

Válasz Dr. Petrovay Kristóf opponens kérdéseire

Doktori értekezés címe: Az ekliptikai üstökösök eredete és fizikai tulajdonságai

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

Doktori értekezés kategóriája: MTA doktori disszertáció

Doktori értekezés tudományos osztálya: MTA XI. Fizikai Tudományok Osztálya

Köszönöm Dr. Petrovay Kristóf opponensnek a disszertációm gondos áttanulmányozását és értékelését. Külön köszönöm az opponensi véleményben feltett 3. és 4. számú kérdéseket, amelyek a Naprendszer kis égitestei fizikai tulajdonságaival kapcsolatos további vizsgálatok irányába előremutatóak.

A konkrét kérdésekre a válaszaim a következők:

1. A 24. ábrán milyen koordinátaháló van az égitestre rávetítve? Másképpen: milyen (csillagászati? geodetikus?) koordinátarendszerben ekvidisztánsak az ott mutatott hosszúsági körök? Ránézésre ugyanis a rávetített koordinátaháló lapult (oblát) szferoidális alakot sugall.

Az értekezés 24. ábráján látható koordinátaháló az ellipszoid modell láthatóságát segíti elő. A koordinátaháló az (x, y, z) térbeli derékszögű koordinátarendszer (x, y) síkjában mért $(0 \leq \lambda' \leq 2\pi)$ hosszúság és $0 \leq |\phi'| \leq \pi/2$ szélesség paraméteres koordináták ekvidisztáns lépéseivel készült, amelyek az ellipszoid középpontjában felvett derékszögű koordinátákkal a következő összefüggésben állnak:

$$\begin{aligned} x &= a \cos \phi' \cos \lambda' \\ y &= b \cos \phi' \sin \lambda' \\ z &= c \sin \phi', \end{aligned} \tag{1}$$

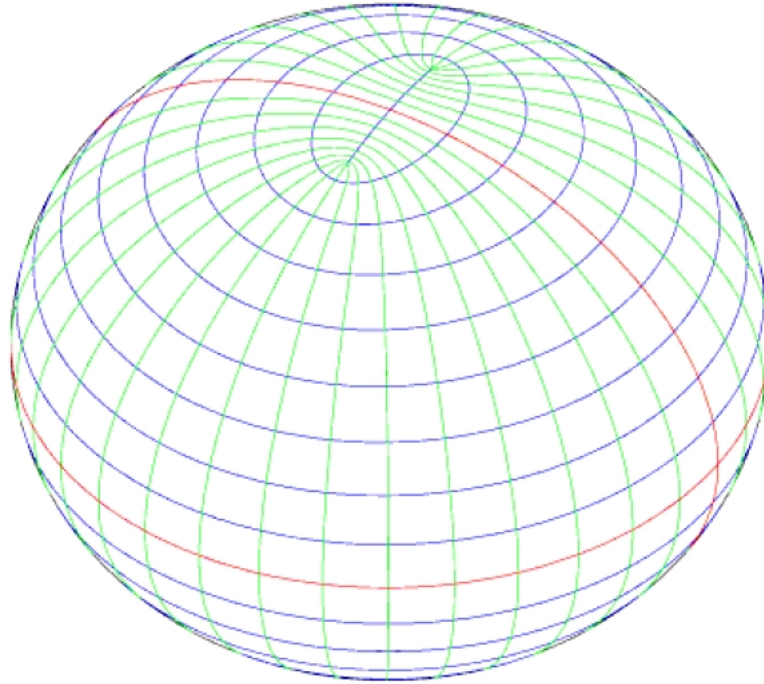
ahol $a \geq b \geq c$ az ellipszoid félnagytegyeinek hossza. Az értekezés 24. ábráján az ellipszoid modell nem a lapult forgásszimmetrikus (oblát: $a = b > c$, ami a c tengely körül forgásszimmetrikus), hanem az elnyújtott modell (prolát: $a > b = c$, ami az a tengely körül forgásszimmetrikus, de esetünkben a test, üstökös a c tengelye körül forog). Az üstökös c tengelyirányú forgástengelyének megfigyelésekből adott ekliptikai koordinátái és a Deep Space 1 űrszonda által készített kép orientációja (üstökös és kamera iránya) figyelembe lett véve. Látható, hogy az ábrán a paraméteres koordináták (szögek) ekvidisztáns lépésköze nem adja az ellipszoid felületén a koordinátahálózat egyenközű lépéseit, hiszen például két hosszúsági kör közötti ívhosszak távolsága erősen változó.

Felmerül a kérdés, hogyan lehetne jobban érzékeltetni az ellipszoid felületén a koordinátahálózatot az ekvidisztáns lépésköz sűrítése nélkül - hogyan lehetne az ellipszoid alak, felület láthatóságát javítani? Milyen koordinátahálózat lenne jobban ekvidisztánsnak látható az ellipszoidra?

Az ellipszoid felületének legnagyobb részén ekvidisztáns koordinátahálózat egy megoldását a XIX. században Carl Jacobi dolgozta ki az ellipszoidális szélesség és hosszúság (β, ω) koordináták bevezetésével, ezek és az (x, y, z) derékszögű koordináták között a következő összefüggés áll fenn (Karney, 2013: GeographicLIB 1.29 - Geodesics on a triaxial ellipsoid):

$$\begin{aligned} x &= a \cos \omega \frac{\sqrt{a^2 - b^2 \sin^2 \beta - c^2 \cos^2 \beta}}{\sqrt{a^2 - c^2}} \\ y &= b \cos \beta \sin \omega \\ z &= c \sin \beta \frac{\sqrt{a^2 \sin^2 \omega + b^2 \cos^2 \omega - c^2}}{\sqrt{a^2 - c^2}}. \end{aligned} \tag{2}$$

Az ellipszoid pólusai körül ($a + z$ és $-z$ tengelyek végpontjainál) a hosszúsági körök nem egy pontban, hanem egy zárt terület által közrefogott területen haladnak át (1. ábra).



1. ábra. Ellipszoid felületén a Jacobi-féle ellipszoid szélességi és hosszúsági körök (β, ω) szemléltetése 10° lépésekben. Az ábra egy háromtengelyű ellipszoidot mutat: $a = 1,01, b = 1, c = 0,8$ félnagy tengelyekkel, ortografikus vetületben (forrás: Charles F. F. Karney, 2013, GeographicLIB 1.29 - Geodesics on a triaxial Ellipsoid, <http://geographiclib.sourceforge.net/1.29/triaxial.html>).

Lehetne egy másik megoldás is az ellipszoid felületi koordinátahálózatának egyenletessé tételére: például a szélességi körök között egyenlő ívhosszak felvételével, de a hosszúsági körök ábrázolására a legnagyobb főgörbületű (legkisebb főgörbületi sugarú) orrpontban (nagy tengely-végpont) a jó láthatóság szempontjából elegendően kis ívhossz választása lenne célszerű.

2. Az EPOXI missziónak a 103P/Hartley üstökös magjára vonatkozó eredményei (2,33 km hosszú, elnyúlt súlyzó alakú mag) hogyan egyeztetethetők össze a jelölt korábbi idevágó mérési eredményeivel?

A kérdés a 103P/Hartley 2-üstökös magjának valódi alakja és előzetes űrszillagászati megfigyelésével kapott eredmény összehasonlításával kapcsolatos.

A 103P/Hartley 2 ekliptikai üstökös (103P) űrszillagászati megfigyelése az ISO Infravörös Űrobszervatórium (Infrared Space Observatory) ISOCAM (Infrared Camera) műszerével történt 1998. február 5-én 46 nappal a napközelsége után, amikor az üstökös 1,21 CsE naptávolságban és 0,91 CsE földtávolságban volt $53,2^\circ$ fázisszögnél. Az infravörös detektor egy képelemének mérete az üstökösénél 988 km méretű volt. Az üstökös mag megfigyelhető volt a 11,5 mikronos hullámhosszon (LW10 szélessávú szűrő) termális infravörös sugárzási fluxusa 41,2 millijansky volt.

Csak snapshot ("pillanatfelvétel") jellegű megfigyelés volt, tehát nem volt az üstökös teljes tengelykörüli forgásidejét átfogó fluxusgörbe (fénygörbe) megfigyelés, amelyből az üstökös hosszúka alakja elnyújtottságának mértékének lehetséges alsó határa $f_{\min}$ megbecsülhető lett volna: egy ($a > b = c$ félnagy tengelyekkel leírható, a c tengelye körül forgó elnyújtott ellipszoid test modellben $f_{\text{valódi}} \geq f_{\min}$. Sőt, sajnos nem volt a Hubble Űrteleszkóppal sem megfigyelve a 103P üstökös a látható fénytartományban, így nem volt a HST-vel független megfigyelés, ami lehetővé tette volna a méret és albedó egyidejű meghatározását, illetve a látható fénygörbe az infravörös fluxusgörbe mellett, annál pontosabb alak meghatározást ($f_{\min}$ becslést) tett volna lehetővé. A HST PC2 (Bolygókamera 2) műszerének egy képeleme az üstökös távolságában 16,8 km lett volna, ami jobb üstökös mag/kóma kontrasztot eredményezett volna, mint az infravörös detektor esetén volt ugyanolyan megfigyelési geometria mellett.

Mivel sajnos nem volt az infravörös megfigyelésekkel (ISO) közel egyidejű (HST) megfigyelés a látható fénytartományban, ezért az üstökös magokra általánosan elfogadott és érvényes 0,04 geometriai albedó értéket kellett feltételezni. Az ISO megfigyelés alapján a 103P üstökös magjának effektív radiusza $0,71 \pm 0,13$ km, ami egy 1,42 km-es átmérőjű gömb alakú testnek felel meg.

Az EPOXI (Extrasolar Planet Observation and Deep Impact Extended Investigation) űrszonda 103P üstökös magja közelében történt helyszíni elrepülése alapján kapott eredmények szerint az üstökös mag egy 2,33 km hossz tengelyű, erre a tengelyre közel forgásszimmetrikus súlyzó alakú test (Thomas és mások, 2013: Icarus 222, 550-558). Egy ilyen elnyújtott alakú forgó test forgási fázisa és rálátási geometriája következménye lehet, hogy az ISO megfigyelések az üstökös magnak a műszer detektorának képsíkjaiba eső kisebb keresztmetszetű vetületét mutatták.

Az EPOXI megfigyelésekből ismert forgástengely és az ISO megfigyelési geometriai lehetővé teszi, hogy az ISO megfigyelés idején az üstökös magot ne a forgástengelye irányából nézzük, hanem egy közbülső rálátási szögnél és olyan forgási fázisnál, hogy ezekből az ISO által megfigyelt kisebb keresztmetszetet adódhat.

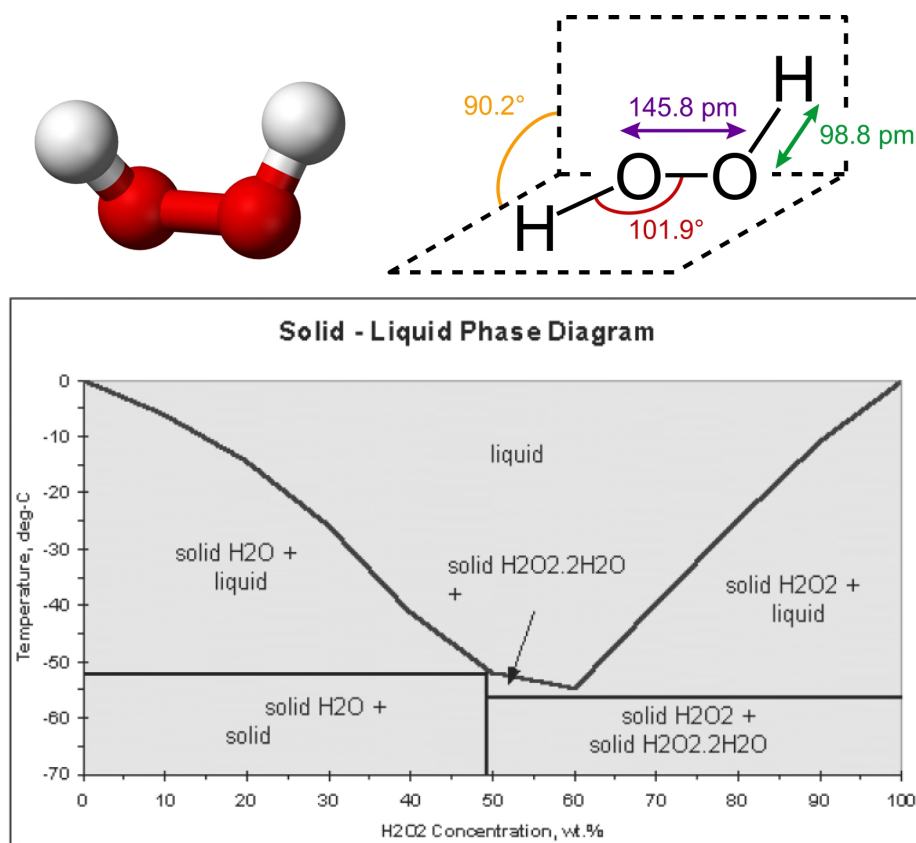
Megjegyzem, hogy a 103P magja összetett forgómozgást végez (Belton és mások, 2013: Icarus 222, 595-609), ami befolyásolhatja az egyszerű forgómozgás figyelembe vételével adódó megfigyelési geometriát, de az összetett forgómozgás is lehetővé teszi az ISO megfigyelések idején megfigyelt kisebb keresztmetszetet.

Egyébként az ISO megfigyelések alapján történt méretmeghatározásban az üstökös mag geometriai albedójának, valamint a fázisintegrálnak a 103P üstökösétől különböző értékei is okozhatnak eltérést a helyszíni űrszonda által megfigyeltéktől.

Összefoglalva: a 103P/Hartley 2 üstökös magjának mérete közötti különbség, ami az ISO és EPOXI megfigyelések között tapasztalható, elsősorban az erősen elnyújtott alakú üstökös magnak az ISO megfigyelés idején fennállt megfigyelési, rálátási geometriai helyzetéből adódik (snapshot megfigyelés).

3. Milyen okai lehetnek a 17P/Holmes-üstökös szuperkitöréseinek?

2007. október 24,0 UT-kor felfedezték, hogy a 17P/Holmes ekliptikai üstökös váratlanul mintegy 14 magnitúdóval kifényesedett és szabad szemmel is jól láthatóvá vált a napközelsége után mintegy 5 hónappal. Egyébként az üstökös felfedezését is egy ilyen szuperméretű fényességkitörés tette lehetővé 1892-ben, s a 2007-es újabb, megfigyelt szuperkitöréséig 115 év telt el. A Holmes-üstökös impulzusszerűen (néhány óra leforgása alatt) mintegy $(2 - 90) \times 10^{10}$ kg poranyagot dobott ki a kómába, a porkibocsátás csúcsa 2007. október 24,54 $\pm$ 0,01 UT-kor volt $3,5 \times 10^5$ kg s⁻¹ maximális porkibocsátással (Li és mások, 2011: Astrophys. J. 728, 31). A hirtelen nagy fényességnövekedés, illetve nagy mennyiségű poranyagnak a kómába történt kidobódása alapján "szuperkitörésről" vagy "megakitörésről" tesz említést a szakirodalom (superoutburst, megaoutburst, megaburst).



2. ábra. A hidrogén-peroxid (H_2O_2) molekula szerkezete (bal felső panel), szilárd fázisának szerkezete (jobb felső panel), valamint szilárd-folyékony állapotának fázisdiagramja (nem a szokásos p-T síkon, hanem a T-koncentráció síkon) (Giguere, 1975: *Complements au Nouveau Traite de Chimie Minérale*, No. 4, Paris, Masson 1975; Miles, 2007: astro-ph: ArXiv 0712.3314).

Itt most két, elsősorban tudománytörténeti jellegű magyarázat után ismertetem a ma széleskörben elfogadott, de még vitatott, nem végleges modelleket a 17P/Holmes üstökös megfigyelt szuperkitöréseinek magyarázatára.

Elsősorban tudománytörténeti jelentőségű magyarázatok:

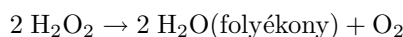
1. *Ütközési hipotézis.* Az üstökös magja kettős égitest: egy kis méretű kísérője van és ez kétszer súrlolta a nagyobb mag felszínét, ami anyag felszabadulással járt 1892. őszén és 1893. januárjában (Whipple, 1984: *Icarus* 60, 522-531). Ez a feltevés a 2007-es szuperkitörést is figyelembe véve teljesen valószínűtlen, ugyanis az ilyen ütközések nem okozhatnak olyan nagy mennyiségű anyag kiszabadulását az üstökös magból, ami a megfigyelt fényességnövekedést eredményezné (akár az 1892/93-as, akár a 2007-es szuperkitörések esetén). Amennyiben ez a "súrló" (grazing) ütközési hipotézist tételeznénk fel a 2007-es szuperkitörés magyarázatára, ez a mechanizmus nem működne, mert egyáltalán a 115 éven keresztül igen sok ilyen ütközésnek kellett volna történnie, ami miatt ezt az üstökös egy rendszeresen szuperkitörésben lévő égitest lenne, amit nem figyeltünk meg, illetve már 1-2 súrlódó ütközés után vagy teljesen szétesése vagy pedig teljesen más, ütközést elkerülő pályára állna a kis égitest, ami nem eredményezne további kitöréseket. Az ütközési hipotézis már nem is került elő a Holmes-üstökös 2007-es szuperkitörésének magyarázatára.

2. A hidrogén-peroxid, illetve a folyadék fázis lehetséges szerepe az üstököskitörésekben. A hidrogén-peroxid (H_2O_2 vagy más kémiai képlettel HOOH , amit néha "oxidált víznek" is szoktak nevezni), az üstökösrag porózus felszínén ultraibolya sugárzás, napszél részecskék vagy kozmikus sugárzás hatására alakulhat ki (pl. elektronok hatására kristályos vízjégben, l. Zheng és mások, 2006: *Astrophys. J.* 639, 534), de már létrejöhetett a csillagközi anyagban, illetve a csillagközi ösködében is. Az ESO APEX (Atacama Pathfinder EXperiment) teleszkópjával a szubmilliméteres tartományban a rho Ophiuchii magjában kimutatták a hidrogén-peroxidot (Bergman és mások, 2011: *Astron. Astrophys.* 531, L8). A Naprendszerben a Ganymedes, Callisto és Enceladus holdakon, valamint a Marson is kimutatták a hidrogén-peroxidot (Hendrix és mások, 1999: *LPSC* 30, 2043; Encarnaz, 2004: *Icarus* 170, 424). A hidrogén-peroxid tehát előfordul a csillagok körüli korongok anyagában és előfordulhatott a Naprendszer ösködében is, amiből az üstökösök kialakultak.

Az üstökösragban a hidrogén-peroxid izolált kristályos vízjég trimerben van jelen ($\text{HOOOH} \bullet 2\text{H}_2\text{O}$) mintegy 80 K hőmérsékleten és ha a hőmérséklet eléri a mintegy 150 K-ot, akkor a trimerek kristályos $\text{HOOOH} \bullet 2\text{H}_2\text{O}$ dihidrátokká alakulnak. A 2. ábra a hidrogén-peroxid fázis állapotait mutatja a hőmérséklet és koncentráció síkon. Mintegy 217 K (-56 C) körül a szilárd-folyékony fázisátmenet lehetséges.

A NASA Stardust üstökösszondája által a 81P/Wild 2 ekliptikai üstökösnel begyűjtött porminta laboratóriumi vizsgálata kimutatta a vas-oxidok és vas-hidroxidok jelenlétét (hematit, goethite: FeOOH , stb.), amik az üstökösragokban a hidrogén-peroxid katalitikus szétbontását teszik lehetővé, s ez a folyamat alapja lehet az üstökösök szuperkitörésének.

A vízhez kötött hidrogén-peroxidból ($\text{H}_2\text{O}_2(\text{aqueous})$) például egy fém katalizátor segítségével (vas: Fe) végbemenő katalitikus folyamat során oxigén gáz szabadul fel - ez a hidrogén-peroxid katalitikus felbontása, dekompozíciója (Abbot és Brown, 2004: *J. Chem. Kinetics* 22(9), 963):



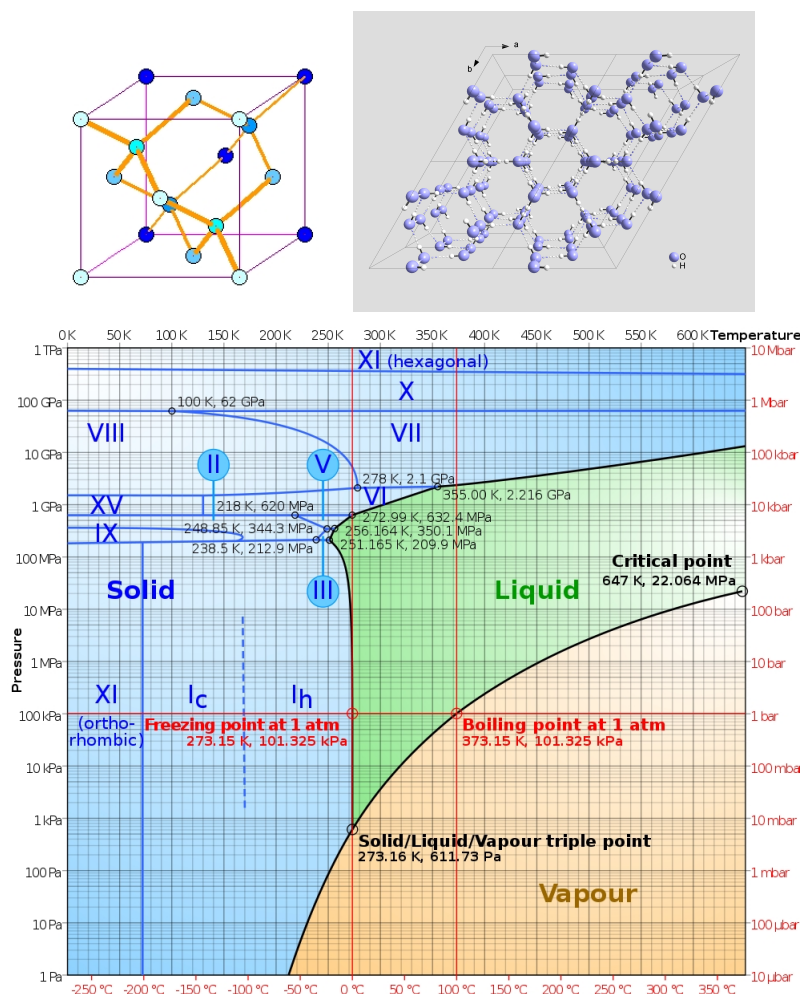
A folyamat hőtermelő és oxigén gázt szabadít fel ami további jegek (vízjég, szénmonoxid-jég, széndioxid-jég) heves szublimációját indítja el. Az oxigén pedig az üstökösrag felszíne alól hevesen (nagy sebességgel) kitörni igyekszik. A kitörő gázok a port és a mag külső felszíni rétegét képesek leszakítani és a kómába kiszórni. A Stardust eredményei alapján Miles (2007: astro-ph ArXiv 0712.3314) feltételezi, hogy az üstökösragban van elegendő fém is, például vas (Fe), amely képes katalitikus reakcióba lépni a hidrogén-peroxiddal a mag felszíne alatt és heves kitörést produkálni. A hidrogén-peroxid vas-katalizált dekompozíciója alapja lehet egy üstökösrag szuperkitörésének, sőt a mag teljes szétesési folyamatát is elindíthatja (Miles 2007).

Meg kell jegyezni, hogy hidrogén-peroxidnak az üstököskitörésekben betöltött esetleges szerepével kapcsolatban Miles (2007: astro-ph ArXiv 0712.3314) kéziratot küldött be a Monthly Notices of the Royal Astronomical Society neves szakfolyóiratba, ahol végülis nem jelent meg, de a különböző vegyületek lehetséges folyadék fázisáról végülis megjelentetett egy részletesebben kidolgozott cikket Miles és Faillace (2012: Icarus 219, 567-595. oldal). A cikk szerint a víz (H_2O), metanol (CH_3OH), etán (C_2H_6) és néhány más egyes kötésű egyszerűbb szénhidrogének $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$, ún. alkánok, pl.: az etán C_2H_6 , ($n = 2$) és propén C_3H_8 , ($n = 3$), illetve C_nH_{2n} alkének nagy naptávolságban folyadék fázisban lehetnek az üstökös-mag belsejében. Miles és Faillace (2012) az üstökös-magokra részletes hő- és anyagszerkezeti modellt alkalmaztak és figyelembe vették a hővezetést, porozitást és a poros-jeges anyag termo-mechanikai tulajdonságait is. Ezeknek a vegyületeknek a fázisdiagramján ugyanis a hármaspont nagyon alacsony hőmérsékletnél van és így nagy naptávolságban előfordulhatnak folyadék fázisban. A felszín alatt a felszínhez közel kialakulhat egy stabil, hosszú élettartamú folyadékréteg, amely megnöveli a hővezetőképességet, amelynek következtében a mag egyre mélyebb részei is felfűtődhetnek. Amennyiben illékony szénmonoxid (CO), széndioxid (CO_2) és metán (CH_4) is jelen van, például más jegekbe ágyazottan ("trapped volatiles", "trapped gases"), akkor ezek heves szublimációba kezdenek és jeges-poros szemcséket magukkal ragadva kitörést produkálhatnak az üstökös-magon. Ez az elképzelés ma még vitatott és csak a közeljövő helyszíni űrszondás vizsgálatai - pl. az ESA Rosetta programja által ellenőrizhető az elmélet helyessége.

A ma legelfogadottabb magyarázatok a 17P/Holmes-üstökös szuperkitöréseinek magyarázatára, amelyek 2007-től 2012-ig az utóbbi öt évben láttak napvilágot:

1. *Amorf-kristályos vízjég fázisátalakulása és az üstököskitörés.* Földi körülmények között a természetben a vízjég kristályos formában fordul elő, de asztrofizikai környezetben alacsony hőmérsékleten (a nyomástól és az aktuális hőmérséklettől függően) 120 K alatt metastabil, amorf fázisban. Amikor a hőmérséklet 150 K fölé kezd emelkedni az amorf vízjég köbös kristályos formába alakul át, majd egy jól behatárolható szűk hőmérséklettartományban 195-223 K között stabil hexagonális kristályos formába alakul át (3. ábra). A folyamat hőfelszabadulással jár, amelynek mértéke $9 \times 10^4 \text{ J kg}^{-1}$ (Ghormley, 1968: J. Chem. Phys. 48, 503-508).

A Halley-üstökös 1991-es kitörésének legvalószínűbb magyarázata az üstökös-magban levő vízjég amorf-kristályos fázisátalakulása lehet (Priyalnik és Bar-Nun, 1992: Astron. Astrophys. 258, L9-L12; Sekanina és mások, 1992: Astron. Astrophys. 263, 367-386). Ehhez hasonlóan Sekanina (2008: ICQ 30, 3-28) szerint a 17P/Holmes-üstökös szuperkitöréseinek, köztük a 2007-ben megfigyeltnek is az üstökös-magban levő amorf vízjég kristályos vízjéggé való fázisátalakulásakor felszabaduló hő által megindított heves szublimáció, gáz- és porkibocsátás lehetett. A mag felszíne alatt egy kristályosodási front zóna alakul ki, amely lassan, a napköri keringésként egyre mélyebbre hatol a magban és az addig még amorf fázisban levő vízjeget kristályos fázisba alakítja át miközben heves szublimáció indul meg (Priyalnik, 1992: Astrophys. J. 388, 196-202).

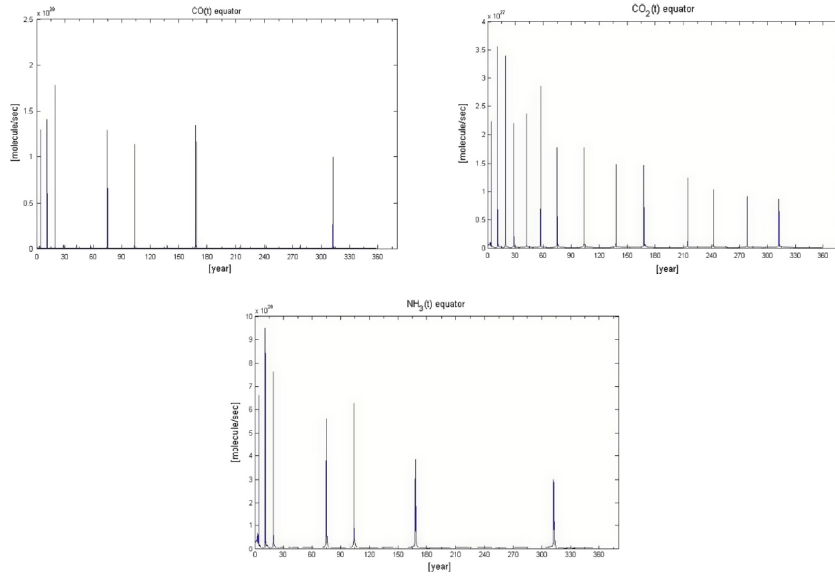


3. ábra. A köbös kristályos vízjég (I_c) szerkezete - csak az oxigén atomokat feltüntetve (bal felső panel), a hexagonális kristályos vízjég (I_h) szerkezete (jobb felső panel), illetve a víz fázisdiagramja (alsó panel). Az amorf vízjégből a köbös kristályos átalakulás mintegy 150 K-nál (-123 C) indul meg és 195-223 K ($-78/-50$ C) között alakul ki a hexagonális kristályos szerkezet (ábrák forrásai: <http://www.uwbg.edu>, http://en.wikipedia.org/Phase_diagram).

A heves szublimációval a jégből felszabaduló nagy mennyiségű gáz nyomásának is szerepe van az üstököskitörésben. A vízjég amorf-kristályos fázisátalakulásakor az üstökösanyag felszíne közelében a gáznyomás megnövekszik, ami a felszín poros-jeges anyagában (a felszín külső kérgében) mechanikai feszültséget kelt. A KOSI üstökösanyag szimulációs labor kísérletek szerint ennek megengedett legnagyobb értéke mintegy $\sim 10^5$ din cm⁻² (Kochan és mások, 1989: Adv. Space Res. 9, 113) és ezen érték felett az üstökösanyag felszíne berepedezik, széttöredezik és leválik a felszínről (Prialnik és Bar-Nun, 1992; Sekanina, 2008). Tehát így dobódhatott le a 17P/Holmes-üstökös mag felszínének egy része méter – néhányszor tíz méteres kéreg vastagságban. Sekanina (2008) a vízjég mellett a az üstökösanyagban jelenlévő szénmonoxid heves szublimációját is feltételezte, ami segíthette a mag külső rétegének, ezzel együtt pedig nagy mennyiségű pornak a kómába való felemelését.

2. *A szénmonoxid (CO) szerepe.* Kossacki és Szutowicz (2010: Icarus 207, 320-340) rámutatott, hogy a 17P/Holmes-üstökös szuperkitörését nem is lehet egyedül csak a vízjég amorf-kristályos fázisátalakulásával megmagyarázni. A poros vízjégből álló mag amorf-kristályos vízjég fázisátalakulásával felszabaduló energia nem elegendő a szuperkitörés után megfigyelt nagy tömegű porkóma kialakulásához. Kossacki és Szutowicz (2010) tehát a Sekanina (2008) magyarázatnak egy független megerősítését adták meg, mert kimutatták, hogy a magban lévő szénmonoxid-jég (CO) gyors szublimációja valóban szükséges a mag felszín közeli gáznyomás megnövelésének, ami meghaladhatja a mag szilárd külső rétegének szakítószilárdságát, s így kitörésszerűen nagy mennyiségű por szabadulhat ki a magból.
3. *Más gázok szublimációjának szerepe.* Gronkowski és Sacharczuk (2010: Mon. Not. R. Astron. Soc. 408, 1207-1215) négy mechanizmust vizsgáltak meg a 17P/Holmes-üstökös szuperkitöréseinek magyarázatára:
 - (a) *A hidrogénianid (HCN) polimerizációja.* A Halley-üstökösben kimutatott CHON (C, H, O és N tartalmú) porszemcsék a hidrogénianid jelenlétére utalnak az üstökösökben. A HCN a csillagközi anyagban is és az üstökösökben is mintegy 0,1–4% közötti gyakorisággal fordul elő. A HCN polimerizációja a csillagközi porszemcsék felületén ultrabolya sugárzás hatására végbemehetett, így a Naprendszer ősködében már adva lehetett polimerizált HCN. Az üstökösök kitörés szempontjából a már kialakult üstökösökön bekövetkező HCN polimerizáció a fontos: ugyanis a HCN az üstökösök felszínközeli rétegeinek fejlődése során is végbemehet ultrabolya sugárzás hatására a polimerizáció, amelynek során $1,85 \times 10^7 \text{ J kg}^{-1}$ hőenergia szabadul fel (Rettig és mások 1992: Astrophys. J. 398, 293; Gronkowski és Smela, 1998: Astron. Astrophys. 338, 761). A HCN polimerizációjával felszabaduló hő megindíthatja a magban lévő amorf vízjég kristályos vízjéggé való fázisátalakulását, ami heves szublimációt eredményez.
 - (b) *Csak a vízjég amorf-kristályos fázisátalakulásával felszabaduló hő (HCN polimerizációja és CO szerepe nélkül).* Az amorf vízjég kristályos vízjéggé történő fázisátalakulásakor erős szublimáció és porkiszabadulás megy végbe, ami nagy tömegű porkóma kialakulásához vezet (l. fentebb még a Sekanina (2008) modellt).
 - (c) *Hő hatására keletkező mechanikai feszültségek az üstökösökben.* Az üstökösök elnyújtott ellipszis pályán keringenek a Nap körül. A 17P/Holmes ekliptikai üstökös ellipszis pályájának excentricitása 0,432, a pálya fél-nagyitengelye 3,61 CsE, legközelebb 2,05 CsE-re, legtávolabb pedig 5,18 CsE-re van a Naptól, keringési ideje 6,88 év (JPL oszkuláló pályaelemek id. 9000217, az 1964-2007. közötti megfigyelések alapján). Az üstökösök felszíne és belseje közötti hőmérséklet különbség a napközelség körüli hónapokban olyan nagy lehet, hogy ennek hatására fellépő mechanikai feszültségek a magban meghaladják a vízjég magot összetartó erejét (szakítószilárdságát). A 17P/Holmes-üstökös mag felszínén fellépő feszültség lehet az üstökös megfigyelt szuperkitörésének egy magyarázata Gronkowski és Sacharczuk (2010) szerint.
 - (d) *Mechanikai feszültségek a bezárt CO hatására.* A vízjég szakítószilárdsága csökken akkor, amikor benn CO zárványok vannak. Az üstökösök anyagának (víz és széndioxid-dominált) effektív szakítószilárdsága (σ_{eff}):

$$\sigma_{\text{eff}} = \sigma - 1,5 f P_{\text{vap}} \quad (3)$$



4. ábra. A 17P/Holmes-üstökösben a CO, CO₂ és NH₃ gázok kibocsátási üteme időszakonként kiemelkedő csúcsokat mutat egy 360 év időtartamot átfogó modell szimuláció során (Hillman és Prialnik, 2012). A vízszintes tengely az években mért időt jelöli. A függőleges tengelyeken molekula s⁻¹ egységben $\times 10^{29}$ (CO), $\times 10^{27}$ (CO₂) és $\times 10^{26}$ (NH₃) van feltüntetve. Mintegy 100-szor annyi CO szabadul ki időegységenként, mint CO₂ és időegységenként ammónia csak egy tizedannyi ammónia szabadul ki, mint széndioxid (forrás: Hillman és Prialnik, 2012, 1., 2. és 4. ábrák).

ahol σ a vízjég eredeti szakítószilárdsága, f a vízjég azon tömeg hányada, amelyben CO zárványok vannak (általában $f = 0,18$, azaz 18%), P_{vap} a CO gáz nyomása. Amikor az üstökös pályáján közeledik a Naphoz, a mag felszínéhez közeli rétegében a bezárt CO gáz nyomása növekszik, ami az effektív szakítószilárdságot csökkenti az (3) képlet szerint. Az üstökös több keringése során csökken a mag felszín közeli részének szakítószilárdsága, ami a mag felszínéről folyamatos anyagleváláshoz, illetve kitörésekhez vezet. A szuperkitörésekért Grownkowski és Sacharczuk (2010) szerint a mag mélyebb részéből a belső repedéseken keresztül felszínre törő nagy nyomású CO gáz a felelős.

A 17P/Holmes-üstökös szuperkitörésének magyarázatára a fent felsorolt négy közül a negyediket, vagyis a CO-zárványok által meggyengített belső szerkezetű üstökösmagban fellépő mechanikai feszültséget tartja a legvalószínűbbnek Grownkowski és Sacharczuk (2010).

4. *Többkomponensű kémiai összetételű üstökösmag 3-dimenziós hőmodellje a 17P/Holmes-üstökös ismétlődő szuperkitöréseinek magyarázatára.* A 17P/Holmes-üstökös részletes, háromdimenziós hőmodelljét fejlesztette ki Hillman és Prialnik (2012: Icarus 221, 147-158). Ez az eddigi legrészletesebb, a valósághoz a legközelebb álló hőmodelleje a Holmes-üstökös magjának és ismétlődő szuperkitöréseinek. A modellben az üstökösmag kristályos vízjég összetétele mellett amorf vízjég, illetve az amorf vízjégbe ágyazott ("trapped") szénmonoxid (CO), széndioxid (CO₂) és ammónia (NH₃), valamint por is szerepel (4. ábra). A vízjég amorf-kristályos fázisátmenete kristályosodási frontot mozgat az üstökösmag felszíne alatt a felszíntől a mag belseje felé. Az amorf vízjégbe ágyazott gázok szuperillékonyak és a modell szimulációk 360 éves időtartamra számították ki a magból időegységenként kiszabadult gáz és por mennyiségét.

Az adódott, hogy az üstökös pályájának bármely pontján előfordulhatnak kitörések mintegy 30 évenként: a kitörések nem korlátozódnak kizárólag a napközelség környékére, hanem a kitörések körülbelül egy harmada a Naptól távoli pályaszakaszon fordul elő, sőt mintegy 100 évenként perihélium közelében, röviddel a napközelség után néhány héttel, néhány hónappal - ugyanis a mag felszínének napközelség idején történt felmelegedése után rövid idő kell, amíg a mag felszíne alatt a gázok nyomása annyira megnövekszik, hogy annak kitörés (rövid idő alatt nagymennyiségű por- és gázkibocsátás) legyen a következménye. A kitörések előfordulásának naptávolságtól való függetlenségének oka a vízjég amorf-kristályos fázisátmenete frontjának folyamatos vagy lépcsőzetes előrehaladása a mag belseje felé és ezzel együtt a felszabaduló beágyazott gázok törnek fel és okoznak kitöréseket. A kristályosodási front folyamatos előrehaladása nagy naptávolságban is zavartalanul folytatódik. Napközelen valóban több hő éri a mag felszínét és ha ez be tud hatolni a mélyebb részek felé, akkor erősítheti az amorf-kristályos fázisátalakulás hatását a gázok kiszabadítására. A modell szimulációk szerint a kitörések előfordulási gyakoriságát nem befolyásolja sem a mag tengelykörüli forgásideje, sem pedig a forgástengely térbeli iránya, sem pedig az üstökös pályabeli pozíciója. A kitörések fő oka az amorf-kristályos vízjég fázisátalakulási frontjának mozgása, a vízjéghez kötött gázok nagysebességű kiszabadulása és az általuk mozgatótt nagy mennyiségű poranyag felemelése az üstökös belsejéből és felszínéről.

4. Mi az alapja annak a feltevésnek (127. oldal), hogy az üstökös magok anyagának szublimációja az eredeti felszín színétől függetlenül ugyanannyival csökkenti színindexet, és így a színeloszlás alakját egy eltolástól eltekintve változatlanul hagyja?

A kérdés megválaszolásához vizsgáljuk meg azt, hogy az üstökös mag aktivitása hogyan változtatja meg a magfelszín színét (fotometriai színindexét). Egy fiatal ekliptikai üstökös, amikor pályabeli fejlődése során a Naprendszer külső vidékeiről egyre közelebb kerül a Naphoz, vagyis a pályája fél-nagy tengelye és perihélium távolsága egyre kisebb lesz, aktívvá válik, ami az üstökös mag jegeinek szublimációját, a gáz- és poranyagának kibocsátását jelenti. Az üstökös mag legfelső felszíni rétegének por és gázanyaga eltávozik a magról és a felszín alatti friss jeges-poros anyag előkerül, aminek színe az eredeti felszín besugárzott sötét vörös anyagához képest kékebb (egyébként pedig a jegek - annak ellenére, hogy "frissek", azaz nem besugárzottak bennük lévő a por miatt mindig sötétek, kis fényvisszaverő képességűek lesznek). Például a valószínűleg még fiatal ekliptikai üstökösök, amelyek csak nemrég kerültek be a külső Naprendszerből (kentaur állapot közbeiktatásával) a magfelszínük színe a HST-vel végzett megfigyelések szerint még vörös: az 50P/Arend és 86P/Wild 3 (Lamy és Tóth, 2009: Icarus 201, 674-713, 3. táblázat).

A kentaurok és ekliptikai üstökös magok színének változását illusztrálja a 5. ábra, amikor inaktív állapotból szublimációs aktivitást mutató állapotba kerülnek. A friss jeges-poros felszínre azután a túl nagy tömegű porszemcsék visszahullanak, mert a magból kiáramló gázok nem képesek eltávolítani ezeket a magról és ballisztikus pályán (hajítás) visszahullanak a mag felszínére, ahol felhalmozódnak és egy felszíni köpenyt (mantle) hoznak létre (mantling process), aminek a színe szintén kékebb az eredeti vörös színhez képest. Jewitt (2002: ESA SP-500, pp. 11-19) szerint az üstökös mag



5. ábra. A külső Naprendszerből kentaur pályára frissen bekerült vörös színű objektumra példa a szublimációs aktivitást nem mutató 5145 Pholus (bal oldali panel) és hosszú idő óta aktív, kékes-szürke színű kentaur, a 2060 Chiron (jobb oldali panel) a művész elképzelése szerint. Az aktívvá váló üstökösmagok színindexének csökkenése is hasonló lehet (l. HST-vel történt üstökösmegfigyelési példák: 50P/Arend és 86P/Wild 3, Lamy és Tóth, 2009) (forrás: William K. Hartmann, <http://www.psi.edu/about/staff/hartmann/asteroids.html>).

körüli szuborbitális pályáról is visszahullhat poranyag a mag felszínére (a ballisztikus pálya felszíni pontjai nagyon távol vannak egymástól), így egy lokalizált aktív terület is betérítheti porral a mag felszínét, azaz "új" felszíni borítás képződik. A folyamat részleteit és modelljeit először Jewitt (1992: Liège conf., Brahic, Gerard, Surdej, szerk., 85-112), Luu és Jewitt (1996: *Astron. J.* 112, 2310-2318), Jewitt és Luu (2001: *Astron. J.* 122, 2099-2114) készítették el, illetve Delsanti és mások (2004: *Astron. Astrophys.* 417, 1145-1158) kiegészítették, kissé módosították, kiterjesztették külső Naprendszerbeli egyéb objektumokra is. Az aktív ekliptikai üstökösmag felszínén a köpeny ballisztikus folyamattal mintegy száz, legfeljebb ezer év alatt alakul ki (Jewitt, 2002), ami rövid idő ezen üstökösök mintegy százezer éves dinamikai élettartamához képest, tehát az üstökösmag felszín színének kialakulása gyors folyamat.

Az üstökösmag aktívvá válásakor kezdeti színétől a szublimáció során bekövetkező színeltolódás mértéke akkor független, vagyis a szublimáció mindig ugyanannyival csökkenti a színindexet ("kékíti" a mag színét), ha a felszínre került poros-jeges mag-anyag a szublimációs aktivitás folyamán optikailag ugyanolyan lesz. Ehhez az szükséges, hogy a teljes szublimációs aktivitási időszak alatt a komplex törésmutató, a porszemcsék mérete, a felszínen kialakult réteg durvasága, ami az effektív, átlagos felszíni meredekségi szöggel, a felszín makroszkópikus durvaságával jellemző szög-paraméterrel írható le - nem változik lényegesen.

Egy átlagos ekliptikai üstökösmag esetén a dinamikai, illetve szublimációs aktivitási élettartama alatt a szublimáció hosszú időn át azonos intenzitású és a felszínre került poranyag is a mag külső rétegeiben állandó fizikai tulajdonságúnak tekinthető fel. A szublimációs aktivitás néhányszor tízezer évig is lehetséges, ami rövidebb idő, mint a dinamikai élettartam, így üstökös pályán inaktív ("kihúnyt") üstökösök is lehetnek (pl. földközeli objektumok között, a NEO-k között).

Az üstökösmag felszínének szublimációs aktivitás következtében kialakult színét több tényező is befolyásolhatja:

1. A felszín színét alakító folyamat eléggé összetett és más körülményektől is függ: a szemcsék mérete és a felszínen a keveredésük, egymáshoz viszonyított konfigurációjuk módja is befolyásolja a felszín megfigyelhető színét. Továbbá, a jegek szublimációval történő elvesztése is lényeges színindex csökkenést eredményez (Grundy 2009: *Icarus* 199, 560-563).

2. Amennyiben az üstökös mag oly módon réteges belső felépítésű, hogy az egyes rétegekben változó optikai tulajdonságú poranyag kerül a felszínre, akkor is változhat a felszín színe. Ilyen réteges szerkezetről eddig nincs tudomásunk, csak vízjég, széndioxid, szénmonoxid mélység szerinti gyakorisági eltéréséről (9P/Tempel 1, 103P/Hartley 2). A por összetételében eddig nem tapasztaltunk mélységtől függést. A közeljövő ESA Rosetta üstökösszonda helyszíni vizsgálatai esetleg kimutathatnak réteges szerkezetet, de ma úgy gondoljuk, hogy a kisméretű üstökös magok (0,1-10 km) kialakulási folyamata nem eredményez kémiai összetételben és a por optikai tulajdonságaiban rétegződő szerkezetet.
3. Kozmikus sugárzás, bolygóközi úridőjárás hatására létrejövő "öregedés" (maturáció) csökkenti a fényvisszaverő képességet, tehát a felszín sötétedik, de az csak a már inaktívvá vált ("kihúnyt") üstökös magokra határos, mert nem kerül folyamatosan a maturációs folyamatot zavaró friss szublimációs aktivitási anyag a felszínre.

5. Kérem a szerzőt, fejtse ki bővebben, miért utalnak eredményei arra, hogy az ekliptikai üstökösök ősei inkább a plutínók, mint a Kuiper-objektumok? Csupán a 64. ábrán elfoglalt helyzetük hasonlósága adja az alapot? (Mert ez esetben pl. a szórt korong-objektumok helyzete még közelebbi...)

Az értekezés 64. ábráján bemutatott színindexekben ((B-V), (V-R) és (R-I)) a plutínók (PLU), nagy inklinációjú klasszikus Kuiper-öv objektumok (CKBO-HI), a kentaurok (CEN I+II együttesen), valamint a Szórt Korong-objektumok (SDO) a színindex eltolást tekintve egymáshoz közel helyezkednek el. A legnagyobb számú megfigyelt objektumot tartalmazó és egyben fotometriailag legpontosabb minta a (V-R) színindex mérésén alapul. Ezen a tengelyen a vöröstől kék szín eltolódás felé (jobbról balra) a PLU-SDO-CEN(I+II)-EC (ekliptikai üstökös) sorrend látszik. Egyébként ez a sorrend a színindex eltolódásokban megfelel a dinamikai modellekből előrejelzett pályabeli fejlődésnek ("ős-leszármazott" értelemben): a valamelyik Kuiper-öv (plutínó vagy klasszikus) alcsoportból Szórt Korong-Objektumok lesznek, amelyek később kentaurok pályákra állnak és ezután pedig a kentaurok közül kerülnek ki az ekliptikai üstökösök. Ez a fejlődési sor megfelel a korábbi égi mechanikai alapon kidolgozott modelleknek és az utóbbi években kifejlesztett Nice dinamikai modell által megjósoltak (Yu és Tremaine, 1999: *Astron. J.* 118, 1873-1881; Gomes, 2003: *Icarus* 161, 404-418; Morbidelli és mások, 2005: *Nature* 435, 462-465; Levison és mások, 2008: *Icarus* 196, 258-273). Tehát az ekliptikai üstökösök ősei nem közvetlenül a Szórt Korong-objektumok, hanem ezek mindenképp kentaurok állapoton keresztül válnak ekliptikai üstökössé. Egyébként az, hogy az ekliptikai üstökösök távoli, alap-ősei a plutínók lehetnek, ennek első részletes dinamikai alapon történő elemzését Yu és Tremaine (1999: *Astron. J.* 118, 1873-1881) adta meg. Az értekezés 63. és 64. ábrái a külső Naprendszer kis égitestjei megfigyelt színindexei alapján az égi mechanikai (dinamikai) vizsgálatoktól függetlenül utalnak az ekliptikai üstökösök lehetséges őseire, eredetére.

Egyéb megjegyzések:

Külön köszönöm az értekezés nyelvezetére vonatkozó észrevételeket, bírálatokat, amelyek a későbbiek során hasznosíthatók az értekezésre alapozott magyar nyelvű munkák elkészítésekor. Bár nem mentség, de valószínűleg a nagy terjedelmű, közel 200 oldalas magyar nyelven megírt értekezés viszonylag gyors elkészítésének nyomása is közrejátszhatott a helyesírási, nyelvezeti hibák előfordulásához, a szövegben való bennmaradásához. Elnézést kérek a szöveg olvasásában okozott nehézségekért.

A "Nice modell" az angol nyelvű szakirodalomban "Nice model", amelyben a "Nice" szó Nizza városának neve nem angolul, hanem franciául van. A modell kidolgozóinak minden bizonnyal játékos kedve tette az angol "nice" szót a formailag egyező Nice (Nizza) városnév helyébe, a modell minősítése céljából. A "Nice" szó egyébként közvetetten utal a város francia névre is, ahol a modell egyik megalkotója, Alessandro Morbidelli professzor végez tudományos kutató és egyetemi oktató munkát.

Mindenképp rendkívül érdekes lett volna az üstökösökkel kapcsolatos közelmúltbeli magyar vonatkozású földfelszíni csillagászati megfigyelési eredményekről is írni, illetve magyar nyelvű ismeretterjesztő tevékenységről, irodalomról is említést tenni, de az értekezés eleve nagy terjedelme és tartalmi célkitűzése (ekliptikai üstökösök) ezt sajnos nem tette lehetővé. Az értekezésben inkább az üstökösökkel kapcsolatos nemzetközi és hazai úrkutatási vonatkozású eredményekre helyeztem a hangsúlyt. Talán egy másik összefoglaló műben részletesebben kifejttem majd az üstökösök kutatásának közelmúltbeli magyar vonatkozású részleteit. Bár nem közvetlenül az értekezéssel kapcsolatos, de az opponensi bírálatban megfogalmazott egy megjegyzéssel kapcsolatban a következő kiegészítő információt szeretném adni. Szécsényi-Nagy Gábor üstökösökkel kapcsolatos kutatásait és megjelent ismeretterjesztő műveit is összefoglaltam egy ismeretterjesztő előadásomban a "Perseida-éj a Polarisban (2012)" esemény keretében. A Magyar Csillagászati Egyesület (MCSE) Polaris Csillagvizsgálójában 2012. augusztus 11-én megtartott "Perseidák, a Naprendszer parányai" című előadásom a

<http://www.youtube.com/watch?v=oMzWVDgRaHolist=PL1CD4271482532456> internetes címen található, amelyet a Polaris TV vett fel és az MCSE helyezett el az interneten. Továbbá az üstökösök hazai kutatásának történetéről és ezeknek az égitesteknek kortárs hazai kutatásáról az Élet és Tudomány című ismeretterjesztő hetilap 2013. március 29-i számának (LXVIII. évf. 13. szám) 394-395. oldalán megjelent riportban adtam rövid tájékoztatást.

Budapest, 2013. május 27.

Tóth Imre