

**Válasz**  
**Dr. Jankovics István opponens**  
**kérdéseire**

**Doktori értekezés címe:** Az ekliptikai üstökösök eredete és fizikai tulajdonságai

**Doktori értekezés szerzője:** Tóth Imre, PhD (MTA CSFK KTM CSI)

**Doktori értekezés kategóriája:** MTA doktori disszertáció

**Doktori értekezés tudományos osztálya:** MTA XI. Fizikai Tudományok Osztálya

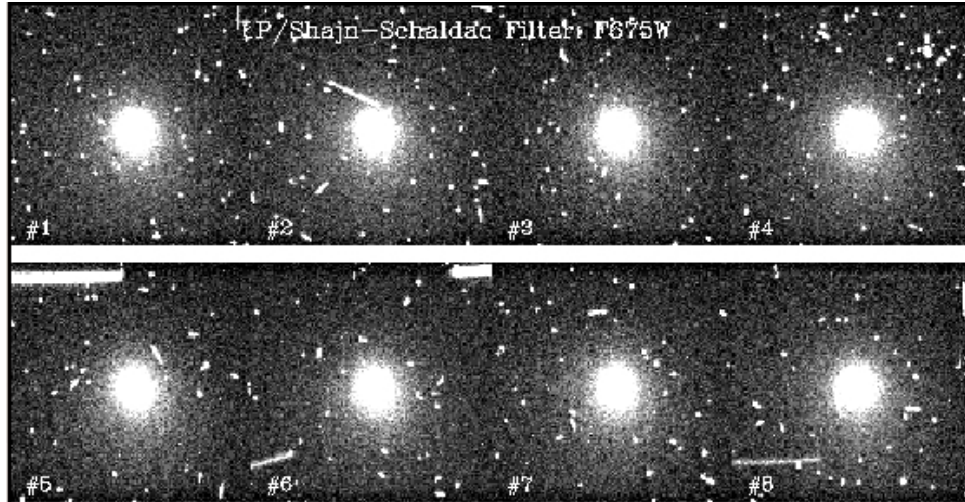
Köszönöm Dr. Jankovics István opponensnek a disszertációm gondos áttanulmányozását és értékelését. Külön köszönöm az opponensi véleményben feltett 2. és 3. számú kérdéseket, amelyek a Naprendszer kis égitestei fizikai tulajdonságaival kapcsolatos további vizsgálatok irányába előremutatóak.

A konkrét kérdésekre a válaszaim a következők:

**1. Az értekezésben az üstökös-mag és kóma fényének szétválasztására ismertített módszer mikor nem alkalmazható?** A feltett kérdés igen fontos, hiszen az értekezésben ismertített módszer alkalmazhatóságának korlátait érinti. Ezek részletezésére a disszertáció terjedelmi korlátai miatt egyáltalán nem vagy csak részben kerülhetett sor. A módszer alkalmazhatóságának vannak műszerteknikai, a megfigyelés geometriai és távolságviszonyaival összefüggő, illetve az objektum fizikai tulajdonságai által adott korlátai.

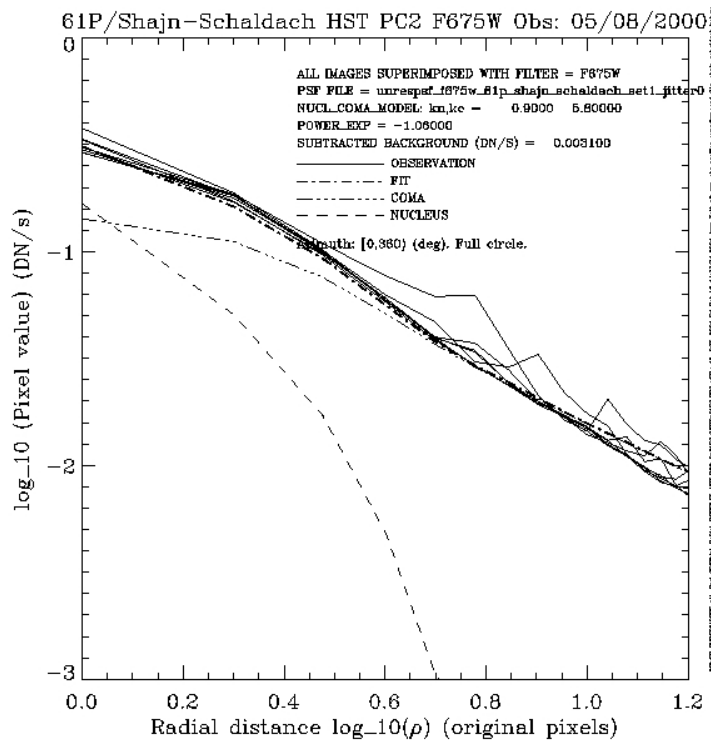
A műszerteknikai korlátok a következők:

1. A teleszkóp (HST, ISO, Spitzer) mozgó objektumokra történő követési pontossága által adott korlát: a gyakorlatban az ekliptikai üstökösökre ez azt jelenti, hogy a földkörüli pályán keringő teleszkóptól mintegy 0,1 CsE távolságnál közelebbi objektumot (például üstökösöt) annak túl gyors látszólagos mozgása miatt nem tudja követni, nem tudja egy képlemen belül pontforrás jellegű objektumnak megtartani (az üstökös magját). A túl gyorsan mozgó objektum képe elhúzódo csíknak fog látszani, ami nem alkalmas az értekezésben ismertített módszer alkalmazására.
2. A kozmikus sugárzás részecskéinek nyomai az üstökös-magot tartalmazó képlemen közelében, illetve a kómában (kóma profil) torzítást okoznak, amely olyan mértékű lehet, hogy a sem az értekezésben alkalmazott, sem pedig más, például apertúra fotometriával analóg módszer alkalmazását lehetetlenné teszik. Erős naptevékenység idején megnövekedett kozmikus sugárzás ("kedvezőtlen űridőjárási viszonyok"), illetve a földi Dél-Atlanti Anomália felett történő elrepülés idején a földkörüli pályán keringő űrteleszkópok műszereit, detektorait a sugárzás elleni megerősített védelem ellenére erős kozmikus sugárzás éri (HST, ISO). A HST és az ISO földkörüli pályán kering, a Spitzer pedig napkörüli pályán, ezért ezen utóbbira nem volt hatással a Dél-Atlanti Anomália felett megnövekedett kozmikus sugárzás, de a Föld mágneses terének védőpajzsa nem védi, ezért állandóan ki volt téve a bolygóközi kozmikus sugárzás hatásának. Az ISO elnyújtott ellipszis pályájának földközeli szakasza a Van Allen-övezeten is áthaladt, ahol erős sugárzás éri és ezért ezen a pályaszakaszon a műszereivel a csillagászati megfigyelések szüneteltek. Az űrteleszkópokkal végzett üstökös-megfigyeléseken a kozmikus sugárzás részecskéinek különböző hatásait a 1., 2. és 3. ábrák szemléltetik.



1. ábra. Koszmos sugárzás részecskéinek nyomai a Hubble Űrteleszkóp PC2 kamerája (Bolygókamera 2) által a 61P/Schajin-Schaldach ekliptikai üstökösről R-ben (F675W fotometriai szűrővel) 2000. augusztus 5-én (UT) készített megfigyelések közben (HST Cycle 9). Az üstökös 2,96 CsE naptávolságban és 1,96 CsE földtávolságban a napközelsége felé közeledő pályaszakaszán járt a HST megfigyelések idején. Az 5., 6. és 8. számú képeken látható közel vízszintes irányú fehér csíkok az üstökösre történő követés közben vonallá húzódó háttérsillagok nyomai.

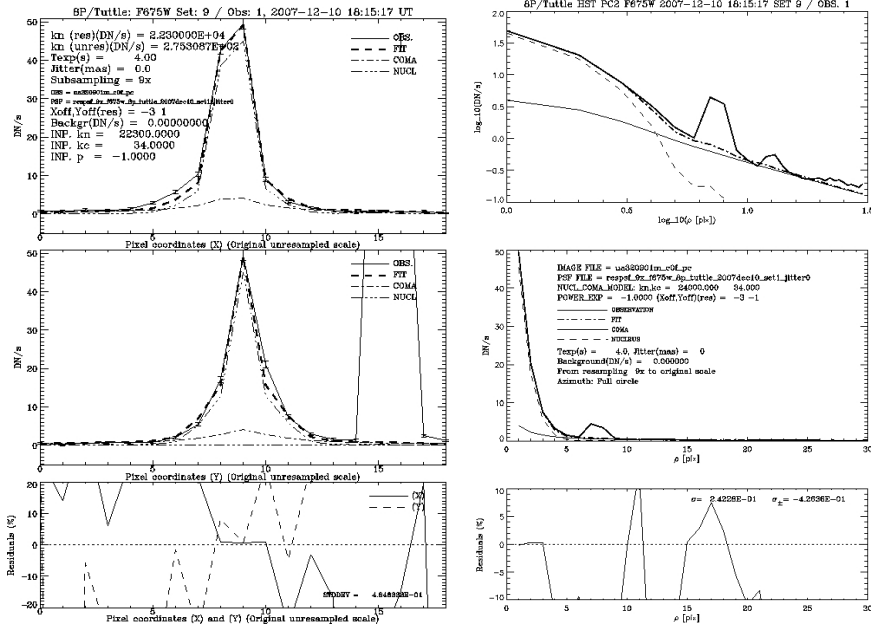
3. A mozgó objektum követése során egy csillag elhúzódnak nyoma az objektumot (üstökösmagot) tartalmazó képelemen vagy ahhoz nagyon közel megy keresztül, ami az üstökösmag és kóma fényének elválasztását zavarja, de csak akkor akadályozza meg, ha pontosan a magot tartalmazó képelemen megy át. A csillagnyomok általában a magtól távol haladnak át a kómán és így nem zavaróak a mag és kóma fényének szétválasztásában, ellentétben a kozmikus részecskék nyomának a detektoron nagy kiterjedésű hatásához képest, ami lehetetlenné teszi a mag/kóma szétválasztást és a fotometriát. Az eddigi HST-vel történt üstökösmegfigyelések során nem fordult még elő az, hogy egy háttérsillag nyoma pont az üstökösmagot tartalmazó képelement ment volna át.
4. Amikor a teleszkóp mechanikai vibrációi (jitter) túl nagyok, amik a pont-szórásfüggvény (PSF) túl nagy kiszélesedéséhez, torzulásaihoz vezetnek, a pontszerű objektumra (üstökösmag) a PSF illesztése bizonytalan vagy lehetetlen. Ez a jitter mintegy 20 ezred ívmásodpercnél (milli-ívmásodperc, angol rövid.: *mas*) nagyobb értékeinél következhet be. A tapasztalataim szerint a 2-15 ezred ívmásodperc közötti jitter értékek - leggyakrabban 2-5 ívmásodperce, de legfeljebb 10 ezred ívmásodperc - fordultak elő az elmúlt mintegy húsz év, a HST-vel folytatott üstökösmegfigyeléseim során.



2. ábra. Kozmikus sugárzás részecskéinek hatása a Hubble Űrteleszkóp PC2 kamerája (Bolygókamera 2) által a 61P/Schajin-Schaldach ekliptikai üstökösről R-ben (F675W fotometriai szűrővel) 2000. augusztus 5-én (UT) készített megfigyelések közben (HST Cycle 9): a megfigyelt radiális fényességprofilok azimut szög szerint átlagolása helyenként fényesség-ugrásokat mutat, ami a kozmikus részecskék detektorba való becsapódásának következménye. Az ábrán a görbesereg több megfigyelt kép radiális profilja.

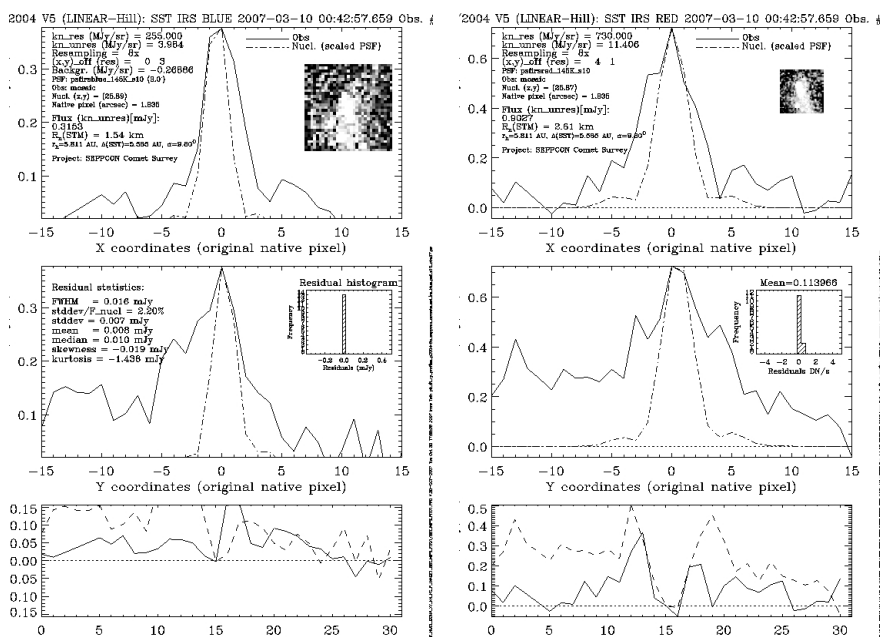
5. Amikor a teleszkóp defókuszált, akkor sem alkalmazható az értekezésben ismertetett módszer az üstökösmag és kóma fényének szétválasztására, hacsak a pont-szórási függvény (PSF) elő nem állítható a defókuszáltság mértékének figyelembevételével, mint ami például lehetséges az új WFC3 kameránál (korábban a PC2 és ACS kamerák használatakor nem állt még rendelkezésre ez a lehetőség, csak 2012 novemberétől lehet megadni a defókuszáltság mértékét, ha az ismert). Egyébként pedig defókuszált képeket lehet javítani, élesíteni és az élesített képre lehet alkalmazni az ismertetett módszert, de a HST PC2 optikailag javított kamerájával már nem volt ilyen probléma 1993. decemberétől. Annak előtte csak az optikailag hibás WFPC1 kamera estén merült fel a defókuszáltsági probléma.

A legfontosabb szempont az üstökösmag és kóma fényének sikeres szétválasztására az, hogy a mag/kóma fénykontraszt elegendően nagy legyen. A megfigyelési geometriai viszonyoktól, illetve a megfigyelésre kiválasztott időszaktól, valamint az üstökösmag tulajdonságaitól (méretétől, aktivitásától) függő tényezők, amelyek a mag és kóma fényének szétválasztását befolyásolják:



3. ábra. Koszmos sugárzás részecskéinek hatása a Hubble Űrteleszkóp PC2 kamerája (Bolygókamera 2) által a 8P/Tuttle Halley-típusú (Oort-felhőből származó) üstökösről R-ben (F675W fotometriai szűrővel) 2007. december 10-én (UT) készült megfigyelésről. A megfigyelt képen az üstökösmagot tartalmazó képelemen át X és Y irányban felvett fényességprofilon Y irányban egy kozmikus részecske hatása látható (bal oldali panel). A megfigyelt radiális fényességprofilok azimut szög szerint átlagolása helyenként fényességugrásokat mutat, ami a kozmikus részecskék detektorba való becsapódásának következménye (jobb oldali panel). A kozmikus részecske nyom szerencsére nem akadályozta meg az üstökösmag és kóma fényének elválasztását, illetve a mag fotometriájának meghatározását.

1. Az üstökösmag/kóma fényének szétválasztására kidolgozott módszer alkalmazhatóságának alapfeltétele, hogy a kóma optikailag vékony, átlátszó legyen. A nagyon aktív üstökösök esetén elsősorban a magból koncentráltan kiáramló anyag (gáz és porjetek) forrásainak helyénél a mag közvetlen közelében a kóma optikailag vastag: ilyen lehetett például a Hale-Bopp (C/1995 O1) nagy és igen aktív üstökösnél, illetve Halley-üstökös 1986-os napközelsége idején. Az értekezésben ismertett kutatás során megfigyelt ekliptikai üstökösök egyikének aktivitása sem volt olyan nagy mértékű, hogy a kóma optikailag vastag lett volna, így az üstökösmag detektálható volt, a mag és kóma fénye külön választható volt.
2. Amikor az üstökös nagy távolságban van a megfigyelőtől (űrteleszkóp) az üstökös távolságában a detektor egy képeleme, amely az üstökösmagot tartalmazza túl nagy méretű a megmérendő üstökösmag méretéhez képest, azaz a kóma fényességjáruléka túl nagy az üstökösmagéhoz képest, tehát a mag/kóma fényességkontraszt túl kicsi lesz és a mag/kóma fényesség szeparáció nem hajtható végre. Gyakorlati tapasztalatom szerint például egy 4-5 CsE távolságban lévő üstökös a HST Bolygókamera 2 (PC2), illetve Nagylátómezejű Kamerája (WFC3) képeleme mintegy 120 km oldalhosszúságú négyzet, amelyen belül egy mintegy 2 km átmérőjű üstökösmag fénye nem különíthető el egy aktív és fényes kómától.



4. ábra. Példa arra az esetre, amikor egy üstökösnél csak a porkóma detektálható: a Spitzer infravörös űrteleszkóp IRS detektorával a "kék" és "vörös" tartományban a P/2004 V5-A (LINEAR-Hill) üstökösről 2007. március 7-én (UT) készített megfigyeléseken az optocenteren keresztül X és Y irányban felvett fényességprofilokra a PSF (pontforrás, üstökösmag) nem illeszthető.

Ilyenre példa egy az Oort-felhőből érkezett üstökös volt, ami egyébként nem szerepelt az értekezésben tárgyalt üstökösök között. Természetesen kóma nélkül egy ilyen kis méretű üstökösmag mint pontforrás (csillagszerű, aszteroidszerű objektum) fotometriai vizsgálata elvégezhető függetlenül az üstökös távolságába vetített képlelem méretétől. Ennek csak a műszer érzékenysége szab határt.

- Amikor az üstökösmag/kóma kontraszt elegendő a mag/kóma fényének különválasztására (az üstökös távolságára vetített képlemen belül a mag nem túl kicsi), de az üstökösmag túl halvány és nem detektálható a műszerrel, ekkor nyilvánvalóan a mag nem detektálható. A HST-vel fotometriai R-sűrűvel mintegy 28 magnitúdójú objektumok (üstökösmagok) fotometriája végezhető el. Például a C/1999 S4 (LINEAR) Oort-felhőből érkezett üstökös magja 2000-ben több darabra esett szét és a HST-vel sikerült a legnagyobb, néhányszor tízméteres átmérőjű magtöredékeinek méretét meghatározni, amelyek látszó fényessége R-ben 25,5-27,3 magnitúdó között volt mintegy 0,80 CsE-re a Földtől (Weaver, Sekanina, Toth és mások, 2001: Science 293, (5520), 1329-1334. oldal). Termális infravörösben az ISO és Spitzer infravörös űrteleszkópokkal az üstökösmagokra a fotometrálnálási határ mintegy 1-5 millijansky (mJy) fluxus közötti volt. Túl halvány objektumokra túl hosszú expozíciós idő alkalmazása lenne szükséges, ami a követési pontosság csökkenése miatt nem biztosítaná az üstökösmag egy képlemen belül való megtartását, illetve a túl hosszú expozíciós idő az egy keringési időn belüli megfigyelési ablakot kitöltené, ami nem megengedett.

4. Az üstökös magja, illetve egy szétesett üstökös magjának valamely magtöredéke helyett már csak kóma (gáz- és/vagy porfelhő) létezik, akkor az üstökös mag vagy annak töredékdarabja nyilvánvalóan nem vizsgálható és így nincs mit különválasztani a kómától. Ekkor csak a kóma (porkóma, kiterjedt porcsomó) tanulmányozható. Ilyen esetre példa a C/1999 S4 (LINEAR) szétesett üstökös egyes magtöredékei, amelyek már csak mint porcsomók (porkóma maradványok) voltak megfigyelhetők 2000-ben a HST-vel, illetve infravörösben a Spitzer űrtávcsővel megfigyelt P/2004 V5-A (LINEAR-Hill) szétesett üstökös (4. ábra).
5. Olyan eset is előfordulhat, amikor az objektum nagy méretű (kisbolygó vagy üstökös mag) olyan kis távolságra van a megfigyelőtől (űrteleszkóp), hogy ilyenkor az objektum felbontottá válik, azaz a detektor egy képeleménél nagyobb a látszó kiterjedése. Tegyük fel, hogy a közeli objektum látszó mozgása nem túl gyors és az adott űrteleszkóp követni tudja. Az értekezésben alkalmazott módszer ilyenkor közvetlenül nem alkalmazható. Ilyen esetben például kóma jelenléte esetén a kóma megfelelő modellezésével annak fénye az objektum fényéből levonható (optikailag vékony kómát feltételezve) és az objektum (üstökös mag) fotometriai vizsgálata elvégezhető. Így tehát az értekezésben alkalmazott módszernek a kóma modell előállítására vonatkozó része módosításokkal, de alkalmazható lehet. Egyébként pedig elméletileg ha az űrtávcsővel az objektum felbontott akkor általában túl közel van, így a látszó mozgása túl gyors és emiatt nem lehet megfigyelni az eddigi űrteleszkópokkal. A NASA tervezett NGST James Webb űrteleszkópjával pedig még korlátozottabb a túl közeli mozgó objektumok megfigyelése.

**2. Az Oort-felhő üstököseinek és az ekliptikai üstökösök porszemcséinek méreteloszlásának hasonlósága vagy különbözősége.** Természetesen nem kell, hogy az ekliptikai üstökösök és az Oort-felhőből származó Halley-típusú üstökösök porrészecskéinek méreteloszlása azonos legyen, hiszen az üstökösöknek ezen két típusa az ősi Naprendszerben különböző helyeken, kisebb-nagyobb mértékben eltérő fizikai és kémiai viszonyok között keletkezett, azaz a porrészecskék méreteloszlása is különbözhet a kialakulási körülményektől függően.

Az üstökösök porrészecskéinek  $f(a)$  méreteloszlás függvényének alábbi formuláját Hanner (1983: Proc. ICCE Budapest, 1982, Vol. 2, szerk. T.I. Gombosi, 1-22. oldal, (2) képlet) vezette be - valószínűségi sűrűség függvény:

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

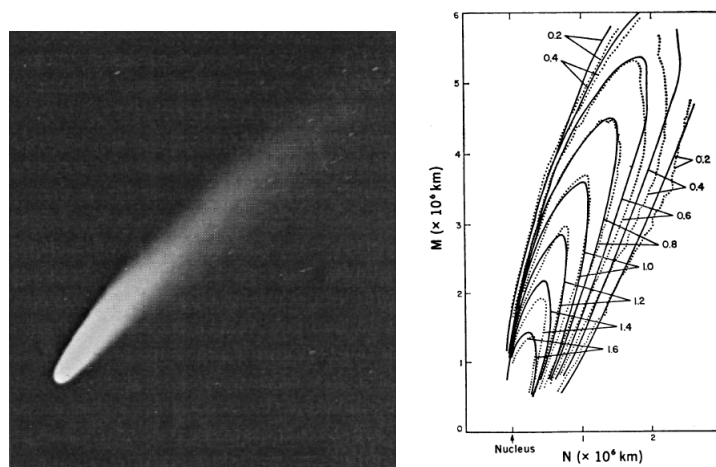
ahol  $a$  a gömbalakúnak feltételezett porszemcse rádiusza,  $a_0$  a legkisebb porszemcse rádiusza,  $M$  és  $N$  az eloszlás paraméterei,  $k$  normálási tényező. A fenti eloszlás paraméterei  $N = 4.2$  és az  $M$  függ az  $r_h$  (CsE) heliocentrikus távolságtól (a Halley-üstökös esetén meghatározva)

$$\log(M) = 1.13 + 0.62 \log(r_h) . \quad (2)$$

Ez a méreteloszlás szerepel például az értekezés a 61. oldalán a (27-28) egyenletekben. Egyébként az üstökös por méreteloszlására az egyszerű hatványfüggvénytől eltérő függvények is léteztek (Divine és Newburn, 1983: Proc. ICCE Budapest, 1982, Vol. 2, szerk. T.I. Gombosi, 81-98. oldal), azonban a Halley-üstökös porának helyszíni űrszondás vizsgálataiból a Hanner (1983) által megadott porszemcse méreteloszlás függvény más üstökösökre is érvényesnek és a különböző számításokban jól alkalmazhatónak bizonyult (Singh, De Almeida, Huebner, 1992: Astron. J. 104, 848). Egyébként az üstökös magból a gáz és por kiáramlásának fizikai modellezésén alapuló porrészecske méreteloszlásra Gombosi (1986: ESA SP-250, Vol. 2, 167) vezetett le differenciális méreteloszlás függvényt.

Az üstökösök porrészecskéinek méreteloszlása a különböző empirikus (megfigyelési, mérési) módszerekkel határozható meg - ezek egyben jelzik a feladat nehézségét is. Ezek a módszerek a következők:

**Csillagászati megfigyelések:** Földi vagy űrteleszkópokkal végzett megfigyelésekkel a porkóma és porcsóva fényességeloszlásának modellezése és összehasonlítása a megfigyelésekkel (optikai vagy infravörös tartományban). A porkóma és porcsóva modellekben a porrészecskék méreteloszlási paraméterei alapvető fontosságúak és a modell illesztésével meghatározhatóak (Sekanina és Miller, 1973: Science 179, 565; 1. még Fulle, 2004: Comets II, Univ. Arizona Press, Tucson, 2004, 565-575. oldal, áttekintő munkáját és annak I. táblázatát) (1. még 5. ábrát). Azonban ez a módszer csak nagyon aktív és fényes üstökösökre alkalmazható megbízhatóan, ezért elsősorban csak a kevés számú fényes, aktív Oort-felhőből származó üstökösökre lehetett eddig alkalmazni. A halvány, kevésbé aktív ekliptikai üstökösökre azonban igen nehézkes a módszer alkalmazása.



5. ábra. Az üstökösök porrészecske méreteloszlás függvényének első meghatározása a C/1969 Y1 (Bennett) üstökös fényességeloszlás modellje és a megfigyelt kép fényességeloszlásának összehasonlításával történt. A megfigyelés (bal oldali panel) 1970. március 18,36 UT-kor történt a Cerro Tolo Amerikaközi Observatórium 61/91 cm-es f/3,5 Curtis-Schmidt teleszkópjával Kodak 103a-F fotografikus lemezre RG1 szűrővel 15 perces expozíciós idővel. A számítógépes modell kép (jobb oldali panel) izofótái (folytonos vonalak) és a megfigyelt kép izofótái (pontosított vonalak) jó illeszkedése a modellben szereplő porszemcse méreteloszlási függvény paramétereit is rögzítik. A számok a felületi fényesség relatív értékeinek logaritmusai (Sekanina és Miller, 1973: Science 179, 565-567 oldal, 1. és 2. ábrák).

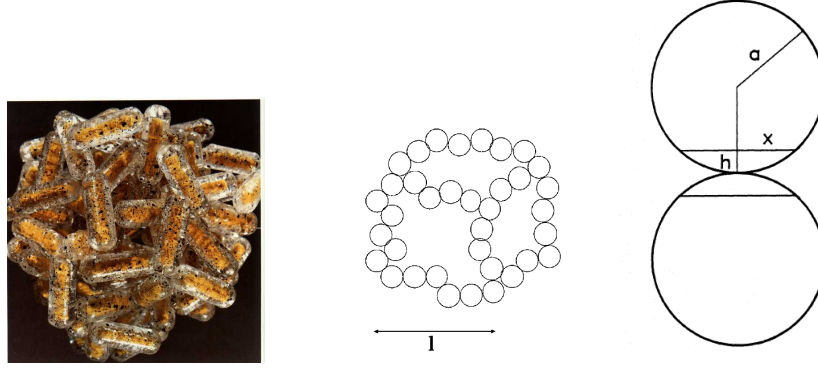
**Helyszíni üstökösszondák mérései és laboratóriumi adatok:** Az üstökösök közvetlen közelében helyszíni (in situ) űrszondák pordetektorai adataiból közvetlen mérésekkel lehet a poreloszlást meghatározni. Az első üstökös porrészecske detektorok Halley-üstököst közelről meglátogató, az üstökös mag közelében a porkómán átreptülő VEGA 1 és 2, valamint Giotto üstökösszondák fedélzeti tudományos műszerei közötti pordetektorok voltak. A későbbi NASA üstökösszondákon nem mindegyikén volt pordetektor. A NASA Stardust űrszondájának két pordetektora a CIDA (Cometary and Interstellar Dust Analyzer) és DFMI (Dust Flux Monitor Instrument) közül a DFMI adataiból lehetett porrészecske méreteloszlásra következtetni. A Stardust porminta-begyűjtő egysége (SSC: Stardust Sample Collection) egy kivételes eszköz, ami visszatért a Földre és lehetővé vált egy ekliptikai üstökösből, a 81P/Wild 2 poranyagának földi laboratóriumi vizsgálata. A DFMI és SSC adatokból, valamint földi megfigyelésekből a 81P üstökös porrészecskéinek méreteloszlása meghatározható volt (Hoertz és mások, 2006: Science 314, 1716. oldal; Kolokolova és Kimura, 2007: BAAS 39, abstr. 54.06, 524. oldal). A Stardust kiterjesztett küldetése során (Stardust-NExT) a 9P/Tempel 1 ekliptikai üstökös magja közelében is végzett méréseket 2011-ben. Ennek az üstökös porrészecskéinek méreteloszlására vonatkozó eredményei e sorok írásakor még nem állnak rendelkezésre. Tehát a Stardust porszemcse méreteloszlásra vonatkozó eredményei (9P és 81P ekliptikai üstökösök) azonban az értekezésem tárgyát képező üstökösök vizsgálatakor még nem álltak rendelkezésre, így csak az addigi Halley-üstökösre vonatkozó porszemcse méreteloszlás függvény volt ismert. A tervek szerint ESA Rosetta űrszondája 2014/15-ben a 67P/Churyumov-Gerasimenko ekliptikai üstökös magja körül keringve (illetve egy leszálló egységet a mag felszínére küldve) fog hosszú időn keresztül helyszíni vizsgálatokat végezni. A Rosetta keringő egységének fedélzeti porrészecske detektorai, a COSIMA (COmetary Secondary Ion Mass Analyser), MIDAS (Micro-Imaging Dust Analysis System), GIADA (Grain Impact Analyser and Dust Accumulator), amelyek méréseiből egy ekliptikai üstökös porrészecskéinek méreteloszlása meghatározható lesz.

Összefoglaló következtetés: a Stardust pordetektorainak és üstökösor mintájának laboratóriumi elemzéséből kapott porrészecske méreteloszlás kissé eltér a Halley-üstökös porszemcse méreteloszlásától. A földi és földközeli pályán lévő teleszkópokkal végzett megfigyelésekből az üstökösor porkibocsátása mértékének meghatározásában szereplő porrészecske méreteloszlási függvény eltérése az ekliptikai üstökösök és a Halley-üstökösé között véleményem szerint nem eredményezhet nagyságrendi eltérést. Mindenesetre a jövő kutatási feladata az ekliptikai üstökösök porrészecske méreteloszlásának meghatározása.

### 3. A Sirono-Greenberg (2000) porszemcse modellben miért nagyobbak a belső összetartó erők, mint a Greenberg és mások (1995) modelljében?

Az üstökösor aggregátum modelljét Greenberg és mások (1995), valamint Sirono és Greenberg (2000) részletes számításai írják le, illetve korábban Greenberg több laboratóriumi kísérletben elő is állított ilyen por-aggregátum modelleket (6. ábra). Az üreges szerkezetű,  $l$  hosszúságú por-aggregátum blokkok húzófeszültsége (szakítószilárdsága) Sirono és Greenberg (2000) alapján:

$$T_{\text{void}} = \left[ \frac{E_e \gamma_e}{l} \right]^{1/2} \quad (3)$$



6. ábra. Az üstököspor laboratóriumban előállított aggregátum modellje (Greenberg és mások, 1995: *Astron. Astrophys.* 295, L35) (bal oldali panel). A por-aggregátum modell egy blokkja (részlete), amelynek karakterisztikus hossza  $l$  (Sirono és Greenberg, 2000: *Icarus* 145, 238. oldal 1. ábra). A por-aggregátum modell két gömb alakú porszemcséjének érintkezési felülete egy  $2h$  vastagságú réteg és  $x = a_c$  sugarú körlemez (Greenberg és mások, 1995: *Astron. Astrophys.* 295, L35, 1. ábra).

ahol  $E_e$  a por-aggregátum lánc effektív Young-modulusa,  $\gamma_e = \gamma \pi a_c^2 / l^2$  az aggregátum effektív felületi energiája, amelyben  $\gamma$  a porszemcsék találkozási felületénél a molekulák közötti kölcsönhatás energia (két molekula egymástól való eltávolításához, szétválasztásához szükséges energia),  $a_c$  az aggregátum lánc két gömb alakú porszemcséjének érintkezési felületének radiusza (körlemez) és  $l$  az aggregátum lánc egy blokkjának karakterisztikus hossza (6. ábra).

A Greenberg és mások (1995) által kiszámított szakítószilárdság (a térfogategységre eső kohéziós energia):

$$T_{\text{green}} = \frac{3z\psi\gamma a_c^2}{4R^3} \quad (4)$$

ahol  $z$  az érintkezési felületen érintkező molekulák száma,  $\psi$  a porozitás,  $R$  az aggregátum láncot alkotó gömb alakú porszemcsék radiusza.

A Sirono-Greenberg (2000) modellben megadott üreges por-aggregátum szakítószilárdsága (3) adott porozitásnál csaknem egy nagyságrenddel azért nagyobb, mint a korábban Greenberg és mások (1995) által készített por-aggregátum modell alapján számított (4), mert az üreges modellben a molekulák egymástól való eltávolításához szükséges energia  $\gamma_e$  a számítások alapján nagyobb, ezen kívül a por-aggregátum lánc  $E_e$  effektív Young-modulusa is nagyobb (Sirono és Greenberg, 2000: *Icarus* 145, 230-238, 4. és 6. ábrák). Ezek a kulcs szerepet játszó fizikai paraméterek a por-aggregátum lánc rugalmassági paramétereitől (megnyúlás, nyírás, torzió), valamint az aggregátum láncba rendeződött üreges szerkezetétől is erősen függenek. A Greenberg és mások (1995) gyengébb összetartó erőket mutató por-modellje és a Sirono-Greenberg (2000) erősebb por-modellje közötti különbség rávilágít arra, hogy ma még nem ismerjük eléggé az üstököspor szerkezetét és ezen keresztül a Naprendszer ősködének poranyagát, az ősköd fizikai viszonyait. Az üstökösma poranyaga szerkezetének és elasztomechanikai paramétereinek megismerése ma még csak a kezdetén tart, tehát ezen a kutatási területen is van még bőven tennivaló a jövőben.

Budapest, 2013. május 27.

Tóth Imre