

Válaszok Érdi Bálint kérdéseire

1. Az 5. oldalon szereplő egyenletekben több változó jelentése nincs megadva. Mit jelent σ_{fs} az (1.4) egyenletben, r és τ az (1.6)-ban, (1.7)-ben mi az s ? Az (1.10)-be történő behelyettesítés után (1.11)-ben miért nem szerepel Ω ? Hasonlóan, a 8.1 egyenletben mit jelent P_V , a 8.3-ban pedig A ?

Az (1.4) egyenletben: σ_{fs} – a forrássűrűségből származó konfúziós zaj

Mint ahogyan azt Kolláth Zoltán bírálatában is olvashatjuk, az (1.6) egyenletben van egy elírás, az ablakfüggvény nevezőjében szereplő r és τ ugyanazt jelenti, tehát az (1.6) egyenlet helyesen:

$$S(\theta) = \frac{1}{\tau} \int \Pi\left(\frac{x}{\tau}\right) |F(x - \theta) - F(x)|^2 dx \quad (1)$$

Az (1.7) egyenletben s a Fourier-változó (térfrekvencia)

Az (1.11) egyenletben csak arányosság és nem egyenlőség szerepel, így az ide a (1.9) és (1.10) összefüggések alapján történő behelyettesítésnek nem kell tartalmaznia az Ω térszöveget, az (1.9)-hez képest csak a gyökvonást végezzük el.

A (8.1) egyenletben a p_V a geometriai albedot, a (8.3) egyenletben A pedig a Bond-albedot (a teljes beeső és visszavert teljesítmény aránya) jelenti.

2. A diffúz égi struktúrákat általában a Fourier-teljesítményspektrumukkal szokták jellemezni. Sok esetben a teljesítményspektrum hatványfüggvénnyel adható meg. Ennek spektrálindeksen alapulnak a konfúziós zajra vonatkozó vizsgálatok. (5. oldal) Hogyan becsülhető a konfúziós zaj, ha a teljesítményspektrum nem írható le hatványfüggvénnyel?

A hatványfüggvénnyel történő leírás előnye, hogy pl. a galaktikus cirrusz teljesítményspektrumát meg lehet illeszteni alacsony térfrekvenciákon, ahol az ebből származó fluktuációs teljesítmény jelentősen nagyobb, mint a többi komponensé (pl. az extragalaktikus háttéré). Ezt az összefüggést felhasználva "le tudjuk vonni" a teljesítményspektrumból a cirrusz hozzájárulását magas térfrekvenciákon is. Amennyiben a komponensek között nincsen ilyen, alacsony térfrekvenciákon jól elkülöníthető komponens, akkor a magasabb térfrekvenciákon (pl. a felbontási határon, ahol ezek a vizsgálatok számára a legérdekesebbek) nem tudjuk megbecsülni az adott komponens hozzájárulását, így a többi komponens elkülönítése sem lehetséges. Ilyen esetekben a teljes struktúrazaj (a konfúziós zaj és a műszerzaj összege) mérhető a kívánt térfrekvenciákon, pl. a Fourier-teljesítményspektrumból, vagy a struktúrafüggvény segítségével, de csak felső korlátot adhatunk pl. az extragalaktikus háttér fluktuációs amplitúdójára. A műszerzaj bizonyos esetekben jól becsülhető (ld. a dolgozat 2.3 fejezetét), ekkor az asztrofizikai komponensek teljes konfúziós zaja meghatározható. Nem-hatványfüggvény alakú teljesítményspektrumok előfordulhatnak, pl. a galaxishalmazok léte egy a Poisson-eloszlástól eltérő térbeli eloszlást jelent a magas térfrekvenciákon (pl. Zemcov, 2014, Science, 346, 732), ennek elemzéséhez részletes extragalaktikus háttér modellekre van szükség.

3. Az állatövi fény kis skálás szerkezetére az ISO űrtávcső 25 μm -es méréseiből lehet következtetni, eszerint "a felületifényesség-fluktuációk a 3' térbeli skálákon nem haladják meg a 0,2%-ot ami $\pm 0,04 \text{ MJysr}^{-1}$ -nek felel meg magas ekliptikai szélességeken". (7. oldal) Mit jelent a "magas", és miért ezt emeli ki a szerző? Lehet-e tudni szélességtől függően a szerkezetet? Ugyanez a kérdés vonatkozik a "magas galaktikus szélességeken" kifejezésre, néhány sorral alább (1.12 egyenlet fölött).

Globális, kis skálás (nagy térfrekvenciás, $\sim 1'$ körüli illetve ezalatti skálákra vonatkozó) állatövi fény szerkezeti modellel nem rendelkezünk sem a látható, sem az infravörös tartományban. Az állatövi fény intenzitása a közép- és távoli-infravörös hullámhosszakon kb. 1/3-ára, 1/4-ére csökken az ekliptikai pólusok környékén az ekliptikán mérhetőhöz képest, és valószínűleg a fluktuációk amplitúdója is eszerint skálázódik (Nesvorný és mtsai, 2010, ApJ, 713, 816). Ilyen modell megalkotásán Varga-Verebélyi Erika kollégámmal dolgozunk (Verebélyi és mtsai, 2014, Asteroids, Comets, Meteors 2014, #555), a Spitzer-űrtávcső mérései alapján.

A kis skálás fluktuációk fontossága technikailag a legnagyobb az extragalaktikus háttér fluktuációinak meghatározásánál. Ezek az extragalaktikus háttérrel célzó mérések általában magas galaktikus és ekliptikai szélességeken ($b/\beta > 30^\circ$) történnek, hogy az előterek (galaktikus csillagközi anyag és az állatövi fény a Naprendszerben) hatását minimalizálni lehessen. A dolgozatban említett, a magas galaktikus/ekliptikai szélességeken az állatövi fény fluktuációs amplitúdójára kapott felső korlát (Ábrahám és mtsai, 1997, A&A, 328, 702) jó becslést jelent arra, hogy az extragalaktikus háttér fluktuációihoz az állatövi fény fluktuációi milyen mértékben tudnak hozzájárulni. Ezt a felső korlátot több, az extragalaktikus háttérrel foglalkozó munkában is felhasználták (pl. Zemov és mtsai, 2014, Science, 346, 732; Kashlinsky és mtsai, 2015, ApJ, 804, 99; Arendt és mtsai, 2016, ApJ, 824, 26).

4. 18. oldal: **”Az itt kapott eredményekből megbecsülhetjük, hogy mennyi lehet a cirrusz spektrálindexe az ég leghalványabb háttérfényességű területein a C200-as detektor hullámhossztartományában. Ehhez a $\log_{10}\langle B_{C2} \rangle - \alpha_{C2}$ összefüggést extrapoláltuk a leghalványabb mezőkre ...”.** Mi az említett összefüggés, és mennyire jogos az extrapoláció, tekintve hogy 13 égterületen 20 ISOPHOT térképet vizsgáltak, melyek mérete $0^\circ 5 \times 0^\circ 5$, és a 2.1 táblázat szerint ezek mintegy fele hasonló galaktikus koordinátákkal rendelkezik

A két összefüggés, a Draco mező kizárásával mintkét esetben, illetve a nagy meredekségű pontok figyelembevételével illetve kizárásával:

$$\alpha_{C2} = -1,38 \pm 0,40 \log_{10}(B_{C2}) - 1,96 \pm 0,53 \quad (2)$$

illetve

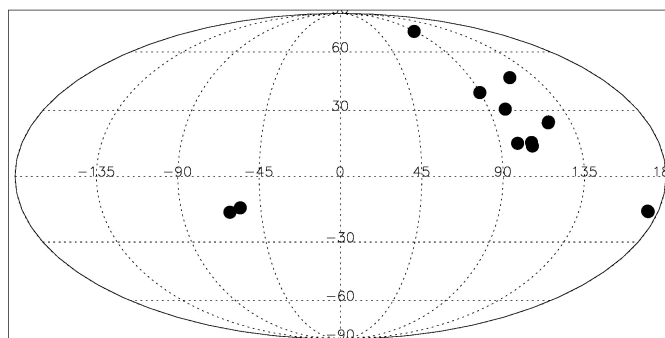
$$\alpha_{C2} = -1,36 \pm 0,14 \log_{10}(B_{C2}) - 1,52 \pm 0,20 \quad (3)$$

Az általunk vizsgált égterületek gyakorlatilag az ISOPHOT C100 és C200 kameráival mért összes szóbjöhető mérést jelentették, azaz az akkor (2000-es évek elején) elérhető legjobb és legszélesebb lefedettséget biztosító adatok voltak.

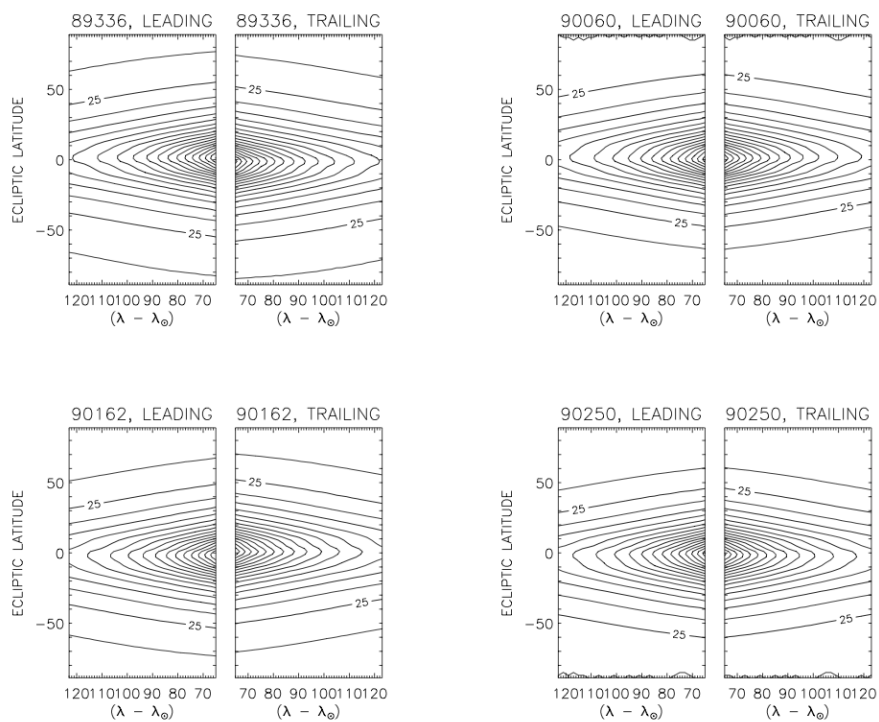
Valóban jól látható, hogy a mért területek elhelyezkedése nem egyenletes, és van egy kitüntetett galaktikus hosszúság, amelynek környékén a mérések többsége történt. Ugyanakkor a területek jól lefedik a különböző galaktikus szélességeket, ami a különböző csillagközi anyag szerkezetek szempontjából fontosabb, mint a jó hosszúságbeli lefedettség – ez egyben megfelelő felületi fényesség lefedettséget is jelentett, amit néhány távolabbi terület mérése nem javított volna számottevően.

5. 23. oldal: **”Abban az esetben, ha az adott elongációra és ekliptikai szélesség értékre nem volt DIRBE-mérés (a műszer véges élettartama miatt), az elongációt ’tükröztük’ a Nap másik oldalára és az ottani elongáció abszolút értékéhez tartozó pozícióra számítottuk ki az állatövi fény komponenszt. Ezt a tükrözött pozíciót majdnem minden esetben észlelték.”** Kérdés: szimmetrikus-e az állatövi fény a Napra elongáció szerint?

A jelenleg legszélesebb körben használt látható tartománybeli és infravörös állatövi fény modellek (Leinert és mtsai, 1998, A&ASS, 127, 1) minden esetben az elongációra szimmetrikus állatövi fény intenzitást tételeznek fel, mindkét hullámhossztartományban. A vezető és követő irányok közötti asszimmetria jól jellemezhető különböző napokon rögzített COBE/DIRBE $25 \mu\text{m}$ -es mérések izokontúr ábráival (Leinert és mtsai, 1998, 45. ábra). Ezek alapján a ’tükrözés’ hibája jelentősen kisebb, mint az egyéb mérési pontatlanságok.



1. ábra. A galaktikus cirrusz térszerkezetének meghatározásához használt területek elhelyezkedése galaktikus koordinátákban



2. ábra. Az állatövi fény $25 \mu\text{m}$ -es felületi fényessége vezető és követő elongációknál, a COBE/DIRBE mérések négy különböző napján (Leinert és mtsai, 1998).

6. A 3.2 ábra és a 3.1 táblázat szerint a (3.3) összefüggésben szereplő S paraméter a növekedésével csökken, $100 \mu\text{m}$ -nél azonban ettől a tendenciától eltérő, nagyobb érték található. Mi lehet ennek az oka?

A kérdéses egyenlettel a DIRBE és az ISOPHOT felületi fényességeket hasonlítjuk össze:

$$I_{\lambda}^{\text{ISOPHOT}} = S \times I_{\lambda}^{\text{DIRBE}} + I_0 \quad (4)$$

ahol $I_{\lambda}^{\text{ISOPHOT}}$ és $I_{\lambda}^{\text{DIRBE}}$ az ISOPHOT és DIRBE felületi fényesség értékek a λ hullámhosszon, S az illesztett egyenes meredeksége. Tökéletes kalibráció esetén természetesen tökéletesen azonosnak kellene lenniük a két műszerrel kapott értékeknek, azonban ez a kalibrációk (mindkét műszernél előforduló) bizonytalanságai miatt nyilvánvalóan nincs így. A kapott S meredekségeket az adott hullámhossz DIRBE és ISOPHOT kalibrációi, illetve annak hibái határozzák meg, de nem várunk semmilyen, hullámhossztól, vagy bármi mástól függő trendet ezekben az értékekben, így a $100\mu\text{m}$ -en kapott 1-nél nagyobb érték – ebben az esetben az ISOPHOT $\sim 10\%$ -al "felülbecsli a DIRBE méréseket – "véletlennek" tekinthető. Az valóban feltűnő, hogy ezen a hullámhosszon jóval nagyobb a két kalibráció közötti eltérés, mint 90, 170 és $200\mu\text{m}$ -en, azonban az 1:1 összehasonlításnál jól látható ($R_{1:1}$ a táblázatban), hogy a kapott $\sim 16\%$ eltérés összhangban van azzal, hogy mindkét fotometriai rendszer bizonytalansága 5–15%, hullámhossztól függően.

7. **38. oldal: "Az integrálásnál figyelembe vettük a külső és belső bolygók kalibráló hatását is." Mit jelent a bolygók "kalibráló" hatása? Milyen integrációs modellt, és milyen integrátort használtak?**

A bolygók "kalibráló hatása" természetesen elírás, *perturbáló* hatást szerettem volna írni.

A korlátozott N-test probléma megoldására használt Lie-integrátor módszer leírása megtalálható Pál & Süli (2007, MNRAS, 381, 1515) cikkében.

8. **39. oldal: "Az adott számolás keretein belül feltételeztük, hogy az aszteroidák lokális térbeli eloszlása Poisson-eloszlás." Hogyan egyeztethető ez össze a numerikus integrálásból kapott eloszlással?**

A fenti mondatban a dolgozat szövegében kiemeltém a "lokális" jelzót. Itt a "lokális" az adott égi pozíció kis környezetére vonatkozik, ahol ugyan az aszteroidák számát/fényességét a globális modellből kapjuk, de feltételezzük, hogy adott hely környezetében az eloszlás elég sima ahhoz (tipikusan $\sim 1'$ távolságon belül), hogy azt egyetlen számmal (konfúziós zaj/fluktuációs amplitúdó) jellemezni lehessen.

9. **Az SAM kisbolygók fluktuációs teljesítményének és teljes számának eloszlása maximumot mutat az ekliptikai szélességben az antiszoláris pontnál (5.1 ábra). Mi ennek a magyarázata, és mennyire egyezik a megfigyelésekkel?**

Egy adott kisbolygó látszó fényessége mind a visszavert fényben, mind a termális emisszióban a Naptól és a megfigyelőtől mért távolságok négyzetének szorzatával fordítottan arányos, illetve függ a Nap által megvilágított oldal megfigyelő általi láthatóságától (fázisszög). Ez utóbbi egy fővi kisbolygót a Földről megfigyelve az antiszoláris pont irányában lesz a legnagyobb (a Nap, a Föld és a kisbolygó pozíciója egy egyenesbe esik, a kisbolygó oppozícióban van). Hasonlóan, a fővi kisbolygók az antiszoláris pont környékén lesznek a Földhöz a legközelebb, és lesznek itt emiatt a legfényesebbek; vagy másképpen, adott fényességhatárig a legnagyobb számú kisbolygót az antiszoláris pont irányában tudjuk megfigyelni, így az ezeknek tulajdonítható konfúzió is ebben az irányban lesz a legnagyobb.

Dedikált infravörös konfúziós zaj méréseket űreszközökről általában éppen az antiszoláris pont irányában nem lehet végezni, mert az űrtávcsövek hővédelme miatt a hővédő pajzsokra a napsugárzásnak mindig kb. 90° -os szög közelében kell beesnie, maximum néhány 10° toleranciával, így ezek az eszközök szinte mindig kb. $\pm 90^\circ$ -ra mérnek az antiszoláris ponttól. A kevés elérhető földi műszerek esetében pl. a légkörből adódó és egyéb műszerzajok dominánsabbak az égi háttér (ebben az esetben a kisbolygók) zajához képest. Mint azt a dolgozatban is említettem (5.5 fejezet) a Spitzer-űrtávcső First Look Survey ekliptikai komponenséből származó fluktuációs adatok jó egyezésben vannak azzal az előrejelzéssel, amit mi a modellünkben az állatövi fény és a kisbolygók hozzájárulására kaptunk.

Természetesen nagyon elnyúlt pályán keringő (pl. földsíróló) kisbolygók nem feltétlenül az oppozíció környékén lesznek a legfényesebbek, de a dolgozatban tárgyalt statikisztikus modell ilyeneket nem vesz figyelembe, minthogy véletlen hozzájárulásuk pl. a konfúziós zajhoz elhanyagolható.

10. **Mit takar a dinamikailag "hideg" és "forró" elnevezés (91. oldal), azon kívül, hogy az inklináció kicsi az első, és nagy a második esetben? Ha az elnevezés dinamikai fejlődéssel kapcsolatos, van-e magyarázat arra, hogy a "hideg" objektumok kisebb méretűek, mint a "forrók", a 10.1 ábra szerint.**

A dinamikailag "hideg" és "forró" elnevezések eredetileg a klasszikus Kuiper-öv bimodális inklináció eloszlásában a kis ($<4,5^\circ$) és nagy ($\geq 4,5^\circ$) inklinációjú csoportokhoz tartozó objektumokra vonatkoztak, azt sugallva, hogy a hideg csoportba tartozó objektumok alkotják azt a klasszikus értelemben vett tóruszt, amit az egykori protoplanetáris korong legkevésbé perturbált maradványának tekintünk, az itt található égitestek kis inklinációja és excentricitása miatt. Mint azt később megmutatták, a két csoport más, fizikai jellemzőkben is eltér egymástól, pl. a forró csoportba tartozó, nagy inklinációjú objektumok kékebbek, mint az alacsony inklinációjúak (Peixinho és mtsai, 2008, AJ, 136, 1837), valamint a kettősök aránya számottevően nagyobb a hideg populációban (Noll és mtsai, 2007, Icarus, 194, 758). Mint ahogyan azt a dolgozat 11. fejezetében megmutattam, a hideg klasszikus objektumok kivétel nélkül a vörös-fényes szín-albedó csoportba tartoznak, míg a forró alpopuláció égitestjei között vannak a sötét csoportba tartozók is. Ennek alapján a hideg klasszikus populáció a Kuiper-öv legfontosabb valódi "maradvány" populációja, ami megőrizte a keletkezéskori felszíni tulajdonságokat az évmilliárdok alatt, szemben a forró populációval.

A 10.1 ábra a hideg és forró klasszikus Kuiper-öv objektumok elfogultság-korrigálatlan (felső ábra), illetve elfogultság-korrigált (alsó ábra) méreteloszlása látható, a "TNOs are Cool!" kulcsprogram adatai alapján. Az eloszlások megfelelnek annak az általános képnek, hogy a hideg populáció jobban megőrizte a méreteloszlás keletkezéskori, az akkréciós folyamatok által beállított alakját, míg a forró populációban az ütközések hatására a kisebb égitestek méreteloszlása módosult ("laposabb" lett), ahogyan azt az ütközési modellek alapján várjuk is (pl. Gladman és mtsai, 2001, AJ, 122, 1051). A hideg populációban található objektumok nem feltétlenül "kisebbek", de adott méretű égitestből kevesebbet tudunk megfigyelni, mint a forró populációban, amibe a dinamikai folyamatok (pl. a Neptunusz migrációja) más kiindulási pályákról is keverhettek be égitesteket – ezt részletesen tárgyaltam a dolgozat 11. fejezetében (T9 tézispont).

11. **A 2012 DR30 és a 2013 AZ60 kentaurok dinamikai szimulációja során a kezdeti pályaadatok közül az excentricitást, az inklinációt, és a perihéliumtávolságot változtatták. A másik három pályaelemet miért nem? A 12.3 táblázatban mennyi az M középanómália értéke (csak a hiba van megadva)? A kezdeti pályamenti helyzettől erősen függ a stabilitás.**

Korábban Horner és mtsai (Horner & Lykawka, 2010, MNRAS, 405, 49; Horner, és mtsai, 2004, MNRAS, 354, 79; — 2004, MNRAS, 355, 321; — 2011, MNRAS, 416, L11; — 2012, MNRAS, 422, 2145; — 2012, MNRAS, 423, 2587; Wittenmyer és mtsai, 2016, ApJ, 818, 35; — 2017, AJ, 153, 167) vizsgálták a bolygópályák stabilitását exobolygó rendszerekben és a kenturok esetében. Ezek szerint a források szerint általában a félnagy tengely és az excentricitás a domináns pályaelemek a stabilitás tekintetében. A pálya irányultságát leíró pályaelemek akkor válnak fontossá, ha az égitest középmozgás-rezonancia közelében mozog, ilyenkor a kis eltérések ezekben a pályaelemekben valóban eredményezhetnek nagyon stabil, vagy nagyon instabil pályákat. A mi égitestjeink nem rezonáns pályákon mozognak, ezért a stabilitás vizsgálatára elsősorban a félnagy tengelyt és az excentricitást használtuk.

Egy másik tényező a stabilitási számítások számítási ideje, amik így is nagyon hosszú ideig, hetekig futottak. 3-3 klón hozzáadása ω -ban, Ω -ban és M -ben 27-szeresére növelte volna a futási időt. Ehelyett azokat a pályaelemeket (q , e , i) választottuk, amelyeknél a korábbiak alapján a stabilitásra gyakorolt legnagyobb hatást vártuk.

Ezekre az égitestekre a középanómália jól meghatározott, mert pontosan ismerjük a perihélium-átmenet időpontját és az égitest helyét az azt megelőző, illetve azt követő hónapokban, az égitest egyébként igen hosszú keringési periódusához képest. A középanómáliának akkor lenne jelentősége, ha a "valódihoz" képest

az égitest sokkal (hónapokkal/évekkel) korábban vagy később érne a perihélium átmenethez. Ebben az esetben azonban nem a mi égitestünket szimulálnánk, hanem egy másik, ugyanolyan pályán mozgó objektumot.

A középanomália értéke a 12.3 táblázatban szereplő időpontban helyesen $M = 0.007354^\circ \pm 0.000032^\circ$ a Minor Planet Centre adatbázisában található adatok alapján.

Budapest, 2017. december 6.

Kiss Csaba