

# Fizika Doktori Iskola féléves beszámoló

2016-2017/I. félév

Név: Dencs Zoltán

Neptun kód: A169IQ

Doktori program: Részecskefizika és csillagászat

Témavezető: Dr. Regály Zsolt

A kutatási témám a doktori iskola programjának keretében: csillag körüli törmelékkorongok és óriásbolygók gravitációs kölcsönhatásának vizsgálata. Egy törmelékkorongba ágyazott bolygó a planetezimálokra gyakorolt gravitációs hatása által befolyásolja a korong porszemcséinek eloszlását. A bolygó keringése során rést nyithat a korongban, ezen kívül különböző struktúrákat alakíthat ki a törmelékek térbeli elhelyezkedésében. A bolygó által kiürített tartomány mérete a bolygótömegtől ( $M_{pl}$ ), illetve a bolygópálya excentricitásától ( $e_{pl}$ ) függ. A korongban található porszemcsék milliméteres hullámhossz-tartományú hőmérsékleti sugárzásának köszönhetően rádió-interferometriai távcsőrendszerek segítségével, megfelelő felbontás és jel-zaj viszony mellett meghatározható a kiürített zóna mérete. Ezek alapján törmelékkorong-modelleket referenciaként használva létrehozható egy módszer, amely lehetővé teszi, hogy a megfigyelt korongok termális emisszós képének analízisével következtetni tudjunk egy korongba ágyazott bolygó jelenlétére, amelynek az  $M_{pl}$  és  $e_{pl}$  értékeire becslést adhatunk. A korongmodellek elkészítéséhez és vizsgálatához szükséges munkafolyamat több fázisra bontható: bolygópályán belüli, illetve azon kívüli régiók modellezése, valamint a planetezimálok interakciója kis- és nagytömegű beágyazott bolygóval, majd a modellekről szintetikus milliméteres képek készítése.

A planetezimálok eloszlását a különböző korongmodellekben a témavezetőm által fejlesztett HIPERION<sup>1</sup> nevű GPU<sup>2</sup> alapú N-test kód segítségével szimuláltam. A modellekben a beágyazott bolygó tömegének  $1,25 \times 10^{-3} M_{\odot}$  (naptömeg) és  $10^{-2} M_{\odot}$  közötti értékeket választottunk. Ez esetben a planetezimálok tömege elhanyagolható, ezért korlátozott háromtest-problémát alkalmaztunk. A rendszerben található testek helyének és sebességének meghatározását hatodrendű Hermite-integrátor teszi lehetővé, amely a legnagyobb gyorsulású részecske által definiált időlépést alkalmazza a teljes rendszerre. Az integrációs idő optimalizálása érdekében a törmelékkorongok bolygópályán belüli és azon kívüli részét külön modelleztük. A korongok külső részével foglalkoztam a diplomamunkámban. A kutatás eredményeit és a következtetéseket az *Astrophysical Journal* folyóirathoz beküldött cikkünkben mutatjuk be, amelynek javított változata jelenleg revízió alatt áll. A cikk szerzői és címe: Regály, Zs.; Dencs, Z.; Moór, A.; Kovács, T.: Interactions between Debris Disks and Giant Planets.

A kutatás folytatásaként a 2016-2017/I szemeszterben a törmelékkorongok bolygópályán belüli régióját kezdtem vizsgálni. A korábbi szimulációkhoz hasonlóan a bolygópálya apoastron

---

<sup>1</sup> High PERFORMANCE Integrator fOr Nbody

<sup>2</sup> Graphics Processing Unit

pontja 1 csillagászati egységre (CsE) lett rögzítve a központi csillagtól, az excentricitás értéket pedig  $0 \leq e_{pl} \leq 0,9$  között állítottam be a különböző korongmodelleknél. Dinamikailag hideg törmelékkorongokat vizsgáltam, ami azt jelenti, hogy kezdetben a korongban található planetezimálok pályájának átlagos excentricitása 0,01, inklinációja pedig  $0,^\circ 005$ . A korongokat félmillió véletlenszerű térbeli eloszlású részecskével töltöttem föl egy 0,1 CsE sugarú belső és egy külső határ között, amelyet a bolygópálya fél nagytengelyének 1,2-szeresének választottam. A szimulációkat  $5 \times 10^{-3} M_\odot$  tömegű beágyazott bolygóval végeztem el az MTA CSFK CSI<sup>3</sup>-nél rendelkezésemre bocsátott NVIDIA Tesla m2075 és kettő darab c2075-ös GPU segítségével.

A szimulációk eredményeként világossá vált, hogy a modelleket mennyi ideig kell futtatni ahhoz, hogy a planetezimálok eloszlása statikussá váljon. A szimulációk hosszát ez alapján 5000 keringési egységnek vettem, a bolygó egy teljes keringési periódusát tekintve egy egységnek. A keringések során a kezdeti részecskeszám kb. 1/3-ára csökken az  $e_{pl}$  értéktől függően,  $e_{pl} > 0,6$  esetén pedig 10-20 keringés alatt elhanyagolhatóan kis mennyiségű részecske marad a rendszerben. Ennek az a magyarázata, hogy bolygó és planetezimálok közeli találkozása a rendszerből való kiszóródással, illetve a bolygóra vagy a központi csillagba történő akkrécióval végződik a planetezimálok számára. Egy bolygó és egy planetezimál interakciójának lehetséges kimeneteleiről angol nyelvű előadást tartottam Wyatt és mtsai (2016) alapján a SA-PSF<sup>4</sup> kutatócsoport ülésén a CSFK CSI-ben.

A továbbiakban a Dustmap, szintetikus emissziós térképet előállító IDL-rutin használatával a planetezimálokkal megegyező eloszlású porból származó termális sugárzási képeket készítettem az N-test szimulációk alapján. Azért van szükség ezekre a termális sugárzási térképekre, mert műszeres mérésekkel is csupán a poreloszlást tudnánk detektálni a por milliméteres sugárzásának köszönhetően, míg a planetezimálok túl nagy felületen sugározzák ki az elnyelt hőt, így ezek eloszlása közvetlenül nem észlelhető az alacsony emissziós fluxusuk miatt. A korong külső részénél meghatározott fényességű kontúrszinteket használtam a bolygópályán belüli korongok határának kijelöléséhez. A bolygópálya és a korong határvonala közt húzódó térrész, a kiürített régió, amelynek méretét ( $\delta a_{cav}$ ) vizsgáltam az  $e_{pl}$  értékek függvényében. A vizsgálatból az látszik, hogy az  $e_{pl}$  növekedtével  $\delta a_{cav}$  is növekszik egy meghatározott függvény szerint. Az  $e_{pl}$  értékek és a kiürített tartomány határának lapultsága ( $e_{cav}$ ) közti viszony esetén nem adható meg egyértelmű összefüggés. A vizsgálatokat azonosan  $5 \times 10^{-3} M_\odot$  tömegű beágyazott bolygó esetén végeztem el a fenti  $e_{pl}$  értékek mellett. Az ettől különböző tömegű bolygóval rendelkező modellek kiértékelése  $e_{pl}=0$ ; 0,3 és 0,6 esetén megtörtént. Ezek alapján látható, hogy a bolygótömeg csökkenésével a belső korong mérete megnő, ezenfelül a bolygópálya és a törmelékkorong külső határa között egyre több a bolygóval közepmozgás-rezonanciában lévő planetezimálok által alkotott sziget jelenik meg.

A rezonáns szigetek populáltságának feltérképezése fontos, ugyanis az itt található porsemcsék hőmérsékleti sugárzása módosíthatja a kiürített zóna határát, attól függően, hogy mek-

---

<sup>3</sup> Magyar Tudományos Akadémia Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet

<sup>4</sup> Space Astronomy - Planet and Star Formation

kora számban vannak jelen a bolygóval középmozgás-rezonanciában lévő planetezimálok. A vizsgálathoz kiindulásként kiszámoltam, hogy a központi csillagtól adott távolságokban mely rezonanciák lehetnek populáltak. A szimulációk termális térképei pedig megmutatták, hogy a populált rezonanciákban található porszemcsék közül melyek alkotnak szigeteket, illetve melyek azok, amik nem különülnek el térben a korongtól. Rezonáns szigetek jelennek meg például  $e_{pl}=0$ ; 0,2 és 0,3 esetén a bolygóval 1:1 középmozgás-rezonanciában lévő planetezimáloknak köszönhetően, valamint  $e_{pl}=0,5$  esetén az 1:2,  $e_{pl}=0,6$ -nál az 1:3 rezonanciahelyeken. Az  $e_{pl}=0,1$  modellnél a 2:3 rezonanciában lévő planetezimálok hasonló alakzatot hoztak létre, mint Pravec és mtsai (2005) szerint a Hilda-csoport tagjai, amelyek a Jupiterrel 2:3 rezonanciában vannak. Ezt az esetet ezért külön megvizsgáltam  $1 M_{Jupiter}$  tömegű bolygóval is, azonban az eredményekből az látszik, hogy a 2:3 rezonancia részecskéi nem különülnek el a törmelékkorongtól, nem alkotnak a Hilda-csoportéhoz hasonló gyűrűt. Ez azzal magyarázható, hogy a mi szimulációinkban csak egy bolygó található a rendszerben, míg a Naprendszer esetén a belső bolygók gravitációs hatását is figyelembe kell venni.

Az eddigi eredményeket referenciaként felhasználva egy törmelékkorong termális térképén látható kiürített zóna méretének és alakjának meghatározása alapján megbecsülhetnénk a korongban keringő bolygó tömegét és pályaeccentricitását. Azonban eddig csupán az ideális esetekkel végeztem számításokat. Ezért meg kell vizsgálni azt is, hogy a törmelékkorongok bolygópályán belüli és kívüli régióit, valamint a rezonáns szigetek termális sugárzását milyenek észlelnénk egy valódi rádió-interferometriai eszközzel, az ALMA<sup>5</sup> teleszkóprendszerrel. Ezen vizsgálathoz az ALMA Observing Tool (OST) segítségével készíthetők szintetikus termális képek a korongmodellekről. Az Observing Tool számára a bemeneti FITS fájlok előkészítés alatt állnak, a megfelelő mennyiségű szintetikus felvétel elkészülte után megbecsülhető, mekkora fényesség, integrációs idő, jel-zaj viszony és milyen további körülmények szükségesek az észlelések sikerességéhez. A fenti eredményeket a kiértékelés alatt lévő szimulációk adataival kiegészítve a következő cikkünkben fogjuk megjelentetni.

Az N-test szimulációkkal párhuzamosan elkezdtem foglalkozni az adatok háromdimenziós (3D) megjelenítési módjával. Ehhez meg kellett tanulnom a Blender vizualizációs programcsomag használatát. A Blender egy Python-alapú, nyílt forráskódú program, amellyel vegyesen raszteres és vektoros ábrázolásmóddal is készíthetők állóképek, illetve animációk, és csillagászati adatok megjelenítésére is alkalmazható (Kent, 2013). A törmelékkorong-modellek planetezimáleloszlását a Blender segítségével 3D térben ábrázolhatjuk. Ennek tesztelésére az N-test szimulációk közül kiválasztottam néhányat, amelyekben a rezonáns szigetek jól látható struktúrákat alkotnak. A HIPERION kóddal megkaptam adott időpillanatban a rendszerben lévő összes részecske x, y és z koordinátáját, amelyeket kiolvastva és a Blender számára bemeneti fájlként kezelhető ún. Voxel Data formátumra alakítva ábrázolni tudtam. A Blenderrel ábrázolt korongokat bármilyen betekintési szögből vizsgálhatjuk, ami különösen a bolygó gravitációs hatása által gerjesztett planetezimálpályainklinációk eloszlásának vizsgálatánál hasznos.

---

<sup>5</sup> Atacama Large Millimeter/submillimeter Array

Az N-test szimulációk alapján készült animációkban a törmelékkorongok statikus módon vannak ábrázolva. A továbbiakban olyan animációk készítését tűztem ki célul, amelyekben a részecskék és a bolygó csillag körüli keringését, illetve a részecskeeloszlás fejlődését is megtekinthetjük. Azonban a Voxel Data formátum nem teszi lehetővé az összes részecske valós térbeli koordináták szerinti ábrázolását, ehelyett egy rácsháló reprezentálja a teret. A jobb felbontás érdekében ki kell dolgozni egy valódi N-test ábrázolási módot.

A Blender lehetőséget nyújt sztereografikus ábrázolásmód használatára is, amelynek köszönhetően térhatású képeket, mozgóképeket hozhatunk létre. Ennek tesztelésére készítettem néhány rövid ismeretterjesztő jellegű térhatást keltő animációt, amelyek közül az egyik bemutatásra került a témavezetőm előadásában a CSFK CSI vizuális 3D vetítőrendszerével. Az ideális sztereografikus beállítások meghatározásához tanulmányoztam a sztereopszis jelenségét, amely a mélységérzeti inger kialakulását okozza az emberi agyban. Majd digitális fényképezőgéppel készítettem felvételeket különböző távolságokban lévő valódi tárgyakról egymástól eltérő látószögekben az optimális parallaxis kiválasztásához. Az elkészült felvételek levetítésének több módját is megvizsgáltuk, ezek közül az egymás mellett megjelenő képkockák egymásra vetítését, az ún. side-by-side beállítást találtuk legalkalmasabbnak. A tudományos adatok vizuális közlésében nagy segítséget jelenthet ez az ábrázolási mód, ugyanis a befogadó fél számára könnyebben érthetővé és az élménynek köszönhetően maradandóbbá teszi a bemutatott tudományos eredményeket.

A félév során a CSFK CSI-ben fiatal kutatóként kezdtem dolgozni. A SA-PSF kutatócsoport tagja lettem, amelynek Ábrahám Péter a vezetője. A kutatócsoport egyik ülésén előadás formájában bemutattam a törmelékkorong szimulációkkal kapcsolatos eredményeinket. Ezeket az ELTE Csillagászati Tanácsék bolygókeletkezési workshopján is bemutattam. Ezenfelül részt vettem a "Missing links from disks to planets" Konkoly/MPIA<sup>6</sup> workshop 2016 konferencián. Mindemellett tagja vagyok a témavezetőm bolygókeletkezés kutatásával foglalkozó OTKA<sup>7</sup> pályázatának és a Három Dimenziós Numerikus Asztrofizika Laboratórium kutatócsoportjának. A 3D vetítőterem kialakításánál és az eszközök kalibrációjánál is segédkeztem.

A következő félévre szóló terveim: 1) elsődleges feladat a bolygópályán kívüli és belüli törmelékkorong-modellek egyesítése a kiürített régió szerkezetének meghatározásához. 2) Ezek után a korongmodellekből szintetikus termális emissziós képek készítése ALMA OST segítségével, 3) végül a publikáció megírása az eredmények és a következtetések alapján. A távolabbi célok közé tartozik olyan modellek készítése, amelyekben a Földéhez hasonló tömegű bolygó található. Ilyen esetekben a korlátozott háromtest-probléma nem alkalmazható, mivel a planetezimálok tömege nem elhanyagolható a bolygóéhoz képest. Kutatásaim során tervezem az elkészült korongmodellek ábrázolását Blenderrel, emellett a programcsomag további lehetőségeinek megismerését, tesztelését és ismeretterjesztő anyagok készítését. Továbbá egy bolygó kutatással, bolygókeletkezéssel foglalkozó nyári iskolában való részvételt tervezek a nyár során.

---

<sup>6</sup> Max-Planck-Institut für Astronomie

<sup>7</sup> Országos Tudományos Kutatási Alapprogramok

## Hivatkozások

Kent, B. R. 2013, PASP, 125, 731

Pravec, P., Harris, A. W., Scheirich, P. és mtsai. 2005, Icarus, 173, 108

Wyatt, M. C., Bonsor, A., Jackson, A. P., Marino, S., & Shannon, A. 2016, ArXiv e-prints