

4. félévi beszámoló

Dencs Zoltán (dencszoltan@caesar.elte.hu)

Részecskefizika és csillagászat PhD program

Témavezető: Regály Zsolt

A dolgozat címe: Bolygó – törmelékkorong kölcsönhatások vizsgálata

A kutatásom során bolygók és a központi csillag körüli törmelékkorongok gravitációs kölcsönhatását vizsgáltam. A bolygó kiürít egy tartományt, amelyet kaotikus zónának nevezünk, néhány speciális középmozgás-rezonanciától (MMR) eltekintve, amelyek népesek maradhatnak. Egy adott MMR közelében a törmelékek pályája oly módon stabilizálódik, hogy a pályamenti mozgásuk során a törmelékek sosem közelítik meg túlságosan a bolygót. Azok a törmelékek, amelyek ezen MMR-től távol helyezkednek el, és a bolygó kaotikus zónájába kerülnek, a szekuláris perturbáció hatására módosult excentricitású, illetve inklinációjú pályán fognak keringeni. A törmelékek bolygóval való közeli találkozásának három féle kimenetele lehet a törmelékek szempontjából: kiszóródnak a rendszerből, beszóródnak a központi csillag felé, vagy akkretálódnak a perturbáló bolygó által. E kérdéskör vizsgálatát folytattam eddigi munkámban két területet érintve. 1) A bolygó által kiürített tartományok méretét és alakját befolyásolja a törmelékkorongba ágyazott bolygó tömege, valamint a bolygópálya fél nagytengelye és excentricitása. 2) A bolygók és a törmelékek (aszteroidák) kölcsönhatása során egy bolygórendszer külső törmelékkorongjából egy perturbáló test (pl. óriás bolygó) hatására a beszóródó aszteroidák ütközhetnek a belső bolygókkal, ezáltal a keletkezési helyükről származó anyagot szállítva a bolygókra. Amennyiben az aszteroidák a hóhatáron túl keletkeztek, jelentős illótartalommal rendelkezhetnek. A Naprendszer esetén az aszteroida becsapódási ráta megnövekedése a belső kőzetbolygókon magyarázhatja a víz egy részének eredetét a bolygók felszínén. Ennek az ún. késői nagy bombázásnak (Late Heavy Bombardment, LHB) a lehetőségét vizsgáltam meg a *TRAPPIST-1* hét kőzetbolygóból álló rendszerben.

A nagy tömegű bolygók által kiürített korongok kutatásával kapcsolatos eddigi munkám során numerikus N-test szimulációkat végeztem, valamint szintetikus ALMA képeket készítettem mm-es hullámsávban. IDL rutint írtam a jel-zaj arány kiszámítására, valamint a kaotikus zóna paramétereinek meghatározása céljából. A kutatás főbb konklúziói:

- A bolygópálya mentén húzódó kaotikus zóna mérete függ a korongba ágyazott bolygó tömegétől (m_{pl}) és a bolygópálya excentricitásától (e_{pl}). Szintetikus korongok ALMA képei alapján becsülhetők a kiürített zónában keringő bolygó (m_{pl}) és (e_{pl}) értékei adott hibahatárok között.
- A kaotikus zóna lapultsága $e_{pl} \leq 0,2$ esetén nagyobb, $0,3 \leq e_{pl} \leq 0,6$ esetén megegyező, és $e_{pl} \leq 0,7$ esetén kisebb, mint a bolygópálya excentricitása.
- Az bolygótól megfelelően távoli MMR-ek környékén a törmelékek nem tűnnek el a kaotikus zónából. Ezek a törmelékek alkotta rezonáns szigetek módosítják az észlelhető kiürített zóna alakját, amely hozzájárul a bolygóparaméterek becslésének pontosításához.

- A korongok szintetikus ALMA képein az bolygópálya apocentrumában a korong többi részénél fényesebb folt jelenik meg, amelynek azimutális kiterjedése változó, és $e_{pl} = 0,2$ -nél éri el a legnagyobb kiterjedését, amely indirekt indikációja lehet egy beágyazott bolygó jelenlétének.
- A csillag és a kiürített zóna középpontja nem esik egybe, és távolságuk nagysága arányos m_{pl} és e_{pl} értékekkel.

Az eredményeinket szakcikkben publikáltuk (lásd: *Publikációk*). A jelenségek további értelmezésében, illetve a bolygópályán belüli és kívüli korongok együttes vizsgálatában segítséget nyújt az eredmények vizualizációja, amely során a szimuláció virtuális 3-dimenziós reprezentációját a Blender szoftver segítségével végeztem. Ezek alapján jól látható, hogy kisebb tömegű bolygók esetén a rezonáns szigetek átmérője nagyobb, illetve az ezekben összegyűlt törmelékek z-irányú kiterjedése is tágabb tartományban oszlik el, mint nagyobb tömegű bolygók esetén, amely jelenség a törmelékek pályájában bekövetkező lassabb fejlődés eredménye, és további vizsgálatokat igényel.

A *TRAPPIST-1* rendszerben a vízszállítás vizsgálatát az előző félévben kezdtem el, ennek a folytatásaként jelen félévben további szimulációkat készítettem. Egy feltételezett 8. i bolygóval kiegészített rendszer stabilitásvizsgálata céljából olyan modelleket futtattam, amelyekben a 8. bolygó pályájának fél nagytengelyét ($a_{pl,i}$) úgy határoztam meg, hogy a feltételezett bolygó ne kerülhessen középmozgás rezonanciába a h bolygóval. Ahogy a korábbi modelleknél, úgy itt is $5 - 50 M_{\oplus}$ között változtattam az i bolygó tömegét (m_i). IAS15 integrátorral vizsgáltam meg a rendszer stabilitását, amely alapján a beszámolóimban bemutatott eredményekhez hasonlóan a kisebb tömegű és tágabb pályán keringő i bolygó kevésbé gerjeszti az ismert bolygók pályaparamétereit az észlelt értékek fölé. Azonban a rezonáns és a rezonanciaközi pozícióban keringő i bolygót tartalmazó rendszerek között különbség áll fenn: utóbbi esetén kisebb $a_{pl,i}$ mellett is stabil marad a rendszer a vizsgált időskálán. Az $5:2 - 3:1$ rezonanciák orbitális távolsága közé eső pályán ($a_{pl,i} = 0,117$ CsE) mozgó bolygó stabil rendszert eredményez az összes vizsgált m_i mellett.

A további N-test szimulációkban kilenc egymással kölcsönható és $0,5 \times 10^6$ darab tömeg nélküli próbatest mozgását szimuláltam. A próbatestek reprezentálják a dinamikailag hideg ($\bar{e} = 0; \bar{i} = 0^\circ$), illetve forró ($\bar{e} = 0,05; \bar{i} = 0,^\circ 025$) korongokban található aszteroidákat. Vizsgálataim szerint a forró korongokban 3 – 4-szer hosszabb időskálára van szükség az aszteroida becsapódási szám (N_{acc}) egy konstans szintjének eléréséhez, mint hideg korongoknál. Hasonló képet mutatnak az inklinált ($i_{pl,i}$) pályán keringő i bolygót tartalmazó modellek: $i_{pl,i}$ növelésével a szaturációs időskála egyre növekszik, az akkréciós ráta a bolygók felszínére pedig csökken. Emellett szimulációkat futtattam excentrikus pályán keringő i bolygók esetén, amelyek megmutatták, hogy nagyobb excentricitású ($e_{pl,i}$) pályán mozgó i bolygó hatására rövidebb időskálán válik instabillá a rendszer. Azonban az $e_{pl,i}$ növelésével N_{acc} is növekszik az ismert bolygókra, ami arra enged következtetni, hogy a kaotikus zóna mérete összefüggésben van N_{acc} értékkel.

A vizsgált rendszerek stabilitása és a perturbáló bolygó által okozott aszteroida becsapódási fluxus ismeretében megbecsültem az egyes bolygókra érkező víz mennyiségét. Ennek alapját empirikus mennyiségek képezik: minden aszteroida tömege megegyező, és annak 50%-át a víz tömege teszi ki (átlagos víztömegfrakció a fő kisbolygó öv leggyakoribb objektumai, a szenes kondritok esetén), valamint a korábban definiált határok között elszórt aszteroidák össztömegének megbecsülése, amely naprendszerbeli analógián alapul. Ebből kifejezhető az aszteroidák karakterisztikus tömege, és az általuk szállított víztömeg. Meghatároztam a lakható zónában keringő *TRAPPIST-1e*, *f* és *g* bolygók által elnyelt vizet a két millió éves időskálán stabil rendszerekre, amelyeknél N_{acc} szaturálódott. A legnagyobb víztömeg (~ 5 földi óceán) a *g* bolygón egy 0,117 CsE fél nagytengelyű pályán keringő $50 M_{\oplus}$ perturbáló bolygó esetén mérhető. Ez összhangban van a jelenlegi Spitzer űrtávcsővel végzett mérésekkel, amelyek alapján a *g* bolygó a Földnél nagyobb tömegű, azonban kisebb sűrűségű, így nagyobb tömegű vízkészlettel rendelkezhet.

A TRAPPIST-1 rendszerben történő bolygó – aszteroida kölcsönhatás vizsgálatok fontosabb konklúziói:

- Az ismert bolygórendszer stabilitását egy megfelelően tág pályán ($a_{pl,i} = 0,117$ CsE) keringő nagy tömegű feltételezett bolygó ($m_{pl,i} = 50 M_{\oplus}$) nem befolyásolja a vizsgált időskálán.
- A bolygók felszínére történő akkréció időskálája függ a feltételezett perturbáló bolygó $a_{pl,i}$ és $m_{pl,i}$ értékeitől (ahogyan a korábbi kutatásokból látható, $e_{pl,i}$ -től is függ). Az ismert rendszerhez közelebb keringő nagyobb tömegű test az N_{acc} gyorsabb szaturációjához vezet.
- Inklinált pályán mozgó perturbáló bolygó esetén a szaturációs időskála hosszabb. Ugyanez tapasztalható, ha az aszteroidák kezdeti inklinációjában nagyobb a szórás (forró korongok).
- A *TRAPPIST-1* rendszerben az összesített N_{acc} függ a perturbáló bolygó tömegétől és távolságától.
- A perturbáló bolygó által akkretált aszteroidák száma a bolygó Hill-szféra méretének függvénye. Kimutatható, hogy az összesített N_{acc} a perturbáló bolygó kaotikus zónájának szélességétől függ.
- A csillagtól legtávolabb keringő bolygó akkretálja a legtöbb aszteroidát, a legbelső bolygóra sokkal kevesebb jut.

Ezenkívül a rendszerben kifelé növekvő N_{acc} alapján pontosítható a Belső-Naprendszerben becsült aszteroida fluxus, amely a holdi kráterek számán alapul és bolygókra az orbitális távolságuktól független N_{acc} -ot feltételez, ez további kutatásoknak ad teret.

Publikációk.

Regály, Zs.; Dencs, Z.; Moór, A.; Kovács, T.: On the cavity of a debris disc carved by a giant planet, *MNRAS* 473, 3547-3558 (2018)

Dencs Zoltán: Lakhatók-e a TRAPPIST-1 Föld-szerű bolygói?, *Fizikai Szemle* 750, 183 (2017)

Elküldés előtt lévő publikáció: Dencs, Z. & Regály, Zs.: Water delivery in the TRAPPIST-1 system. Publikálását az MNRAS folyóiratban tervezem.

Tanulmányi tevékenység. Az aktuális félévben a Radio astronomy II. kurzust elvégeztem, valamint részt fogok venni a Basics of Astrobiology 2018 nyári iskolában az Universitát Wien szervezésében.

Konferenciák a képzés alatt. 1) Missing links from disks to planets, szervező: Konkoly – Max Planck Institut für Astronomie 2016, Budapest; 2) Planet Formation and Evolution 2017, szervező: Friedrich-Schiller-Universität, Jéna, poszter prezentáció. Továbbá poszter az International Astronomical Union General Assembly 2018 konferencia "Planet Days" szekciójában.

Oktatási tevékenység. Csillagász tanfolyam keretében előadás és gyakorlat megtartása. Az előadáson bemutattam a tudományos kutatások és eredmények megjelenítésének digitális 3D módjait és ezek technikai hátterét (képek és videók előállítása, projekciója). Az ehhez kapcsolódó gyakorlaton a résztvevők N-test szimulációk eredményeinek felhasználásával készítettek sztereografikus animációkat. Ezenkívül oktatási célú animációkat készítettem: objektumok mozgása és megfigyelhetősége különböző típusú csillagászati koordinátarendszerekben, valamint a Csurjumov–Geraszimenko üstökös felszínmodelljének felhasználásával sztereografikus animáció. Az alkalmazott technika a tudományos modellek bemutatását szemléletessé, azok interpretálását egyszerűbbé teszi. Az animációk renderelését az MTA Wigner Cloud szerverén futtattam.

Szakmai közéleti tevékenység. Továbbra is részt veszek a 3DNAL csoport munkájában, valamint a K-119993 számú OTKA pályázatban. Ezenkívül a CSFK CSI Detre termében található vetítőrendszer kialakításánál és üzemeltetésénél nyújtottam segítséget. Tudomány népszerűsítés céljából ismeretterjesztő előadást tartottam exobolygó kutatás témakörben, a legfrissebb eredmények és saját kutatásom bemutatásával a Dunabogdányi Művelődési Házban. Ezzel kapcsolatban interjút adtam a Danubia Televízió munkatársainak.

A kutatás folytatására vonatkozó tervek. A TRAPPIST-1 rendszerben történő víztranszport vizsgálatához hasonló szimulációk összeállításával a Naprendszerben is meg fogom vizsgálni N_{acc} alakulást a különböző bolygókon. Ez által pontosíthatók azok a krátorszámlálási modellek, amelyek jelenleg nem veszik figyelembe a bolygók Naptól mért távolságát. Egyes elméletek szerint felületarányosan a Holdon nagyobb az egységnyi idő alatt bekövetkező becsapódások száma, mint a Földön (fizikai becsapódások helyett itt a légkörben felizzó tűzgömbök számát veszik figyelembe). Ennek igazolására numerikus szimulációkat készítek, amelyekben a Nap, a Föld, a Hold, a fő kisbolygó öv és a Jupiter szerepelnek. Amennyiben a Hold a TRAPPIST-1 legkülső bolygójához hasonlóan több aszteroidát nyel el, mint a Föld, az elmélet igazolható. Az ELTE Gothard Asztrofizikai Observatóriumában egy GINOP pályázat keretében foglalkoznak recens holdi meteorbecsapódási ráta és ütközési sebességek vizsgálatával, amelyekkel az elméleti kutatást fogom összekötni.