

Fizika Doktori Iskola féléves beszámoló

2017-2018/I. félév

Név: Dencs Zoltán

Neptun kód: A169IQ

Doktori program: Részecskefizika és csillagászat

Témavezető: Dr. Regály Zsolt

A *TRAPPIST-1* rendszerben eddig hét bolygót fedeztek fel a központi csillag körül. Az előző féléves beszámolómban bemutattam, hogy a HIPERION kód segítségével és az ismert bolygópálya-paraméterek felhasználásával sikerült modellezni a rendszert. A bolygópályák stabilak maradtak néhány ezer éves időskálán (a legbelső b bolygó $\sim 10^6$ keringése; periódusidő: 1,52 nap), a pálya fél nagytengelyek és excentricitások megegyeztek az észlelt értékekkel a hibahatárokon belül. A nyolctest-probléma hosszabb időskálájú vizsgálatához gyorsabb integrátor alkalmazására volt szükség. A nyílt forráskódú REBOUND csomag CPU-alapú IAS15 N-test integrátorával két millió évig (b bolygó $4,8 \times 10^8$ keringése) futtattam a szimulációkat. Az adaptív időlépést alkalmazó IAS15 integrátor előnye a gyors és nagy pontosságú számítás: a rendszer relatív energiahibája $10^{-15} - 10^{-12}$ nagyságrendűnek adódott az általam futtatott szimulációk során. A HIPERION és az IAS15 szimulációkból származó pályaelemek a rendszer ismert paramétereinek hibahatárain belül vannak (fénygörbe-analízis alapján [1]).

A továbbiakban a belső bolygók felszínén mérhető külső forrásból származó aszteroidafluxus nagyságát vizsgáltam. A rendszer hóhatáránál távolabb keringő kisbolygók vagy üstökösök összetételének jelentős részét képezhetik illóanyagok (pl. víz, metán, ammónia stb). Külső objektummal történő gravitációs kölcsönhatás eredményeként az aszteroidák pályája módosulhat, egy részük ütközhet a *TRAPPIST-1* kőzetbolygóival, ezáltal vizet szállítva a bolygók felszínére. Megfelelően nagy számú becsapódás esetén óceánok jöhetnek létre a csillag lakható zónájában keringő bolygók felszínén, ezért külön figyelmet kell fordítani a csillagtól 0,024 CSE – 0,049 CSE távolságban keringő *TRAPPIST-1e, f* és *g* bolygók aszteroida becsapódási rátájára.

A korábban felsorolt lehetséges külső perturbáló tényezők közül egy feltételezett 8. bolygó hatásaival végeztem szimulációkat. A *TRAPPIST-1* rendszerben az átlagos bolygótömeg, ~ 1 földtömeg (M_{\oplus}) és a központi csillag tömege közötti arány megfeleltethető a Naprendszerben a Jupiter és a Nap tömegarányának, ezért a *TRAPPIST-1* rendszerben egy $5 M_{\oplus}$ objektum már nagy tömegű bolygónak tekinthető, amely jelentős számú kisbolygó pályaelemeit képes módosítani. A gerjesztés nagysága a pályaelemekben függ a perturbáló égitest tömegétől és a gerjesztett égitesttől mért távolságától. Annak érdekében, hogy meg tudjam vizsgálni, hogyan érhető el a lehető legnagyobb aszteroidafluxus a *TRAPPIST-1* bolygókon, a modellezett rendszerben elhelyeztem egy külső törmelékgyűrűt, amelyben egy nagy tömegű feltételezett i bolygó kering. Ez a különböző szimulációkban más-más fél nagytengelyű pályákon kering, és különböző tömeggel rendelkezik. A

rendszerben egy rezonáns lánc fedezhető fel a bolygók középmozgásai között, emiatt az i bolygót a legkülső h bolygóval középmozgás-rezonanciában helyeztem el, 3:2 és 10:1 rezonancia közötti távolságokban. Az i bolygó tömegét $5 - 50 M_{\oplus}$ között változtattam. A bolygópálya excentricitása kezdetben mindig 0 volt, inklinációját pedig $0 - 5^{\circ}$ között állítottam be.

A feltételezett, de eddig meg nem erősített bolygó (vagy bolygók) jelenlétére utalhat a csillag sajátmozgásának és radiális sebességének időbeli változása. A csillag sajátmozgásában imbolygás figyelhető meg, amely mozgás a csillagnak a rendszer tömegközéppontja körüli keringése miatt lép fel. Boss és mtsai [2] cikke szerint a *TRAPPIST-1* esetén az 1,9 milliív másodperces (mas) imbolygást okozhatja egy 1 év keringési periódusú bolygó, amely $< 4,6 M_{\text{Jup}}$ tömegű, vagy egy 5 év periódusú, $< 1,6 M_{\text{Jup}}$ bolygó. Az általam vizsgált lehetőségek közül az 1/4 év periódusú $50 M_{\oplus}$ bolygó okozza a legnagyobb imbolygást, amely csupán 0,22 mas. Ezek alapján nem zárható ki egy ilyen tulajdonságú bolygó vagy további külső bolygók jelenléte.

A *TRAPPIST-1* radiális sebességének meghatározásakor 150 m/s amplitúdójú sebességváltozást mutattak ki [3]. A futtatott szimulációk és az analitikus számításaim szerint az ismert bolygók ~ 35 m/s amplitúdójú változást okozhatnak. Egy $50 M_{\oplus}$ bolygó 0,06 CSE fél nagytengelyű pályán (azaz a legkülső ismert bolygón túl) ~ 70 m/s változást eredményez. Ez szintén megengedi egy feltételezett bolygó, vagy további bolygók jelenlétét a rendszerben. Azonban fontos megvizsgálni, hogy az i bolygó milyen hatással van az ismert bolygók mozgására, a rendszer stabilitására.

Az IAS15 integrátorral végeztem el a nyolcbolygós rendszer stabilitásvizsgálatát. Egy bolygórendszer stabilitását a kezdőfeltételek apró megváltoztatása is jelentősen befolyásolhatja. Ezért a korábbi beszámolómban olvasható kezdőfeltételeken kívül Quarles és mtsai [4] 2017-es publikációjában szereplő adatok felhasználásával is futtattam szimulációkat. A Quarles-féle cikk szerzői a mérési eredmények hibahatárai közé eső értékekkel több tízezer szimulációt futtattak le. A megfelelő kezdőfeltételek megválasztásával 10 millió éves időskálán sem esett szét a rendszer. Ezen kezdőfeltételek mellett a 8. bolygóval kiegészített rendszer stabilitását is megvizsgáltam, az i bolygó paramétereit változtatva. A szimulációk eredményeinek összevetésével azt tapasztaltam, hogy a h bolygóval 5:1 rezonáns távolságnál távolabb keringő $5 - 50 M_{\oplus}$ bolygó nem okoz instabilitást a rendszerben a vizsgált időskálán. Koplanáris pályák esetén a rendszerhez közelebb keringő $5 - 10 M_{\oplus}$ bolygók csak kis mértékben befolyásolják a stabilitást.

Ezzel párhuzamosan a HIPERION kód segítségével vizsgáltam az aszteroida akkréciós szám növekedését a hét belső bolygón. Az aszteroidapályákat gerjesztő i bolygót egy törmelékkorongban helyeztem el, amelyet 0,06 CSE és 0,2 CSE között fél millió próbatesttel töltöttem fel, ezek pályájának excentricitása és inklinációja kezdetben nulla. Az aszteroidákat jelképező próbatestek száma a központtól való távolsággal négyzetes arányban csökken adott körgyűrű mentén. Az aszteroidák egy Kuiper-övhez hasonló térrészből származnak, ezért feltehető, hogy tömegük 50%-át kőzetek, míg 50%-át víz teszi ki. A szimulációk segítségével megbecsülhető a bolygókra érkező vízmennyiség. A vizsgálatból látható, hogy a becsapódások száma idővel növekszik, és a legbelső bolygó 5×10^5 keringése alatt szaturálódik. Az akkréciós szám a belső bolygókon nagyobb, ha

az i bolygó közelebb kering a rendszerhez. Amennyiben az i bolygó pályahajlása nagyobb 0° -nál, akkor ugyanakkora tömeg és fél nagytengely mellett jelentősen kisebb akkréciós szám mérhető.

A legnagyobb akkréciós szám (~ 60000 aszteroida) 3:2 rezonanciában lévő $5 M_{\text{Jup}}$ bolygónál áll elő, ugyanis ekkor kevesebb aszteroida nyelődik el az i bolygón, és több szóródik a belső rendszerbe. Tegyük fel, hogy a törmelékkorong $10^{-6} M_{\oplus}$ vizet tartalmaz [5], és egyforma méretű aszteroidák alkotják. Ekkor az egyes bolygókon regisztrált becsapódások számából megbecsülhető, hogy a három lakható zónában keringő bolygóra mekkora víztömeg zuhant (*TRAPPIST-1e*: $4 \times 10^{-9} M_{\oplus}$; *f*: $3 \times 10^{-8} M_{\oplus}$; *g*: $10^{-7} M_{\oplus}$). Azonban egy ilyen szoros pályán keringő i bolygó hosszútávon instabil rendszert eredményez. Tágabb pálya esetén viszont jelentősen lecsökken az akkréció.

A pontosabb vízmennyiség meghatározásához szükség van az excentrikus és az inklinált korongok vizsgálatára is. Ezenkívül nem elég az aszteroidák bolygókkal való ütközését figyelembe venni, hiszen a legtöbb Kuiper-övbéli objektumhoz hasonló, ám parabola pályán mozgó kisbolygó a csillag közelébe érve csóvát fejleszt a felszínét alkotó illókból. Amennyiben a bolygó Hill-szférája keresztezi a csóvát, a benne található víz szintén a bolygó felszínére kerülhet [6]. Fontos kérdés még, hogy adott tömegű csillag körül legfeljebb mekkora tömegű protoplanetáris korong jöhet létre. Ugyanis korábbi elméletek alapján egy *TRAPPIST-1*-hez hasonló kis tömegű csillag körül nem alakulhat ki olyan nagy tömegű korong, amely elegendő anyagot biztosít hét vagy akár több földtömegű bolygó kialakulásához.

A kutatás elméleti háttéréből és az előzetes eredményekből posztert készítettem *Water delivery to the TRAPPIST-1 planets by asteroids* címmel (Z. Dencs és Zs. Regály), amelyet Jénában a Planet Formation and Evolution 2017 (szeptember 23-25.) konferencia poszter szekciójának résztvevőjeként mutattam be. Friss eredmények felhasználásával jelenleg folyamatban van egy első szerzős cikk írása ebben a témában. A kutatáshoz szükséges szimulációkat az MTA CSFK CSI számítógépein futtattam. További számítási kapacitást bocsátott rendelkezésemre a Nemzeti Információs Infrastruktúra Fejlesztési Program (NIIF) és az MTA Wigner FK.

Tanulmányi tevékenység. Az alábbi kurzusokra jelentkeztem az egyetemen: 1.) Radio astronomy, valamint 2.) Fejezetek a többes csillag- és bolygórendszerek elméleti és megfigyelési kérdéseiből. Folytattam a gyakorlataimat a piszkéstetői obszervatóriumban: a 60 cm-es Schmidt-teleszkóppal végeztem méréseket szupernóvákról, nyílt halmazokról és kisbolygókról, valamint kalibrációs felvételeket készítettem.

Tudományos közéleti tevékenység. A 3DNAL kutatócsoportbeli munkám részként 3D animációkat készítettem és segédkeztem a vetítőrendszer üzemeltetésében. Többek között az OFF-Biennálé Budapest művészeti kiállítás CSFK CSI-ben megtartott vetítéseinél is közreműködtem. Ezenkívül a Magyar Tudomány Ünnepehez kapcsolódóan ismeretterjesztő előadásokat tartottam 3D ábrázolási technikákról, ezek tudományos területen történő alkalmazásáról, sztereografikus képek és videók

készítéséről, valamint bemutattam csoportunk aktuális munkáját. A Magyar Televízió munkatársai ebben a témában készítettek velem interjút, amely megjelent az M1 Minden tudás című műsorában.

Elfogadásra került publikáció. 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)

Egyéb tervek. A TRAPPIST-1-es kutatás folytatása (pl. egyéb külső hatások, amelyek befolyásolják az aszteroidafluxus nagyságát) mellett a korábban megkezdett bolygópályán belüli és kívüli kaotikus zónával kapcsolatos vizsgálat folytatását tervezem.

Referenciák. [1] Wang és mtsai 2017; [2] Boss és mtsai 2017; [3] Tanner és mtsai 2012; [4] Quarles és mtsai 2017; [5] Raymond és Izidoro 2017; [6] Schwarz és mtsai 2017