

saként értelmezett. A „Boltzmann vagy Gibbs?” kérdésre Einstein salamoni válasza tehát „Boltzmann és Gibbs”.

Az 1917/18-as kurzust követő években Einstein tevékenysége a statisztikus mechanika terén szemináriumára korlátozódik. 1921-ben megismerkedik Szilárd Leóval, aki attól kezdve ismételtlen kéri, hirdessen szemináriumot statisztikus mechanikáról. Ennek Einstein több ízben eleget is tett. A szemináriumokon részt vett, ha Berlinben volt, Neumann János és minden bizonnyal Wigner Jenő, Gábor Dénes, Polányi Mihály és talán Bay Zoltán is. Szilárd itt „próbálta ki” a tárgyat érintő munkáit [27], és (valószínűleg) itt érlelődtek meg Neumann János elgondolásai a kvantummechanika és a statisztikus mechanika kölcsönös kapcsolatáról is [28].

Mint Neumanntól tudjuk, a kvantummechanikai entrópiadefiníciójához (ami egyébként nem más, mint (2) átírása a kvantummechanika nyelvére), Szilárd adta az ötletet [29]. Jóllehet a Boltzmann-féle entrópiadefiníció (1) nem ültethető át a kvantummechanika operátorformalizmusába, helye a kvantumfizikában éppúgy megvan, mint a klasszikusban: W a kvantumállapotok száma. Boltzmann entrópiafogalmából bontakozott ki Szilárd merőben új interpretációja is, miszerint az entrópia a vizsgált rendszer állapotára vonatkozó ismerethiány kvantitatív mértéke. (Ezzel teljes összhangban van a későbbi információelmélet entrópiaki-fejezése, amely Gibbs definíciójára emlékeztet.)

A mai statisztikus fizika magában foglalja mind Boltzmann, mind Gibbs szemléletét. A szintézis, melyet Einstein Boltzmann és Gibbs elméleteinek elemeiből, valamint saját felismeréseiből hozott létre és egyetemi kurzusában körvonalazott, a fejlődés egy közbülső állomását jellemzi, de ma is megállja a helyét.



Köszönettel tartozom Polányi Jánosnak a számtalan jó tanácsért.

Irodalom

1. <http://echo.mpiwg-berlin.mpg.de/content/relativityrevolution/zabel>
2. GALÁNTAI J.: *Az első világháború* – Gondolat, Budapest, 1988.
3. A. FÖLSING: *Albert Einstein. Eine Biographie* – Suhrkamp, Frankfurt/M, 1993.
4. *Einstein on Peace* (szerk. O. Nathan, H. Norden) – Schocken, New York, 1968.

5. M. BORN in: *Albert Einstein/Max Born, Briefwechsel 1916–1955.* – Nymphenburger, München, 1969.
6. *Albert Einstein/Arnold Sommerfeld, Briefwechsel* (szerk. A. Hermann) – Schwabe & Co., Basel/Stuttgart, 1968.
7. R. KUBO ET AL.: *Statisztikus Mechanika* – Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1976.
8. HORVÁTH J.: *Termodinamika és Statisztikus Mechanika* – Tankönyvkiadó, Budapest, 1970.
9. A. ROSENTHAL – Ann. Physik 42 (1913) 796; M. PLANCHEREL – Ann. Physik 42 (1913) 1061
10. J. SINAI in: *Statistical Mechanics, Foundations and Applications* (szerk. T.A. Bak) – Benjamin, New York, 1967.
11. J.W. GIBBS: *Elementary Principles of Statistical Mechanics* – Yale UP, New Haven, 1902; németül *Elementare Grundlagen der Statistischen Mechanik* (ford. E. Zermolo) – Teubner, Leipzig, 1905.
12. D. RUELLE: *Statistical Mechanics* – Benjamin, New York, 1969.
13. H. HAKEN: *Synergetics* – Springer, Berlin etc., 1977.
14. P. EHRENFEST, T. EHRENFEST: *Encykl. Math. Wiss.* IV/32, 1911; angol ford.: *The Conceptual Foundations of the Statistical Mechanics* – Cornell UP, Ithaca, 1959.
15. P. HERTZ in: WEBER-GANS: *Repertorium der Physik*, Bd. I/2. – Teubner, Leipzig, 1916.
16. A. EINSTEIN – Ann. Physik 9 (1902) 417; 11 (1903) 170; 14 (1904) 354; 34 (1911) 175
17. L. BOLTZMANN: *Vorlesungen über Gastheorie*, 2 Bde. – J.A. Barth, Leipzig, 1896/1898.
18. A. PAIS: „Subtle is the Lord...” *The Science and Life of Albert Einstein* – Oxford UP, Oxford etc., 1982.
19. M. BORN in: *Albert Einstein: Philosopher-Scientist* (Vol. 1). (szerk. A. Schlipp) – Open Court, La Salle, Ill., 1982.
20. M.J. KLEIN in: *Albert Einstein – Historical and Cultural Perspectives* (szerk. G. Holton, Y. Elkana) – Princeton UP, 1982.
21. A. EINSTEIN – Ann. Physik 22 (1907) 180; 22 (1907) 800; 33 (1910) 1275
22. L.D. LANDAU, E.M. LIFSHIC: *Elméleti Fizika, V. köt.: Statisztikus Fizika I.* – Tankönyvkiadó, Budapest, 1981.
23. A. EINSTEIN – Ann. Physik 17 (1905) 549; Z. Electrochem. 14 (1908) 235
24. T.L. HILL: *Statistical Mechanics* – McGraw-Hill, New York, 1956.
25. M.J. KLEIN – Physica 26 (1960) 1073
26. Boltzmann módszerét követi (és általános statisztikának nevezi) még A. SOMMERFELD is 1952-ben megjelent tankönyvében (*Vorlesungen über Theoretische Physik Bd. V: Thermodynamik und Statistik* – Akad. Verl. Ges., Leipzig); a hazai szakirodalomban KÁROLYHÁZY F., MARX GY. NAGY E.: *Statisztikus Mechanika* – Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1965.
27. L. SZILÁRD – Z. Physik 32 (1925) 753; 53 (1929) 840
28. W. LANUETTE: *Genius in the Shadows: A biography of Leo Szilard* – Ch. Scriber's Sons, New York, 1992
29. NEUMANN J.: *A kvantummechanika alapjai* – Akadémiai Kiadó, Budapest 1980.

MEKKORÁK AZ ÜSTÖKÖSMAGOK?

Tóth Imre
MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati
Kutatóintézete, Budapest

Az üstökösök, kisbolygók, meteoroidok¹ a Naprendszer kisebb égitestjei. Közöttük az úgynevezett primitív kisebb égitestek, az üstökösök, kentaurok,² transzneptun objektumok³ és bizonyos típusú kisbolygók, különösen fonto-

sak a Naprendszer kialakulási körülményeinek megismerésében. Ezek az egyszerű felépítésű, őseredeti (primordiális) kis égitestek a bolygórendszerünk kialakulásakori maradékanyagok, amelyek belsejükben nagyrészt még szinte érintetlenül megőrizték a képződésükkor az ősi Naprendszerben végbement fizikai és kémiai folyamatok lenyomatát. Felszínük a kialakulásuk óta a szoláris és galaktikus sugárzások hatására átalakulhatott, valamint más kisebb égitestekkel (pl. meteoroidokkal, meteorokkal) való ütközések nyomait is őrzik. Jóllehet, a felszínük és ahhoz közeli rétegük a kialakulásuk óta eltelt igen

¹ A meteoritikus anyag és a kisbolygó- (aszteroid-) méret közötti 10^0 – 10^2 méteres kis égitestek.

² A Nap körül 5,2–30 CsE fél nagytengelyű ellipszispályán, a Jupiter és Neptunusz pályái között keringő kis égitestek. 1 CsE (Csillagászati Egység) a földpálya fél nagytengelye ($\approx 1,496 \cdot 10^8$ km).

³ A Neptunuszon túli aszteroidóv objektumai: Kuiper-öv, illetve a Szórt Korong Objektumok (SDO-k) is.

hosszú idő alatt módosult, de a felszín alatt a belsejükben ezeknek az átalakító folyamatoknak nem volt jelentős hatása. A legkisebb, de egyszerű őseredeti felépítésük miatt a legfontosabb, egyébként pedig a legrégebbi időktől fogva tanulmányozott kis égitestek az üstökösök. Az üstökösök kutatásának alapkérdése az, hogy milyen az üstökös magja (mérete, alakja, forgása, színe, albedója, azaz fényvisszaverő képessége, termális tulajdonságai stb.), milyen a felszíni és belső szerkezete, miből van, hol és hogyan keletkezett. Ebben a cikkben először nagyon röviden összefoglalom az idevonatkozó legfontosabb ismereteket az üstökösök magjáról, majd utána a magok mérete és közelítő alakja meghatározásával kapcsolatos legújabb eredményeket ismertetem.

Az üstökösökről röviden

Az üstökösök szublimációra képes, jeges-poros őseredeti kis égitestek. Egyébként az aktív üstökösökön kívül a többi primitív kisebb égitest közül néhány szintén mutat szublimációs aktivitást. A szublimáció következtében a kis égitest lassan tömeget veszít, mérete csökken, alakja megváltozik, illetve felszínének geológiai szerkezete is jelentősen átalakul. Az üstökösök magja ugyanis a Naphoz közeli pályaszakaszon – de több esetben a Naptól nagyon távol is – kigázósodást mutat: a magot alkotó jeges (főleg vízjég, szén-monoxid, szén-dioxid) szublimálnak, és a bennük cementált poranyag is kiszabadul, amelyből kialakul az üstökös kómája, és kifejlődnek a gáz- és porcsóvíai. A kóma tulajdonképpen nem kötött légkör, mert a kisméretű mag gyenge gravitációja nem képes megtartani a kiszabadult gáz- és poranyagot. Az üstökös fizikai, illetve fenomenológiai definíciója a magban nagy tömegben jeges poranyag és permanens kóma meglétét követeli meg. Továbbá, ezenkívül van még a pályaelemeket figyelembe vevő égi mechanikai definíció is. A legutóbbi években ugyanis egy korszerű, az égi mechanika mélyebb összefüggéseire alapuló osztályozás kezd elterjedni: ez pedig a Nap – Jupiter – kis égitest (üstökös) kör korlátozott háromtest-probléma *Tisserand-paraméterén*⁴ (T_J) alapul. Ezek szerint vannak ekliptikai üstökösök (*Ecliptic Comet*, EC), amelyek a Jupiter-család üstökösösei ($2 < T_J < 3$) plusz a Naprendszer belső térségeibe is ellátogató 2P/Encke üstökös ($T_J = 3,03$) és a hozzá hasonló objektumok csoportja. A többiek a közel izotróp pályaeloszlású üstökösök (*Nearly-isotropic Comet*, NIC), amelyekre $T_J < 2$. Ez a csoport is két komponensből áll: az Oort-felhőből az első visszatérésüket átélőkből, valamint az ismert Halley-típusúakból.

⁴ Tisserand-paraméter: $T_J = a_J/a + 2[(1 - e^2)a/a_J]^{1/2} \cos(i)$, ahol a_J a Jupiter pályájának fél nagytengelye, a a kis égitest pályájának fél nagytengelye, e az excentricitása, és i a Jupiter – kis égitest pályái közötti kölcsönös pályahajlás szöge. A kör korlátozott háromtest-probléma T_J paramétere jó közelítés hosszú időn keresztül a valódi Naprendszerben való mozgás jellemzésére annak ellenére, hogy a valóságban a többi nagybolygó perturbációs hatása is jelen van, illetve az üstökösök mozgását az úgynevezett nem gravitációs eredetű, az aktivitásukkal összefüggő „rakétaszzerű” erőhatások is befolyásolhatják, sőt sok ekliptikai és Halley-típusú üstökös pályája kaotikus.

Az üstökösöknek alapvetően két nagy forrásvidéke, rezervoárja van a Naprendszerben: egy gömbszimmetrikus térrész, amely néhány tízezer csillagászati egység távolságnál kezdődik és mintegy 1–1,5 fényév távolsáig terjed ki a Naptól, gyakorlatilag addig a távolsáig, ameddig a Nap gravitációs hatása dominál. Ez az Oort-féle üstökösfelhő, amely a becslések szerint mintegy billió (10^{12}) kis jeges-poros üstökösöt tartalmaz. Az Oort-felhő a forrása a közel izotróp pályaeloszlású üstökösöknek. A másik forrásvidéke az üstökösöknek a Neptunusz bolygó pályáján túl elhelyezkedő transzneptun övezet, amelynek része a Kuiper-öv és a Szórt Korong Objektumok (SDO-k). Ez az ekliptikai üstökösök fő forrása, utánpótlási övezete. Vannak nem üstököszerű (azaz nincs kómájuk), hanem kóma és csóva nélküli, aszteroidaszerű kis égitestek is igen elnyújtott ellipszispályán. Ezek az üstökösökre emlékeztető elnyújtott ellipszispályán mozognak, azonban nem mutatnak sem kómát, sem csóvát, mint az üstökösök, amikor bekerülnek a Naprendszer belső térségeibe. Ezek egy része igazi, közetszerű (nem poros jég) aszteroida és nem üstökös. Egy másik részük azonban hosszú ideig aszteroidaszerű, kóma nélküli objektum, majd a Naphoz közeli pályaszakaszon üstököszerű aktivitást mutat. Pályájuk alapján ezek a kisbolygó vagy kisbolygó/üstökös átmeneti objektumok, az úgynevezett *damokloidok*, az 5335 Damocles névadó aszteroida után elnevezve. Ezekre $T_J < 2$, vagyis eredetüket tekintve Oort-felhőből eredő objektumok. Sőt olyan objektumok is vannak, amelyek tipikusan kisbolygószerű pályán keringenek ($T_J > 3$), de mégis időnként üstökösaktivitást is mutatnak. Ma még nem ismerjük igazán ezeket az objektumokat, és a kutatásuk a jövőben is folytatódik majd. Látható, hogy az üstökösjelenséget mutató objektumok osztályozása nem mindig találkozik a klasszikus üstökösfogalommal (pl. elnyújtott pálya), átfedések lehetnek a kisbolygók tulajdonságaival vagy már inaktív „alvó” üstökösök magokról is szó lehet.

A földi megfigyelések és az űrszondák eredményei alapján az üstökösök a Naprendszer legsötétebb égitestjei: igen alacsony a felületük fényvisszaverő képessége (a geometriai albedójuk $0,04 \pm 0,02$). Méretük szubkilométerestől legfeljebb néhány száz tíz kilométeresig terjed. E sorok írójának a Hubble-űrtávcsöve (HST) egy nemzetközi munkacsoportban folytatott vizsgálatai szerint az ekliptikai üstökösök legtöbbször szubkilométeres méretű, és csak igen kevés több kilométeres EC üstökösök lehet.

Fontos folyamat a kis égitestek szétesése, mert ennek következtében keletkezett magtöredékek, fragmentumok az eredeti nagyobb test belsejéből származnak, és az őseredeti (primordiális) anyagról hordoznak információt: például gyakori esemény az üstökösök szétesése. Az üstökösök gyakran és eredetüktől függetlenül a pályájuk mentén bárhol szétesnek, teljesen feldarabolódnak, és poros, meteoritikus anyag marad vissza szétszórva a pálya mentén. Ma még nem tudjuk, milyen folyamatok vezetnek az üstökösök széteséséhez, de nyilván a törékeny, laza szerkezetük megkönnyíti a dezintegrálódásukat. Például a C/1999 S4 (LINEAR) Oort-felhő üstökösökének teljes szétesésének megfigyelése a HST és

VLT-vel⁵ is alátámasztja azt, hogy a mag építőelemei legfeljebb tíz és száz méter közöttiek (*Weaver, Sekanina, Tóth* és mások, 2001). Megjegyezzük, hogy az Oort-felhő üstökösseiről olyan kevés megfigyelés áll rendelkezésre, hogy nem ismerjük a magok tulajdonságait, illetve méreteloszlását, amely többek között az Oort-felhő tömegére vonatkozó becslést lehetővé tenné. Az Oort-felhő üstökösseinek megismerésében a jövő nagy teleszkópjaitól várunk jelentős előrelépést.

A mai elméletek szerint a Naprendszer ősködének primitív, jeges poranyagából kialakult üstökös-mag-alkotó építőelemek, blokkok mintegy 70–100 méter méretűek lehetnek: ezek a kometezimálok vagy üstökös-mag-kezdemények, hasonlóan a többi égitestet felépítő planetézimálokhoz, bolygó-kezdeményekhez. Tehát ezen modell szerint kisebb-nagyobb építoblokkokból tevődik össze a mag. Az üstökös-magok igen törékeny, kis belső összetartó erővel egyben tartott égitestek, a mag egybentartásában nagy szerepe van az egyes építőelemek közötti gravitációs vonzásnak is. Nem tudjuk azonban, hogy ezen építőelemeknek milyen a belső finomszerkezete, milyen szorosan töltik ki az üstökös-mag belsejét, de a magok kis átlagsűrűsége ($0,3\text{--}1,0\text{ g cm}^{-3}$) porózus, üreges belső szerkezetre utal. 2004-ben azonban éppen a Stardust („Csillagpor”) űrszondaközeli képfelvételei a 81P/Wild 2 ekliptikai üstökös magjáról rámutattak arra, hogy ez az üstökös-mag inkább egy tömbből álló monolit, és nem a fent vázolt klasszikus modellnek megfelelő 70–100 méteres építoblokkokból összetevődő test. A 81P/Wild 2 magjában jelentős szerepe van a belső összetartó erőnek és nem a gravitációnak, mint azt a klasszikus építőelem-modell feltételezi. Tehát a Stardust eredményei után az üstökös-magok keletkezéséről, felépítéséről alkotott modelleket újra kell majd gondolni, illetve felvetődik, hogy az üstökösök belső szerkezete egymástól eltérő lehet.

Méret és alak meghatározása

Helyszíni (in situ) vizsgálatok űrszondákkal

Az ideális vizsgálati módszer az, ha űrszondát küldünk az üstököshöz, lehetőleg minél közelebb a maghoz, esetleg a felszínére. Eddig csak három üstökös magjáról készültek közeli képfelvételek *in situ* űrszondák segítségével: 1P/Halley (VEGA 1 és 2; Giotto, 1986), 19P/Borrelly (Deep Space 1, 2001), 81P/Wild 2 (Stardust, 2004) (*1. ábra*). Az *1. táblázat* foglalja össze az ismert méretű és alakú üstökös-magok adatait: ezek a fenti *in situ* üstökös-szondák képfelvételeinek elemzéséből adódtak, valamint a 10P/Tempel 2 üstökösről földi teleszkópokkal készített megfigyelésekből kapott eredmények. E sorok írója részt vett a nemzetközi VEGA űrprogramban, a MTA KFKI Ré-

<i>1. táblázat</i>			
Ismert méretű és alakú üstökös-magok			
üstökös	$a \times b \times c$ (km \times km \times km)	1 : a/b : a/c	megjegyzés
1P/Halley	$7,65 \pm 0,25 \times 3,61 \pm 0,25 \times 3,61 \pm 0,25$	1 : 2,13 : 2,13	(1)
	$7,21 \pm 0,15 \times 3,7 \pm 0,1 \times 3,7 \pm 0,1$	1 : 1,95 : 1,95	(2)
10P/Tempel 2	$8 \times 4 \times 4$	1 : 2,0, $c = b$	(3)
	$8,2 \times 4,9 \times 3,5$	1 : 1,67 : 2,34	(4)
19P/Borrelly	$4,0 \pm 0,1 \times 1,60 \pm 0,02 \times 1,60 \pm 0,02$	1 : 2,5, $c = b$	(5)
	$4,4 \pm 0,15 \times 1,80 \pm 0,08 \times 1,80 \pm 0,08$	1 : 2,4, $c = b$	(6)
81P/Wild 2	$2,75 \pm 0,05 \times 2,00 \pm 0,05 \times 1,65 \pm 0,05$	1 : 1,38 : 1,67	(7)

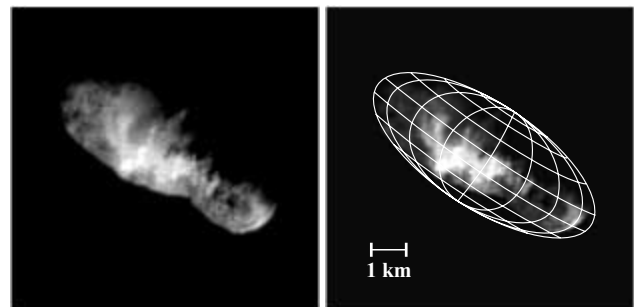
Megjegyzés:

- (1) VEGA 1, 2, közeli elrepülés, képfelvételek, 1986.
- (2) Giotto HMC, közeli elrepülés, képfelvételek, 1986.
- (3) Földi teleszkóppal CCD fotometria, 1989.
- (4) Földi teleszkóppal megfigyelések és modell, 1989.
- (5) Deep Space 1 MICAS (*Miniature Integrated Camera Spectrometer*), közeli elrepülés, képfelvételek, 2001.
- (6) HST WFPC2 nagy precizitású fotometria, 1994.
- (7) Stardust OpNav kamera, közeli elrepülés, képfelvételek, 2004.

szecske- és Magfizikai Kutatóintézete által fővállalkozásban készített fedélzeti televíziós képfelvevő rendszer elkészítésében és *Szegő Károly* irányításával a tudományos adatok kiértékelésében, valamint 1994-ben egy francia–amerikai munkacsoportban a 19P/Borrelly üstökös magjának a HST új *Bolygó-kamerájával* (*Wide-Field Planetary Camera 2*, WFPC2) történt fotometriai megfigyelésében. A HST nagy precizitású fotometriai adataiból a mag alakját sikerült egy közelítő modellel leírni 1994-ben. Ez az elnyújtott ellipszoidmodell ($a > b = c$, ahol a fél tengelyek a , b és c) kitűnő egyezést mutat a NASA Deep Space 1 űrszondaközeli felvételei alapján 2001-ben meghatározott magméretekkel: a modell ellipszoid alakú, és konvex burka a 19P/Borrelly elnyújtott alakú magjának (*1. táblázat*, *1. ábra*).

Több helyszíni űrszonda is végez vizsgálatokat közvetlen közelről üstökös-magok méretének, alakjának és fizikai paramétereinek, szerkezetének meghatározása céljából, és követi végig aktivitásukat. A NASA Discovery Mission programja keretében 2005. január 12-én indított Deep Impact űrszonda készített képfelvételeket a 9P/Tempel 1 (EC) üstökös magjáról, és abba egy 370 kg tö-

1. ábra. Balra: a 19P/Borrelly üstökös magjáról a NASA Deep Space 1 (DS1) űrszondája által készített legközelebbi kép (2001. szeptember 22.). A szabálytalan alakú test konkáv, a kép síkjából kifelé hajlik, a megfigyelő felé. Jobbra: ez a kép és a HST PC2-vel 1994-ben készült megfigyelésekből meghatározott méret és alak alapján készített elnyújtott forgásiellipszoid-modell együtt jól illeszkedik.



⁵ *Very Large Telescope*, Európai Déli Observatórium (ESO), Chile.

megű, rézből készült próbatestet irányít bele mintegy 10 km másodpercenkénti sebességgel 2005. július 5-én Közép-európai Zónaidő szerint. A továbbrepülő szonda kamerája a próbatestet becsapódásának következményeit is végigköveti a tervek szerint. Várható, hogy a becsapódás egy új aktív területet hoz létre. Az ESA Horizon 2000 programja keretében a 2004. március 2-án indított Rosetta űrszonda a 67P/Churyumov–Gerasimenko üstökös magját fogja tanulmányozni majd 2014/2015-ben hosszú időn át keringő és leszálló egységgel is. A NASA Discovery Mission programja keretében még csak tervezés alatt áll az Odyssey Comet Nucleus Orbiter, amely a tervek szerint 2009. október 15-én indulna el, és 2013. október 13-án érné el úti célját a 46P/Wirtanen ekliptikai üstököst, amelynek maga körüli pályán hosszú időn keresztül (mintegy 9 hónapig) végezne megfigyeléseket és méréseket (régábbi terv szerint a 22P/Kopff ekliptikai üstököst látogatta volna meg). A HST-vel sikerült már mindegyik, itt említett űrprogram célüstökösének magját megfigyelni nemzetközi kutatási programok keretében.⁶ A helyszíni űrszondákkal – bár igen részletesen – csak néhány üstökös vizsgálható, vagyis nyilvánvalóan nem szolgáltathatnak sok objektumról adatot, azonban mérőföldkövek a Naprendszer megismerésében.

Radarcsillagászati megfigyelések

Az égitesteket távolról is meg lehet figyelni a radarcsillagászati technika eszközeivel. A megfigyelésekből a cél-objektumok mérete (radar keresztmetszete), alakja, forgási paraméterei, esetleg felszíni alakzatai, a felszín elektromos tulajdonságai (dielektromos állandó, polarizáció) meghatározhatók, továbbá a radaralbedő és a felszínen az anyag tömegsűrűsége is megbecsülhető. Ezenkívül az égitest pontos távolsága és térbeli sebessége, valamint pozíciója is meghatározható, és mindezekből a Nap körüli keringési pályája is kiszámítható. Amennyiben az üstökös magot por- vagy törmelékfelhő veszi körül cm-es, dm-es szemcsékből, akkor az abban levő porszemcsék méreteloszlása és össztömege is megbecsülhető. A radarcsillagászati megfigyelések nehézsége a következőképpen érzékeltethető. Egy kisméretű égitestről is elegendő radarvisszhangjelet kell visszakapni a zajhoz képest a kiértékeléshez. A jel/zaj viszony (SNR) a visszhangjel teljesítménye a vevő r.m.s. zajához viszonyítva:

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

ahol R_{tar} a célobjektum (target) távolsága, D_{tar} a célobjektum karakterisztikus radarátmérője, A a rádióteleszkóp (radarantenna) apertúrája, P_{tx} a kibocsátott jel teljesítménye, P_{rot} a céltárgy forgási periódusa, Δt az integrációs

idő. Látható, hogy a távolabbi objektumokra adott apertúránál ugyanakkora jel/zaj viszony eléréséhez az integrációs idő megnő $\Delta t \sim R_{tar}^8 A^{-4}$ szerint. Ezért a kis radarjel adó objektumok (üstökösök, kisbolygók) esetén a radarmegfigyeléseket kis földtávolságban, nagy apertúrájú és teljesítményű antennával, hosszú integrációs idővel lehet csak végezni. Az első, radarral megfigyelt üstökös a 2P/Encke volt (1980), amelyet az arecibói 305 méteres rádióteleszkóppal figyeltek meg radar üzemmódban az S-sávban (12,8 cm). Rádiuszára akkor 2,2 km-t határoztak meg. 1980–2002 között kilenc üstököst is megfigyeltek, de csak két esetben érte el az $SNR = 4$ -et: C/1983 H1 (IRAS–Araki–Alcock) rádiuszára 4,4 km és C/1996 B2 (Hyakutake) rádiuszára 2,1–2,4 km adódott. Az utóbbi években arecibói radart jelentősen modernizálták, aminek következtében például 1/20-ad részére csökkent a szükséges integrációs idő (Δt). 2003 novemberében a 2P/Encke-üstököst újból megfigyelték a földközelsége idején a felújított arecibói radarral az S-sávban. A radarkeresztmetszetre 0,84 km²-t kaptak, hasonlóan az 1980-ban mért értékhez. A radar albedója 0,055 (hasonló a látható színkép-tartománybelihez), a forgási periódusa 11,1 óra. A radarmegfigyelések egy 9,2 km hosszú (elnyújtott alakú) magot jeleznek. Felszínén az anyag tömegsűrűsége 0,5–1,0 g cm⁻³, ami megfelel az üstökösökra feltételezett átlagos sűrűségnek. A maghoz közel nem volt radarral kimutatható porszemcsefelhő. Bár a radarmódszer elég pontos eredményt ad, segítségével azonban csak néhány üstökös vizsgálható. A jövőben újabb és újabb radarcsillagászati módszereket alkalmaznak a jel/zaj viszony és a felbontás növelésére.

Csillagfedések (okkultációk) megfigyelése

Nagyon ritka esetben a látszó égi mozgása során az üstökös mag elfedhet egy távoli csillagot, és ez a fedés meg is figyelhető. A csillag fényét a hozzánk közelebb mozgó üstökös magja kitakarja, és a fedés időtartama, a látszó égi szögelfordulás, valamint a magnak a megfigyelőtől való távolságából kilométerben kiszámítható a fedési húr hossza, amely kisebb vagy egyenlő a kis égitest legnagyobb méretével. A fedési hurok hossza attól is függ, hogy a Föld felszínén honnan figyelik meg a kis égitestet: 1 ívmásodpercnél kisebb eltérés a hurok pozíciójában több 100 vagy 1000 km eltérést jelent a Föld felszínén. Több húr hosszának megmérése több földrajzi helyről lehetővé teszi a kis égitest méretének, alakjának közelítő meghatározását. Nagyobb kisbolygók esetében már többször alkalmazták a csillagfedések geometriai, asztrometriai módszerét más méretmeghatározási módszerek, például radiometriai, fotometriai módszerek független ellenőrzésére. Az üstökösököt fényes, zavaró, aktív kóma veszi körül, ami a csillagszerű megjelenésű aszteroidokhoz képest igen megnehezíti a csillagfedések megfigyelését. A Hale–Bopp (C/1995 O1) üstökösre sikerült egy húr hosszát megmérni, aminek alapján a rádiuszának 48 km-nél nagyobbak kell lenni. Továbbá, a nagyméretű Chiron kentaur (amikor kevésbé aktív volt) esetében egy csillagfedésből a rádiuszának alsó határa 90 ± 7 km, de ezt összevetve több más radiometriai (80 km) és infravö-

⁶ Ezek a 9P/Tempel 1, 22P/Kopff, 46P/Wirtanen, és 67P/Churyumov–Gerasimenko, illetve az útközben elveszett CONTOUR űrszondáé, a 73P/Schwassmann–Wachmann 3 voltak. A 67P/Churyumov–Gerasimenkóról HST PC2 és Spitzer (NASA *Space Infrared Telescope Facility*, SIRTf) infravörös megfigyeléseket is készítettünk 2003/2004-ben, továbbá a HST ACS/HRC-vel (*Advanced Camera for Surveys*) a 9P/Tempel 1 magjáról is készítettünk fénygörbe-megfigyelést 2004-ben. A kutatást *Philippe L. Lamy* (CNRS, Franciaország) vezeti.

rös csillagászati (*Infrared Space Observatory*, ISO) megfigyeléssel (71 ± 5 km), azt lehet mondani, hogy a csillagfedés módszere nem adott pontos eredményt. Csillagfedések megfigyeléséből a kis égitestek méretére és alakjára nem várhatunk statisztikusan elegendően sok, illetve pontos eredményt.

Indirekt becslések: aktivitás, nem gravitációs pályamódosító erők hatása

Csak a teljesség kedvéért említjük meg, hogy régebben a nem gravitációs erőket és az üstökösök aktivitásának mértékét is felhasználták a méretük indirekt becslésére. Az aktív üstökösök Nap körüli keringését ugyanis a gravitáción kívül a magból kiáramló anyag rakétaszzerű erőhatásokkal gyorsítja, lassítja. Kérdés, hogy adott nem gravitációs erő mekkora tömegű magot tud gyorsítani, illetve adott közepes tömegsűrűséget feltételezve, milyen méretű lehet a mag. A másik becslési módszer azt számítja ki, hogy az üstökösök adott aktivitásához, a másodpercenként kibocsátott gáz- és portömeghez, mekkora mag szükséges (itt az aktív felület arányát is ismerni kell). Mindkét módszer a valódi méret többszörösét adja, tehát ezeknek a közvetett becsléseknek elég nagy a hibája, és ma már nem alkalmazzák ezeket a méret meghatározására. Azt azonban igen, ha ismert a mag mérete, akkor a nem gravitációs erők modellezésével a mag átlagos tömegsűrűsége megbecsülhető, illetve a mag méretét és aktivitását ismerve az aktív felület arányát lehet becsülni, azaz hogy a mag felszínének hányad része aktív.

Optikai és termális infravörös csillagászati megfigyelések

Az üstökösök legtöbbje naptávolban kóma nélküli pontforrás, de akkor halvány és kis jelet ad. Napközben viszont a mag fényes ugyan, de jelentős zavaró aktív és fényes kóma veszi körül. Sőt ma már egyre több üstökös-ről derül az ki, hogy naptávolban is kómát fejleszt, így a vélt csillagszerű megjelenés mellett a nem felbontott kóma fénye is jelentősen hozzájárul a mag fényességéhez, ami meghamisítja a mag fotometriáját. Ezen okok miatt ma már a nagy teleszkópok és új kiértékelési módszerek alkalmazásával a mag és a kóma fényességjelölkeit el kell és el is tudjuk különíteni. A mai optikai csillagászat a csúcstechnológia adta eszközeivel lehetőséget nyújt a kisméretű és halvány üstökösök nagy pontosságú fotometriai megfigyelésére a magokat körülvevő aktív és fényes kóma ellenére is (2–4. ábra). A HST kitűnő minőségű, nagyfelbontású optikája és érzékeny detektorokkal ellátott kamerái a földi légkör zavaró hatásaitól mentes képfelvételeket készítenek, és megfelelő kontraszttal emelik ki, „húzzák ki” a magot a kómából. Az első *Széles Látómezejű Bolygókamera*t (WFPC) a javított optikájú új *Bolygókamera* váltotta fel (PC2), és ezt ma már az új generációs, még nagyobb felbontású és érzékenységgű ACS/HRC (*Advanced Camera for Surveys/High Resolution Channel*) követi. A Föld felszínén csak az adaptív optikával felszerelt nagy teleszkópok vehetik fel – jó esetben – a versenyt az űrtávcsövel: például VLT 8

méteres teleszkópjai, amelyeknél állandóan számítógép korrigálja a földi légkör és távcsőmechanika okozta kép torzulásokat, valamint a Keck-, a Gemini-teleszkópok és hasonló. Kisebb földi távcsövekhez képest csak a HST és a nagy teleszkópok adaptív optikával adnak ma már elfogadható pontosságú adatokat az üstökösök magjáról.

A HST-vel készített üstökös megfigyeléseknek hosszú időre, több mint egy évtizedre visszatekintő múltja van, és ebben a programban e sorok írója is részt vesz. Még a régi WFPC-kamerával történt a 4P/Faye 1991-es megfigyelése és magméretének meghatározása, a kóma és aktivitásának vizsgálata. Eddig összesen 32 ekliptikai, főleg a Jupiter-családba tartozó üstökös magjának méretét és maghoz közeli kómájának tulajdonságait sikerült meghatározni, valamint az 55P/Tempel–Tuttle és Hale–Bopp (C/1995 O1) Oort-felhőbeli üstökösökét is. A HST optikai tartományban kapott mérési adatait több esetben az ISO (ISOCAM), illetve az új infravörös űrteleszkóp, a Spitzer (MIPS)⁷ infravörös megfigyelései egészítették ki ugyanarról az üstökösökről.

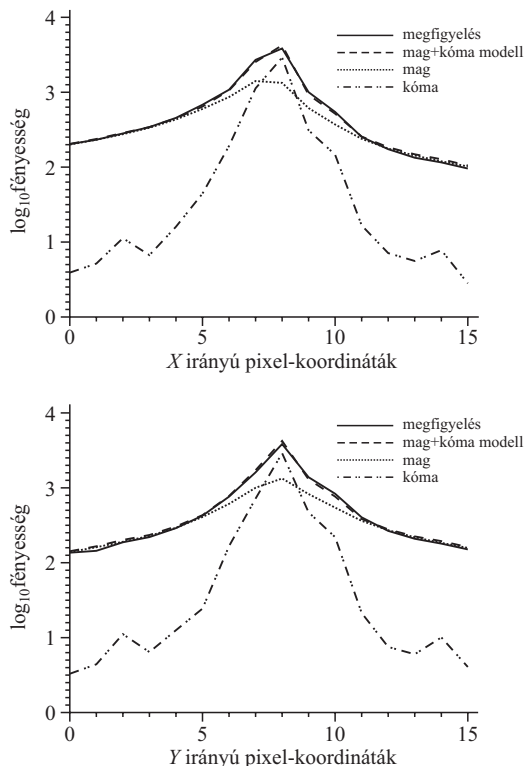
Az adatfeldolgozásban a kulcskérdés az, hogy az üstökös magjának fényét el kell különíteni az aktív kómától. A jó mag/kóma kontraszt elérését a HST kitűnő optikai tulajdonságai, nagy felbontása és a megfigyeléseknek a földi légkör zavaró hatásaitól való mentessége lehetővé teszi. A tapasztalat szerint az üstökös maghoz közeli kóma optikailag vékony még a nagyon aktívknál is (Halley, Hale–Bopp), és esetleg csak a fényesebb *jetek* fedik el kis szakaszon a mag peremét. Az üstökös megfigyelt fényességeloszlása a kómamodell + mag fényességének összegeként modellezhető:

$$B(\rho) = \left[\frac{k_c}{\rho} + k_n \delta(\rho) \right] * PSF, \quad (2)$$

ahol ρ a magtól mért radiális távolság a kép síkjában (a látóirányra merőleges síkban), δ a Dirac-delta függvény, és $*$ a konvolúció operátora. Az első tag a kóma járulékát jelenti egy k_c skálafaktorral, a második tag pedig a magét egy k_n skálafaktorral. A k_c és k_n faktorokat a modellnek a megfigyelt fényeloszláshoz való illesztése által kell meghatározni. A fenti esetben egyszerű kómáról van szó, amelyben a fényesség $1/\rho$ szerint változik a magtól mért távolsággal a képsíkban. Bonyolultabb, igen aktív kóma fényességeloszlása a kép síkjában mért azimutuszögtől való paraméterfüggéssel írható le. *PSF* a pontszórási függvény (*Point Spread Function*), amely a HST esetében modellezhető, szintetikus elállítható a teleszkóp, szűrőrendszer és a detektor ismert, esetleg időben lassan változó paramétereinek, így az optikai paraméterek, *jitter*⁸ ismeretében az Űrteleszkóp Intézet (STScI) TinyTIM szoftvere segítségével. Egy HST képelemnek (pixelnek)

⁷ ISO: *Infrared Space Observatory*, ISOCAM: *ISO Camera*. Spitzer: *Spitzer Space Telescope* (NASA/SST), *Lyman Spitzer Jr.* amerikai csillagásztól elnevezett, korábbi nevén *Space Infrared Telescope Facility* (SIRTF), infravörös űrteleszkóp. MIPS: *Multi-Band Imaging Photometer for Spitzer*.

⁸ Jitter-jelenség: a teleszkóp mechanikai rezgései, vibrációi miatt a *PSF* kiszélesedik, torzul, az energiát nem a centrumba koncentrálja. Ezt a *PSF* generálásakor figyelembe lehet venni.

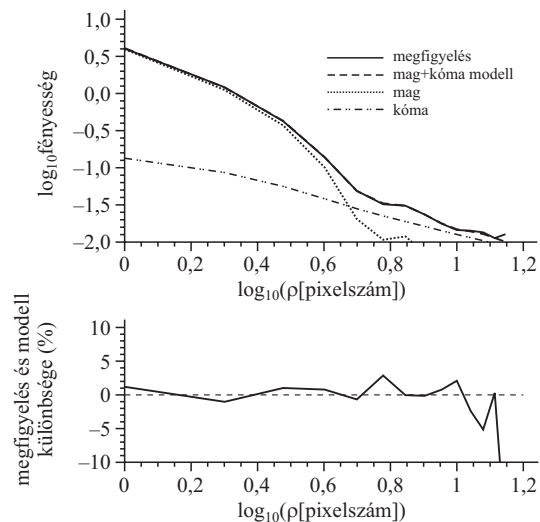


2. ábra. A 19P/Borrelly ekliptikai üstökös magjáról a HST PC2-vel 1994-ben készített képek egyikén a magot tartalmazó képelemen keresztül X és Y irányban felvett fényességprofilok (X : fenti, Y : lenti ábra). A vízszintes tengelyen eredeti képelem-koordináták, a függőleges tengelyeken expozíciós időre normált digitális fényességértékek (DN/s) vannak. Fent: a megfigyelést a folytonos vastag vonal, az illesztett mag+kóma-modellt a szaggatott vonal jelzi: a modell jól illeszkedik a megfigyeléshez. A mag és kóma fényességprofiljai egymástól elkülönülnek (jó az elkülönítési kontraszt).

az üstökös távolságába vetített méretén belüliek a megfigyelt üstökös magok, tehát egy pixelen belül lokalizáltak. Egy pixel négyzet alakú: PC2-nél 0,0455 ívmásodperc, az ACS-nél 0,0250 ívmásodperc szögfelbontással. A mag szubpixel lokalizációjához, azaz hogy hol van a mag az eredeti pixelen belül, az illesztéshez használt modelleket a HST pixelnél finomabb skálán készítjük el. Ezen a finomabb skálán a mag (x_n, y_n) helyzete meghatározható. A k_n , k_c skálafaktorokat, valamint a mag (x_n, y_n) pozícióját a megfigyelt kép (adatok) eredeti pixeleivel való összehasonlítással illesztjük (paraméterillesztés). A finomabb felbontású skáláról az eredeti pixelskálára történő visszaterés integrálással történik, amikor is a szubpixeleket felösszegezzük az eredeti pixelre, és a Q mennyiség minimalizálásával kapjuk a legjobb paraméterillesztést:

$$Q(x_n, y_n, k_n, k_c) = \left| \iint_{x, y} \left\{ \left[\frac{k_c}{\rho} + k_n \delta(\rho) \right] * PSF \right\} dx dy - \text{adatok} \right| \quad (3)$$

Az illesztés alkalmazható az (X, Y) képelemsíkon, valamint a kép (ρ, θ) polártranszformáltjában felvett fényességprofilokra is, ahol ρ a magot tartalmazó pixeltől (optocentertől) mért távolság, θ a síkbeli polárszög. Mindkét módszerrel igen jó illesztés érhető el, amit a 19P/Borrelly



3. ábra. A 67P/Churyumov-Gerasimenko ekliptikai üstökös magjáról a HST PC2-vel 2003-ban készített képek egyikén a mag és kóma fényének elkülönítése a kép polártranszformáltján a minden ρ távolságnál θ szerint körbeátlagolt profilokkal. A vízszintes tengelyen eredeti képelem-koordináták 10-es alapú logaritmus, a függőleges tengelyeken expozíciós időre normált digitális fényességértékek (DN/s) vannak. Fent: a megfigyelést a folytonos vastag vonal, az illesztett mag+kóma-modellt a szaggatott vonal jelzi: a modell jól illeszkedik a megfigyeléshez. A mag és kóma fényességprofiljai egymástól elkülönülnek (jó az elkülönítési kontraszt). Lent: a megfigyelés-modellfényesség különbség százalékban kifejezve: a mag-képelemnél az eltérés igen kicsi: $\pm 1\%$.

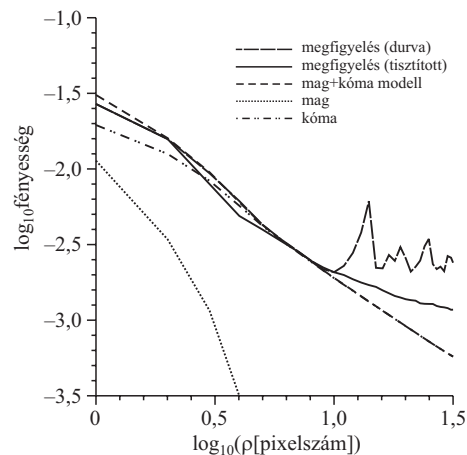
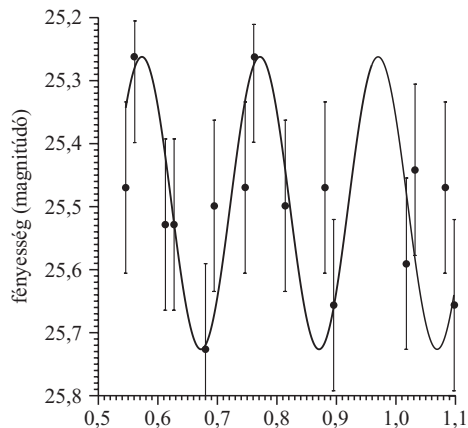
(2. ábra) és 67P/Churyumov-Gerasimenko (3. ábra) példái is mutatnak. A HST kameráival végzett fotometriához olyan fotometriai színszűrőkészlet is tartozik, amellyel a Landolt-Kron-Cousins széles sávú fotometriai rendszer realizálható. Az üstökös mag fényességének meghatározásában jelentkező hibák közül az illesztési hiba dominál a k_n -ben, ez általában 5% alatti. A detektorzajból adódó hiba ennél kisebb, valamint a fotometriai kalibráció hibája pedig 0,01 magnitúdó⁹ körüli. A kóma fénytől elkülönített (tőle szeparált, „kihúzott”) üstökös mag látszó fényességének és effektív rádiuszának a meghatározása a feladat. A tipikus fotometriai hiba körülbelül 0,01 magnitúdó, akkor ez például 1 km-es rádiuszban mintegy 0,02 km hibát jelent.

Ezután az üstökös mag effektív rádiusza a geometriai keresztmetszetből számítható ki a geometriai albedó, a fázisfüggvény, valamint a Nap adott fotometriai színtartományban való látszó fényessége ismeretében:

$$p_R \bar{C} = \frac{2,24 \cdot 10^{22} \pi r_b^2 \Delta^2 10^{0,4(m_\odot - m_r)}}{10^{-0,4\beta \alpha}}, \quad (4)$$

ahol p_R a geometriai albedó az adott spektrális sávban (itt R -ben), $\bar{C} = \pi R_{eff}^2$ a test effektív geometriai keresztmetszete (m^2), R_{eff} az effektív rádiusza (m); r_b , Δ a helio- és geocentrikus távolsága (CSE); m_\odot a Nap látszó fényessége az adott sávban, és m_r az objektum látszó fényessége az adott sávban; β a lineáris fázisfüggvény együtthatója (mag/fok), valamint α a Nap-fázisszög (fok), azaz a Nap-égitest-megfigyelő által bezárt szög. Az üstökösök mag-

⁹ Csillagászati fényességskala: az I_1/I_2 intenzitásarány logaritmikusan megfeleltetése: a magnitúdókülönbség $m_1 - m_2 = -2,5 \log_{10}(I_1/I_2)$.



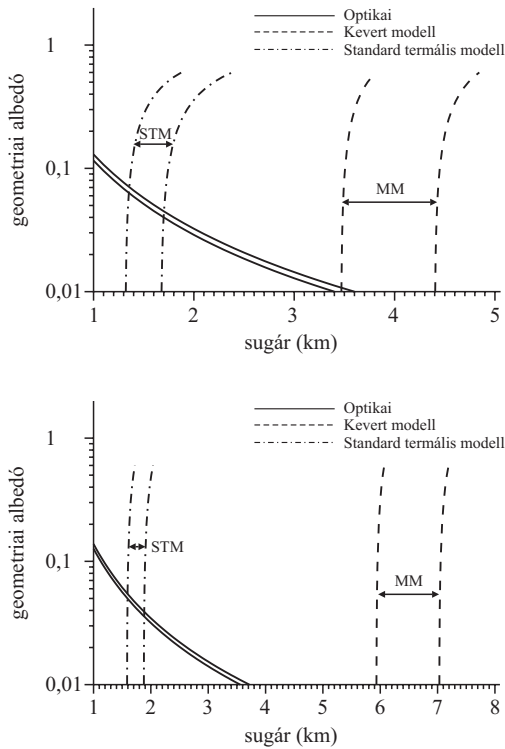
4. ábra. A 147P/Kushida–Muramatsu ekliptikai üstökös 2001. január 2-i megfigyelése a HST PC2-vel. Balra: a PC2 CCD-chipen az üstökös és környezete, és a sok kozmikus sugárzási nyom megfigyelt képe. Középen: a fotometriai fénygörbe a mag forgásából adódik. A mag igen halvány, 25–26 magnitúdó körül volt R (vörös) fotometriai szűrővel a megfigyeléskor, de a HST-vel fotometriai megfigyeléseket lehetett kapni róla. Jobbra: polártranszformációból kapott fényességprofilok a megfigyelés és modell (mag és kóma) jó illesztését mutatják (lásd még 3. ábrát). Ez az eddig megfigyelt legkisebb, még egészben lévő üstökös: effektív rádiusza $0,21 \pm 0,02$ km, azaz valódi szubkilométeres méretű.

jára a tapasztalat szerint a geometriai albedó az optikai tartományban 0,04, illetve fázistörvény együtthatója 0,04 mag/fok. Független albedó és fázisfüggvény meghatározás hiányában ezekkel az értékkel számolva a valósággal jól egyező üstökös-magméret határozható meg. Mivel a méret fordítottan arányos a geometriai albedó négyzetgyökével, így például egy ~ 3 -szor nagyobb albedó $1/\sqrt{3} \approx 0,86$ -szoros eltérést jelent a méretben. Amennyiben a fázistörvény együtthatója 2-es faktossal változik, akkor ez közel 2-es faktort jelent a méretben is. Bár az üstökös-magok albedóját nem sok üstökösre határozták meg, de értékük a $0,04 \pm 0,02$ tartományban van. Ezzel a behatárolással megegyeznek az eddigi helyszíni üstökösszondás vizsgálatok albedómeghatározásai is: az 1P/Halley magjára, valamint a 19P/Borrelly magjára a 4% albedó feltételezésével 1994-ben meghatározott méret és alak megegyezik a NASA Deep Space 1 űrszondának a Borrelly magja közelében 2001-ben végzett helyszíni vizsgálatának eredményeivel (1. ábra, 1. táblázat). A Borrelly magja mintegy fele akkora, mint a Halley-üstökösé.

Az üstökös-magok is forognak: vagy egyszerűen a legnagyobb főtengelyük irányában, vagy a kigázosodási, tömegvesztési folyamatok miatt gerjesztett állapotban, általában erőmentes, szabadon forgó pörgettyűként. A forgás a mérhető fénygörbéből kimutatható. Az üstökösök optikai és infravörös fotometriai megfigyelései alapján ugyanis a fénygörbe nem foltosságától ered (tehát nem a különböző albedójú vagy hőmérsékletű alakzatok okozta „foltosság” miatt van), hanem az elnyújtott, szabálytalan alakú test megfigyelő felé eső, láttható megvilágított felületének forgás miatt bekövetkező változásából adódik (4. ábra). A tapasztalat szerint az elnyúlt, szabálytalan alakú üstökös-magok és kisbolygók tengely körüli forgásuk miatt bekövetkező fényváltozása első közelítésben jól modellezhető egy a legrövidebb tengelye körül forgó, elnyújtott (*prolate*) forgási ellipszoiddal, amelynek fél nagytengelyeire $a > b = c$ és a test c körül egyenletesen forog. A fényváltozást a megfigyelő felé forduló időben periodikusan változó nagyságú, láttható megvilágított vetület területe (S) adja:

$$S(\phi) = \pi a b^2 \sqrt{\left(\frac{\sin^2 \phi}{a^2} + \frac{\cos^2 \phi}{b^2}\right) \sin^2 \xi + \frac{\cos^2 \xi}{b^2}}, \quad (5)$$

ahol $\phi = 2\pi/P(t - t_0)$ a forgás fázisszöge, P a forgási periódus, t és t_0 az idő és kezdőfázis időpontja, ξ a testtől a megfigyelő felé mutató vektor és a forgástengely iránya által bezárt szög, a rálátás szöge. A fenti képletben feltettünk, hogy a Nap mögöttünk van ($\alpha = 0^\circ$). Megjegyezzük, hogy a fénygörbék nemcsak a megfigyelhető megvilágított vetületi területet jelentik, hanem a test felszíni fényszórási paramétereitől való függést is a látható tartományban, infravörösben pedig a felszíni hőmérsékleti eloszlástól is. Szabálytalan alakú test felületén a domborzat, árnyékok és kitakarások is bonyolítják a valóság-hű fénygörbe-modellezést. Teljes fénygörbe megfigyelése esetén az a/b tengelyarány csak egy alsó határ lesz, mert nem ismert a rálátási szög, ugyanis nem feltétlenül merőlegesen nézzük a forgástengelyt. Csak a látóirányra merőleges forgástengely esetén figyelnénk meg az igazi a/b arányt: amikor is a test a legnagyobb kiterjedését mutatja, akkor egy $S_{\max} = \pi ab$ területű ellipszist mutat felénk (fényesség maximuma), amikor a legkisebb kiterjedését mutatja („csúcsa” látszik a fényesség minimumakor), akkor egy $S_{\min} = \pi b^2$ területű ellipszist, tehát $S_{\max}/S_{\min} = a/b$. Ez a speciális geometriai helyzet azonban igen ritka. Statisztikai vizsgálatok szerint tetszőleges ξ rálátási szögre különböző a/b arányú elnyúltság esetén a $\kappa \pi ab$ legnagyobb terület κ hányada a következő: $a/b = 1,5$ -re $\kappa = 0,924$, $a/b = 2$ -re $\kappa = 0,892$, és $a/b = 3$ -ra $\kappa = 0,866$. Sokszor nem ismert a fénygörbe, legfeljebb csak egy-két pontja. A pillanatnyi vetület területéből kiszámított effektív rádiusz $r_{n,a} = (S/\pi)^{1/2}$, $S = \kappa \pi ab$ esetén $\kappa^{1/2}$ -nel skálázható. Egy tipikus $a/b = 2$ tengelyirányú testre egy megfigyelés $r_{n,a} = 0,945(ab)^{1/2}$ effektív rádiuszt ad, vagyis ez 5,5%-on belül van a maximális $(ab)^{1/2}$ értékhez. A kis égitestek méreteloszlásának statisztikai vizsgálatára a térfogat-ekvivalens effektív rádiuszt használjuk, amelyre $r_{n,v}^3 = ab^2$. Az $r_{n,v}/r_{n,a}$ arány 1-hez közeli marad: $a/b = 1,5$ -re 0,972, $a/b = 2$ -re 0,943, és $a/b = 3$ -ra 0,895, tehát a



5. ábra. Fent a 22P/Kopff (ekliptikai) és lent az 55P/Tempel-Tuttle (Halley-típusú) üstökösök magjának látható fénybeli és infravörös megfigyeléséből behatárolt rádiusza és albedója. Az standard termális modell (STM) a valósághoz közelebb álló eredményt ad a bonyolultabb, kevert modellhez (MM) képest.

megfigyelt látszó vetületből leszámaztatott $r_{n,v}$ igen jó becslés a térfogat-ekvivalens gömb alakú test effektív rádiuszára.

A méret (effektív rádiusz) és albedo egyidejű meghatározását teszik lehetővé a látható és termális infravörösben (IR) végzett megfigyelések. Egy r_n rádiuszú testre a termális kontinuum fluxussűrűség F_{ib} adott λ hullámhosszon:

$$F_{ib}(\lambda) = \epsilon_{ib} \int \int B_v \left[T(r_b, pq, \eta, \epsilon_{ib}, \theta, \phi), \lambda \right] d\phi d\cos\theta r_n^2 \frac{\Phi_{ib}}{\pi \Delta^2}, \quad (6)$$

ahol Δ a megfigyelőtől való távolság, Φ_{ib} a fázisfüggvény a termális IR-tartományban, p geometriai albedo a visszavert látható fényben, q a fázisintegrál, amely a geometriai és Bond-albedót¹⁰ kapcsolja össze: $A_B = pq$. T az abszolút hőmérséklet, B_v a Planck-függvény, ϵ_{ib} emisszivitás a termális tartományban, θ és ϕ koordináták a test felületén. Az η faktor az infravörös sugárzási határfok. A legnagyobb hibalehetőségek a Φ_{ib} és η megválasztásában vannak. A tapasztalat szerint kielégítő eredményt ad $\Phi_{ib}(\alpha)$ -ra, ha a Planck-emissziót felintegráljuk a testnek a megfigyelő felé eső felületén. Az η nem ismert pontosan az üstökösök magjaira, de az üstökösök méretű kilométeres-

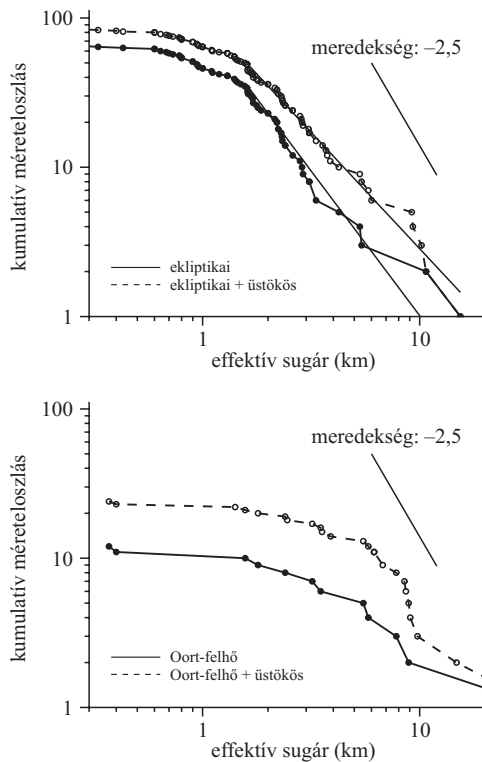
¹⁰ Egy test felületének A_B Bond-albedója az, hogy a teljes beeső napfényenergia – az összes hullámhosszon – hányad részét veri vissza vagy szórja szét a térbe (George Phillips Bond (1825–1865) amerikai csillagászról elnevezve).

szubkilométeres földközeli kisbolygók IR-megfigyelésével összhangban levő $\eta \leq 1$ értékeket lehet használni. A mag IR-fluxusát a megfigyelésekből hasonlóan lehet meghatározni, mint azt fentebb ismertettük a látható fényben végzett megfigyeléseknél: a mag + kóma fényességmodell alapján az IR-teleszkóp pontszórási függvényének ismeretében a mag fluxusa elkülöníthető a kómától. Az eddig megfigyelt üstökösök infravörös fluxusa ~ 10 – 100 millijansky¹¹ között volt. Kérdés, hogy a mag megfigyelt IR-fluxusát milyen rádiuszú és albedójú testtel lehet előállítani. Az IR-fluxus a testfelület $T(\theta, \phi)$ hőmérséklet-eloszlásának modellezésével számítható ki: a) standard hőmodell (STM), amelyben a test tengely körüli forgása lassú, a hőtehetlensége kicsi, a felszín minden pontja termális egyensúlyban van a beeső napfény energiájával; b) gyors forgás esetére alkalmazott izotermális szélességi modell (ILM), amelyben a hőtehetlenség olyan nagy, hogy a felület eleme nem hűl ki, addig sem, amíg az éjszakai oldalon van; c) bonyolultabb, az üstökösök gáz- és portartalmát, részletes hőtani paramétereit, és szabálytalan alakját figyelembe vevő modellek. Az a) és b) modellek felteszik, hogy a forgástengely merőleges a Nap-megfigyelő-üstökösök mag síkra, a c) modellben viszont a tengelyirány tetszőleges. A „gyors” vagy „lassú” forgás kissé félrevezető, mert például két azonos periódussal lassan forgó, de lényegesen különböző hőtehetlenségű üstökösök esetén az egyik nem felel meg a „lassú” rotátor modelljének. A HST-vel a látható tartományban készített fotometriai eredményeket kiegészítettük az IR-megfigyelésekkel, és a standard termális modellt, illetve a mag termális paramétereit részletesen figyelembe vevő modellt is alkalmaztuk a 22P/Kopff, valamint 55P/Tempel-Tuttle üstökösök magjára. A geometriai albedo – rádiusz síkon egy keskeny tartomány jelölhető ki az STM-modell alapján a lehetséges albedóra és méretre (5. ábra). Tehát az űrteleszkópokkal a látható fényben és termális infravörösben végzett megfigyelései ugyanarról az üstökösömről pontos méret- és albedó-meghatározást tesznek lehetővé, a kis égitestek méret-eloszlása pontosabb lesz az ilyen megfigyelésekből.

Elő pontosabb eredmények a méret és a/b szerinti eloszlásokra

Az ekliptikai üstökösök eredete ma még nem teljesen megválaszolható kérdés. Mint említettük, ezeknek az ősei elsősorban a transzneptun-objektumok lehetnek. Ezek égi-mechanikai okok következtében kentaur-, illetve ekliptikai üstökös- (főleg Jupiter-család) pályákra kerülnek. Utánpótlásuk ma is folyamatos. Az ekliptikai üstökösök egy része később kihunyt, inaktív állapotban földközeli aszteroida lesz. Úgy tartjuk, hogy a Naprendszer őskorában a Kuiper-öbven az ütközések igen gyakoriak voltak, és ott a nagyobb aszteroidák feldarabolódási termékei az ekliptikai üstökösök. A méretük, alakjuk az idő folyamán módosulhatott, és kénytelenek vagyunk a ma megfigyelhető méret-eloszlásból következtetni az eredetükre és fejlődésükre.

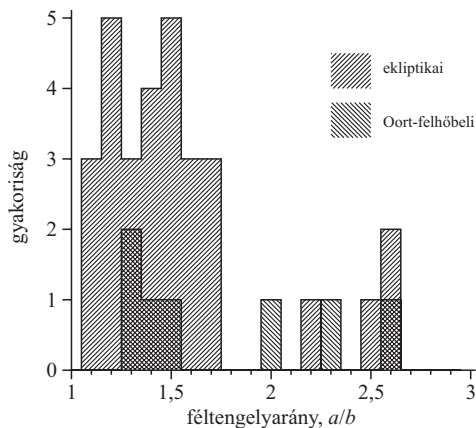
¹¹ 1 jansky (1 Jy) = 10^{-26} W m⁻² Hz⁻¹ a fényességi fluxus egysége.



6. ábra. Az eddig megfigyelt üstökösök effektív rádiuszának eloszlása: a kumulatív méreteloszlás-függvény $N(r > r_0)$ reprezentációban. Fent: ekliptikai üstökösök (folytonos vonal), ekliptikai üstökösök + üstökös eredetű földközeli kisbolygók mintája (szaggatott vonal). Lent: Oort-felhőbeli üstökösök (folytonos vonal), Oort-felhőbeli üstökösök + üstökös eredetű földközeli kisbolygók mintája (szaggatott vonal). A tengelyek logaritmus skálájúak. A $-2,5$ meredekségű vonal is jelölve.

A HST és ISO ekliptikai üstökösmeréseink ez idáig legpontosabb, nagy és homogén mintája biztosítja a méret szerinti eloszlásfüggvény megbízhatóságát. A HST, ISO és megfelelően pontos, földfelszíni teleszkópokkal meghatározott üstökösök méret-eloszlásokat mutat be a 6. ábra, különválasztva az ekliptikai és az Oort-felhő üstökösöket. Ugyanezek az ábrák az üstökös mintához hozzávettük az üstökös eredetűnek tartott (inaktív) földközeli aszteroidák méret adatait is. Sajnos, egyelőre kevés adat van (a HST- és más megfigyelésekkel ez 13) az Oort-felhő üstökösöire, és emiatt a méreteloszlásukat ma még nem ismerjük pontosan, ezért ezek tárgyalásával itt most nem tudunk foglalkozni.

Az objektumok effektív rádiuszának statisztikus eloszlása vizsgálható a kumulatív méreteloszlás-függvény $N(r > r_0)$ alakú reprezentációban, ahol r_0 egy adott rádiusz, N pedig az objektumok száma $r > r_0$ méret felett. A kumulatív eloszlásfüggvényt $N \sim r^{-q}$ alakban illesztjük a megfigyelésekhez: keressük a legjobban illeszthető hatványfüggvény q kitevőjét, amely egyúttal utal az eloszlások lehetséges fizikai magyarázatára is. Elméleti megfontolásból ugyanis egy ütközésekből eredő relaxált mintára $q = 2,5$, de az ütközési modell, amelyből ez a kitevő kiadódott, még csak aszteroidoszerű (közetmonolit) testek ütközésén alapult. Azonban a gyakorlatban az üstökösökre a probléma sokkal összetettebb, ma még nem ismert a szerkezetük és az ütközési termékek méreteloszlása (a Deep Impact űrkísélet talán majd közelebb visz a



7. ábra. Az eddig megfigyelt üstökösök alakjának, az $a > b = c$ ellipszoidmodell a/b főeltengelyarányának eloszlása. Az ekliptikai és Oort-felhőbeli üstökösök megkülönböztetve, külön szimbólumokkal szerepelnek.

pontosabb modellezéshez). A 6. ábrán látható, hogy az ekliptikai üstökösök magból kevés a nagyméretű (több kilométeres rádiuszú), továbbá az eloszlásfüggvény laposabb lesz a mintegy $1,6$ km-nél kisebb rádiuszokra. Ma még nem tudjuk, hogy ez a mérhető csupán megfigyelési effektus, azaz nem tudtuk még megfigyelni a kisebb, szubkilométeres magok legtöbbjét, vagy pedig a magok szerkezetével, illetve evolúciójával van összefüggésben. Ugyanis a mag keringési pályája, forgása, kezdeti mérete, alakja, termális tulajdonságai és kémiai összetétele is hatással van az aktivitására, fejlődésére. Az üstökösök élettartama annál hosszabb, minél nagyobb méretűek: a több szublimálható anyag hosszabb ideig tart. Egy adott méret alatt a mag belsejében a hővezetés időskálája kisebb, mint a szublimációs időskála. Ennek következtében a mag közepe hamarabb felmelegszik, mint egy nagyobb méretű magé, tehát a kisebb magok aktivitása megnövekszik, gyorsabban veszítik el gáz- és poranyagukat, méretük gyorsan lecsökken, kevesebb lesz a megfigyelhető szubkilométeres üstökösök. Csak az ekliptikai üstökösök tartalmazó mintára $r > 1,6$ km méretekre $q = 1,9 \pm 0,3$ kaptunk. Kiegészítve ezeket a földközeli üstökösaszteroidákkal, a kitevőre $q = 1,6 \pm 0,2$ adódott. Összehasonlításként a 20 km-nél nagyobb rádiuszú Kuiper-övi objektumokra a különböző megfigyelési adatok alapján $q = 3,20 \pm 0,10$ és $3,15 \pm 0,10$, az ismert kentaurokra $q = 2,70 \pm 0,35$, illetve $q = 3,0$, az összes ismert földközeli aszteroidákra pedig $q = 1,75 \pm 0,10$ és $1,96$ értékeket adnak meg. A Kuiper-övi objektumok és kentaurok esetében a q közel azonos, ezek az objektumok valószínűleg evolúciós kapcsolatban állnak egymással. Ma még nehezebb megtalálni a kapcsolatot a Kuiper-öv – kentaurok – ekliptikai üstökösök evolúciós teljes láncon, mert míg a Kuiper-övi objektumok és kentaurok közül csak a nagyobbakra (20 – 50 km rádiuszra) van statisztikai minta, addig az ekliptikai üstökösökre csak a kilométeres–szubkilométeres tartományra.

Az üstökösök alakját a közelítő elnyújtott ellipszoidmodell fél nagytengelyeinek a/b arányával lehet leírni, amelynek eloszlását a 7. ábra mutatja az ekliptikai és Oort-felhő üstökösöire a HST- és más megfigyelésekkel együtt. Az Oort-felhőbeli üstökös mintája még kevés

számú (7), tehát statisztikailag még nem jelentős. Azonban a 30 ekliptikai üstökösre kapott hisztogram alapján az a/b eloszlás mediánértéke 1,5 körül van. Vannak magok esetenként 2-nél is nagyobb a/b értékkel. Az üstökösök elnyújtott alakja a magok felszínén nem egyenletes kigázosodási aktivitásával függhet össze: az anyagvesztési helyeken gyorsabban fogy a mag anyaga. Egyszerűbb evolúciós modellek szerint azonban lehetséges a gömbhöz közeli, kevésbé elnyújtott alak kialakulása is a kigázosodás által. A pontosabb és teljes fénygörbékből a magok alakját jobban meg lehet majd határozni a jövőben, a minta bővülni fog.

A Kuiper-övön a kentaurokon és ekliptikai üstökösökön át bizonyos földközeli kisbolygókig a méreteloszlás függvénye, valamint az alakjukat közelítőleg leíró a/b arány eloszlása ezeknek a kis égitesteknek az evolúciójának következményeit tükrözi vissza. Az azonban, hogy ezek az eloszlások pontosan miként változnak az időben, ma még nem ismert. A közeljövőben a HST (ACS/HRC) és Spitzer IR-teleszkóp további alkalmazása, valamint a fejlettebb termális modellek javulást hozhatnak a pontosabb és statisztikailag szignifikánsabb adatminta vizsgálatában. Az üstökösökkel rokon többi kisebb égitest méreteloszlását is meg kell határozni, többek között a köztük fennálló evolúciós kapcsolatok kimutatása végett. Nem ismert a külső Naprendszer kentauro-, és transznejtunobjektumainak méreteloszlása a kisebb méretek felé. Ezek a kis – kilométeres, szubkilométeres – objektumok talán az ekliptikai üstökösök ősei. A még csak tervezés szakaszában lévő nagy keresőprogramok pedig nagyság-

rendekkel fogják megnövelni az ekliptikai és Oort-felhőbeli üstökösök méret-adatbázisát. Fontos a szétesett üstökösök magtöredékeinek a megfigyelése a jövőben, különösen a SOHO napfizikai űrobszervatórium koronográfjával (LASCO), mert ezeknek a kis üstökösöknek a legtöbbje nagyobb üstökösök széteséséből keletkezett. A Nap közelébe került üstökösök magjának fotometriájából a méretükre, alakjukra, forgásukra lehet adatokat kapni.

Végezetül pedig a témával kapcsolatban egy válogatást ajánlunk az olvasó figyelmébe a legfontosabb ismeretterjesztő, illetve szakirodalomból.

Irodalom

- BÉRCZI SZ.: *Kristályoktól bolygótestekig* – Akadémiai Kiadó, Budapest, 1991.
- BOTH E.: *A Rosetta űrszonda* – Természet Világa 2003/1, 3
- ÉRDI B.: *Bolygórendszerek kaotikus dinamikája. I. rész* – Természet Világa 2003/5, 210
- ÉRDI B.: *Bolygórendszerek kaotikus dinamikája. II. rész* – Természet Világa 2003/6, 256
- P.L. LAMY, I. TÓTH, Y.R. FERNÁNDEZ, H.A. WEAVER: *The sizes, shapes, albedos, and colors of cometary nuclei. Comets II* – University of Arizona Press, Tucson, 2005
- SZEGŐ K.: *Selected chapters of space research in Hungary* – Fizikai Szemle 49/5 (1999) 206
- SZEGŐ K.: *Új eredmények az üstökösök fizikájából* – Fizikai Szemle 52/5 (2002) 149
- TÓTH I.: *Fényes üstökösök 1996–1997-ben. A Hyakutake és a Hale-Bopp üzenete* – Magyar Tudomány 1998/4, 411
- TÓTH I.: *Az üstökösök lágyröntgen-sugárzása. Új felfedezés a Hyakutake és a Hale-Bopp kapcsán* – Fizikai Szemle 48/7 (1998) 218
- TÓTH I.: *Üstökösök és kisbolygók* – Magyar Tudomány 2004/6, 699
- H.A. WEAVER, Z. SEKANINA, I. TÓTH ÉS MÁSOK: *HST and VLT investigations of the fragments of Comet C/1999 S4 (LINEAR)* – Science 292 1329

MEGEMLÉKEZÉSEK

SZÁZ ÉVE SZÜLETETT VERMES MIKLÓS

Radnai Gyula
ELTE Általános Fizika Tanszék

A fizika évében ünnepeljük *Vermes Miklós* századik születésnapját. Nem csak az övét, persze, *József Attiláé*t is – születésük napja alig egy héttel tér el egymástól.

Az 1905-ben születettek közül a magyar fizikatanárok előtt mindenképp meg kell emlékeznünk *Kunfalvi Rezsőről* is, aki elindította a Középiskolai Matematikai Lapok fizikarovatát, és egyik kezdeményezője volt a nemzetközi fizikai diákolimpiának. Vermes és Kunfalvi az egyetlen ugyanarra az évfolyamra jártak, de csak egyetemi tanulmányaik utolsó évében tegeződtek össze. 1928-ban diplomáztak, ekkor ment nyugdíjba *Fröhlich Izidor*, és átadta helyét az Elméleti Fizika Tanszéken *Ortvay Rudolf*nak. A fizikai könyvtárba Vermes Miklós már Fröhlich idején bejáratos volt, az Eötvös Collegiumban tanulta meg, mennyire nélkülözhetetlen a könyvtár mindenféle kutatáshoz. Ortvay először őt akarta megbízni a fizikus könyvtár újrendezésével, de neki akkor már foglalt helye volt a II. sz. Kémiai Intézetben, egy labora-

tóriumában, így maga helyett Kunfalvi Rezsőt ajánlotta. Kunfalvi egész életére kiható élményeket gyűjtött az Ortvay mellett töltött néhány év alatt, s ez örökre megpecsételte barátságát Vermessel.

Vermes is, Kunfalvi is szerette az irodalmat. Számos cikkük és könyvük tanúsítja, hogy tehetségük volt az íráshoz, szépen, jó stílusban beszéltek és írtak magyarul. Vermes németül is, amely második anyanyelve volt, Kunfalvi pedig németül és angolul is – angolból még nyelvkönyvet is írt. Egyikük se tiltakozna, ha most itt József Attila 100. születésnapjáról emlékeznénk meg, Vermes talán még egy szép aláfestő zenét is találna hozzá. Figyelmesen hallgatnák, ha most kiállna egy diák, és elmondaná József Attila valamelyik ideillő versét, vagy felolvasná gyönyörű, megható írását gyerekkoráról, bizonyos lámpaüveg eltöréséről, a meg tapasztalható tudás után sóvárgó, kísérletező kislányról...

2005 a fizika éve. Magyarországon az irodalom, a költészet, a versmondás éve is. Azt viszont Vermes is, Kun-