

Válaszok Kun Mária kérdéseire

1. A dolgozatban több helyen olvashatjuk, milyen fontos a Naprendszer Neptunuszon túli régióinak megismerése a távoli múlt feltárása szempontjából. A Neptunuszon túli vidék jelenti a kulcsot a Naprendszer kialakulásának és fejlődésének megértéséhez, és ahhoz is, hogy megértsük a távoli, most formálódó bolygórendszerekben zajló folyamatokat, valamint a Kuiper-öv jelenlegi és eredeti méreteloszlása fontos megszorítást jelent a Naprendszer-keletkezési modellek számára. Mit tudhatunk meg a korai Naprendszer tulajdonságairól, keletkezési körülményeiről a ma megfigyelhető tulajdonságok alapján? Milyen következtetéseket vonhatunk le a Naprendszer törmelékkorongjának mai tulajdonságaiból más bolygórendszerek keletkezési körülményeire?

A Naprendszeré az egyetlen olyan törmelékkorong rendszer, ahol nem csak az ütközésekből származó port, hanem a törmelékkorongot alkotó egyes égitesteket (törpebolygókat, aszeroidákat) is meg tudjuk figyelni. Ironikus módon, éppen a Naprendszer külső vidékein nem tudjuk detektálni az ütközésekből származó port, mert az állatövi fény magasabb hőmérsékletű és kiterjedt korongja elfedi előlünk az onnan származó sugárzást (ld. pl. Liou & Kaufmann, 2008, *The Solar System Beyond Neptune*, 425. o.). Így, bár nem tudjuk, hogy a Naprendszer ebben az értelemben tipikus-e, jelen pillanatban az itteni égitestekről szerzett információk az egyetlen forrásaink, amikre más bolygórendszerek/törmelékkorong rendszerekkel kapcsolatban támaszkodhatunk.

A bolygórendszerek fejlődési modelljeinek több olyan paramétere van, amiket jelenleg csak a Naprendszerbeli égitestekre tudunk megfigyelésekkel meghatározni (ld. a példákat alább); ezeket a modelleket a Naprendszerre alkalmazva azoknak összhangban kell lenniük a Naprendszerben ma megfigyelhető állapottal.

Ilyen pl. a törmelékkorong rendszerek méret vagy tömegeloszlása, amivel a Kuiper-öv esetében a dolgozat 10. fejezete részletesen foglalkozik. A mai törmelékkorong tömege is ebből a méret/tömegeloszlásból határozható meg (ld. részletesen a következő kérdésre adott választ). A különböző populációk tömeg-, illetve az abból származtatható abszolút fényesség eloszlásából nemcsak a törmelékkorong mai, hanem kialakuláskori tömege is származtatható (pl. Fraser és mtsai, 2014, *ApJ*, 782, 100), ami alapján hideg klasszikus populációban a felületi sűrűség $\Sigma(40 \text{ CSE}) \approx 10^{-5} \text{ g cm}^{-2}$ lehetett, hasonlóan a mai értékhez, szemben a belső, 20-30 CSE közötti régió $\Sigma(20-30 \text{ CSE}) \approx 0,3 \text{ g cm}^{-2}$ értékével. A dolgozatom 10. fejezetében közölt eredmények jelentősége, hogy az albedó becsléstől függetlenül tudja megadni a tömegeloszlásokat, szemben az abszolút fényességen alapuló modellekkel. A Naprendszer fiatal törmelékkorongjára vonatkozó eredmények közvetlenül felhasználhatóak más csillagok körüli korongok modellezésében is.

Hasonlóan, a kisbolygók összetételének heliocentrikus távolságtól való függése a korai Naprendszer dinamikai, keveredési folyamatainak lenyomataként értelmezhető a legkönnyebben (DeMeo & Carry, 2014, *Nature*, 505, 629). Ebben pl. a Jupiter befelé történő vándorlása majd visszafordulása (3.5–1.5–5 CSE, "Grand Tack" modell) alakíthatta ki a kisbolygó öv, és a Jupiter pályáján belüli kisbolygó populációk ma megfigyelhető összetételét (ideértve a Jupiter trójai kisbolygóit is). Ehhez szorosan kapcsolódik a dolgozatom 11. fejezetében tárgyalt megfigyelés, miszerint a külső Naprendszer égitestjei albedójuk és színük alapján két nagy csoportra lehet osztani. Az "ősi" jellegűket megőrző külső populációk csak a fényes-vörös csoportból tartalmaznak égitesteket (pl. a hideg klasszikus populáció), míg azok az populációk, amelyekbe a Naprendszer dinamikai fejlődése különböző heliocentrikus távolságokról is keveredhetek égitestek (pl. kentaurok, szórt korong objektumok, és bizonyos rezonanciák) vegyes képet mutatnak. Ebből arra következtethetünk, hogy a korai Naprendszerben létezett egy összetételbeli elkülönülés a külső és a belső vidékek között (kb. 20 CSE-nél), amit a dinamikai folyamatok (a Neptunusz kifelé történő vándorlása) jelentősen megváltoztatott.

A hideg klasszikus populációban nemrégén fedeztek fel lazán kötött, a populáció átlagánál kékebb kettősöket (Fraser és mtsai, 2017, *Nat. Astr.*, 1, 88), amelyek a modellek szerint a Neptunusz migrációjának korai fázisában a ~ 38 CSE tartományból kerülhettek a mai klasszikus hideg populációba (~ 40 – 47 CSE között), így egy olyan területről szolgáltatnak információt, amelyben ma gyakorlatilag nem léteznek égitestek.

Ugyancsak jelentős információt hordoznak a Naprendszer protoplanetáris korongjáról / törmelékkorongjáról a mai törmelékkorong legnagyobb égitestjeinek, a törpebolygóknak holdrendszerei. A legutóbbi eredmények

szerint (Parker és mtsai, 2016, ApJL, 825, L9 ; Kiss és mtsai, 2017, ApJL, 838, L1) minden, kb. 1000 km-nél nagyobb égitest rendelkezik kísérővel, amelyek ilyen hierarchikus rendszerekben ütközések során jöhettek létre. Az ütközések akkori gyakorisága és az ütközések kinematikája meghatározza a keletkező holdrendszerek gyakoriságát és a keletkező holdak relatív méretét (l. pl. Canup, 2005, Science, 307, 546). A megfigyelhető gyakoriság alapján a törpebolygók holdjai egy kis sebességszórású és sűrű korongban keletkeztek (hasonlóan a hideg klasszikus populációban ma megfigyelhető égitestekhez), függetlenül attól, hogy jelenleg milyen populációban találjuk meg ezeket.

Az egyedi objektumok megfigyelései is hasonlóan fontosak, és támpontul szolgálhatnak a más, éppen formálódó rendszerekben megfigyelt jelenségek értelmezéséhez. Pl. Ábrahám és mtsai (2009, Nature, 459, 224) az EX Lupi fiatal változócsillag kitörése után jelentős változást észleltek a csillag középínfravörös spektrumában, amit kristályos forsterit képződésének tulajdonítottak, hasonlóan ahhoz, amit a Naprendszerben az 1P/Halley és 9P/Tempel üstökösök spektrumában figyeltek meg.

A spektroszkópiai és színinformációk alapján azonosíthatók azok az illékony anyagok, amelyek meghatározzák az égitestek felszínét (CH₃OH, H₂S és NH₃ jegek, ld. pl. Brown és mtsai, 2011, ApJL, 739, L60; Wong & Brown, 2016, AJ, 152, 90), és amelyek alapján a kémiai összetétel változására is következtethetünk a fiatal törmelékkorongban.

2. Vannak-e becslések arra, mekkora (minimum-maximum) tömege lehet a Naprendszer törmelékkorongjának?

Mint ahogyan az a dolgozatban is említésre került, a Naprendszer törmelékkorongja három fő részből áll: a bolygóközi porkorongból (vagy állatövi fény korongból), a fő kisbolygóövből, illetve a Neptunuszon túli kisbolygóövből (általánosan használt megnevezéssel a Kuiper-övből).

Az állatövi fény tömegére a legpontosabb becslés még ma is a COBE/DIRBE mérések állatövi fény komponenséből származik, ennek alaján $M_Z \approx 4 \cdot 10^{15} \text{ kg} = 7 \cdot 10^{-10} M_{\oplus}$ (pl. Reach és mtsai, 1997, Icarus, 127, 461; Kelsall és mtsai., 1998, ApJ, 508, 44).

A főöv tömege dinamikai hatásai alapján, pl. a Viking-1 és 2 szondák pályái alapján becsülhető (pl. Krasinsky és mtsai, 2002, Icarus, 158, 98): $M_{\text{főöv}} \approx 18 \cdot 10^{-10} M_{\odot} = 5 \cdot 10^{21} \text{ kg} = 8 \cdot 10^{-4} M_{\oplus}$.

Mind az állatövi fény korong, mind a fő kisbolygóöv tömege számottevően kisebb, mint a Neptunuszon túli kisbolygóöv tömege, hiszen ezek az értékek jelentősen kisebbek pl. a Plútó tömegénél is (kb. $1.3 \cdot 10^{22} \text{ kg}$).

A Kuiper-öv tömegének becsléséhez általában az égitestek méreteloszlását használják, a módszer részletes leírása megtalálható pl. Gladman és mtsai (2001, AJ, 122, 1051) cikkében. A teljes tömegének becsléséhez az egyes populációk (kentaurok, klasszikus Kuiper-öv, szórt korong, rezonanciák) méret és térbeli eloszlását használjuk, általában a következő feltételezéssel, a D méret és az r heliocentrikus távolság függvényében:

$$n(r, D) dr dD = A r^{-c} D^{-q} dr dD \quad (1)$$

, ahol n az égitestek differenciális számsűrűsége, q a differenciális méretindex, c pedig a radiális eloszlást leíró kitevő, A pedig a normalizációs faktor. A méreteloszlás ugyanakkor nem írható le egyetlen q indexszel: a fejlődési modellek szerint létezik egy bizonyos D_k méret, ami felett a méreteloszlás nem változott a korongban bekövetkező ütközések következtében, és az itt érvényes ($D > D_k$) eloszlásindex az akkréciós folyamat eredménye. Ennél kisebb méreteknél a méreteloszlás módosult az ütközések miatt, és $q \approx 3.5$ (Dohnanyi, 1969, J. Geophys. Res., 74, 2531). A különböző modellek szerint a D_k érték kb. 50 km lehet a Neptunuszon túli vidéken (Davis & Farnella, 1997, Icarus, 125, 50; Stern & Colwell, 1997, AJ, 114, 841). A dolgozat 10. fejezetében meghatározott méreteloszlások ezért alapvető fontosságúak a Kuiper-öv teljes tömegének meghatározásában is. A jelenleg ismert méreteloszlásokból a kiválasztási effektusok figyelembevételével $\sim 0.1 M_{\oplus}$ adódik (kb. a Plútó tömegének 450-szerese).

A klasszikus Kuiper-öv tömegére a bolygókra gyakorolt perturbáló hatásból is lehet következtetni, amiből $\sim 0,033 M_{\oplus}$ adódik, míg a rezonáns objektumok esetében ez $\sim 0.018 M_{\oplus}$ (Iorio, 2007, MNRAS, 375, 1311). Ilyen tekintetben a legnehezebb a szórt korong, és az annál távolabbi, lecsatolódott vagy elkülönülő objektumok összetömegének becslése. Ez akár kétszer akkora lehet, mint a klasszikus Kuiper-öv tömege.

Budapest, 2017. december 6.

Kiss Csaba