

## Zárójelentés

Az extraszoláris bolygórendszerek kutatása napjainak csillagászatának egyik legfontosabb területe. Az első Naprendszeren kívüli bolygót egy Naphoz hasonló csillag, az 51 Pegasi körül 1995-ben fedezték fel, s jelenleg már 212 exobolygót ismerünk 182 bolygórendszerben. Világszerte folynak kutatások új exobolygók felfedezésére, fizikai paramétereik és dinamika viselkedésük meghatározására. A most lezárult OTKA pályázatunkban mi is a Naprendszeren kívüli bolygók vizsgálatát tűztük ki célul, mind megfigyelési, mind elméleti (dinamikai) oldalról. Elért eredményeink a következők.

## Észlelési eredmények

### Új változók:

Az Auriga és Cygnus csillagképekben csillagokban gazdag mezőket észleltünk exobolygók átvonulásának keresése céljából az MTA KTM CSKI 180/90/60 cm-es Schmidt távcsövével. Az észlelési anyag feldolgozása során átvonulást sajnos nem találtunk, azonban 11 új változócsillagot fedeztünk fel. Az egyik csillag W UMa típusú kettőscsillagnak bizonyult, amely időben változó O'Connell-effektust mutat. Ennél is érdekesebb egy az Aurigában talált, Gamma Dor-jellegű fényváltozásokat produkáló csillag, amelyen a mintegy 1,06 nap periódusú és néhány század magnitúdójú fényességváltozás mellett egy kb. háromnegyed tized magnitúdójú, kb. 0,25 nap periódusú moduláció is észlelhető. Ezt a csillagot V és I sávban is észleltük és meghatároztuk a frekvenciákat. Publikálásra benyújtottuk az Auriga és Cygnus mezőkben talált 11 új változócsillagról készített cikkünket.

### **KH 15D születő bolygórendszer** (*Astronomical Journal*, 2005, **130**, 1896-1915):

Nemzetközi együttműködésben fotometriai megfigyeléseket végeztünk a KH 15D születőben lévő exobolygórendszerrel az MTA KTM CSKI 1 m-es távcsövével. A KH 15D egy fiatal csillag a 760 pc-re lévő NGC 2264 nyílthalmazban, mely kb. 3 millió éves. A csillag 4 mg-s fényességváltozásokat mutat, amit korábban a csillag körüli akkréciós korongban létrejövő sűrűség hullámokkal magyaráztak. Ezeket egy a csillag körül keringő bolygókezdemény gravitációs perturbáló hatása hozhatja létre. A korábbi fotometriai adatokat felhasználva kiderült, hogy a csillag fedései 1995-ben kezdődtek. A fedések hossza és mélysége folyamatosan növekedett 2004-ig (néhány napról 24 napra, ami az orbitális periódus mintegy fele, illetve kb. 2 mg-ról 4 mg-ra.) Emelett az adatokban egy 9,6 napos periódus is jelen van, amelyet a központi csillag forgási periódusaként lehetett interpretálni. A fedésekben mutatkozó változásokat korábban azzal próbálták magyarázni, hogy a középponti csillag körül keringő protobolygó vagy bolygó perturbációi spirális sűrűség hullámokat keltenek a csillag körüli porkorongban, amelyet éléről látunk és így figyelhetjük meg a fedést. Célpontunkba is ezért került a rendszer. Az újabb eredmények szerint azonban a kísérő protocsillag, így egy ún. fősorozat előtti kettőscsillag csillag körüli anyaga sűrűség hullámjainak változását figyeltük meg. Az elmélet szerint az ilyen sűrűség hullámok a bolygórendszerek kialakulását előzik meg.

### **Porkorongok** (*Astrophysical Journal*, 2006, **644**, 525-542):

Az IRAS műhold két évtizeddel ezelőtti missziója óta tudjuk, hogy fősorozati csillagok körül is található porkorongok. Az első ilyen struktúrát a Vega körül fedezték fel. Az IRAS pontforrás katalógusaira támaszkodó statisztikus vizsgálatok kimutatták, hogy a fősorozati csillagok legalább

15%-a érintett a Vega-jelenségben. Mai tudásunk szerint az ezen csillagok körül észlelt por a legtöbb esetben a mi Naprendszerünk Kuiper-övéhez hasonló képződményekben keringő kisebb-nagyobb bolygókezdemények közötti ütközések terméke. A létrejött törmelékdiskok szerkezetének és időbeli fejlődésének vizsgálata nyomán a Naprendszer és általában a bolygórendszerek keletkezését is jobban megérthetjük. Munkánk során IRAS, ISOPHOT és Spitzer adatokat felhasználva összeállítottuk a Naprendszer 120 parszekes környezetén belül található legfényesebb törmeléköröngök katalógusát, meghatározva azok főbb paramétereit. A csillagok kinematikai tulajdonságainak vizsgálatakor kiderült, hogy közel 50%-uk az utóbbi néhány évben felfedezett fiatal mozgási halmazokhoz köthető. Ezekben az esetekben a csillagok korának meghatározása sokkal pontosabbá vált. A nagyobb felbontású infravörös képek felhasználásával (Spitzer adatok) számos korábbi törmeléköröng-jelölt esetében megállapítottuk, hogy az infravörös többletsugárzás nem a csillag körüli anyagból, hanem háttérobjektumokból (valószínűleg galaxisokból) származik. Korábban ezek az idős, többmilliárd éves, látszólag nagy infravörös excesszussal rendelkező csillagok komoly kihívások elé állították a korongok fejlődését vizsgáló elméleteket. Az eredményeink nyomán elkészített evolúciós diagramok a korábbiaknál jobb összhangot mutatnak az elméleti modellekkel.

Az elmúlt években (2004, 2005) két sikeres pályázatot adtunk be a Spitzer űrtávcsőre. A programok során a Spitzer infravörös mesterséges hold 78 F színképtípusú csillag fotometriai és spektroszkópiai vizsgálatát végzi majd el. Az eddig lemért 56 csillag közül 24 mutatott infravörös excesszust egy vagy több hullámhosszon. Ezek közül 11 új felfedezés. Az infravörös excesszust mutató csillagok javarésznél (21) a talált por hőmérséklete kisebb mint 80K. Ezen törmeléköröngök esetében exoszoláris Kuiper-övekben lejátszódó ütközések adhatják a por utánpótlását. Fontos eredmény, hogy három olyan ritka, meleg törmeléköröngöt is találtunk, melyeknél a porgyűrű vagy porkorong valószínűleg viszonylag közel helyezkedik el a csillaghoz (<8 AU). A mintában szereplő 150 millió évnél fiatalabb csillagok 60%-nál volt megfigyelhető infravörös excesszus. Ez azt is mutatja, hogy a vizsgált fiatal csillagok több mint felénél lezajlott már valamilyen bolygókeletkezés, amelynek során legalább néhány 100 km-es méretű bolygókezdemények létrejöttek. Ezeket az első eredményeket egy konferenciakiadványban publikáltuk (Visions for Infrared Astronomy), amelynek a megjelenése 2007 nyarára várható.

## **Dinamikai vizsgálatok**

### **Dinamikai stabilitási katalógus (MNRAS, 2007, 375, 1495-1502):**

Exobolygórendszerek dinamikai tulajdonságainak vizsgálatára stabilitási katalógust készítettünk a korlátozott háromtest-probléma modellje (csillag-óriásbolygó-tesztbolygó) alapján. Az eddig megismert 182 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 teszteltünk. Ez az eddigi legátfogóbb dinamikai katalógus. A katalógus készítése során általunk kifejlesztett, hatékony numerikus módszereket használtunk (relatív Ljapunov-indikátorok). A katalógus több módon is alkalmazható:

- Az exobolygók pályadatait folyamatosan módosítják a megfigyelések számának növekedésével javuló pályameghatározások alapján. A javított pályaadatokkal rendelkező rendszerek stabilitási tulajdonságai a stabilitási térképekről azonnal leolvashatók, hiszen ezeket nagyszámú kezdőadatra számítottuk, melyek magukba foglalják az új pályaadatokat is.

- 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?

- A stabilitási térképekről meghatározható az ismert exobolygó-rendszerek lakhatósági zónáinak stabilitási tulajdonságai. Így megállapítható, hogy hol létezhetnek Föld-típusú bolygók a

lakhatósági zónákban.

A stabilitási katalógust 15 ismert exobolygó-rendszer lakhatósági zónájának dinamikai jellemzésére alkalmaztuk. Ezek a rendszerek: HD 52265, HD 121504, HD 8574, 70 Vir, HD 178911 B, Eps Eri, HD 114729, GJ 777 A, HD 70642, HD 72659, 47 UMa b, HD 50554, 14 Her, HD 10697, HD 30177. A stabilitási viszonyok nagymértékben függenek a vizsgált rendszerek rezonanciáitól. A stabilitási térképek megadják a rezonanciák finomszerkezetét mind a lakhatósági zónában, mind azon kívül is. Meghatároztuk, hogy mely rendszerekben létezhetnek a stabilitási viszonyok alapján Föld-típusú bolygók a lakhatósági zónákban. Ezek a rendszerek Föld-típusú bolygók utáni kutatások célpontjai lehetnek.

### **Többes exobolygó-rendszerek stabilitás-vizsgálata** (*MNRAS*, 2004, **351**, 1043-1048):

Dinamikai szempontból igen érdekesek azok az exobolygó-rendszerek, melyekben két óriásbolygó kering. Ezek száma jelenleg 20 van. A közeli pályákon keringő nagy tömegű bolygók pályáinak stabilitása igen érzékenyen függ a kezdőfeltételektől és a rendszer paramétereitől. Három rendszer stabilitási viszonyaival foglalkoztunk részletesen, vizsgálva a lakhatósági zónák stabilitását is. A lakhatósági zóna ezeknél a rendszereknél a két óriásbolygó között helyezkedik el. Numerikus módszerek (relatív és gyors Ljapunov indikátorok, hosszú idejű numerikus integrálás) alkalmazásával kimutattuk, hogy a HD 38529 rendszer lakhatósági zónájának nagy része kaotikus. A két bolygó között stabil tartomány csak a lakhatósági zóna belső szélénél, a középponti csillagtól 0,8-1,3 AU távolságban található. Ez a stabil tartomány fennmarad akkor is, ha a külső, nagyobbik bolygó tömegét, vagy az excentricitását tág határok között változtatjuk. Ebben a stabil tartományban nemcsak kicsi, Földhöz hasonló méretű, hanem Jupiter-tömegű bolygó is stabilan keringhet. A stabil tartományt magasrendű rezonanciák (9:1, 8:1, 7:1) szelik át. A vizsgálatok alapján úgy látszik, hogy exobolygó-rendszerekben a magasrendű rezonanciák jelentős szerepet játszanak a nagy bolygótömegek és excentricitások miatt. A HD 168443 rendszerben számos rezonancia fedi át egymást a lakhatósági zónában, és ezért, valamint a két közeli nagytömegű bolygó miatt a lakhatósági zóna jórészt instabil. Hasonló a helyzet a HD 169830 rendszerben, ahol a lakhatósági zóna a nagy tömegek és a rezonanciák átfedése miatt még instabilabb. Harmadik bolygó számára nincs hely a két ismert bolygó között ebben a rendszerben.

### **Koorbitális mozgások stabilitása** (*Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2005, **92**, 113-121):

Kutatásaink során foglalkoztunk a koorbitális mozgások stabilitásával is exobolygó-rendszerekben. Koorbitális mozgásra a Naprendszerben igen sok példa ismeretes. Várható, hogy koorbitális objektumok exobolygó-rendszerekben is léteznek. A kérdés vizsgálatával foglalkozó tanulmányok egyike mutatott rá arra, 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. Ezt az elképzelést részletes vizsgálat tárgyává tettük. Az ismert exobolygó-rendszerek közül kiválasztottuk azokat a rendszereket (HD 17051, HD 28185, HD 108874, HD 27442, HD 114783), melyekben az egyetlen ismert óriásbolygó pályája teljes egészében a lakhatósági zónában helyezkedik el. Négy további rendszert is vizsgáltunk (HD 150706, HD 177830, HD 20367, HD 23079), melyeknél az óriásbolygó pályájának fél nagytengelye a lakhatósági zóna határait megadó intervallumba esik, ám a nagy pályaeccentricitás miatt a bolygó keringése során bizonyos időre elhagyja a lakhatósági zónát. Ebben a 9 rendszerben meghatároztuk az L4 Lagrange-pont körüli nemlineáris stabilitási tartomány méretét és dinamikai szerkezetét az elliptikus korlátozott háromtest-probléma modelljében a relatív Ljapunov indikátorok módszerével. Megállapítottuk, hogy valamennyi rendszerben kiterjedt stabilitási tartomány található az L4 Lagrange-pont körül, melynek kiterjedése az óriásbolygó tömegétől és pályájának

excentricitásától függ. Kistömegű exotrójai bolygók létezése lehetséges ezekben a rendszerekben. Stabilitási szempontból nincs különbség a lakhatósági zónában keringő, és az abból kilátogató óriásbolygók koorbitális régiói között. A koorbitális stabilitási tartományok több érdekes szerkezeti sajátossággal rendelkeznek. Ilyenek például a magasrendű rezonanciáknak megfelelő gyűrűszerű szerkezetek, melyekben a mozgás fokozottabban érzékeny a kezdőfeltételek kis változásaira. A stabilitási tartomány mérete akkor a legnagyobb, ha mind az óriásbolygó tömege, mind pályájának excentricitása kicsi.

A vizsgálatokat kiterjesztettük az általános háromtest-probléma modelljére is. Nagy számú numerikus szimuláción alapuló vizsgálataink szerint többszáz földtömegű, vagy akár egy Jupiter-tömegű trójai exobolygó is keringhet stabil pályán az L4 pont környezetében. Numerikusan meghatároztuk az L4 pont körüli stabilitási tartomány méretét az óriásbolygó tömegének és excentricitásának függvényében a tesztbolygó 1-100 Föld-tömeg közötti értékeire. Itt azt az érdekes eredményt kaptuk, hogy a stabilitási tartomány méreteloszlása igen érzékenyen függ az L4 pont körüli mozgás frekvenciáinak rezonanciáitól. A frekvenciákat meghatározó analitikus összefüggés (20-ad fokú algebrai egyenlet a frekvenciában, 5-öd fokú a tömegparaméterben, 4-ed fokú az excentricitásban) numerikus megoldásával sikerült meghatározni a rezonáns megoldásokat, és azonosítani a méreteloszlás minimumait a rezonanciákkal. Ezen eredményeket jelenleg készítjük elő publikálásra.

### **Trójai exobolygók kialakulása** (*Astronomy and Astrophysics*, 2007, **463**, 359-367):

Számos munka foglalkozik a Naprendszer Trójai kisbolygóinak keletkezésével.

Eddig nem vizsgálták azonban, kialakulhat-e Trójai exobolygó egy óriásbolygó stabil Lagrange-pontjai körül. Ilyen irányú kutatásaink alapgondolata egy óriás exobolygó stabil (L4, L5) Lagrange-pontjai körül egy földméretű bolygó kialakulásának, dinamikai fejlődésének és stabilitásának vizsgálata volt. Az óriásbolygó kezdetben a csillagtól távol helyezkedik el, tömege és pályaadatái pedig a Jupiteréhez hasonlóak. A bolygó a csillag körüli gázkoronggal való kölcsönhatás következtében befelé vándorolhat (migrál) a lakhatósági zónába. A Naphoz hasonló csillagoknál a lakhatósági zóna közelítőleg 0.7-1.3 AU között helyezkedik el. Korábban nem vizsgálták azt a problémát, hogy kialakulhat-e egy trójai planetézimál-rajból egy bolygó, sem egy ilyen bolygó stabilitását a migrációs folyamat során.

Kutatásaink első lépéseként kifejlesztettünk egy N testből álló rendszerre egy numerikus kódot a trójai planetézimálok dinamikai és ütközéses fejlődésének vizsgálatára. A kód figyelembe veszi a középponti csillag, az óriásbolygó és a planetézimálok közti teljes gravitációs kölcsönhatást, a planetézimálok közötti ütközéseket, egy Stokes-típusú gáz-fékezőerőt, és az óriásbolygó migrációját. A kód felhasználásával vizsgáltuk a bolygókeletkezést mind gázmentes környezetben, mind gázkorong jelenléte esetén.

Gázmentes esetben szimulációk sorozatával vizsgáltuk különböző darabszámú ( $N=100-1000$ ) és össztömegű ( $M=1-3$  Föld-tömeg) planetézimál-rajok dinamikai és ütközéses fejlődését. A 100-nál is több futtatás eredményei a következőképp összegezhetők:

- a fejlődés első szakaszában az L4 (vagy L5) pont körüli librációs tartományban elhelyezett planetézimálok közti ütközések következtében gyorsan kialakul néhány nagyobb bolygóembrió;
- a fejlődés következő fázisában, 1000-10 000 év múlva ezek a nagyobb testek fokozatosan kipturbálják a librációs tartományból a kisebb planetézimálokat;
- néhány tízezer év múlva már csak néhány nagyobb bolygóembrió marad, míg végül ezek közül is a legnagyobb a kezdeti  $N$  és  $M$  értékétől függően százezer – egy millió év alatt kipturbálja a többit és egy Trójai bolygó marad vissza;
- a keletkezett Trójai bolygó tömege átlagosan néhány tized földtömeg volt, és sosem haladta meg a 0,6 földtömeget.

Vizsgálataink arra a korábban nem ismert tényre mutattak rá, hogy nagyobb tömegű Trójai bolygó kialakulása planetézimálok akkréciójával nem lehetséges a rendszer instabilitása miatt. A numerikus kód futtatásával és káoszdetektálási módszerekkel (relatív Ljapunov indikátorok, legnagyobb excentricitás módszere) kimutattuk, hogy ha a librációs tartományban jelen van egy 0,1 Föld-tömegű test, akkor ez rövid idő alatt kipturbálja a kisebbeket. Az akkréciós bolygókeletkezési folyamat tehát a stabil Lagrange-pontok körüli librációs tartományban eltér a hagyományostól: a perturbált, ellaposodó pályák nem a többi planetézimállal való ütközés esélyét növelik, hanem ellenkezőleg, a librációs tartomány elhagyására vezetnek, és így csökkentik a trójai planetézimálok ütközésének valószínűségét.

Nagyobb tömegű Trójai bolygó kialakulását a csillagot körülvevő protoplanetáris gáz- és porkorong hatása segítheti, melybe az óriásbolygó és a trójai populáció be van ágyazódva a fejlődés korai szakaszában. Korábbi szimulációk szerint mind az óriásbolygó tömegnövekedése, mind a korong fékező hatása a librációs tartomány stabilitásának növekedését vonja maga után, elképzelhető hát, hogy gázdús környezetben a Trójai bolygó tömegnövekedése nem áll meg néhány tized Föld-tömegnél, hanem tovább folytatódik. Ennek tesztelésére hidrodinamikai szimulációkat, valamint különböző gáz fékezőerők feltételezésével modellszámításokat végeztünk.

A hidrodinamikai szimulációkat a publikus FARGO kóddal végeztük. A kód kétdimenziós gázkorong és a korongba helyezett sziklás testek kölcsönhatásának vizsgálatára alkalmas. A kód futtatásával az óriásbolygó különféle tömegértékei mellett meghatároztuk egy trójai planetézimál excentricitásának és librációs amplitúdójának változását a gázkoronggal való kölcsönhatás következtében. Ha az óriásbolygó tömege kicsi, kb. 30 Földtömeg, a librációs tartományban a gáz sűrűsége megegyezik a korong többi részének sűrűségével, a trójai planetézimál fejlődése tehát gázban gazdag környezetben zajlik. Az óriásbolygó tömegének növekedése azonban azt eredményezi, hogy pályája mentén, és így a librációs tartományban is a gáz sűrűsége lecsökken, 300 Földtömegű óriásbolygó esetén pedig már egy rés nyílik a bolygó pályája mentén a gázkorongban. Ekkor a trójai planetézimálok fejlődése megegyezik a gázmentes esetben tapasztalttal. A gázkorong hatását a planetézimálok fejlődésére tehát 300 Föld-tömegű óriásbolygóig kell figyelembe venni.

A hidrodinamikai szimulációkat arra is felhasználtuk, hogy a gázkorong hatását egyszerű fékezőerőkkel modellezzük. Stokes-féle és Epstein-féle (sebesség négyzetes) fékezőerőket vizsgáltunk, ezek együtthatóit a hidrodinamikai számítások alapján kalibráltuk. Közülük a Stokes-féle modell bizonyult alkalmasabbnak, ez adott a hidrodinamikai szimulációkkal jól egyező eredményeket.

A Stokes-modell alapján 30-300 Föld-tömegű óriásbolygók mellett vizsgáltuk a trójai bolygókeletkezést planetézimál-rajokból. A gáz fékezőerő bár lassította a planetézimálok relatív sebességét, azonban érdemben nem befolyásolta a korábban megismert eredményt: gáz fékezőerő hatását figyelembe véve sem alakulhatnak ki néhány tized Föld-tömegnél nagyobb Trójai bolygók. Gázdús környezetben planetézimálok akkréciójával legfeljebb Mars méretű exobolygók keletkezhetnek.

Vizsgáltuk a II. típusú planetáris migráció hatását is a trójai bolygókeletkezésre és a kialakult bolygó stabilitására. A csillagtól távoli bolygó a gázkoronggal való kölcsönhatás következtében százezer - tíz millió éves időskálán befelé vándorol és elér a lakhatósági zónába. A FARGO kóddal és a migrációs effektust is figyelembe vevő N-test kóddal végzett szimulációkkal kimutattuk, hogy bár a migráció alatt az akkréció határfoka lecsökken, azonban így is keletkezhet egy néhány tized Földtömegű Trójai bolygó, mely követi az óriásbolygót a lakhatósági zónába, stabilan keringve annak L4 (vagy L5) librációs pontja körül.

Planetézimálokból akkrécióval a stabil Lagrange-pontok körül tehát csak legfeljebb Mars méretű Trójai bolygók keletkezhetnek. Az óriásbolygók stabil Lagrange-pontjai körül nagyobb méretű Trójai bolygók csak más mechanizmussal jöhetnek létre. Ilyen lehet például a gázkorongban fellépő instabilitás miatti kollapszus, vagy egy már kialakult nagyobb bolygó befogása librációs pályára. Ezek a folyamatok azonban további vizsgálatokat igényelnek. Ezeknek a jövőbeli vizsgálatoknak kell feloldaniuk azt az ellentmondást, melyet a keletkezésre vonatkozó, és a stabilitással kapcsolatos

kutatásaink feltártak, nevezetesen, hogy akkrécióval csak kistömegű Trójai bolygók keletkezhetnek, ugyanakkor a rendszer dinamikája nagytömegű Trójai bolygó stabil keringését is megengedi.

### **Egyszerűsített Naprendszer-modell (MNRAS, 2005, 363, 241-250):**

Az eddig megismert exobolygó-rendszerekben általában nagy tömegű bolygók keringenek a középponti csillaghoz közeli excentrikus pályákon. Az extrém körülmények igen megnehezítik ezen rendszerek stabilitásának vizsgálatát. Kutatásaink egyik irányaként az exobolygó-rendszerek stabilitásának tanulmányozására a Naprendszer egy egyszerűsített modelljét választottuk, mely a Napból, és öt bolygóból (Vénusz, Föld, Mars, Jupiter, Szaturnusz) állt. Azt vizsgáltuk, hogyan változik a rendszer stabilitása, ha az egyik bolygó, nevezetesen a Föld tömegét változtatjuk. A Föld tömegét fokozatosan növelve minden rendszerre meghatároztuk a rendszer stabilitását a mozgásegyenletek 20 (egy esetben 100) millió éves numerikus integrálásával. A számítások arra az eredményre vezettek, hogy az egyszerűsített Naprendszer modellje nagyon stabil a tömegnövekedéssel szemben, a rendszer (egy kivételtől eltekintve) mindaddig stabil marad, míg a Föld tömege 540-szer nagyobb nem lesz (ez körülbelül 2 Jupiter-tömegnek felel meg). A kivétel az az eset jelenti, amikor a Föld tömege 4,2-4,9-szer nagyobb a jelenleginél, ekkor ugyanis a Mars elszökik a rendszerből. A meglepő jelenség okának tisztázására a Laplace-Lagrange-féle elsőrendű szekuláris perturbációelméletet alkalmaztuk. Kiderült, hogy ötszörös földtömeg esetén a Mars, Jupiter és Szaturnusz felszálló csomói között szekuláris rezonancia lép fel. Ezen szekuláris rezonanciák átfedése erős kaotikus viselkedést eredményez, és az excentricitás növekedésén át végső soron ez az oka a Mars szökésének. Meglepő módon a Vénusz erős stabilitást mutat. Vizsgálataink szerint ennek oka egy olyan védőmechanizmus (a Vénusz excentricitása valamint a Föld és Vénusz perihélium-hosszúságainak különbsége sajátos összhangban változik), mely megóvjá a Vénuszt a Föld szoros megközelítésétől. Hasonló védőmechanizmus a 47 UMa exobolygó-rendszerben is létezhet (hipotetikus földtípusú bolygóval).

### **Módszertani vizsgálatok**

#### **A korlátozott háromtest-probléma globális regularizálása (CMDA, 2004, 90, 35-42):**

A korlátozott háromtest-probléma modellje exobolygó-rendszerekre is alkalmazható, így ilyen vizsgálatokban is szükség lehet szoros megközelítések esetén a regularizált mozgásegyenletek numerikus integrálására. A globális regularizáló transzformációkkal kapcsolatban azt az elvi problémát vizsgáltuk, mi az oka annak, hogy az ismert transzformációk, melyeket különböző időpontokban, különböző szerzők más-más megfontolással vezettek le, egy közös alakba írhatók. Kimutattuk, hogy a globális regularizáló transzformációk generátorfüggvényére felírható egy elsőrendű differenciálegyenlet, melynek egzakt megoldását is megadtuk. Ennek a megoldásnak a létezése bizonyítja a globális regularizáló transzformációk általános alakjának unicitását. A megoldás felhasználásával új transzformációkat is megadtunk.

#### **Relatív Ljapunov-indikátorok (CMDA, 2004, 90, 127-138):**

Stabilitás-vizsgálatoknál igen sok kezdőfeltételről kell eldönteni a létrejövő pályák stabilitási tulajdonságait. Ehhez hatékony numerikus módszerek szükségesek. Kutatásaink során mi is foglalkoztunk ilyen módszerek kifejlesztésével. Ezek egyike a relatív Ljapunov-indikátorok (RLI) módszere. Az RLI két közeli kezdőpontból kiinduló pályára adja meg a véges idejű Ljapunov-indikátorok legnagyobb Ljapunov-exponenshez való konvergenciájának különbségét. Az RLI igen hatékony fokmérője egy pálya kaotikusságának. Használatának fő előnye, hogy a pályákat elég csak

rövid időre integrálni, ami az egyes rendszereknél a kezdőfeltételek igen nagy számának megvizsgálását teszi lehetővé. A módszert részletesen leíró cikkben alkalmazásokat mutattunk be folytonos Hamilton-rendszerek 2 és 4 dimenziós szimplektikus leképezéseire. Vizsgáltuk továbbá ismert exobolygó-rendszerek (HD 38529, HD 168443) fázisterének stabilitási szerkezetét is, megadva a stabil és instabil tartományok elhelyezkedését.

**Exobolygók pályadatainak becslése átvonulási fotometriai adatokból** (*CMDA*, 2006, **95**, 273-285):

Azt a kérdést vizsgáltuk, hogy lehetséges-e egy átvonulási fotometriával felfedezett bolygó pályadatainak kiszámítása, ha a periódus mellett az átvonulás ideje is mérhető. Feltéve, hogy a középponti csillag tömege és sugara ismert, levezettünk egy egyenletet, mely kapcsolatot teremt a csillag és a bolygó tömege, az átvonulás időtartama, a fél nagytengely, az excentricitás, a periasztron argumentuma, és a pályahajlás között. A pályahajlást rögzítve az egyenletben két ismeretlen lesz, a periasztron argumentuma és az excentricitás. A megoldást ezen két változó paraméter-síkján különböző pályahajlások mellett vizsgáltuk. Ezen síkon reguláris és kaotikus tartományok jelentkeznek, melyek vizsgálatával korlátok adhatók az észlelt bolygó excentricitására és pályahajlására.

**Nekhoroshev becslések Trójai kisbolygókra** (*MNRAS* 2005, **364**, 253-271):

A trianguláris Lagrange-pontok körüli stabil tartomány méretének becslése igen nehéz, klasszikus problémája az égi mechanikának. A kérdés fontos lehet az exobolygó-rendszerekkel kapcsolatban is, hiszen koorbitális mozgások feltehetően azokban is létrejönnek. Koorbitális mozgásokra korábban általunk levezetett szimplektikus leképezések felhasználásával sikerült minden eddiginél élesebb Nekhoroshev-típusú becslést adni a Jupiter L4 pontja körüli stabil tartomány méretére, mely a Naprendszer korát meghaladóan stabil! Ez a tartomány tartalmazza a jelenleg katalogizált trójai kisbolygók 48%-át.

**P-típusú pályák és a Plútó holdrendszere** (*MNRAS*, 2006, **370**, L19-L23):

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, az S/2005 P1 és S/2005 P2 szolgáltatta, melyek a kettős rendszernek tekinthető (tömegarány 0,13) Plútó-Charon rendszer körül keringenek. Vizsgáltuk ezen holdak stabilitását, és általában P-típusú pályák stabilitását kettős rendszerekben. Eredményeink exobolygó-rendszerek P-típusú pályáira is alkalmazhatók. Speciálisan az új Plútó-holdak esetében eredményeink 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.