

Bírálat

Borkovits Tamás:

*A fedési kettős és többes csillagrendszerek
vizsgálatának járatlan útjain*

című akadémiai doktori értekezéséről

Témaválasztás

Az értekezés témája időszerű, és a jelölt külön szerencséje, hogy a múlt évezred utolsó dekádjában figyelme éppen a fedési kettősök felé fordult, hiszen nem sejtette, hogy két évtized múlva már két űrtávcső, a CoRoT és a Kepler is fürkészni fogja az eget. A Kepler-űrtávcső több mint 150 000 fősorozati csillag fényességét méri 10 mikromagnitúdós pontossággal. Az értekezésben ismertetett elméleti kutatások gyakorlati alkalmazhatóságára és ellenőrzésére ezen űrtávcsövek nélkül nem lett volna lehetőség.

A fedési kettősök a szoros kettőscsillagok jól detektálható részét képezik, hiszen fotometriailag könnyen mérhető paraméterük a fedési fényváltozás legnagyobb fázisának időpontja. A fedési kettősök asztrofizikai jelentőségét az adja, hogy lehetőséget nyújtanak a komponensek tömegének és sugarának pontos meghatározására, sőt gondos megfigyelésük a csillagok belső szerkezetére és tömegeloszlására vonatkozóan is információval szolgálnak. A szerző a hierarchikus hármas rendszerek¹ modelljét választva elméleti kutatásokat végzett, hogy a fedési fényváltozások időbeli fejlődését analitikusan előrejelezze. A kutatásokat mindvégig kiegészítette gondos numerikus vizsgálatokkal is, hogy az analitikus eredményeket folyamatosan ellenőrizhesse és, hogy az egyenletek pontos megoldásával is szolgálhasson. A szerző kutatásai tehát alapvető csillagászati kérdések vizsgálatára irányultak és az eredményeket a legfejlettebb technológia felhasználásával vetette össze.

Az értekezés tartalmi ismertetése

A doktori mű a hierarchikus hármas rendszert két modell keretein belül vizsgálja: *(i)* tömegponti közelítés, *(ii)* a szoros kettős komponensei kiterjedtek, alakjukat az árapály-kölcsönhatás, a forgásból fakadó torzultság mellett a harmadik, továbbra is pontszerűnek tekintett test gravitációs vonzása együttesen alakítja. Ezen két modell analitikus leírásával a szerző a következő problémákat teszi vizsgálat tárgyává: *(i)* éves, évtizedes időskálájú fedésiminimumidőpontváltozások (az angol eclipse timing variation kifejezés után ETV) analitikus vizsgálata, *(ii)* az apszismozgás és az ETV évszázados időskálájú analitikus vizsgálata nem gömb alakú komponenseket tartalmazó hierarchikus hármas

¹Egy hierarchikus hármas csillagrendszer úgy fogható fel, mintha két kettőscsillagból állna: az egyik kettős (továbbiakban szoros vagy belső kettős) a két egymáshoz közelebbi csillagból áll, míg a másikat (továbbiakban táv vagy külső kettős), a távolabbi, a harmadik komponens és a szoros kettős tömegközéppontja alkotja.

rendszerekben (*iii*) űrfotometriai adatsorokban megfigyelhető jelenségek modellezése, az inverz probléma megoldása (*iv*) fedési kettősök ETV görbéinek kvantitatív analízise és (*v*) speciális viselkedést mutató, a Kepler-űrtávcsővel felfedezett hierarchikus hármas-rendszerek kombinált vizsgálata.

A 200 oldal terjedelmű mű 7 fejezetből és 3 függelékből áll, tartalmát tekintve két fő részre, egy elméleti (2. és 3. fejezet) és egy gyakorlati részre (4., 5. és 6. fejezet) tagolható. Az 1. fejezet alapvetően bevezető jellegű, mely a fedési kettőscsillagokkal és hierarchikus hármas csillagrendszerekkel kapcsolatos elméleti tudnivalókat foglalja össze. A következő két fejezet a szerző elméleti vizsgálatait részletezi.

A 2. fejezetben a tömegponti közelítést alkalmazva egy, a fedési kettős körül keringő harmadik komponens gravitációs perturbációi által okozott ETV analitikus leírását tárgyalja az égi mechanika perturbációszámítási módszerei felhasználásával. A szerző először a hosszú periódusú, azaz a tág kettős P_2 keringési idejével összemérhető időskálájú perturbációkat vizsgálta. Az ETV-t megadó Δ_{L1} mennyiségre az eredményt először a ρ_1/ρ_2 kis paraméter másodrendjéig figyelembe véve vezeti le, ahol ρ_1 és ρ_2 az első két Jacobi-vektor hossza. A Kepler-űrtávcső által végzett mérések vizsgálata során kiderült, hogy bizonyos esetekben indokolt a harmadrendű tagok figyelembevétele is, amit a Δ_{L2} -re levezetett mennyiség tartalmaz. A mérések és az elmélet további gondos összehasonlítása során a szerző azt tapasztalta, hogy a kielégítő modellezéshez a harmadrendű perturbációk kiszámításán túl szükséges a rövid, azaz a szoros kettős P_1 periódusú perturbációinak bizonyos szintű figyelembevétele. Ezt az eredményt a Δ_S -re adott kifejezésbe foglalja. A fejezetet az eredmények diszkussziója és pontokba szedett összefoglalója zárja. A 2.2 ábra bemutajta a fényidőeffektusból, illetve a dinamikai perturbációkból származó ETV nagyságrendi viszonyait, támpontot nyújtva, hogy milyen pálya periódusok mellett számíthatunk egyáltalán egyik vagy másik jelenség, és így harmadik komponens felfedezésére. Az ETV-re levezetett formulák változatlan formában használhatók exobolygórendszerekre is, feltéve, hogy hierarchikus rendszert alkotnak. A szerző megmutatta, hogy az analitikus, illetve numerikus integrálásokkal generált ETV-k még 0,9 feletti excentricitások, illetve egymásra merőleges pályasíkok esetén is kielégítő pontosságú eredményeket adnak.

A 3. fejezet ismerteti az árapály-kölcsönhatás, illetve egy harmadik komponens gravitációs perturbációinak eredő hatását excentrikus pályán keringő szoros kettőscsillagok pályafejlődésére. A vizsgálatok két innovatív elemet tartalmaznak: az analitikusan (és numerikusan) számolt árapálytorzultság, illetve a harmadik test perturbációinak szimultán, egymással szorosan összefüggő hatásának számbavétele, és annak modellezése, hogy e változások miként jelennek meg a földi észlelő által megfigyelhető és számolható mennyiségekben. Itt szeretném kiemelni, hogy ilyen számításokat a szerző elsőként végzett. A pályaelemekre felírt perturbációs egyenletek megoldását a fokozatos közelítések módszerének egy speciális alkalmazásával adja meg. Megmutatta, hogy jelentős kölcsönös pályahajlások esetében, az apszismozgási periódus hossza jelentősen megnövekedhet a klasszikus esethez képest. Elsőként ismerte fel a becsült ap-

szismozgási periódusok között mutatkozó jelentős különbséget, valamint azt, hogy a pillanatnyi apszismozgási rátából számolt apszismozgási periódus téves eredményre vezethet. Az eredmények bemutatására az AS Camelopardalis rendellenesen lassú apszismozgású kettős esetén megmutatta, hogy egy néhány éves keringési idejű harmadik csillag okozhatja a lassúnak mért apszismozgási rátát.

A három fejezetet tartalmazó második rész a doktori első részében ismertett analitikus eredmények gyakorlati alkalmazását demonstrálja.

A 4. fejezet részletesen tárgyalja a fedésiminimumidőpont-változások matematikai alakját és a modellezésére kidolgozott szoftvercsomagot, mely képes az inverz probléma megoldására is, azaz segítségével meghatározható egy hármas rendszernek mind a teljes térbeli konfigurációja, mind pedig a komponensek tömegei. A 4.4. alfejezetben részletes leírását találjuk a hármasjelöltek Kepler fedési katalógusából történő kiválasztásának és az adatok előfeldolgozásának. Az eljárás eredményeként az eredeti Kepler-mezőben felfedezett több mint 2500 fedési kettős, illetve ellipszoidális változóból összesen 230 olyan rendszer maradt, amelyben feltételezhető egy harmadik test jelenléte. A 4.5. alfejezetben ezen minta részletes statisztikai vizsgálata kapott helyet. Kiderült, hogy 160 rendszert lehet tisztán fényidőmegoldással modellezni, 62 rendszer esetében szükséges a szerző által kidolgozott analitikus megoldással kiegészíteni a fényidőmegoldást. Ezen rendszerek teljes térbeli elrendeződését, és a tömegeket is meghatározta. A fennmaradó 8 esetben világossá vált, hogy ezeket előzetesen tévesen klasszifikálták fedési kettősként. A 222 rendszerből 104-nek a külső periódusa rövidebb mint 1000 napot. Korábban ilyen rendszerből csak néhány volt ismert, így szignifikánsan növeltük ezek mintáját. Növeltük azon rendszerek számát is amelyekben a szoros és tág pályák kölcsönös pályahajlását ismerjük. A szerző azt találta, hogy noha a kölcsönös pályahajlásoknak lokális maximuma van a KCTF mechanizmusból jósolt $i_m \approx 40^\circ$ érték körül, azonban a $P_1 - i_m$ eloszlás nem követi az elmélet jóslatát. Hangsúlyozom, hogy az exobolygók felfedezése utáni öldöklő harcban szerzőnek sikerült elsőként azonosítania egy cirkumbináris exobolygót a KIC 07177553 esetében.

Az 5. és 6. fejezetekben egyedi Kepler-rendszerek vizsgálata olvasható. Az 5. fejezetben a HD 181068-as triplán fedő hármas rendszer fénygörbéjének részletes vizsgálata, értelmezése és az annak során meghatározott rendszerparaméterek találhatók. Ehhez szükség volt egy fénygörbeszintézis kód kifejlesztésére is, melynek ismertetése megtalálható az 5.2. alfejezetben. A kód több újításának köszönhetően - Doppler-nyalábolás, a külső fedések bonyolult geometriája, csillagpulzáció figyelembevétele - felülmúlja a jelenleg legszéleskörűbben használt, több évtizede fejlesztett WD-kódot. A fénygörbe vizsgálata kombinálva korábbi spektroszkópiai mérésekkel lehetőséget ad a tömegek és sugarak minden korábbinál pontosabb meghatározására. Sikerült kimutatnia, hogy az objektumok körpályákon direkt irányban keringenek és a pályasíkok egybeesnek. A 6. fejezet bemutat egy olyan fedési kettőst, a HD 183648-at melynek egyik tagja pulzáló csillag. Szeretném kiemelni, hogy ennek vizsgálata során a szerző nemcsak a Kepler méréseire, hanem hazai obszervatóriumokban készített spektroszkópiai adatsorokra is támaszkodott. Ezen adatok össze-

tett vizsgálata során sikeresen szétválasztotta a kettősségből, illetve a csillagpulzációkból származó fényességváltozást, és megmutatta, hogy a pulzációt az árapály okozza.

Az analitikus számítások elvégzéséhez a jelölt az XMaple matematikai szoftvercsomagot hívta segítségül, és az eredményül kapott analitikus formulák tesztelésére, valamint a direkt és indirekt problémákban való alkalmazására saját maga fejlesztett komplex C programokat.

Az utolsó 7. fejezet a kutatási témák lehetséges további irányait foglalja össze. Az értekezést 3 függelék és az irodalomjegyzék zárja.

Technikai megjegyzések

Az értekezés szerkezeti felépítése átgondolt, szövegezése szakszerű, nyelvi-
leg kevés hibát tartalmaz és a nyomdahibák száma is elenyésző. Ugyanakkor helyenként a mondatok túl cikornyásak vagy máshol a kóros szószaporítás miatt a lényeg elveszik és csak többszöri figyelmes olvasás után bontakozik ki az olvasó előtt a mondandó. Egy tárgyi tévedést említek a 19. oldalon, miszerint az $O-C$ függvény egy adott ponthoz tartozó érintőjének meredeksége a fedési kettős pillanatnyi periódusát adja meg. (A periódus hibáját adja meg).

Kérdéseim az értekezéssel kapcsolatban

1. A 38. oldal 2.1. ábráján az m_A tömegponton áthalad az m_C külső csillag pályasíkja. Ha a mozgás leírásához a Jacobi-féle koordinátákat használja, akkor az m_C tömegpont pályasíkja a belső szoros kettős tömegpontján megy át, ami nem esik egybe az m_A -val. Kérem a jelöltet, hogy ezt magyarázza meg!
2. Mi a szemléletes fizikai magyarázata annak, hogy a (2.20) - (2.22) alatti perturbációs erőkomponensekben az $m_A = m_B$ esetben nem lépnek fel $(\rho_1/\rho_2)^2$ -el arányos tagok?
3. A (2.33) és (2.44) közelítések milyen feltevések mellett alkalmazhatók?
4. A 2.3. ábrán alapján az A_M és A_S együttthatók jelentősen eltérnek a másod- és hatodrendű közelítésben. A további számítások melyik közelítésre épültek?
5. A 4.9. ábrán látható a tág pályák e_2 excentricitásának eloszlása a Kepler-mező 222 hierarchikus hármas rendszere esetében. Jól látható, hogy az $e_2 \approx 0,3$ körül egy csúcs jelentkezik a megfigyelt eloszlásban. Szerző írja, hogy a magyarázatával adósak, de mégis milyen lehetőségek merülnek fel?
6. A különböző szélsötétedési törvények és az ezekhez alkalmazott együttthatók mennyiben befolyásolhatják az eredményeket?

Összefoglaló értékelés

Eredményeit a szerző 5 csoportba sorolva 24 tézispontban foglalta össze. Ezek közül 10 a szerző analitikus munkájával kapcsolatos és 14 azok gyakorlati alkalmazásával elért eredményeket mutatja be. Valamennyi tézispontot önálló, új tudományos eredménynek fogadom el.

A tézisekben megfogalmazott eredményeket a szerző 15 publikációban ismertette. Ezek rangos, nemzetközi folyóiratokban jelentek meg. Az elért eredmények a hierarchikus hármas rendszerekben található fedési kettősök fénygörbéjének vizsgálatát új, a korábbiaknál magasabb szintre emeli és lehetővé teszi olyan részletek kimutatását is mint pl. a szoros és tág pályák kölcsönös hajlásszöge. A kifejlesztett elmélet segítségével a csillagok tömegének és sugarának meghatározása a triplán fedő esetben egy nagyságrenddel pontosabb. Analitikus számításai eredményét alkalmazandó olyan szoftvercsomagot fejlesztett ki amely minden korábban használatnál jelentősen összetettebb fizikai modellen alapszik. Továbbá egy fénygörbe-szintetizáló és -illesztő kódot is elkészített, amellyel a nagy pontosságú űrfotometriai fénygörbéken megfigyelhető, korábban nem látott fizikai, illetve geometriai jelenségeket lehet modellezni.

Olvasás közben örömmel vettem észre a jelölt azon törekvését, hogy a ahol csak lehetett mindig kitért a magyar vonatkozású korábbi eredményekre.

Az értekezésnek egy jelentős hibája, hogy szinte az összes ábra és a lényeges adatokat tartalmazó 4.1. - 4.9. táblázatok olyan kis méretűek, hogy az olvasónak nagyítót kell használnia. Ez nehezítette az értekezés olvashatóságát és az eredmények megértését.

Az értekezés eredményeit elegendőnek tartom az MTA Doktora cím megszerzéséhez, a nyilvános vitára bocsátását javaslom.

Süli Áron

Budapest, 2018. január 31.