

Borkovits Tamás

A FEDÉSI KETTŐS ÉS TÖBBES CSILLAGRENDSZEREK
VIZSGÁLATÁNAK JÁRATLAN ÚTJAIN

AZ MTA DOKTORA CÍME MECSZERZÉSÉÉRT KÉSZÜLT DOLGOZAT TÉZISFÜZETE

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM BAJAI OBSZERVATÓRIUMA,
BAJA, 2016

1. A kutatások előzménye

A modern asztrofizika XIX. századra datálható kezdetei óta a kettőscsillagok rendkívül fontos, mondhatni alapvető szerepet játszottak a tudományág történetében. A kettőscsillagok különféle típusai közül is ki kell emelni a fedési kettősöket, amelyek kombinált fotometriai és spektroszkópiai megfigyelése sokáig az egyedüli lehetőséget jelentette a csillagok olyan alapvető fontosságú állapothatározóinak, mint a tömegük, illetve a sugaruk nagy pontosságú meghatározására. Nem véletlenül jellemezték az elmúlt évszázad asztrofizikai kutatásainak olyan ikonikus alakjai, mint Henry Norris Russell, illetve Zdeněk Kopal a fedési kettőscsillagok vizsgálatát mint „az asztrofizika királyi útját”. A fundamentális csillagparaméterek meghatározásán kívül a fedési kettőscsillagok még többet is nyújtottak, nyújtanak. Például a csillagok belső szerkezetére, tömegeloszlására vonatkozó első észlelési eredményeket is ezen égitestcsoport speciális képviselői, az excentrikus pályán keringő fedési kettőscsillagok mozgásának évtizedes megfigyeléséből sikerült leszűrni. A példákat hosszan lehetne tovább sorolni. Egy fedési kettőscsillag fénygörbéjének alakját az egyszerű fedési geometrián felül számos más jelenség is befolyásolja a pálya menti keringés dinamikájától a két csillaglégkör sugárzási viszonyait meghatározó fizikai folyamatokon keresztül a komponensek közti árapály- és egyéb kölcsönhatások következményeiig, és a fenti felsorolás egyáltalán nem kimerítő.

A fentiek alapján talán meglepő, hogy annak ellenére, hogy Magyarországon a változócsillagok bizonyos típusai vizsgálatának nagy hagyományai vannak, a fedési kettőscsillagok tanulmányozása korábban nem került az érdeklődés középpontjába, noha észlelés- és műszertechnikai, valamint adatfeldolgozási szempontból nincs lényegi különbség egy fedési és egy pulzáló vagy foltos változócsillag földfelszíni megfigyelése között. Ez természetesen nem azt jelenti, hogy magyar kutatók korábban egyáltalán nem foglalkoztak volna fedési kettőscsillagokkal. Az első magyar észlelések még a változócsillagászat hőskorában, a XIX. század végén, az Ógyallai Csillagvizsgálóban megszülettek. Az obszervatórium Budapestre települését követően pedig, a második világháborúig bezárólag elsősorban Lassovszky Károly (1938–1943 között az intézet igazgatója) foglalkozott fedési kettőscsillagok megfigyelésével.¹ A második világháborút követően viszont a változócsillagászat ezen ága sajnálatos módon kevésbé hangsúlyosan képviseltette csak magát a hazai kutatási programokban. A legutóbbi negyedszázadot tekintve név szerint talán csak Patkós Lászlót, illetve a fiatalabb generáció tagjai közül Csizmadia Szilárdot lehetne kiemelni, akik (a történeti hűség kedvéért) az MTA Csillagászati Kutatóintézete keretén belül a legutóbbi időkig elsődlegesen a fedési kettőscsillagok kutatása terén működtek.

Ily módon, Magyarországon legalábbis, a fedési kettőscsillagok vizsgálata inkább a csillagászat kevés vidéki fellelővárában (Szegeden és Baján) lett jellemző. A bajai csillagvizsgálóban a profilváltást az 1980-as évek közepén odakerült két fiatal kutató, Nuspl János és Hegedüs Tibor kezdeményezte. A fő hangsúly kezdetben a relativisztikus apszismozgást mutató fedési kettősök (mind elméleti, mind gyakorlati) vizsgálatán volt, amely az én érkezésem kapcsán (az 1990-es évek első felében) egészült ki a harmadik kísérőt tartalmazó fedési rendszerek szisztematikus keresésével, amelyhez a matematikai, illetve szoftveres apparátust is az évek során magam építettem fel. A kezdetektől fogva mindannyiunk számára nyilvánvaló volt, hogy ha egy ilyen kis, háttér nélküli vidéki intézményben működve többet akarunk elérni, mint egyszerűen jó iparos munkát végezni, akkor a behatárolt technikai lehetőségek miatt inkább az elméleti kutatások terén kell újszerű megoldásokra, eredmé-

¹Minderről Szeidl Béla ír a Detre László születésének centenáriuma kapcsán rendezett konferencián tartott áttekintő előadása nyomán (Szeidl, B., 1996, Commun. Konkoly Obs. N°. 104; <http://www.konkoly.hu/Mitteilungen/Mitt104/szeidl.html>)

nyekre törekednünk. Már e törekvés fényében született meg PhD-értekezésem, amelyben torzult komponenseket tartalmazó hierarchikus hármas rendszerek dinamikai viselkedését vizsgáltam az akkoriban elérhető kevés számú hasonló munkához képest új megközelítésben. E munka során fordult érdeklődésem a fedési kettőst tartalmazó kompakt hierarchikus hármas csillagrendszerekbeli rövid távú perturbációk okozta fedésiminimumidőpont-változások (ETV) analitikus leírása és ezek észlelési kimutatásának irányába. Röviddel az ez irányú kutatásaim eredményeit bemutató harmadik tanulmányom publikálása után a *Kepler*-űrtávcső szinte futószalagon kezdte el szállítani az általam megjósolt viselkedést mutató kompakt, hierarchikus hármas csillagrendszer-jelölteket, amelyek alkalmat adtak elméleti kutatási eredményeim gyakorlati alkalmazására is. Ezt, Saul A. Rappaport az MIT emeritus professzorának megkeresését követően magyar–amerikai együttműködés keretében végeztem el, a munka egyes fázisaiba ELTE-s doktorandusz hallgatóimat is bevonva. Az ezen a téren kifejtett munkásságom képezi a jelen doktori értekezés nagyobb részét.

A fedési kettőscsillagok vizsgálatának „legklasszikusabb” része a fedési fénygörbék analízise. Abban a megtiszteltetésben volt részem, hogy ennek a folyamatnak a csínját-bínját, illetve finom trükkjeit személyesen a fénygörbe-modellezés doyenjétől, a mind a mai napig a legszéleskörűbben használt, már csaknem fél évszázada folyamatosan fejlesztett WD-kód megalkotójától Robert E. Wilson professzortól tanulhattam, hiszen első tanulmányutam még 1996-ban, friss diplomásként a Floridai Egyetemre, hozzá vezetett. E tudásom igazi kamatoztatásának ideje szintén a közelmúltban jött el, hála a *Kepler*-űrtávcső példa nélkül álló folyamatos és ultraprecíz fotometriai méréseinek, amelyek különleges fedési kettős-, sőt triplán fedő hierarchikus hármascsillagok felfedezéséhez vezettek el. Ezek modellezése új, a modern kihívásoknak eleget tevő fénygörbeillesztő-eljárások és kódok kifejlesztését tette szükségessé. Az egyik első ilyen kódot, Bob Wilson munkásságára alapozva, magam fejlesztettem ki, és az elmúlt években több (nem csak *Kepler*-) fedési rendszerre is alkalmaztam. Ezek közül e dolgozatban a fénygörbevizsgálatot az új kóddal három, a *Kepler*-űrtávcső által megfigyelt fedési rendszerre mutatom be.

Az általam feldolgozott témák így, habár bírnak némi hazai előzménnyel, mégis inkább hiánypótlóknak tekinthetők a változócsillag-kutatás magyarországi palettáján, és úgy gondolom, túlzás nélkül állíthatom: annak nemzetközi viszonylatban is jelentős kiterjesztését képezik.

2. Célkitűzések

2.1 A téma jelentősége, aktualitása

Az új évezred első évtizede a változócsillagászati és benne a fedési kettőscsillagokkal kapcsolatos kutatások új reneszánszát hozta. Mindez elsősorban az űrfotometria térhódításának, másodsorban a nagy, hosszú távú, földfelszíni fotometriai égboltfelméréseknek köszönhető. A korábban soha nem látott pontosságú fénygörbék az űrfotometria oldaláról, illetve a sok év hosszúságú, viszonylag egyenletesen és sűrűn mintavételezett adatsorok elsősorban a földfelszíni égboltfelmérések, de némi engedménnyel még a *Kepler*-űrtávcső részéről is, számos új, nem várt (vagy éppen várt, de korábban nem kimutatható) értelmezésre, modellezésre váró jelenség felfedezéséhez, felismeréséhez vezettek, illetve a különféle statisztikai vizsgálatokhoz felhasználható minták elemszámának ugrásszerű növekedését hozták.

Ezzel egyidejűleg a kettőscsillag-populációkkal kapcsolatos elméleti, illetve észlelési, statisztikai vizsgálatok szintén az ezredfordulóhoz közeledve vezettek el egyre erősebben annak a sejtésnek a megfogalmazásához, hogy a szoros kettőscsillag-rendszerek létrejöttéhez valószínűleg szükség van egy harmadik, távolabbi komponensre is, amelynek természetesen

most is ott kell keringenie a szoros kettős körül. A szoros kettősök hármasszerbeli eredete azért is az érdeklődés középpontjába került, mert evolúciós vizsgálatok megmutatták, hogy szoros hármasszer alkotó csillagok életének fejlődési végállomása még változatosabb lehet, mint a kettőscsillagok esetében, és így a hármasság erősen befolyásolhat egyebek mellett olyan kozmológiailag alapvető fontosságú jelenséget is, mint például az Ia típusú szupernóvák kitörése.

2.2 A feladat ismertetése

A szoros kettőscsillagok legkönnyebben felfedezhető és tanulmányozható alcsoportját a fedési kettősök alkotják. Ezen objektumok fotometriailag legkönnyebben mérhető paramétere a fedési fényváltozás (továbbiakban: minimum) maximális fázisának az időpontja. Ezen időpontok hosszú időtartamon keresztül végzett mérésével a fedési kettős periódusa, illetve annak változásai kimutathatók. A dolgozat első felét kitevő elméleti kutatások során azt vizsgáltam, hogy a fedési kettőscsillag minimumidőpontjainak változását (eclipse timing variation – ETV), amelyet az $O - C$ (observed minus calculated) diagramon szemléltetünk, miképpen befolyásolja egy a kettőscsillag körül, jóval távolabb keringő harmadik objektum gravitációs zavaró hatása.

Míg a távolabbi, harmadik komponens okozta pusztán geometriai fényidőeffektus (Light-Travel Time Effect – LTTE) ETV-re gyakorolt hatását több mint egy évszázada vizsgálják különböző szerzők, köztük már szakdolgozatotól [12,13] kezdve én magam is, és számtalan harmadik komponens létét valószínűsítették is ily módon, a harmadik kísérő okozta tényleges gravitációs perturbációk következtében fellépő, dinamikai ETV jelenségét minimális előzmények után, egy egyszerűsített modell (körpályán keringő belső, fedési kettős esetére) elsőként én tárgyaltam, még PhD-értekezésem keretén belül [14,15]. Az analitikus modell gyakorlati alkalmazhatóságának ideje azonban részben a CoRoT-, de elsősorban a *Kepler*-űrtávcsövek működésének köszönhetően jött el. A földfelszíni észlelések ugyanis főként a legrövidebb keringési idejű fedési kettősök felfedezésének kedveznek, ezek esetében viszont a dinamikai ETV amplitúdója általában túl kicsi ahhoz, hogy kimutatható effektust okozzon. Az űrfotometriai mérések ugyanakkor kedveznek a hetes, hónapos vagy akár még hosszabb keringési idejű fedési kettősök felfedezésének is, ahol viszont a dinamikai ETV amplitúdója akár az órás nagyságrendet is elérheti (arról nem is szólva, hogy a nagy pontosságú és homogén űrfotometriai mérések sokkal pontosabb fedésiminimumidőpont-meghatározást tesznek lehetővé, jelentősen javítva ezáltal az $O - C$ görbék jel/zaj arányát, és növelve a kis amplitúdójú jelenség detektálásának valószínűségét). Ugyanakkor, a hosszabb periódusú fedési kettősök egyre nagyobb hányada mozog excentrikus pályán. Ezt felismerve (Csizmadia Szilárd ösztönzésére) korábbi analitikus modelletem kiterjesztettem excentrikus pályán keringő fedési kettősök esetére is, ezáltal a hierarchikus hármasszerrendszerek minden lehetséges konfigurációjára érvényes analitikus formulához jutottam. Az így előre jelzett, helyenként egészen extrém alakú ETV-eket a dolgozat második felében már a *Kepler*-űrtávcső által megfigyelt egyes excentrikus fedési kettősök tényleges ETV-görbéiként látjuk majd viszont.

Analitikus vizsgálataimat azonban nem csupán elméleti érdeklődés motiválta, és nemcsak annak a megmutatása, hogy milyen jellegű és milyen amplitúdójú ETV-k mögött kell harmadik komponens gravitációs hatását gyanítanunk, hanem egy ennél sokkal ambíciózusabb cél inspirált, nevezetesen az inverz probléma megoldása, azaz a dinamikai és fényidőeffektusok kombinált hatását mutató ETV-kból az analitikus formulán alapuló numerikus paraméteroptymalizációs-eljárással a hármasszerrendszerek térbeli geometriai és dinamikai konfigurációjának a meghatározása (beleértve olyan alapvető állapothatározót is, mint a tömeg). Az inverz probléma megoldására kifejlesztett kóddal sikeresen el is végeztem

több mint kétszáz, az eredeti *Kepler*-mezőben megfigyelt fedési kettőscsillag harmadiktest-nyanús $O - C$ görbéjének analízisét, amely az egyedi rendszerek paramétereinek meghatározásán felül statisztikailag szignifikáns vizsgálatokat is lehetővé tett.

Analitikus ETV vizsgálataimat egy másik irányban is kiterjesztettem. A klasszikus árapály-kölcsönhatásból származó perturbáló erőket is figyelembe véve (vagyis a klasszikus háromtest-probléma kereteit meghaladva) azt vizsgáltam, hogy a harmadik test okozta dinamikai perturbációk, illetve a csillagok torzultságából származó további járulékok kölcsönhatása hosszabb időskálán miként befolyásolja a kettős rendszer dinamikai, illetve az észlelésekből meghatározható apszizmozgási periódusát, illetve pillanatnyi apszizmozgási periódusát. Ezzel a vizsgálattal azt kívántam tanulmányozni, hogy az egyes excentrikus fedési kettősökben megfigyelt rendellenesen lassú apszizmozgási ráta magyarázható-e, és ha igen, milyen feltételek mellett, egy harmadik komponens zavaró hatásával.

A dolgozat utolsó két fejezetében a *Kepler*-űrtávcső által megfigyelt két fedési kettőscsillag komplex analízisét mutatom be, a hangsúlyt elsősorban az űrfotometriai adatsoron végzett fedésifénygörbe-modellezésre helyezve. A *Kepler*-adatok modellezése a rendkívüli fotometriai pontosság miatt eleve komoly kihívást jelent, s például megköveteli a hagyományos fénygörbekódok mögött álló fizikai modell kiterjesztését, hiszen például itt már szükség van a relativisztikus Doppler-nyalábolás figyelembevételére is, amely a korábbi, földfelszíni fotometriai adatsorok elemzésénél nyugodtan figyelmen kívül hagyható volt. A leglátványosabb és legtöbb haszonnal kecsegtető modellezendő jelenséget a külső komponens részvételével bekövetkező tripla, extra vagy külső fedések szolgáltatják, amelyek segítségével, tisztán geometriai úton, a hármas rendszer teljes geometriai konfigurációja, valamint számos dinamikai paramétere is meghatározhatóvá vált.

3. Alkalmazott vizsgálati módszerek

A dolgozat első felében elméleti kutatásaimat ismertetem. Analitikus számításaim során az égi mechanikai perturbációszámításban megszokott eljárásokat alkalmaztam. A felmerülő sorfejtések együtthatóiban megjelenő függvények alakját időt és sok (az esetleges számolási hibák miatti) bosszúságot megelőzendő általában a Maplesoft által forgalmazott XMaple matematikai szoftverrel számítottam ki. Az eredményül kapott analitikus formulák tesztelésére, valamint a direkt és indirekt problémákban való alkalmazására magam fejlesztettem C programokat. Az analitikus megoldások numerikus integrálással való összevetésénél minden esetben a PhD-értekezésem keretében kifejlesztett Runge–Kutta–Nystrom-alapú numerikus integrátor kódot használtam.

Az értekezés második felében a *Kepler*-űrtávcső korábban soha nem látott pontosságú fotometriai adatsorait használtam. Minden esetben már mások által előfeldolgozott adatsorokkal dolgoztam. Az átfogó ETV-analízis során a *Kepler* Fedési Kettős Katalógus² honlapjáról töltöttem le az előfeldolgozott adatsort, míg a HD 181068, illetve HD 183648 rendszerek (időben korábbi) vizsgálata során a szerzőtársaktól kaptam az instrumentális effektusoktól megtisztított fénygörbéket.

A kutatás érdemi részében aztán ezen előfeldolgozott fénygörbékből az analízishez szükséges információk kinyerését már én oldottam meg az adott problémára írott C-nyelvű szubrutinokkal és programokkal. E rutinok magukban foglalnak egyebek között frekvenciakezeső, diszkrét Fourier-transzformációt megvalósító algoritmust, lineáris, illetve nemlineáris legkisebb négyzetes illesztési eljárásokat (rögzített frekvenciájú Fourier-polinomok együtthatóinak keresése; algebrai simítópolinomok, illetve szintén algebrai minimum/maximum sablonpolinomok illesztése stb.), illetve „bootstrap” eljáráson alapuló hibabecslést.

²<http://keplerebs.villanova.edu/>

Az adatsorok elemzésének utolsó lépése az indirekt probléma, azaz a mérési adatsorra legjobban illeszkedő elméleti görbe paramétereinek meghatározása. Dolgozatomban az indirekt problémát radiálissebesség-, $O - C$ (vagy ETV), illetve fénygörbék vizsgálatánál alkalmazom. A radiálissebesség-görbék esetében az irodalomban elérhető, jól ismert analitikus formula alapján keresem az illeszkedést, az ETV esetében a függvénykapcsolat analitikus formáját is e dolgozat keretében határozom meg, míg a fénygörbék esetében (részben újszerű) numerikus módszerekkel hozom létre az elméleti görbét. Mindazonáltal az közös mindezekben a vizsgálatokban, hogy a paraméterkereső, -illesztő szoftver szintén saját fejlesztés, amelyek az ismert numerikus paraméteroptimalizálási módszerek közül a nemlineáris legkisebb négyzetek módszerét megvalósító Levenberg–Marquardt-algortimust, valamint a rácskereséses („grid-search”) algoritmusokat használják.

Új tudományos eredmények

1. Éves, évtizedes időskálájú fedésiminimumidőpont-változások analitikus vizsgálata hierarchikus hármas rendszerekben

- Elvégeztem a hierarchikus hármas csillagrendszerben keringő, a harmadik komponens gravitációs perturbációinak alávetett szoros, fedési kettőscsillagok fedésiminimumidőpont-változásainak analitikus leírását. Számításaim során a három égitestet tömegpontnak tekintve, az égimechanikai „sztelláris háromtest-probléma” keretein belül, a tág kettős P_2 keringési idejének megfelelő időskálán fellépő fedésiminimum-változásokra koncentráltam. A szakirodalomban korábban elérhető addigi legteljesebb (szintén általam, még PhD-értekezésem keretében kidolgozott), csak körpályán keringő fedési kettősök esetére érvényes modellt jelentősen továbbfejlesztve, az új analitikus formula excentrikus pályán mozgó fedési kettősökre is érvényes, azaz a hierarchikus hármas csillagrendszerek teljes paraméterterén alkalmazható. Továbbá, míg a korábbi, egyszerűbb modell csak a másodrendű (kvadrupól) perturbációkat vette figyelembe, az analitikus leírást kiterjesztettem a harmadrendű perturbációs komponensekre is. Ezenfelül a rövid, $\sim P_1$ időskálájú perturbációknak a fedési kettős egy periódusára vett átlagolásából származó további (a másodrendű perturbációk rendjéig meghatározott) járulékát is figyelembe vettem. Ez utóbbi két kiterjesztés lehetővé tette, hogy a legkompaktabb hierarchikus hármas rendszerekre is alkalmazható formulákat kapjak.
- Megmutattam, hogy a fedésiminimumidőpont-változások alakjában és nagyságában mind a komponensek egymáshoz, mind a földi észlelőhöz viszonyított helyzete fontos szerepet játszik. Azaz, az analitikus formulában mind a dinamikai (a perturbációszámítási problémákban általánosan használt), mind pedig az észlelői (pl. asztrometriai) koordináta-rendszerben definiált szögpályaelemek is megjelennek. Megadtam továbbá olyan kiegészítő, szférikus geometriai összefüggéseket, amelyek lehetővé teszik a konverziót a dinamikai, illetve az észlelői rendszerbeli szögpályaelemek között, és ezáltal megteremtettem a lehetőséget arra, hogy a ténylegesen megfigyelt dinamikai fedésiminimumidőpont-változások segítségével egy hierarchikus hármas rendszer teljes térbeli konfigurációját, valamint a csillagok legfőbb dinamikai paramétereit (tömegek) meg lehessen határozni.
- Kimutattam, hogy a fedésiminimumidőpont-változásokat leíró formula szétválasztható egy az adott rendszer fizikai paramétereitől független, csak a pályák alakjától, illetve az egymáshoz, valamint az észlelőhöz viszonyított helyzetüktől függő (geometriai)

összetevőre, illetve egy gyakorlatilag csak a komponensek tömegarányától, illetve a periódusoktól (vagy fizikai pályaméretektől) függő komponensre. Ezáltal könnyen alkalmazható receptet adtam arra, hogy a hagyományos fényidőpálya-megoldások esetén miképpen becsülhető az általában elhanyagolt dinamikai járulékok mértéke anélkül, hogy ismernénk a rendszer tényleges geometriai konfigurációját.

- Megvizsgáltam a fedésiminimumidőpont-változások nagyságának, illetve alakjának függését a különböző szögpályaelemektől. Ezek különféle kombinációjának megfelelően a mintázat a kvázi-színuszostól a dupla-frekvenciás szinuszos alaktól az EKG-szerű tüskealakig terjedhet. Emellett a görbe (elsősorban a köztes inklinációtól függően) dőlhet balra, illetve jobbra is. Az amplitúdókat illetően a nagyobb excentricitások (a tüskéken felül) általában nagyobb amplitúdót eredményeznek. Ennél várhatóan a köztes inklinációtól való függés: közepes köztesinklináció-értékek esetében az amplitúdó jelentősen lecsökken az egysíkú, illetve a merőleges konfigurációjú rendszerek amplitúdójához képest. Az általam e vizsgálatokhoz analitikusan és numerikusan generált $O - C$ görbék mintázatát a későbbiekben a *Kepler*-úrtávcső tényleges észleléseinek feldolgozása során láttuk viszont. E mintázatokat a *Kepler*-űrprogram egyes vezető kutatói azóta is informálisan esetenként „*Borkovits wiggle*”-ként emlegetik.³
- Az általam kapott analitikus formula változtatás nélkül alkalmazható a központi csillaga előtt átvonuló, Naprendszeren kívüli bolygó és egy távolabbi harmadik komponens esetében is, feltéve, hogy a három égitest dinamikailag kielégíti a hierarchikus-hármas-közelítés feltételeit. Megvizsgáltam, hogy két konkrét, viszonylag hosszú periódusú, excentrikus pályán mozgó exobolygó (CoRoT-9b, HD 80606b) esetében milyen feltételek mellett lenne kimutatható további bolygókísérő. Ennek során megmutattam, hogy minden központi csillag-exobolygó relációban, amennyiben az exobolygó periódusa, illetve a központi csillag tömege ismert, a további kísérő (bolygó) okozta tranzitidőpont-változások várható amplitúdója egyszerűen a külső objektum tömegének és keringési periódusának m_{p2}/P_2 arányától függ.

A tézispontokhoz kapcsolódó publikációk: [1], [2]

2. Az apszismozgás és a fedésiminimumidőpont-változások évszázados időskálájú analitikus vizsgálata torzult komponenseket tartalmazó hierarchikus hármas rendszerekben

- A tömegponti közelítést meghaladva, de továbbra is az analitikus perturbációszámítás eszközeivel, azt vizsgáltam, hogy az árapály-kölcsönhatás, illetve a gyors tengelyforgás következtében nem szférikus tömegeloszlású szoros kettőscsillagok és egy körülöttük távolabbi keringő harmadik komponens gravitációs perturbációinak eredőjeként miként változnak a szoros, fedési kettős pályaelemei. Az általam követett eljárás két ponton is újszerű. Egyrészt, tudomásom szerint elsőként vettem figyelembe, és számítottam ki mind analitikusan, mind numerikusan az árapály-torzultság, illetve a harmadiktest-perturbációk egyidejű, egymással szorosan összefüggő hatását, mégpedig rövid (évtizedes, évszázados) kvantitatív eredményeket is megadva. Másrészt, a hármas rendszernek az egyidejűleg vizsgált, egymással kölcsönható perturbációk következtében fellépő rövid távú dinamikai fejlődését mindvégig összekötöttem annak a vizsgálatával, hogy e változások miként nyilvánulnak meg a földi észlelő által, a perturbációk időskálájához képest jelentősen rövidebb időtartamon megfigyelhető,

³<https://www.astro.up.pt/investigacao/conferencias/toe2014/files/wwelsh.pdf> – a 21. és 24. diákon.

mérhető, számolható mennyiségekben. Különös hangsúlyt fektettem arra a kérdésre, vajon ezen a módon magyarázható-e az egyes fedési kettősökben megfigyelhető, rendellenesen lassú apszismozgás rejtélye.

- Kimutattam, hogy magas kölcsönös pályahajlások esetében, a szoros kettős pályael-lipszisének az invariábilis síkhoz viszonyított helyzete függvényében az apszismozgási periódus hossza jelentősen megnövekedhet a klasszikus esethez képest. Ugyanakkor megerősítettem azt a korábban ismeretes eredményt is, hogy 30° -nál kisebb relatív pályahajlások esetén a harmadik komponens jelenléte minden esetben gyorsítja az apszismozgás szögsebességét.
- Először hívtam fel a figyelmet a dinamikai és a mérhető apszismozgási ráta, és így az ezekből interpolált apszismozgási periódusok jelentős különbségére, valamint ki-mutattam, hogy a dinamikai apszismozgás librációs komponense miatt, különösen magas köztes inklinációk esetén, a pillanatnyi apszismozgási rátából interpolált apszismozgási periódus téves eredményt adhat.
- Megmutattam, hogy amennyiben a szoros, illetve a tág kettős pályasíkjai az égbolt síkja közelében metszik egymást, a hagyományos módon, a fő- és mellékminimumok különbségéből interpolálható apszismozgási periódus minden esetben jóval nagyobb-nak fog adódni a ténylegesnél.
- Eredményeim numerikus szemléltetésére az AS Camelopardalis rendellenesen lassú apszismozgású kettőst választottam, és megmutattam, hogy egy 2-3 éves keringési idejű harmadik csillag anélkül is okozhatja a lassúnak mért apszismozgási rátát, hogy más észlelésekkel ki lehetne mutatni.

A tézispontokhoz kapcsolódó publikációk: [3], [4]

3. Űrfotometriai adatsorokban megfigyelhető extrém jelenségek modelle-zése, az inverz probléma megoldása

- Olyan szoftvercsomagot fejlesztettem ki a fedési kettőscsillagok fedésiminimumidő-pont-változásainak analíziséhez, amely minden korábban használnál jelentősen össze-tettebb fizikai modellen alapszik. A kód egyszerre képes kezelni harmadik komponens okozta fényidő-effektust és különböző időskálájú dinamikai perturbációkat, valamint a klasszikus apszismozgást, a pályasík precesszióját, illetve további, akár fizikai, akár látszólagos periódusváltozások hatásait. A szoftvercsomag lehetővé teszi, hogy az in-verz probléma alkalmazásával – ideális esetben – egy hármas rendszernek mind a teljes térbeli konfigurációját, mind pedig az azt alkotó komponensek tömegeit is meghatá-rozzuk. A programot számos *Kepler*-rendszerre alkalmaztam, a kapott eredmények megbízhatóságát azon rendszerek esetére, ahol ez egyéb, független spektroszkópiai, fotometriai megfigyelésekkel lehetséges volt, demonstráltam.
- Kifejlesztettem egy fénygörbe-szintetizáló, -illesztő kódot is, amely alkalmas a nagy pontosságú űrfotometriai fénygörbékben megfigyelhető, korábban nem látott fizikai, il-letve geometriai jelenségek modellezésére is. Ily módon, a korábban a fedésifénygörbe-modellezésben sztenderdnek tekinthető programok képességeit meghaladva a prog-ramba beépítettem a Doppler-nyalábolás jelenségét, valamint fő újdonságként a külső vagy extra fedések bonyolult geometriájának modellezését. (S ezzel együtt, a harma-dik komponens mozgásának modellezésével természetesen a fényidő-effektus fény-görbére gyakorolt hatása is megjelenik a modellfénygörbékben.) Ezenfelül beépítettem

egy, a csillagpulzációból, illetve az esetleges kromoszférikus aktivitásból származó további fényváltozások egyidejű modellezéséhez szükséges matematikai (nem fizikai!) eljárást is. A módszert sikeresen alkalmaztam számos különféle esetben, a *Kepler* trip-lán fedő hármas rendszereitől fedéseket nem mutató, pulzáló komponens tartalmazó szívdobbantó *CoRoT*-kettősig. (Ez utóbbi vizsgálat nem képezi téziseim részét.)

A tézispontokhoz kapcsolódó publikációk: [2], [5]

4. Fedési kettősök fedésiminimumidőpont-változásainak (ETV) kvantitatív analízise

- Az eredeti *Kepler*-mezőben felfedezett több mint két és fél ezer fedési kettős, illetve ellipszoidális változó fedésiminimum-időpontjait analízálva, olyan új eljárásokat vezettem be (részben mások ötleteit továbbgondolva), amelyek segítségével az $O-C$ -diagramokat eredményesen megtisztítottam a folt- és pulzációs aktivitás okozta zavaró és esetenként tévesen harmadik komponens nyomának vélt jelektől. Ahol lehetséges volt, bevontam a kvadratúrabeli fényességmaximum-időpont változásait is a vizsgálataimba, és ezáltal további, szigorúbb kritériumokat állítottam fel arra nézve, hogy mikor valószínűsíthető egy periodikus $O-C$ -diagram esetén a harmadik test jelenléte.
- A harmadiktest-gyanús rendszerek $O-C$ -it komplex analízisnek vetettük alá, elsőként alkalmazva ilyen vizsgálódásokban a fényidőeffektus mellett a dinamikai perturbációk általam kifejlesztett analitikus modelljét (1. tézispont) is. 222 esetben találtunk bizonyítékot arra, hogy a fedési kettős nagy valószínűséggel hierarchikus hármas rendszer tagja. Közülük 60 kettős esetében kombinált, mind fényidőeffektust, mind dinamikai perturbációkat figyelembe vevő ETV-megoldást adtam. E 60 rendszerre a hármas rendszer teljes térbeli elrendeződését, illetve a tömegeket is meghatároztam. További 160 esetben az $O-C$ -t a klasszikus fényidőeffektussal modelleztem, s ennek megfelelően ezeknél a hármas rendszereknél csak kevesebb rendszerparaméter sikerült meghatározni. További nyolc esetben megmutattam, hogy az ETV ugyan kétségtelenül fényidőeffektussal magyarázható, azonban az $O-C$ forrását tévesen klasszifikálták kettősnek.
- Az általunk elemzett 222 rendszerből 104 külső periódusa rövidebb mint 1000 nap, noha korábban ilyen rövid külső periódusú hármas rendszerekből alig néhány volt ismert, azaz szignifikánsan növeltük ezek mintáját. Hasonlóképpen, többszörösére (legalább négyszeresére) növeltük azon hármas rendszerek számát is, amelyekben ismerjük a szoros és tág pályák kölcsönös pályahajlását. Megmutattuk viszont, hogy érintkező kettősök esetében az 1:100-nál kisebb periódusarányú hármas rendszerek hiánya nem lehet észlelési effektus, hanem valószínűleg asztrofizikai (evolúciós) okai vannak. Azt találtuk, hogy noha a kölcsönös pályahajlásoknak lokális maximuma van a KCTF mechanizmusból jóslott $i_m \sim 40^\circ$ érték körül, azonban a $P_1 - i_m$ eloszlás nem követi az elmélet jóslatát.
- Három esetben a harmadik komponens valószínűleg cirkumbináris exobolygó. Két rendszer esetében ezzel a felfedezéssel más szerzők kissé megelőzték, de a KIC 07177553 esetében én közöltem először a felfedezést.
- Kilenc rendszerrel retrográd apszismozgást detektáltam.

- Egy korábbi, még nem *Kepler*-rendszereket vizsgáló munkánkban a BP Vulpeculae esetében viszont azt mutattam ki, hogy az irodalomban korábban közölt retrográd apszismozgás csak az adatsor rövidségéből származó téves eredmény. A 45 évnyi további minimumidőpont-adattal kibővített $O - C$ görbéből szokványos, a keringési iránnyal megegyező apszismozgást mutattam ki, és ebből, a relativisztikus járulék levonása után, meghatároztam a fedési kettős „átlagolt” belső szerkezeti állandóját is.
- Egy másik korábbi munkánkban pedig öt A8 és G5 szinképtípus közé eső komponenseket tartalmazó érintkező (W UMa típusú) fedési kettős 50–100 éves hosszúságú ETV-it vizsgálva az ötből négy, konvektív csillagokat tartalmazó kettős (AB And, OO Aql, V566 Oph, U Peg) esetében közvetett bizonyítékot találtunk 18–20 éves, az elméleti jóslatokkal összhangban álló mágneses ciklusok jelenlétére. Korábban ez a viselkedés késői komponenseket tartalmazó Algol típusú rendszerekre ugyan már ismert volt, érintkező kettősök esetében viszont egyetlen rendszert leszámítva ez az első sikeres detektálás.

A tézispontokhoz kapcsolódó publikációk: [2], [6], [7], [8], [9]

5. Egyedi Kepler-rendszerek kombinált vizsgálata

- Elvégeztem a triplán fedő HD 181068 (KIC 5952403) hierarchikus hármas rendszer komplex fénygörbe-, radiális sebesség-görbe- és ETV-analízisét. Az általam kifejlesztett fénygörbekóddal (3. tézispont) sikerrel modelleztem a külső fedések komplex szerkezetét, és ezáltal a hármas rendszer számos paraméterét, s megmutattam, hogy mind a szoros, mind a tág rendszer körpályán kering, amelyek relatív hajlásszöge kisebb mint 1° . (Dinamikai megfontolásokból viszont az egzakt koplanaritás is valószínűsíthető, és a retrográd keringés is kizárható.)
- Az ETV-görbén megfigyelhető fényidőeffektus, illetve az óriás főkomponens radiális sebesség-görbéjének vegyítésével újszerű módon meghatároztam a tág rendszer két komponensének vetített tömegét, majd ebből, a fénygörbemegoldás felhasználásával mindhárom csillag tömegét és méretét is megadtam.
- Hasonlóképpen, elvégeztem a marginálisan excentrikus HD 183648 (KIC 8560861) fedési kettős *Kepler*-fénygörbéjének és (részben általam és munkatársaim által Magyarországon mért) egyvonalas radiális sebesség-görbéjének, valamint ETV-jének összetett vizsgálatát, és meghatároztam a rendszer orbitális és asztrofizikai paramétereit, amelyeket azután a szerzőtársak által végzett kvantitatív spektrumanalízis felhasználásával több iterációs lépésben pontosítottunk. Sikeresen szétválasztottam a kettősségből, illetve a csillagpulzációkból adódó fényességváltozást, és megmutattam, hogy a fénygörbén megjelenő pulzációban megfigyelhető lebegésért felelős két pulzációs frekvencia közti távolság pontosan megfelel az orbitális frekvencia kétszeresének. Ily módon a pulzáció árapály-eredetéhez nem férhet kétség, ami egy ilyen tág ($P \sim 32$ nap) és csak egészen kis mértékben lapult ($e \sim 0,048$) kettős esetében váratlan eredmény.
- Kimutattam, hogy az ETV-n megjelenő periodikus változás a pulzációs és keringési periódus összemérhetőségéből fakadó hamis jel, nem pedig egy harmadik test okozta fényidő- (és/vagy dinamikai) effektus következménye. Ugyanakkor azt is megmutattam, hogy az úrfotometriai észlelések négy éve alatt a szoros kettős keringési periódusa kis mértékben folyamatosan nőtt. Az ETV-ből meghatároztam az apszismozgás periódusát is, ami kb. kilencszer rövidebbnek adódott, mint amekkorát a

relativisztikus, illetve klasszikus árapály-effektus alapján várnánk. Azonban az adat-sor rövideége miatt ebből jelenleg komoly következtetés még nem vonható le.

- A KIC 07177553 ETV analízise során valószínűsített nem fedő, cirkumbináris bolygó létét megerősítendő nemzetközi spektroszkópai észlelési kampányt szerveztem. A spektroszkópai észlelések arra a meglepő eredményre vezettek, hogy ez az objektum valójában két, paramétereiben nagyon hasonló kettőscsillag együttese, amelyek valószínűleg egy tág négyes rendszert alkotnak. Ez ugyan semmi esetre sem zárja ki az ETV-ben detektált 529 nap periódusú cirkumbináris bolygó létezését, azonban még nehezebbé teszi a felfedezés spektroszkópai úton való megerősítését. Viszont elvégeztük a négyes rendszer teljes körű vizsgálatát. A fedési kettősre kapott spektroszkópai adatok, illetve a *Kepler*-fénygörbe analízise alapján azt találtam, hogy az így, független forrásból meghatározott pálya- és dinamikai paraméterek a fedési kettős esetében összhangban vannak az ETV-megoldásból kapottal. Ez egyben azt is jelenti, hogy ha az ETV-mintázatért felelős 529 napos keringési idejű objektum tényleg létezik, az a tömege alapján biztosan óriásbolygó.

A tézispontokhoz kapcsolódó publikációk: [5], [10], [11]

4. A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

1. **Borkovits, T.**, Csizmadia Sz., Forgács-Dajka E., Hegedüs T., 2011, *Transit timing variations in eccentric hierarchical triple exoplanetary systems. I. Perturbations on the time scale of the orbital period of the perturber*, Astronomy & Astrophysics, 528, A53
2. **Borkovits, T.**, Rappaport, S., Hajdu, T., Sztakovics, J., 2015, *Eclipse timing variation analyses of eccentric binaries with close tertiaries in the Kepler field*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 448, 946
3. **Borkovits, T.**, Forgács-Dajka, E., Regály, Zs., 2005, *The combined effect of the perturbations of a third star and the tidally forced apsidal motion on the O-C curve of eccentric binaries*, in: Tidal Evolution and Oscillations in Binary Stars: Third Granada Workshop on Stellar Structure, ASP Conference Series, Vol. 333, Proceedings of the conference held 16-18 May, 2004 in Granada, Spain. Edited by A. Claret, A. Giménez and J.-P. Zahn
4. **Borkovits, T.**, Forgács-Dajka, E., Regály, Zs., 2007, *Tidal and rotational effects in the perturbations of hierarchical triple stellar systems. II. Eccentric systems – the case of AS Camelopardalis*, Astronomy & Astrophysics, 473, 191
5. **Borkovits, T.**, Derekas, A., Kiss, L. L., Király, A., Forgács-Dajka, E., Bóró, I. B., Bedding, T. R., Bryson, S. T., Huber, D., Szabó, R., 2013, *Dynamical masses, absolute radii and 3D orbits of the triply eclipsing star HD 181068 from Kepler photometry*, Monthly Notices of Royal Astronomical Society, 428, 1656
6. Rappaport, S., Deck, K., Levine, A., **Borkovits, T.**, Carter, J., El Mellah, I., Sanchis-Ojeda, R., Kalomeni, B., 2013, *Triple-star Candidates among the Kepler Binaries*, The Astrophysical Journal, 768, 33
7. **Borkovits, T.**, Hajdu, T., Sztakovics, J., Rappaport, S., Levine, A., Bóró, I. B., Klagyivik, P. 2016, *A comprehensive study of the Kepler triples via eclipse timing*, Monthly Notices of Royal Astronomical Society, 455, 4136

8. **Borkovits, T.**, Elkhateeb, M. M., Csizmadia, Sz., Nuspl, J., Bíró, I. B., Hegedüs, T., Csorvási, R., 2005, *Indirect evidence for short period magnetic cycles in W UMa stars. Period analysis of five overcontact systems.*, Astronomy & Astrophysics, 441, 1087
9. Csizmadia, Sz., Illés-Almár, E., **Borkovits, T.**, 2009, *On the apsidal motion of BP Vulpeculae*, New Astronomy, 14, 413
10. **Borkovits, T.**, Derekas, A., Fuller, J., Szabó, Gy. M., Pavlovski, K., Csák, B., Dózsa, Á., Kovács, J., Szabó, R., Hambleton, K. M., Kinemuchi, K., Kolbas, V., Kurtz, D. W., Maloney, F., Prša, A., Southworth, J., Sztakovics, J., Bíró, I. B., Jankovics, I., 2014, *HD 183648: a Kepler eclipsing binary with anomalous ellipsoidal variations and a pulsating component*, Monthly Notices of Royal Astronomical Society, 443, 3068
11. Lehmann, H., **Borkovits, T.**, Rappaport, S. A., Ngo, H., Mawet, D., Csizmadia, Sz., Forgács-Dajka, E., 2016, *KIC 7177553: A Quadruple System of Two Close Binaries*, The Astrophysical Journal, 819, 33

5. A tézisfüzetben említett egyéb tudományos közlemények

12. **Borkovits, T.**, 1994, *19 fedési kettőscsillag fedési minimumidőpont változásainak vizsgálata*, Szakdolgozat, ELTE
13. **Borkovits, T.**, Hegedüs, T., 1996, *A search for possible unresolved components in eighteen eclipsing binaries*, Astronomy & Astrophysics Suppl. Ser., 120, 63
14. **Borkovits, T.**, 2002, *A forgási-, illetve az árapálytorzultság hatása a hierarchikus hármas csillagrendszerek dinamikai evolúciójára*, PhD-disszertáció, ELTE Fizika Doktori Iskola, BKKM Önk. Csillagvizsgáló Intézete, Baja, 2002
15. **Borkovits, T.**, Érdi, B., Forgács-Dajka, E., Kovács, T., 2003, *On the detectability of long period perturbations in close hierarchical triple stellar systems*, Astronomy & Astrophysics, 398, 1091