez, hiszen ez csak egy fénygörbén, illetve a forgástengely térbeli iránya asszimptotikus beállításának feltételezésén alapul (Samarasinha 1997). Ezt az eredményt 2005/6-ban tettem közzé és munkám (Toth 2006a,c) ösztönzőleg hatott más kutatócsoportoknak nagy földi teleszkópokkal történő megfigyelések elvégzéséhez a 133P forgástengelye térbeli irányának meghatározására. Azóta a következő fontosabb eredmények születtek a 133P/Elst-Pizarro fő-övbeli üstökösrel kapcsolatban. A forgástengely térbeli irányára Kaluna és mások (2010) végeztek újabb megfigyeléseken alapuló vizsgálatokat, amelyek eredményét a 69. ábra foglalja össze. E szerint a 133P pólusának térbeli iránya még ma sem ismert pontosan, igen nagy tartományban helyezkednek el a pontok az ekliptikai koordinátákban. Az általam javasolt megoldások Toth (2006c) ekliptikai szélességben a ponthalmazban szélső helyzet jelentik, de a vetülete a napkörüli pálya apszisvonalához közeli. Egy másik újabb eredmény szerint a 133P napkörüli keringését nem-gravitációs erők befolyásolják, amelyek a kis égitest aktivitásából adódó repulzív ("rakétameghajtás-szerű") erők következményei (Chesley és mások 2010). A nem-gravitációs erőnek főleg a 133P pályasíkjába eső komponensei dominálnak, a transzverzális komponens túl kicsi ezekhez képest. Chesley és mások (2010) szerint a 133P aktivitását elsősorban a szezonális effektus határozza meg és perihélium átmenet után erősödik fel, továbbá szerintük a kis égitest forgása direkt irányú és az aktív terület valószínűleg a 133P déli forgási pólusa közelében helyezkedik el. Ennek ismeretében 67. ábra felső paneljén azt jelenti, hogy ha ekliptikai észak felfelé van, akkor fordítva, a test alsó részén van az aktív területet jelképező világos kis folt és a déli pólus balra dől a perihélium felé, hogy süssen a Nap. A nem-gravitációs erők alapján Chesley és mások (2010) meghatározták a 133P tömegvesztésének mértékét, ami mintegy 10 kg s^{-1} lehet.

A fő-öv üstökösei közül e sorok írásakor több, a klasszikus, kómával és gáz emisszióval rendelkező üstököskhöz is hasonlót fedeztek már fel, nevezetesen: 176P/LINEAR, P/2005 U1 (Read), P/2008 R1 (Garradd), P/2010 R2 (La Sagra) üstököket (l. még az 66. ábrát is). Ezeken kívül még a minden bizonnyal ütközés következtében porkibocsátást mutató P/2010 A2 (LINEAR), valamint az 596 Schelia aszteroidát is a fő-övbeli üstökösök közé sorolják, de ezek fizikai tulajdonságaikat és aktivitási mechanizmusukat tekintve valószínűleg nem üstökösök. Mindezekhez képest a 133P/Elst-Pizarro eltérő és különleges objektum az aszteroidák fő-övében. A 133P rekurrens aktivitása, az aktivitási mechanizmusa, még további megfigyeléseket és magyarázatot igényel, továbbá több rálátási geometriai helyzet mellett felvett fénygörbe a test alakját és a forgástengely térbeli helyzetének pontosabb meghatározását is lehetővé teszi. Ismereteim szerint a NASA előkészítés alatt álló Comet Odyssey programja során az űrszonda útban az ekliptikai cél-üstökös felé egy Themis-zóna kisbolygót is meglátogat, nevezetesen a 24 Themis aszteroidát, de sajnos a tudományos szempontból legalább annyira érdekes 7968=133P/Elst-Pizarro fő-övbeli üstökös nem.

12. A primitív kis égitestek forgási szétesés elleni stabilitása

Az égitestek adott esetben a túl gyors tengelykörüli forgásuk következtében széteshetnek. Az üstökösmagok és a velük kapcsolatos egyéb primitív kis égitestek gyors tengelykörüli forgás miatt bekövetkező szétesés elleni stabilitását vizsgálom ebben a fejezetben.



70. ábra. Az ekliptikai (EC) és az Oort-felhővel (NIC) kapcsolatos üstökösök tengelykörüli forgási idejének eloszlása (bal oldalon), valamint a tengelyarány eloszlás hisztogramja (jobb oldalon) (kép: a szerző által készített ábra, l. még Lamy és mások 2004).

A túl gyors tengelykörüli forgás miatt bekövetkező szétesés függ a forgó test rotációs periódusától, a test alakjától, méretétől, belső tömegsűrűségétől, anyagi minőségtől függő belső összetartó erőktől – ez utóbbiak meglététől vagy hiányától. A forgó test forgási periódusa, alakja, mérete, tömegsűrűsége, illetve belső összetartó erők megléte esetén a szakítószilárdságot is tartalmazó állapotegyenlet által meghatározott feltétel vizsgálatából megtudható a test túl gyors forgása esetén a fizikai paraméterek mely értékénél esik szét. Ezen túlmenően pedig a megfigyelésekből ismert periódus, alak és méret ismeretében behatárolható a test tömegsűrűsége, illetve adott esetben a belső összetartó erőkre, belső szerkezetére és összetételére is következtetni lehet adott modell keretén belül.

Az égitestek esetében csillagászati vagy helyszíni űrszondás megfigyelésekből meghatározható a test tengelykörüli forgási periódusa, mérete és alakja. Egyéb mérések, mint például kettős vagy többszörös rendszer keringési paraméterei, gravitációs tér, belső tömegeloszlás ismerete hiányában a tömegsűrűség és a lehetséges belső összetartó erők becslésének, behatárolásának egy lehetséges módszere a tengelykörüli forgás – tömegsűrűség, illetve belső összetartó erők megléte esetén a tengelykörüli forgás – sűrűség, szakítószilárdság összefüggését leíró állapotegyenlet által meghatározott feltétel vizsgálata.

12.1. Üstökösök forgási periódusa és elnyújtottsága a megfigyelések alapján

A Naprendszer kisebb égitestjeinek, úgymint az üstökösöknek, kentauroknak, transzneptun-objektumoknak és a bolygóholdaknak bizonyos típusainak szabálytalan alakja van. Azonban a legtöbb kis égitestnek az alakja jól közelíthető háromtengelyű ellipszoiddal. Egyszerűbb esetekben az alak kéttengelyű, elnyújtott vagy lapos (*pro-*

late, oblate) ellipszoiddal modellezhető, illetve egyes speciális esetekben gömbbel is elégséges a közelítés, fizikai, geometriai modellezés. A kis égitestek elnyúlt alakjára a tapasztalatok szerint tehát első közelítésben jól alkalmazható $a > b = c$ félnagy tengelyekkel leírt (prolate) ellipszoid test modell feltételezésével megvizsgáltam az ekliptikai üstökösök tengelykörüli forgási idejének, valamint a mag alakját, elnyújtottságának mértéket jellemző a/b félnagy tengely arány eloszlását. Az eredményül kapott két hisztogramot a 70. ábra mutatja. A HST megfigyeléseim és a szakirodalomból gondosan válogatott, nagy földi teleszkópokkal végzett megfigyelésekből megállapítottam, hogy az ekliptikai üstökösök elnyújtottságát jellemző a/b félnagy 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 kentaur-ekliptikai üstökös átmeneti objektumnál éri el (Meech és mások 1993; Lamy és mások 2004). Az üstökösök tengelykörüli forgási periódusa 4–70 óra közötti, amely a fő aszteroid-öv és földközeli objektumokéhoz hasonlít (eltekintve a monolitikus gyorsan forgó kis égitestektől).

A kis égitestek gyors forgás következtében történő szétesés elleni stabilitását három modell segítségével vizsgálom. Az első, legegyszerűbb modell egy elnyújtott alakú, $a > b = c$ félnagy tengelyű, a c tengelye körül forgó (prolate) ellipszoid alakú test, amelynek felszínén a leghosszabb ($2a$) tengely végpontjaiban lévő tömegpontot a tömegvonzási erő már nem képes megtartani, a centrum felé vonzani és a felszínről a nagy tengely végpontjaiban anyagdarabok válhatnak le. Ebben a modellben csak a tömegvonzás tartja egybe a testet és nincsenek más, az anyagi minőségtől függő belső összetartó erők. A második modellben a forgó test egy homogén tömegeloszlású gömb, amelyet azonban a tömegvonzáson kívül anyagi minőségtől függő belső erők tartanak össze. A harmadik modellben a forgó test egy homogén belső tömegeloszlású elnyújtott (prolate) ellipszoid alakú test, amelynek félnagy tengelyei $a > b = c$. Ez utóbbi két modellben változtatom az anyagi minőségtől függő belső összetartó erőket és vizsgálom a kis primitív égitestek gyors forgás következtében való szétesés elleni stabilitását.

12.2. Forgási egyenlítő mentén kezdődő anyagleválás

A gyors tengelykörüli forgásból adódó üstökösök szétesés kritikus periódusidejének legegyszerűbb meghatározási módszerei abból a nagyon egyszerű feltevésből indultak ki, hogy egy a mag felszínén a forgási egyenlítőn lévő részecske egy adott kritikus kerületi sebesség esetén elszakad a magtól, mert a mag gravitációs ereje nem tudja ott megtartani.

Először tehát ebből az egyszerű modell segítségével adódó eredményeket ismertetem. Ezzel a legegyszerűbb modell feltételezésével a forgó test mérete, alakja és tengelykörüli forgási periódusa ismeretében meg lehet adni egy alsó határt a tömegsűrűségére, vagyis azt a minimális sűrűséget, amely a gyors forgás miatt bekövetkező szétesés megakadályozására, vagyis a test egybetartásához szükséges a belső összetartó erők elhanyagolhatóságának feltételezésével. Ez a minimális tömegsűrűség Jewitt & Meech (1988), valamint Luu & Jewitt (1992) nyomán a következőképpen számítható ki. Az ellipszoid alakú, homogén belső tömegeloszlású test leghosszabb tengelyének végpontjában a gravitációs gyorsulás

$$g = -2\pi G\rho_b a \int_0^2 \left(\left[1 - f_1^2 + \frac{2f_1^2}{s} \right]^{1/2} - 1 \right) ds, \quad (39)$$

ahol G a gravitációs állandó, itt $f_1 = b/a < 1$ az ellipszoid test félnagytengety aránya ($f_1 = 1/f$, megkülönböztetésül az $f = a/b > 1$ tengelyarány szokásos jelölésétől), ρ_b a test tömegsűrűsége (b: bulk), s a félnagytengety mentén mért távolság a egységgel kifejezve (az integrálás határai így 0 és 2). A gravitációs és a centripetális³⁶ gyorsulást egyenlővé téve a szétesést megakadályozó minimális tömegsűrűségre a következő feltétel adódik:

$$-\frac{P_{\text{rot}}^2 G\rho_b}{2\pi} = \frac{(1 - f_1^2)^{3/2}}{2f_1^2(1 - f_1^2)^{1/2} + f_1^2 \ln(f_1^2) - f_1^2 \ln(2 - f_1^2 + 2\sqrt{1 - f_1^2})}. \quad (40)$$

A forgási periódus – tengely arány diagram segítségével alsó határt lehet adni az üstökösök belső tömegsűrűségére. Az ekliptikai és az Oort-felhővel kapcsolatos, a megfigyelésekből meghatározott rotációs periódussal, mérettel és alakkal rendelkező üstökösöknek ezen a diagramon való elhelyezkedését mutatja a 71. ábra. Az ábrán látszik, hogy a megfigyelt leggyorsabban forgó üstökösök stabilak a forgás miatt bekövetkező szétesés ellen, ha a sűrűségük nagyobb, mint $0,6 \text{ g cm}^{-3}$ (600 kg m^{-3}). Ez a sűrűség megfelel az üstökösökre különböző módszerekkel meghatározott átlagsűrűség értékeknek, amelyek egészen kicsi $0,01 \text{ g cm}^{-3}$ -tól $1,0 \text{ g cm}^{-3}$ -ig szóródnak. Összehasonlításképpen, a NASA Deep Impact űrkísérletének célpontja, a 9P/Tempel 1 ekliptikai üstökös magjára Davidsson és mások (2007) $0,450 \pm 0,250 \text{ g cm}^{-3}$ átlagos sűrűséget határoztak meg.

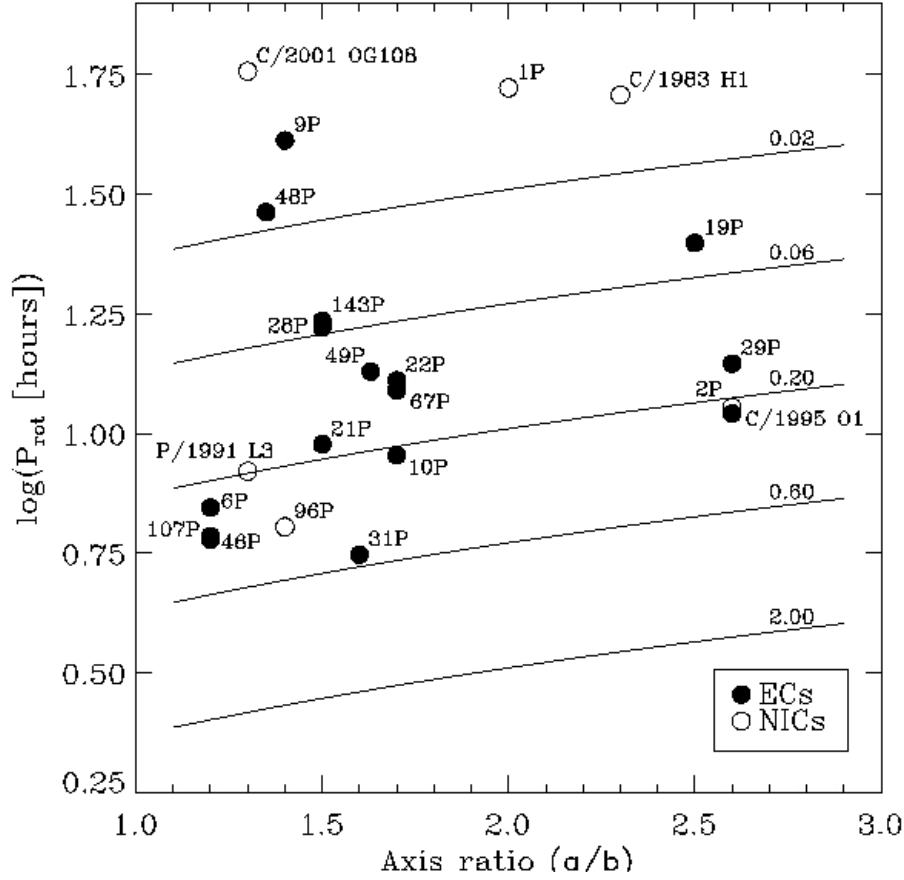
Az előzőekben tárgyalt nagyon egyszerű modell csak forgó elnyúlt ellipszoid alakú test felületéről való anyagdarabok leszakadásának kezdetét írja le, illetve nincsenek a testben belső összetartó erők. Ehhez képest jóval fejlettebb és még egyszerű számításokkal, vagyis nem bonyolult numerikus, esetleg hidrokód alkalmazásával végzett szimulációkkal kezelhető modelleket fejlesztett ki Davidsson (1999, 2001) gömb, illetve forgási ellipszoid alakú, homogén belső tömegeloszlású testekre, amelyeket nem csak a tömegvonzás, hanem belső összetartó erők is segítenek egybetartani.

12.3. Gömb alakú forgó test

A kis égitesteket el lehet helyezni a meghatározott méret (effektív rádiusz) és megfigyelt tengelyforgási idő alapján a rádiusz – rotációs periódus síkon, a továbbiakban (R, P) síkon, ahol R az effektív rádiusz és P a rotációs periódus. Az így elhelyezett égitestek közül ki lehet választani azokat, amelyek "extrém" elhelyezkedésűek ezen a diagramon, azaz amelyek túl közel vannak a forgási szétesés határához. Így tehát ez a diagram fontos eszköz a különböző kis égitesttípusok, és egyedi égitestek forgási széteséssel szembeni stabilitási – instabilitási állapotának megállapításához.

Abból a célból, hogy a később ismertetendő eredmények mögött megbúvó fizikai modell ismert legyen, röviden feleleveníttem a kritikus tengelyforgási idők kiszámítására vonatkozó, Davidsson (1999, 2001) által kidolgozott modelleket. Egy, a megfigyelésekkel is könnyen egybevetethető koherens elméleti háttér rövid ismertetése megvilágítja

³⁶Centripetális erőről van szó külső koordináta-rendszerből nézve – a testhez rögzített forgó rendszerben pedig a centrifugális erőről.



71. ábra. Ekliptikai (EC) és Oort-felhővel kapcsolatos (NIC) üstökösmagok elhelyezkedése a tengelykörüli forgási periódus – tengely arány diagramon. A folytonos görbesereg az állandó tömegsűrűséghez ($g\ cm^{-3}$) tartozó vonalakat ábrázolja, vagyis az ezekhez tartozó a kritikus forgási periódus és tengely arány értékek a görbék segítségével határozható meg a (40) feltétel szerint. A tömegsűrűség alsó határt jelent a forgási stabilitásra adott forgási periódusnál (a kép forrása: a szerző által készített ábra, l. még Lamy és mások 2004).

előttünk a kis égitestek tengelyforgása szempontjából megengedett stabil, veszélyeztetett instabil, illetve tiltott (szétesési katasztrófa) zónáinak helyzetét a (R, P) diagramon. A két nagy alakcsoport esetét külön alfejezetekben tárgyalom: először a gömbalakkal közelíthető, majd pedig a kéttengelyű ellipszoid alakú testek eseteit.

Gömb alakú vagy jó közelítéssel annak feltételezhető testek esetében a (R, P) diagramon szemléletes módon kijelölhetők azok a tartományok, amelyekben elhelyezkedő égitest a gyors tengelyforgás miatti szétdarabolódás szempontjából vagy a "megengedett" stabil régióban van, vagy a "veszélyes" zónában, illetve a "tiltott" szétesési tartományban. Davidsson (1999) modellje alapján az (R, P) síkon kiszámítható azoknak a határvonalaknak a helyzete, amelyek elválasztják egymástól ezeket a tartományokat (72. ábra). A "megengedett" régió azokat az objektumokat tartalmazza, amelyekre a centrifugális erő nem elég nagy a mechanikai forgási szétesési instabilitás létrehozásához. A "veszélyes" zónába azok az objektumok kerülhetnek, amelyek a

nyíró erők hatására széttöredeznek, de még a gravitáció ereje egybetartja a testüket. A "tiltott" zónában a test méretéhez és belső anyagi paramétereikhez képest túl gyors tengelyforgás miatt szétesett objektumok találhatók.

Homogén tömegeloszlású, merev és összenyomhatatlan, szabad tengely körül, szabad térben (külső erőktől mentesen) forgó gömb alakú (közelítőleg gömbnek feltételezhető) testre a spontán szétesésre vonatkozó kritikus forgási periódust a következő képlet határozza meg

$$P_{\text{crit}_1} = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{1}{3}\pi G\rho + \sigma_T/(\rho R^2)}} , \quad (41)$$

ahol ρ a test átlagos tömegsűrűsége, R a test (effektív) rádiusza, σ_T a szakítószilárdság³⁷ (*tensile strength*), és G az általános gravitációs állandó.

Spontán nyírási széttöredezés esetére a kritikus forgási periódus

$$P_{\text{crit}_2} = \pi \sqrt{\frac{\rho}{2S}} R , \quad (42)$$

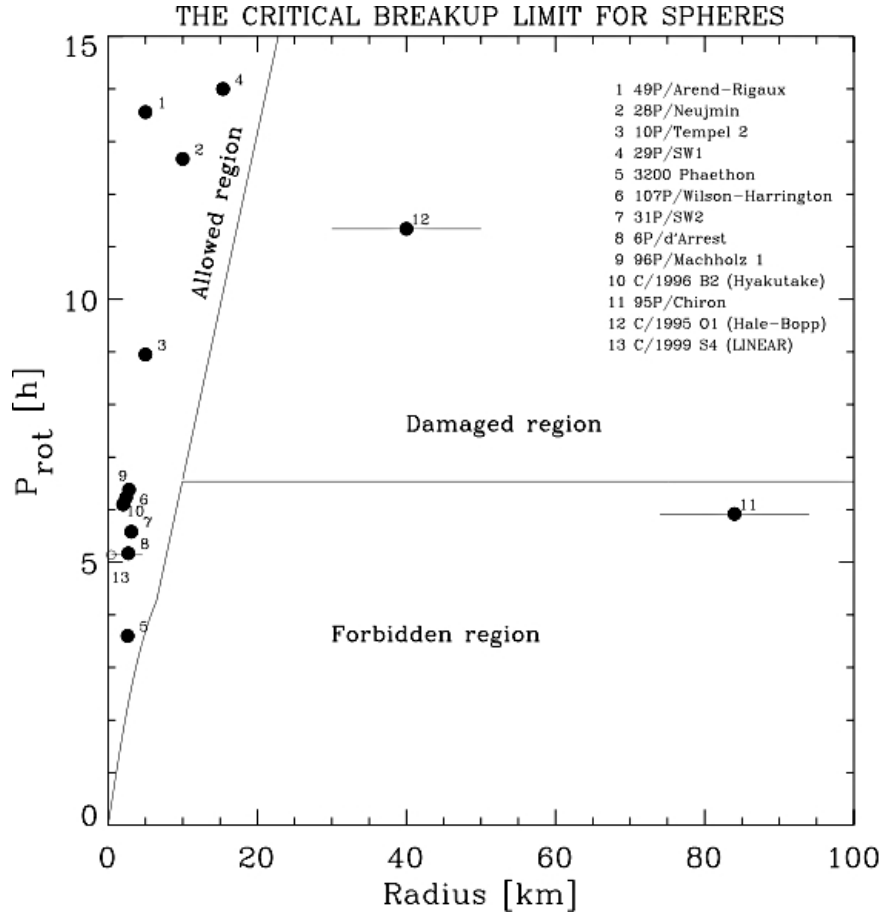
ahol S a test anyagának nyírási modulusa. A kritikus forgási idő azt jelenti, hogy ennek elérésekor a test a szétnyírásból adódóan széttöredezik, de még nem esik teljesen szét, mert a gravitáció összetartja. A következő kifejezések azokat a kritikus forgási periódusokat, illetve a hozzájuk rendelt kritikus rádiuszokat adjuk meg, amely rádiusz intervallumokon belül a nyíróerők miatt már szétदारabolódásnak indult test szétesése végbemegy (l. a 72. ábrát):

$$P_{\text{crit}_3} = \sqrt{\frac{3\pi}{2G\rho}} \quad (43)$$

$$P_{\text{crit}_4} = \sqrt{\frac{\pi^3}{2.8G\rho}} . \quad (44)$$

Az (R, P) síkban megszerkeszthető a forgási széttöredezéssel szembeni stabilitási – instabilitási határvonal rendszer, amely "megengedett", "veszélyes" és "tiltott" tartományokra osztja ezt a síkot. Ez a határvonal rendszer egy szigorúan monoton növekvő vonalból, és egy, kiszámítható rotációs periódusnál egy vízszintes egyenes szakaszból áll (72. ábra). A szigorúan monoton növekvő görbe három részre osztható, amelyeket a fentebb meghatározott kritikus forgási idők, illetve az ezekből kiszámítható rádiuszok határoznak meg. Az első a $0 \leq R \leq R_3$ által határolt rész, amelyben a szakítószilárdság dominál, ez ellen hat a centrifugális erő. Ennek határa rádiuszban az R_3 , amely a $P_{\text{crit}_3} = P_{\text{crit}_1}$ feltételből számítható ki. A második szakasz az $R_3 \leq R \leq R_4$, ahol a nyíró erőkől származó széttöredezés dominál, vagyis a nyírási szétesés (l. (23) egyenlet), amelyet azonnal szétesés követ a (25) egyenlet alapján meghatározott kritikus forgásidőnél. Az R_4 határ-rádiuszt a $P_{\text{crit}_4} = P_{\text{crit}_1}$ feltétel határozza meg. A harmadik szakaszt a már a nyíró erők által "szétnyírt" testre vonatkozó kritikus forgásidő határozza meg a (25) egyenlet alapján, miután $P_{\text{crit}_4} > P_{\text{crit}_3}$. A "veszélyeztetett" és "tiltott" zónákat elválasztó vonal vízszintes félegyenes az (R, P) diagramon, amelyhez a $P_{\text{crit}_4} =$ állandó kritikus forgási idő tartozik (minden rádiuszra az aktuális rotációs periódus $P_{\text{rot}}: \forall R > R_4 \mapsto P_{\text{rot}} = P_{\text{crit}_4} = \text{konstans}$).

³⁷ Az anyag által törés nélkül elviselt legnagyobb feszültség, húzófeszültség. A szakítószilárdságot Davidsson (1999, 2001) T jelölése helyett ebben a dolgozatban σ_T jelöli.



72. ábra. Gömbalakúnak feltételezhető üstökösragok és a 2060 Chiron (95P/Chiron) kentaur elhelyezkedése a rádiusz – forgási periódus diagramon a megfigyelések alapján (forgási idő és effektív rádiusz) Tóth & Lisse (2006) alapján. Aggregátum típusú üstökösrag anyagra (kristályos vízjég és porszemcsék) kiszámított mechanikai szakítószilárdságnak Greenberg és mások (1995) modellje alapján megszerkesztett elhatároló vonalait is feltüntettük. A "megengedett" (allowed) tartományban stabil a forgás, azaz nincs kitéve a test a túl gyors tengelyforgásból adódó szétdarabolódásnak. A "veszélyeztetett" (damaged) zónában a belső nyírófeszültség hatására kezd széttörözni a test, de a gravitáció még egybentartja. A "tiltott" (forbidden) zónába került test szétesik kisebb darabokra. A P_{crit_4} (44) a vízszintes vonalnak felel meg. A P_{crit_3} (43) a monoton növekedő görbe inflexiós pontjának ordinátája a monoton növekvő görbe $P < P_{\text{crit}_4}$ szakaszán. A hozzájuk tartozó R_3 és R_4 rádiuszok kiszámíthatók a $P_{\text{crit}_3} = P_{\text{crit}_1}$, illetve a $P_{\text{crit}_4} = P_{\text{crit}_1}$ feltételekből (41, 43, 44) (kép: a szerző által készített ábra, l. még Toth & Lisse 2006).

Megemlítem, hogy a belső feszültségektől mentes "törmelék halmaz" (rubble pile) felépítésű testekre, amelyekre a centrifugális erőt csakis a test saját gravitációja egyensúlyozza ki a külső erőktől mentes (szabad) forgás esetében Solem (1995) alapján a kritikus forgási periódus a

$$P_{crit_5} = \sqrt{\frac{3\pi}{G\rho}} \quad (45)$$

képlettel számítható ki.

12.4. Elnyúlt alakú forgó ellipszoid

Homogén tömegeloszlású, merev és összenyomhatatlan, szabad tengely körül, szabad térben (külső erőktől mentesen) forgó, elnyújtott (*prolate*) szferoidra a spontán szétesésre vonatkozó kritikus forgási periódust a következő képlet határozza meg

$$P_{prolate} = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{1}{4}\pi G\rho \mathcal{E}(f) + \sigma_T/(\rho R^2 f^2)}} \quad (46)$$

ahol $\mathcal{E}(f)$ az alaki tényező vagy alakfüggvény (l. (23b) Davidsson 2001), és f a tengelyarány. *Prolate* szferoidra a test félnagy tengelyeire fennáll, hogy $a > b = c$, így $f = a/b > 1$. Az alaki tényezőt a következő összefüggés adja meg

$$\mathcal{E}(f) = \frac{2\pi f}{(f^2 - 1)^{3/2}} \ln \left(\frac{f + \sqrt{f^2 - 1}}{f - \sqrt{f^2 - 1}} \right) - \frac{4\pi}{f^2 - 1}. \quad (47)$$

Kéttengelyű ellipszoidokra az $R = R_{\text{eff}}$ effektív rádiuszt az ellipszoid testtel megegyező tömegű (tömeg-ekvivalens modell) gömb sugarával helyettesítjük. Az ellipszoidokra vonatkozó (R, P) Davidsson-diagramot a forgási szétesési határgörbe a "megengedett" és "tiltott" tartományokra osztja ketté.

A modellel megadható a test egybentartásához szükséges szakítószilárdság legkisebb értéke is, vagyis a szakítószilárdság alsó határa ($\sigma_{T\min}$). Tekintsünk egy homogén, merev és összenyomhatatlan gömböt vagy elnyújtott (*prolate*) szferoidot, amely félnagy tengelyeinek aránya $f = a/b \geq 1$, és $a \geq b = c$. Jelöljük a b félkistengelyt R_p -vel ($R_p := b$). Az égitestek esetében sokszor előfordul, hogy a forgási széteséssel szembeni stabilitáshoz valamilyen minimális szakítószilárdságra ($\sigma_{T\min}$) van szükség. Az objektumok megfigyelt rádiusza (most R_p) és forgási periódusa ismeretében a Davidsson (1999, 2001) modellekben megadott kritikus forgásidők alapján a stabil forgáshoz szükséges minimális belső szakítószilárdság kiszámítható. Gömb és *prolate* szferoid alakkal közelíthető testekre

$$\sigma_{T\min} \stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} \rho R_p^2 \left(\frac{\pi^2}{P^2} - \frac{1}{3} G\rho \right) & \text{ha } f = 1 \text{ (gömb, amelyre} \\ & R_p = a = b = c) \\ \rho R_p^2 f^2 \left(\frac{\pi^2}{P^2} - \frac{1}{4} G\rho \mathcal{E}(f) \right) & \text{ha } f > 1 \text{ (prolate szferoid)} \end{cases} \quad (48)$$

ahol $\mathcal{E}(f)$ a *prolate* szferoidokra vonatkozó alakfüggvény (l. 7. egyenlet is).

12.5. A szakítószilárdság: a modell kulcs paramétere

A D/Shoemaker-Lev 9 szétesett üstökös eredeti magjára por-aggregátum modellt feltételezve Greenberg és mások (1995) a szakítószilárdságra mikrofizikai alapon közelítő képletet adott meg.

12.5.1. A szakítószilárdság 1995-ös modellje (Greenberg és mások 1995)

A Greenberg és mások (1995) modellben az aggregátum szakítószilárdsága (Greenberg és mások 1995):

$$\sigma_T = 6,1 \times 10^3 (1 - \Psi) \beta_n (a/0,1\mu m)^{-2} \text{ dyn cm}^{-2}, \quad (49)$$

ahol Ψ a porozitás,³⁸ vagyis a makroporozitás, ami a mag egészére vonatkozik, a a részecske rádiusza (mikron), β_n az érintkezési pontok száma ($1 \leq \beta_n \leq 12$) és $\beta_n = 12$ köbös rács esetében. Megjegyezzük, hogy a szakítószilárdság a részecske rádiusának négyzetével fordítottan arányos, erre igen érzékeny. Greenberg és mások (1995) modelljében β_n és a porozitás számértékei a következők. A csillagközi por aggregátum modellre az érintkezési pontok átlagos száma $\beta_n = 5$. A porozitás $\phi = 0,8$, a Halley por infravörös tartományban végzett megfigyeléseivel megegyezően (Greenberg & Hage 1990) és az ennek megfelelő közepes sűrűség az üstökösmaagra $0,28 \text{ g cm}^{-3}$.

Mivel $\Psi = 1 - V_d/V$, ahol a szilárd komponens térfogata V_d , és a teljes térfogat V , ekkor a relatív sűrűség nem más, mint $1 - \Psi = \rho/\rho_d$, ahol ρ a test átlagsűrűsége, és ρ_d a szilárd (poros) komponens tömegsűrűsége. Ennek segítségével a (49) egyenletből a porozitás helyett az egyes porszemcsék átlagos tömegsűrűségét (ρ_d) és az üstökösma átlagsűrűségét (ρ) véve (kg m^{-3})

$$\sigma_T = 6,1 \times 10^{-12} \left(\frac{\rho \beta_n}{\rho_d a^2} \right) \text{ (Pa)}. \quad (50)$$

Az üstökösmaagoknak a gyors tengelyforgásból adódó szétesése elleni stabilitás vizsgálatához Davidsson (1999) a következő paramétereket vette alapul: $\rho_d = 1540 \text{ kg m}^{-3}$, $\beta_n = 5$, és $a = 0,15 \mu m$. Ekkor a szakítószilárdságra az üstökösma átlagsűrűségének függvényében a következő egyszerű összefüggés írható (SI egységek)

$$\sigma_T = 0,88\rho \text{ (Pa)}. \quad (51)$$

Ennek a képletnek az alapján a $\rho = 280 - 300 \text{ kg m}^{-3}$ sűrűséggel számolva a szakítószilárdság mintegy két nagyságrenddel nagyobb, mint a D/S-L 9 eredeti magjára becsült érték de még három nagyságrenddel kisebb, mint a szilárd vízjégé (l. Meech 1996, 3. táblázatát). Davidsson (1999, 2001) modellszámításaiiban kereken 300 kg m^{-3} -nek vette az üstökösma közepes sűrűségét.

Milyen mértékben befolyásolja a szakítószilárdságot az üstökösma átlagos sűrűsége? Legyen ez most 300 kg m^{-3} . A tipikus üstökös porrészecske mérettartomány $0,10 - 0,15$ mikron, amelyhez tartozó szakítószilárdság intervallum $10^2 - 10^3 \text{ Pa}$. A $0,1$ mikronos referencia porrészecske méret (Greenberg és mások 1995) és a Halley por modell (Lamy és mások 1987) alapján kiszámolt szakítószilárdság 441 Pa . A mag más átlagsűrűségénél, például $100, 700$ és 1000 kg m^{-3} esetén ugyanerre a por modellre $147, 1030$ és 1471 Pa , rendre, a kapott szakítószilárdság. Ezek az értékek az üstökösmaagok anyagának jelenleg ismert, illetve feltételezett fizikai paraméterei alapján a Meech (1996) és Rickman (1996) által számított szakítószilárdság tartományba esnek.

Megvizsgáltam (l. Toth & Lisse 2006), hogy milyen hatása van a rotációs periódus – rádiusz síkon a forgási szétesési stabilitási határvonalak helyzetére az "erősebb", illetve "gyengébb" belső összetartó erőt eredményező anyagi összetétel. A por helyett csak vízjég szemcséket véve, és ezek szakítószilárdságát figyelembe véve (Jewitt 1992);

³⁸Greenberg és mások (1995) P jelölése helyett a porozításra itt a Ψ jelölést használok.

porózus vízjég erős szakítószilárdsággal ("jeges-piszkos üstökösmodell, "icy dirt-ball, Meech 1996); valamint a Lamy és mások (1987) Halley por modellét véve, de erősebb, 4000 Pa szakítószilárdságot feltételezve számítom ki a stabilitási zónahatárok helyzetét. Fontos megjegyezni azt, hogy a porozitás és a szakítószilárdság korrelál: csökkentve a porozitást, növekszik a belső összetartó erő. Az "erős Halley modell" 0.10 porozitásnak felel meg, amely jelentősen különbözik a standard intersztelláris por aggregátum modelltől, ahol a porozitás 0.80–0.85 (Greenberg és mások 1995; Davidsson 1999). Az motiválja mégis, hogy belső összetartásban erősebb anyagokat is figyelembe vegyünk, mert lehetséges, hogy közetszerű ("rocky", sziklás) porösszetétel is előfordulhat az üstökösöknél, amire Jessberger (1999), valamint Hanner (1999) is utaltak tanulmányaikban, illetve a Campins & Swindle (1998) által vizsgált üstökös eredetű meteoritek vizsgálata is jelez. Továbbá a GIOTTO üstökös-szondának a Halley magjáról, vagy legutóbb a NASA Deep Space 1 (DS1) űrszondájának a 19P/Borrelly üstökös magjáról készített felvételei is utalnak az intersztelláris aggregátumnál erősebb anyagra, legalábbis a magok felszínén (nem jeges felszíni részek, becsapódási alakzatok, mechanikai feszültségnek kitett morfológiai alakzatok). A megfigyelt objektumok helyzetét és az eredményül kapott elválasztó egyenesek helyzetét az (R , P) síkon a (73. ábra) mutatja.

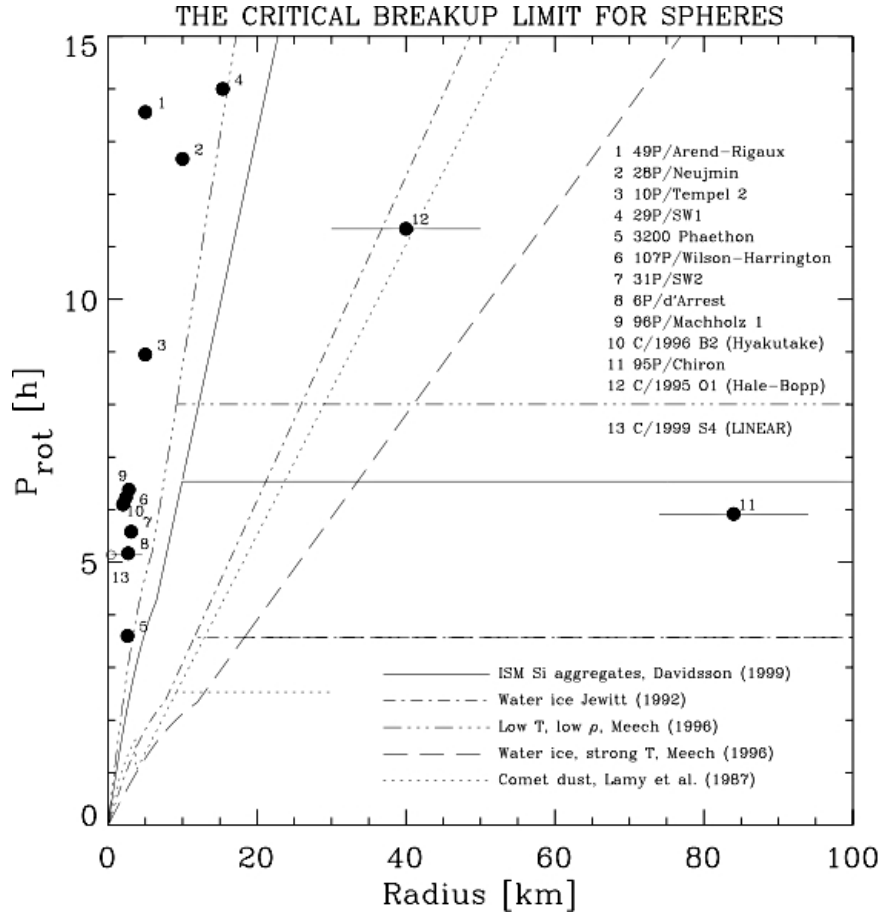
A "gyenge" üstökösmodell anyag kis szakítószilárdsággal és kis por- vagy jég szemcse tömegsűrűséggel (Meech 1996) a Chiront a "tiltott" zónában tartja, a Hale-Bopp pedig marad a "veszélyes" zónában. A 29P/Schwassmann-Wachmann 1 (29P/SW 1) és 3200 Phaethon stabilitási helyzete megváltozik. A 29P/SW 1 átkerül a "megengedettből" a "veszélyes" zónába, a 3200 Phaethon pedig a "megengedettből" a "tiltott" zónába. Az "erős" vízjég anyag nagy szakítószilárdsággal (Meech 1996) a Chiron kivételével minden objektumot a "megengedett" tartományba helyez át, miközben a Chiron a "veszélyes" zónába kerül át a "tiltottból". Tehát a Chiron elkerülheti a szétesést ilyen belső anyagi és szerkezeti összetétel esetén (nagyobb sűrűség vagy belső összetartó erők), de a "veszélyes" zónában a belső nyírás még fennmarad, és a saját gravitációja tartja össze.

Vízjég anyag (Meech 1996) és por modell (Lamy és mások 1987) a Hale-Boppot a "megengedett" tartományba helyezi át, míg a Jewitt (1992) által megadott anyag (fizikai paraméterek), illetve az "erős" anyag ($\sim 10^3$ Pa) még mindig a "veszélyes" zónában hagyja, de az objektum pozíciója már nagyon közel van a "megengedett"/"veszélyes" zónák határához, amennyiben a Hale-Bopp méretmeghatározási, illetve elnyújtott alakjából adódó hibahatárt is figyelembe vesszük (Weaver & Lamy 1997; Lamy és mások 2004).

Összehasonlítás végett "erős" anyag (4000 Pa) hatását is megvizsgáltam az (R , P) diagramon a stabilitási határvonalak és az egyes megfigyelt objektumok helyzetére (l. még Toth & Lisse 2006). A vízjég (Meech 1996) és üstökösmodell (Lamy és mások 1987), valamint az "erős" anyagok feltételezésével megszerkesztett "veszélyes"/"tiltott" zónák határvonala gyorsabb forgást is megenged (73. ábra). Ennek következtében több objektum helyzete stabilabbá válik a forgási széteséssel szemben: vagy a "megengedett" tartományba kerülnek és egyúttal távolabb is a határvonalaktól (29P/SW1, 3200 Phaethon), vagy a "veszélyesből" a "megengedettbe" (Hale-Bopp), vagy pedig a "tiltottból" a "veszélyes" zónába (Chiron).

12.5.2. A szakítószilárdság 2000-es modellje (Sirono & Greenberg 2000)

A jeges-poros kis égitestek szakítószilárdságának első fontos modellje (Greenberg és mások 1995) után öt évvel ennek egy továbbfejlesztett változatával állt elő Sirono



73. ábra. A különböző belső összetartó erejű vízjég és kozmikus poranyagok hatása a stabilitási zónák és a megfigyelt objektumok helyzetére a Davidsson-diagramon (l. 72. ábrát is). A szakítószilárdság és por tömegsűrűség adatok Jewitt (1992) és Meech (1996) alapján figyelembe véve. Aggregátum típusú üstökösma anyagra (kristályos vízjég és porszemcsék) kiszámított mechanikai szakítószilárdsággal és tömegsűrűséggel a Greenberg és mások (1995) modellje alapján megszerkesztett elhatároló vonalakat is feltüntetjük (folytonos vonal). Egy erősebb összetartó erő (4000 Pa) a Lamy és mások (1987) pormodellel lett számolva. A "veszélyes"/"tiltott" zónák határa jelentősen megváltozik. Az interstelláris pormodellel kapcsolatos határvonalak a Chiront a "tiltott" zónában tartják (kép: a szerző által készített ábra, l. még Toth és Lisse 2006).

& Greenberg (2000), akik a por-aggregátumok szerkezetét részletesebben vették figyelembe. Összehasonlítottam a Greenberg és mások (1995), valamint a Sirono & Greenberg (2000) által magadott por-aggregátum modellek alapján a kis égitestek forgási szétesés elleni stabilitását. Először röviden ismertetem a Sirono & Greenberg (2000) modellből adódó szakítószilárdságokat, majd ezeknek felhasználásával vizsgálok a primitív kis égitestek gyors forgás következtében történő szétesés elleni stabilitását. Sirono & Greenberg (2000) por-aggregátum modelljében az aggregátum-lánc térbeli

szerkezetet alkot, amelyben egyforma rádiuszú részecskéket (porszemcséket) tételezünk fel l élhosszúságú (karakterisztikus méretű) térbeli elrendezésben, rácson. Az így elrendezett részecske-aggregátum lánc szakítószilárdsága

$$\sigma_{\text{ch}} = \frac{F_{\text{sep}}}{l^2} = \frac{3\pi\beta\gamma R}{\alpha l^2}, \quad (52)$$

ahol F_{sep} az érintkező részecskék eltávolításához szükséges erő, γ a felületi energia (például vízjégre $\gamma = 100 \text{ erg cm}^{-2}$), $\alpha = 2, 2$ és $\beta = 1, 8$ a csillagközi por-aggregátum modellekből numerikusan meghatározott állandók (Dominik & Tielens 1997). A valóságban a szakítószilárdságot üregek vagy anyag-repedések (a rács megszakadásai, folytonossági hibái) jelentősen lecsökkentik, de ezeknek a hatását a (52) képlet nem tartalmazza. Magyar szilárdtestfizikusok (Arato és mások 1995) eredményeit felhasználva Sirono & Greenberg (2000) az üregek hatását figyelembe véve módosították a modellt azt feltételezve, hogy az üregek hossza (karakterisztikus mérete) l . Ekkor az üregek aggregátum szerkezet szakítószilárdsága

$$\sigma_v = \left[\frac{E_s \gamma_e}{l} \right]^{1/2}, \quad (53)$$

ahol γ_e az aggregátum effektív felületi energiája és fennáll a $\gamma_e = \gamma \pi a_c^2 / l^2$ összefüggés, amelyben a_c az egymással érintkező részecskék kör alakú érintkezési felületének rádiusza (pl, vízjég szemcsék esetén $a_c = 1, 2 \times 10^{-6} \text{ cm}$).

Greenberg és mások (1995) eredeti por-aggregátum modelljében a szakítószilárdság (l. még (49)) az egységnyi térfogatra eső teljes koheziós energia felhasználásával

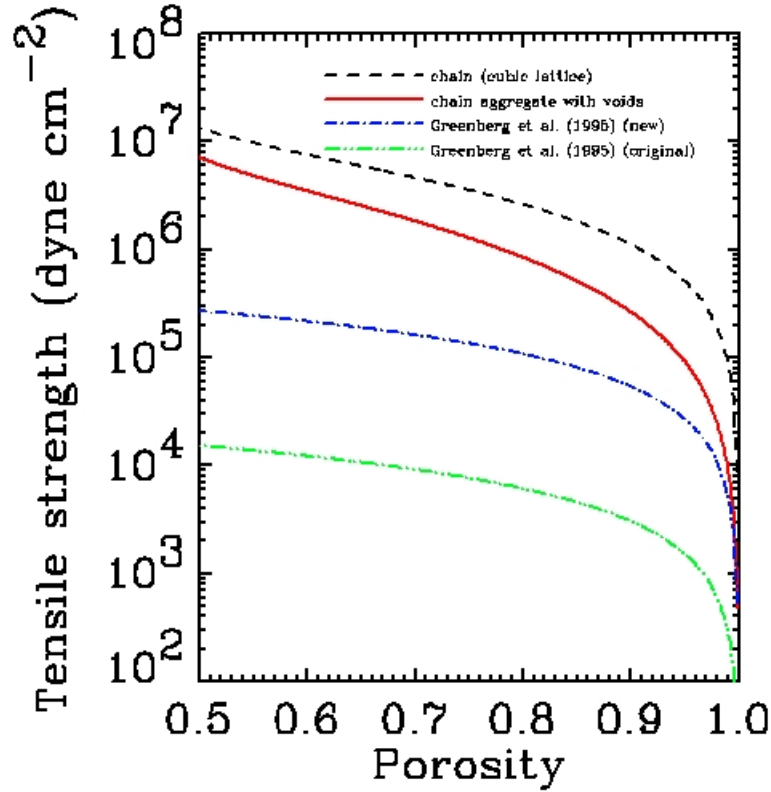
$$\sigma_{\text{Green}} = \frac{3z\Psi\gamma a_c^2}{4R^3}, \quad (54)$$

ahol z a porszemcséken az érintkezési pontok átlagos száma. A Greenberg-féle új szakítószilárdság (σ_{Green} az (54) képletben) többszöröse az eredeti Greenberg és mások (1995) szakítószilárdságnak (σ_T a (49) képletben), mert a (54) képletben a γ felületi energia, vagyis a molekulaközi energia nagyobb, mint amelyet Greenberg és mások (1995) feltételeztek.

A NASA Deep Impact űrkísérletének kutatójával, C. M. Lisse-vel együtt összehasonlítottuk a Greenberg és mások (1995) és a Sirino & Greenberg (2000) modellt a primitív kis égitestek gyors tengelykörüli forgás elleni szétesésének vizsgálata alapján (Toth & Lisse 2010). Ebben a munkában összehasonlítottam a különböző por-aggregátum modellek által meghatározott szakítószilárdság – porozitás függvényeket: az eredeti modellt Greenberg és mások (1995) és annak (54) képlettel adott módosítását, valamint az üreg-nélküli és üregeket feltételező modelleket (52, 53). Azt találtam, hogy a Sirono-Greenberg (2000) modellben a belső összetartó erők minden esetben nagyobbak, mint a Greenberg és mások (1995) eredeti, illetve módosított modelljében (74. ábra). E szerint tehát a szakítószilárdságok a különböző modellek alapján a következő nagyságrendi viszonyban állnak:

$$\sigma_T < \sigma_{\text{Green}} < \sigma_{rmv} < \sigma_{\text{ch}}. \quad (55)$$

A primitív kis égitestek elhelyezkedését vizsgáltam a rotációs periódus – effektív rádiusz diagrammon négy különböző mérettartomány szerint elkülönítve és az eredményt a 75. ábra szemlélteti és Toth & Lisse (2010) publikáció ismerteti részletesen. Az ekliptikai üstökösök (EC) és fő-öv üstökösök (MBC), valamint különböző



74. ábra. Por-aggregátum modellekből meghatározott szakítószilárdságok a porozitás függvényében (kép: a szerző által készített ábra, l. még Toth & Lisse 2010).

méretű kentaurok (CEN) és transzneptun-objektumok (TNO) alakját közelítőleg elnyújtott (prolate) ellipszoidnak tételeztem fel. A paneleken az elnyújtott alakú ellipszoid modellekre kiszámított stabilitási határvonalak is fel vannak tüntetve, amelyek különböző belső szakítószilárdsági modellekkel kapcsolatosak: térbeli rácsba rendezett porszemcsék, rács-aggregátum üregekkel, Greenberg-féle aggregátum modell új változata Sirono & Greenberg (2000) alapján, az eredeti Greenberg és mások (1995) aggregátum modell. Az üreges rács modellt különböző mértékben elnyújtott ellipszoidokra alkalmaztam: a/b 1,01 (közel gömb) és 3,0 tengelyarányokig bezárólag. Ugyanis minél elnyújtottabb a test alakja, annál feljebb van a hozzátartozó határvonal a rotációs periódus mentén, tehát annál szigorúbb a stabilitási feltétel az ilyen testekre. Megállapítottam, hogy az összes ma ismert üstökös és MBC stabil a gyors forgás miatt bekövetkező szétesés ellen, a nagyobb kentaurok és TNO-knál azonban előfordulhat szétesés, mint például a 136108 Haumea és (150642) 2001 CZ31 esetében.

Különösen érdekes eredmény, hogy a 133P/Elst-Pizarro fő-övbeli üstökös (MBC) is stabil a gyors tengelykörüli forgás következtében esetleg bekövetkező szétesés ellen, a kis égitest viszonylag rövid rotációs periódusa (mintegy 3,4 óra) ellenére. Sőt, az eddig megfigyelt többi MBC is stabil az ilyen okból történő szétesés ellen, tehát a fő-öv üstökösei aktivitásának magyarázatában a elsősorban nem túl gyors forgás játszik szerepet. Ugyanis a forgási szétesés előjeleként a test belsejéből előkerült friss belső

13. KITEKINTÉS – MEGOLDATLAN PROBLÉMÁK ÉS LEHETŐSÉGEK 155

jeges-poros anyag Nap által történő felfűtése okozhatná a szublimációs aktivitást.

Egy másik elgondolkodtató eredmény, hogy a Haumea transzneptun-övezeti törpebolygó a gyors tengelykörüli forgás miatt bekövetkező szétesési zónába esik a rotációs periódus – rádiusz síkon (lásd a d) panelt a 75. ábrán). A Haumea esetében fontos körülmény az, hogy ez az eddig elsőként felismert dinamikai család a transzneptun-övezetben (Brown és mások 2007). A Toth & Lisse (2010) munkában felvetettük, hogy a nagy méretű és elnyújtott alakú Haumea dinamikai családjának kialakulása egy nagyobb őszégitest gyors tengelykörüli forgás miatt szétesés következtében alakult ki. Más elképzelés szerint (Schlichting & Sari 2009) ütközés következtében jött létre, tehát ez a kérdés ma még vita tárgyát képezi.

A Deep Impact űrkísérlet, illetve a korábbi megfigyelések szerint azonban az üstökösök laza szerkezetű, gyengén összetartott kis égitestek, tehát a Sirono & Greenberg (2000) por-aggregátum modell túl erős belső összetartó erővel egybetartott üstökösöket eredményez, ami nem egyezik a megfigyelésekkel. Tehát az üstökösök, az üstökösöket összetartó belső erők modelljének tökéletesítésére van szükség. Ennek a kutatásnak folytatásaként a jövőben a Sirono-Greenberg (2000) modellnek az üstökösök belső szerkezetét jobban leíró finomítását és a megfigyelésekkel való ismételt összehasonlítását tervezem.

13. Kitekintés – megoldatlan problémák és lehetőségek

A HST, ISO és Spitzer (SEPPCoN) üstökösfigyelési programok által az eddig ismert ekliptikai üstökös populációnak csak mintegy egyharmadát sikerült megfigyelni, az üstökösök méretét és egyéb fizikai paramétereit meghatározni. A rotációs periódusok, fénygörbék meghatározása területén is rengeteg még a megfigyelni való objektum.

Az ekliptikai üstökösök populációjának leltára várhatóan bővülni fog a közeljövő nagy csillagászati átvizsgáló programjai által, nevezetesen a Pan-STARRS és LSST programok által. Ezek a programok várhatóan egészen a belső Oort-felhőig rengeteg üstökös és transzneptun-objektumot fognak felfedezni. Rendkívüli nehézséget és kihívást jelent az ezekkel a programokkal akár csak egy éjszakán keletkezett hatalmas digitális megfigyelési anyag feldolgozása, kiértékelése, az objektumok követése, pályájuk meghatározása és egyéb, fizikai tulajdonságaik megismerésére irányuló megfigyeléseik folytatása vagy csupán azok előkészítése céljából. Mindenképp várható a Kuiper-öv háromdimenziós térképének elkészítése. Az Oort-felhő üstökösök részletesebb tanulmányozása, az Oort-felhőhöz tartozó üstökösök méreteloszlásának meghatározása is alapvetően fontos és a jövő nagy földi-bázisú és űrteleszkópokkal folytatott átvizsgáló programjai ezt elősegíthetik.

A földközeli objektumok felfedezésére, nyomonkövetésére és fizikai tulajdonságaik vizsgálatát célzó földi- és űrcsillagászati megfigyelő programok, valamint helyszíni űrszondás vizsgálatok, űrkísérletek végrehajtása alapvetően fontos ezeknek – adott esetben bolygókra is veszélyt jelenthet – égitestek leltárának bővítésében, illetve fizikai tulajdonságaik megismerésében. Ezek között az objektumok között több egykoron aktív üstökös is van, tehát ezeknek a földközeliében történő – esetleg űrszondával történő vizsgálata a mai technológiával is már viszonylag egyszerűen kivitelezhető.

Az üstökösök fizikai és kémiai tulajdonságainak további tanulmányozására nagy földi teleszkópokkal történő megfigyelések, valamint helyszíni űrszondás vizsgálatok

is folynak majd. Például az ALMA (Atacama Large Millimeter Array) projekt keretében új, részletes asztrokémiai ismereteket kaphatunk az üstökösökről, a helyszíni űrszondákkal (Rosetta, Comet Odyssey) pedig az üstökösök közvetlen közelében, sőt a felszínére leszállva közvetlen információt szerezhetünk annak fizikai és kémiai tulajdonságairól. Problémát jelenthet azonban például a már előrehaladott állapotban lévő nagyműszer projektek, illetve űrprojektek törlése vagy elhalasztása, mint például a JWST (James Webb Space Telescope) esetében is felvetődött ilyen.

Fontos lesz a jövőben az üstökösök nemrég azonosított forrásvidékeinek tanulmányozása is: a fő aszteroida-öv Themis és Hilda zónáiban. A Jupiter-trójai kisbolygók eredetének és fizikai tulajdonságainak vizsgálata is sorra fog kerülni.

Az üstökösök, transzneptun-objektumok, valamint a fő-öv üstökösei belső szerkezetének, az aktivitásuk lehetséges mechanizmusainak újabb elméleti modellekkel, illetve azok megfigyelésekkel való egybevetése is napirenden lesz a jövőben. Különösen fontos lenne megérteni, miért esnek szét spontán módon az üstökösök, illetve miért produkálnak kitöréseket, olykor szuperkitöréseket.

Az üstökösök – akár ekliptikai, akár pedig az Oort-felhőhöz tartozók tanulmányozása által más naprendszer törmelékkorongjai, illetve extraszoláris bolygórendszerek kialakulása és fejlődése fontos támpontot jelenthet. Fordítva, az extraszoláris törmelékkorongok, illetve bolygórendszerek vizsgálatával a Naprendszer régmúltja és fejlődése érthető meg jobban.

14. Az eredmények hasznosítása, továbbfejlesztése

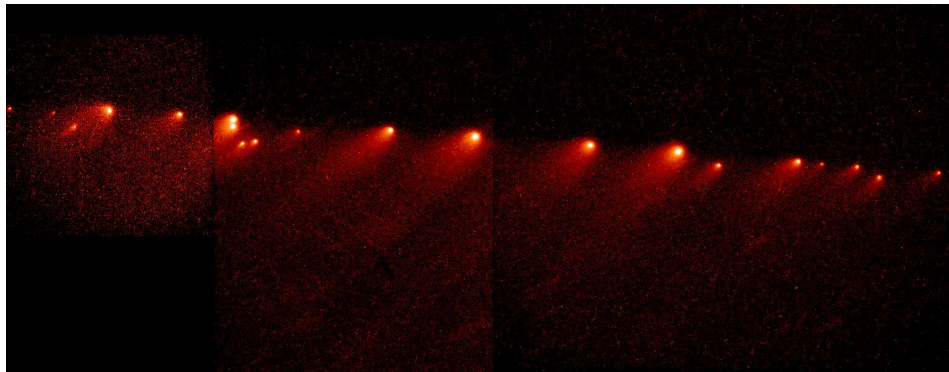
Az értekezés tárgya felfedező jellegű, tudományos alap kutatás, ezért nem várható annak azonnali közvetlen gyakorlati, illetve anyagi hozadéka. Mivel azonban a disszertációban ismertetett eredmények a HST-vel végzett pontos fotometriai megfigyeléseken, illetve az ISO és Spitzer űrtávcsövekkel kapott infravörös fotometriai megfigyeléseken alapulnak, továbbá az üstökösök megfigyelése igen nehéz feladat, ráadásul nehéz műszeridőt kapni erre a célra, ezért a disszertáció eredményei várhatóan még hosszú ideig alapvetőek és egyedülállóak lesznek az üstökösökkel kapcsolatosan. 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:

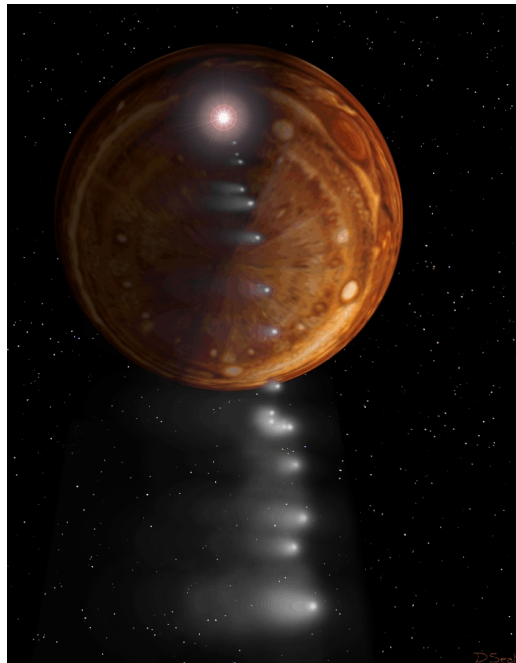
1. A megfigyelt üstökösök közül többet közvetlen közléről helyszíni űrszondák tanulmányoztak és a disszertációban tárgyalt vonatkozó eredményeket a szondák programjának tervezésekor figyelembe vették; tehát föld körüli pályán elhelyezett űrtávcsövekkel végzett optikai és infravörös csillagászati megfigyelések in-situ űrszondák programját segítették (NASA Deep Space 1, CONTOUR, Deep Impact/EPOXI, Stardust-NExT).
2. A jövőben megvalósuló helyszíni űrszondás programok cél-üstökösök 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 ismertett adatok, mint például a 67P/Churyumov-Gerasimenko üstökös magjának modellezésére, az ESA Rosetta üstökös-szondája 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 eredményeimet a megfigyelésekre kiválasztott üstökösök esetében, illetve a kapott eredményeiket összehasonlíthatták a korábbi eredményeimmel. 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).
5. A 133P/Elst-Pizarro üstökös viselkedést mutató fő-övbeli kisbolygóval kapcsolatos vizsgálataim (Toth 2000, 2006a,b)) 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 és mások 2004; Hsieh & Jewitt, 2006).
6. Az üstökösök méreteloszlása újabb megfigyelési mintákkal kiegészíthetők 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 paramétereinek meghatározásában is. Az ekliptikai üstökösök méretének meghatározására kifejlesztett módszer további űrtávcsöves megfigyelésekre alkalmazható.
7. A Naprendszer primitív kis égitestjeinek, 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 törmelékkorongok és bolygórendszerek egymás közötti, illetve a Naprendszerhez képest meglévő hasonlóságainak és különbségeinek (diverzitás) a feltárása, megismerése szempontjából is fontos a Naprendszer kisebb égitestjeinek vizsgálata.
 - A távlatokat tekintve pedig asztrokémiai és asztrobiológiai kutatásokban 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.

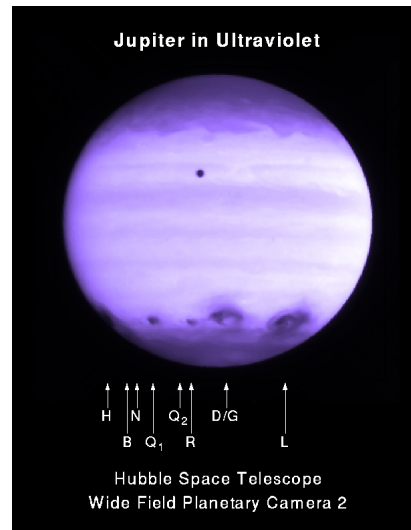
A fenti 8. pont alapján a disszertáció kapcsolatos az üstökösök nagybolygókkal és azok holdjaival való ütközési veszély elhárításával, illetve az ilyen kozmikus katasztrófák hatásának csökkentésével is, hiszen az üstökösök mérete, méreteloszlása, forgási periódusa, aktivitása és belső szerkezetére vonatkozó következtetései



(a) HST WFPC2



(b) A Jupiter déli pólusára való rálátás



(c) HST WFPC2 UV

76. ábra. A D/Shoemaker-Levy 9 (D/SL9) üstökös példája mutatja, hogy a mai Naprendszerben is előfordulhat kis égitesteknek nagybolygókba történő ütközései, amelyeknek akár regionális vagy globális katasztrófa lehet a következménye. A HST WFPC2 kamerával 1994. májusában készült felvételt mutatja az (a) panel (fent). A D/SL9 valószínűleg a Hilda aszteroida-zóna kvázi-Hilda alcsoportjához tartozhatott és onnan került át Jupiter-közelbe pályára (lásd még a 11.1. pontot is). A magtöredékek egymás utáni becsapódását mutatja a művészi elképzelés, ugyanis a becsapódások helye a Földről nem látszott közvetlenül, hanem a NASA Galileo szondája volt ehhez valamelyest kedvezőbb geometriai, rálátási pozícióban: (b) panel (balra lent). A képen a Jupiter déli pólusvidéke látható. A HST WFPC2 kamerája által ultraviolet (UV) tartományban 1994. július 17-én készült képfelvételét mutatja a (c) panel (jobbra lent). A képen balról jobbra a H, B, N, Q1, Q2, R, D/G és L magtöredékek becsapódási helye látható. A bolygó korongján középtől balra fent látható határozott peremő fekete folt a Jupiter egyik Galilei-holdjának árnyéka. (kép: NASA Space Telescope Science Institute, STScI-1994-21, 1994. május 18., STScI-1994-41, 1994. július 18., valamint <http://www.solarviews.com/raw/sl9/sl9rend3.jpg>, .../sl9hst22juv.jpg).

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 égitestjeinek 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, amelyet a 76. ábra illusztrál. Bár a kisbolygókkal való ütközésnek nagyobb a valószínűsége, mint egy üstökössel, de akár ekliptikai, akár pedig Oort-felhő eredetű üstökösmaggal 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 bekövetkezhetsz 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 összetető erők jellege és nagysága, a napköri pályamozgásukat és tengely körüli forgásukat befolyásoló gáz- és porkibocsátási aktivitásuk ismerete alapvetően fontos a Földre vagy egy jövőben megvalósuló hold- vagy marsbázisra nézve katasztrófális jövőbeli esetleges becsapódás elkerülésére tett döntések és intézkedések meghozatalánál.

15. Összefoglalás és az értekezés tézisei

15.1. Az új eredmények rövid összefoglalása

Röviden összefoglaltam azt a tudománytörténeti utat, amelyen keresztül az üstökösöket égitestek közé sorolták, illetve azt az utat, amely az üstökösök fizikai lényegét alkotó üstökösmag fogalom kialakulásához elvezetett. Ezeknek a tudományos szempontból fontos kis égitesteknek űrszondákkal és modern űrcsillagászati megfigyelő eszközökkel történő tanulmányozásának legfontosabb eredményeit is felvázoltam. Kitértem a témakörben elért világviszonylatban is fontos magyar tudományos eredményekre is, különös tekintettel a XIX/XX. sz. fordulóján, illetve a XX. végén az üstökösök fizikai tulajdonságainak megismerésében elért eredményekre. Ez az első ilyen jellegű és ilyen hosszú időszakot átfogó magyar nyelven készített ismertetés, szinopszis. Ezután rátértem a saját kutatási eredményeim ismertetésére.

Új, hatékony módszert dolgoztam ki az üstökösmagok fényének a kómáétól való különválasztására, ami még a fényes és aktív kóma megléte esetén is lehetővé teszi az üstökösmagok fényének közvetlen detektálását és fotometriáját. A módszer a látható fénytartományban is és a termális infravörös tartományban is működik, amit a Hubble Űrteleszkóppl, az ISO és Spitzer infravörös űr-obszervatóriumokkal történt nagyszámú sikeres üstökösmegfigyelés, illetve az üstökösmagok sikeres detektálása is mutat.

A módszer alkalmazásával több, az üstökösöknél helyszíni vizsgálatokat végző űrszonda programjának előkészítéseként azok cél-objektumairól megfigyeléseket végeztem a látható fénytartományban, illetve a termális infravörösben a HST, ISO és Spitzer űrteleszkópokkal. Az ekliptikai üstökösök magjának mérete, alakja, forgási periódusa, színe, albedója, fázisfüggvénye, valamint porkibocsátási aktivitásának meghatározását végeztem el több űrtávcsöves projekt keretében elsősorban a HST-vel, de az ISO és Spitzer űrtávcsövekkel is.

Különösen fontos új eredményeket adtak a HST-vel, illetve a Spitzer űrteleszkópokkal folytatott üstökös-mag méret meghatározási programok, amelyek eredményeként az ekliptikai üstökös-magok ma ismert populációja egyharmadának méretét, illetve sok esetben albadóját sikerült meghatározni.

Az ekliptikai üstökös-magok színindexeit meghatároztam a HST-vel kapott pontos fotometriai megfigyelésekből. Az üstökös-magok színindexére, illetve más, velük lehetséges evolúciós kapcsolatban lévő primitív kis égitestek színindex adataira alapozva statisztikai összehasonlító vizsgálatokat végeztek az ekliptikai üstökösök eredetének a már mások által égi mechanikai módszerekkel történt behatárolása független vizsgálata – azok megerősítése, finomítása – céljából. A lehetséges forrásvidékeket azonosítottam a már meglévő dinamikai csoportok további finomabb felosztására alapozva, nevezetesen a Kuiper-öv dinamikailag gerjesztett és kevésbé gerjesztett, valamint a kentaurok színében meglévő bimodalitás figyelembe vételével.

A kisbolygok fő-övében lévő üstökösökkel kapcsolatban is vizsgálatokat végeztem. Tovább bővítettem a kvázi-Hilda üstökösök leltárát, illetve a Themis-zóna nevezetes objektumának, a 133P/Elst-Pizarro fő-övbéli üstökös aktivitási periódusaival, illetve a kis égitest forgástengelyének lehetséges térbeli irányaának meghatározásával is foglalkoztam.

Az üstökös-magok, illetve más primitív kis égitestek túl gyors tengelykörüli forgása következtében történő szétese elleni stabilitását is vizsgáltam. Ezek a vizsgálatok a kis égitestek méretének, alakjának, forgási periódusának, átlagos tömegsűrűségének, anyaguk szakítószilárdságának összefüggését határozzák meg, feltételeket, korlátokat adnak ezekre a mennyiségekre.

15.2. Tézisek

Az értekezés téziseit külön téziszfüzet tartalmazza, de a tézis pontokat itt is felsorolom.

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

1. *Új módszer az üstökös-mag fényének közvetlen detektálására és alkalmazása a HST megfigyelésekre.* Új eljárást dolgoztam ki az üstökös-magok 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 (Lamy & Toth 1995; Lamy és mások 2011). 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 üstökösöt, valamint a 73P-C magtöredéket. Minden megfigyelt üstökös-magra meghatároztam annak effektív rádiuszát. Az üstökös-magok alakját elnyújtott forgási ellipszoid modellel közelítettem, amelynek félnagy-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 félnagytengety 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 üstökösök és a kóma szélessávú fotometriai színindexeit is meghatároztam. A HST-vel készült üstökösök fotometriai megfigyelések alapját képezték és képezik az üstökösök méreteloszlása, illetve az ekliptikai üstökösök eredetének vizsgálatában. A HST-vel végzett üstökösök megfigyelésekből kapott rádiuszokat és színindexeket összehasonlítottam az irodalomban rendelkezésre álló földi nagy teleszkópokkal végzett megbízható megfigyelések eredményeivel (Lamy és mások 2004; Lamy & Toth 2009). 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 (Belton és mások 2005; Lamy és mások 2004).

2. *Új eredmények az üstökösök termális infravörösben történt megfigyelésével kapcsolatosan.* Új módszert dolgoztam ki az üstökösök infravörös megfigyelésének kiértékelésére. A termális infravörös tartományban végzett üstökös megfigyelésekből meghatároztam több ekliptikai és Oort-felhővel kapcsolatos üstökösök infravörös fluxusát az ESA Infravörös Űrobszervatóriuma (ISO) és a NASA Spitzer űrtávcsőve megfigyeléseiből az üstökösök és a kóma fényének szétválasztása alapján ((Lamy és mások 2002; Groussin és mások 2004; Lamy és mások 2004, 2007b; Fernández és mások 2008a; Lamy és mások 2011). Az üstökösök 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 üstökösök rádiuszát a két különböző módszerrel kapott eredmények összehasonlítása céljából (l. például Groussin és mások 2004). Azt találtuk, hogy az egyszerű Standard Hőmodellel és az új modellel kapott rádiuszok közötti relatív eltérés 5-15%, ami azt is jelenti, hogy az üstökösökre 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 (Jorda és mások 2000; Lamy és mások 2002; Groussin és mások 2009). 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 üstökösök magot az esetek többségében aktív üstökös porkómája infravörös sugárzásától. Az üstökösök rádiuszát a Spitzer űrteleszkóp megfigyelések esetén is a Standard Hőmodell (STM) alkalmazásával határoztam meg. Eddig ez a legnagyobb homogén megfigyelési anyag az ekliptikai üstökösök infravörös fotometriájára, méretére és albedójára (Fernández és mások 2008a). 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 (Jorda és mások 2000; Lamy és mások 2002, 2007b, 2008a, 2009; Groussin

és mások 2009).

3. *Az üstökösmagok méreteloszlásának meghatározása.* A HST megfigyelésekből kapott üstökösmag 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 üstökösmagok ezen két alcsoportja méreteloszlásának összehasonlítása céljából (Lamy és mások 2004). 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 üstökösmagok kumulatív méreteloszlási függvényét. Ráműtattam, hogy az Oort-felhő üstökösmagjainak 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 üstökösmagok. A kumulatív eloszlásfüggvény a kis méretű magok hiányát mutatja. Véleményem szerint a kis méretű üstökösmagok hiánya vagy megfigyelési bias – azaz műszereinkkel még nem figyelhetjük meg a túl kicsi üstökösmagokat, vagy pedig fejlődési effektus, vagyis az üstökösmagok 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 üstökösmagok 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 üstökösmagok kumulatív méreteloszlás függvénye közel 2 körüli hatványkitevőjének. E szerint: 1) az ekliptikai üstökösmagok fejlődése során végbement tömegvesztés és méretcsökkenés lehet; 2) az üstökösmagok 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 üstökösmag megfigyelési adatokból álló minta volt a legnagyobb megbízható minta az üstökösmagok méreteloszlásának meghatározására (Lamy és mások 2004), azonban a NASA Spitzer infravörös űrteleszkópjával folytatott SEPPCoN program során még ennél is nagyobb megfigyelési anyagból sikerült meghatároznom az ekliptikai üstökösmagok méretét, amelyeket felhasználva közös munkában sikerült meghatározni azok méreteloszlását (Fernández és mások 2008a). A Standard Hőmodellt alkalmaztam és 0,04 albedót feltételeztem. A meghatározott üstökösmag rádiuszok kumulatív eloszlásfüggvénye jól egyezik a korábban a látható fénytartományban végzett megfigyelésekből leszármaztatottal. A SEPPCoN programban az üstökösmagok fizikai paramétereinek meghatározásában az én munkámnál szélesebb körű és attól független eredmények is létrejöttek: ugyanis közös munkában az egyes üstökösmagokra 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 SEPPCoN 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 (Lamy és mások 2004, 2001, 2007a, 2011). 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-üstökös, 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 (Lamy és mások 2011). 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 (Lamy és mások 2004). 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 (Fernández és mások 2008a). 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 (Lamy és mások 2004; Toth & Lamy 2000). 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 üstökösmaag 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 (Morbidei és mások 2005, *Nature*, 435, 462-465) teljes összhangban vannak. Továbbá arra a következtetésre jutottam, hogy a kentaurok mindkét alcsoportja a Neptunusz-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 üstökösök 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 forrásvidéke. 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 ($T_J \sim 3$). Vizsgáltaim 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 megléte 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 üstököszerű 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 (Toth 2006a,c). 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 megléte), 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 (Toth 2006c).

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 (Toth és mások 2005, 2006, 2008). A 2001-es napközelsége évében csak pillanatfelvételek (snapshot megfigyelések) és nem fénygörbék készültek, de ezekből meghatároztam a magtöredék effektív rádiuszt, 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 (Toth és mások 2005), 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 (Toth és mások 2006, 2008). 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 $a > b = c$ félnagy tengelyű 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 tengely körüli forgásnak lehet-e szerepe a magtöredék további szétaprózódásának. Azt találtam, hogy a magtöredék a gyors forgása ellenére még stabil a forgás miatt bekövetkező szétesés ellen, de a felszínéről anyagdarabok válhatnak le (Toth és mások 2006, 2008; Toth & Lisse 2010). 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. Felvetettem, 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 félnagy-tengely arány medián értéke 1,5, amiről feltehetjük, hogy nem torzít el a rálátási geometria (a legkülönbözőbb rálátási szögben megfigyelt 30 ekliptikai üstökösömről van szó). Néhány üstökösök nagyon megnyúlt alakú, vagyis az a/b arány 2-nél nagyobb, a ma ismert legnagyobb 2,6 értékét a 29P/Schwassmann-Wachmann 1 kentaurekliptikai üstökös átmeneti objektumnál éri el (Lamy és mások 2004). Az üstökösök tengelykörüli 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 szétesés elleni stabilitásának vizsgálatára és az átlagos tömegsűrűségük behatárolására. Először egy erősen leegyszerűsített modellt alkalmaztam (Lamy és mások 2004), 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} (Lamy és mások 2004). A fenti leegyszerűsített modellhez képest a Davidsson (1999, Icarus, 142, 525-535; 2000, Icarus, 149, 375-383) jóval összetettebb modellt használtam a további vizsgálatokhoz (Toth & Lisse 2006, 2010). 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 szakítószilárdság 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 jegesporos 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 (Toth & Lisse 2006, 2010). 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 (Toth & Lisse 2010). 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 (Toth & Lisse 2010). Más elképzelés szerint ütközés következtében jött létre, tehát ez a kérdés ma még vita tárgyát képezi.

16. Köszönetnyilvánítás

Köszönetem fejezem ki az értekezéssel kapcsolatos kutatómunkám támogatásáért az MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete korábbi igazgatóinak, Szeidl Bélának és Balázs Lajosnak, az MTA doktorainak, valamint az értekezésem megírása idején (2011) az intézet igazgatójának, Ábrahám Péternek, az MTA doktorának, illetve a kutatóintézet minden igazgatóhelyettesének, Almár Ivánnak, Kolláth Zoltánnak, Kiss L. Lászlónak, az MTA doktorainak és Patkós Lászlónak, a fizikai (csillagászat) tudományok kandidátusának. Az intézet nagyműszereivel kapcsolatos technikai feltételek biztosításáért köszönetet mondok dr. Virághalmy Gézának és dr. Rácz Miklósnak, az intézet műszaki igazgató helyetteseinek és az intézet műszaki állományának. Ahhoz, hogy a disszertációban ismertetett eredményeket elérhessem, számos hazai és külföldi kolléga is hozzásegített. Rendkívül nagymértékű és hasznos szakmai együttműködést tett lehetővé Philippe L. Lamy kutatási igazgató (CNRS, Marseille) és az általa hosszú éveken át rendszeresen biztosított támogatás, valamint az MTA–CNRS Franciaország közötti kétoldali együttműködés keretében a 9871. témaszámú program, amelyekért hálás köszönetem fejezem ki. A francia CNRS LAS, LAM-OAMP (Marseille) igazgatói, Paul Cruvellier, Roger Malina, valamint Olivier Le Fèvre intézetükben lehetővé tették kutatómunkám végzését és ezért a támogatásért külön köszönetem fejezem ki. Külön köszönöm Marseille városának (Gouvernement Municipal, Mairie de Marseille) a városban lévő tudományos kutatóhelyeken dolgozó külföldi kutatóknak 2004-ben adott kitüntető különdíjat. Köszönet illeti továbbá Horst Uwe Kellert (Max-Planck-Institut für Aeronomie (MPAE), Katlenburg-Lindau), akinek meghívására fontos tanulmányutat tettem az MPAE-ben, illetve aki az ESA Rosetta üstökös-szonda OSIRIS kutatócsoportjába meghívott. Külföldi kollégákkal a disszertációhoz kapcsolódó témakörben folytatott együttműködések és diszkussziók igen hasznosak voltak, amelyekért köszönet illeti Olivier Groussin, Laurent Jorda, Antoine Llebaria, (CNRS, Marseille), továbbá Michael A'Hearn (Marylandi Egyetem, MD), Michael J. S. Belton (Kitt Peak National Observatory, majd Belton Space, Tucson, AZ), Carey M. Lisse és Harold A. Weaver (APL, Johns Hopkins Egyetem, Laurel, MD), Yanga R. Fernández és Michael S. Kelley (Közép Floridai Egyetem, Orlando, FL), Stephen C. Lowry és Paul R. Weissman (NASA JPL, Pasadena, CA), valamint Nicolas (Nick) Thomas (MPAE Katlenburg-Lindau) kollégákat.

Köszönetem fejezem ki kutatóintézeti munkatársaimnak, Kovács Gézának, az MTA doktorának az idősoranalízissel kapcsolatos értékes és tartalmas diszkusszióikért, Barcza Szabolcsnak, a fiz. tud. (csillagászat) kandidátusának, Sturmman Lászlónak (PhD, ma Mt. Wilson Observatory, Mt. Wilson, CA), Balázs Lajosnak, Jurcsik Johannának, Oláh Katalinnak, Paparó Margitnak, Patkós Lászlónak, Szeidl Bélának az MTA doktorainak a csillagászati fotometria témakörében folytatott hasznos konzultációikért. Rendkívül értékes segítségükért köszönetet mondok Holl András, Nuspl János, Regály Zsolt tud. munkatársaknak és Decsy Pál kollégáknak. Külön köszönöm Zsoldos Endre kollégámnak a tudománytörténeti vonatkozásokkal kapcsolatos diszkussziókat, értékes megjegzéseit, észrevételeit.

Külön köszönet illeti a kutatómunka során alapvető fontosságú szakkönyvtári tevékenységben nyújtott segítségéért néhai Vargha Domokosnének (Magdi Néni), illetve Márton Józsefnek és Turtóczki Timeának, valamint Csizmadia Ákosnak (2000-2007. között), az MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete könyvtárosainak, továbbá az MTA KFKI Könyvtára munkatársainak.

Megalapozó szakmai együttműködésért és az általuk nyújtott támogatásért köszönet illeti Szegő Károlyt, a fiz. tud. doktorát (MTA KFKI/RMKI) és Bradford A.

Smith professzort (Hold- és Bolygókutatási Laboratórium (LPL), Arizona Egyetem, Tucson, AZ, majd Hawaii Egyetem). Továbbá az értékes szakmai diszkussziókért és a közös szakmai együttműködésért köszönet illeti Földy Lajost, PhD (MTA KFKI/RMKI/KFFO), néhai dr. Kondor Andrást (MTA KFKI/RMKI/KFFO), Merényi Erzsébetet (MTA KFKI/RMKI/KFFO, majd LPL, Tucson, AZ), valamint az űrfizikai kérdésekben folytatott hasznos diszkussziókért Erdős Gézát, az MTA doktorát (MTA KFKI/RMKI/KFFO), Gombosi Tamást, a fiz. tud. doktorát, (MTA KFKI/RMKI/KFFO, majd Michigani Egyetem, Ann Arbor, MI), dr. Horányi Mihányt (MTA KFKI/RMKI/KFFO, majd LPL, Tucson, AZ), Kecskeméty Károlyt, a fiz. tud. kandidátusát (MTA KFKI/RMKI/KFFO), Kóta Józsefet, a fiz. tud. kandidátusát (MTA KFKI/RMKI/KFFO, majd LPL, Tucson, AZ), Kőrösmezey Ákost, a fiz. tud. kandidátusát (MTA KFKI/RMKI/KFFO). Az MTA KFKI/RMKI/TFO munkatársainak, néhai Szabó László mérnöknek, valamint Barna Péter, Farkas Géza, Ferenczy Ferenc, Szalai Sándor és Várhalmi László mérnököknek, néhai dr. Koch József fizikusnak, továbbá Maróti Tamás, Zsenei Márton és Varga András fizikusnak külön köszönöm az üstökös kutatást elősegítő képfeldolgozásban adott megalapozó segítségüket.

A témakörben végzett kutatómunkám kezdetén nyújtott segítségért köszönet illeti Almár Ivánt, Balázs Bélát, Balázs Lajost, néhai Barta Györgyöt, továbbá Érdi Bálintot, Ill Mártont, az MTA doktorait, Horváth Andrást, a fiz. tud. kandidátusát, néhai Marik Miklóst, a fiz. tud. kandidátusát, valamint Szeidl Bélát, az MTA doktorát. A tudományos kutatást megalapozó egyetemi szemináriumokon, gyakorlatokon átadott szakmai ismeretekért Balázs Lajosnak, Barcza Szabolcsnak, valamint a nagyműszerekkel végzett gyakorlatokon átadott gyakorlati ismeretekért Balázs Lajosnak, Lovas Miklósnak, Szécsényi-Nagy Gábornak, illetve a műszerek munkám során történt használata idején Virágfalvy Gézának.

Köszönet mondok továbbá a témakör aktuális tudományos fejleményeinek, illetve munkám eredményeinek ismeretterjesztő fórumokon való közzétételének elősegítéséért Kiss L. László kollégámnak, az MTA doktorának, a Magyar Csillagászati Egyesület (MCSE) Internetes Hírporthál szerkesztőjének, Mizser Attilának, az MCSE főtítkárának és Szabados László kollégámnak, az MTA doktorának, a Magyar Tudomány és Fizikai Szemle folyóiratok szerkesztőbizottsági tagjának.

Kutatásaim anyagi hátteréhez hozzájárultak az OTKA T014963 és T025049 pályázatok.

A disszertáció szövegszerkesztése és tipográfiai előkészítése a "LaTeX Language Definition for magyar (Hungarian) v1.5b" szoftverrel (Budapesti Műszaki Egyetem, 2004. február) és a Linux Ubuntu operációs rendszerben is működő *Kile 2.1 verzió beta 2* LaTeX feldolgozó programcsomaggal készült.

Hivatkozások

- A'Hearn, M.F., Thurber, C.H., Millis, R.L., 1977, Evaporation of ices from comet West. *Astron. J.*, **82**, 518-524.
- A'Hearn, M.F., Cowan, J.J., 1979, Evidence for two different ices in comet West. *Bull. Amer. Astron. Soc.*, **12**, [09.25.02], p. 455.
- A'Hearn, M.F., Schleicher, D.G., Feldman, P.D., Millis, R.L., Thompson, D.T., 1984, Comet Bowell 1980b. *Astron. J.*, **89**, 579-591.
- A'Hearn, M.F., Millis, R.L., Schleicher, D.G., Osip, D.J., Birch, P.V., 1995, The ensemble properties of comets: Results from narrowband photometry of 85 comets, 1976-1992. *Icarus*, **118**, 223-270.
- A'Hearn, M.F., Campins, H., Schleicher, D.G., Millis, R.L., 1989, The nucleus of comet P/Tempel 2. *Astrophys. J.*, **347**, 1155-1166.
- A'Hearn, M.F., Belton, M.J.S., Delamere, W.A., Kissel, J., Klaasen, K.P., McFadden, L.A., Meech, K.J., Melosh, H.J., Schultz, P.H., Sunshine, J.M., Thomas, P.C., Veverka, J., Yeomans, D.K., Baca, M.W., Busko, I., Crockett, C.J., Collins, S.M., Desnoyer, M., Eberhardy, C.A., Ernst, C.M., Farnham, T.L., Feaga, L., Groussin, O., Hampton, D., Ipatov, S.I., Li, J.-Y., Lindler, D., Lisse, C.M., Mastrodemos, N., Owen, W.M., Richardson, J.E., Wellnitz, D.D., White, R.L., 2005, Deep Impact: Excavating Comet Tempel 1. *Science*, **310**, 258-264.
- A'Hearn, M.F., 2007, Deep Impact at comet Tempel 1. *Icarus*, **187**, 1-3.
- A'Hearn, M.F., Belton, M.J.S., Delamere, W.A., Feaga, L.M., Hampton, D., Kissel, J., Klaasen, K.P., McFadden, L.A., Meech, K.J., Melosh, H.J., Schultz, P.H., Sunshine, J.M., Thomas, P.C., Veverka, J., Wellnitz, D.D., Yeomans, D.K., Besse, S., Bodewits, D., Bowling, T.J., Carcich, B.T., Collins, S.M., Farnham, T.L., Groussin, O., Hermalyn, B., Kelley, M.S., Li, J.-Y., Lindler, D.J., Lisse, C.M., McLaughlin, S.A., Merlin, F., Protopapa, S., Richardson, J.E., Williams, J.L., 2011, EPOXI at comet Hartley 2. *Science*, **332**, 1396-1400.
- Anders, E., 1964, Origin, age, and composition of meteorites. *Space Sci. Rev.*, **3**, 583-714.
- Apathy, I., Remizov, A.P., Gringauz, K.I., Balebanov, V.M., Szemerey, I., Szendro, S., Gombosi, T.I., Klimenko, I.N., Verigin, M.I., Keppler, E., 1986, PLAZMAG-1 experiment: Solar wind measurements during the closest approach to Comet Giacobini-Zinner by the ICE probe and to Comet Halley by the Giotto and Suisei spacecraft. *ESA SP-250*, Vol. 1, 65-70.
- Arago, F., 1855, In W.H. Smyth & R. Grant, *Popular Astronomy*, **1**, London.
- Arato, P., Bessenyei, E., Kele, A., Weber, F., 1995, Mechanical properties in the initial stage of sintering. *J. Mater. Sci.*, **30**, 1863-1871.
- Arrhenius, S.A., 1900, *Phys. Zeitstr.*, **2**, 81.
- Asphaug, E., Benz, W., 1996, Size, density, and structure of comet Shoemaker-Levy 9 inferred from the physics of tidal breakup. *Icarus*, **121**, 225-248.
- Balázs, L., 1999, Egy centenárius margójára. Az MTA CSKI 100-éves évfordulójáról. *Fizikai Szemle*, **49**, (1999/12), 425.
- Baldet, F., 1926, *Thése, Facult. de Sci. Paris, Ann. Obs. Astr. Phys. Meudon*, **7**.
- Baldet, F., 1927, Sur le noyau de la comète Pons-Winnecke. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **185**, 39-41.
- Bartoli, A., 1884, Il calorica raggrate e il secondo principio di termodinamica. (A hő (sugár)nyomás levezetése a termodinamika második főtételéből.) *Nuovo Cimento*, **15**, 196-202.

- 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. *Space Sci. Rev.*, **117**, 137-160.
- Belton, M.J.S., Meech, K.J., Chesley, S., Pittichová, J., Carcich, B., Drahus, M., Harris, A., Gillam, S., Veverka, J., Mastrodemos, N., Owen, W., A'Hearn, M.F., Bagnulo, S., Bai, J., Barrera, L., Bastien, F., Bauer, J.M., Bedient, J., Bhatt, B.C., Boehnhardt, H., Brosch, N., Buie, M., Candia, P., Chen, W.-P., Chiang, P., Choi, Y.-J., Cochran, A., Crockett, Ch.J., Duddy, S., Farnham, T., Fernández, Y.R., Gutiérrez, P., Hainaut, O.R., Hampton, D., Herrmann, K.A., Hsieh, H., Kadooka, M.A., Kaluna, H., Keane, J., Kim, M.-J., Klaasen, K., Kleyna, J., Krisciunas, K., Lara, L.M., Lauer, T.R., Li, J.-Y., Licandro, J., Lisse, C.M., Lowry, S.C., McFadden, L., Moskovitz, N., Mueller, B., Polishook, D., Raja, N.S., Riesen, T., Sahu, D.K., Samarasinha, N., Sarid, G., Sekiguchi, T., Sonnett, S., Suntzeff, N.B., Taylor, B.W., Thomas, P., Tozzi, G.P., Vasundhara, R., Vincent, J.-B., Wasserman, L.H., Webster-Schultz, B., Yang, B., Zenn, T., Zhao, H., 2011, Stardust-NExT, Deep Impact, and the accelerating spin of 9P/Tempel 1. *Icarus*, **213**, 345-368.
- Benner, L.A.M., McKinnon, W.B., 1995, On the orbital evolution and origin of Comet Shoemaker-Levy 9. *Icarus*, **118**, 155-168.
- Bessel, F.W. 1836a, Bemerkungen über mögliche Unzulänglichkeit der die Anziehungen allein berücksichtigenden Theorie der Kometen. Von Herrn Geheimen-Rath und Ritter Bessel. *Astronomische Nachr.*, **13**, (No. 310), Jun. 11, 345-350.
- Bessel, F.W., 1836b, Beobachtungen über die physische Beschaffenheit des Halley'schen Kometen und dadurch veranlasste Bemerkungen. *Astronomische Nachr.*, **13**, (Nos. 300-302), Feb. 20, 185-232.
- Biot, J.-B., 1803, Mémoires de la classe des sciences mathématiques et physiques de l'Institut National de France 7, Paris, 1803, pp. 224-265.
- Biretta, J.A., & 18 colleagues, 1996, Wide Field and Planetary Camera 2 Instrument Handbook. Version 4.0 (June 1996). Space Telescope Science Institute, Baltimore, MD.
- Biver, N., Rauer, H., Despois, D., Moreno, R., Paubert, G., Bockelée-Morvan, D., Colom, P., Crovisier, J., Gérard, E., Jorda, L., 1996, Substantial outgassing of CO from comet Hale-Bopp at large heliocentric distance. *Nature*, **380**, 137-139.
- Blake, G.A., Salyk, C., Bonev, B.P., Villanueva, G.L., Disanti, M.A., Mumma, M.J., Magee-Sauer, K., Gibb, E.L., 2006, Comet 73P/Schwassmann-Wachmann 3. *IAU Circ.*, 8704, (2006 April 24, D.W.E. Green, ed.).
- Boehnhardt, H., Babion, J., West, R.M., 1997, An optimized detection technique for faint moving objects on a star-rich background. *Astron. Astrophys.*, **320**, 642-651.
- Boehnhardt, H., Rainer, N., Birkle, K., Schwehm, G., 1999, The nuclei of comets 26P/Grigg-Skjellerup and 73P/Schwassmann-Wachmann 3. *Astron. Astrophys.*, **341**, 912-917.
- Boehnhardt, H., 2002, Comet splitting – Observations and model scenarios. *Earth, Moon, and Planets*, **89**, 91-115.
- Boehnhardt, H., 2004, Split comets. In *Comet II*, M.C. Festou, H.U. Keller, H.A. Weaver, eds., Space Science Series, University of Arizona Press, Tucson, AZ, 2004, pp. 301-316.
- Bradley, J.P., Brownlee, D.E., 1986, Cometary particles – Thin sectioning and electron beam analysis. *Science*, **231**, 1542-1544.
- Bredichin, T.H., 1903, *Mechanische Untersuchungen über Kometenformen*, in *Syst. Darstellung von R. Jaegermann*, St. Petersburg.

- Brown, M.H., Cruikshank, D.P., Pendleton, Y., Veeder, G.J., 1998, Identification of water ice on the centaur 1997 CU26. *Science*, **280**, 1430-1432.
- Brown, R.H., Cruikshank, D.P., Pendleton, Y.J., 1999, Water ice on Kuiper belt object 1996 TO66. *Astrophys. J.*, **519**, L101-L104.
- Brown, M.E., Barkume, K.M., Ragozzine, D., Schaller, E.L., 2007, A collisional family of icy objects in the Kuiper belt. *Nature*, **446**, 294-296.
- Brownlee, D.E., 1979, Interplanetary dust. *Rev. Geophys. Planet. Sci.*, **17**, 1735-1743.
- Brownlee, D.E., Wheelock, W.M., Temple, S., Bradley, J.P., Kissel, J., 1987, A quantitative comparison of Comet Halley and carbonaceous chondrites at the submicron level. *Lunar Planet. Sci.* **18**, 133-134.
- Brownlee, D.E., Horz, F., Newburn, R.L., Zolensky, M., Duxbury, T.C., Sandford, S., Sekanina, Z., Tsou, P., Hanner, M.S., Clark, B.C., Green, S.F., Kissel, J., 2004, Surface of young Jupiter Family Comet 81P/Wild 2: View from the Stardust Spacecraft. *Science*, **304**, 1764-1769.
- Buratti, B.J., Hicks, M.D., Soderblom, L.A., Britt, D., Oberst, J., Hillier, J.K., 2004, Deep Space 1 photometry of the nucleus of Comet 19P/Borrelly. *Icarus*, **167**, 16-29.
- Buzzi, L., Muler, G., Kidger, M., Henriquez Santana, J. A., Naves, R., Campas, M., Kugel, F., Rinner, C., 2007, Comet 17P/Holmes. *IAU Circ.*, 8886, (2007 October 24, D.W.E. Green, ed.).
- Campins, H., Swindle, T.D., 1998, Expected characteristics of cometary meteorites. *Meteoritics & Planet. Sci.*, **33**, 1201-1211.
- Campins, H., Fernández, Y.R., 2000, Observational constraints on surface characteristics of cometary nuclei. *Earth, Moon, Planets*, **89**, 117-134.
- Celoria, G., 1921, Sulle osservazioni di Comete Fatte de Paolo Toscanelli. *Pubblicazioni del Osservatorio di Brera*, No. 55.
- Cesarski, W., 1910, Observation du Soleil, á l'observatoire de Moscou. *Astron. Nachr.*, **187**, Nr. 4466, 31-32.
- Chesley, S.R., Kaluna, H., Kleyna, J., Meech, K., Pittichová, J., Yeomans, D., 2010, Detection of nongravitational accelerations on Comet 133P/Elst-Pizarro. *Bull. Amer. Astron. Soc.*, **42**, [15.07], 950.
- Chladni, E.F.F., 1794, Über den kosmischen Ursprung der Meteorite und Feuerkugeln (1794). Leipzig: Geest & Portig, 1979. 1. Aufl. (H. Günter).
- Chodas, P.W., Yeomans, D.K., 1994, The impact of comet Shoemaker-Levy 9 with Jupiter. *Bull. Amer. Astron. Soc.*, **26**, 1022.
- Combes, M., Lecacheux, J., Encrenaz, T., Sicardy, B., Zeau, Y., Malaise, D., 1983, On stellar occultations by comets. *Icarus*, **56**, 229-232.
- Cowan, J.J., A'Hearn, M.F., 1979, Vaporization of comet nuclei: light curves and life times. *Earth, Moon, and Planets*, **21**, 155-171.
- Crifo, J-F., 1997, The correct evaluation of the sublimation rate of dusty ices under solar illumination, and its implications on the properties of P/Halley nucleus. *Icarus*, **130**, 549-551.
- Crifo, J-F., Rodionov, A.V., 1997, The dependence of the circumnuclear coma structure on the properties of the nucleus, I. Comparison between a homogeneous and an inhomogeneous spherical nucleus, with application to P/Wirtanen. *Icarus*, **127**, 319-353.
- Cysat, J.B., 1619, *Mathematica astronomica de loco, motu, magnitudine et causis cometarum qui sub finem auctumni 1618 et initium anni 1619 in coelo fulsit*. Ex Tipographeo Ederiano, Ingolstadt, 1619.

- Dahlgren, M., Lagerkvist, C.-I., 1995, A study of Hilda asteroids. I. CCD spectroscopy of Hilda asteroids. *Astron. Asgtrophys.*, **302**, 907-914.
- Dahlgren, M., Lagerkvist, C.-I., Fitzsimmons, A., Williams, I.P., Gordon, M., 1997, A study of Hilda asteroids. II. Compositional implications from optical spectroscopy. *Astron. Asgtrophys.*, **323**, 606-619.
- Davidsson, B.J.R., 1999, Tidal splitting and rotational breakup of solid spheres. *Icarus*, **142**, 525-535.
- Davidsson, B.J.R., 2001, Tidal splitting and rotational breakup of solid biaxial ellipsoids. *Icarus*, **149**, 375-383.
- Davidsson, B.J.R., Gutiérrez, P.J., Rickman, H., 2007, Nucleus properties of Comet 9P/Tempel 1 estimated from non-gravitational force modeling. *Icarus*, **187**, 306-320.
- Davis, D.R., Farinella, P., 1997, Collisional evolution of Edgeworth-Kuiper Belt Objects. *Icarus*, **125**, 50-60.
- Davis, D.R., Durda, D.D., Marzari, F., Campo Bagatin, A., Gil-Hutton, R., 2002, Collisional Evolution of Small-Body Populations. In *Asteroids III*, W.F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paollicchi, R.P. Binzel, eds., Space Science Series, University of Arizona Press, Tucson, AZ, pp. 545-558.
- Debye, P., 1909, Der lichtdruck auf kugeln von beliebigem material. *Ann. Phys.*, Leipzig (4), **30**, 57-136.
- Delsemme, A.H., 1982, Chemical composition of cometary nuclei. In *Comets*, L.L. Wilkening, ed., Space Science Series, Univ. Arizona Press, Tucson, AZ, pp. 85-130.
- Di Sisto, R.P., Brunini, A., Dirani, L.D., Orellana, R.B., 2005, Hilda asteroids among Jupiter family comets. *Icarus*, **174**, 81-89.
- Dominik, C., Tielens, A.G.G.M., 1997, The physics of dust coagulation and the structure of dust aggregates in space. *Astrophys. J.*, **480**, 647-673.
- Dohnanyi, J.S., 1969, Collisional model of asteroids and their debris. *J. Geophys. Res.*, **74**, 2531-2554.
- Donati, G., 1864, Schreiben des Herr Professor Donati, Directors der Sternwarte in Florenz an den Herausgeber. Comet II 1964. (C/1864 N1 (Tempel)). *Astron. Nachr.*, **62**, 375-378.
- Donn, B., Daniels, P.A., Hughes, D.W., 1985, On the structure of the cometary nucleus. *Bull. Amer. Astron. Soc.*, **17**, 520.
- Donn, B., Rahe, J., Brandt, J.C., 1986, *Atlas of Comet Halley 1910*, NASA SP-488, U.S. Gov. Printing Office, Washington D.C.
- Donn, B., Hughes, D., 1986, A fractal model of a cometary nucleus formed by random accretion. *ESA SP-250*, Vol. 1, 523-524.
- Doressoundiram, A., Peixinho, N., Doucet, C., Mousis, O., Barucci, M.A., Petit, J.M., Veillet, C., 2005, The Meudon Multicolor Survey (2MS) of Centaurs and Trans-Neptunian objects: extended dataset and status on the correlations reported. *Icarus*, **174**, 90-104.
- Drahus, M., Kueppers, M., Jarchow, C., Paganini, L., Hartogh, P., Villanueva, G.L., 2007, Submillimeter monitoring of the HCN molecule in fragment C of the split comet 73P/Schwassmann-Wachmann 3. *Bull. Amer. Astr. Soc.*, **39**, [48.07], 508.
- Drummond, J.D., 1982, Theoretical meteor radiants of Apollo, Amor, and Aten asteroids. *Icarus*, **49**, 143-153.
- Duncan, M., Quinn, T., Tremaine, S., 1988, The origin of short-period comets. *Astrophys. J.*, **328**, L69-L73.

- Duncan, M., Levison, H.F., 1997, A scattered comet disk and the origin of Jupiter family comets. *Science*, **276**, 1670-1672.
- Eddington, A.S., 1910, The envelope of Comet Morehouse (1908 c). *Astrophys. J.*, **70**, 442-458.
- Edgeworth, K.E., 1943, The evolution of our planetary system. *J. Brit. Astron. Assoc.*, **53**, 181-188.
- Edgeworth, K.E., 1949, The origin and evolution of the solar system. *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, **109**, 181-188.
- Ellerman, F., 1910, An expedition to photograph a comet. *Publ. Astron. Soc. Pacific*, **22**, 165-168.
- Elst, E.W., Pizarro, G., Pizarro, O., Pollas, C., Tichá, J., Tichý, M., Moravec, Z., Offutt, W., Marsden, B.G., 1996, Comet P/1996 N2 (Elst-Pizarro). *IAU Circ.*, 6456, (1996 August 21, B.G. Marsden, ed.).
- Encke, J.F., 1820, *Berliner Astron. Jahrbuch für 1823*, p. 211.
- Encke, J.F., 1829, Auszug aus einem Schreiben des Königlichen Astronomen Herrn Prof. Encke an den Herausgeber. *Astron. Nachr.*, **7**, 181-184.
- Érdi, B., 2001, *A Naprendszer dinamikája*, ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 2001.
- Erdős, G., Kecskeméty, K., 1987, Distribution of neutral gas molecules at large distances from Halley's comet. *ESA SP-278*, 223-227.
- Evershed, J., 1910, Observations of Halley's comet. *Bull. Kodaikanal Obs.*, No. XX, 198-207.
- Fanale, F.P., Salvail, J.R., 1984, An idealized short period comet model: Surface insolation, flux, dust flux, and mantle evolution. *Icarus*, **60**, 476-511.
- Fanale, F.P., Salvail, J.R., 1987, The loss and depth of CO₂ ice in comet nuclei. *Icarus*, **72**, 535-554.
- Fanale, F.P., Salvail, J.R., 1990, The influence of CO ice on the activity and near-surface differentiation of comet nuclei. *Icarus*, **84**, 403-413.
- Farinella, P., Davis, D.R., 1996, Short-period comets: Primordial bodies or collisional fragments? *Science*, **273**, 938-941.
- Fernández, J.A., 1980, On the existence of a comet belt beyond Neptune. *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, **192**, 481-491.
- Fernández, Y.R., Wellnitz, D.D., Buie, M.W., Dunham, E.W., Millis, R.L., Nye, R.A., Stansberry, J.A., Wasserman, L.H., A'Hearn, M.F., Lisse, C.M., Golden, M.E., Person, M.J., Howell, R.R., Marcialis, R.L., Spitale, J.N., 1999, The inner coma and nucleus of comet Hale-Bopp: Results from a stellar occultation. *Icarus*, **140**, 205-220.
- Fernández, Y.R., Lowry, S.C., Weissman, P.R., Meech, K.J., 2002, New dominant periodicity in photometry of Comet Encke. *Bull. Amer. Astron. Soc.*, **34**, [27.06], 887.
- Fernández, Y.R., Meech, K.J., Lisse, C.M., A'Hearn, M.F., Pittichová, J., Belton, M.J.S., 2003, The nucleus of Deep Impact target Comet 9P/Tempel 1. *Icarus*, **164**, 481-491.
- 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. In *Asteroids, Comets, Meteors – ACM 2008*, paper id. 8307.

- Fernández, Y., Kelley, M., Lamy, P., Reach, W., Toth, I., Groussin, O., Lisse, C., A'Hearn, M., Bauer, J., Campins, H., Fitzsimmons, A., Licandro, J., Lowry, S., Meech, K., Pittichová, J., Snodgrass, C., Weaver, H., 2008b, Results From SEPP-CoN, a Survey to Study the Physical Properties of the Nuclei and dust of Jupiter-Family Comets. *Amer. Geophys. Union, Spring Meeting 2008*, #P41A-08.
- Fernández, Y.R., Kelley, M.S., Lamy, P.L., Toth, I., Groussin, O., Lisse, C.M., A'Hearn, M.F., Bauer, J.M., Campins, H., Fitzsimmons, A., Licandro, J., Lowry, S.C., Meech, K.J., Pittichová, J., Reach, W.T., Snodgrass, C., Weaver, H.A., 2011, Thermal properties, sizes, and size distribution of Jupiter-Family Cometary nuclei. *Icarus*, nyomdában.
- Festou, M.C., Rickman, H., West, R.M., 1993a, Comets 1: Concepts and observations. *Astron. Astrophys. Rev.*, **4**, 363-447.
- Festou, M.C., Rickman, H., West, R.M., 1993b, Comets 2: Models, evolution, origin and outlook. *Astron. Astrophys. Rev.*, **5**, 37-163.
- Foster, M.J., Green, S.F., McBride, N., 1999, Detection of water ice on 2060 Chiron. *Icarus*, **141**, 408-410.
- Fraunhofer, J. von, 1823, *Denkschr. Kon. Akad. Wiss. München*, **5**, 193-228.
- Gombosi, T.I., Houppis, H.L.F., 1986, An icy-glue model of cometary nuclei. *Nature*, **324**, 43-44.
- Gomes, R.S., 2003, The origin of the Kuiper Belt high-inclination population. *Icarus*, **161**, 404-418.
- Grant, R., 1852, *History of Physical Astronomy from the Earliest Ages to the Middle of the Nineteenth Century*. Robert Baldwin, Paternoster Row, London, 1852.
- Greenberg, J.M., 1983, Laboratory dust experiments - Tracing the composition of cometary dust. In *Proc. of the Internat. Conf. on Cometary Explor.*, Budapest, Hungary, November 15-19, 1982, T.I. Gombosi, ed., Budapest, Akadémiai Kiadó, 1983, Vol. 2, pp. 23-54.
- Greenberg, J.M., Hage, J.I., 1990, From interstellar dust to comets – A unification of observational constraints. *Astrophys. J.*, **361**, 260-274.
- Greenberg, J.M., Mizutani, H., Yamamoto, T., 1995, A new derivation of the tensile strength of cometary nuclei: Application to comet Shoemaker-Levy 9. *Astron. Astrophys.*, **295**, L35-L38.
- Greenstein, J.L., 1958, High-resolution spectra of Comet Mrkos (1957d). *Astrophys. J.*, **128**, 106.
- Groussin, O., Lamy, P., 2003, Activity on the surface of the nucleus of comet 46P/Wirtanen. *Astron. Astrophys.*, **412**, 879-891.
- Groussin, O., Lamy, P., Jorda, L., Toth, I., 2004, The nuclei of comets 126P/IRAS and 103P/Hartley 2. *Astron. Astrophys.*, **419**, 375-383.
- Groussin, O., Lamy, P., Toth, I., Kelley, M., Fernández, Y.R., A'Hearn, M., Campins, 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.
- Hadamcik, E., Levasseur-Regourd, A.C., 2002, Different regions in dust cometary comae studied by CCD-polarimetry from C/1995 O1 (Hale-Bopp) to C/2000 WM1 (LINEAR). In *IAU Colloquium No. 186: Cometary Science after Hale-Bopp*, pp. 6-7.
- Hainaut, O., Delsanti, A.C., 2002, Colors of Minor Bodies in the Outer Solar System. A statistical analysis. *Astron. Astrophys.*, **389**, 641-664.

- Hainaut, O.R., Delsanti, A., Meech, K.J., West, R.M., 2004, Post-perihelion observations of comet 1P/Halley. V: $r_h = 28.1$ AU. *Astron. Astrophys.*, **417**, 1159-1164.
- Hale, A., Bopp, T., Stevens, J., 1995, Comet 1995 O1. *IAU Circ.*, 6187, (1995 July 24, D.W.E. Green, ed.).
- Halley, E., 1705, *Astronomiae Cometae Synopsis*, Philosophical Transactions, Oxford, 6 pp, (A Synopsis of the Astronomy of Comets).
- Hanner, M.S., 1999, The silicate material in comets. *Space Sci. Rev.*, **90**, 99-108.
- Harmon, J., Nolan, M.C., Ostro, S.J., Campbell, D.B., 2004, Radar studies of comet nuclei and grain comae. *Comets II*, M. C. Festou, H. U. Keller, H. A. Weaver, eds., Space Science Series, Univ. of Arizona Press, Tucson, pp. 265-279.
- Harmon, J., Nolan, M.C., Giorgini, J.D., Howell, E.S., 2010, Radar observations of 8P/Tuttle: A contact-binary comet. *Icarus*, **207**, 499-502.
- Harmon, J., Nolan, M.C., Giorgini, J.D., Howell, E.S., 2011, Radar observations of comet 103P/Hartley 2. *Astrophys. J.*, **734**, L2.
- Hartmann, W.K., Cruikshank, D.P., Degewij, J., 1982, Remote comets and related bodies: VJHK colorimetry and surface materials. *Icarus*, **52**, 377-408.
- Haser, L., 1957, Distribution d'intensité dans la tête d'une comète. *Bull. Acad. R. Sci. Liège*, **43**, 740-750.
- Hearnshaw, J.B., 1986, *The analysis of starlight: One hundred and fifty years of astronomical spectroscopy*. Cambridge University Press, Cambridge and New York, 1986.
- Heidarzadeh, T., 2010, *A history of physical theories of comets from Aristotle to Whipple*. New Studies in the history of Science and technology, Archimedes Vol. 19, Springer Science + Business Media, LLC, New York, NY, 2008, 275pp.
- Helfenstein, P., Veverka, J., 1989, Physical characterization of asteroid surfaces from photometric analysis. In *Asteroids II*, T. Gehrels, ed., Space Science Series, University of Arizona Press, Tucson, AZ, pp. 557-593.
- Herschel, W., 1800, Experiments on the Refrangibility of the Invisible Rays of the Sun. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **1**, 22, (abstract), RSPS, pp. 22-23.
- Holtzman, J.A., Burrows, Ch.J., Casertano, S., Hester, J.J., Trauger, J.T., Watson, A.M., Worthy, G., 1995, The photometry performance and calibration of WFPC2. *Publ. Astron. Soc. Pacific*, **107**, 1065-1093.
- Horányi, M., Kecskeméty, K., 1983, Percolation model and the origin of comets. In *Proc. of the Internat. Conf. on Cometary Explor.*, Budapest, Hungary, November 15-19, 1982, T.I. Gombosi, ed., Budapest, Akadémiai Kiadó, 1983, Vol. 1, pp. 21-25.
- Horányi, M., Gombosi, T.I., Cravens, T.E., Körösmezey, Á., Kecskeméty, K., Nagy, A., Szegő, K., 1984, The friable sponge model of a cometary nucleus. *Astrophys. J.*, **278**, 449-455.
- Hsieh, H.H., Jewitt, D.C., Fernández, Y.R., 2004, The strange case of 133P/Elst-Pizarro: A comet among the asteroids. *Astron. J.*, **127**, 2997-3017.
- Hsieh, H.H., Jewitt, D., 2005, Search for Active Main-Belt Asteroids: The SAMBA project. *Bull. Amer. Astr. Soc.*, **37**, [11.01], 631.
- Hsieh, H.H., Jewitt, D., 2006, A population of comets in the Main Asteroid Belt. *Science*, **312**, 561-563.

- Hsieh, H.H., Jewitt, D., Lacerda, P., Lowry, S.C., Snodgrass, C., 2010, The return of activity in main-belt comet 133P/Elst-Pizarro. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **403**, 363-377.
- Hsieh, H.H., 2009, The Hawaii trails project: comet-hunting in the main asteroid belt. *Astron. Astrophys.*, **505**, 1297-1310.
- Huebner, W.F., 1965, Über die gasproduktion der Kometen. *Z. f. Astrophys.*, **63**, 22-34.
- Huebner, W.F., Weigert, A., 1966, Eiskörner in der koma von kometen. *Z. f. Astrophys.*, **64**, 185-201.
- Huggins, W., 1868, On the spectrum of Comet II., 1868. *Proc. R. Soc. London*, **16**, 481-482.
- Jaegermann, R., 1903, *Prof. Th. Bredikhin's mechanische Untersuchungen über Cometenformen in systematischer Darstellung. Zusammengestellt v. R.J.*, St. Petersburg.
- Jessberger, E.K., 1999, Rocky cometary particulates: Their elemental, isotopic and mineralogical ingredients. *Space Sci. Rev.*, **90**, 91-97.
- Jewitt, D.C., Meech, K.J., 1986, Cometary grain scattering versus wavelength, or 'What color is comet dust'? *Astrophys. J.*, **310**, 937-952.
- Jewitt, D.C., Meech, K.J., 1987, Surface brightness profiles of 10 comets. *Astrophys. J.*, **317**, 992-1001.
- Jewitt, D.C., Meech, K.J., 1988, Optical properties of cometary nuclei and a preliminary comparison with asteroids. *Astrophys. J.*, **328**, 974-986.
- Jewitt, D., Luu, J., 1989, A CCD portrait of comet P/Tempel 2. *Astron. J.*, **97**, 1766-1790.
- Jewitt, D.C., Luu, J.X., 1990, CCD spectra of asteroids. II - The Trojans as spectral analogs of cometary nuclei. *Astron. J.*, **100**, 933-944.
- Jewitt, D., 1992, Physical Properties of Cometary Nuclei. Invited review, Proceedings of the 30th Liège International Astrophysical Colloquium, A. Brahic, J.-C. Gerard J. Surdej, eds., Univ. Liège Press, Liège, pp. 85-112.
- Jewitt, D., Luu, J., 1992, 1992 QB1. *IAU Circ.*, 5611, (1992 September 14, B.G. Marsden, ed.).
- Jewitt, D., Luu, J., 1993, Discovery of the candidate Kuiper belt object 1992 QB1. *Nature*, **362**, 731-732.
- Jewitt, D., Senay, M., Matthews, H., 1996, Observations of carbon monoxide in comet Hale-Bopp. *Science*, **271**, 1110-1113.
- Jewitt, D., Kalas, P., 1998, Thermal Observations of Centaur 1997 CU26. *Astrophys. J.*, **499**, L103-L106.
- Jewitt, D., Matthews, H., 1999, Particulate mass loss from comet Hale-Bopp. *Astron. J.*, **117**, 1056-1062.
- Jewitt, D.C., 2002a, From Kuiper Belt Object to cometary nucleus: The missing ultrared matter. *Astron. J.*, **123**, 1039-1049.
- Jewitt, D.C., 2002b, From Kuiper Belt object to cometary nucleus. In *Proc. Asteroids, Comets, Meteors - ACM 2002*, ESA SP-500, Noordwijk, The Netherlands, ESA Publication Division, ESTEC, pp. 11-19.
- Jewitt, D., Lacerda, P., Peixinho, N., 2007, Comet 133P/Elst-Pizarro. *IAU Circ.*, 8847, (2007 June 12, D.W.E. Green, ed.).

- Jewitt, D., 2009a, Six hot topics in planetary astronomy. *Small Bodies in Planetary Systems*. Lecture Notes in Physics, Springer series: "Origin and Evolution of Planetary Systems", I. Mann, I. Nakamura, T. Mukai, eds., pp. 1-39.
- Jewitt, 2009b, Icy Bodies in the New Solar System. In *Proc. of IAU Symposium 263 "Icy Bodies in the Solar System"*, Proc. of the International Astronomical Union, D. Lazzaro, D. Prialnik, R. Schulz, J.A. Fernández, eds., IAU Symposium, Volume 263, Cambridge University Press, pp. 3-16.
- Jewitt, D., Weaver, H., Agarwal, J., Mutchler, M., Drahus, M., 2010, A recent disruption of the mean-belt asteroid P/2010 A2. *Nature*, **467**, 817-819.
- Jewitt, D., Weaver, H., Mutchler, M., Larson, S., Agarwal, S., 2011, Hubble Space Telescope observations of Main-belt Comet 596 Schelia. *Astrophys. J.*, **733**, Issue 1, id L4.
- Jones, G.H., Balogh, A., Horbury, T.S., 2000, Identification of comet Hyakutake's extremely long ion tail from magnetic field signatures. *Nature*, **404**, 574-576.
- Jones, G.H., 2002, Ulysses's encounter with comet Hyakutake. *ESA SP-500*, 563-566.
- Jorda, L., Lamy, P., Groussin, O., Toth, I., A'Hearn, M.F., Peschke, S., 2000, ISOCAM observations of cometary nuclei. *ESA-SP 455*, 61-66.
- Kaluna, H.M., Meech, K.J., Pittichova, J., Zenn, T., Sonnett, S., Riesen, T., Hsieh, H.H., 2010, Characterization of Main Belt Comet 133P/Elst-Pizarro. In *Astrobiology Science Conference 2010: Evolution and Life: Surviving Catastrophes and Extremes on Earth and Beyond*, April 26-20, 2010, in League City, Texas, LPI, Contrib. No. 1538, p. 5559.
- Kecskeméty, K., Cravens, T.E., Afonin, V.V., Erdős, G., Eroshenko, E.G., Gan, L., Gombosi, T.I., Gringauz, K.I., Keppler, E., Klimenko, I.N., Marsden, R., Nagy, A.F., Remizov, A.P., Richter, A.K., Riedler, W., Schwingenschuh, K., Somogyi, A.J., Szegő, K., Tátrallyay, M., Varga, A., Verigin, M.I., Wenzel, K.-P., 1989, Pickup ions in the unshocked solar wind at Comet Halley. *J. Geophys. Res.*, A, **94**, 185-196.
- Keller, H.U., 1976, The interpretations of ultraviolet observations of comets. *Space Sci. Rev.*, **18**, 641-684.
- Keller, H.U., Arpigny, C., Barbieri, C., Bonnet, R.M., Cazes, S., Coradini, M., Cosmovici, C.B., Delamere, W.A., Huebner, W.F., Hughes, D.W., Jamar, C., Malaise, D., Reitsema, H.J., Schmidt, H.U., Schmidt, W.K.H., Seige, P., Whipple, F.L., Wilhelm, 1986, First Halley multicolour camera imaging results from Giotto. *Nature*, **321**, 320-326.
- Keller, H.U., 1990a, The nucleus. In *Physics and chemistry of comets*, W.F. Huebner, ed., Springer, Heidelberg, pp. 13-68.
- Keller, H.U., 1990b, Surface features and activity of the nucleus of comet Halley. In *Comet Halley. Investigations, results, interpretations*, Vol. 2, pp 133-145.
- Keller, H.U., Britt, D., Buratti, B.J., Thomas, N., 2004, In situ observations of cometary nuclei. In *Comets II*, M.C. Festou, H.U. Keller, H.A. Weaver, eds., Space Science Series, University of Arizona Press, Tucson, Arizona, pp. 211-222.
- Kelley, M.S., Fernández, Y.R., A'Hearn, M.F., Bauer, J., Campins, H., Fitzsimmons, A., Groussin, O., Lamy, P.L., Licandro, J., Lisse, C.M., Lowry, S.C., Meech, K.J., Pittichová, J., Reach, W.T., Snodgrass, C., Toth, I., Weaver, H.A., 2008, Comet Dust and Activity in the SEPPCoN Survey. *Asteroids, Comets, Meteors – ACM 2008*, paper id. 8272.
- Kirchhoff, G., Bunsen, R., 1860, Chemische analyse durch spectralbeobachtungen. *Annalen der Physik und Chemie*, **110**, Bd. 11, No. 6, 161-189.
- Konkoly Thege, N., 1873, Spectroscopic observations of meteors. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **33**, 575-576.

- Konkoly Thege, M., 1910, Az üstökösök - I. A Szénhidrogén gázokról (CnHm). *Az időjárás, Meteorológiai és csillagászati folyóirat*, **XIV**, nov.-dec. füzet, 1-23.
- Konno, I., Huebner, W.F., Boice, D.C., 1993, A model of dust fragmentation in near-nucleus jet-like features on comet P/Halley. *Icarus*, **101**, 84-94.
- Kovács, J., 2008, Gothard Jenő felvételei a Holmes-üstökösről. *Meteor*, **38**, (2008/4, No. 382), 31-33.
- Krasnopolsky, V.A., Greenwood, J.B., Stancil, P.C., 2004, X-ray and extreme ultraviolet emissions from comets. *Space Sci. Rev.*, **113**, 271-374.
- Kresák, L., 1979, Dynamical interrelations among comets and asteroids. In *Asteroids*, T. Gehrels, ed., Space Science Series, University of Arizona Press, Tucson, AZ, pp. 289-309.
- Kresák, L., 1982, On the similarity of orbits of associated comets, asteroids and meteoroids. *Bull. Astron. Inst. Czechosl.*, **33**, 104-110.
- Krist, J., 1995, Simulation of HST PSF using tiny TIM. In *Astronomical Data Analysis Software and System IV*. R.A. Shaw, H.E. Payne, J.J.E. Hayes, eds., ASP Conference Series, vol. 77, Astron. Soc. Pacific, San Francisco, pp. 349-352.
- Kuchner, M.J., Brown, M.E., Holman, M., 2002, Long-Term dynamics and the orbital inclinations of the classical Kuiper Belt Objects. *Astron. J.*, **124**, 1221-1230.
- Kuiper G. P. 1951, On the origin of the solar system. In *Astrophysics: A Topical Symposium*, J.A. Hynek és mások, eds., McGraw-Hill, New York, pp. 357-424.
- Lagerros, J.S.V., 1996, Thermal physics of asteroids. II. Polarization of the thermal microwave emission from asteroids. *Astron. Astrophys.*, **315**, 625-632.
- Lagrange J.L., 1814, *Additions á la Connaissance des Temps*, 211.
- Lamy, P.L., Grün, E., Perrin, J.M., 1987, Comet P/Halley: Implications of the mass distribution function for the photopolarimetric properties of the dust coma. *Astron. Astrophys.*, **187**, 767-773.
- Lamy, P., Toth, I., 1995, Direct detection of a cometary nucleus with the Hubble Space Telescope. *Astron. Astrophys.*, **293**, L43-L45.
- Lamy, P., 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.
- Lamy, P.L., Toth, I., Jorda, L., Weaver, H.A., A'Hearn, M., 1998a, The nucleus and inner coma of Comet 46P/Wirtanen. *Astron. Astrophys.*, **335**, L25-L29.
- Lamy, P.L., Toth, I., Weaver, H.A., 1998b, Hubble Space Telescope observations of the nucleus and inner coma of comet 19P/1904 Y2 (Borrelly). *Astron. Astrophys.*, **337**, 945-954.
- 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.
- 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.
- 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.
- Lamy, P.L., Toth, I., Fernández, Y.R., Weaver, H.A., 2004, The sizes, shapes, albedos, and colors of cometary nuclei. In *Comets II*, M.C. Festou, H.U. Keller, H.A. Weaver, eds., Space Science Series, University of Arizona Press, Tucson, AZ, pp. 223-264.

- 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**, 669-678.
- Lamy, P.L., Toth, I., A'Hearn, M.F., Weaver, H.A., Jorda, L., 2007a, Rotational state of the nucleus of Comet 9P/Tempel 1: Results from Hubble Space Telescope observations in 2004. *Icarus*, **191**, 310-321.
- Lamy, P.L., Toth, I., Davidsson, B.J.R., Groussin, O., Gutiérrez, P., Jorda, L., 2007b, A portrait of the nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Space Sci. Rev.*, **128**, 23-66.
- Lamy, P.L., Toth, I., Groussin, O., Jorda, L., Kelley, M.S., Stansberry, J.A., 2008a, Spitzer Space Telescope observations of the nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Astron. Astrophys.*, **489**, 777-785.
- Lamy, P.L., Toth, I., Weaver, H.A., A'Hearn, M.F., Jorda, L., 2009, Properties of the nuclei and comae of 13 ecliptic comets from Hubble Space Telescope snapshot observations. *Astron. Astrophys.*, **508**, 1045-1056.
- Lamy, P.L., Toth, I., 2009, Colors of cometary nuclei – Comparison with other primitive bodies of the solar system and implications for their origin. *Icarus*, **201**, 674-713.
- Lamy, P.L., Toth, I., Weaver, H.A., A'Hearn, M.F., Jorda, L., 2010, Properties of the nuclei and comae of 10 ecliptic comets from Hubble Space Telescope snapshot observations. *Astron. Astrophys.*, **508**, 1045-1056.
- 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. *Astron. Astrophys.*, **412**, 1573-1573.
- Laplace, P.S., 1813, *Exposition du Système du Monde*, 4th ed., Paris, 131.
- Laplace, P.S., 1816, *Additions à la Connaissance des Temps*, 213.
- Lara, L.M., Gutiérrez, P.J., Schulz, R., Stüwe, J.A., Tozzi, G.P., 1999, Dust coma simulations: grains fragmentation of fading grains? *Bull. Amer. Astron. Soc.*, **31**, [7.17], 1100.
- Lara, L.M., Schulz, R., Stüwe, J.A., Tozzi, G.P., 2001, Activity of comet Tabur (C/1996 Q1) during September 12-17, 1996. *Icarus*, **150**, 124-139.
- Larson, S.M., A'Hearn, M.F., 1984, Comet Bowell (1980b) - Measurement of the optical thickness of the coma and particle albedo from a stellar occultation. *Icarus*, **58**, 446-450.
- Lebedev, P., 1901, Untersuchungen über die druckkräfte des Lichtes (The experimental study of the pressure of light). *Annalen der Physik*, No. 11, Band 6, Heft 3, Leipzig, 1901.
- Lecacheux, J., Encrenaz, T., Rouan, D., Thuillot, W., Laques, P., Despiau, R., 1984, Stellar occultations by two comets -IRAS-Araki-Alcock (1983d) and P/IRAS (1983j). *Icarus*, **60**, 386-390.
- Leonard, F.C., 1930, The new planet Pluto. *Leaflet Astron. Soc. Pacific*, No. 30, 1930 August, pp. 121-124.
- Levin, B.J., 1943, *Astron. Zh.*, **20**, 48, *Soob. Akad. Nauk. SSSR*, **38**, 82.
- Levison, H.F., 1996, Comet taxonomy. In *Completing the Inventory of the Solar System*, T.W. Rettig, J.M. Hahn, eds., ASP Conference Series 107, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco, pp. 173-191.
- Levison, H.F., Duncan, M., 1997, From the Kuiper Belt to Jupiter-Family Comets: The spatial distribution of ecliptic comets. *Icarus*, **127**, 13-32.

- Levison, H.F., Morbidelli, A., Dones, L., Jedicke, R., Wiegert, P.A., Bottke, W.F., 2002, The mass disruption of Oort cloud comets. *Science*, **296**, 2212-2215.
- Levison, H.F., Morbidelli, A., Vanlaerhoven, Ch., Gomes, R., Tsiganis, K., 2008, Origin of the structure of the Kuiper belt during a dynamical instability in the orbits of Uranus and Neptune. *Icarus*, **196**, 258-273.
- Li, J.-Y., A'Hearn, M.F., McFadden, L.A., Belton, M.J.S., 2007, Photometric analysis and disk-resolved thermal modeling of Comet 19P/Borrelly from Deep Space 1 data. *Icarus*, **188**, 195-211.
- Licandro, J., Tancredi, G., Lindgren, M., Rickman, H., Gil Hutton, R., 2000, CCD photometry of cometary nuclei, I: Observations from 1990–1995. *Icarus*, **147**, 161-179.
- Lisse, C.M., Dennerl, K., Englhauser, J., Harden, M., Marshall, F.E., Mumma, M.J., Petre, R., Pye, J.P., Ricketts, M.J., Schmitt, J., Trumper, J., West, R.G., 1996, Discovery of X-ray and Extreme Ultraviolet emission from Comet C/Hyakutake 1996 B2. *Science*, **274**, 205-209.
- Lowry, S.C., Fitzsimmons, A., Cartwright, I.M., 1999, CCD photometry of distant comets. *Astron. Astrophys.*, **349**, 649-659.
- Lowry, S.C., Fitzsimmons, A., 2001, CCD photometry of distant comets II. *Astron. Astrophys.*, **365**, 204-213.
- Lowry, S.C., Weissman, P.R., 2003, CCD observations of distant comets from Palomar and Steward observatories. *Icarus*, **164**, 492-503.
- Lowry, S.C., Fitzsimmons, A., Collander-Brown, S., 2003, CCD photometry of distant comets. III. Ensemble properties of Jupiter-family comets. *Astron. Astrophys.*, **397**, 329-343.
- Luu, J.X., 1993, Spectral diversity among the nuclei of comets. *Icarus*, **104**, 138-148.
- Luu, J.X., Jewitt, D.C., 1992, Near-aphelion CCD photometry of Comet P/Schwassmann-Wachmann 2. *Astron. J.*, **104**, 2243-2249.
- Luu, J., Marsden, B.G., Jewitt, D., Trujillo, Ch.A., Hergenrother, C.W., Chen, J., Offutt, W.B., 1997, A new dynamical class of object in the outer Solar System. *Nature*, **387**, 573-575.
- Luu, J., Jewitt, D., 1996, Color diversity among the Centaurs and Kuiper Belt Objects. *Astron. J.*, **112**, 2310-2318.
- Luu, J.X., Jewitt, D.C., Trujillo, Ch., 2000, Water ice in 2060 Chiron and its implications for centaurs and Kuiper belt objects. *Astrophys. J.*, **531**, L151-L154.
- Luu, J.X., Jewitt, D.C., 2002, Kuiper Belt Objects: Relics from the accretion disk of the Sun. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, **40**, 63-101.
- Jewitt, D., Luu, J., 2004, Crystalline water ice in Kuiper belt object (50000) Quaoar. *Nature*, **432**, 731-733.
- Lyttleton, R.A., 1948, On the origin of comets. *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, **108**, 465-475.
- Lyttleton, R.A., 1952, Note on the Origin of Comets. *Astrophys. J.*, **115**, 333.
- Lyttleton, R.A., 1953, *The Comets and Their Origins*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Marsden, B.G., 1976, Nongravitational Forces on Comets: A Review. In *The Study of Comets*, Part 1, NASA SP-393, pp. 465-489.
- Maxwell, J.C., 1873, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, (1st ed.), **2**, 391, Clarendon Press, Oxford, 1873.

- Meech, K.J., 1992, Observations comet Cernis (1983 XII) at 19.4 and 20.9 AU. *Bull. Amer. Astron. Soc.*, **24**, [29.06], 993.
- Meech, K.J., Belton, M.J.S., Mueller, B.E.A., Dicksion, M.W., Li, H.R., 1993, Nucleus properties of P/Schwassmann-Wachmann 1. *Astron. J.*, **106**, 1222-1236.
- Meech, K.J., 1996, Physical properties of cometary nuclei. The Review paper for the Asteroids, Comets, Meteors – ACM 1996. In: Levasseur-Regourd, A.C., Fulchignoni, M., eds., Proceedings of the 10th COSPAR Colloquium. Pergamon-Elsevier, Oxford.
- Meech, K.J., Bauer, J.M., Hainaut, O.R., 1997, Rotation of comet 46P/Wirtanen. *Astron. Astrophys.*, **326**, 1268-1276.
- Meech, K.J., Hainaut, O.R., Marsden, B.G., 2000, Comet nucleus size distributions and distant activity. In *Proceedings of Minor Bodies in the Outer Solar System*, A. Fitzsimmons et al., eds., Springer-Verlag, Berlin, pp. 75-80.
- Meech, K.K., Hainaut, O.R., Marsden, B.G., 2004, Comet nucleus size distributions from HST and Keck telescopes. *Icarus*, **170**, 463-491.
- Meech, K.J., Pittichová, J., Bar-Nun, A., Notesco, G., Laufer, D., Hainaut, O.R., Lowry, S.C., Yeomans, D.K., Pitts, M., 2009, Activity of comets at large heliocentric distances pre-perihelion. *Icarus*, **201**, 719-739.
- Merényi, E., Földy, L., Szegő, K., Tóth, I., Kondor, A., 1990, The landscape of Comet Halley. *Icarus*, **86**, 9-20.
- Moons, M., 1996, Review of the dynamics in the Kirkwood gaps. *Cel. Mech.*, **65**, 175-204.
- Morbidelli, A., Levison, H.F., Tsiganis, K., Gomes, R., 2005, Chaotic capture of Jupiter's Trojan asteroids in the early solar system. *Nature*, **435**, 462-465.
- Mueller, B.E.A., 1992, CCD-photometry of comets at large heliocentric distances. In *Asteroids, Comets, Meteors – ACM 1991*, LPI, 425-428.
- Mueller, B.E.A., Ferrin, I., 1996, Change in the rotational period of Comet P/Tempel 2 between the 1988 and 1994 apparitions. *Icarus*, **123**, 463-477.
- Mueller, B.E.A., Samarasinha, N.H., 2001, Lightcurve observations of 19P/Borrelly. *Bull. Amer. Astron. Soc.*, **33**, [28.02], 1090.
- Murray, C.D., Dermott, S.F., 2000, *Solar System Dynamics*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000.
- Newburn, R.L., Jr., Spinrad, H., 1985, Spectrophotometry of seventeen comets. II – The continuum. *Astron. J.*, **90**, 1591-2608.
- Newton, I., 1687, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, London, Book 3, 510 pp.
- Nichols, E.F., Hull, G.F., 1903, The pressure due to radiation. *Astrophys. J.*, **17**, 315-351.
- Ninkov, Z., 1994, A near stellar occultation by P/Grigg-Skjellerup. *Astron. J.*, **107**, 1182-1188.
- Nolan, M.C., Harmon, J.K., Howell, E.S., Benner, L.A., Giorgini, J.D., Ostro, S.J., Campbell, D.B., Margot, J.L., 2006, Radar observations of Comet 73P/Schwassmann-Wachmann 3. *Bull. Amer. Astr. Soc.*, **38**, [12.06], 504.
- Noll, K.S., Weaver, H.A., Feldman, P.D., eds., 1996, The collision of comet Shoemaker-Levy 9 and Jupiter. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 266 pp.
- Oberc, P., 1996, Disintegration of dust aggregates as origin of the boundaries in Halley's coma: Derivation of the sublimation parameters. *Icarus*, **124**, 195-208.

- Oberc, P., 2004, Small-scale dust structures in Halley's comet II. Disintegration of large dust bodies. *Icarus*, **171**, 463-486.
- Oberst, J., Giese, B., Soderblom, L., & The DS1 Science Team, 2002, The nucleus of comet Borrelly: A study of morphology and surface brightness. *LPSC*, **33**, 1716.
- O'Brien, D.P., Greenberg, R., 2003, Steady-state size distributions for collisional populations: analytical solution with size-dependent strength. *Icarus*, **164**, 334-345.
- Ohtsuka, K., Ito, T., Yoshikawa, M., Asher, D.J., Arakida, H., 2008, Quasi-Hilda comet 147P/Kushida-Muramatsu. Another long temporary satellite capture by Jupiter. *Astron. Astrophys.*, **489**, 1355-1362.
- Olbers, H.W.M., 1812, *Monatliche Correspondenze z. Beförd. d. Erd und Himmels-Kunde*, ed. F. v. Zach, **25**, 3
- Oort, J.H., 1950, The structure of the cloud of comets surrounding the solar system and a hypothesis concerning its origin. *Bull. Astron. Neth.*, **11**, 91-110.
- Öpik, E., 1932, Note on the stellar perturbations of nearly parabolic orbits. *Publ. Am. Acad. Arts Sci.*, **67**, 259-269.
- Ostro, S.J., 1993, Planetary radar astronomy. *Rev. Mod. Phys.*, **65**, 1235-1279.
- Peixinho, N., Doressoundiram, A., Delsanti, A., Boehnhardt, H., Barucci, M.A., Belskaya, I., 2003, Reopening the TNOs color controversy: Centaurs bimodality and TNOs unimodality. *Astron. Astrophys.*, **410**, L29-L32.
- Rickman, H., Huebner, W.F., Ahrens, T.J., Johnson, R.E., Klinger, J., Möhlmann, D. (Organizers Eds.), 1996, Cometary material. In *First Comet Nucleus Surface Properties Workshop. Asteroids, Comets, Meteors VI – ACM 1996*, 8-12 July 1996, Paris-Versailles.
- Rodionov, A.V., Crifo, J.-F., Szegő, K., Lagerros, J., Fulle, M., 2002, An advanced physical model of cometary activity. *Planet. Space Sci.*, **50**, 983-1024.
- Russell, H.N., 1916, On the albedo of the planets and their satellites. *Astrophys. J.*, **43**, 173-196.
- Russell, H.N., Dougan, R.S., Stewart, J.Q., Young, C.A., 1926, *Astronomy, a revision of Young's Manual of astronomy*, Boston, New York, Ginn and company.
- Russell, H.N., 1929, On meteoric matter near the stars. *Astrophys. J.*, **69**, 49-71.
- Sagdeev, R.Z., Szabo, F., Avanesov, G.A., Cruvellier, P., Szabo, L., Szego, K., Åbergel, A., Balazs, A., Barinov, I.V., Bertaux, J.-L., Blamont, J., Demaille, M., Demarelis, E., Dul'Nev, G.N., Endroczy, G., Gardos, M., Kanyo, M., Kostenko, V.I., Krasikov, V.A., Nguyen-Trong, T., Nyitrai, Z., Reny, I., Ruzsnyak, P., Shamis, V.A., Smith, B., Sukhanov, K.G., Szabo, F., Szalai, S., Tarnopolsky, V.I., Toth, I., Tsukanova, G., Valnicek, B.I., Varhalmi, L., Zaiko, Yu.K., Zatsepin, S.I., Ziman, Ya.L., Zsenei, M., Zhukov, B.S., 1986, Television observations of comet Halley from VEGA spacecraft. *Nature*, **321**, 262-266.
- Sagdeev, R.Z., Szegő, K., 1990, The near-nuclear region of comet Halley, based on the imaging results of the VEGA mission. In *Comet Halley. Investigations, results, interpretations*, Vol. 2, pp 147-162.
- Samarasinha, N.H., Belton, M.J.S., 1995, Long-term evolution of rotational stress and nongravitational effects for Halley-like cometary nuclei. *Icarus*, **116**, 340-358, Erratum: *Icarus*, **120**, 443 (1996).
- Samarasinha, N.H., 1997, Preferred orientations for the rotational angular momentum vectors for periodic comets. *Bull. Amer. Astron. Soc.*, **29**, 743.
- Schiaparelli, J.V., 1866, *Bull. Meteor. Obs. Coll. Rom.*, **5** (8,10,11,12), 6(2).

- Schiaparelli, J.V., 1867, Sur la relation qui existe entre les comètes et les étoiles filantes. Par M. J. V. Schiaparelli. *Astron. Nachr.*, **68**, 331-332.
- Schubart, J., 1968, Long-period effects in the motion of Hilda-type planets. *Astron. J.*, **73**, 99-103.
- Schlichting, H.E., Sari, R., 2009, The creation of Haumea's collisional family. *Astrophys. J.*, **700**, 1242-1246.
- Schuller, Fr., 1930, Comet Schwassmann-Wachmann 3 (1930d). *Union Astronomique Internationale Circular*, 288, (1930 June 16, E. Strömgren, ed.).
- Schwarzschild, K., 1901, *Sitz. Ber. Akad. München*, **31**, 293.
- Schwarzschild, K., Kron, E., 1911, On the distribution of brightness in the tail of Halley's comet. *Astrophys. J.*, **34**, 342-352.
- Secchi, A., 1861, *Comptes Rendus Acad. Paris*, **53**, 85.
- Secchi, A., 1865, *Comptes Rendus Acad. Paris*, **55**, 751.
- Senay, M.C., Jewitt, D., 1994, Coma formation driven by carbon monoxide release from comet Schwassmann-Wachmann 1. *Nature*, **371**, 229-231.
- Singh, P.D., de Almeida, A.A., Huebner, W.F., 1992, Dust release rates and dust-to-gas mass ratios of eight comets. *Astron. J.*, **104**, 848-858.
- Sirianni, M., Jee, M.J., Benítez, N., Blakeslee, J.P., Martel, A.R., Meurer, G., Clampin, M., De Marchi, G., Ford, H.C., Gilliland, R., Hartig, G.F., Illingworth, G.D., Mack, J., McCann, W.J., 2005, The photometric performance and calibration of the Hubble Space Telescope Advanced Camera for Surveys. *Publ. Astron. Soc. Pacific*, **117**, 1049-1112.
- Sirono, S-i., Greenberg, J.M., 2000, Do cometesimal collisions lead to bound rubble piles or to aggregates held together by gravity? *Icarus*, **145**, 230-238.
- Slipher, V.M., 1927, The spectrum of the Pons-Winnecke comet and the size of the cometary nucleus. *Lowell Obs. Bull.*, **3**, No. 86, 135-137.
- Smith, B.A., Terrile, R.J., 1984, A circumstellar disk around Beta Pictoris. *Science*, **226**, 1421.
- Smith, B., Szegő, K., Larson, S., Merényi, E., Toth, I., Sagdeev, R.Z., Avanesov, G.A., Krasikov, V.A., Shamis, V.A., Tarnapolski, V.I., 1986, The spatial distribution of dust jets seen at Vega-2 fly-by. *Astron. Astrophys.*, **187**, 835-838.
- Snodgrass, C., Lowry, S.C., Fitzsimmons, A., 2006, Photometry of cometary nuclei: rotation rates, colours and a comparison with Kuiper Belt Objects. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **373**, 1590-1602.
- Snodgrass, C., Lowry, S.C., Fitzsimmons, A., 2008, Optical observations of 23 distant Jupiter Family Comets, including 36P/Whipple at multiple phase angles. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **385**, 737-756.
- Soderblom, L.A., Becker, T.L., Bennett, G., Boice, D.C., Britt, D.T., Brown, R.H., Buratti, B.J., Isbell, C., Giese, B., Hare, T., Hicks, M.P., Howington-Kraus, E., Kirk, R.L., Lee, M., Nelson, R.M., Oberst, J., Owen, T., Sandel, B.R., Stern, S.A., Thomas, N., Yelle, R.V., 2002, Results from the Deep Space 1 Miniature Integrated Camera and Spectrometer. *LPSC*, **33**, 1256.
- Soderblom, L.A., Becker, T.L., Bennett, G., Boice, D.C., Britt, D.T., Brown, R.H., Buratti, B.J., Isbell, C., Giese, B., Hare, T., Hicks, M.D., Howington-Kraus, E., Kirk, R.L., Lee, M., Nelson, R.M., Oberst, J., Owen, T.C., Rayman, M.D., Sandel, B.R., Stern, S.A., Thomas, N., Yelle, R.V., 2002, Observations of Comet 19P/Borrelly by the Miniature Integrated Camera and Spectrometer Aboard Deep Space 1. *Science*, **296**, 1087-1091.

- Solem, J.C., 1995, Cometary breakup calculations based on a gravitationally-bound agglomeration model: the density and size of Shoemaker-Levy 9. *Astron. Astrophys.*, **302**, 596-608.
- Somogyi, A.J., Gringauz, K.I., Szegő, K., Szabó, L., Kozma, Gy., Remizov, A.P., Erő, J., Klimenko, I.N., Szűcs, I.T., Verigin, M.I., Windberg, J., Cravens, T.E., Dyachkov, A., Erdős, G., Faragó, M., Gombosi, T.I., Kecskeméty, K., Keppler, E., Kovács, T., Kondor, A., Logachev, Y.I., Lohonyai, L., Marsden, R., Redl, R., Richter, A.K., Stolpovskii, V.G., Szabó, J., Szentpétery, I., Szepesváry, A., Tatrallyay, M., Varga, A., Vladimirova, G.A., Wenzel, K.P., Zárándy, A., 1986, First observations of energetic particles near comet Halley. *Nature*, **321**, 285-288.
- Somogyi, A.J., Axford, W.I., Erdős, G., Ip, W.-H., Shapiro, V.D., Shevchenko, V.I., 1990, Particle acceleration in the plasma fields near comet Halley. In *Comet Halley. Investigations, results, interpretations*, Vol. 1, pp 203-219.
- Spencer, J.R., Lebofsky, L.A., Sykes, M.V., 1989, Systematic biases in radiometric diameter determinations. *Icarus*, **78**, 337-354.
- Stern, S.A., 1995, Collisional time scales in the Kuiper Disk and their implications. *Astron. J.*, **110**, 856-868.
- Stern, S.A., 1996, Signatures of collisions in the Kuiper disk. *Astron. Astrophys.*, **310**, 999-1010.
- Swings, P., 1941, Complex structure of cometary bands tentitatively ascribed to the contour of the solar spectrum. *Lick Observatory Bull.*, No. 508, 131-136.
- Swings, P., 1942, Molecular bands in cometary spectra. Identifications. *Rev. Mod. Phys.*, **14**, 190-194.
- Swings, P., 1943, Cometary spectra. (Reports on the progress of astronomy.). *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, **103**, 86-110.
- Swings, P., 1948, Le Spectre de la Comète d'Encke, 1947i. *Annales d'Astrophysique*, **11**, 124-136.
- Szabó, Gy.M., Kiss, L.L., Sárneczky, K., 2008, Cometary activity at 25.7 AU: Hale-Bopp 11 years after perihelion. *Astrophys. J.*, **677**, L121-L124.
- Szabó, Gy.M., Sárneczky, K., Kiss, L.L., 2011, Frozen to death? Detection of comet Hale-Bopp at 30.7 AU. *Astron. Astrophys.*, **531**, id.A11.
- Szegő, K., Toth, I., Szatmáry, Z. Smith, B.A., Kondor, A., Merényi, E., 1989, Dust photometry in the near nucleus region of Comet Halley. *Adv. Space Res.*, **9**, No. 3, 89-92.
- Szegő, K., 1991, P/Halley, the model comet, in view of the imaging experiment a board of VEGA spacecraft. In *Comets in the Post-Halley era.*, Vol. 2, Proc. IAU Colloq. 116, R.L. Newburn, Jr., M. Neugebauer, J. Rahe, Kluwer Academic, *Astrophys. Space Sci. Lib.*, Vol. 167, pp. 723-731.
- Szegő, K., Crifo, J. F., Földy, L., Lagerros, J.S.V., Rodionov, A.V., 2001, Dynamical effects of comet P/Halley gas production. *Astron. Astrophys.*, **370**, L35-L38.
- Tancredi, G., Lindgren, M., Rickman, H., 1990, Temporary satellite capture and orbital evolution of Comet P/Helin-Roman-Crockett. *Astron. Astrophys.*, **239**, 375-380.
- Tancredi, G., Sosa, A., 1996, Was SL-9 a Jupiter Family Comet or an escaped asteroid? *Rev. Mex. de Astron. Astrofis. Seria de Conf.*, **4**, 118.
- Tancredi, G., Fernández, J.A., Rickman, H., Licandro, J., 2000, A catalog of observed nuclear magnitudes of Jupiter family comets. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **146**, 73-90.
- Tancredi, G., Fernández, J.A., Rickman, H., Licandro, J., 2006, Nuclear magnitudes and the size distribution of Jupiter family comets. *Icarus*, **182**, 527-549.

- Tegler, S.C., Romanishin, W., 1998, Two distinct populations of Kuiper-belt objects. *Nature*, **392**, 49-51.
- Terkán, L., 1910, A Halley-üstökös kisugárzásának fényességváltozása. *Az Időjárás, Meteorológiai és csillagászati folyóirat*, **XIV.**, 6. fűzet, 173-179.
- Thomas, N., Keller, H.U., 1989, The colour of Comet P/Halley's nucleus and dust. *Astron. Astrophys.*, **213**, 487-494.
- Thomas, N., Keller, H.U., 1990, Interpretation of the inner coma observations of comet P/Halley by the Halley Multicolor Camera. *Annales Geophysicae*, **8**, 147-165.
- Thomas, N., 2009, The nuclei of Jupiter family comets: A critical review of out present knowledge. *Planet. Space Sci.*, **57**, 1106-1117.
- Tisserand, F.F., 1889, *Traité Mécanique Céleste*, Vol. 4, Gauthier-Villars et fils, Imprimeurs-Libraties, Paris.
- Tóth, I., Balázs, L., 1982, Possibility of three dimensional morphological studies in cometary missions. In *Cometary exploration; Proceedings of the International Conference*, T.I. Gombosi, ed., Budapest, Hungary, November 15-19, 1982, Akadémiai Kiadó, Budapest, Volume 3, pp. 169-174.
- Toth, I., Szego, K., Kondor, A., 1987, Dust photometry in the near nucleus region of Comet Halley from VEGA-2 observations. *ESA SP-278*, 343-347.
- Toth, I., 1992, Konkoly Thege and the Research of Comets. In *The Role of Miklos Konkoly Thege in the History of Astronomy in Hungary*. Proceedings of the 120th Anniversary of Konkoly Observatory, meeting in Budapest, 5-6 September 1991. Edited by Magda Vargha, Laszlo Patkos, and Imre Toth. Budapest: Konkoly Observatory, 1992., p.30.
- 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.
- 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.
- Toth, I., Lamy, P.L., 2000, Spectral properties of the nucleus of short-period comets. *Bull. Astron. Soc. Amer.*, **32**, [37.05], 1063.
- Toth, I., Lamy, P.L., 2005, The colors of cometary nuclei and other primitive bodies. *Bull. Amer. Astr. Soc.*, **37**, [16.17], 1563.
- 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.
- Toth, I., 2006a, Connections between asteroids and cometary nuclei. (Invited review). In *Asteroids, Comets, Meteors - ACM 2005*, Proc. of the 229th Symposium of the IAU, J.A. Fernández, S. Ferraz-Mello, D. Lazzaro, eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 67-96.
- Toth, I., 2006b, Search for comet-like activity in asteroid 7968 Elst-Pizarro and limitation of its rotational pole orientation. *Astron. Astrophys.*, **446**, 333-343.
- Toth, I., 2006c, The quasi-Hilda subgroup of ecliptic comets - an update. *Astron. Astrophys.*, **448**, 1191-1196.
- Toth, I., Lisse, C.M., 2006, On the rotational breakup of cometary nuclei and centaurs. *Icarus*, **181**, 162-177.
- 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. Astron. Soc.*, **38**, [06.01], 489.

- 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. Astron. Soc.*, **40**, [05.08], 394.
- Toth, I., Lisse, C.M., 2010, Effect of the tensile strength on the stability against rotational breakup of icy bodies. In *Icy Bodies of the Solar System*, Proceedings of the IAU Symposium 263, D. Lazzaro, D. Prialnik, R. Schulz, J.A. Fernández, eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 131-140.
- Trigo-Rodriguez, J.M., Sanchez, A., Colas, F., Maquet, L., Pastor, S., Reyes, J.A., Rodriguez, D., Kugel, F., 2010, Comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1. *CBET*, 2160, (2010 February 4, D.W.E. Green, ed.).
- Vargha D-né, 2001, In *A Konkoly-obszervatórium krónikája. Emlékek az elmúlt száz esztendőből*. Vargha D-né, Csaba J., Vida R. szerk. (eds.), MTA KTM CSKI, Budapest, pp. 11-19, *Konkoly Observatory Monographs* No. 3/A. Konkoly Thege Miklós élete és munkássága.
- Veillet, C., Doressoundiram, A., Shapiro, J., Kavelaars, J.J., Morbidelli, A. 2001, S/2000 1999 WW31. IAU Circular No. 7610, (2001 April 16, D.W.E. Green, ed.).
- Veillet, C., Parker, J.W., Griffin, I., Marsden, B., Doressoundiram, A., Buie, M., Tholen, D., Connelly, M., Holman, M.J., 2002, The binary Kuiper-belt object 1998 WW31. *Nature*, **416**, 711-713..
- Volk, K., Malhotra, R., 2008, The Scattered Disk as the source of the Jupiter Family Comets. *Astrophys. J.*, **687**, 714-725.
- Vorontsov-Velyaminov, B., 1946, Structure and mass of cometary nuclei. *Astrophys. J.*, **104**, 226-233.
- Vsekhsviatky, S.K., 1948, On the question of cometary origin. *Astron. Zh.*, **25**, 256-266.
- Weaver, H.A., Lamy, P.L., 1997, Estimating the size of Hale-Bopp's nucleus. *Earth, Moon, and Planets*, **79**, 17-33.
- Weaver, H.A., Feldman, P.D., A'Hearn, M.F., Arpigny, C., Brandt, J.C., Stern, S.A., 1999, Post-perihelion HST observations of Comet Hale-Bopp (C/1995 O1). *Icarus*, **141**, 1-12.
- Weiss, E., 1888, *Bilderatlas der Sternwelt*, Stuttgart, 1888.
- Weissman, P.R., Kieffer, H.H., 1981, Thermal modeling of cometary nuclei. *Icarus*, **47**, 302-312.
- Weissman, P.R., 1986, Are cometary nuclei primordial rubble piles? *Nature*, **320**, 241-244.
- Weissman, P.R., 1996, If it quacks like a Comet... *Icarus*, **121**, 275-280.
- Weissman, P.R., Doressoundiram, A., Hicks, M., Chamberlin, A., Larson, S., Hergenrother, C., 1999, CCD photometry of comet and asteroid targets of space missions. *Bull. Am. Astron. Soc.*, **31**, [33.03].
- Weissman, P.R., Bottke, W.F. Jr., Levison, H.F., 2002, Evolution of comets into asteroids. In *Asteroids III*, W.F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paollicchi, R.P. Binzel, eds., Space Science Series, University of Arizona Press, Tucson, AZ, pp. 669-686.
- Weissman, P.R., Asphaug, E., Lowry, S.C., 2004, Structure and density of cometary nuclei. In *Comets II*, M.C. Festou, H.U. Keller, H.A. Weaver, eds., Space Science Series, University of Arizona Press, Tucson, Arizona, pp. 337-457.
- Weissman, P.R., Lowry, S.C., 2006, Size distribution, structure and density of cometary nuclei. In *Workshop on Spacecraft Reconnaissance of Asteroid and Comet Interiors*, October 5-6, 2006, Santa Cruz, California, LPI Contrib. No. 1325, pp. 76-77.

- Wesselink, A.J., 1948, Heat conductivity and nature of the lunar surface. *Bull. Astron. Inst. Neth.*, **10**, 351-363.
- West, R.M., Hainaut, O., Smette, A., 1991, Post-perihelion observations of P/Halley. III – an outburst at $R = 14.3$ AU. *Astron. Astrophys.*, **246**, L77-L80.
- Whipple, F.L., 1950, The comet model. *Astrophys. J.*, **111**, 375-394.
- Whipple, F.L., 1960, On the structure of the cometary nucleus. *Astron. J.*, **65**, 503-503.
- Whipple, F.L., 1961, Problems of the cometary nucleus. *Astron. J.*, **66**, 375-380.
- Whipple, F.L., 1989, Comets in the space age. *Astrophys. J.*, **341**, 1-15.
- Wodetzky, J., 1910, *Üstökösök*. Népszerű Természettudományi Könyvtár 1. Kiadja a Kir. Magyar Természettudományi Társulat, Budapest, 1910.
- Wood, J.A., 1968, *Meteorites and the origin of planets*. McGraw-Hill Book Co., Inc. New York.
- Wright, A.W., 1881, The polarization of light from comet b 1881. *Observatory*, **4**, 253-256.
- Wurm, K., 1934, Beitrag zur Deutung der Vorgänge in Kometen. II. Mit 5 Abbildungen. *Zeitschr. für Astrophysik*, **9**, 62.
- Wurm, K., 1943, Die Natur der kometen. *Mitteilungen der Hamburger Sternwarte in Bergedorf*, **8**, Nr. 51, 57-92.
- Wyckoff, S., 1982, Overview of comet observations. In *Comets*, L.L. Wilkening, ed., Space Science Series, Univ. Arizona Press, Tucson, AZ, pp. 3-55.
- Yeomans, D.K., 1991, *Comets. A chronological history of observations. Science, myth and folklore*. Wiley Science Eds., New York.
- Yeomans, D.K., Chodas, P.W., 1994, Comet Shoemaker-Levy 9 in orbit about Jupiter. *Bull. Amer. Astron. Soc.*, **26**, [01.10-P], 1566.
- Zellner, B., Tholen, D.J., Tedesco, E.F., 1985, The eight-color asteroid survey – Results for 589 minor planets. *Icarus*, **61**, 355-416.

dc_107_10

Külső borítólapon kép: *A NASA Hubble Űrteleszkópja (HST) és a Föld. A felvétel a Discovery űrsikló (Space Shuttle) STS103-726-081 szervíz küldetése idején 1999. december 19-27. között készült. A kép forrása: NASA*
http://spaceflight.nasa.gov/gallery/images/shuttle/sts-103/html/sts103_726_081.html

dc_107_10

