

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI ÉS INFORMATIKAI KAR
KÍSÉRLETI FIZIKAI TANSZÉK

Csillagász szak

DIPLOMAMUNKA

Kozmikus kőrakás szerkezetű üstökös? A 73P/Schwassmann-Wachmann 3 üstökös darabolódásának története

Készítette: **Pálfi Dénes**, V. éves csillagász szakos hallgató
Témavezető: **Dr. Szabó M. Gyula**, tudományos segédmunkatárs
SZTE TTIK, Kísérleti Fizikai Tanszék

Szeged, 2009

Csillagászati értelemben vett szűkebb környezetünk - a Naprendszer - kutatásában fontos szerep jut a Nap, bolygók és holdak mellett a kisebb égitesteknek is. Közéjük tartoznak az üstökösök, melyek mind a mai napig intenzív kutatási területnek számítanak. Jól bizonyítja ezt a tényt, hogy napjaink legnagyobb teleszkópjaira is kapnak a kutatók távcsőidőt üstökösészlelési céllal és számos űrszondát indítottak az utóbbi években üstökösökhöz.

A 73P/Schwassmann-Wachmann 3 2005/2006-ban ismét napközeli állapotban volt megfigyelhető. A piszkéstartói 60 cm-es Schmidt távcsővel több hónapot felölelő fotometriai mérésorozatot készült a C, B, G magról és több mellékkomponensről. Ezen megközelítés alkalmával az üstökös ismételt, a szokásostól eltérő aktivitást mutatott, majd 2006 májusában számos, körülbelül 30 darab fragmentum leszakadása volt megfigyelhető a Larson-Sekanina morfológiai ábrákon. A képeken apertúra fotometriát is végeztem.

Munkám második részében lehetőségem nyílt egy olasz amatőr csillagász szakcsoport által készült mérésorozatot vizsgálatával foglalkozni a CArA-program keretein belül. Céлом az adatok részletes elemzése és az aktivitás ill. dezintegrálódás megerősítése volt. Vizsgáltam az üstökös fénygörbéjének és portermelődési rátájának változását, ami további bizonyítékot szolgáltatott az üstökös kaszkád fragmentációjára.

Kulcsszavak: üstökösök tulajdonságai , széthulló üstökösök, Larson-Sekanina szűrő, kómaprofil, $Af\rho$

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	4
1.1. Üstökösök	4
1.1.1. Az üstökösökről kialakult kép 1950-2009 között	4
1.1.2. Az üstökösök az űrszondás megközelítések fényében	4
1.1.3. Az üstökösök felépítése	8
1.1.4. Üstökösök eredet modellje	11
1.2. Széteső üstökösök	13
1.2.1. Vizsgálatok tudományos fontossága	14
1.2.2. Széthullási mehanizmusok	15
1.2.3. 73P/Schwassmann-Wachmann darabolódásának története	17
1.2.4. Morfológiai alakzat: <i>kóma szárnyak</i>	20
1.2.5. Széthulló üstökösök típusai	21
2. Észlelések, módszerek	22
2.1. CArA program	22
2.1.1. CArA adattenger	23
2.1.2. Kómaprofil meghatározása	23
2.1.3. Az üstökös fejlődése láthatósága alatt	25
2.2. Pizskéstetői észlelések	27
2.2.1. Adatfeldolgozás	28
2.2.2. Larson-Sekanina szűrő	29
2.2.3. Apertúra fotometria	32
2.2.4. Halvány magok fotometriája	36
2.2.5. Pizskéstetői Larson-Sekanina ábrák és értelmezésük	37
3. További munkaterv	46
4. Összefoglalás	47
Köszönetnyilvánítás	49
Nyilatkozat	50
Hivatkozások	51

Hány ezer év kellett hozzá, míg a hatodik teremtés meleg iszapja egy sugalmas csillagképlet napján, tán egy üstökössel találkozás mennyei csókjának órájában megterhesülve az üstökös teremtő erejű monádjaiktól, megszülte az első embert?

Jókai Mór: Fekete gyémántok

1. Bevezetés

1.1. Üstökösök

1.1.1. Az üstökösökről kialakult kép 1950-2009 között

Whipple 'piszkos hógolyó' modelljét az 1950-es évek elején alkotta meg. Modelljében szilárd magot feltételezett, amely nagyrészt vízjégből, porból és apró kőtömbökből áll. A modell megmagyarázta a mérések során tapasztalt pályaelem-változásokat. A vízjég szublimációja okozhat olyan rakéta effektust, amely csökkenti vagy növeli az üstökös keringési periódusát. A piszkos hógolyó mellett szólt a nagy gáz termelődési ráta is, amely nem tárolódhat porszemcsékbe zárva (Biermann & Trefftz 1964, Huebner 1965, Keller 1976). A 'homokzsák' elméletet (Lyttleton 1953) teljesen kiszorította a tudományos közéletből a szilárd, vízjégben gazdag üstökösmodellje.

Amíg az üstökös kémiai összetételéről viszonylag hamar születtek már eredmények - köszönhetően a spektroszkópiának -, addig a többi fizikai paraméterről, mint például a méret, alak, tömeg csak nagyon kevés információ állt rendelkezésre. Ennek egyik oka, hogy a mag fényességét nagyon nehéz pontosan meghatározni a körülötte lévő porfelhő miatt. Cruikshank és mtsai. (1985) szerint - vizsgálva a külső Naprendszer kisbolygóit - az üstökösök albedója 0.04 körül van, amely érték az eddig ismert legalacsonyabb a Naprendszerben. Az érték ellentmondott a Whipple-féle 'piszkos hógolyó' modellel jósoltak, de az első 1986-os űrszondás megfigyelések (Giotto, Vega) tökéletesen igazolták, hogy helyes a jósolt albedó (Sagdeev 1986, Keller 1986). Nyilvánvalóvá vált, hogy az üstökösökről kialakított mai képünket jelentősen átalakítják az űrszondás megfigyelések.

1.1.2. Az üstökösök az űrszondás megközelítések fényében

Vega program A Vega program 2 űrszondából állt, amelyek a Vénus 1986-os látogatása után egy hintamanőver segítségével a Halley üstökös felé vették az irányt. Elhaladtak az üstökös mellett és a felvételek alapján bebizonyosodott, hogy az üstökösök felszíne sokkal csendesebb világ mint, ahogy ezt korábban gondolták a kutatók.

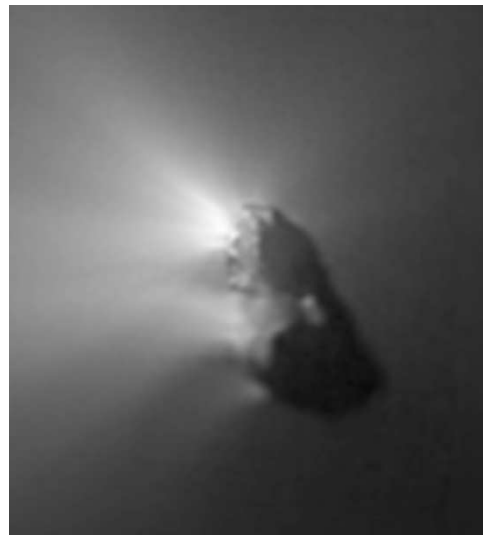
Giotto űrszonda A Vega programmal egyazon évben látogatta meg a Halley üstökösöt a Giotto űrszonda. Pár nappal a Vega szondák után érkezett az üstököshöz és 600 kilométeres magasságból készített felvételek azt mutatták, hogy a mag felszíne rendkívül sötét és aktív területekben szegény.

A Halley üstökös vizsgálatának főbb eredményei (Divine és mtsai. 1986, Rubin és mtsai. 2009):

- a mag alakja szabálytalan földimogyoró alakú test, hosszabbik tengelye 15, a rövidebbik pedig 7–10 km között van.
- az aktív területek aránya alacsony, körülbelül 10 százalék.
- a kilövelt anyag összetétele alapján a mag vízből (<10%), szénmonoxidból (<5%), porból és szerves molekula áll.
- a felszíne sötét, az albedója alacsony (0,05). Felszíne valószínűleg porréteggel borított.
- korát 4,5 milliárd évesre becsülik, amely a Naprendszer keletkezésével jó egyezést mutat.

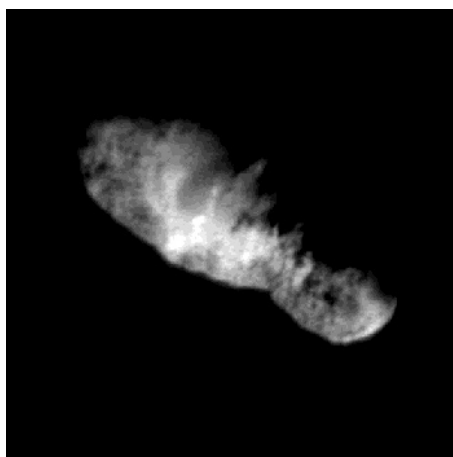


1. ábra. 1P/Halley az 1910-es visszatérésekor (Meteor 2003/1. sz)



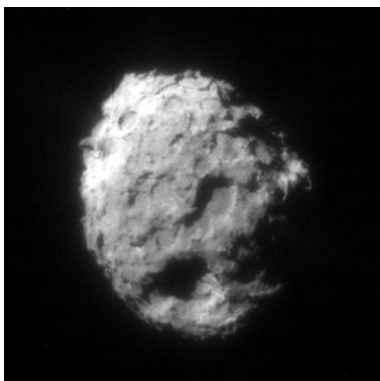
2. ábra. A földimogyoró alakú Halley üstökös (Giotto Project, ESA)

Deep Space-1 Az űreszköz a NASA New Millennium-programjának az első küldetése volt. Több kisebb égitestet is megközelített, köztük a Borrelly üstököst (3. ábra). A küldetés elsődleges célja mégsem az égitestek tanulmányozása volt, hanem a szondán lévő számos technológiai újítás tesztelése volt, a későbbi komplexebb missziókhoz.

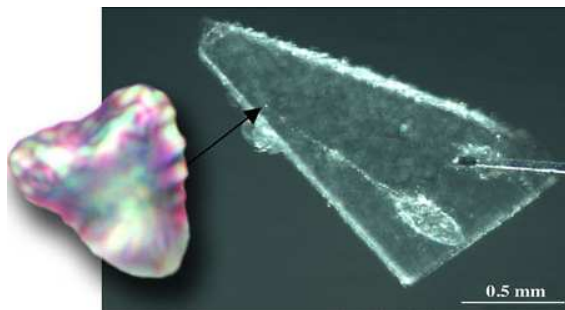


3. ábra. A kuglibábú alakú 19P/Borrelly üstökös a Deep Space-1 kamerájával (JPL, NASA)

Stardust szonda Egy teljesen újfajta szonda volt. Célja anyaggyűjtés volt a Wild-2 üstökös kómájából. Egy speciális, szuperkönnyű (a levegőnél is kisebb sűrűségű), szilárd anyag, az aerogél segítségével a kómából pormintát gyűjtöttek, amelyet visszajuttattak a Földre egy földközeli elhaladás során. A minta vizsgálata a mai napig folyik, és bár vannak már eredmények, de a tudományos közösséget megosztja a minta értelmezése.

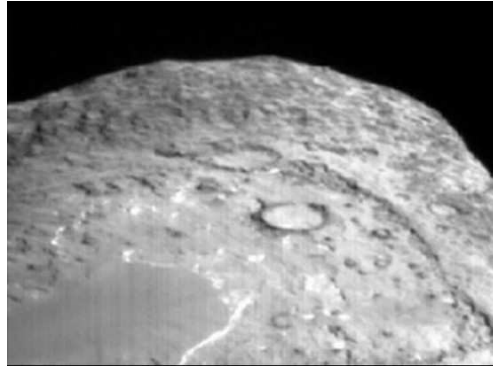


4. ábra. A Wild-2 meglátogatása során készített felvétellel (JPL, NASA)



5. ábra. Az aerogelbe csapódott μm -es üstököspor? (JPL, NASA)

Deep Impact űrszonda A szonda célja a Tempel-1 nevű üstökös vizsgálata volt. A szondáról egy lövedék csapódott az üstökösnek, hogy a kirepülő anyagot tanulmányozhassa (6.ábra). A vizsgálat során kiderült, hogy vastag, szuperfinom, μm -es méretnél is kisebb por borítja az üstökös felszínét. Energetikai számítások szerint a finom porszemcsék nem a becsapódás során keletkeztek, hanem már korábban az üstökös történetében.



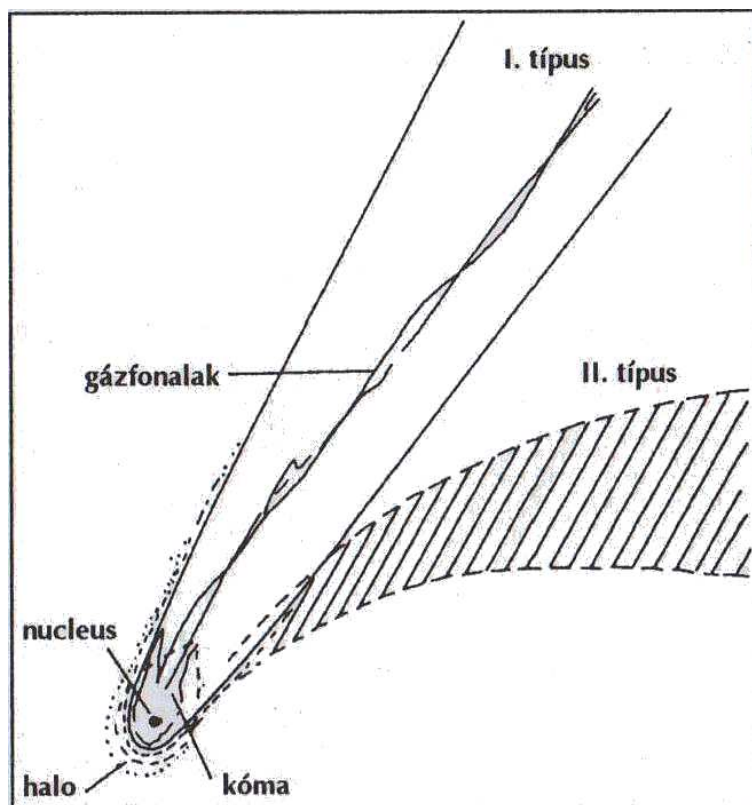
6. ábra. A 9P/Tempel-1 felszíne közvetlenül a becsapódás előtt (A' Hearn 2005)

Rosetta szonda A Rosetta űrszonda még nem hajtotta végre a kitűzött feladatot. A misszió fő feladata a 67P/Churyumov-Gerasimenko nevű üstökös minden eddiginél részletesebb vizsgálata. A szonda két fő részből, a Rosetta műszeregyüttesből és egy leszállóegységből, a Philae nevű szondából áll. A program lépcsőzetes lesz: a Rosetta először feltérképezi a kométát, majd a leszállóegység a lehető legigéretesebb területre leszáll és megkezdí működését. Ez lesz az első ember alkotta eszköz, mely leszáll egy üstökös felszínén. A Rosetta 2014-ben találkozik a 67P/Churyumov-Gerasimenkoval.

Whipple a 20. század közepén még egy közel gömbszimmetrikus, vízjégben nagyon gazdag magot feltételezett. Később kiderült, hogy csak töredék mennyiségű vizet tartalmaz a mag és, hogy alakja inkább egy kuglibábúra hasonlít, mintsem hógolyóra. Felszíne sötét, porréteggel borított és a luminozítás nagy része a kóma által reflektált napfény csupán. Az elmúlt majd 60 év eredményeiből jól látszik miként, formálják az üstökösökről alkotott nézetünket az újabb és újabb felfedezések.

Természetesen a kiemelkedő eredményeket hozó űrmissziók mellett a földi távcsöves megfigyelés is rohamléptekkel fejlődik. Az adaptív optikával felszerelt óriásteleszkópok is számos új, izgalmas információt szolgáltatnak a tudományos közösségnek. Ilyen például az üstökösök morfológiai elemzésének lehetősége, új üstökös családok felfedezése.

1.1.3. Az üstökösök felépítése



7. ábra. Az üstökös vázlatos felépítése: mag, kóma, csóva (I. ill. II. típus)(Sárneczky 2006)

Mag

Az üstökösök magjának (közvetlen) vizsgálata több szempontból is rendkívül nehéz feladat, mivel az üstökös életének nagy részében láthatatlan. Vagy túl messze jár a pályáján és így túlságosan halvány, vagy túl közel, de akkor a sűrű belső kóma akadályozza a megfigyeléseket.

Az átmérő pontos meghatározásához űrtávcsövekre és az üstökös űrszondás megközelítésére van szükség. Az átmérő megbecslésére több további módszer is létezik, de ezeket hibák terhelik. Egyik ilyen módszer a fotometriából való méretbecslés, de ekkor a mérés hibája mellett számolni kell a kóma fényességének pontatlan levonásával is (Roemer 1966). A fényesség és a geometriai méret között párhuzamot lehet felállítani. Minél fényesebb a mag, annál nagyobb az átmérője. Ugyanakkor ha az aktív területek aránya az átlagostól nagyon eltér (pl. 20%), könnyen alul vagy felül lehet becsülni a mag méretét. Másik indirekt lehetőség a radar visszhangokkal való vizsgálat (Kamoun és mtsai 1982). Ekkor a magról visszaérkező rádióhullámokból következtethetünk a méretre és alakra. Ennél a módszernél a legnagyobb hiba a magot körülvevő sűrűbb porfelhő hozzámérése lehet. A magot övező nagyobb porszemcsék miatt ugyanis

nem lesz határozott körvonala a nukleusznak (jó példa az Encke üstökös átmérője: $1.5 \text{ km}^{(+2.3, -1.0)}$). A rádió módszerek - pontatlanságuk ellenére - jó támpontot adnak a magok méretére. A vizsgálatok szerint az átlagos átmérő 1–10 km között változik, de akadnak ezeknél jóval nagyobb üstökös magok is, mint például a Hale-Bopp 30–60 km-es magja (óriásmagok létezését a Hale-Bopp aktivitása nagy naptávolságba is alátámasztja (Szabó és mtsai. 2008)). Az alakjuk szabálytalan, változó, sokszor elnyúlt (a hossz tengelyek aránya általában 2:1).

Tömegbecslést indirekt módon az égitestre ható gravitációs és nem gravitációs perturbációk hatása segítségével lehet tenni. Az átlagos magtömeg 1 km-es mag esetén 10^{14} - 10^{15} kg között van. A sűrűség értéke változó, körülbelül 0.5 és 1.2 gcm^{-3} között van. Ilyen alacsony sűrűség mellett valószínűleg nagyon porózus és vatta szerkezetű a mag belseje. A mag szilárd, ugyanakkor laza szerkezetű és rendkívül törékeny. A mai elméletek szerint kötőrmelék-rakás vagy hagymahéj szerkezetű lehet a nukleusz.

A forgási periódus meghatározása a fénygörbék tanulmányozása segítségével lehetséges. Ilyen vizsgálatnál a legcélrevezetőbb a mag fényességének megfigyelése, periódus keresése. Az így kapott rotációs periódusok óráktól napokig terjednek (A Halley-üstökös rotációs periódusa 53 óra, Smith & mtsai 1987). *További lehetőségek:* jetek nyomkövetése (Hale-Bopp 24 óra, Tang & mtsai 1999), űrszondás megfigyelés. A viszonylag lassú forgást valószínűleg az üstökös anyagtermelésével kapcsolatos. A belső kómába jutó poranyag kellően sűrű és nagy viszkozitású ahhoz, hogy lassíthassa a mag forgási periódusát.

Kóma

A porból és gázokból álló nagyjából gömbszimmetrikus atmoszféra, a kóma akkor jelenik meg az üstökös magja körül, amikor az a Nap közelébe ér. Általában a Naptól 3–4 CS.E. távolságra már kialakul a mag körül a kóma és átmérője a perihéliumon való áthaladáskor éri el a maximumot. A belső kóma mag felszínéről elszökő molekulákból (szülőelemekből), az ezekből létrejövő leányelemekből (atomok, ionok, gyökök, molekulák) és a vízből kiszabadult porszemekből áll. Az üstökös ezen része a legfényesebb (a luminozitás kis része származik csak a magból, a döntő többségét a kómában levő porról és kristályokról visszaverődő fény adja). A kóma kémiai összetételét a színképe segítségével lehet vizsgálni. Sokáig a spektroszkópiai vizsgálatok csupán a látható színképtartományban voltak lehetségesek, így csak olyan elemeket lehetett megfigyelni, amelyeknek van optikai emissziós vonala vagy sávja. Ilyen atomok, molekulák és ionok például: CN, CH, C₂, C₃, NH, NH₂, OH, O, OH⁺, CO⁺ és további nyílt láncú és aromás szénhidrogének. Ezek stabil állapotban nem fordulnak elő, így lennie kellett más atomoknak és molekuláknak, amikből születnek. A létrejövő elemeket ezért leányelemeknek nevezik, melyek a Nap ultrabolya sugárzásának hatására keletkeznek

fotodisszociációval és ionizálódással a szülőelemekből vagy akár egy korábbi leányelem-ből. Ezen feltételezett szülők: H_2O , NH_3 , CH_4 , CO , CO_2 , HCN . Létezésüket később rádióban és infrában végzett spektroszkópiai mérésekkel sikerült bebizonyítani. Jelenlegi ismeretek szerint ezen molekulák közül legnagyobb arányban vízjég fordul elő (80%), szénmonoxid (10%) - amely nagy naptávolságban (10 CS.E.) a kóma kialakulásának fő okozója -, széndioxid CO_2 , metanol CH_3OH , metán CH_4 , ammónia NH_3 , hidrogénianid HCN és hidrogénszulfid H_2S . Ezenkívül számos más illékony és szerves molekula nyomát is megtalálták.

Az elszökő gázok hatására nagy mennyiségű por is a mag légkörébe kerül. Ezek döntő része karbonátos, szilikátos, bazaltos részecske, konglomerátum $1\text{--}100\mu\text{m}$ tartományban. Fény hatására a gyenge felületi erők felhasadnak, további por fragmentáció figyelhető meg. A gáz hőmérséklete általában $10\text{--}100\text{K}$.

Csóva

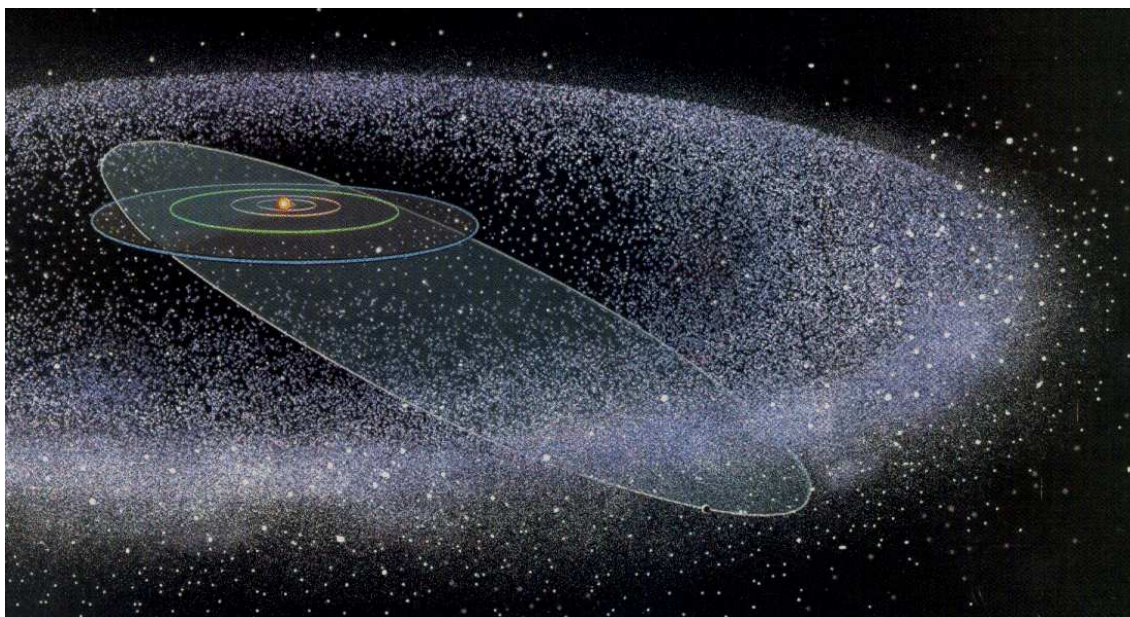
Az üstökös csóvája a leglátványosabb része az égitestnek. Kémiai összetétele a kómához hasonló, főleg porból és ionizált gázokból áll. Eszerint alapvetően két részre oszthatjuk a csóvát: egy por- (II. típusú) és egy ioncsóvára (I. típusú).

A porcsóva, a kómából - a Nap sugárnyomásának és a mag tömegéből adódó alacsony gravitációs vonzóerőnek köszönhetően - kiszabadult apró porszemekből áll. Színe vöröses. Luminozitása reflektált fény, amely a Naptól érkezik. Alakja elnyúlt és az üstökös pályáját követi. Mérete átlagosan $10^5\text{--}10^7$ km.

Az ioncsóva keskeny, egyenes, szemben a porcsóva széles és elnyúlt alakjával. Iránya mindig antiszoláris. A Naptól körülbelül 2 CS.E. távolságra jelenik meg és a Naptól érkező ultraibolya sugárzás és napszél hozza létre. Molekulaionok alkotják (H_2O^+ , CO^+ , CO_2^+ , OH^+) és a csóvabeli sebességük eléri az $100\text{--}1000$ km/s-ot, létrehozva akár 10^7 km hosszú csóvát.

1.1.4. Űstökösök eredet modellje

A mai modern elméletek szerint az űstökösök a Naprendszer keletkezésével egyidejűleg a proto-Napot körülvevő porkorongban születtek viszonylag gyorsan 10^5 - 10^6 év alatt (Safronov 1969, Goldreich & Ward 1973). A bolygócsírák kezdeti méreteloszlása - a gravitációs instabilitásokat figyelembe véve - néhány kilométernek adódik. A korai időszakban ha kialakult egy nagyobb bolygócsíra az akkréciós korongban, az nagyon gyors fejlődésnek indult és a többi protoplanétát a Naprendszer külső régióiba söpörte. A numerikus modellezések szerint ezen bolygócsírák száma akár a milliárdos számot is elérhette. A nagy víz- és illékony anyag tartalmú magok kialakulásának feltétele volt még, hogy a Jupiter pályáján kívül legyenek, ahol a hőmérséklet már elegendően alacsony a szublimáció elkerüléséhez. A jeges mag keletkezésének hatásfoka nagyban függ még a porkorong fizikai tulajdonságaitól is, például az optikai mélységtől, ami a lokális hőmérsékletet befolyásolja (Greenberg 1977, 1998). A Naprendszer jég rezervátumába tartozó égitestek jelenlegi helye a Edgeworth-Kuiper öv és az Oort-felhő. Oort (1950) felvetette, hogy lennie kell egy, a Naprendszert gömbszerűen körülölelő térrésznek (a Kuiper-övön kívül), ahol az űstökösök fagyott, inaktív állapotban, alacsony energiájú pályákon keringenek. Számuk több milliárdra becsülhető. Jelenleg ez az elfogadott elmélet az űstökösök lelőhelyét illetően (8. ábra).



8. ábra. A belső Naprendszer és a körülötte elhelyezhető Kuiper-öv (www.solarviews.com)

Az elmélet szerint, amíg az Oort-felhőben vannak, fagyott állapotban őrzik a korai Naprendszer összetételét. A Naprendszer belső régióiba egymással való ütközéssel és a közelben elhaladó más csillagok gravitációs perturbáló hatására lépnek be. Az

üstökösök tanulmányozásával pontosíthatjuk a Naprendszerünk kialakuláselméletét.

Fontos még megemlíteni a kis üstökösök hiányának problémáját is. A üstökösök méreteloszlás függvényétől a kialakulásmodell alapján azt várnánk, hogy a kis átmérőjű üstökösök felé haladva számuk meredeken emelkedik. Ezzel szemben csökkenő tendenciát mutat a függvény. A probléma feloldására két lehetőség mutatkozik.

- a kis magok kevés poranyagot és gázt tartalmaznak, így gyorsabban kimerülnek. A mag elveszti kómáját és kisbolygó jellegű lesz.
- az evolúció utolsó lépcsőfokán darabokra hullanak

Az üstökösök tartalmaznak kristályos szilikátot is, ami 1200 K feletti hőmérsékleten jön csak létre. Ez a protoplanetáris korong belső dinamikájára utalhat. Az akkréciós korongban a hőmérséklet gradiens miatt az anyag áramlani kezd, így a magas hőmérsékleten létrejött szilikátok a külső régiókat is feldúsíthatják (pl. egy T Tauri típusú változó körül) amint az esetleg a korai Naprendszerben is megvalósulhatott (Ábrahám Péter, személyes közlés).

1.2. Széteső üstökösök

Az üstökösök evolúciójának egyik lehetséges utolsó lépcsőfoka azok dezintegrációja. Amíg az Oort-felhőben nagy valószínűséggel érintetlen állapotban lehet őket megtalálni, addig - különféle kölcsönhatásoknak köszönhetően - a belső Naprendszerben fejlődésük felgyorsul. Az anyagvesztés következtében szerkezetük meggyengül és végül széthullik. Az első ilyen jelenséget már a 19. században dokumentálták, mégis mind a mai napig kevés széthullást sikerült vizsgálni és még kevesebb esetben sikerült a szétesés pontos okát meghatározni. Az első ilyen különleges üstökös az 1846-os visszatérése alkalmával széthulló 3D/Biela nevű üstökös volt (9. ábra).



9. ábra. Egy korabeli rajz a 3D/Biela üstökőspárról (Kronk 2003)

Az üstökös két jól észlelhető darabra szakadt szét, amiből 1852-es visszatéréskor már csak az egyik volt megfigyelhető, később pedig a másik is eltűnt, valószínűleg megsemmisült (Vsekhsvyatskii, 1964). Azóta több mint 40 üstökös hullott szét, több, mint 400 fragmentumot létrehozva. A részletes lista megtalálható a www.cometography.com weboldalon. A megfigyelések alapján a széthasadó üstökösöknek a következő tulajdonságaik vannak:

- mindig többszörös üstökösként jelennek meg, több fragmentum, amelyek kezdetben nagyon hasonló pályán mozognak
- az esemény bármilyen naptávolságnál bekövetkezhet, de a legvalószínűbb a perihélium elérése előtt

- a leszakadó komponensek élettartama rövid (néhány órától néhány napig terjedően)
- a fragmentumok jól definiálható saját kómával és csóvával rendelkeznek kezdetben, amelyek átfednek egymáson.

Mindezen tulajdonságok mellett akkor állíthatjuk egy üstökösről, hogy széthullás következett be, ha legalább egy másodlagos komponenset sikerül azonosítani az eredeti főkomponens mellett.

1.2.1. Vizsgálatok tudományos fontossága

Az üstökösök halála, a szépségük mellett, nagyon fontos tudományos jelentőséggel is bír. A jelenség megértésével számos más fontos kérdésre is választ kaphatunk:

- Milyen tényezők okozzák a darabolódást? Milyen mechanizmusok és mekkora súllyal?
- Milyen a belső szerkezete az üstökösnek? Mennyire erős ez a szerkezet? Apró kövekből áll össze a mag? Lehettek-e a korai Naprendszer építőkövei?
- Milyen a nukleusz kérge alatt mélyen elrejtett üstökös-anyag kémiai összetétele? Tükrözi-e a Naprendszer keletkezésekor létrejött kémiai összetételt?
- Minden üstökös élete a mag széthullásával ér véget?
- Mennyire homogének az üstökösök?
- A dezintegráció teljesen véletlenszerű, vagy van módszer azok előrejelzésére?

1.2.2. Széthullási mechanizmusok

Mérések útján az üstökösről nagyon kevés információhoz juthatunk. Albedója, geometriai alakja, rotációs periódusa és annak iránya, az anyag szakítószilárdsága stb. fizikai paraméterek közvetlenül nem mérhetőek, csupán modellek útján következtethetünk a helyes értékre. A mért adatok összevetése a modelltől kapottal segíthet egy-egy széthullás kiváltó okát megsejteni. A feladat nehézségét mi sem mutatja jobban, hogy csupán egyetlen üstökös esetében sikerült a kiváltó okot kielégítően meghatározni (D/1993 F1 Shoemaker-Levy 9: ár-apály erők; Asphaug & Benz 1996). A főbb modellek: *Árapály -*, *rotációs -*, *besugárzási -*, *belső nyomás okozta -*, *becsapódási fragmentáció* illetve ezek kombinációi.

Árapály erők okozta széthullás

A fragmentációs mechanizmusok közül ez a legjobban modellezhető. Árapály erők akkor lépnek fel az magban, ha egy sokkal nagyobb tömegű égitest (Nap, óriásbolygó) mellett halad el. Differenciált gravitációs vonzóerő ébred, amely a testet összetartó erőket (gravitációs, szilárdsági erők pl. húzószilárdság) meghaladva feldarabolja az égitestet. Whipple (1963) adta meg először a feltételét egy szférikus test árapály erők okozta széthullásának:

$$\sigma < \frac{GM_0\rho R^2}{\Delta^3}, \quad (1)$$

ahol a σ a test húzószilárdsága, G a gravitációs konstans, M_0 a nagyobbik test tömege, ρ a mag sűrűsége, R a test sugara és Δ a két test közti távolság. A modell szerint a darabolódás a test egészére hat, a keletkezett darabok a mag középpontjában nagyobbak, míg kifelé haladva aprózódnak. Természetesen ez függ a mag belső szerkezetétől is. Előfordulhat, hogy az árapály erők nem okoznak közvetlen fragmentációt, de gyengítve a mag szerkezetét, szerepet játszanak egy későbbi – más folyamatok okozta – feldarabolódásban.

Rotációs modell

A folyamat során, a magban a centrifugális erő tart egyensúlyt a magot alkotó tömegelemek között ható gravitációs vonzóerővel. Sekanina (1982) adta meg egy forgó szférikus test szétesésének feltételét:

$$\sigma < \frac{2\pi^2 \rho R^2}{P^2} = 1/2 \rho V_{rot}^2, \quad (2)$$

ahol a σ a testet összetartó erők összege, ρ a mag sűrűsége, R a gömb sugara, P a forgási periódus, V_{rot} pedig a forgási sebesség az egyenlítő mentén. A forgási sebesség megnövekedését okozhatja egy aszimmetrikus gázkiáramlás is a mag felszínén (Samarasinha, 2004). Rotációs fragmentáció az üstökös pályájának bármelyik pontján bekövetkezhet, de a valószínűsége az aktivitás növekedésével jelentősen megnő. A folyamat során a felszínről válnak el a lazán kötött darabok, így egy üstökös teljes pusztulásában ritkán játszhat vezető szerepet.

Fűtés és belső nyomás modell

Egy üstökös darabokra hullása bekövetkezhet a mag fűtése miatt is, ha a magot összetartó szilárdsági erők már nem elég nagyok. A hóhullámok behatolnak a mag belsejébe és a szerkezetét belülről változtatják meg. Tauber & Kührt (1987) vizsgált homogén és inhomogén (vízjég mellett CO₂ és szilikát) magmodelleket is. Mindkét esetben azt találták, hogy a folyamat a felszínen indul el és apró darabokat szakít le a nukleuszról. Később Shestakova és Tambostseva (1997) szintén ezt az okot vizsgálta. Úgy gondolják, hogy a szétesés a mag átmérőjétől és naptávolságától függ. Kisebb magok esetén (pár 100 méter) az égítést teljes pusztulását okozhatja a fűtés, míg nagyobb magok esetén inkább csak a felszínen jelentős a fűtés hatása. A termális stressz a Naphoz közel jelentősebb inkább (<5 CS.E.).

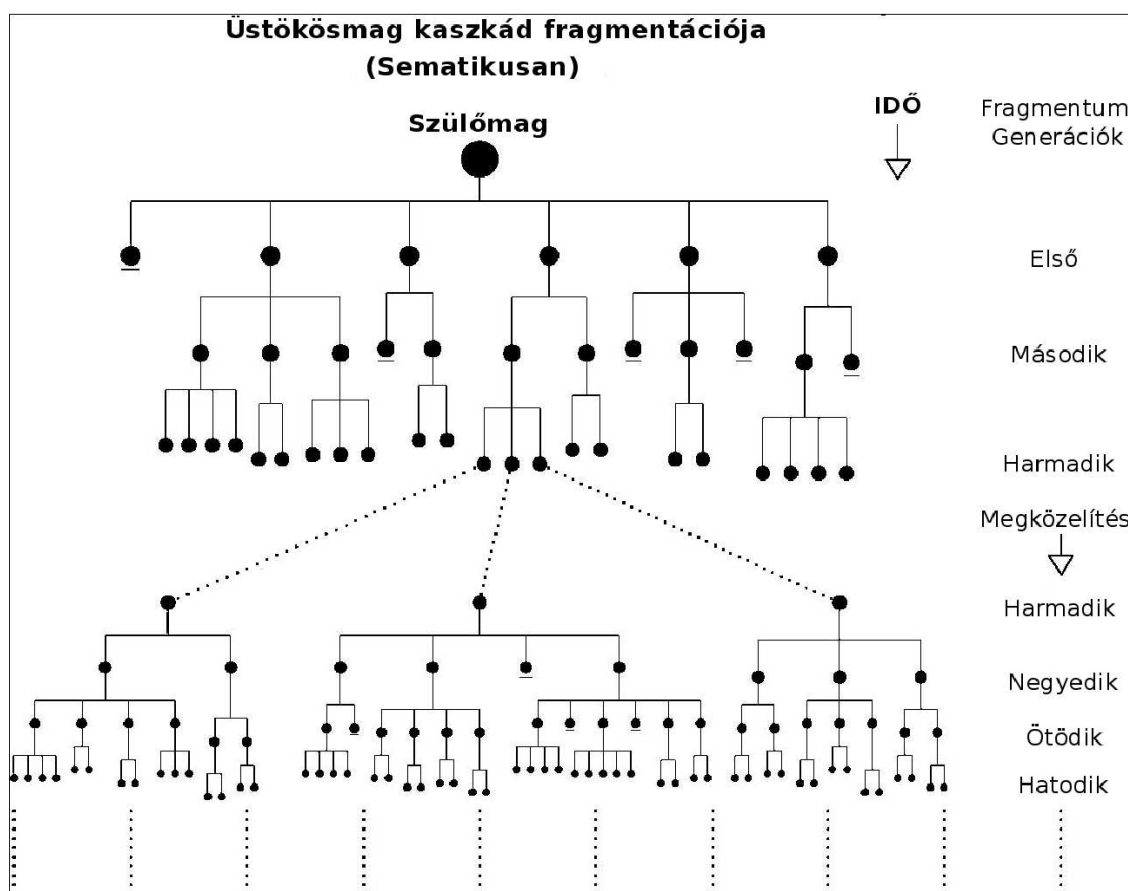
Ha feltételezzük, hogy az üstökös belsejében vannak gázzal töltött zárványok, akkor a termális stressznek kitett mag még nagyobb valószínűséggel fog szétesni.

Becsapódási modell

Az üstökös pusztulásához vezethet egy másik testtel való ütközés is. Beech és Gauer (2002) szerint - figyelembe véve, hogy a mag laza szerkezetű - ehhez már elég egy néhányszor 100 méter átmérőjű objektum is. Tóth (2001) szerint a C/1999 S4 (LINEAR) üstökös pusztulását is egy ilyen kozmikus ütközés okozta.

1.2.3. 73P/Schwassmann-Wachmann darabolódásának története

A 73P/Schwassmann-Wachmann a Jupiter családba¹ tartozó rövid periódusú üstökös. A keringési periódusa 5.4 év és a perihéliumtávolsága 0.94 CS.E. Eddig hat visszatérést sikerült észlelni. A korábbi észlelések alapján a legígéretesebb jelölt a kaszkád fragmentáció alapos vizsgálatára. Kaszkád folyamatról beszélünk akkor ha a fragmentáció több szinten, folyamatos darabolódás mellett zajlik (10. ábra).

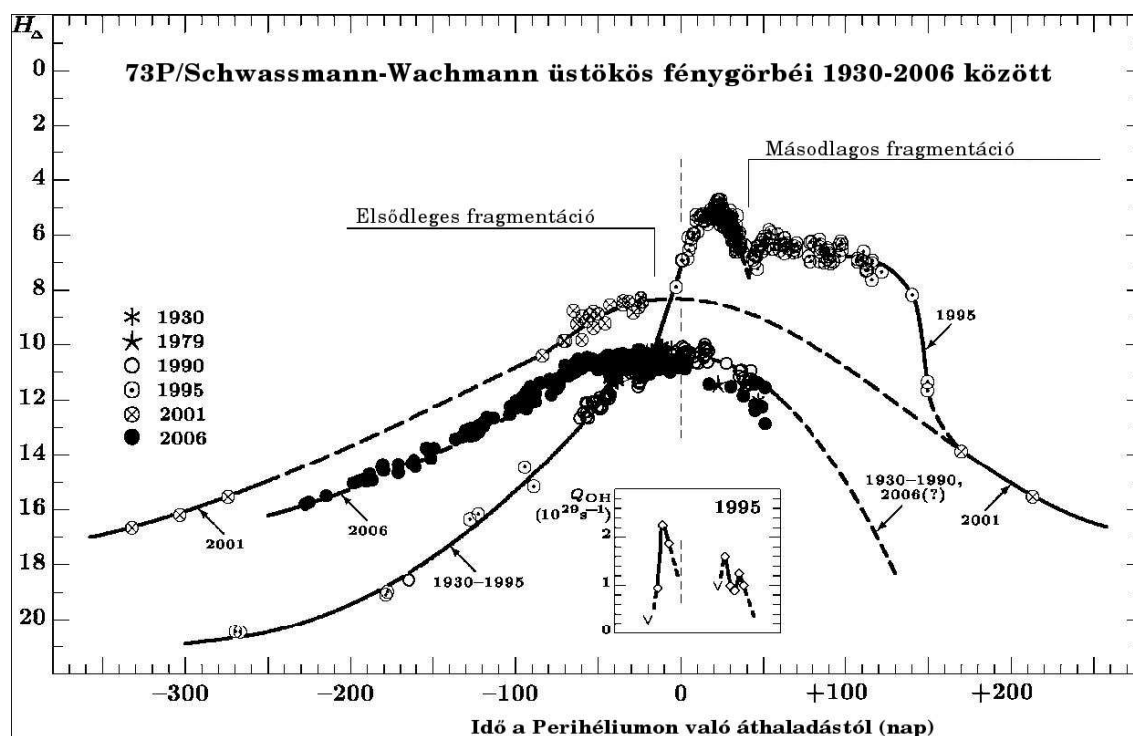


10. ábra. A kaszkád fragmentálódás vázlatos rajza (Sekanina 2007)

Az üstököst 1930 május 31-én fedezte fel Friedrich A. Schwassmann és Arno A. Wachmann (Hamburg Kutatóintézet, Bergedorf, Németország) egy kisbolygó felmérés alkalmával amikor 0.062 CS.E. távolságra volt a Földtől. A következő visszatérések már nem sikerült megtalálni, ezután hosszú időre nyoma veszett. 1979-ben aztán újra sikerült észlelni 5 héttel a számolt perihélium áthaladás után (a pályaelemek megváltozásának oka az 1965-ben a Jupiter melletti közeli elhaladás volt) (Candy 1979, Marsden 1984). A következő észlelés 1990-ben sikerült (1985-ben nem) ekkor 9 magnitúdóra fényesedett fel. 1995-ös visszatérése alkalmával több nagyobb kitörés is lejátszódott a mag felszínén, majd több nagyobb mellékkomponenst sikerült azonosítani. 1995.

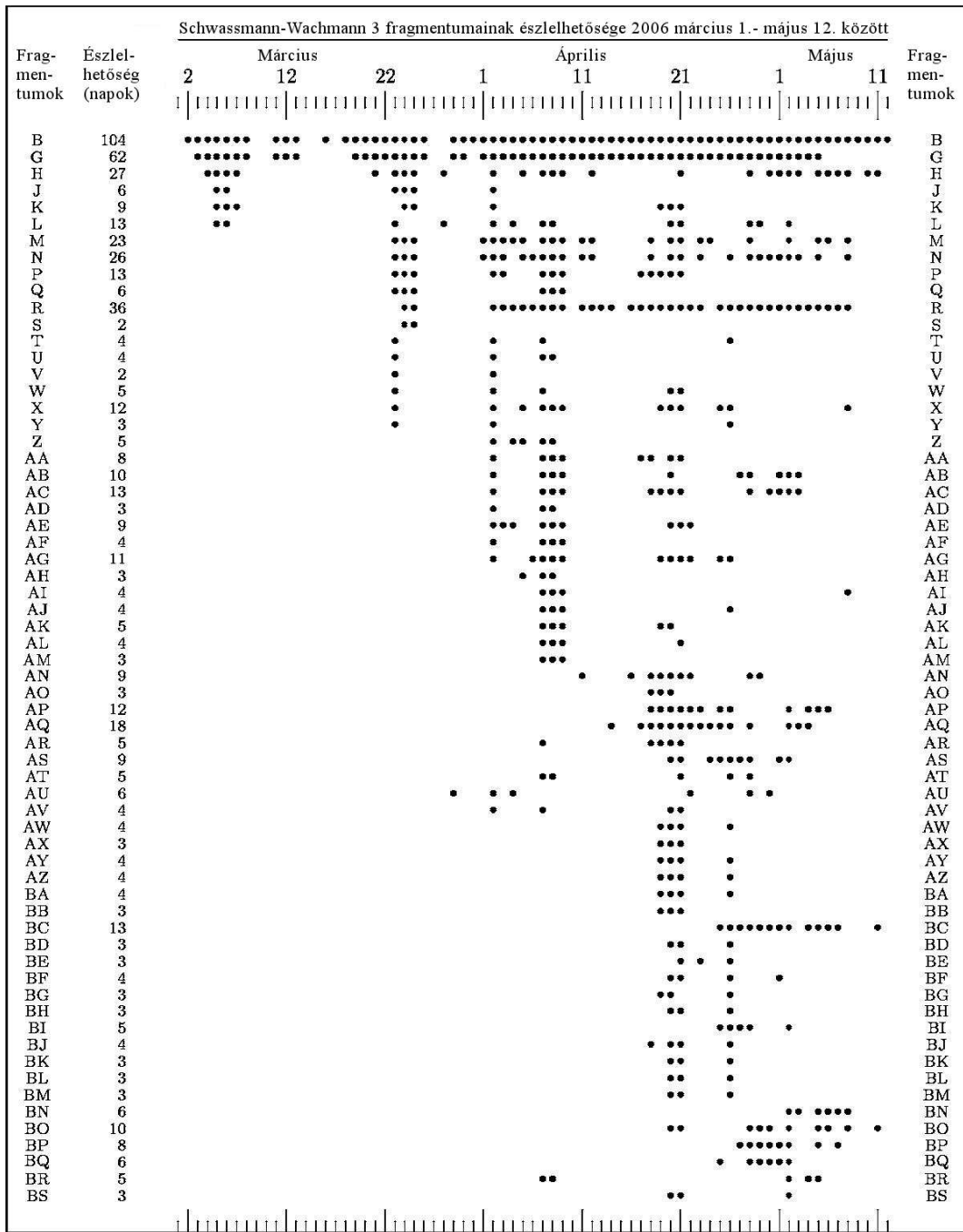
¹rövid periódusú üstökösök családja, amelyek hasonló pályaelemekkel rendelkeznek, mint a Jupiter

szeptember 6-án Crovisier és mtsai (1996), Sekanina és mtsai (1996) szokatlan OH csúcsot mértek (11.ábra, belső ábra). Látható tartományban a kitörés első detektálása szeptember 17-21 (Green, 1996a) volt, amikor 4 magnitúdót fényesedett az üstökös. Október 9-én 6 magnitúdó fényes (Green, 1996b), már szabad szemmel is észlelhető volt. A maximális fényesség 5 magnitúdóra nőtt, ezután halványodni kezdett, majd 41 nappal a perihélium áthaladás után (november 2.) újabb kitörést észleltek és az üstökös felfényesedett 7 magnitúdóra (11.ábra).



11. ábra. A 73/SW fénygörbéi 1930–2006 között (Sekanina 2007)

Az üstökös feldarabolódását Boehnhardt & Käufl (1995) jelentette először december 12-én. Négy fragmentumot azonosítottak, melyeket "A", "B", "C" és "D" jellel láttak el. A "D" jelű darabot csak rövid ideig lehetett észlelni. A darabolódás "A" típusú volt és rövidesen kiderült, hogy a főkomponens a "C" jelű fragmentum (Marsden, 1996). A következő 2000-es visszatérésekor további két darabot észleltek ("E" és "F"), de Sekanina (2005) számításai szerint ezek a darabok még a 1995-ös kitörés alkalmával keletkeztek, és tévesen azonosították őket korábban, mint "B" komponenset. Legutóbbi visszatérésekor, 2006 februárjában újabb darabot fedeztek fel ("G", Green, 2006) az ismert "C" és "B" komponensen kívül, majd április végén és május elején számos apró üstökös darab szakadt le a "B" és "G" komponensről a perihélium áthaladás előtt. Ezen további darabolódás miatt feltételezhetjük, hogy kaszkád-folyamat játszódik le ezen üstökös evolúciójának végén. A 12.ábrán láthatóak az eddig észlelt fragmentumok.



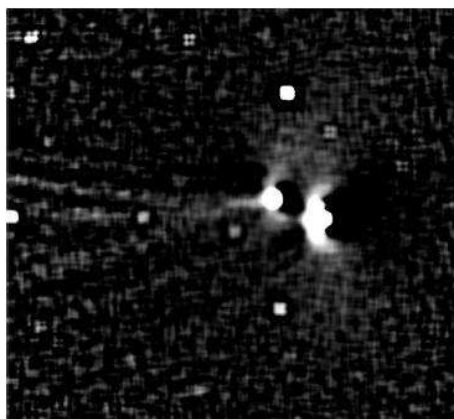
12. ábra. Fragmentumok láthatósága

1.2.4. Morfológiai alakzat: kóma szárnyak

A kóma szárnyak ("*coma arclets*") röviddel a fragmentálódás után jöhetnek létre (5-10 napon belül). Kialakulásuk könnyen nyomon követhető Larson-Sekanina² ábrákon. Élettartamuk néhány nap. A megfigyelt szárnyak kiterjedése szimmetrikus és 1000 és 10000 km nagyságú volt. Látható és közeli infravörös mérések szerint főleg gázokból áll (OH, CN, C₂), por elenyésző mennyiségben van jelen. Három magyarázat született eddig a jelenség megmagyarázására:

- Harris és mtsai (1997) szerint a C/1996 B2 (Hyakutake) üstökösnél látott kóma-szárnyakat egy vékony - a főkomponens és a leszakadt darab között kialakult - kőzetpor-ív okozta. Nem feltételezett hullámfrontot, az észlelt gázok az ívben levő kőzetből szabadultak ki.
- A Hyakutake szárnyainak magyarázata Rodionov és mtsai (1998) szerint a két komponens között kialakult gáz hullámfront aminek az éleit lehet megfigyelni.
- A harmadik lehetőség a szárnyak kialakulására a forgásban keresendő. Ekkor a mag forgástengelye a Nap felé mutat és egy por jet hozza létre a struktúrát.

Bár a folyamat pontosan még nem tisztázott, afelől nincs kétség, hogy kiváló korai nyomjelzője lehet az üstökös széthullásának.



13. ábra. A C/2001 A2 (LINEAR) üstökös 2001 májusában mutatott kóma szárnyai ("A" típusú fragmentálódás is történt)(Jehin és mtsai. 2002)

²lsd. 29. oldal

1.2.5. Széthulló üstökösök típusai

A megfigyelések alapján két csoportba sorolhatjuk őket (Boehnhardt 2002):

A típus: Az üstökös feldarabolódásakor több komponens keletkezik. A maradványok közül meghatározható egy főkomponens. A legtöbb esetben a fragmentumok a főkomponensről szakadnak le. A másodlagos komponensek ("cometesimal") általában kis tömegűek (tipikus méret: 10-100 méter) és rövid életűek (néhány esetben előfordul az éves vagy akár évszázados élettartam). Az eddig megfigyelt pusztulások nagy része ebbe a csoportba sorolható. A 73P/Schwassmann-Wachmann az *A* típusba tartozik. Fragmentumok elnevezése: Latin nagybetűkkel (I,O kivételével) A-tól kezdődően, a perihéliumon való áthaladás sorrendjében. Általában a főkomponens (legnagyobb tömegű) éri el először a perihéliumot (Sekanina 1982). Előfordulnak, olyan esetek, amikor a főkomponens nem az "A" jelzést kapja.

Példa: **73P/Schwassmann-Wachmann C**

B típus: Ebbe a típusba azok az üstökösök tartoznak, amelyek valamilyen külső kölcsönhatás eredményeképp (árapály erő), több (> 10) komponensre hullanak szét. A fragmentumok rövid életűek (valószínűleg a kis méret miatt) és nincsen pontosan beazonosítható főkomponens. A D/1993 F1 Shoemaker-Levy 9 és a C/1999 S4 LINEAR *B* típusú széteső üstökösök. Fragmentumok elnevezése: Mivel számos mellékkomponens keletkezik, a harmadlagos fragmentumokat számokkal jelölik a szülőkomponens után.

Példa: **D/1993 F1 Shoemaker-Levy 9 P1 komponens**



14. ábra. A Jupiter által darabokra szaggatott S-L 9 üstökös (JPL, NASA)

2. Észlelések, módszerek

2.1. CArA program

A CArA (Cometary Archive for Amateur astronomers, <http://cara.uai.it>) program megalkotói a GOC (Group of Cometary Observers) csoport, mely tapasztalt olasz amatőrcsillagászokból áll. 1998 óta a GOC CCD kamerákat használ az üstökösök észlelésére. A CCD kamerák használatával rájöttek, hogy az üstökösök egy részét - kisebb teleszkópokkal - amatőrcsillagászok is képesek kvázi folyamatosan megfigyelni. Másfelől egy CCD-s mérés sokkal több tudományos információt hordoz magában, mint egy hagyományos amatőr észlelés. A program remek lehetőséget nyújt arra, hogy amatőr- és szakcsillagászok együtt minőségi munkát tudjanak végezni.

A CArA életre hívója és egyben névadója Dr. Szabó M. Gyula. Ő vetette fel a 2003-as MACE (Meeting on Asteroids and Comet in Europe) találkozón, hogy ideje lenne a két táborot kutatás szempontjából is közelebb hozni egymáshoz. Természetesen számolni kell néhány korlátozó tényezővel is. Az amatőrcsillagászok képfeldolgozási ismeretei általában korlátozottak, ezért nem körültekintően kalibrálhatják a méréseiket. Sok esetben a fotometriai szűrő beszerzése is gondot jelenthet. A korlátozó tényezőket megfontolva célszerű, ha az amatőrök az $Af\rho$ mennyiséget mérik, hiszen ez eléggé műszerfüggetlen, és helyesen mérve általában spektrális változása is lassú (Szabó 2003). Ezután a méréseket adatbázisba illesztte azonnal hozzáférhető lesz.

A CArA archívum formátuma a következő; egy ASCII szövegfájl, minden sorában rögzített pozícióban az észlelés ideje, a fotometriai adatok, egyetlen $\rho - Af\rho^3 - Err_{Af\rho}$ adathármas, az összehasonlító adatait tartalmazó katalógus hivatkozása, az észlelő névkódja, a forráskép vagy az észlelő elérhetősége és az esetleges megjegyzés szerepel. Egyetlen képhez legalább 3, legfeljebb 5 sor tartozik az archívumban; továbbá ha egy észlelő több színszűrőt használ, akár 10-15 sornyi adat keletkezik éjszakánként. A használt módszer adatai impliciten szerepelnek az adatokban, mégpedig úgy, hogy minden észlelő minden használt módszeregyüttesére külön névkódot kap, így tehát a névkód nemcsak az észlelőre utal, hanem pontosan leírja a módszereket is. Az $Af\rho$ kimérése kissé nehézkes, és könnyű elszámolni; különösen igaz ez a hiba számítására. Ezért kifejlesztettek és teszteltek egy kimérőprogramot Unix és Windows alapú operációs rendszerekre (Xafrho, Wafrho; Trabatti 2004). A program grafikusán megjelenti a kimérni kívánt üstökösöt, az üstökös és a dátum megadása után kiszámítja az efemeridákat. Ezek alapján a program felülbírálnak javaslatot tesz az apertúra-sorozatra (km-ben és pixelben). A további szükséges adatok (a szűrő kódja, a referenciakatalógus és az észlelő névkódja) standard formátuma szerint kiírja. Az adatok e-mailben érkeznek, félautomatikus földolgozással kerülnek az archívumba (Szabó 2005).

³lásd 23. oldal

2.1.1. CArA adattenger

Témavezetőm Dr. Szabó M. Gyula a piszkéstetői mérések mellett valóságos adattömeget kapott az olasz amatőr csillagászok csoportjától. A CArA adatok remek lehetőségeket adtak arra, hogy munkánk valóban minőségi és kellő részletességű legyen. A mérések a B,C és G magról készültek. Több apertúrával mérték a kóma $Af\rho$ értékét és fényességét. Az alábbi ábrán a teljesség igénye nélkül bemutatom az adatok egy szeletét.

Üstökös neve	Idő (JD)	Föld-üst. táv.(CS.E.)	Nap-üst. táv.(CS.E.)	Szoláris fázis(°)	Színszűrő
0073-B	2453768.62	1.206	1.879	27.69	Ru
0073-B	2453792.87	0.810	1.643	26.85	Ru
0073-B	2453830.83	0.346	1.289	28.86	R
0073-B	2453834.38	0.317	1.266	29.21	R
0073-G	2453792.87	0.81	1.643	26.85	Ru
0073-G	2453832.41	0.337	1.285	28.22	R
0073-G	2453833.427	0.328	1.276	28.63	R
0073-G	2453839.367	0.273	1.225	31.65	R

Fényesség (mag)	Apertúra (km)	$Af\rho$ (cm)	Hiba (cm)	Katalógus	Észlelő kódja
17.83	5905	9	1	TYC	LIG[02]
16.09	3551	24	1	TYC	SosGui
10.83	2152	573	35	TYC	GuiSos
11.38	1864	322	14	TYC	LIG[02]
18.61	3601	2	0	TYC	GuiSos
13	7658	20	0	HIP	TRB[1]
12.92	6409	25	0	HIP	TIR[0]
13.96	2313	17	1	TYC	LIG[02]

1. táblázat. Észlelési táblázat

2.1.2. Kómaprofil meghatározása

Az $Af\rho$ mennyiség használatát üstökös-kóma por projektált kitöltési tényezőjének mérésére A' Hearn & mtsai javasolták először 1984-ben. A mennyiség 3 paraméterből áll össze:

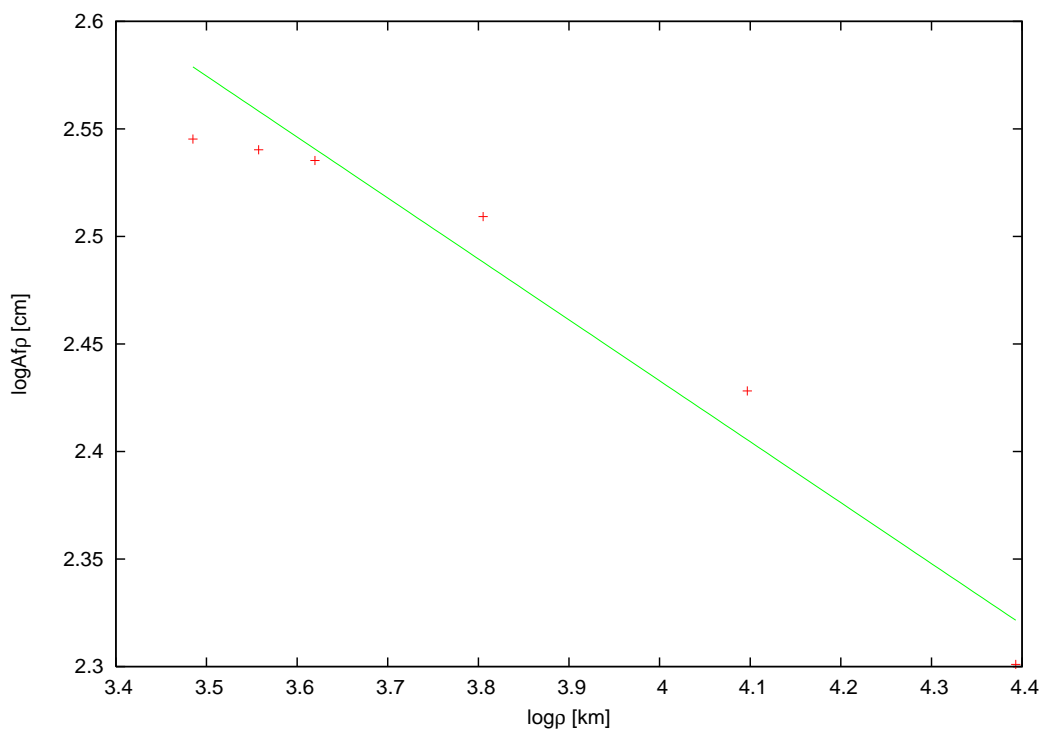
- A a porszemcsék reflektáló képessége (albedója, százalékban kifejezve)
- f a kitöltöttségi faktor (oszlopsűrűség), amely a látómező porszemekkel való kitöltöttségét méri
- ρ az apertúra nagysága km -ben kifejezve

A mennyiségből kapott érték adja meg az üstökös portermelési rátáját. Ha ismerjük a kóma fényességét, a Nap fényességét, az üstökös tőlünk és Naptól való távolságát valamint az apertúra átmérőjét, akkor meg tudjuk adni, mennyi por van adott térrészen belül. Az $Af\rho$ értékét a következő képlettel számolhatjuk:

$$Af\rho = \frac{4D^2R^2}{\rho} \frac{F_{ustokos}}{F_{Nap}}, \quad (3)$$

ahol A albedó, f oszlopsűrűség, ρ apertúra, D Föld–üstökös távolság, R Nap–üstökös távolság, F_{Nap} a Nap fluxusa 1 CS.E. távolságból, $F_{ustokos}$ a kóma ρ sugáron belülről érkező fluxus.

Feladatom a kapott adatokból az $Af\rho$ érték ρ függvényében való változása, azaz a kómaprofil meghatározása volt. Ahogy már korábban is említettem, a program célja és feladata ezen érték mérése, mert gyakorlatilag műszerfüggetlen, így az adatok összehasonlíthatóak. Ezt az állítást támasztja alá az a tény, hogy munkám során egy tucat észlelő eredményeire támaszkodtam, akik teljesen különböző műszeregyüttessel dolgoztak.



15. ábra. Egyenes illesztése a ρ – $Af\rho$ adatpárokra

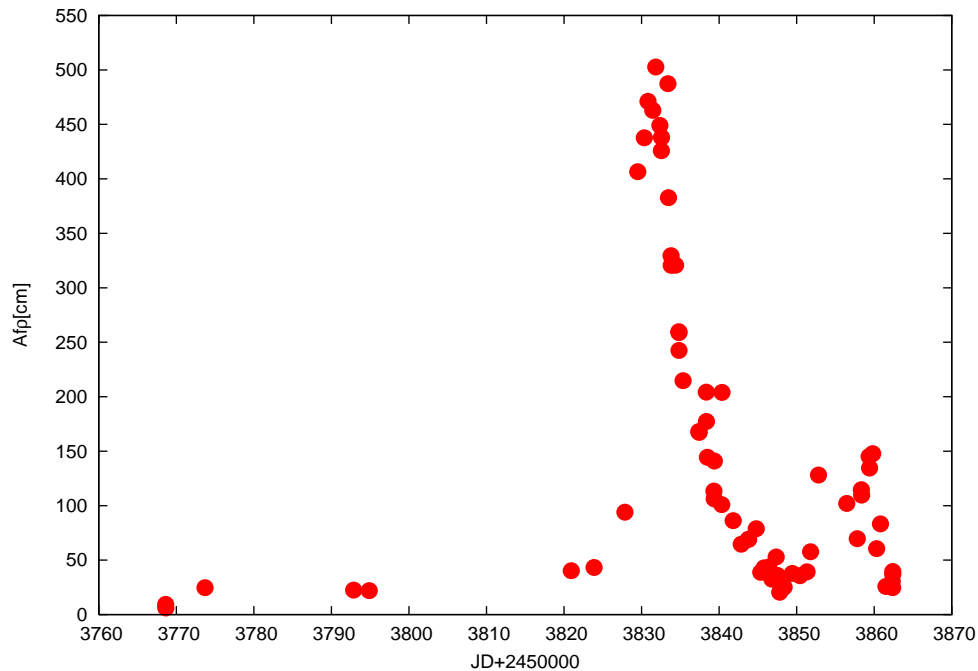
A adatok kézhez kapása után első feladatom annak szétbontása volt. A külön fájlokba való rendezésre azért volt szükség, hogy a több száz mérés kiértékelése fél-automatizálható lehessen. Minden egyes méréshez 4–5 különböző apertúras $Af\rho$ tartozott. A ρ – $Af\rho$ adatpárokat ezután gnuplottal logaritmikusan ábrázoltam és egy $F(x) = a * x + b$ alakú egyenest illesztettem rá (15. ábra). A lineáris regresszió egyen-

letét $\log \rho = 3,5 - 4,5$ között illesztettem. A függvény megfelelő illeszkedését minden esetben manuálisan ellenőriztem, majd $\log \rho = 3,7$ értéknél leolvastam az $Af\rho$ értékét és az egyenes meredekségét. Végül a kapott eredményeket táblázatba rendeztem, majd levontam a következtetést. Ezek bemutatását a következő fejezetben tettem meg.

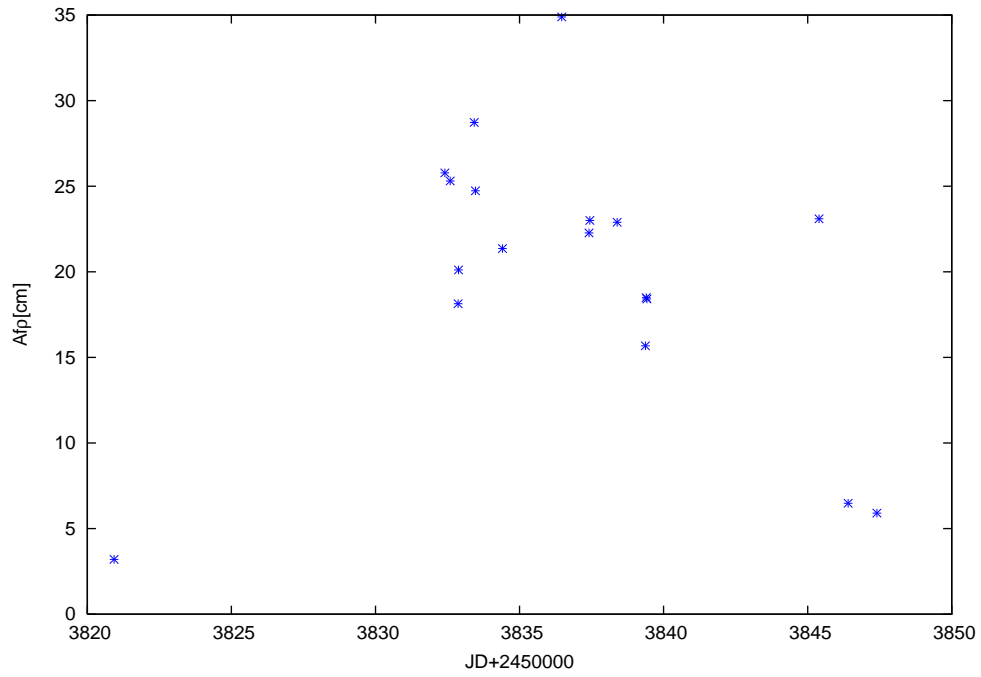
2.1.3. Az üstökös fejlődése láthatósága alatt

A kómaprofil meghatározását a B és G magra tettem meg.

A B mag esetében jóval több mérési pont állt rendelkezésre, így az $Af\rho$ időbeli változása jól nyomonkövethető. Két nagy csúcs látszik. Mindkettő a mag felszínén bekövetkezett változásokra engednek következtetni. A második kisebb $Af\rho$ csúcs a piszkéstartói fénygörbén bekövetkezett változásokkal összhangban áll. Az első – nagyobb – csúcstról nem készültek magyarországi mérések.



16. ábra. A B mag $Af\rho$ értékének változása az idő függvényében



17. ábra. A G mag $Af\rho$ értékének változása az idő függvényében

A G mag görbéje kevésbé markánsabb, de jól látszódik a kómában lévő por mennyiségének rövid időskálájú változása, amely a magon bekövetkező folyamatokra utal. Ha képzeletben a mérési pontokat vonallal összekötjük a rövid időskálájú változások könnyebben szemrevételezhetőek.

2.2. Piszkéstetői észlelések

Munkám második részét magyarországi mérések alkották. Az megfigyeléseket nem én, hanem a Kísérleti Fizika Tanszék egyik PHD hallgatója, Sárnecky Krisztián és témavezetőm, Dr. Szabó M. Gyula készítette a Konkoly Intézet piszkéstetői 60/90/180 Schmidt-távcsővel 2006 január 7. és 2006 május 17. között (18 éjszakán keresztül). A távcső egy AT200CCD típusú kamerával felszerelt. A felvételek 1536×1024 pixel méretűek, a használt chip KAF-1600-as volt. A képek $1''.01$ per pixel felbontásúak a látómező (FOV) pedig $25'.9 \times 17'.2$ égterületet fedett le. A mérések Johnson-Cousins féle VBRI szűrőrendszerrel készültek. A program célja a B, C ill. G fragmentum megfigyelése volt. A következő táblázatban vázlatosan feltüntettem a méréssorozatot.

Észlelés dátuma	Észlelt fragmentum	Szűrők
2006.01.07.	C,K	R
2006.01.10.	C	R
2006.03.19.	B,C,G	V,I
2006.04.02.	B,C,G,R,Y	V,I
2006.04.04.	B,C,G	V,I
2006.04.17	B	R,I
2006.04.18	B,C	I
2006.04.21	B,C,G	V,I
2006.04.22	B,C	V,I
2006.04.23	B,C,G	V,I
2006.04.24	B,C,G	V,I
2006.04.25	B,C,G	V,I
2006.05.04	B,C,G	V,I
2006.05.08	B,C,G	V,I
2006.05.09	B,C	B,V,I
2006.05.12	B,C	I
2006.05.15	B,C	V,I
2006.05.17	B,C	V,I

2. táblázat. Észlelési táblázat

A képek 12 másodperces expozíciós idővel készültek. Az expozíciós idő hosszát az üstökös égen való elmozdulása korlátozta. A kométa elmozdulása a képeken nem lehetett több mint egy pixel.

2.2.1. Adatfeldolgozás

A képeket nyers állapotukban kaptam kézhez. A nyers CCD felvételeken alapvetően 3 korrekciót kell elvégezni: bias, dark illetve flat-field korrekciót.

Bias korrekció A detektor fénymentes környezetben, nulla integrációs idő (a fény-érzékeny terület kiürítése majd az alapállapotba került detektor azonnali kiolvasása) esetén is mutat bizonyos jelszintet. Ezt, a minden képen megjelenő additív tagot (bias-t) le kell vonni az egyes felvételekből. Formailag:

$$I'(x, y) = I(x, y) - \frac{\sum_{p=1}^M B_p(x, y)}{M} \quad (4)$$

ahol $I(x, y)$, $I'(x, y)$ a korrigálni kívánt, illetve a korrigált kép egyes pixeleinek intenzitása, $B_p(x, y)$ pedig a p -edik bias kép egyes pixeleinek intenzitása. A képletben nem egy, hanem több bias kép átlaga szerepel. Erre azért van szükség, mert a bias felvételekre a kiolvasó elektronika véletlenszerű zaja is ráépül, és az ebből adódó szórás az átlagolással csökkenthető. A bias kép szerkezete az elektronika állapotától függ, ezért egy éjszaka során több képet célszerű készíteni, és ezek átlagát venni, illetve minden éjszaka újabb sorozatot készíteni, és azt felhasználni az adott megfigyelési ciklus korrekciójához.

Dark korrekció A CCD kamerával készült képen további hibaforrás lehet az ún. "sötétáram" okozta intenzitásváltozás. Az elektronok véletlenszerű "vándorlása" pixel-pixel között jelentősen csökken a műszer megfelelő és folyamatos hűtésével. Az effektus 100 Kelvin közelében már nem jelentős.

Flat-field korrekció Az egyes pixelek érzékenysége eltérő lehet, továbbá a detektor, a szűrők felületén lévő szennyeződések (pl. porszemek) hatására a kép intenzitásviszonyai nem felelnek meg a valódi intenzitásnak. Ennek kiküszöbölésére egy úgynevezett flat-field képet kell készítenünk valamilyen homogén megvilágítottaságú felületről. Erre tökéletesen alkalmas a derült, szürkületi égbolt (Skyflat). Ahol erre valamilyen okból nincsen lehetőség, a teleszkóp dómjának belső fehér felületéről készítenek flat-field képet (Domeflat). Az így kapott flat-field képeket átlagoljuk, korrigáljuk a bias szintre, egyre normáljuk, majd ezzel elosztva a korrigálni kívánt képet visszaállíthatjuk a helyes intenzitás-eloszlást:

$$F(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N F_i(x, y)}{N} - \frac{\sum_{p=1}^M B_p(x, y)}{M}, I''(x, y) = \frac{I'(x, y) \sum F(x, y)}{F(x, y) \cdot j \cdot k} \quad (5)$$

ahol $F_i(x, y)$ az egyes flat-field képek, $F(x, y)$ az átlagolt flat-field pixeleinek intenzitása, $I'(x, y)$ a bias-, $I''(x, y)$ pedig a bias- és flat-korrigált kép egyes pixeleinek intenzitása (Fűrész 1998).

A számításokban szereplő átlagolásokat célszerű medián módszerrel számítani, ugyanis

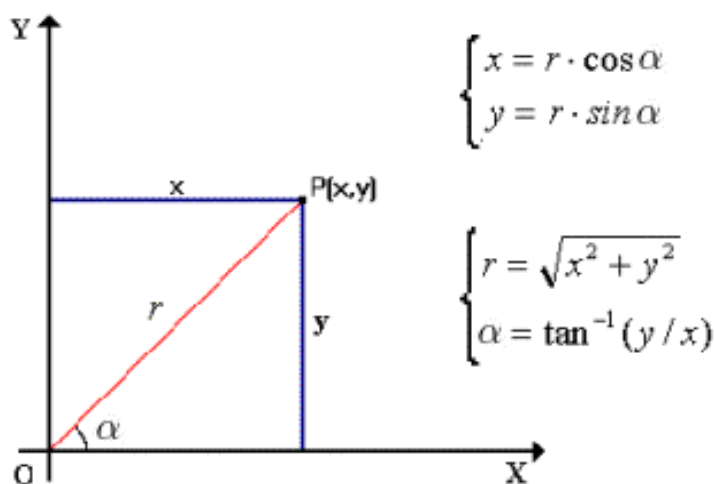
így az esetleges kozmikus sugarak okozta hamis, magas számtani átlagértékek kiküszöbölhetőek.

Az első korrekciós eljárásokat a IRAF csillagászati programcsomaggal végeztem. A képeken csak flat-field korrekciót végeztem el, mert a bias ill. dark korrekció nem javított volna a felvételeken, hanem további szisztematikus hibát vitt volna bele. A műveletet a IRAF noao-imred-cddred-flatcombine ill. ccdproc taszkokkal végeztem el. Volt olyan éjszaka, melyhez nem készültek flat képek, ebben az esetben az időben legközelebbi flat képeket használtam.

A képek összeadása az Astrometrika nevű programmal készült. Az IRAF-nak is van erre a célra beépített összegző taszkja, de az Astrometrika az üstökös saját mozgása alapján adta össze a felvételeket, így egy kiterjedt objektum esetében, mint amilyenek az üstökösök is, pontosabb eredményhez jutottunk. A felvételeken elvégzett korrekciók és összeadások után Sekanina-ábrákat készítettem, hogy elvégezhessem az üstökös morfológiai elemzését.

2.2.2. Larson-Sekanina szűrő

Üstökösök morfológiai vizsgálatára gyakran alkalmazott képtranzformációs eljárás a Larson-Sekanina szűrő. Az eljárást Sekanina és Larson publikálta 1984-ben (Sekanina & Larson 1984). A korábbi algoritmusokhoz képest a Larson-Sekanina szűrővel a kóma szerkezete közvetlenül vizsgálható.



18. ábra. Polárkoordinátákba való transzformáció

Tekintsünk egy Descartes-koordináta rendszert. Vegyünk egy $B(x, y)$ függvényt, amely x -től és y -től függ. A változók polár koordinátákba való transzformálásával a B függvényt felírhatjuk r és α függvényében, ahol r az origótól $(0,0)$ való távolság a α pedig a x tengellyel bezárt szög (18. ábra). A polár koordinátákkal való munka az

üstökösben fellelhető szimmetriák miatt előnyösebb. Üstökösök esetében a kezdőpontot (x_0, y_0) a magba helyezzük.

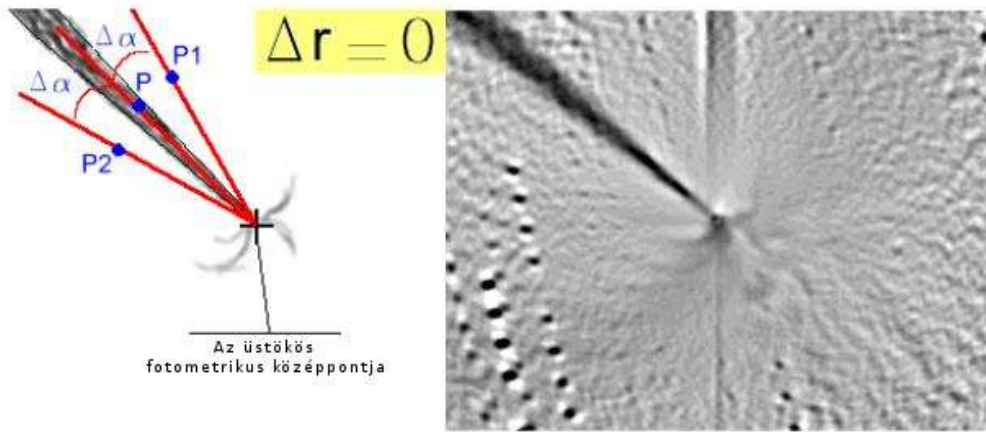
Így a általános Larson-Sekanina algoritmus a következőképpen írható fel:

$$B'(r, \alpha, \Delta r, \Delta \alpha) = 2B(r, \alpha) - B(r - \Delta r, \alpha - \Delta \alpha) - B(r + \Delta r, \alpha + \Delta \alpha) \quad (6)$$

ahol B' az új függvény, amelyet Δr mennyiséggel radiálisan eltoltunk és $+\Delta \alpha$ ill. $-\Delta \alpha$ szöggel elforgattunk. Az így elkészült kép minden fotometriai információt elveszít, ugyanakkor morfológiailag vizsgálható lesz.

$\Delta r = 0$. Az egyenlet a következő alakot veszi fel:

$$B'(r, \alpha, \Delta \alpha) = 2B(r, \alpha) - B(r, \alpha + \Delta \alpha) - B(r, \alpha - \Delta \alpha) \quad (7)$$



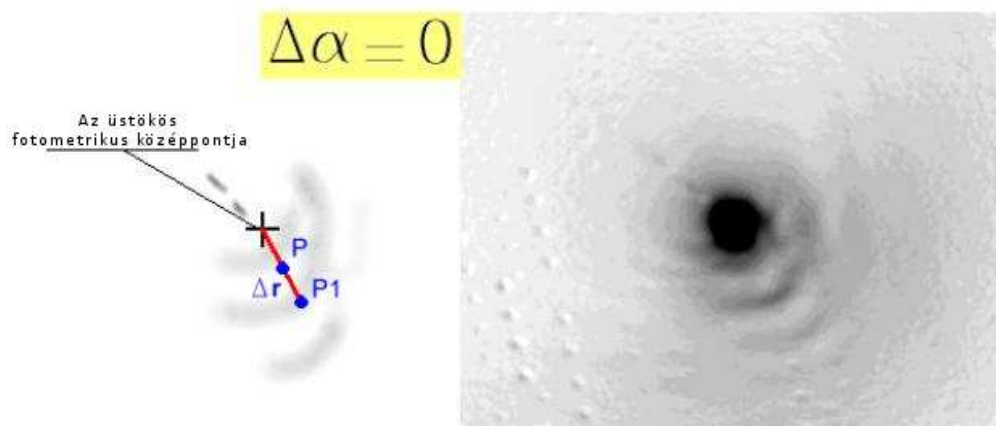
19. ábra. $\Delta r = 0$ eset; jetek, szökőkutak látszódnak a jobboldali képen

$\Delta r = 0$ esetben azok a struktúrák kontrasztosodnak, melyek a α deriváltjának változására érzékenyek. Ezek struktúrák általában jetek, szökőkutak amelyek a magból törnek fel (19. ábra).

$\Delta \alpha = 0$. Az egyenlet a következő alakot veszi fel:

$$B'(r, \alpha, \Delta r) = 2[B(r, \alpha) - B(r - \Delta r, \alpha)] \quad (8)$$

Abban az esetben, mikor csak az r szerint deriváljuk a képet, előtérbe kerülnek azok az alakzatok, melyek a magot veszik körbe. Ilyen alakzatok a halok, spirális struktúrák illetve héjak (20. ábra). Ilyenkor a jetek nem látszódnak.



20. ábra. $\Delta\alpha = 0$ eset, halo és gömbszimmetrikus alakzatok a mag körül

A képek elkészítéséhez újból az IRAF programcsomagot használtam. Mivel ezen szakasza a munkának elég hosszadalmas és igen monoton, megpróbálkoztam az IRAF programozásával is, de nem sikerült működő szkriptet írnom, így maradtam a kézi irányítás mellett. A munkafolyamat a következő lépésekből állt:

1. Alapkép készítése Az adott kép ds9⁴-ben történő betöltése után - az IRAF-ban az *imexamine* taszkkal - a képen az intenzitásmaximumát megkerestem ("e" billentyű) és az "a" gombbal kiírtam a pont x ill. y értékét. Ezután a *geotran* taszkot állítottam a következőképpen:

```
geotran(input='bemenő kép neve', output='alapkép', xin='intenzitás max. x koord.', yin='intenzitás max. y koord.', xout='intenzitás max. x koord.', yout='intenzitás max. y koord.', xrotati='elforgatás(°),0', yrotati='elforgatás(°),0')
```

Ezen első elemre (zéró elforgatás, nagyítás), azért van szükség, mert a későbbi levonást az *imarith* taszk az eredeti képre nem volt hajlandó elvégezni. A be- és kimenő koordináták azért azonosak, mert így azok lesznek a forgatás középpontja.

2. Segédképek Az alapkép elkészítése után további két, meghatározott szöggel elforgatott képet készítettem. Az ideális szög a morfológiai vizsgálat szempontjából képenként változó volt. Többszöri kísérletezés után 10 ill. 15 fokos forgatást használtam leggyakrabban.

```
geotran(input='bemenő kép neve', output='eredmény kép neve', xin='intenzitás max. x koord.', yin='intenzitás max. y koord.', xout='intenzitás max. x koord.', yout
```

⁴gyakran alkalmazott képnézegető szoftver. Indítása IRAF-ban: !ds9

= 'intenzitás max. y koord.', xrotati='elforgatás(°)', yrotati='elforgatás(°)')

geotran(input='bemenő kép neve', output='eredmény kép neve', xin='intenzitás max. x koord.', yin='intenzitás max. y koord.', xout='intenzitás max. x koord.', yout='intenzitás max. y koord.', xrotati='elforgatás(°)', yrotati='elforgatás(°)')

3. Összeadás Utolsó lépésben már az *imarith* taszkkal dolgoztam. Összeadtam a két elforgatott képet

imarith(operand1='1.elforgatott kép', op='+', operand2='2.elforgatott kép', result='eredménykép'),

majd mivel kétszer vettem ugyanazt leosztottam kettővel

imarith(operand1='eredménykép', op='/', operand2='2', result='levonandó kép').

Végül pedig levontam az első lépésben készült képből

imarith(operand1='alapkép', op='-', operand2='levonandó kép', result='kész.fits')

2.2.3. Apertúra fotometria

A Sekanina ábrák elkészítése után apertúra fotometriát is csináltam a felvételeken. Apertúra fotometriát végezni üstökösmaison egy kissé eltérő technikát igényel, mint csillagok fényesség meghatározása esetén.

Az apertúra fotometriát is az IRAF programcsomaggal végeztem és a következő lépésekből állt:

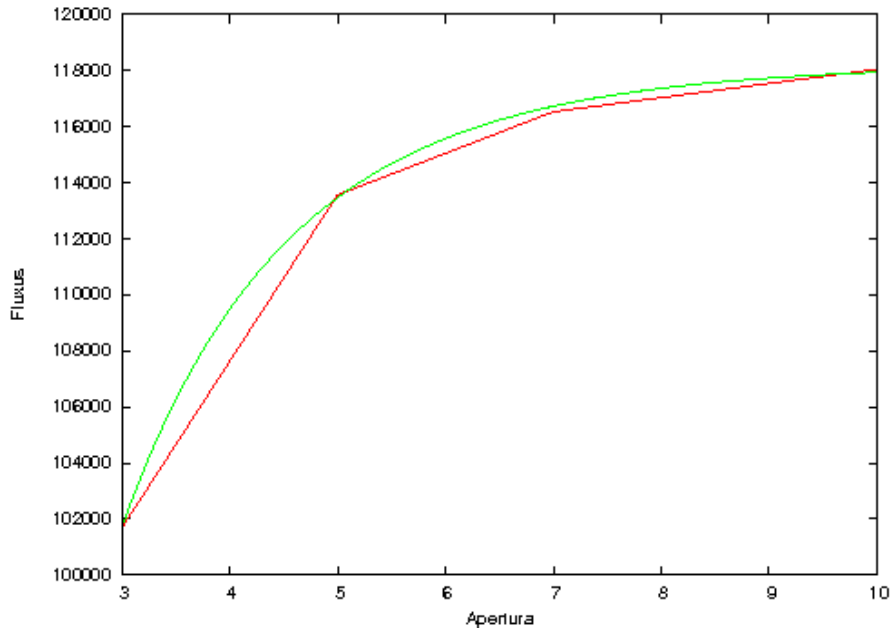
- a kiválasztott képen megkerestem az üstökös intenzitásmaximumát (*ds9*, *imexam* taszk)
- mintavételeztem különböző apertúrákkal (3,5,7,10) az üstökös intenzitását (*qphot*)
- a háttér-intenzitást több helyen is megmértem, majd vettem ezek középértékét és levontam a kométa fényességéből
- az értékpárokat adatfájlokba rendeztem, külön minden képre

- gnuplottal ábrázoltam majd egy $a * \exp^{-x*b} + c$ alakú görbét illesztettem rá adott kezdőparaméterekkel (21. ábra)), amely tapasztalat szerint jól illeszkedik a kompakt üstökösök fotometriai profiljához
- az előző érték $\infty - re$ extrapolált fluxusát átszámoltam instrumentális magnitúdóba (összehasonlító csillagok fotometriája alapján).

$$I_u = \lim_{x \rightarrow \infty} a * \exp^{-x*b} + c \equiv c, \quad (9)$$

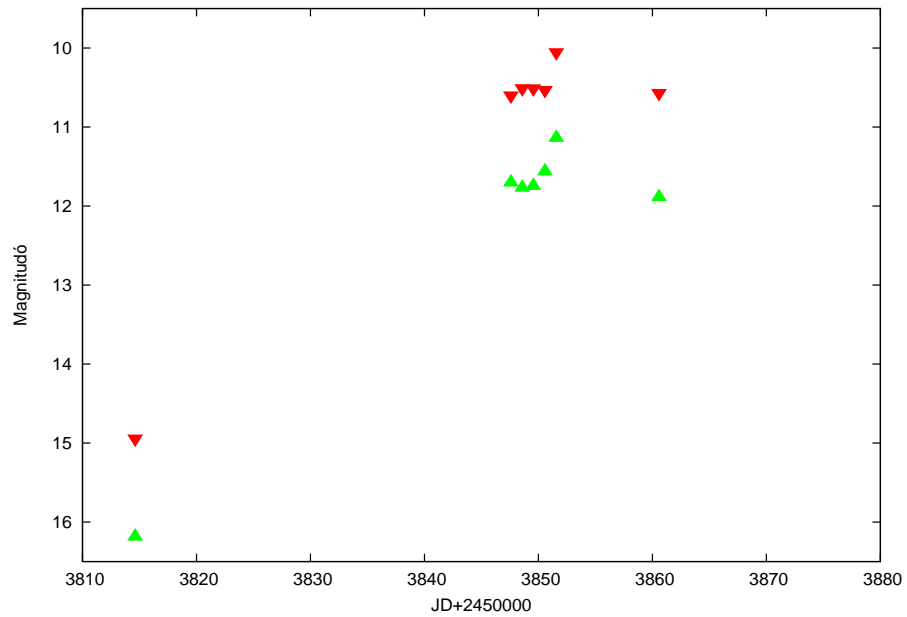
$$m_u - m_* = -2,5 \log \frac{I_u}{I_*}, \quad (10)$$

ahol m_u az üstökös fényessége magnitúdóban, $I_u \equiv c$ az üstökös intenzitása, I_* az összehasonlító csillag intenzitása.

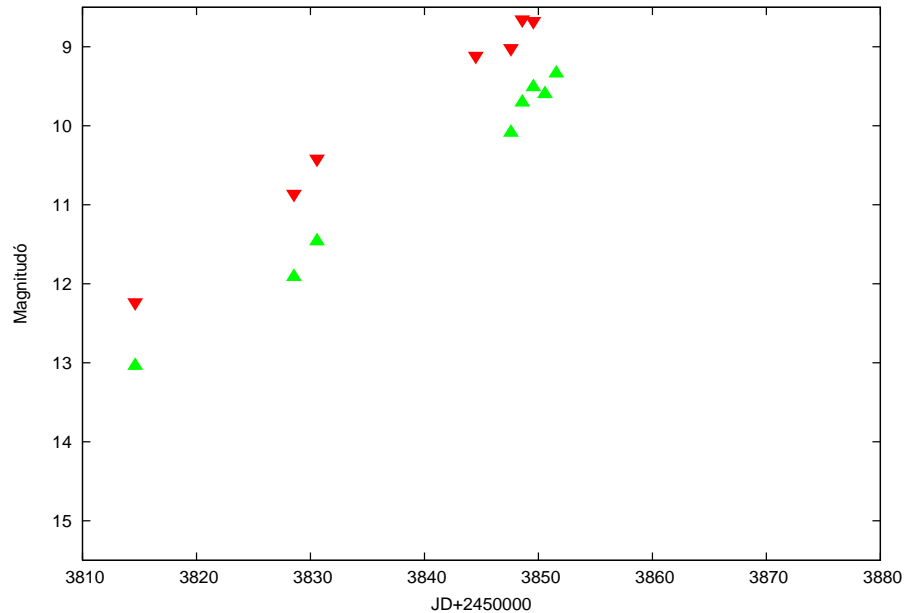


21. ábra. Exponenciális függvény illesztése az adatpárokra

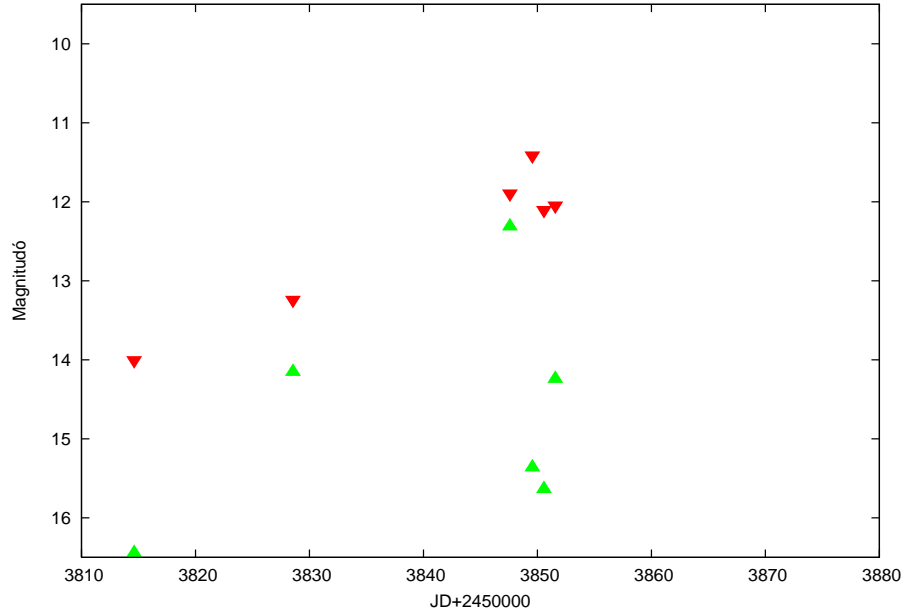
A piszkéstetői képekre ezen módszerrel 3 magról – B, C, G – állítottam elő fénygörbéket.



22. ábra. A B mag apertúra fotometriája után elkészült fénygörbe. A piros jelzés a Johnson I szűrős értéket, a zöld jelzés a V szűrős értéket jelöli.



23. ábra. A C mag apertúra fotometriája után elkészült fénygörbe. A piros jelzés a Johnson I szűrős értéket, a zöld jelzés a V szűrős értéket jelöli.



24. ábra. A G mag apertúra fotometriája után elkészült fénygörbe. A piros jelzés a Johnson I szűrős értéket, a zöld jelzés a V szűrős értéket jelöli.

A B mag fénygörbéjén jól láthatóan nőtt a nukleusz fényessége mind az I, mind a V tartományban. Ez a felfényesedés azonosítható az $Af\rho$ görbéken látott kisebbik csúccsal. A főkomponens fénygörbéjén nem tapasztalható hirtelen felfényesedés, a mag fokozatosan fényesedett, ahogy a perihéliumhoz közeledett. A G komponens esetében hirtelen ugrások vannak mindkét tartományban, összhangban az $Af\rho$ görbén látottakkal.

2.2.4. Halvány magok fotometriája

Jelzés	Márc. 20	Ápr. 1.	Ápr. 3.	Ápr. 5.	Ápr. 22.
H	—	< 2900	—	—	—
J	5500	< 4500	2600	< 5500	—
M	—	42000	6200	—	—
N	—	105000	210000	—	—
K	—	—	< 2300	—	—
L	—	28000	< 2300	—	—
P	< 22000	< 10000	< 9600	—	—
R	—	—	290000	—	—
S	—	—	< 2300	—	—
T	—	—	< 4000	—	—
Y	—	—	< 4000	—	—
Z	—	< 2900	< 2300	—	—
AE	—	52000	39000	—	—
AI	—	—	< 4000	—	—
AM	—	—	< 2300	—	—
AN	—	< 2900	< 2300	—	—
AO	< 22000	< 10000	< 9600	—	—
AP	—	—	—	—	170000
AQ	—	—	—	—	10000
AU	< 16000	—	—	—	—
BC	—	—	—	—	< 8200
BF	< 28000	—	—	—	—
BL	—	—	—	< 2000	—
BM	—	—	—	< 2000	—

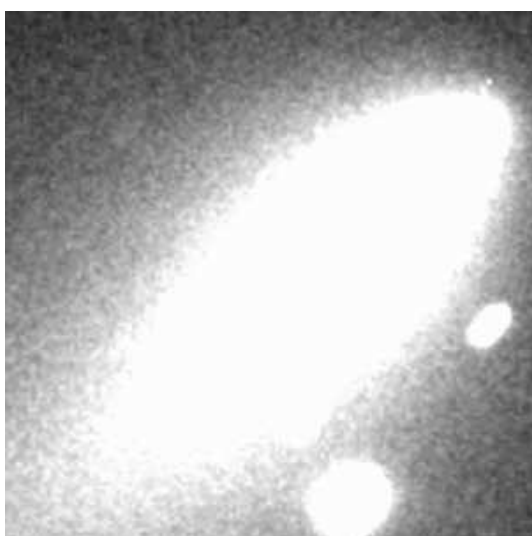
3. táblázat. Halvány magok fotometriája (a megtalált fragmentumok vastagon szedve ADU-ban feltüntetve szerepelnek, a többi mérési érték egy égfelületről becslést ad az égterületen fel nem ismert darabokra (ADU-ban), a — jelzés elégtelen mérési adatot jelent (nem készült felvétel)).

A 3. táblázatban szereplő magok fényességén jól látszik, hogy a változás nagyon gyors. Az észlelés után akár már néhány nappal el is tűnhetnek és kisbolygókká válhatnak. A fényességük és halványodásuk üteme alapján 10–100 méter nagyságú kőtömbök lehetnek, amelyek csak kevés por- és gázanyagot tartalmaztak.

2.2.5. Pizskétetői Larson-Sekanina ábrák és értelmezésük

A pizskétetői felvételek morfológiai elemzéséhez a Larson-Sekanina képeket használtam fel. Két magról, a *B* és *G* komponensről készültek morfológiai ábrák. A következőkben galériába rendezve mutatom be a képeket. Minden kép után rögzítettem megfigyelési eredményeimet. A kép-párok közül az első az eredeti CCD felvétel, a második pedig az L-S ábra. További formázás még a képeken, hogy minden kép azonos távolságban látszik (minden képen 1 cm ugyanakkora távolságot jelent a valóságban is).

A *B* magról készített morfológiai ábrák idősorrendben (minden ábra Johnson I szűrős CCD képről készült):

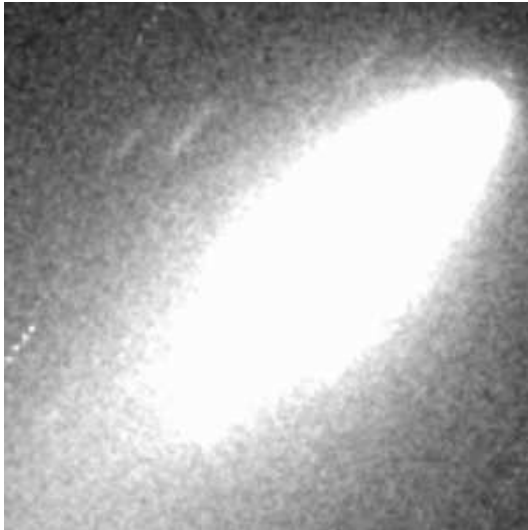


25. ábra. 2006. április 17-én (B)



26. ábra. 04.17-i kép Sekanina ábrája

2006.04.17. - A kóma elnyúlt, ovális lett a csóva fényessége növekedett. Ebből arra következtethetünk, hogy aktív területek jelentek meg a mag felszínén, és további apró töredékek kerültek a kómába, ami az ovális alak valószínű oka. A képen 10 fokos elforgatást használtam.

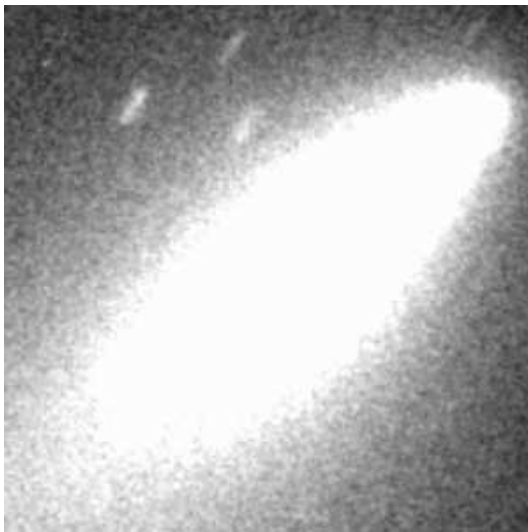


27. ábra. 2006. április 18-án (B)

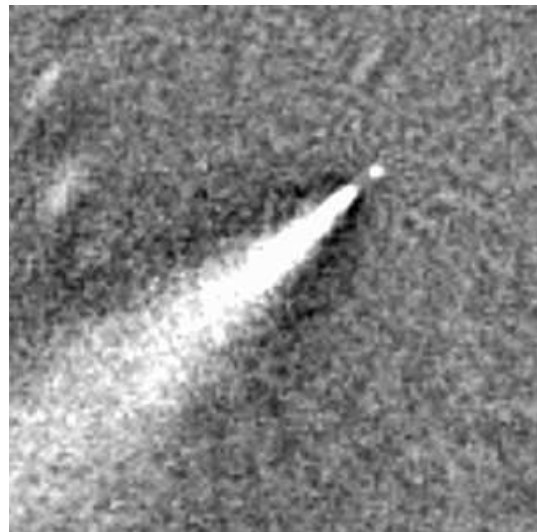


28. ábra. 04.18-i kép Sekanina ábrája

2006.04.18. - Folytatódott a kóma elnyúlása és a csóva fényesedése. Ezenkívül nem figyelhető meg semmilyen egyéb struktúra. 10 fokos elforgatású kép készült.

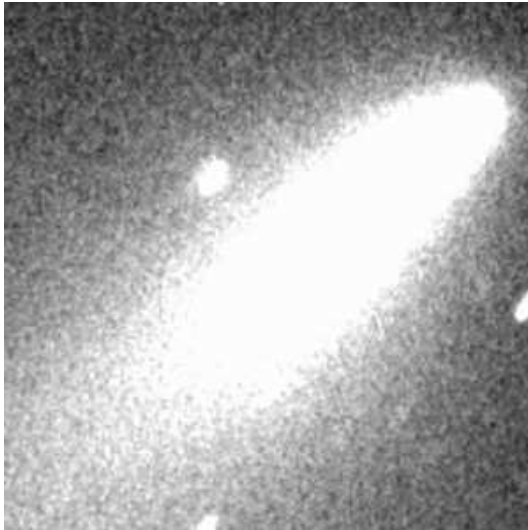


29. ábra. 2006. április 21-én (B)

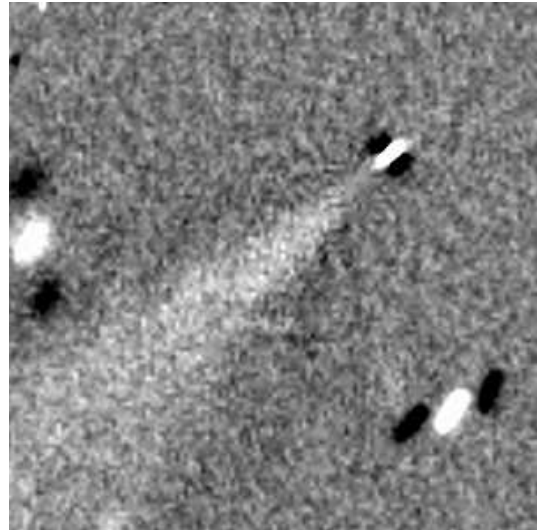


30. ábra. 04.21-i kép Sekanina ábrája

2006.04.21. - Még jobban elnyúlik az üstökös, ez a mag felszínén lejátszódó változásokra enged következtetni. Esetleges leszakadó darabokat még nem lehet észlelni. 10 fokos elforgatású kép készült.

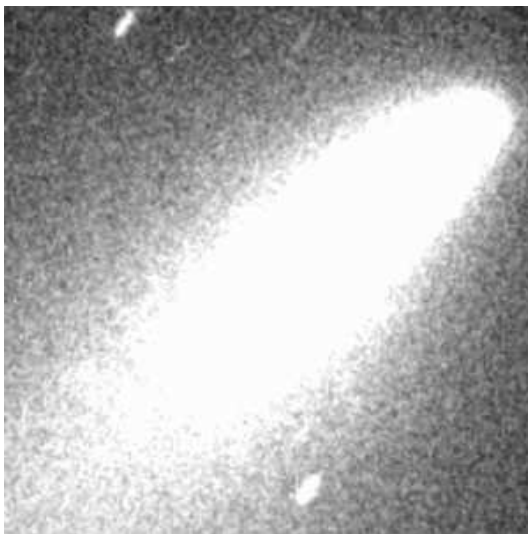


31. ábra. 2006. április 22-én (B)

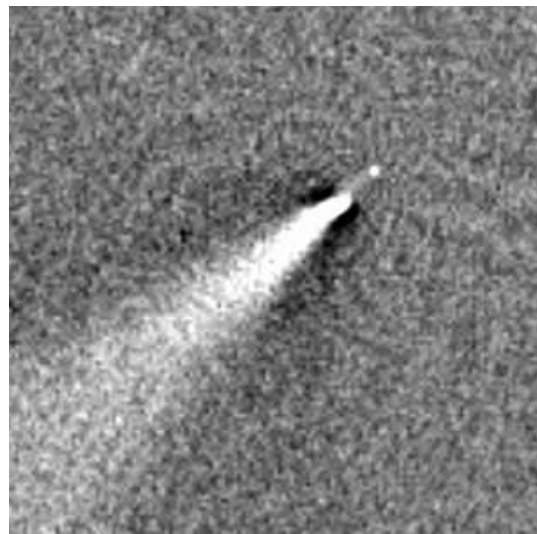


32. ábra. 04.22-i kép Sekanina ábrája

2006.04.22. - A kóma alakja kissé aszimmetrikussá válik. 10 fokos elforgatás történt.



33. ábra. 2006. április 23-án (B)

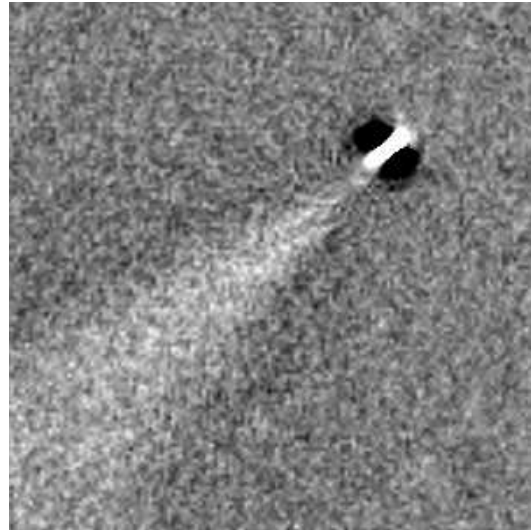


34. ábra. 04.23-i kép Sekanina ábrája

2006.04.23. - Jelentős változás nem figyelhető meg sem az eredeti sem az elforgatott képeken. Továbbra is elnyúlt a kóma alakja. 10 fokos elforgatás történt.



35. ábra. 2006. április 24-én (B)

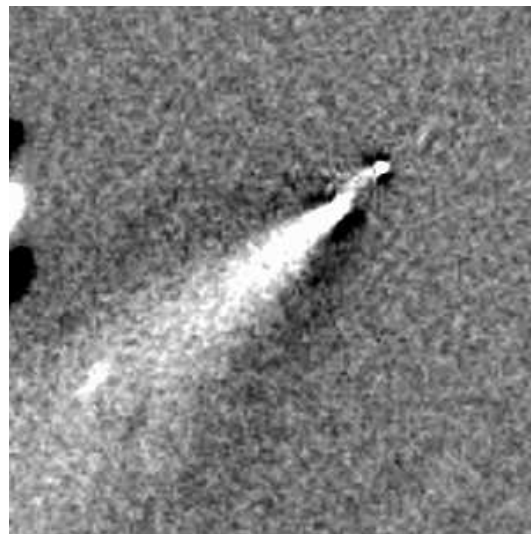


36. ábra. 04.24-i kép Sekanina ábrája

2006.04.24. - Az eddig megfigyelt változások továbbra is látszanak. Elnyúlt kóma.



37. ábra. 2006. április 25-én (B)



38. ábra. 04.25-i kép Sekanina ábrája

2006.04.25. - A kóma alakja még inkább aszimmetrikussá válik. Hirtelen megnövekvő aktivitás. A Sekanina ábrán az üstökös két darabban látszik. Az elforgatás 10 fokos.

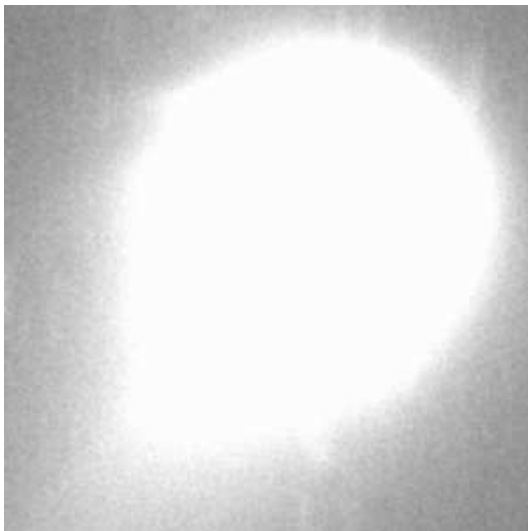


39. ábra. 2006. május 4-én (B)

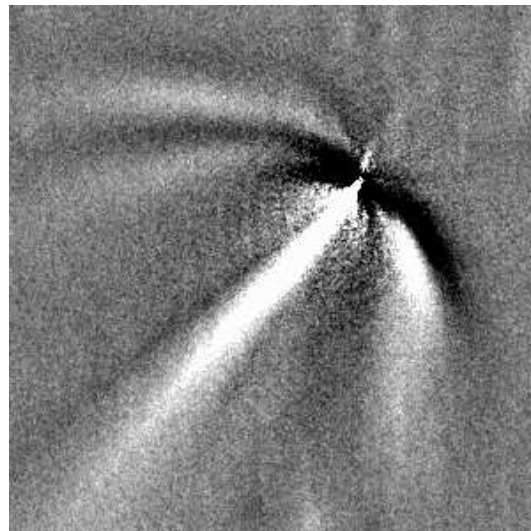


40. ábra. 05.04-i kép Sekanina ábrája

2006.05.04. - A felvételen közvetlenül megfigyelhető az SW3 üstökös B magjának további darabolódása. A kóma fényessége ugrásszerűen megnőtt. A fragmentáció "A" csoportjába (Boenhardt) sorolható az égitest. A főkomponensről leszakadó kisebb darabokból 4 elkülöníthető egymástól. Kettő ezek közül saját jól látható csóvával is rendelkezik.



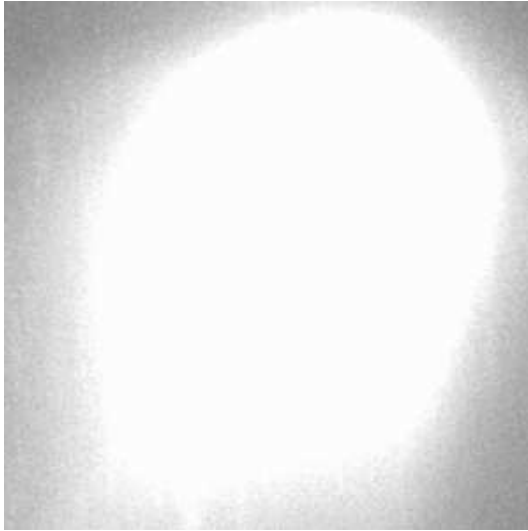
41. ábra. 2006. május 8-án (B)



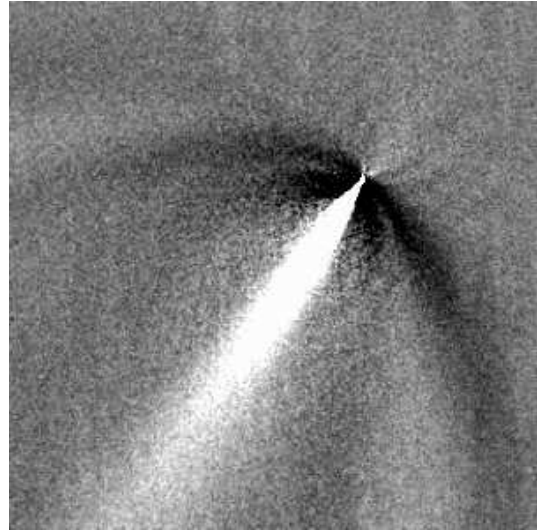
42. ábra. 05.08-i kép Sekanina ábrája

2006.05.08. - A kóma az elnyúlt formája után újra gömbölyű alakot vett fel, termelési rátája jól láthatóan növekedett. Az üstökös környezete egészen más struktúrát mutat, számos érdekes alakzat megjelent. A főkomponensről leváló darabkákat ezen a felvételen már nem lehet megfigyelni. Ez mutatja, hogy igen rövid életűek, ami nagyban

szűkíti a vizsgálati lehetőségeket. Az magból kiinduló több ív is megfigyelhető, amelyek valószínűleg anyagkiáramlások lehetnek. Ezenkívül megfigyelhető egy szökőkút kifúvás is, a csóvával ellentétes irányba. 10 illetve 20 fokos elforgatást is végeztem azon célból, hogy megerősítsem az alakzatok valódiságát. Mindkét ábrán tisztán kivehetőek.

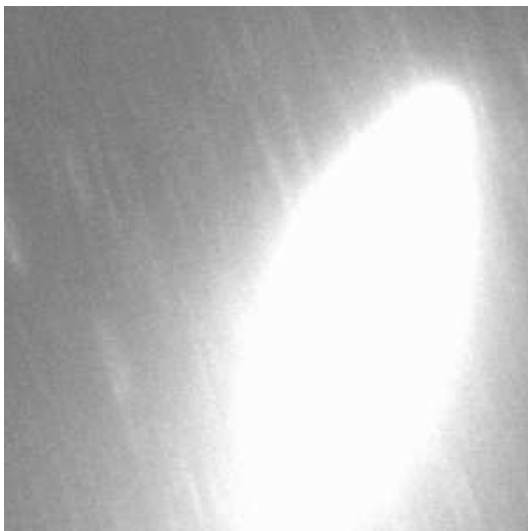


43. ábra. 2006. május 9-én (B)



44. ábra. 05.09-i kép Sekanina ábrája

2006.05.09. - Csillapodnak a hirtelen - valószínűleg - dezintegráció következtében kialakult struktúrák, ívek, de még mindig megfigyelhetőek. A kóma struktúrák relaxációjának időskálája pár napos nagyságrendű lehet.



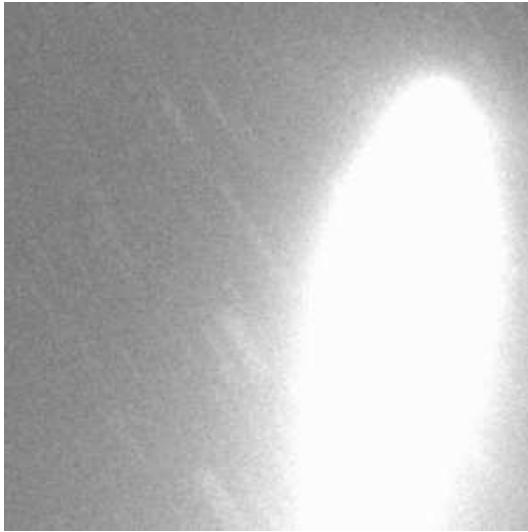
45. ábra. 2006. május 12-én (B)



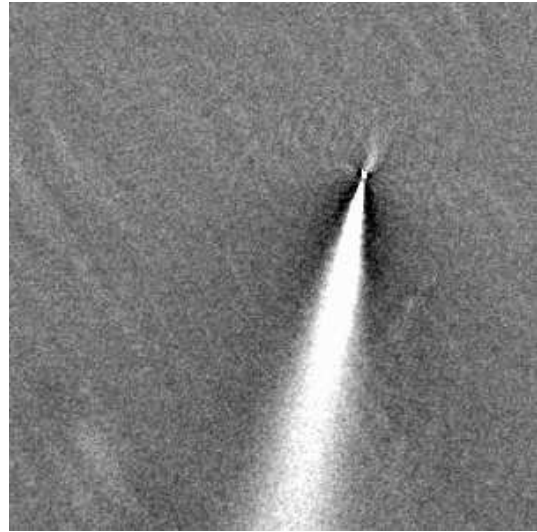
46. ábra. 05.12-i kép Sekanina ábrája

2006.05.12. - Anyagkiáramlás figyelhető meg a keringési iránnyal megegyezően. A

különböző "bajuszok" már egyáltalán nem láthatóak. A csóva mellett látható apró folt talán egyike a B magról leszakadt daraboknak (üstökössel mozog együtt).

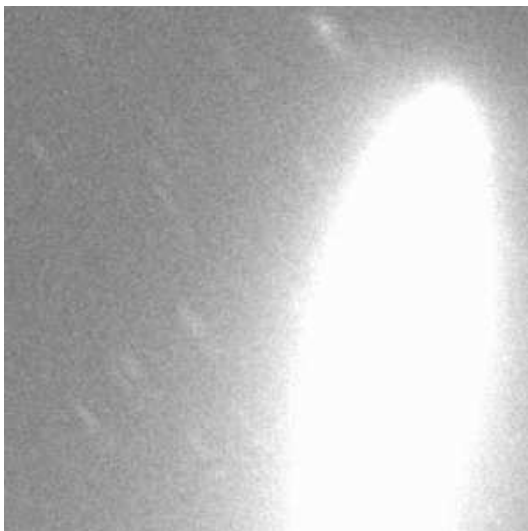


47. ábra. 2006. május 15-én (B)

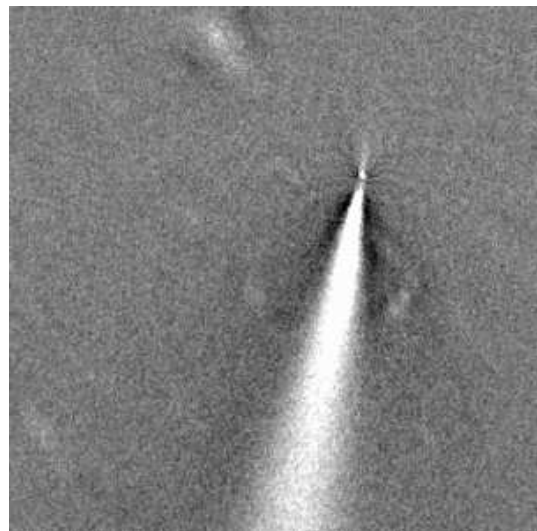


48. ábra. 05.15-i kép Sekanina ábrája

2006.05.15. - Továbbra is megfigyelhető az ellencsóva, iránya kissé változott. A leszakadt darabok nagyon halványan de még látszanak. Egyéb változás nem figyelhető meg az üstökös szerkezetében.



49. ábra. 2006. május 17-én (B)



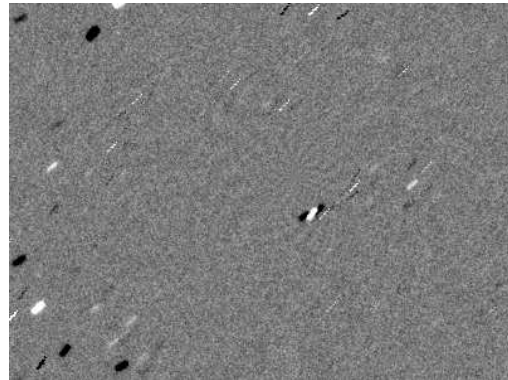
50. ábra. 05.17-i kép Sekanina ábrája

2006.05.17. - Az ellencsóva iránya tovább változott, valószínű, hogy a mag forgása okozza.

A B fragmentum mellett további Sekanina ábrákat készítettem még a G komponensről is. Ez egy kisebb tömegű, kevésbé domináns, szabad szemmel is jól láthatóan halványabb mag. A következő galériában a G magról készített ábrákat közlöm.



51. ábra. 2006. április 4-én
(G)

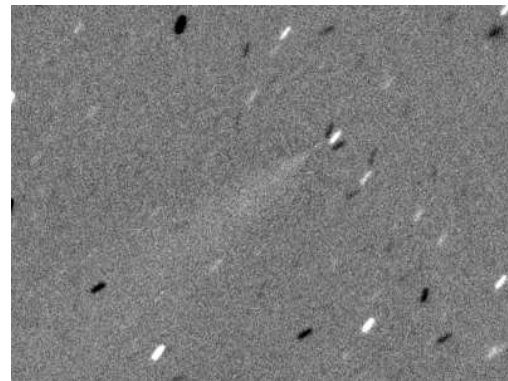


52. ábra. 04.04-i kép L-S ábrája

2006.04.04. Halvány kóma illetve csóva. Kissé elnyúltnak látszik a kóma. A képlevonások után alig látszik valami a Sekanina ábrákon. 10 fokos elforgatás.

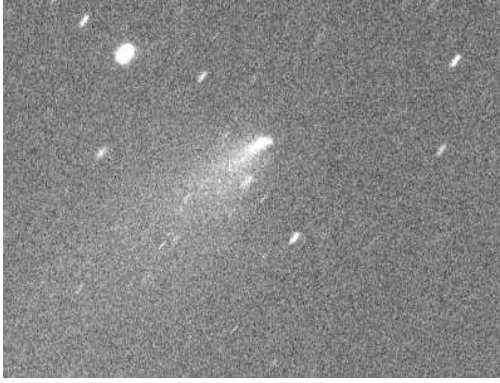


53. ábra. 2006. április 21-én
(G)

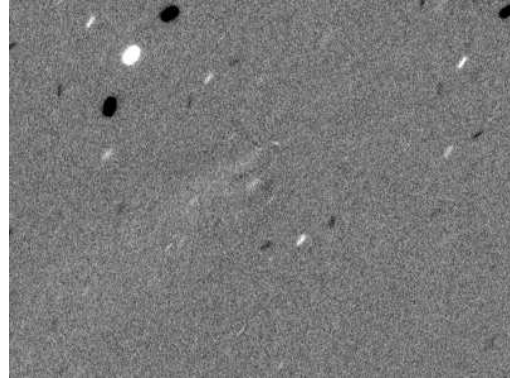


54. ábra. 04.21-i kép L-S ábrája

2006.04.21. A kóma jól láthatóan felfényesedett. Az üstökös csóvája tisztán kivehető, valószínűleg jelentős anyagledobódás zajlik le a G magon. 10 fokos elforgatás.

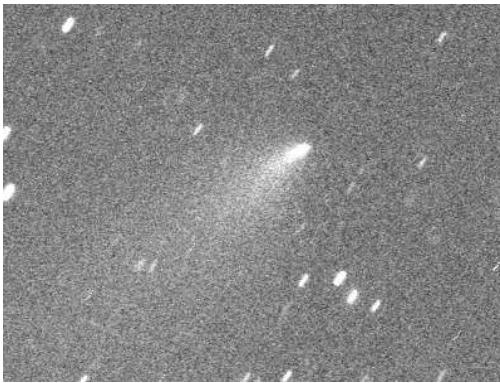


55. ábra. 2006. április 23-án (G)

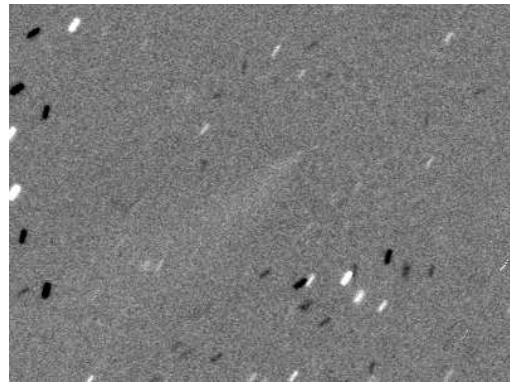


56. ábra. 04.23-i kép L-S ábrája

2006.04.23. Két nappal később a kóma fényessége csökkent. Húsz fokos elforgatás mellett alig láthatóan, de megfigyelhető a mag csóvája. További apró darabok látszanak a mag közelében.



57. ábra. 2006. április 24-én (G)

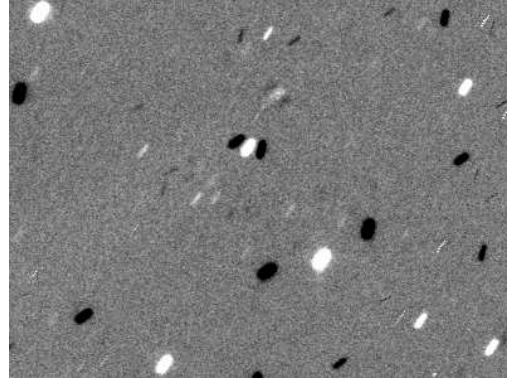


58. ábra. 04.24-i kép L-S ábrája

2006.04.24. Csillapodni látszik a korábbi heves kitörés a kóma elnyúlt formát vesz fel.



59. ábra. 2006. április 25-én
(G)



60. ábra. 04.25-i kép L-S ábrája

2006.04.25. Egészen elnyúlt lesz a mag kómája. Valószínűleg - az előző kitörésnél halványabb - újabb kitörés következett be a mag felszínén. A Sekanina ábrán a mag mögött több apró darabot véltem felfedezni.

3. További munkaterv

A vizsgált üstökös az utóbbi 3 visszatérésekor szokatlan viselkedést mutatott, így további terveink között szerepel, hogy az elkövetkező napközeli állapotairól is beszámolhassunk. Következő földközelsége 2011 október-novemberében lesz, az üstökös 1,6 Cs.E. távolságra közelíti majd meg a Földet. A megfigyelés szempontjából különösen kedvezőtlen, hogy perihélium előtt kis elongációban figyelhetjük majd meg (<30 fok), a perihélium után (október 15) viszont az üstökös deklinációja gyorsan csökken, október végére -30 fok alá süllyed. Így a Schwassmann-Wachmann 3 üstökös 2011-ben a magyarországi megfigyelők számára gyakorlatilag az egész láthatóság során megfigyelhetetlen marad. A 2017. márciusi földközelség (1,4 Cs.E.) alkalmával a feltételek kedvezőbbek lesznek, így lehetőség nyílhat az üstökös megfigyelésére (elongáció 50 fok, deklináció -15–20 fok).

A megfigyelések mellett fejlesztünk egy C++ programot is, amelyben a magot modellezzük és 1.2.2. fejezetben vázolt széthullási okokat teszteljük. A modell fő célja, hogy megalapozott véleményt formálhassunk, hogy milyen okok játszhatnak közre az üstökös pusztulásában.

4. Összefoglalás

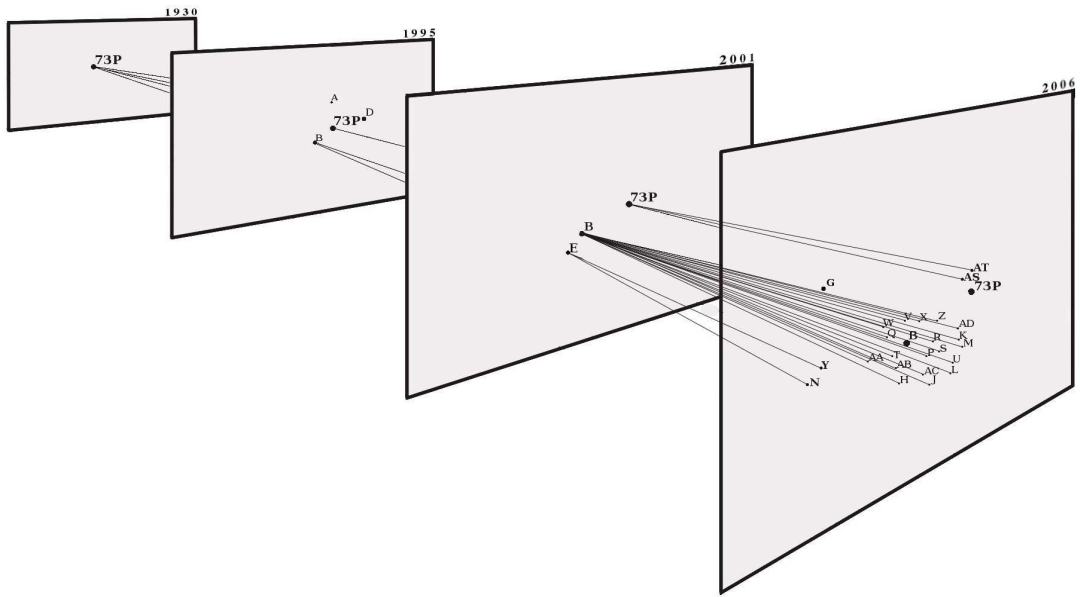
2006 első félévében – 5 hónapon keresztül – témavezetőm és munkatársa méréseket végeztek a 60 cm-es piszkéstetői Schmidt távcsővel a 73P/Schmassmann-Wachmann üstökös főkomponenséről ill. több mellékkomponenséről. Mivel az üstökös a korábbi 2 visszatérésekor is már látványos kitöréseket és darabolódást produkált, így a mérések legfőbb célja egy ilyen viszonylag ritka jelenség dokumentálása volt. A munkálatokhoz a feldolgozás fázisában csatlakoztam. Feladatom az adatok körültekintő feldolgozása és a megfigyelt jelenségek leírása volt. Larson-Sekanina ábrákat készítettem a B és G magról abból a célból, hogy bizonyítékot találjak az üstökös pusztulására. Erőfeszítéseimet siker koronázta, mert a tucatnyi felvétel között akadt olyan, amelyen minden kétséget kizáróan megfigyelhető volt a megjósolt jelenség. Több morfológiai alakzatot is sikerült azonosítanom (jetek, szökőkutak, "bajszok"). Ezután a képek apertúra fotometriáját is elvégeztem, hogy – fénygörbék segítségével – további bizonyítékot szolgáltatassak. A fénygörbék viszonylag csak kevés mérési pontot tartalmaztak mégis kijelenthető, hogy a görbék hirtelen megváltozása (felfényesedés) egy-egy fragmentációval azonosítható.

Munkám másik részét olaszországi mérések adták. A CARA-program keretein belül mérések készültek ugyanebben az időszakban a B,C és G magról. A program az üstökös fényességét ill. $Af\rho$ értékét méri, amelyből az égitest aktivitására következtethetünk. A kómaprofilok meghatározások után az ábrákon tisztán látszódnak a kitörésből származó hatalmas portermelődési ráták. Amíg a C mag esetében a projektált kitöltési tényező folyamatosan a fényességgel összhangban nőtt, addig a B és G mag esetében a függvény rendkívül gyorsan változott időben. A B nukleusz hektikus változásokat mutatott. Az adatok alapján arra lehet következtetni, hogy talán a G mag is hasonlóan viselkedett, azonban halványsága miatt a megfigyelések ritkásak, így az adatsor kevésbé látványos.

Mindezen eredmények után arra az következtetésre jutottunk, hogy további szétesés következett be, ráadásul több szinten⁵. A korábbi pusztulásból származó mellékkomponensekről újabb darabok szakadtak le (61. ábra). Ezek alapján azt mondhatjuk, az üstökös iskolapéldája a kaszkád fragmentációnak és, hogy szerkezete leginkább egy hatalmas kőrákáshoz hasonlít, amelyről, szintén több elemből álló darabok szakadnak le a visszatérések alkalmával.

A dolgozatban bemutatott eredményekből egy cikk is született, amely az MNRAS tudományos folyóiratban fog megjelenni, és jelenleg átdolgozás alatt áll.

⁵lsd. 10. ábra



61. ábra. A lehetséges kaszkád fragmentáció vázlatos rajza

Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet szeretném kifejezni témavezetőmnek, Dr. Szabó M. Gyulának, hogy bármilyen felmerülő kérdésemre készségesen válaszolt és hasznos tanácsaival, észrevételével könnyítette ezen diplomamunka elkészítését. Köszönetem szeretném még kifejezni Sárneczky Krisztián PhD hallgatónak, aki méréseivel és segítő munkájával hozzájárult munkám sikerességéhez. Végül, de nem utolsó sorban hálával tartozom Szüleimnek és Kedvesemnek, akik minden erkölcsi és anyagi támogatást megadtak munkám végzésében.

Nyilatkozat

Alulírott Pálfi Dénes, csillagász szakos hallgató, kijelentem, hogy a diplomadolgozatban foglaltak saját munkám eredményei, és csak a hivatkozott forrásokat (szakirodalom, eszközök, stb.) használtam fel.

Tudomásul veszem azt, hogy szakdolgozatomat/diplomamunkámat a Szegedi Tudományegyetem könyvtárában, a kölcsönözhető könyvek között helyezik el.

Szeged, 2009. május 15.

Hivatkozások

- [1] A' Hearn, M. Schleicher, D. G., Millis, R. L., Feldman, P. D. & Thompson, D. T. 1984, *AJ*, **89**, 579–591.
- [2] A' Hearn, M., Belton, M. J. S., Delamere W. A., 2005, *Science*, **310**, 258–264.
- [3] Asphaug, E. & Benz, W. 1996, *Icarus*, **121**, 225–248.
- [4] Ábrahám Péter, személyes közlés
- [5] Biermann, L. & Treffitz, E. 1964, *Zeitschrift für Astrophysik*, **59**, 1–28.
- [6] Boehnhardt, H., & Käufel, H. U. 1995, *IAU Circ.* 6274.
- [7] Boehnhardt, H. 2002, *Earth Moon Planets*, **89**, 91–115.
- [8] Beech, M. & Gauer K. 2002, *Earth Moon Planets*, **88**, 211–221.
- [9] Candy, M.P. 1979, *IAU Circ.* No. 3393.
- [10] Crovisier, J., Bockelee-Morvan, D., Gerard, E., Rauer, H., Biver, N., Colom, P. & Jorda, L. 1996, *A&A*, **310**, L17–L20
- [11] Cruikshank, D.P., Hartmann, W.K., & Tholen, D.J. 1985, *Nature*, **315**, 122–124.
- [12] Divine, N., Fechtig, H., Gombosi, T.I., Hanner, M. S., Keller, H. U., Larson, S. M., Mendis, D. A., Newburn, R. L., Reinhard, R., Sekanina, Z. & Yeomans, D. K. 1986, *Space Sci. Rev.*, **43**, 1–104.
- [13] Fűrész, G. 1998, TDK, SZTE
- [14] Goldreich, P. & Ward, W.R. 1973, *AJ*, **183**, 1051–1061.
- [15] Green, D. W. E., ed. 1996a, *IAU Circ.* 6234.
- [16] Green, D. W. E., ed. 1996b, *IAU Circ.* 6246.
- [17] Green, D. W. E., ed. 2006, *IAU Circ.* 8679.
- [18] Greenberg, J.M. 1977, in: *Comets, Asteroids, Meteorites*, University of Tolado Press, OH
- [19] Greenberg, J.M. 1998, *A&A*, **330**, 375–380.
- [20] Harris, W. M., Combi M. R., Honeycutt R. K., Mueller B. E. A. & Scherb F. 1997, *Science*, **277**, 676–681.
- [21] Huebner, W.F. 1965, *Zeitschrift für Astrophysik*, **63**, 22–34.
- [22] Jehin, E., Boehnhardt H., Bonfils X., Schuetz O., Sekanina Z., Billeres M., Garrard G., Leisy P., Marchis F., & Thomas D. 2002, *Earth Moon Planets*, **90**, 147–151.
- [23] Kamoun, P.D., Campbell, D.B., Ostro, S.J., Pettengill, G.H. & Shaphiro, I.I. 1982, *Science*, **216**, 293–296.

- [24] Keller, H. U. 1976, *A&A*, **38**, 150–152.
- [25] Keller, H. U. & mtsai 1986, *Nature*, **321**, 320–326.
- [26] Kronk, G. W. 2003 in: *Cometography*, Cambridge Univ. press
- [27] Larson, S. M., Sekanina, Z. 1984, *AJ*, **89**, 571–578.
- [28] Lyttleton, R.A. 1953, in: *The Comets and Their Origin*, Cambridge Univ. Press
- [29] Marsden, B.G. 1984, *Quart. J. Roy. Astron. Soc.*, **26**, 106–114.
- [30] Marsden, B. G., ed. 1996, *IAU Circ.* 6301.
- [31] Oort, J.H. 1950, *Bulletin of the Astronomical Inst. of the Netherlands*, **IX**, 91–110.
- [32] Rodionov A. V., Jorda L., Jones G. H., Crifo J. F., Colas F. & Lecacheux J. 1998, *Icarus*, **136**, 232–267.
- [33] Roemer, E. 1966, *Nature et Origine des Comètes*, 15–22.
- [34] Rubin M, K.C. Hansen, T.I. Gombosi, M.R. Combi, K. Altwegg & H. Balsiger 2009, *Icarus*, **199**, 505–519.
- [35] Safronov, V.S. 1969, *Nasa Technical Memorandum*, TT F–677
- [36] Sagdeev, R.Z. 1986, *Nature*, **321**, 259–262.
- [37] Samarasinha, N. H.; Mueller, B. E. A.; Belton, M. J. S. & Jorda, L. 2004, in: *Comets II*, 281–299. Univ. of Arizona, Tucson
- [38] Sekanina, Z. 1982, in: *Comets* (L. L. Wilkening, ed.), 251–287. Univ. of Arizona, Tucson
- [39] Sekanina, Z., Boehnhardt, H., Käufl, H., & Birkle, K. 1996, *JPL Cometary Sciences Group Preprint Series*, No. 183.
- [40] Sekanina, Z. 2005, *Internat. Comet Quart.*, **27**, 225
- [41] Sekanina, Z. 2007, *IAUS*, **236**, 211–220.
- [42] Shestakova, L.I. & Tambotsteva, L.V. 1997, *Earth Moon Planets*, **76**, 19–45.
- [43] Smith, B.A., Larson, S.M., Szego, K. & Sagdeev, R.Z. 1987, *Nature*, **326**, 573–574.
- [44] Szabó, Gy. M. 2003, in: MACE 2003 abstracts (ed. Salvador Sánchez), <http://www.oam.es/oam/mace/abstracts2.htm>
- [45] Szabó, Gy. 2005, *Doktori értekezés*, SZTE
- [46] Szabó, Gy. M., Kiss, L. L., Sárneczky, K. 2008, *ApJ*, **677**, 121–124.
- [47] Tang, Yuan; Qian, Bochen; Gu, Mingfeng; Tao, Jun & Song, Baojun 1999, *AcASn*, **40**, 156–164.
- [48] Tauber, F. & Kührt, E. 1987, *Icarus*, **69**, 83–90.

- [49] Tóth, I. 2001, *A&A*, **368**, L25–L28.
- [50] Trabatti, R., 2004, <http://cara.uai.it/data/programs/Xafrho1.tar.gz>
- [51] Vsekhsvyatskii, S. K. 1964, *NASA TT F-80*, S. Monson Press, Jeruzsalem
- [52] Whipple, F. 1950, *AJ*, **111**, 134–141.
- [53] Whipple, F. L. 1963, in: *The Solar System IV: The Moon, Meteorites, and Comets*, 639–663. Univ. of Chicago, Chicago.