

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

**Kisbolygók és üstökösök fizikai paramétereinek
meghatározása fotometriai módszerekkel**

Szabó M. Gyula

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
KÍSÉRLETI FIZIKAI TANSZÉK
ÉS CSILLAGVIZSGÁLÓ

Szeged, 2005.

1. Tudományos előzmények és célok

1997 tavasza óta végzem kisbolygók fotometriai megfigyelését, a programhoz 2000 nyara óta üstökösök morfológiai vizsgálata is társul. Később bekapcsolódtam a Sloan Digitális Égboltfölmérés (Sloan Digital Sky Survey, SDSS) kisbolygó-adatainak (Moving Object Catalog, SDSS MOC) statisztikus vizsgálatába. Doktori értekezésemben bemutatom ezen kutatások jelentőségét a modern asztrofizikában, részletezem a földi bázisú megfigyelések mai és jövőbeni lehetőségeit, majd bemutatom saját eredményeimet.

A Naprendszer apró égitestjei

Naprendszerünk kutatása számos ponton kötődik a mai asztrofizika gyorsan fejlődő ágaihoz.

1. A kisbolygók és az üstökösök magukban őrzik a Naprendszer kialakulásának, így egy egészen közről megfigyelhető **csillagkeletkezésnek** a lenyomatát. A Naprendszer apró égitestjeinek kutatása az egyik legfontosabb alap ahhoz, hogy részletesen megismerjük a protoplanetáris korongok fejlődését, a bolygóképződést és a csillag-bolygócsíra kölcsönhatásokat.

2. Az **exobolygók** vizsgálata során kiderült, hogy más csillagok naprendszerében is megtalálható a kis égitestek öve. Ezeket a rendszereket a mi Naprendszerünk kutatásának tanulságai alapján, a környezetünkben megismert szempontok szerint tanulmányozhatjuk.

3. A Naprendszert mint **közvetlen környezetünket** is meg kívánjuk ismerni. Itt a tudományos érdeklődésen kívül föllépnek olyan **egyéb** szempontok is, mint a védelem a földsúroló kisbolygók és az üstökösök ellen, vagy a kis égitestekhez látogató űrszondák technikai tervezése.

4. A **modern fizika** szempontjából fontos, hogy a Naprendszerben földi körülmények közt elő nem állítható állapotban figyelhetjük meg az anyagot. Az üstökösocsóvák a legjobb földi ultravákuumnál nagyságrendekkel ritkábbak; a kisbolygók és üstökösök ütközésekor lejátszódó hatalmas energiájú folyamatok (amelyekben pl. nagyságrendileg 100 km méretű testek ütköznek akár 10 km/s sebességgel) lefolyása földi kísérletekkel még skálatörvények figyelembevételével sem jósolható meg, a folyamatok eredménye azonban indirekt módon kimutatható a kis égitestek felszínén.

Fotometriai módszerek

A kisbolygók forgásának következtében kisebb-nagyobb (jellemzően 10–20%) fényességváltozást tapasztalunk; ennek mérésével következtethetünk az alak-

jukra, a forgástengelyük irányára és a forgás periódusára. Így képet alkotunk a távcsőben egyébként fölbontatlan, pontszerűnek látszó égitest legfontosabb tulajdonságairól. Többszín-fotometriai megfigyeléssel lehet övé válik a felszín eltérő színű területeire következtetni. Az üstökösök fényessége közvetlen kapcsolatba hozható a mag anyagtermelésével. A por termelését jól jellemzi a szakirodalomban is igen elterjedt $A_{f\rho}$ mennyiség, a por relatív lineáris kitöltési tényezője, amely független a megfigyelés körülményitől és a műszereffektusoktól. A spektrum különböző részei interferenciaszűrőkkel elkülöníthetők, ezzel a por és a különböző gázkomponensek térbeli eloszlása külön vizsgálható. Ezek az eloszlások az üstökös-magból kiáramló anyag és a napszél/sugárnyomás hatására alakulnak ki, így fotometriai módszerekkel mindkét folyamatról kapunk információt. Másrészt, ismerve az anyag kiáramlásának sebességét, az eloszlások alapján megfigyelhetjük a nagyon ritka gázokban az atomi/molekuláris átmeneti valószínűségeket, és következtethetünk a szabad élettartamokra.

Statisztikus módszerek

A nagy égboltfelmérések rengeteg (akár több tízezer) kisbolygót figyelnek meg, azonban általában nem készítenek róluk folyamatos adatsort, és a teljes forgási ciklust sem fedik le – így a klasszikus fénygörbe-analízis ebben az esetben nem alkalmazható. A megfigyelések nagy száma miatt viszont az adatokat egy vizsgálni kívánt szempont szerint válogathatjuk; így statisztikus mintát készíthetünk, amelyben a kisbolygók adott csoportjának jellemző tulajdonságai vizsgálhatók. Sok kisbolygó egyszeri méréséből következtethetünk a méret és a szín (azaz az anyagi összetétel) eloszlására; többszöri mérés alapján lehetővé válik a fényességváltozás és a színváltozás tanulmányozása is. Az üstökösök statisztikus vizsgálata az ismert égitestek kis száma miatt nehezebb. Irodalmi adatok feldolgozásán kívül homogén adatsor gyűjtésére jó lehetőség lehet, ha önálló észlelőprogramot hozunk létre, amely egyetlen kiválasztott fizikai mennyiségről gyűjt részletes adatokat.

Vizsgált kérdések Az értekezés a mai kutatás homlokterében lévő kérdései közül az alábbiakhoz kapcsolódik:

1. Hogyan keletkeztek a kisbolygók és az üstökösök; mi a főöbéli és a trójai kisbolygók lényegesen eltérő tulajdonságainak magyarázata; származhat-e a rövid periódusú üstökösök egy része a trójai kisbolygók közül?
2. Mi a kisbolygócsaládok fejlődésének története, milyen fizikai paraméterekben különböznek az anyagi összetétel alapján csoportosított osztályok?

3. Milyen a kisbolygók mai forgásiperiódus- és tengelyhajlás-eloszlása? Van-e szisztematikus különbség a családok közt?

4. Mennyire jellemző a kisbolygókon színes foltok jelenléte, hogyan függ ez az égitestek méretétől, és mi okozza ezeket a foltokat?

5. Mi az ütközések és a napszél általi záporozás szerepe a kisbolygók felszínének fejlődésében? Mennyire jelentős felszíni átalakulásokat okoztak ezek a hatások, mennyire tekinthetjük a kisbolygókat, vagy legalább néhány családjukat ősi égitesteknek?

6. Hogyan osztályozhatjuk az üstökösöket?

7. Mekkora az üstökösök magjai, hogyan forognak, milyen a forgási periódusok és a tengelyhajlások eloszlása?

8. Mi okozza a 10-15 Cs.E. naptávolságban is aktív üstökösök aktivitását?

9. Hogyan fejlődik az üstökösmagot elhagyó anyag a napszél és a Nap sugárzásának hatására?

10. Hová kerültek az inaktívvá vált üstökösmagok? Lehetnek-e ilyenek a földszűrő kisbolygók közt?

2. Tudományos eredmények

1. A Szegedi Csillagvizsgáló C-11 távcsövével, az MTA Piszkéstetői Observatóriumának 60/90/180 Schmidt-távcsövével és a Calar Alto-i Német-Spanyol Observatórium 1,23 méteres távcsövével egyszín-fotometriai méréseket végeztünk 31 kisbolygóról. Az adatok analízise során 5 kisbolygó alak- és forgásmo- delljét határoztam meg. A méréseket egy korábbi irodalomban elterjedt (AM, amplitúdó-magnitúdó) módszerrel vizsgáltam, amely a fényváltozás amplitú- dója és a forgástengely - rálátástól függő - relatív helyzete alapján modellezi a kisbolygót. Meghatározhattam az alakmodell (háromtengelyű ellipszoid) fő tengelyarányait, a tengelyforgás periódusidejét és a forgástengely égi irányát. A forgástengely égi helyzetét és a forgás irányát az epocha-módszerrel határoz- tam meg: a módszer a fényességminimumok közt eltelt idő keringés okozta kis változásainak vizsgálatán alapul. A módszer általam továbbfejlesztett (a forgás irányának meghatározására optimalizált) változata ($O - C'$) 3 kisbolygó eseté- ben volt eredményesen használható (Szabó és mtsai., 1999, Kiss és mtsai., 2001). Azon kisbolygók esetében, ahol AM és $O - C'$ modellezés is lehetséges volt, az egymástól függetlenül adódó pólus-koordináták összhangban voltak egymással.

Tíz további kisbolygó esetében nem lehetett modellt számolni, de a méréseket már meglévő fotometriai adatok birtokában lehetett tervezni. Két esetben (288 Glauke és 499 Tokio) cáfoltam a korábban közölt rövidperiódusú fényváltozás jelenlétét, a többi esetben a megfigyelt fényváltozás összhangban volt az első publikált adattal. 15 kisbolygó fényváltozását elsőként figyeltük meg, közülük 6 esetben tudtam a fénygörbe amplitúdóját és periódusát (legalább 0,1 óra pontossággal) meghatározni. A maradék 9 kisbolygó esetében a forgási fázist nem sikerült teljesen lefedni, így csak tájékoztató jellegű adatokat tudtam közölni (Szabó és mtsai., 2001, Kiss és mtsai., 1999, Sárnecky és mtsai., 1999, Szabó, 1999).

2. A Calar Alto-i Observatóriumban 11, jobbára nagy naptávolságú üstököszt figyeltünk meg. 5 üstökös 5,5 csillagászati egységnél nagyobb, 8 pedig 2,7 csillagászati egységnél nagyobb naptávolságban tartózkodott. Az észlelések alkalmával általában erős aktivitást találtam, ám ez elsősorban kiválasztási effektus, hiszen mindig az adott időszak legfényesebb üstököseit tanulmányoztuk. Az üstökösök átmérőjére kapott értékek inkább felső becslésnek tekintendők. Az adatokból a magvidék fényváltozását mutattam ki a Skiff-üstökös és a C/1999 N4 LINEAR-üstökös esetében. A méréskor a fő hibaforrásnak az aktív kóma és a levegő nyugtalansága bizonyult (Szabó és mtsai., 2001b, Szabó és Kiss, 2001).

Kimutattam egy közepes sáv szélességű fotometriai rendszer használhatóságát (Gunn v,g,r,z, kiegészítve 753/30 nm-es interferencia-szűrővel) a por tanulmányozására. Keskenysávú üstökösszűrőkkel a különböző (CN, CO⁺, C₂, por) anyagi komponensek eloszlását, oszlopúségeit és termelési rátáit hasonlítottam össze. Végül egy képfeldolgozási módszert mutattam be, amelyben a nemradiális komponenseket azimutális renormálás segítségével emeltem ki. Az üstökösök gömbszimmetriától való eltérését az általam bevezetett *lc* paraméterekkel (számérték és típus) jellemeztem. Kimutattam a 19P/Borrelly-üstökös ellencsováját, a 29P/Schwassmann-Wachmann 1 üstökös forgó magja által feltekert kómáját és a C/2001 A2 üstökös szokatlan kémiai összetételét. Az utóbbi üstökös kitörésben mutatott szokványos kémiai összetételt, amely egyedi jelenség (Szabó és mtsai., 2002).

3. A Sloan Digitális Égboltfelmérés SDSS MOC adatbázisából kiválasztottam 7531, legalább kétszer észlelt kisbolygót. Segítségükkel kimutattam, hogy a kisbolygók egy része színváltozásokat mutat. A színváltozás természete véletlenszerű, amennyiben nem kötődik egy-egy dinamikai családhoz, közettani összetételhez, átmérőhöz stb. A fényességváltozásokat is megvizsgáltam, és

azokat hasonló módon véletlenszerűnek találtam (a vizsgált 1–10 km átmérőjű kisbolygók esetében). Kimutattam, hogy a színváltozás nem magyarázható az ismert műszereffektusok segítségével. A változás reprodukálható: a négy alkalommal is megfigyelt kisbolygók esetén az első és második észleléspár színváltozása korrelációban áll egymással.

A színváltozás arra utal, hogy számos kisbolygó felületén nagy méretű, eltérő színű foltok találhatóak. A színváltozás egyik egyszerű magyarázata az lenne, ha a különböző alapkőzetből összetapadó kisbolygókat föltételeznénk. Ez azonban nem valószínű, mert a szín–szín változások nem ennek a föltetésnek a jóslott irányait követik. Az egyik lehetséges magyarázat a napszél általi záporozás, ez a folyamat az $u - g$ színindexet változtatná a legnagyobb mértékben: ez a mért adatokkal összhangban áll, ám kérdéses, hogy a záporozás hogyan tud elegendően nagy felületű struktúrákat kialakítani (Szabó és mtsai., 2004).

4. Az SDSS MOC anyagából – mozgásuk alapján – kiválasztottam a Jupiter trójai kisbolygóit; 480 ismert és 891 még föl nem fedezett égitestet találtam. A minta teljessége kb. 60%, a nem Trójai kisbolygók mennyisége a mintában legföljebb 5% . Közlés előtt álló eredményeim szerint az L4 és L5 csoportok szignifikánsan eltérő darabszámú kisbolygót tartalmaznak. Az L4 és L5 csoport színeloszlása is különbözik; továbbá az L4 csoportban megfigyelhető szín-inklináció korreláció is. A talált aszimmetriák esetleg az L4 és L5 csoport eltérő kialakulására/fejlődésére utalhatnak (Szabó és mtsai., 2005, tervezett).

5. Együttműködésben az Olasz Csillagászati Egyesülettel, szlovén, spanyol, francia és ausztrál amatőr csillagászokkal, elindítottunk egy észlelőhálózatot (CARA, Cometary Archives for Amateurs, cara.uai.it). A program összegyűjti a fényesebb üstökösökről készült fotometriai méréseket, homogén és elég részletes formában, ám lehetőleg egyszerűen. Kimutattam, hogy e kettős célnak az $Af\rho$ mennyiség CCD-kamerás megfigyelése felel meg a legjobban, ha az apertúrát hosszúság egységben rögzítjük. Meghatároztam az adatok formátumát, és megírtam egy, kifejezetten a CARA munkájához illesztett, grafikus felületre írt képfeldolozó program algoritmusait. Az észlelőhálózat 2002 nyarától 2004. december 31-ig 1050 (956 archivált) adatpontot gyűjtött össze 23 üstökösről. Az első adatok gyors analízise alapján az archívum minősége általában megfelelő a tudományos analízis szempontjából (Szabó és mtsai., 2005, tervezett).

A disszertációval összefüggő referált szakcikkek

1. Szabó Gy.M., Ivezić Ž., Jurić M., Lupton R., Kiss L.L., 2004, Color variation in SDSS moving object catalog, *Monthly Notices of the Royal Astron. Soc.*, 348, 987–998
2. Szabó Gy.M., Kiss L.L., Sárneczky K., Sziládi K., 2002, Spectrophotometry and structural analysis of 5 comets, *Astron. & Astrophys.*, 384, 702–710
3. Szabó Gy.M., Sárneczky K., Csák B., Kiss L.L., 2001, Photometric observations of 9 Near Earth Objects, *Astron. & Astrophys.*, 375, 285–292
4. Szabó Gy.M., Sárneczky K., Csák B., Kiss L.L., 2001, Photometric observations of distant active comets, *Astron. & Astrophys.*, 374, 712–718
5. Kiss L.L., Szabó Gy.M., Sárneczky K., 1999, CCD photometry and new models of 5 minor planets, *Astron. & Astrophys. Suppl. Ser.*, 140, 21–28
6. Sárneczky K., Szabó Gy.M., Kiss L.L., 1999, CCD observations of 11 faint asteroids, *Astron. & Astrophys. Suppl. Ser.*, 137, 363–368
7. Szabó Gy.M., 1999, CCD observations of minor planet 73 Klytia, *Acta Phys. Polonica A*, 93–97.

A disszertációval összefüggő konferencia-kiadványok

8. Szabó Gy.M., Kiss L.L., 2001, CCD photometric investigations of small bodies in the solar system, *Publications of the Astronomy Department of the Eötvös University No. 11, Proceedings of the National Postgraduate Reunion in Astronomy & Astrophysics, 2000*, p. 119-125
9. Szabó Gy.M., Sárneczky K., Kiss L.L., 1999, The O-C - geocentric longitude diagrams of minor planets. A new approach in rotation modelling, *Proc. IAU Coll. 173*, 185-188

Egyéb referált szakcikkek

10. Vinkó J., Blake R.M., Sárneczky K., Csák B. és mtsai., 2004, Distance of the hypernova SN 2002ap via the expanding photosphere method, *Astron. & Astrophys.*, 427, 453
11. Michałowski T., Kwiatkowski T., Kaasalainen M., Pych W. és mtsai., 2004, Photometry of selected main belt asteroids I., 52 Europa, 115 Thyra, and 382 Dodona, *Astron. & Astrophys.*, 416, 353
12. Gáspár A., Kiss L.L., Bedding T.R., Derekas A. és mtsai., 2004, The first CCD photometric study of the open cluster NGC 2126, *Astron. & Astrophys.*, 410, 879
13. Derekas A., Kiss L.L., Szabó Gy.M., Váradi M., 2003, Limits on pulsations in two eclipsing binaries: AY Cam and RW CrB, *IBVS*, 5479

14. Szabó Gy.M., Sárneczky K., Vinkó J., Csák B. és mtsai., 2003, *Astron. & Astrophys.*, 408, 915
15. Derekas A., Kiss L.L., Székely P., Alfaro E.J. és mtsai., 2003, A photometric monitoring of bright high-amplitude delta Scuti stars II. Period updates for seven stars, *Astron. & Astrophys.*, 402, 733
16. Vinkó J., Bíró I.B., Csák B., Csizmadia Sz. és mtsai., 2003, The Type Ia Supernova 2001V in NGC 3987, *Astron. & Astrophys.*, 397, 115
17. Derekas A., Kiss L.L., Szabó Gy.M., Fűrész G., Sárneczky K., Heiner Zs., 2002, The primary minimum of OW Geminorum in 2002, *IBVS*, 5239.
18. Kiss L.L., Szabó Gy.M., Sziládi K., Fűrész G. és mtsai., 2001, A variable star survey of the open cluster M37, *Astron. and Astrophys.*, 376, 561
19. Vinkó J., Csák B., Csizmadia Sz., Fűrész G. és mtsai., 2001, Distance of the active galaxy NGC6951 via type Ia supernova 2000E. *Astron. & Astrophys.*, 372, 824
20. Kiss L.L., Szatmáry K., Szabó Gy.M., Mattei J.A., 2000, Multiperiodicity in semiregular variables. II. Systematic amplitude variations, *Astron. & Astrophys. Supplement Series*, 145, 283
21. Csák B., Kiss L.L., Szabó Gy.M., Sziládi K., Sárneczky K., 2000, New field variable stars III, *IBVS*, 4989
22. Csák B., Kiss L.L., Sziládi K., Sárneczky K., Szabó Gy.M., 2000, New field variable stars II, *IBVS*, 4881
23. Csák B., Kiss L.L., Szabó Gy.M., Sárneczky K., Sziládi K., 2000, New field variable stars I, *IBVS*, 4875

Konferencia-kiadványok

24. Jurić M., Ivezić Ž., Lupton R.H., Szabó Gy.M., Quinn T., SDSS, 2004, Asteroid Colors and their Variability, AAS 205120066J
25. Derekas A., Kiss L.L., Bedding T. és mtsai., 2004, A Variable Star Survey of the Open Cluster NGC 2126, *Proc. IAU Coll. 193*, (ed. D.W. Kurtz & K.R. Pollard), ASP Conf. Proc. Vol. 310. San Francisco: ASP, p.162
26. Gáspár A., Kiss L.L., Derekas A. és mtsai., 2004, *Communications in Asteroseismology*, 145, 70
27. Kiss L.L., Szatmáry K., Szabó Gy.M., Mattei J.A., 1999, Changes of the physical state in semiregular variables, *IAU Coll. 176, ASP Conf. Series*, 203, p.277