

Bolygórendszerek keletkezése és Föld-típusú bolygók pályafejlődése (PD-75508)

ZÁRÓJELENTÉS

A Naprendszeren kívüli, azaz extraszoláris vagy exobolygók kutatása a modern csillagászat egyik legdinamikusabban fejlődő területe. Az első Naprendszeren kívüli bolygót egy Naphoz hasonló csillag, az 51 Pegasi körül 1995-ben fedezték fel, s jelenleg (2013 november) már több mint ezer exobolygót ismerünk 786 bolygórendszerben. Világszerte folynak kutatások új exobolygók felfedezésére, fizikai paramétereik és dinamika viselkedésük meghatározására.

Az exobolygók felfedezése az elmúlt években rohamos növekedésnek indult részben az egész földtekét átfogó megfigyeléseknek, illetve az űrtávcsövek sohasem "pihenő" szemeknek köszönhetően. A felfedezés ütemét tovább fokozza a meglévő mérési módszerek finomodása, valamint új technikák kifejlesztése. Noha a Földtípusú bolygók megfigyelése a jelenlegi földfelszínen található műszerekkel meg nem lehetséges, de lehetővé vált a 2009 márciusában sikeresen pályára állított rendkívül precíz Kepler űrtávcsövel. Az űrtávcsövel felfedezett exobolygók közül fél tucatnak kisebb a tömege mint a Föld tömegének kétszerese. Földhöz hasonló bolygók felfedezésének óriási, személetformáló jelentősége lenne, hiszen megnyílna annak lehetősége, hogy tudományos szempontból, kvantitatíve vizsgálhassuk milyen feltételek adtak egy távoli bolygón a lehetséges élet kialakulására.

A bolygórendszerek felfedezése a bolygók kialakulására felállított elméletek szempontjából döntő jelentőséggel bírnak. Hosszú évszázadokig csak a saját Naprendszerünkről voltak ismereteink és ezek alapján dolgozták ki a bolygókeletkezésre vonatkozó hipotéziseket. Ma azonban majd ezer bolygórendszer felépítését ismerjük (legalábbis közelítőleg) és így lehetőség nyílt az elméletek ellenőrzésére. Kiderült, hogy a valóság sokkal színesebb mint azt korábban gondolták, a bolygórendszerek elképesztő változatosságát tárták fel az elmúlt 15 év megfigyelései. A rengeteg új adat számos kihívás elé állította a bolygók kialakulására kidolgozott elméleteket és vált ez a kutatás a csillagászat kurrens területévé.

Munkám során foglalkoztam az exobolygó kutatás különböző aspektusaival; ezek magukba foglalják a Föld-típusú bolygók stabilitását, továbbá a bolygórendszerek, és ezen belül a rezonáns rendszerek stabilitásának vizsgálatát. Foglalkoztam a trójai típusú kis égitestek dinamikájának általános aspektusaival illetve konkrét esetekkel: a Naprendszeren belül a Jupiter-féle trójaiak pályafejlődésével és lehetséges trójaiakkal néhány exorendszerben. Részletesen tanulmányoztam a Plútó holdrendszerének dinamikáját és a kettős aszteroidák időfejlődését és stabilitási viszonyait. Ezeknek a vizsgálatoknak a zömét saját fejlesztésű numerikus kódokkal végeztem el. Kutatásaim alatt folytattam a már meglévő együttműködésemet a Bécsi Tudományegyetem Asztrodinamikai kutatócsoportjának munkatársaival. Új együttműködést építettem ki a Tübingeni Egyetem Csillagászati és Asztrófizikai Intézetének Dr. Wilhelm Kley professzor által vezetett kutatócsoportjával, továbbá a Córdobai Egyetem Csillagászati Observatóriumának (Argentína) egyik vezető munkatársával Dr. Cristian Beaugéval.

Az elért eredményekből tíz referált publikáció, 7 konferencia kiadvány és egy ismeretterjesztő cikk született, elkészült az általam kifejlesztett bonyolult numerikus kód és egy stabilitási térképeket tartalmazó weblap. A továbbiakban részletesen ismertetem az elért eredményeket a megjelent közlemények alapján.

Stabilitási katalógusok és egyedi rendszerek lakhatósági tartományának vizsgálata

A Föld-típusú exobolygók észlelése a Kepler űrtávcsővel valós lehetőséggé vált, ezért a kutatások részben ezen égitestek általános dinamikai jellemzőinek vizsgálatára irányulnak. A vizsgálatokban jelentős szerepük van a modern égi mechanika elméleti és numerikus módszereinek. Egy Föld-típusú exobolygó esetében az egyik legfontosabb kérdés az, hogy a lakhatósági zónában kering-e, illetve pályája dinamikailag elegendően stabil-e ahhoz, hogy rajta az élet kialakulhasson és fennmaradhasson. A lakhatósági zóna vagy övezet egy csillag körüli korong alakú terület, amelyben az általunk ismert élet ki fejlődhet.

On the influence of the Kozai mechanism in habitable zones of extrasolar planetary systems (Astronomy and Astrophysics, 526, A98):

A korlátozott háromtest-probléma (csillag-óriásbolygó-tesztbolygó) keretén belül megvizsgáltam a tesztbolygó hosszú időtávon lejátszódó viselkedését a Kozai-mechanizmusra tekintettel. A tesztbolygó kezdetben az

óriásbolygó pályáján belüli körpályán haladt, a fél nagytengelye és pályahajlása által kifeszített paramétersíkot az általam írt numerikus integrátorral (Bulirsch-Stoer módszer) feltérképeztem. A stabilitás meghatározásához a maximális excentricitás és a Ljapunov-féle karakterisztikus kitevők módszerét alkalmaztam. Az óriásbolygó excentricitását szintén variáltam. A rendszer integrálását minden esetben az óriásbolygó 100 ezer keringésére végeztem el. Az eredmények azt mutatják, hogy a stabil tartomány hatása az óriásbolygó excentricitásának növelésével csökken. A Kozai-mechanizmus hatására a tesztbolygók pályahajlása nem haladhatja meg a 40° -os határt. Sikerült kimutatni egy olyan tartományt ahol 40° -os pályahajlás mellett kis excentricitású pályák rendkívül stabilnak bizonyultak. Megmutattam, hogy az eredmények érvényesek a háromtest-problémára is és közvetlenül alkalmaztam a HD 154345 jelű exorendszerre.

Dynamical Stability in the Habitable Zones of Nearby Extrasolar Planetary Systems (Pathways Towards Habitable Planets, proceedings of a workshop held 14 to 18 September 2009 in Barcelona, Spain. Edited by Vincent Coudé du Foresto, Dawn M. Gelino, and Ignasi Ribas. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, p.430):

Exobolygórendszerek dinamikai tulajdonságainak vizsgálatára stabilitási katalógust készítettem a korlátozott háromtest-probléma modellje alapján. Az eddig megismert több mint 700 exobolygó-rendszer mintegy 90%-ánál egy óriásbolygót találtak csak, így a rendszerek nagy részére a modell alkalmazható. A katalógus 552 stabilitási térképet tartalmaz, ezek mindegyike 80 000 pálya stabilitási viszonyait tünteti fel. Összesen több, mint 44 millió kezdőfeltételt teszteltem. Ez az eddigi legátfogóbb dinamikai katalógus. A katalógus több módon is alkalmazható:

1. Az exobolygók pályaadatait folyamatosan módosítják a megfigyelések számának növekedésével. A javított pályaadatokkal rendelkező rendszerek stabilitási tulajdonságai a stabilitási térképekről azonnal leolvashatók, hiszen ezeket nagyszámú kezdőadatra számítottuk, melyek magukba foglalják az új pályaadatokat is.
2. Ha egy ismert exobolygó-rendszerben új bolygót fedeznek fel, a stabilitási térképek segítségével eldönthető, hogy az új bolygónak a megfigyelési adatokból levezetett pályaelemei dinamikailag konzisztensek-e?
3. A stabilitási térképekről meghatározhatók az ismert exobolygó-rendszerek lakhatósági zónáinak stabilitási tulajdonságai. Így megállapítható, hogy hol létezhetnek Föld-típusú bolygók a lakhatósági zónákban.

Dynamical stability in the habitable zones of nearby exosystems

(European Planetary Science Congress 2010, held 20-24 September in Rome, Italy. p.662):

A stabilitási katalógust használva arra összpontosítottam, hogy hogyan célszerű kiválasztani a 30 parszeknél közelebbi csillagok közül az ideális célobjektumot a tervezés alatt álló űreszközök számára. Az eredmények alapján kizárhatók azok a rendszerek, amelyekben a lakhatósági övezetben nem keringhet stabil pályán Föld-típusú bolygó. Először az exorendszerek alapján kiválasztottam a megfelelő stabilitási térképet a katalógusból. Ha a lakhatósági zóna stabil, akkor a rendszert felvettem a lehetséges célobjektumok listájára és a háromtest-probléma keretein belül vizsgáltam a stabilitását. A kezdeti feltételeket (az óriásbolygó fél nagytengelyét, excentricitását és tömegét, illetve a Föld-típusú bolygó pályahajlását és tömegét) az észlelések által meghatározott hibahatáron belül variáltam. Összesen 22 exorendszert (HD 142, HD 4308, HD 10647, HR 810, HD 33564, HD 39091, HD 52265, HD 70642, HD 75289, HD 93083, HD 102195, HD 111232, HD 114386, HD 114783, HD 130322, HD 134987, HD 154345, GJ 674, HD 179949, GJ 849, HD 216437, 51 Peg) vizsgáltam meg részletesen és az elkészült térképek közvetlenül alkalmazhatók az exorendszerek stabilitásnak vizsgálatára. Az eredmények a <http://www.univie.ac.at/adg/hzcat/> weblapon megtekinthetők.

Dynamics of the TrES-2 system (Astronomische Nachrichten, 330, 469-474):

A TrES-2-es rendszer egyike volt az első ún. fedési technikával felfedezett exorendszereknek. A vizsgálatok célja annak kiderítése volt, hogy lehet-e a rendszernek további bolygó tagja és ha igen, akkor a paraméterter mely tartományai azok. A vizsgálatokat a teszt részecske fél nagytengely és excentricitás illetve inklináció pályaelemei által kifeszített síkon végeztem. Numerikus módszerek (maximális excentricitás módszer, hosszú idejű numerikus integrálás) alkalmazásával kimutattam, hogy a rendszer nagy része reguláris, további bolygók felfedezése dinamikai szempontból nem kizárt. Az erősen kaotikus pályák az óriásbolygó pályája körül találhatóak és határuk gyakorlatilag független a próbatest pályahajlásától. Kimutattam azt is, hogy a rendszerben jelenlévő középmozgás rezonanciák túlnyomó része stabil keringést biztosít a próbatestnek. A lakhatósági övezet teljes egészében stabil.

Stability of inclined orbits of terrestrial planets in habitable zones

(Planetary and Space Science, 57, 434):

Az egyetlen bolygót tartalmazó exorendszerek a következő négy csoport egyikébe sorolható: *(i)* az óriásbolygó kettős csillagot tartalmazó rendszer tagja, *(ii)* az óriásbolygó egy csillag körül kering, pályája a lakhatósági zónán belül, *(iii)* kívül húzódik és *(iv)* a gázóriás a lakhatósági övezetben kering. A lakhatósági zónában keringő tesztbolygó stabilitásának inklinációtól való függését mind a négy típusban megvizsgáltam. Kimutattam, hogy az első három típusban 40° feletti inklináció esetén erősen kaotikus a mozgás, a tesztbolygó stabilitása megszűnik. A negyedik esetben kiderült, hogy 60° -os pályahajlás értékig stabil tartomány veszik körül az L_4 és L_5 Lagrange-féle pontokat. A Lagrange-pontok a háromtest-problémának öt egzakt partikuláris megoldása.

Trójai típusú (koorbitális) kisbolygók vizsgálata és a lakhatósági zóna

Kutatásaim során foglalkoztam a koorbitális mozgások stabilitásával is exobolygó-rendszerekben. Koorbitális mozgásról beszélünk, ha két égitest közel azonos pályán kering a csillag körül, azaz a két égitest között 1:1-es középmozgás rezonancia van. Koorbitális mozgásra a Naprendszerben igen sok példa ismeretes (a legismertebbek a Trójai kisbolygók, melyek a Jupiter koorbitális kísérői), várható tehát, hogy ilyen objektumok exobolygó-rendszerekben is előfordulnak. A kérdés vizsgálatával foglalkozó tanulmányok egyike vetette fel, hogy ha egy exobolygó-rendszerben egy óriásbolygó a rendszer lakhatósági zónájában kering, akkor kisméretű, Föld-típusú bolygók az óriásbolygó stabil koorbitális Lagrange pontjai körül létezhetnek. Kutatásaim során ennek a kérdésnek vizsgáltam meg a különböző vetületeit mind általános mind konkrét rendszerek esetén.

On the stability of possible Trojan planets in the habitable zone: an application to the systems HD 147513 and HD 210277 (Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 423, 3074):

Az exobolygóval 1:1-es rezonanciában keringő hipotetikus Föld-típusú bolygók stabilitását tanulmányoztam. Általános stabilitási vizsgálatokat végeztem a térbeli korlátozott háromtest-probléma keretein belül illetve két konkrét exorendszerre (HD 147513, HD 210277) határoztam meg a lehetséges stabil tartományok méretét és alakját. Feltételezett tesztbolygókat az L_4 pontba helyeztem (ez a Lagrange pont az óriásbolygó pályáján a bolygó előtt 60° -al helyezkedik el) és feltérképeztem a stabilitási tartományt a tesztbolygó excentricitása (e) és pályahajlása (i) által kifeszített síkon. A stabi-

litási tartomány mérete a csillag és óriásbolygó tömegéből számítható tömegparamétertől valamint az óriásbolygó excentricitásától függ. Kimutattam, hogy a tesztbolygó 0.6-nél kisebb excentricitásai esetén a stabil és instabil tartomány határa kb. 60° -os pályahajlásnál húzódik (az e -től lényegében függetlenül), $e > 0.6$ esetén a stabil tartomány határa növekvő e -vel gyorsan lecsökken 0 fokra, a tartomány $e > 0.6$ -ra gyakorlatilag teljesen kaotikus. Az általános vizsgálatok eredményeit felhasználva további vizsgálat tárgyává tettem két olyan exorendszert, amelyben az ismert bolygó a lakhatósági zónában kering. E két rendszer dinamikáját a háromtest-probléma felhasználásával kutattam. A HD 147513 számú exorendszer L_4 pontjában Föld-típusú bolygó elképzelhető stabilitási szempontból, míg a HD 210277-es számú rendszer esetén a stabil tartomány jóval kisebb, így nem valószínű, hogy ott megfigyelhető lesz további exobolygó.

Dynamics of possible Trojan planets in binary systems (Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 398, 2085):

A kettős csillagok aránya az összeshez viszonyítva 70 % körüli és kiderült, hogy a bináris rendszerek is tartalmaznak exobolygókat (jelenleg a közel 800 exobolygót tartalmazó rendszer közül több mint 50 kettős rendszer tagja). Érdekes kérdés, hogy ilyen rendszerekben milyen stabilitási viszonyok uralkodnak. A kutatás során kettős csillagrendszerekben meghatároztam a Lagrange pontok (L_4 , L_5) körüli stabilitási tartomány méretét és struktúráját az elliptikus korlátozott háromtest-probléma modelljében. A vizsgált rendszerek első csoportját valódi kettős csillagok képezték (51 θ Vir, 53 ξ Uma, HD 223099, SB 152, SB 667 és SB 831) míg a második csoportba olyan rendszerek tartoztak, melyekben a másodkomponens barna törpe volt (18 Del, NGC 24233, XO-3, HD 162020, HD 13189, HD 168443, NGC 4349 No127, CoRoT-Exo3). A numerikus szimulációk során kiszámítottam a Ljapunov indikátorokat és megállapítottam, hogy a 6 vizsgált rendszer közül melyek rendelkeznek elegendő nagyságú stabil tartománnyal az L_4 körül ahhoz, hogy ott Föld-típusú bolygók hosszú ideig tartózkodhassanak. Három rendszer (HD 223099, SB 667 és SB 831) esetén dinamikai szempontból elképzelhető trójai típusú exobolygók létezése. Ennek az az oka, hogy a tömegparaméterük a kritikus értéknél kisebb. Azonban ha pályaezesszeik excentricitása meghaladja a 0.05-ös küszöbértéket, az L_4 pont stabilitása megszűnik. A barna törpék vizsgálata során kimutattam, hogy a HD 162020, HD 168443 és XO-3 jelű rendszerek nem tartalmazhatnak az L_4 pont körüli Föld-típusú bolygót. A CoRoT-Exo3 rendszer bizonyos feltételek mellett rendelkezhet L_4 körüli bolygóval, a 18 Del, az NGC 24233, a HD 13189 és az NGC 4349 No127 kiterjedt stabilitási tartománnyal bír az L_4 körül, így a további megfigyelés

szempontjából ez a 4 rendszer tartogathat meglepetéseket.

Stability of Trojan planets in multi-planetary systems. Stability of Trojan planets in different dynamical systems (Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 104, 69):

A tanulmányban elsőként vizsgáltam annak lehetőségét, hogy létezhetnek-e több exobolygót tartalmazó rendszerekben stabil pályán Föld-típusú bolygók a csillag lakhatósági tartományában ha az egyik óriás exobolygó is a lakhatósági övezetben kering? Vizsgálataim három exobolygórendszert (HD 108874, HD 155358, HD 69830) érintettek. Egy rendszer esetében az ismert óriásbolygó teljes egészében a csillag lakhatósági tartományában kering (HD 108874), míg a fennmaradó rendszerek (HD 155358, HD 69830) esetében ugyan az óriásbolygó fél nagytengelye a lakhatósági tartomány határai közé esik, de excentricitása miatt a bolygó keringése során bizonyos időre elhagyja a lakhatósági tartományt. Mind a három rendszert a lakhatósági zónában keringő bolygó kilenc különböző kezdeti feltétele mellett 1 millió évre integráltam. A HD 155358 esetén csak négy kezdeti feltétel vezetett stabil megoldásra, a többi esetben a rendszer felbomlott. A négy stabil megoldást használtam a következőkben arra, hogy megvizsgáljam az L_4 pont körüli tartomány viselkedését. A négy közül csak egy esetben kaptam stabil tartományt, így ez a rendszer csak kis valószínűséggel rendelkezik koorbitális kísérével. A HD 69830 és HD 108874 rendszerek vizsgálatának eredményei alapján megmutattam, hogy ezek a rendszerek mind a kilenc kezdőfeltétel mellett stabilak és az L_4 Lagrange pont körüli tartományok kiterjedtek. Dinamikai szempontból így ezek további intenzív megfigyelése indokolt.

Továbbá a korlátozott háromtest-probléma modelljében elvégzett numerikus szimulációk alapján kapott stabilitási tartomány méretére kétváltozós függvényt illesztettem. A tömegparaméter és az excentricitás függvényében a stabil tartomány méretére adott becslés hibája 10%-on belül visszaadja a numerikus szimulációk eredményét. Az illesztést használva azonnal megbecsülhető egy ismert vagy újonnan felfedezett exorendszer L_4 körüli tartomány mérete így megbecsülhető annak valószínűsége is, hogy lehet-e további exobolygó az L_4/L_5 pontok körül.

On some long time dynamical features of the Trojan asteroids of Jupiter (Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 117, 3-16):

A korlátozott háromtest-probléma modelljében az L_4 (L_5) Lagrange pont körüli hosszú periódusú librációt leíró egyenletet tanulmányoztam. Megmutattam, hogy a libráció saját időskáláján az L_4 körüli libráció periódusa a

modell összes fizikai paraméterétől független konstans. Összehasonlítottam a librációt leíró egyenlet közelítő megoldását a pontos, numerikusan meghatározott megoldással annak érdekében, hogy meghatározzam az analitikus formulák érvényességi tartományát. Kiderült, hogy az összes jelenleg ismert Jupiter trójai kisbolygójára nagyon jó közelítéssel alkalmazhatók.

A SOLARIS kóddal 3393 L_4 körüli és 1766 L_5 körüli trójai aszteroida pályáját numerikusan integráltam a négy külső nagybolygót figyelembe véve 10 millió évre. A SOLARIS képes különböző időpontokra megadott pályaelemű égitesteket szinkronizálni, azaz közös epochára hozni. Erre azért volt szükség, mert az IAU Minor Planet Center adatbázisában tárolt trójai kisbolygók pályaelemei eltérő epochákra adottak. Megmutattam, hogy az analitikus képletek a numerikusan kiszámolt értékeket kis hibán belül közelítik, így pl. az amplitúdó–amplitúdó összefüggést és a fél nagytengelyben fellépő periodikus változásokat. A periódus-amplitúdó összefüggés szintén helyesen írja le a valódi trójaiak viselkedését, bár a numerikus eredmények arra mutatnak, hogy a pályahajlásnak is fontos szerepe van.

A közelítő analitikus modellt felhasználva a trójai kisbolygókat excentricitásuk alapján osztályoztam. Az aszteroidák Jupiterhez viszonyított perihélium viselkedése szerint három osztály definiálható: libráció, cirkuláció és átmeneti. A két Lagrange pont körüli populációban a csoportok relatív aránya gyenge asszimmetriát mutat abban az értelemben, hogy az L_5 pont körül több trójai rendelkezik elnyúltabb pályával. Hosszú időskálán az elnyúltabb pályákon keringő égitestek nagyobb valószínűséggel szöknek meg, a nagyobb szökési ráta részben magyarázhatja a két pont körül megfigyelt kisbolygó jelentős számbeli különbségét.

A Plútó holdrendszerének és kettős aszteroidák dinamikája

Exobolygók kettőscsillagok körül is keringhetnek. Az eddig felfedezett néhány esetben az exobolygó S-típusú pályán kering, amely csak az egyik csillagot fogja körül. Elvben lehetséges P-típusú pálya is, melyen a bolygó mindkét csillagot megkerüli. P-típusú pályára az első ismert példákat Naprendszerünkben a Plútó közelmúltban felfedezett két új holdja, a Nix és a Hydra szolgáltatta, melyek a kettős rendszernek tekinthető (tömegarány 0,13) Plútó-Charon rendszer körül keringenek. Vizsgáltam ezen holdak stabilitását, és általában P-típusú pályák stabilitását kettős rendszerekben. Eredményeim exobolygó-rendszerek P-típusú pályáira is alkalmazhatók. Speciálisan, az új Plútó-holdak esetében eredményeim kizárják ezek befogásos eredetét, és összhangban vannak azzal az elképzeléssel, hogy a kis holdak a Charonnal együtt

keletkeztek egy nagyobb testnek a Plútóba történt becsapódása után.

Stability of the orbit of a third body in binary asteroid systems

(Journal of Physics: Conference Series, Volume 218, Issue 1, id. 012017):

A Naprendszer fő övében keringő négy kettős aszteroidájának ((107) Camilla, (22) Kallipe, (45) Eugenia és (762) Pulcova) dinamikáját és stabilitási viszonyait tanulmányoztam. A numerikus szimulációk során a stabilitási vizsgálatokat három módszerrel végeztem el: relatív Ljapunov indikátorok, a maximum excentricitás és a maximum excentricitás különbsége segítségével. Kutatásom P-típusú pályákra korlátozódott, a szimulációkat a síkbeli korlátozott háromtest-probléma modelljében végeztem el. A vizsgálat célja annak kiderítése volt, hogy ezen kettős aszteroidák körül keringhet-e egy vagy akár több további hold P-típusú pályákon. A hipotetikus holdak fél nagytengelyét és excentricitását széles tartományban változtattam, és minden értékre kiszámítottam a három indikátort. A kifeszített paramétersíkon ábrázolva az indikátorokat megállapítottam, hogy a vizsgált rendszerek mindegyikében adott a lehetőség további holdak jelenlétére. Általánosan igaz, hogy nagy fél nagytengely és excentricitásokra a tartomány erősen kaotikus, ilyen kezdőfeltételekkel rendelkező pályákon további kísérők kizártak. Az eredményeket a mozgásegyenletek dimenziótlanításával kaptam, ezért érvényesek hasonló paraméterekkel rendelkező exorendszerekre. Ezt az alkalmazási lehetőséget a későbbiekben fogom vizsgálni.

Detailed survey of the phase space around Nix and Hydra (Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 398, 2199-2208):

2006-ban a NASA felbocsátotta a New Horizon nevű űrszondát, az első eszközt amelyet kifejezetten a távoli Plútó és Charon rendszer tanulmányozására építettek. A Naprendszer három alapvető típusú bolygó otthona: Föld-típusú, gázóriások és jégtörpék. Az első két típusról már rengeteg adat halmozódott fel, míg a jégtörpékről csak szórványosak az ismereteink. A szonda eredményei alapján a szakemberek végre pontos adatokhoz jutnak majd a Naprendszer ezen parányi égitestjeiről, alapvető hiányt pótolva. Dinamikai szempontból a Plútó-Charon rendszer azért különleges mert olyan kettős rendszert alkot, amelyben a tömegparaméter meglehetősen nagy, hasonló a kettőscsillagokéhoz. A helyzet még izgalmasabbá vált mikor felfedezték, hogy további két égi kísérője van a rendszernek: a Nix és Hydra névre keresztelt parányi holdak (azóta további két holdat, a Kerberost és Styxet fedezték fel). Vizsgálataim a rendszer dinamikájára és stabilitására irányultak. A megfigyelésekből számított pályaelemek alapján valószínűnek látszott, hogy

a két új hold a Charonnal 4:1-es illetve 6:1-es középmozgás rezonanciában van. Elsősorban arra voltam kíváncsi, hogy valóban rezonanciában vannak, másodsorban pedig pályájuk illetve közvetlen környezetük stabilitására. A számításokat a térbeli korlátozott háromtest-probléma modelljében végeztem el több 10 millió kezdőfeltételre. A stabilitási térképeken kirajzolódtak a 4:1-es illetve a 6:1-es rezonanciák. Noha a holdak fél nagytengelyei közel vannak a rezonáns értékekhez, de excentricitásuk túl kicsi, a rezonáns tartomány nem "nyúlik" le olyan kis értékekig. Bizonyos pályaelem kombináció esetén a Nix esetén a 4:1-es rezonancia lehetséges, míg a Hydra esetén nem találtam ilyen pályaelem kombinációt. Az eredmények alapján kérdéses, hogy a fennáll-e valamilyik hold esetén a rezonancia.

A stabilitási vizsgálatok mindkét hold körül nagy kiterjedésű stabil tartományt tártak fel. A holdak mozgása reguláris és hosszú időskálán is biztosnak látszik, hogy mindkét hold a rendszer tagja marad.

Bolygókeletkezési elméletek és numerikus kódok

A bolygókeletkezés folyamata ma még nem teljesen tisztázott, csak modellszámítások léteznek rá. A jelenlegi bolygókeletkezési elméletek szerint a Föld-típusú, azaz a szilárd kéreggel rendelkező bolygók a protoplanetáris korong poranyagából kialakult planetezimálok ütközéses akkréciója során keletkeztek. Az elmélet a közelmúltig kísérletileg nem volt igazolható, ám az ultraprecíz űrtávcsövek megjelenésével és a földi óriásteleszkópok üzembeállításával lehetőség nyílik a modellek obszervációs úton történő ellenőrzésére. A modellben számos olyan paraméter szerepel, melyek értékét nem ismerjük, ezek pontosítása mind a modellszámítások mind pedig a megfigyelések egyik fő célkitűzése. A modell további finomítása két okból is nehézségbe ütközik: 1. a bolygókeletkezési szimulációk a testek nagy száma miatt időigényesek, 2. különböző paraméterek mellett sok szimulációt kell futtatni ahhoz, hogy a kialakult rendszerekről statisztikát lehessen készíteni. Azt a célt tűztem magam elé, hogy egy hatékony numerikus kódot fejlesszek ki és a jövőben annak segítségével nagyszámú szimuláció futtatásával hozzájáruljak a modell fejlesztéséhez. Az eredményeket alább foglalom össze.

Planet formation - implication of statistical properties of exoplanets (Journal of Physics: Conference Series, 218, id. 012004):

A fenti tanulmányban összefoglaltam a bolygókeletkezéssel kapcsolatos elméleti ismereteinket és összevettem az exobolygók különböző statisztikáival. A jelenleg elfogadott elmélet a mag akkréciós hipotézis, amely szerint a bolygók a mikrométeres tartományból a több ezer kilométeres tartományt

folyamatos ütközésekkel és összetapadással érik el. Az elmélet nagy vonalakban helyesen írja le a bolygók keletkezésének mechanizmusát, ám számos nehézséggel is küzd. A legismertebb az ún. méteres-gát problémája. E szerint a kb. méteres átmérőjű tartományba eső testek a gáz közegellenállása miatt spiráloznak a csillag felé, és radiális sebességük ebben a mérettartományban a legnagyobb. Az ütközések olyan nagy relatív sebességek mellett történnek, hogy az a testek felbomlását okozzák nem pedig az összetapadásukat. Több más probléma is megoldásra vár még melyek jelenleg intenzív csillagászati kutatások tárgya. Ehhez a témához kapcsolódnak az alábbi tanulmányok.

SOLARIS: Software for planet formation and orbital integrations (Astronomical Notes, 334, 1000):

A bolygókeletkezés szimulációjához bonyolult modellek alkalmazása szükséges, amiben nem csak a testek közötti kölcsönös gravitációs vonzóerőket kell kiszámítani hanem figyelembe kell venni a rendszerben lévő nagy mennyiségű gáztól származó erőket is. További nehézséget jelent a testek rendkívül nagy száma: pl. egy Föld nagyságú bolygó kialakulásához kb. 1 milliárd 5 km sugarú planetezimál szükséges, azaz minden egyes integrációs lépéshez $N^2/2$ számú erőt kell kiszámítani. Ez jóval meghaladja a jelenlegi számítási kapacitást. Szükség van tehát közelítéseket használni. Egy ilyen lehetőség - amit implementáltam a **SOLARIS**¹ programba - az, hogy különböző test típusokat definiálok. Az egyes típusokat a rájuk ható erők határozzák meg. Például a Föld-típusú bolygókat gravitációsan vonzza az összes tömeggel rendelkező égitest és a gáz I-es típusú migrációs erővel hat rá, míg pl. planetezimálokra gravitációsan hatnak a Föld-típusú testek, önmagukat nem vonzzák és a gáz közegellenállási erőt fejt ki rájuk. Ezek az egyszerűsítések több nagyságrenddel gyorsítják a szimulációt miközben kvalitatíve nem változtatják meg a rendszer fejlődését. Ismert, hogy a fiatal csillagok körüli gázkomponens néhány millió év alatt eltűnik, míg a Föld-típusú bolygók kialakulása több 10 esetenként 100 millió évig is tart. A modellben figyelembe kell tehát venni a gáz időbeli fejlődését, amit a **SOLARIS**ban több különböző függvény segítségével oldottam meg. Alapvető fontosságú az ütközések kezelése, hiszen ezen a mechanizmuson keresztül növekednek az égitestek. A kód két planetezimál ütközésekor keletkezett új égitest kezdeti hely- és sebességkoordinátáit a teljesen rugalmatlan ütközés során megmaradó impulzusból számítja ki. Ez egy durva első közelítés amelynek pontosításán dolgozom (ld. alábbi tanulmány). A testek összetételét is nyomon kell követni ha tudni szeretnénk, hogy a végeredményül kapott rendszer miből tevődik össze.

¹<http://astro.elte.hu/solaris>

A SOLARIS-szal lehetőség van tetszőleges összetételt hozzárendelni bármelyik objektumhoz és ezt az ütközések során a program automatikusan frissíti.

A program tesztelési fázisa 2013 első felében sikeresen lezárult. Jelenleg több tucat szimulációt futtatok és különböző modellekben tanulmányozom a bolygókeletkezést. Mindegyik modell több 10 ezer testet tartalmaz, az óriásbolygók a gázkomponens paramétereitől függő különböző migrációs paraméterekkel rendelkeznek. A szimuláció a csillag körüli gázkomponens időfejlődését is követi. A futások rendkívül időigényesek így az eredmények kiértékelése és publikálása várhatóan a jövő év során történik meg.

SPH-based simulation of multi-material asteroid collisions (Astronomical Notes, 334, 996):

A bolygókeletkezési elméletek egyik sarokköve az ütközések modellezése. Jelenleg a SOLARIS kódban a legegyszerűbb modellt, a teljesen rugalmatlan ütközést implementáltam. Ennek helyettesítése realiztikusabb modellekkel a kóddal kapott eredmények jelentős pontosítását szolgálná, ezért a fenti tanulmányban az ún. "smoothed particle hydrodynamics" módszert alkalmaztam és teszteltem. A munkámban kétkomponensű, bazaltból és jégből álló objektumok ütközését szimuláltam. A módszer képes figyelembe venni az anyagban lévő apró töréseket is a Weibull-féle eloszlás alapján. Az első, különböző ütközési paraméterek mellett végzett szimulációk eredményei alapján az ütköző testek egy része széttöredezett, egy része csak erodálódott, egy része összeolvadt és minden esetben tapasztaltam a testek belső szerkezetét jellemző töredezettség ugrásszerű megnövekedését. A további részletes vizsgálatok eredményei alapján egy pontosabb ütközési modellt fogok kidolgozni és implementálni a SOLARIS kódban.

Water delivery in the early Solar System (LET'S FACE CHAOS THROUGH NONLINEAR DYNAMICS: 8th International Summer School/Conference. AIP Conference Proceedings, Volume 1468, pp. 137-147):

A bolygókeletkezés egyik fontos aspektusa, hogy milyen módon kerül vagy távozik víz egy adott égitestre. Jelenleg pl. megoldatlan kérdés a földi víz eredete. A SOLARIS kód használatával a Naprendszer feltételezett korai állapotát leíró modellt alkalmazva a víz transzportjának különböző aspektusait tanulmányoztam. A 2 csillagászati egységen belüli tartományban található aszteroidák Föld-típusú bolygókkal bekövetkező szoros megközelítési statisztikáját kutattam. A megközelítések eloszlása alapján egy közelítő becslést adtam arra vonatkozóan, hogy néhány százalékos víztartalom esetén mennyi vizet képesek szállítani pl. az ősföldre.

Irodalom

- Érdi, B., Forgács-Dajka, E., Süli, Á.: 2013, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, **117**, 3.
- Maindl, T., Schäfer, C., Speith, R., Süli, Á., Forgács-Dajka, E.: 2013, *Astronomical Notes*, **334**, 996.
- Süli, Á.: 2013, *Astronomical Notes*, **334**, 1000.
- Dvorak, R., Eggl, S., Süli, Á., Sándor, Zs., Galiazzo, M., Pilat-Lohinger, E.: 2012, *AIP Conference Proceedings*, **1468**, 137.
- Funk, B., Schwarz, R., Süli, Á., Érdi, B.: 2012, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **423**, 3074.
- Funk, B., Libert, A.-S., Süli, Á., Pilat-Lohinger, E.: 2011, *Astronomy and Astrophysics*, **526**, 7.
- Funk, B., Süli, Á., Pilat-Lohinger, E., Schwarz, R., Eggl, S.: 2010, *Pathways Towards Habitable Planets. Edited by Vincent C. du F., Dawn M. G., and Ignasi R. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific*, 430.
- Funk, B., Pilat-Lohinger, E., Süli, A., Schwarz, R., Eggl, S.: 2010, "European Planetary Science Congress 2010, held 20-24 September in Rome, Italy. <http://meetings.copernicus.org/epsc2010>, 662.
- Pilat-Lohinger, E., Robutel, P., Süli, Á.: 2010, *EGU General Assembly 2010, held 2-7 May, 2010 in Vienna, Austria*, 14139.
- Zsigmond, Zs., Süli, Á.: 2010, *Journal of Physics: Conference Series*, **218**, id. 012020.
- Nagy, I., Süli, Á., Érdi, B.: 2010, *Journal of Physics: Conference Series*, **218**, 012017.
- Süli, Á.: 2010, *Journal of Physics: Conference Series*, **218**, 012004.
- Süli, Á., Zsigmond, Zs.: 2009, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **398**, 2199.
- Schwarz, R., Süli, Á., Dvorak, R.: 2009, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **398**, 2085.
- Schwarz, R., Süli, Á., Dvorak, R., Pilat-Lohinger, E.: 2009, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, **104**, 69.
- Freistetter, F., Süli, Á., Funk, B.: 2009, *Astronomische Nachrichten*, **330**, 469.
- Funk, B., Schwarz, R., Pilat-Lohinger, E., Süli, Á.: 2009, *Planetary and Space Science*, **57**, 434