

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI ÉS INFORMATIKAI KAR
FIZIKA DOKTORI ISKOLA

**Szoros, hierarchikus hármas csillagrendszerek
az égboltfelmérő űrtávcsövek korszakában**

PhD értekezés

Czavalinga Donát Róbert

okleveles fizikus

Témavezető:

Dr. Hegedüs Tibor, tudományos főmunkatárs
SZTE Bajai Observatórium

Konzulensek:

Dr. Borkovits Tamás, tudományos főmunkatárs
SZTE Bajai Observatórium, HUN-REN-SZTE Sztelláris Asztrofizikai Kutatócsoport

Dr. Mitnyan Tibor, tudományos munkatárs
SZTE Bajai Observatórium, HUN-REN-SZTE Sztelláris Asztrofizikai Kutatócsoport

Szeged

2023

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
2. Elméleti áttekintés	3
2.1. Kettős- és többes csillagrendszerek	3
2.2. Kettőscsillagok geometriai osztályozása	5
2.3. Hierarchikus hármas rendszerek detektálása	7
2.3.1. Kettőscsillagok osztályozása észlelési szempontok alapján	8
2.3.2. Fedési kettőscsillagok periódusváltozásai	12
2.3.3. O–C diagram	13
2.4. A <i>Gaia</i> asztrometriai űrszonda	15
2.4.1. <i>Gaia</i> Data Release 3	16
2.5. Non-Single Stars katalógus	17
2.6. <i>TESS</i> űrtávcső	21
3. Szoros hierarchikus hármas csillagrendszerek azonosítása a <i>Gaia</i> űrtávcső segítségével	23
3.1. Bevezetés	23
3.2. A <i>Gaia</i> Archive NSS katalógusa	24
3.3. Eredmények	25
3.4. Hierarchikus hármas jelöltek megerősítése	30
3.4.1. Ismert hierarchikus hármas rendszerek	30
3.4.2. ETV-k elemzése a <i>TESS</i> űrtávcső adatai alapján	33
3.4.3. Jól lefedett ETV-vel rendelkező hármas rendszerek	35
3.4.4. Kevés ETV ponttal rendelkező hármas rendszerek	41
3.4.5. Triplán fedő hierarchikus hármas csillagrendszerek	42
3.4.6. Jelöltek rövid külső keringési pályával	42
3.5. Összefoglaló	44
3.5.1. Hármas jelöltek azonosítása a <i>Gaia</i> űrtávcsővel	44
3.5.2. A <i>Gaia</i> NSS megoldásainak ellenőrzése egy független módszer segítségével	44
4. Szoros triplán fedő hármas csillagrendszerek fotodinamikai analízise	46
4.1. Bevezetés	46
4.2. Triplán fedő hierarchikus hármas rendszerek <i>TESS</i> fénygörbéi	47
4.3. ASAS-SN, ATLAS égboltfelmérő programok	50
4.4. Fotodinamikai elemzés	52
4.4.1. A LIGHTCURVEFACTORY programcsomag	52

4.5. Eredmények	57
4.5.1. TIC 14839347	57
4.5.2. TIC 66893949	60
4.5.3. TIC 88206187	63
4.5.4. TIC 298714297	67
4.6. Paraméterek összehasonlítása a <i>Gaia</i> NSS paraméterekkel	71
4.7. Összefoglaló	77
5. Összefoglalás és kitekintés	78
6. Summary and conclusion	82
7. Hivatkozások	86
8. Függelék	89
8.1. A TESS által jól lefedett 22 hierarchikus hármas csillagrendszer ETV il- lesztései	89

1. Bevezetés

Az éjszakai égbolt legjellegzetesebb tulajdonsága a több ezer fénylő pont, amely teljes terjedelmében kitölti a fölénk boruló éjszakai eget. A csillagok a világegyetem talán legáltalánosabb lakói, nagy részük képes az univerzum életkorával is összemérhető módon stabil állapotban maradni. A csillagászat összes szerteágazó területe profitál a csillagok fizikájának egyre pontosabb megértéséből. A ma megfigyelhető elemgyakoróság többek között az eddig élt csillagok erőteljes hozzájárulásával alakult ki, a kozmológiában nagyon fontos távolságmérést lehetővé tevő folyamatok kapcsolódnak hozzá. A Naprendszerünk felépítését, anyagának összetételét a Napunknál korábban született csillagok alakították. Sok esetben a csillagok mint világítótornyok jelölik ki az anyag csomósodásának a jelenlétét, amelyek gömbhalmazokat, galaxisokat formálnak. Nem véletlen, hogy a csillagászat egyik legfontosabb kutatási iránya a csillagok kialakulásának, felépítésének, működésének és fejlődésének jobb megértése.

Közvetlen közlelről viszont csak és kizárólag a Napunkat tudjuk tanulmányozni. A legközelebbi csillagok is olyan távol vannak, hogy a világ legnagyobb műszereivel sem lehetséges a felszínüket optikailag felbontani. Csak speciális interferometriai eljárások segítségével van lehetőség közvetlenül feltérképezni a legközelebbi csillagok felszínét.¹ Nem is beszélve a csillagok belsejében zajló folyamatok megfigyeléséről, hiszen a csillagok külső burka, a fotoszféra eltakarja a csillag belsejét, így az ott lejátszódó folyamatokat nem tudjuk közvetlenül tanulmányozni. A csillagok jobb tanulmányozásához ezért rengeteg különböző módszer született, melyek jellemzően a csillagtól érkező látható fényben beálló változás megértésével, modellezésével foglalkozik.

Az egyik lehetőség a csillagok paramétereinek pontosabb meghatározására, hogy ha nem magányos, hanem egymással olyan fizikai kapcsolatban álló csillagokat figyelünk meg, ahol a csillagok egy közeli társ gravitációs terében találhatóak. Ezek a csillagok a Kepler által megfogalmazott törvények alapján egymás körül keringenek, gravitációsan kötött állapotban. A pályájukat vizsgálva új információk nyerhetők a rendszerről. Sok esetben csak ez nyújt arra lehetőséget, hogy csillagok abszolút paramétereit is meghatározhassuk.

Az ilyen irányú kutatómunkámat Dr. Hegedűs Tibor témavezetésével kezdtem el. Kezdetben nyílthalmazokban található kettőscsillagok modellezésével foglalkoztam. Céлом az volt, hogy a nyílthalmazok legfontosabb paramétereinek ismeretében pontosítani tudjam a halmazban található kettőscsillagok fizikai paramétereit. Ehhez többek között elsajátítottam a *Gaia* űrtávcső adataival való munkát, megismerkedtem a kettőscsillagok legfontosabb jellemzőivel. A kutatómunkám során sajnos olyan problémákba ütköztem, amelyeket csak hosszú távon, a PhD képzésemén túlnyúlóan tudtam volna megoldani.

¹Ezzel a technikával is kis felbontásban, és csak jelentősen eltérő felületi fényességű (hőmérsékletű) területeket tudunk feltárni a relatíve nem túl távoli csillagok esetében.

Emiatt döntöttem úgy, hogy egy másik témával is elkezdek foglalkozni, amely szervesen kapcsolódott ehhez a témához. A konzulensem, Dr. Borkovits Tamás által vezetett HUN-REN-SZTE Sztelláris Asztrofizikai kutatócsoportjába kapcsolódtam be, ahol jelenleg is többes csillagrendszerek vizsgálatával foglalkozom. Ezen rendszerek hasonlóak a kettős csillagrendszerekhez, annyi különbséggel, hogy itt akár több csillagot is tartalmazhat a rendszer. A korábbi témám ismeretanyagát felhasználva tudtam segítséget nyújtani a kutatócsoportnak. Végül az értekezésem alapját képező első szerzős szakcikkeim is ebben a témában születtek. Ez némiképp eltér a PhD képzésem elején felállított eredeti célkitűzésemtől, de a lényeg nem változott: a csillagok fizikai paramétereinek pontosításával és ezzel a csillagok működésének pontosabb megértésével foglalkoztam.

2. Elméleti áttekintés

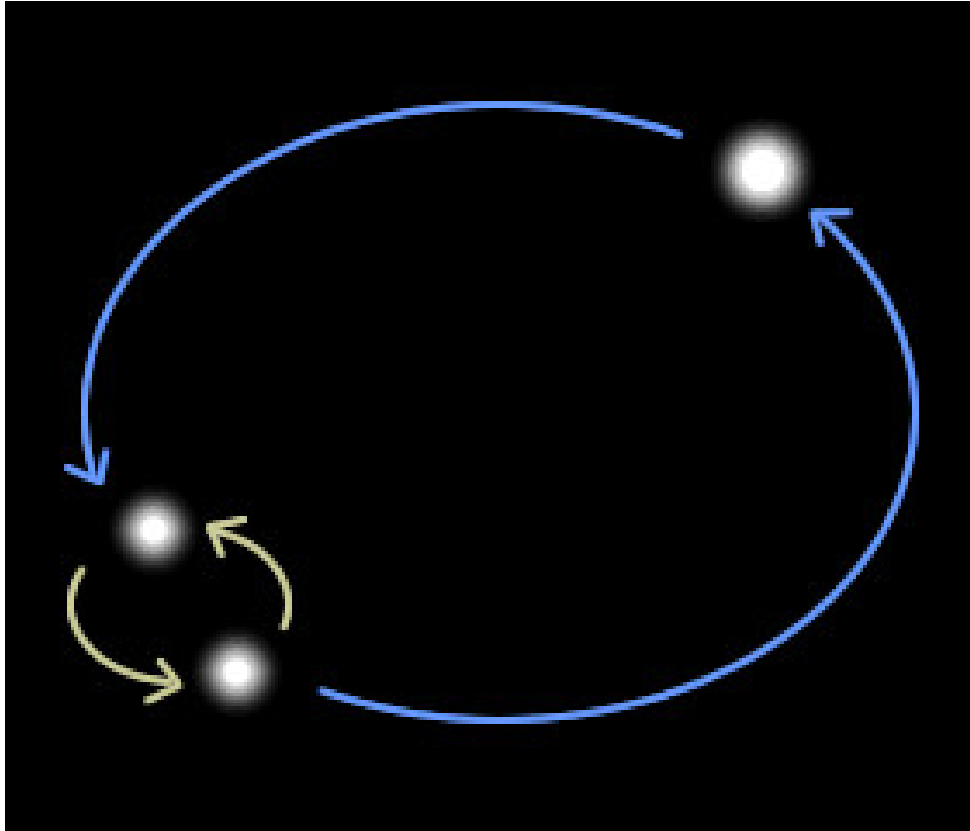
2.1. Kettős- és többes csillagrendszerek

A Naprendszerünkben található központi égitest, a Napunk körül nem kering más csillag, ezzel a magányos csillagok csoportjába tartozik. A Naprendszer közvetlen környezetét vizsgálva viszont arra a következtetésre juthatunk, hogy egyáltalán nem ritkák az olyan csillagok, amelyek párban vagy akár többes rendszerben találhatóak, sőt a Naphoz hasonló csillagok esetén a csillagok körülbelül fele többes rendszer tagja. Raghavan és mtsai 2010-ben megjelent cikkében a 25 parszekon belül lévő 454 a Napunkhoz hasonló ($0,7 < M_{\odot} < 1,3$) csillagot vizsgálva, arra a következtetésre jutott, hogy $44 \pm 2\%$ csillagrendszerben található. A Napunknál nagyobb tömegű csillagok esetén pedig ez az arányszám még inkább a többes rendszerek irányába tolódik el. Sana és mtsai 2012-ben végzett munkájuk alapján nyílthalmazokban található O spektráltípusú csillagok esetén azt találták, hogy a többes rendszerek száma a magányos „rendszerekhez” képest eléri a $70 \pm 9\%$ -ot. Amennyiben a közvetlen környezetünkben található összes olyan csillagot vizsgáljuk, amely a szabad szemmel még éppen látható 6 Hipparcos magnitúdónál fényesebb, akkor arra a következtetésre juthatunk, hogy a csillagrendszerek² 40%-a olyan rendszer, amely legalább kettő csillagot tartalmaz. A legalább kettő csillagot tartalmazó rendszerek 22%-a pedig még egy harmadik komponenst is tartalmaz (Tokovinin és mtsai, 2008). Ebből látható, hogy a hármas csillagrendszerek egyáltalán nem ritkák a közvetlen környezetünkben. Viszont minél több csillagot tartalmaz egy rendszer, azok annál ritkábban fordulnak elő.

A kettőnél több csillagot tartalmazó csillagrendszerek esetén a csillagok csak hierarchikus konfigurációban tudnak gravitációsan stabil állapotban együtt maradni. A hierarchikus elrendezés jelentése, hogy ha 3 tetszőleges csillagot kiválasztunk a rendszerből, akkor a három csillagból az egyik minden esetben sokkal távolabb helyezkedik el a másik kettő csillagtól. Amennyiben csak három csillag alkotja a rendszert, akkor egyféle konfiguráció képzelhető el, mégpedig, hogy található egy egymáshoz viszonylag közel keringő kettőscsillag és tőle sokkal nagyobb távolságra egy külső pályán keringő csillag.

A dolgozatomban az ilyen konfigurációjú hármas csillagrendszerekkel foglalkozom, viszont érdemes megemlíteni, hogy nagyobb elemszámú rendszerek esetén már több különböző hierarchikus konfiguráció is elképzelhető. Például egy négyes rendszer esetén két konfiguráció lehetséges. Egyik, hogy a négy csillag két párba rendeződik, és két egymáshoz közel keringő kettőscsillagot alkot, amelyek egymástól jóval nagyobb távolságban keringenek egymás tömegközéppontjai körül. Másik lehetőség, hogy egy belső pályán

²Ebben az esetben a magányos csillagokat is olyan „csillagrendszereknek” tekintjük, ahol viszont csak egy csillag található.



1. ábra. Hierarchikus konfiguráció hármas rendszer esetén. Forrás: Chris Koresko

keringő közeli kettős körül kering egy távolabbi harmadik komponens, és még a kettőscsillag és a harmadik komponens távolságához képest is sokkal távolabbi pályán kering egy negyedik komponens. Még több csillagot tartalmazó rendszerek esetén még további különböző konfigurációk képzelhetők el (Tokovinin, 2021). Hasonlóan a kettőscsillagokhoz itt is felhasználhatóak azok a tulajdonságok, amelyekkel a rendszer csillagainak paramétereit nagyobb pontossággal meghatározhatóak, mint magányos csillagok esetén. Emellett pedig az ilyen rendszerek tanulmányozása már önmagában is nagyon érdekes, mivel az evolúciójuk még a kettőscsillagokhoz képest is sokkal különlegesebb irányba tud fejlődni.

Sokáig kérdés volt, hogy a szoros kettőscsillagok 1-2 napos keringési idővel hogyan fejlődhettek ki? Mivel a kialakuló csillagok protocsillag fázisban jóval nagyobb átmérővel rendelkeznek, mint a protocsillag fázis végén, így ilyen esetekben a két csillag nem „férne el” egymás mellett a pályáján. Jelenleg úgy gondoljuk, hogy két folyamat alakíthatja ki a kettős- és többes rendszereket: a magfragmentáció, vagy a korongban fellépő instabilitás során alakulhatnak ki további csillagok egy rendszeren belül (Offner és mtsai, 2010; Moe és mtsai, 2019; Tokovinin és mtsai, 2020). A többes rendszerek esetén viszont olyan dinamikai folyamatok is elképzelhetők, amelyek segítségével idővel szoros belső kettőscsillagok is kialakulhatnak. Később ezek a csillagok „kék kószákká”, Ia típusú szupernóvák, gra-

vitációs hullámot kibocsájtó kompakt kettősökké alakulhatnak. (Toonen és mtsai, 2020, 2022) Az egyik ilyen pályaméret-csökkentő mechanizmust okozhatja egy távoli harmadik komponens perturbáló hatása is: az úgynevezett KCTF-mechanizmus (Kozai Cycles with Tidal Friction – KCTF; Kiseleva és mtsai, 1998).

A mechanizmus alapja az, hogy ha az eredetileg hosszabb keringési periódussal rendelkező belső kettőscsillag pályához képest egy távolabbi komponens olyan pályán kering, hogy a két pálya hajlásszöge megközelíti vagy eléri az $i_m = 90^\circ$ -ot,³ akkor a dinamikai perturbációk miatt a belső pálya excentricitása olyan mértékben megnőhet, melynek eredményeként a periasztron-átmenetek során a két belső csillag olyan közel kerül egymáshoz, hogy jelentős árapály-fékeződés lép fel, amely miatt a belső kettős pályájának félnagy-tengelye lecsökken. Ez egészen addig tart több cikluson keresztül, amíg az árapályerők eredője meg nem akadályozza a további KL⁴-mechanizmus érvényesülését. A végén pedig az árapály-súrlódás miatt „bekörösödik” a belső kettős pályája és így kialakul a pár napos keringési idővel rendelkező belső kettőscsillag konfiguráció. A dinamikai perturbációk miatt bizonyos esetekben a rendszerek instalbillá válhatnak, ilyen esetben több különböző forgatókönyv is elképzelhető. A rendszerből akár nagy sebességgel kilökődhet csillag, amely magyarázná a Tejútrendszerben található extra nagy sajátmozgással rendelkező csillagok egy részét. Bizonyos esetekben csillagütközés is történhet, ebből pedig „kék kószák” jöhetnek létre. Ritka esetben akár két fehér törpecsillag ütközését is okozhatja harmadik komponens jelenléte. (Toonen és mtsai, 2022)

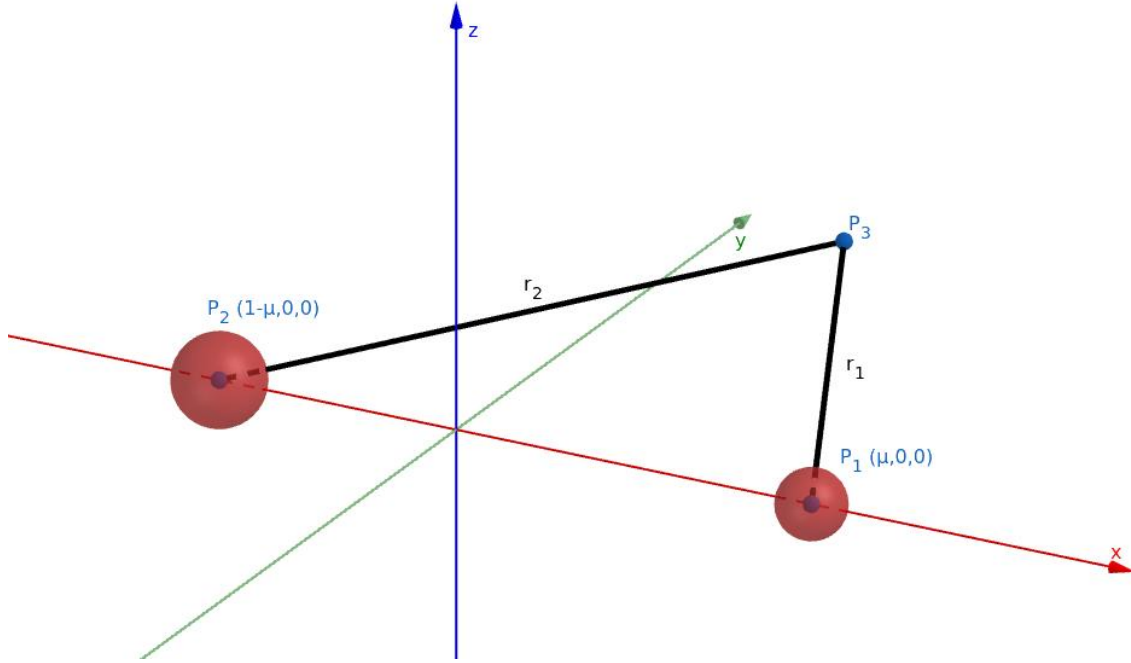
2.2. Kettőscsillagok geometriai osztályozása

A hierarchikus hármas rendszerek esetén a kettőscsillagokra alkalmazott geometriai osztályozást alkalmazhatjuk a belső kettőscsillagokra is.

Nemdegenerált csillagok esetén a tömeg erős centrális koncentrációja miatt a csillagokat jó közelítéssel tömegpontoknak tekinthetjük és a csillag felületét pedig tömeg nélküli próbatestek sokaságaként foghatjuk fel. Ilyenkor felírhatjuk erre a rendszerre a térbeli korlátozott háromtest-problémát és ezt forgó koordinátarendszerben vizsgálva felírható egy elsőfokú integrál, a Jakobi-integrál, amely definiál egy potenciálfüggvényt Ω_{eff} , amely csak a két tömegponttól való relatív távolságoktól és a két tömegpont tömegarányától függ.

³ i_m - köztes inklináció: a belső és külső pályák által bezárt szög

⁴Kozai-Lidov vagy von Zeipel-Kozai-Lidov mechanizmus (Kozai, 1962; Harrington, 1968; Lidov és Ziglin 1976; Mazeh és Shaham 1979; Sidlichovsky, 1983; Marchal, 1990)



2. ábra. A korlátozott háromtest-probléma 3-dimenziós geometriai konfigurációja. Forrás: GeoGebra

$$\Omega_{eff} = \frac{1}{2} \left((1 - \mu) r_1^2 + \mu r_2^2 \right) + \frac{1 - \mu}{r_1} + \frac{\mu}{r_2}, \quad (1)$$

ahol

$$r_1 = \sqrt{(x - \mu)^2 + y^2 + z^2}, \quad (2)$$

$$r_2 = \sqrt{(x + 1 - \mu)^2 + y^2 + z^2}, \quad (3)$$

$$\mu = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \quad (4)$$

Az m_1 és m_2 a két csillag tömege, r_1 és r_2 a két csillag távolsága a próbatesttől, míg az x , y , z értékek a próbatest, avagy jelen esetben a csillag felületének egy „darabjának” a koordinátái, μ pedig a redukált tömeg.

A csillag felületét ezen a potenciálon értelmezett ekvipotenciális felületen értelmezzük.⁵

Az (1) egyenlet alapján leírt potenciálfüggvénynek a két csillag között szélsőértéke, avagy maximuma van, az ezen a helyen lévő első derivált nulla értéket vesz fel, azaz az ide

⁵Ilyen esetben természetesen nem vesszük figyelembe a csillag rotációját, pulzációját és bármilyen olyan asztrofizikai folyamatot, amely nem teszi lehetővé, hogy a csillag rétegei azonnal hozzáigazodjanak az ekvipotenciális felülethez.

helyezett tömegpontra ható erők eredője zérus, így nem lép fel semmilyen irányban gyorsulás. Ezt a speciális helyet nevezik L_1 -es Lagrange-pontnak. Emellett a kettőscsillagok esetén még további két fontos pont található a két tömegpontot összekötő x tengelyen. Az egyik az L_2 -es Lagrange-pont, amely a 2. ábrán a P_2 -vel jelölt csillagon túl, míg a másik, az L_3 Lagrange-pont a P_1 -gyel jelölt csillagon túl található. Az L_1 -es ponton áthaladó ekvipotenciális felület által határolt térrészt nevezzük Roche-lebenynek.

A kettőscsillagok geometriai osztályozása azon alapul, hogy a csillagok milyen mértékben töltik ki a Roche-lebenyüket.

- **Különálló kettősök:** Egyik komponens sem tölti ki a Roche-lebenyét, így az L_1 -es ponton keresztül nem zajlik tömegátadás, a két csillag külön fejlődik, egymástól függetlenül.
- **Félig érintkező kettősök:** A kettőscsillag egyik komponense kitölti a Roche-lebenyét és így tömeget adhat át a társcsillagának. Sok esetben ilyenkor a tömegarány meg is fordulhat. Ennek köszönhetően a csillagok teljesen más utat járnak be fejlődésük során, mintha magányos csillagok lennének. Tipikus példája ennek az úgynevezett Algol-paradoxon. Az Algol kettőscsillagot megvizsgálva azt tapasztalhatjuk, hogy a kisebb tömegű csillag már elfejlődött a fősorozatról, míg a nagyobb tömegű társa nem - miközben az abszolút kora mindkét csillagnak nyilvánvalóan azonos (egy időben keletkeztek). A magányos csillagok esetén tudjuk, hogy minél nagyobb a tömege a csillagnak, annál gyorsabban fejlődik, az Algolnál viszont mégsem ezt figyelhetjük meg. Ennek a magyarázata, hogy a kezdetben nagyobb tömegű csillag vörös óriás állapotba kerülve megközelítette a Roche-lebenyét, és emiatt annyi anyagot? adott át a kisebb tömegű csillagnak, hogy idővel meg is fordult a tömegarány.
- **Érintkező kettősök:** A csillag mindkét komponense kitölti a Roche-lebenyét, sőt túl is terjed rajta. A két csillag egy közös külső burokba van ágyazva.

Hierarchikus hármas csillagrendszerek esetén a belső kettőscsillag mellett lehetséges, hogy a harmadik komponens tölti ki a Roche-lebenyét, és ezzel anyagot ad át a belső csillagokra a fejlődésének akár több pontján is.

2.3. Hierarchikus hármas rendszerek detektálása

Hierarchikus hármas rendszerek detektálása hasonló módszerekkel történhet mint a kettőscsillagok esetén, annyi különbséggel, hogy itt 3 csillag jelét kell keresni az adatokban. Jellemző, hogy először a csillagokról a kettősséget állapítják meg, majd később derül ki,

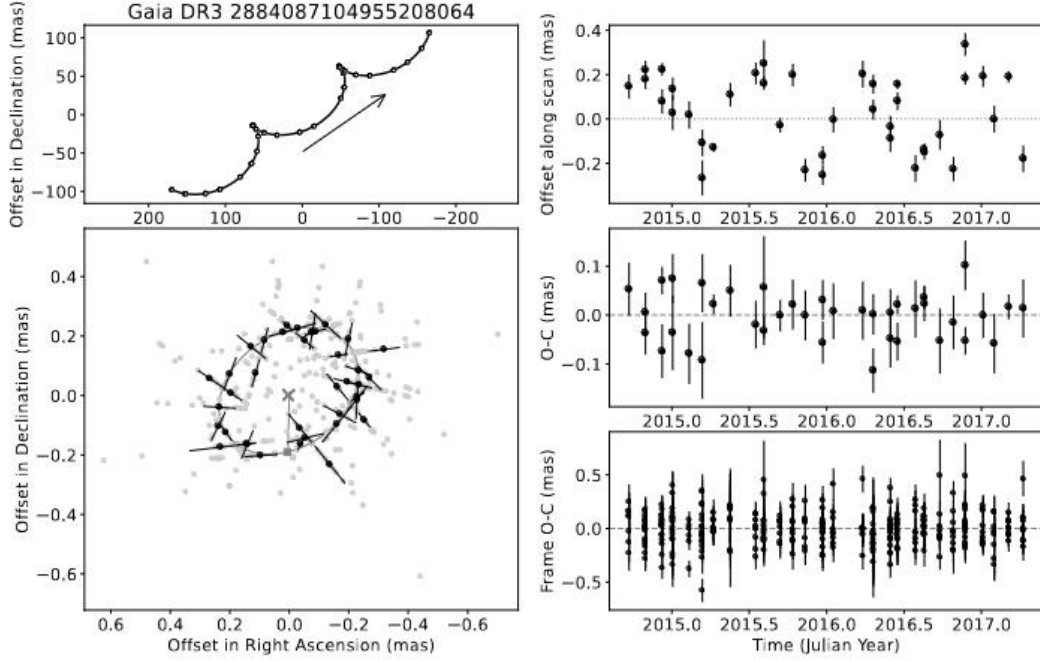
akár más észlelési módszerekkel, hogy valójában hármas vagy akár többes csillagrendszer-ről van szó.

2.3.1. Kettőscsillagok osztályozása észlelési szempontok alapján

Vizuális kettőscsillagok: Ha két csillag optikai eszközök segítségével felbontható akkor vizuális kettőscsillagokról beszélhetünk. A csillagok távolsága és a véges felbontóképesség miatt ezen csillagok jellemzően csak kb. 100 parszek távolságon belül figyelhetőek meg és még ilyen esetekben is ahhoz, hogy optikailag felbonthatóak legyenek, kellően távol kell egymástól keringeniük (átlagos tömegű csillagokat feltételezve). A vizuális módszerrel felfedezett csillagok keringési ideje évtizedes, vagy akár évszázados skálán mozoghat. Az optikai interferometriának köszönhetően nagyobb felbontást érhetünk el, így már rövidebb periódusú vizuális kettősöket is sikerült azonosítani, viszont ezek jellemzően már korábban is ismert kettősök voltak.

Asztrometriai kettőscsillagok: Történetileg ezek olyan kettősök, amelyeknek csak a fényesebb tagja volt észlelhető távcsővel, de viszonylag gyors égi sajátmozgásuk van, és az észlelési időintervallumnál jóval kisebb periódusidejű, kellően tág relatív pályamozgás jellemzi őket. Asztrometriai módszerrel a kettőscsillag fényesebb tagjának mozgását követjük és ebből a mozgásból tudunk következtetni a kettőscsillag léteire. A mozgás égboltra való vetülete nem egy egyenes lesz, hanem ráakódik a csillag halvány társával közös tömegközéppont körüli keringésének a vetülete is. Ilyen asztrometriai kettősök esetén meghatározható pályaelemek közé tartozik a P keringési periódus, az e excentricitás, az ϖ pericentrum-hosszúság, illetve az i inklináció. Az Ω csomóvonal-hosszúságra a háromdimenziós pálya kétdimenziós vetületre való leképezése miatt két egymástól 180° -kal eltérő érték határozható meg. Az a félnagy tengely esetén pedig csak látszó szögméretet tudunk meghatározni, tehát amennyiben nem ismerjük a kettőscsillag távolságát, akkor a félnagy tengely abszolút értéket sem kaphatjuk meg, és így nem tudjuk a kettőscsillag össztömegét meghatározni. Amennyiben mégis rendelkezésre áll távolságadat, például a kimérhető parallaxis miatt, akkor már a félnagy tengely abszolút értékét is meg lehet határozni egyszerű trigonometriai módszerrel, ebből pedig a kettős össztömege számolható. Hangsúlyozandó, hogy ilyen esetben sem lehet a két csillag tömegét külön-külön meghatározni, hanem a láthatatlan komponens tömegére egy harmadfokú egyenlet írható fel.

Spektroszkópiai kettőscsillagok: A csillag kettős mivoltáról a csillag színképében található vonalak periodikus eltolódásából lehet következtetni. Az egymás körül keringő kettőscsillagok a pályájukat bejárva, hol közelednek, hol pedig távolodnak a megfigyelőtől és emiatt a Doppler-effektus jelenségének köszönhetően a csillagok színképében látható vonalak periodikusan eltolódnak. Amennyiben mind a két csillag vonalait látjuk a



3. ábra. A *Gaia* úrtávcső asztometriai mérései (Holl és mtsai, 2023).

spektrumban, akkor kétvonalas (SB2), amennyiben viszont a spektrumban csak egy csillag vonalait látjuk, akkor egyvonalas (SB1) spektroszkópiai kettőscsillagról beszélünk. A radiálissebesség-görbék előállítás után, több különböző pályaparamétert is meg tudunk határozni attól függően, hogy SB1 vagy SB2 típusú a kettőscsillag. A periódust, az excentricitást és a periasztron argumentumát mindkét esetben meg tudjuk határozni, és attól függően, hogy SB1 vagy SB2, egy vagy mindkét komponens vetített félnagy tengelyét $a \sin i$ is meg tudjuk kapni. SB2 esetén ebből pedig a tömegarány, valamint a két csillag lehetséges minimális tömege is meghatározható. A spektroszkópiai módszer további előnye, hogy a spektrumok tanulmányozásával a csillagokról további információk nyerhetőek, hasonlóan a magányos csillagok esetén.

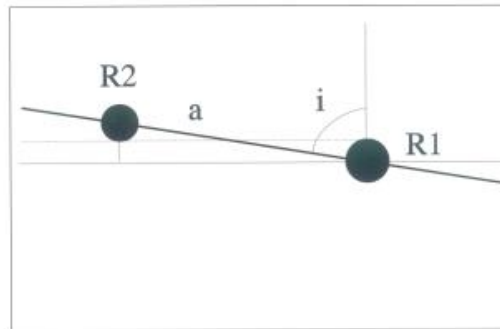
Egyvonalas spektroszkópiai kettős esetén csak az úgynevezett tömegfüggvényt tudjuk meghatározni:

$$f(m_2) = \frac{m_2^3 \cdot \sin(i)^3}{(m_1 + m_2)^2} = \frac{P}{2\pi G} K_1^3, \quad (5)$$

ahol $f(m_2)$ a tömegfüggvény, m_1 , m_2 a fő- és másodkomponens tömege, i a pálya inklinációja, P a keringés periódusa, G a gravitációs állandó, K_1 pedig a főkomponens sebességamplitúdója.

Fedési kettőscsillagok: A legegyszerűbb, és legegyszerűbb eszközökkel kivitelezhető

módszer, amellyel térbelileg nem felbontható (bármilyen távoli) kettőscillagok fedezhetőek fel. Szerencsés konfiguráció esetén a kettőscillag pályájasíkja olyan szögben hajlik a látóirányunkhoz, hogy a két csillag korongja időnként tőlünk nézve eltakarja egymást. Ilyen esetekben pedig időszakosan kitakarják egymás fényének valamekkora részét, így pedig a megfigyelő periodikusan ismétlődő fényességcsökkenést észlel.



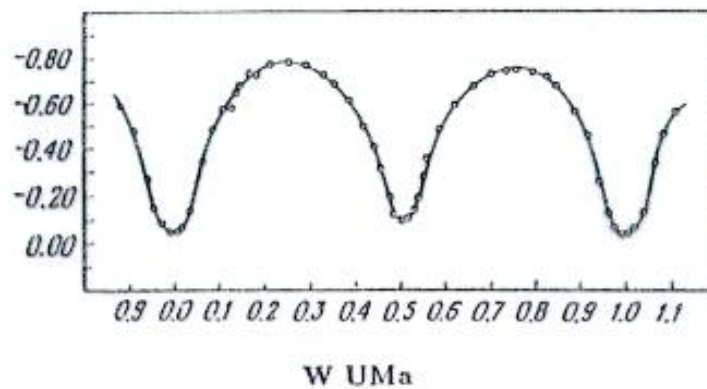
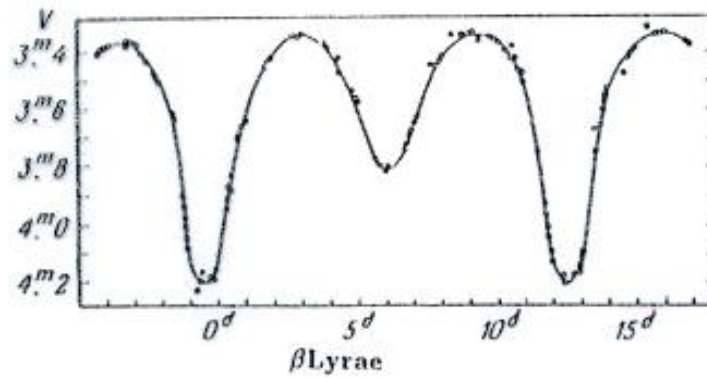
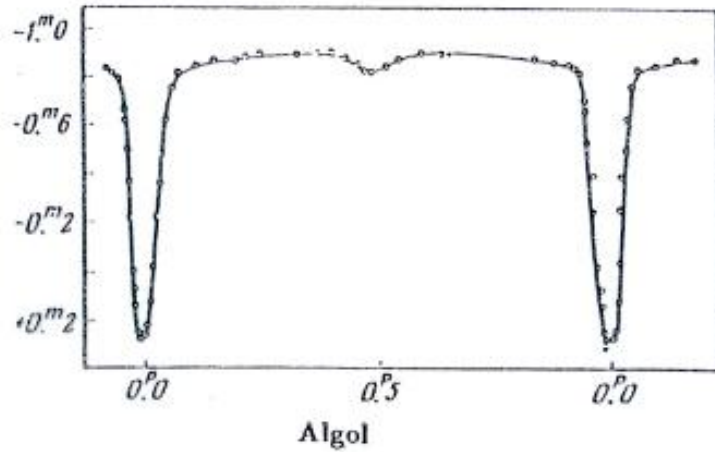
$$R_1 + R_2 \geq a \cos i$$

4. ábra. A fedések geometriai konfigurációja. Forrás: astro.u-szeged.hu

A fénygörbe alakja alapján a fedési kettőscillagokat különböző csoportokba sorolják:

- Algol-típus: A fedésen kívüli részen a fénygörbe többnyire konstans fényességű. Egyértelműen elkülönülnek a fedések a fénygörbe konstans részétől. Jellemzően az ilyen típusú csillagok elegendő távol keringenek egymástól ahhoz, hogy alakjuk közel gömbszimmetrikus legyen, ezért amikor nincs fedés, a rendszer összfényessége nem változik, amennyiben természetesen egyik komponens sem pulzál és nincsenek rajtuk foltok vagy egyéb fényességváltozással járó asztrofizikai folyamatok. Jellemzően az ilyen típusú fénygörbéket különálló kettősök okozzák, de nem kizárólagosan. Például az Algol, amelyről magát a nevét kapta ez a típus, a fényességváltozást mutató fedési kettőscillag valójában egy félig érintkező kettőscillag.
- β Lyr-típus: A fénygörbén már nem figyelhetünk meg konstans részt, a fedéseken kívül is folyamatosan változik, de a fedések még a kezdő és végpontjukat leszámítva azonosíthatóak. A két csillag jóval közelebb kering egymáshoz, emiatt pedig a Roche-lebenyük nagyobb hányadát kitöltve már jelentősen eltérhetnek a gömbszimmetriától, így a keringés során ellipszoidális változást és közelségi effektusokat tudunk megfigyelni.
- W UMa-típus: A fénygörbék folyamatosan változnak, fedéseket nem lehet egyértelműen azonosítani. A fénygörbék szinuszoszoidális jellegűek. Ezeket a fénygörbéket

jellemzően az érintkező komponensek mutatják, a fedések mellett az ellipszoidális változás dominál, és mivel ezek a csillagok egy közös burokba vannak ágyazva, amely egységes hőmérsékletű, ezért a fedések közel azonos mélységűek.



5. ábra. Különböző fedési kettősök fénygörbetípusai. Forrás: astro.u-szeged.hu

A kutatómunkám egy jelentős részét képezi olyan rendszerek tanulmányozása, ahol a fedési kettőscsillagon kívül a harmadik komponens is fedéseket okoz. A hierarchikus

elrendezés miatt a harmadik test által okozott fedések jóval ritkábbak mint a belső kettős okozta fedések, ezért nehezebb őket detektálni. Az első harmadiktest-fedéseket mutató hármas csillagrendszereket 2011-ben találta meg két független kutatócsoport: Derekas és mtsai (2011) a 7 magnitúdós HD 181068-t; Carter és mtsai (2011) pedig a KOI-126 rendszerét. Mindkét esetben a *Kepler* űrtávcső adatsorait használták fel. A *TESS* és *Kepler* űrtávcsöveknek köszönhetően már egyre több ilyen rendszert ismerünk, de még mindig 50 alatt van a hivatalosan bejelentett, ismert triplán fedő hármas rendszerek száma. A harmadiktest-fedések jelentős mennyiségű új információt hordoznak magukban, amelyeket ha kombinálunk más mérésekkel és modellekkel, a csillagok pályáit és alapvető sztelláris paramétereit határozhatjuk meg mint pl. tömeg, átmérő, effektív hőmérséklet, fémesség és kor. Ilyen különböző kiegészítő mérések és modellek lehetnek a később részletesen kifejtett ETV⁶ vizsgálat, radiálissebesség-görbe, csillagspektrumok és spektrális energiaeloszlás (SED) analízis vagy csillagevolúciós kódok használata. Hierarchikus hármas csillagrendszerek esetén a két pálya síkjának nem kell feltétlenül egy síkba esnie, bármilyen köztes inklináció értéket felvehet. Fontos megjegyezni, hogy attól függetlenül, hogy a köztes inklináció értéke nem nulla, még belső és külső fedéseket is ugyanúgy megfigyelhetünk, így a triplán fedő rendszerek is alkalmasak hosszú távú dinamikai hatások tanulmányozására, mint például a KCTF-mechanizmus. Több esetben viszont megfigyelhető, hogy a külső és belső pálya egy síkba esik ennek a fő oka, hogy jellemzően olyan szoros rendszereket figyelünk meg, ahol feltételezhetjük, hogy a teljes rendszer egy közös korongból alakult ki. Ez pusztán megfigyelési effektus, mivel az égboltfelmérő programok véges megfigyelési időintervalluma miatt a rövidebb külső periódussal rendelkező hármas rendszereket könnyebb észrevenni az adatokban.⁷ Emiatt a triplán fedő hármas rendszerekből még mind a mai napig igen keveset ismerünk. Minden egyes újonnan felfedezett rendszer új lehetőséget ad arra, hogy a csillagok alapvető evolúcióját, működését jobban megismerhessük, viszont harmadiktest-fedések nélkül is van lehetőségünk kimutatni harmadik test jelenlétét pusztán a fénygörbéket felhasználva.

2.3.2. Fedési kettőscsillagok periódusváltozásai

Kéttest-probléma esetén a két tömegpont a newtoni mechanika alapján, zárt ellipszist ír le, méghozzá állandó keringési periódussal. A legtöbb kettőscsillag esetén a csillagok mérete elhanyagolható az egymástól való távolságukhoz képest ezért élhetünk ezzel a feltételezéssel. Így amennyiben azt tapasztaljuk, hogy a fedési kettőscsillagot vizsgálva a fedések között eltelt időben változás lép fel, akkor érdemes megvizsgálni annak lehetőségét, hogy egy távolabbi harmadik komponens okozza a periódusváltozást. Ez lehet akár

⁶lásd 2.3.3. alfejezet

⁷Több fedés detektálására van lehetőség egységnyi idő alatt.

valódi periódusváltozás, amelyet a harmadik komponens dinamikai perturbációja okoz, vagy látszólagos változás, amely valódi periódusváltozással nem jár. Itt érdemes megemlíteni, hogy más okok is állhatnak a periódusváltozás mögött, többek között a nem gömb-szimmetrikus tömegeloszlás keltette árapályperturbáció okozta klasszikus apszismozgás, relativisztikus effektusok, tömegátadás és mágneses fékezés. Ezek között az úgynevezett O-C diagram segítségével jellemzően különbséget lehet tenni.

2.3.3. O–C diagram

A csillagászatban az úgynevezett O–C (Observed minus Calculated) diagram alkalmas arra, hogy periódusváltozásokat mutassunk ki. A diagram lényege: egy periodikusnak tűnő fénygörbe jól meghatározható t_0 időpontját kiválasztva (például egy pulzáló csillag esetén a fénygörbe maximumát, vagy fedési kettőscsillagok esetén a főminimum időpontját) egy előre meghatározott P periódus alapján több ciklusra előre vagy akár hátra is kiszámoljuk, majd összehasonlítjuk (kivonjuk) a mért és a meghatározott időpontokat. Az értekezésemben fedési kettőscsillagok fénygörbéit elemzem ilyen módon, ezért a fénygörbe fő- és/vagy mellékminimumainak időpontjait használom fel. A szakirodalom ezekben az esetekben gyakran nem O–C diagramnak hívja az ilyen típusú görbéket, hanem „Eclipse Timing Variation”-nek, rövidítve ETV-nek nevezik. Ezt fedésiminimumidőpont-változásként fordíthatjuk le, amely arra utal, hogy a fedések bekövetkezésének időpontjaiban jelentkező változást, azaz a periódusváltozást keressük. A értekezésem további részében ETV-ként fogok hivatkozni az ilyen típusú diagramokra.

A kalkulált időpontok számolását az alábbi egyenlet segítségével végezhetjük el:

$$C = t_0 + P \cdot E, \quad (6)$$

ahol, C a kalkulált időpont, E pedig egy egész szám, az úgynevezett ciklusszám.

Miután kiszámoltuk ezeket a kalkulált (calculated) minimumidőpontokat, kivonjuk őket az adott ciklusszámhoz tartozó, mérési úton meghatározott (observed) fedési minimumidőpontokból, majd mindezt a ciklusszám függvényében ábrázoljuk. Megjegyzendő, hogy az O–C diagram, avagy az ETV diagram elkészítése nem feltétlen csak fedési minimumidőpontok felhasználásával lehetséges, hanem a fénygörbe bármely jól meghatározható időpontja alapján is. Ilyen például a mellékminimumok időpontja, ilyenkor jellemzően fél ciklusszámmal számolunk.

Amennyiben nincs periódusváltozás minden esetben egy egyenest illeszthetünk a kapott pontokra. Ha a periódust pontosan határoztuk meg, akkor az egyenes meredeksége nulla. Amennyiben az egyenes meredeksége eltér a nullától, akkor csak a kalkulált periódust kell újraszámolni és az egyenes ezután már újra nulla meredekségű lesz. Az egyenes meredeksége megadja a használt periódus hibáját. Amennyiben viszont a pontokra egy

görbe illeszthető, akkor a fedések között eltelt idő hossza változik.

A periódusváltozásnak több különböző oka lehet.

- **Látszólagos periódusváltozás** Az egyik látszólagos periódusváltozás okozója a fényidőeffektus, angolul rövidítve: LTTE (light-travel time effect) vagy LITE (light-time effect). A dolgozatomban az LTTE rövidítést fogom használni erre a jelenségre. Nem valós a periódusváltozás, hanem a kettőscsillag a harmadik test keringése során hol közeledik, hol távolodik a földi megfigyelőtől, és a fény véges terjedési sebessége miatt fellép a Rømer-effektus. A megfigyelő úgy látja mintha a keringési periódus változna viszont a valóságban ez nem következik be, csak a belső kettőscsillag távolsága változik periodikusan. Amennyiben a harmadik komponens perturbáló hatása elhanyagolható, a kettőscsillag tömegközéppontja és a harmadik komponens keringési pályája a kéttest-probléma segítségével tárgyalható, és így a fedések közötti periódusváltozás analitikusan leírható (Irwin, 1952).

$$\Delta_{LTTE} = -\frac{a_{AB} \sin(i_2)}{c} \frac{(1 - e_2^2) \sin(\nu_2 + \omega_2)}{1 + e_2 \cos(\nu_2)}, \quad (7)$$

ahol, Δ_{LTTE} az időkülönbség a valódi fedés időpontjához képest, a_{AB} a fedési kettőscsillag tömegközéppontjának a hármas rendszer tömegközéppontja körüli pályájának a félnagy tengelye; i_2 , ω_2 , e_2 és ν_2 pedig a külső pálya inklinációja, periasztron argumentuma, excentricitása és valódi anomáliája.⁸

Az LTTE a fenti egyenletből látható, hogy szigorúan periodikus. A meghatározható pályaparaméterek pontosan ugyanazok, amelyek egy SB1 kettőscsillag esetén is meghatározhatóak.

Amennyiben az LTTE amplitúdójának értékét akarjuk meghatározni, abban az esetben a

$$A_{LTTE} = -\frac{a_{AB} \sin(i_2)}{c} \sqrt{1 - e_2^2 \cos^2 \omega_2} \quad (8)$$

egyenletet használhatjuk.

A látszólagos periódusváltozást tud még okozni a már említett klasszikus apszismozgás, viszont az általam vizsgált rendszerek esetén ennek a jelenségnek a hatása elhanyagolható, így itt nem részletezném.

- **Valódi periódusváltozás** Ha a rendszerben egy harmadik tag van jelen, akkor a belső kettős esetén a harmadik komponens perturbáló hatása miatt bekövetkezhet

⁸a külső pálya paramétereit a \square_2 alsó index jelöli (disszertációm későbbi részében \square_{out} -ként fogok hivatkozni a külső pálya paramétereire, itt csak a történelmi hagyományok miatt használtam így)

valódi periódusváltozás is. Különböző időskálájú perturbációk vannak. A rövid periódusú perturbációk időskálája a szoros kettőscsillag periódusának nagyságrendjébe esik. A hosszú periódusú perturbációk a tág pálya periódusával arányosak. Az apszis-csomóvonali perturbációk időskálája pedig a P_2^2/P_1 nagyságrendbe esik. A hierarchikus hármas csillagrendszerek ETV diagram vizsgálata során a hosszú periódusú perturbációk keresésével foglalkoztam. Amennyiben a belső kettős pályája körpályának tekinthető (ez szoros kettősök esetén igen valószínű), a következő egyenlet alapján lehetséges az ETV diagramon modellezni a dinamikai perturbáló hatásokat (Borkovits és mtsai, 2003; Borkovits és mtsai, 2015):

$$\Delta_{dyn} = \frac{3}{4\pi} \frac{m_c}{m_{abc}} \frac{P_1^2}{P_2} (1 - e_2^2)^{-3/2} \times \left[\left(\frac{2}{3} - \sin^2(i_m) \right) M + \frac{1}{2} \sin^2(i_m) S \right] \quad (9)$$

ahol

$$M = \nu_2 - l_2 + e_2 \sin \nu_2 \quad (10)$$

és

$$S = \sin(2\nu_2 + 2g_2) + e_2 \left[\sin(2\nu_2 + 2g_2 + \frac{1}{3} \sin(3\nu_2 + 3g_2)) \right]. \quad (11)$$

A paraméterek megegyeznek a (7) egyenletben találhatókval, kiegészítve az m_c , m_{abc} , i_m , g_2 , l_2 paraméterekkel, amelyek a harmadik komponens tömege, a hármas össztömege, a köztes inklináció, valamint a külső pálya periasztron argumentuma a dinamikai koordinátarendszerben, illetve a harmadik test középanomáliája.

A dinamikai perturbáció karakterisztikus ⁹ amplitúdóját az

$$A_{dyn} = \frac{1}{2\pi} \frac{m_c}{m_{abc}} \frac{P_1^2}{P_2} (1 - e_2^2)^{-3/2} \quad (12)$$

egyenlet adja meg, ahol a paraméterek megegyeznek a fenti egyenletben szereplőkkel. Ezzel az egyenlettel meg lehet vizsgálni, hogy a fenti konfigurációk esetén mekkora lehet a dinamikai hozzájárulás az ETV diagramon látható periódusváltozáshoz.

Hierarchikus hármas rendszerek keresése is ezen módszerek segítségével valósulhat meg. A 2013 telén felbocsájtott *Gaia* űrtávcső unikális lehetőséget biztosít, hogy mind a három módszer segítségével hármas rendszereket azonosítsunk.

2.4. A *Gaia* asztrometriai űrszonda

A csillagok távolságának nagy pontosságú meghatározása a legnehezebb feladatok közé tartozik a csillagászatban. A 2013 telén felbocsátott *Gaia* űrtávcső fő célja az, hogy a

⁹Ez a jelenség, amint az a képletből is látható, nem írható le egyetlen periodikus függvénnyel, így nincs is egy szigorúan vett, egyértelmű amplitúdója. Így ez a képlet csak egy általában jó nagyságrendi becslés!

Napunk környezetében található több milliárd csillag térbeli elhelyezkedéséről készítsen el egy precíz 3-dimenziós térképet (*Gaia* kollaboráció, 2016). A mind a mai napig működő űrszonda a Föld és a Nap által kijelölt nevezetes L_2 -es Lagrange pontban végzi a méréseket. Az űrtávcső célját a csillagok és más, akár Naprendszerbeli objektumok ultrapontos asztrometriai mérésével éri el, ezen felül pedig fotometriát és spektroszkópai méréseket is végez a csillagokra. A távcső két teljesen egyforma, téglalap alakú $1,45 \times 0,5$ méteres tükörrel rendelkezik, amelyek egymáshoz képest $106,5^\circ$ -ban vannak elforgatva. A két tükör fókuszsíkjá ugyanarra a felületre esik. A közös fókusz síkban összesen 106 db CCD kamera található. A CCD kameráknak különböző feladataik vannak. Egy részük az objektumok azonosítását végzi, 62 kamera az ultrapontos asztrometria elvégzése céljából van az űrtávcsőre szerelve, de emellett fotometriát is végez. 7+7 CCD kamera egy prizma segítségével 2 különböző szűrőben méri a csillagok fényességét. Ezekben a szűrőkben készült fotometriára BP (Blue Part) és RP (Red Part)-ként hivatkoznak. A BP szűrő a rövidebb hullámhosszú fényre érzékeny, míg az RP szűrő a hosszabb hullámhosszú fényre. Végül pedig egy $R \approx 11700$ felbontóképességgel rendelkező spektrográf van még a távcsőre szerelve. A két tükör más égterületet figyel meg, a látómezejük $1,8^\circ \times 0,7^\circ$. A két, nagy szöget bezáró tükörnek köszönhetően lehetséges a csillagok abszolút parallaxisát megmérni, mivel a parallaktikus elmozdulás (parallaxistényező) arányos a Nap és a csillag közötti szöggel és a két főtükör által figyelt területen lévő csillagok más szögben látszanak a Naphoz képest. A két szöget összehasonlítva az abszolút parallaxis meg lehet határozni. Az ultrapontos asztrometria feltétele, hogy minden időben ismert legyen a két főtükör egymáshoz viszonyított helyzete, ezért ezt folyamatosan mérik. A távcső fókusz távolsága 35 méter, ezzel a felbontóképessége $58,9 \times 176,8 \text{ mas/pixel}^{10}$. Az egész űrtávcső folyamatosan forog a saját tengelye körül, ennek köszönhetően képes feltérképezni az egész égboltot, egy-egy területre többször is visszatérve.

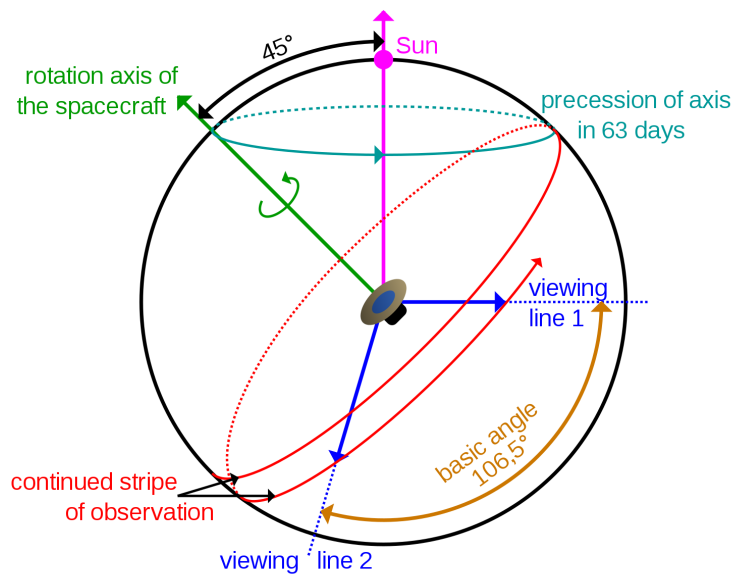
A többszöri asztrometriai mérésnek köszönhetően képes az egyes objektumok trigonometrikus parallaxisának mérésére, ennek köszönhetően a pontos távolságaik meghatározására. Az űrtávcső szinte összes mérési adata szabadon hozzáférhető, több adatkibocsátáson keresztül publikálják a csillagász közösség részére.

2.4.1. *Gaia* Data Release 3

A legfrissebb adatkibocsátás jelenleg a Data Release 3 (DR3; *Gaia* kollaboráció, 2023; Babusiaux és mtsai, 2023), amely 2022 június 13-án jelent meg. 2014. július 15. és 2017. május 28. között mintegy 34 hónap adatainak feldolgozását tartalmazza. Ebben az adatbázisban található:

- Kicsit kevesebb, mint másfél milliárd csillag pontos égi koordinátái, parallaxisa és

¹⁰mas: millióvmásodperc (milliarcsecond)



6. ábra. A *Gaia* űrtávcső észlelési programja. Forrás: [en.wikipedia.org/wiki/Gaia_\(spacecraft\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Gaia_(spacecraft))

sajátmozgása (azokra a csillagokra, amelyek 21 magnitúdónál fényesebbek *Gaia* G fotometriai sávban).

- Több mint 1 milliárd csillagról pontos fotometriai mérések 3 különböző hullámhossz-tartományban.
- 33 millió csillagról a spektroszkópiai méréseknek köszönhetően radiális sebességek is rendelkezésre állnak.

A korábbi adatkibocsátások során még nem állt annyi adat rendelkezésre, hogy a csillagok kettőssége miatti mozgásváltozásokat az égbolton, illetve a radiálissebesség-görbék szinuszos változását is figyelembe vegyék a mérések feldolgozása során, emiatt a korábbi adatfeldolgozási rendszerben minden esetben magányos csillagokat feltételeztek. A harmadik adatkibocsátással együtt érkeztek meg az első olyan *Gaia* pályamegoldások, amelyek nem csak magányos csillagokat tételeztek fel, hanem kettőscsillagok jelét is keresték a mérések között. A munkám igen jelentős része ennek a katalógusnak köszönhető.

2.5. Non-Single Stars katalógus

A *Gaia* űrtávcső DR3 adatkibocsátása során a korábbiak adatait is pontosították az átölelt hosszabb mérési időtartamnak köszönhetően, emellett megjelent többek között az úgynevezett Non-Single Star katalógus (Holl és mtsai, 2023; Halbwachs és mtsai 2023; *Gaia* kollaboráció, 2022) is, amely olyan kettőscsillagokat tartalmaz, amelyeket a *Gaia*

úrtávcső különböző módszerekkel figyelt meg, majd meghatározta azokat a pályaparamétereket amelyeket lehetséges volt.

A *Gaia* kollaboráció ezekre a megoldásokra a non-single stars (NSS) elnevezést használja, én a disszertációmban erre a *Gaia* „nem egyedülálló csillagokra” vonatkozó megoldásaként, vagy rövidítve NSS-ként fogok hivatkozni. A *Gaia* úrtávcső a 2.3.1. alfejezetben részletezett mindhárom fő azonosítási módszer segítségével képes kettőscsillagokat megtalálni.

A katalógus összesen több mint 800 ezer csillagot tartalmaz, tehát ennyi csillagnak van „nem egyedülálló csillagokra” vonatkozó *Gaia* megoldása. Összesen:

- 169 227 csillagnak van teljes asztrometriai megoldása,
- 186 905 csillagnak van spektroszkópiai megoldása,
- 87 073 csillagnak van fedési kettős megoldása,
- a többi csillag esetén pedig csak nem teljes asztrometriai megoldás létezik.

Van átfedés a csoportok között. Több olyan csillag is van, amelyek esetén a *Gaia* úrtávcső különböző módszerekkel is feltételezte a kettősség meglétét. Kétféleképpen kezelte a *Gaia* kollaboráció ezeket a helyzeteket:

- A különböző módszerekből származó mérések adatainak kombinálásával egy pályához tartozó paramétereket kerestek.
- Amennyiben a két megoldás periódusideje között nagy volt az eltérés nem kombinálták a méréseket, hanem külön-külön határozták meg a pályaelemeket.

Jelenleg a *Gaia* adatbázisa csak kettős rendszerek megoldásait tartalmazza, de a *Gaia* kollaboráció a kettőscsillagok megoldásai esetén igen erős megkötéseket alkalmaztak annak érdekében, hogy a lehető legjobb mértékben biztosítani tudják az adatok helyességét, ez pedig szerencsés módon lehetőséget biztosított számomra, hogy a továbbiakban részletezett okok miatt többes csillagrendszerek meglétét feltételezhessem az adatok között.

Asztrometriai megoldások esetén annak érdekében, hogy növeljék a jel/zaj arányt, csak olyan csillagokat vizsgáltak, amelyek 19 magnitúdónál fényesebbek. Emellett pedig csak olyan csillagok kerültek vizsgálat alá, amelyekről a korábbi adatkibocsátásból feltételezhető volt, hogy kettőscsillagok lehetnek. Ezt pedig az úgynevezett RUWE (renormalized unit weight error) érték meghatározásával vizsgálták. Ha ez az illesztés „jóságát” jelző paraméter meghaladta az 1,4 értéket, e mellett pedig a *Gaia* úrtávcső minimum 12 asztrometriai mérést végzett el a csillagon, akkor bekerült a vizsgálandó objektumok közé. Ezen szűrők alkalmazása után sok olyan csillag maradt az adatbázisban, amely „páros”

csillagként jelent meg. Ezek olyan csillagok, amelyek esetén a *Gaia* a csillagokat a keringési pályán való elhelyezkedésük függvényében hol felbontva, hol pedig egybeolvadva figyelte meg. A adatfeldolgozás során úgy jártak el, hogy az ilyen „fél felbontott” csillagpárosokat kiszűrték, mivel az automatikus adatfeldolgozás során az ilyen rendszerek látszólag extrém gyors orbitális mozgást végeztek, amelyek nem lehetnek valós értékek. A szűréshez a *Gaia* által meghatározott különböző paramétereket használtak. Ezek jellemzően olyan paraméterek, amelyek azt mutatják, hogy duplikált csúcsokat talált-e a *Gaia* a mérései során az adott csillag esetében. A későbbiekben tervezik ezen csillagok új automatizált elemzését, erre a problémára optimalizált módszerekkel. Egyéb nem részletezett fotometriai szűrést követően összesen körülbelül 4 millió csillag maradt, amelyeket elemeztek a kettősség szempontjából. Ebből összesen 179 234 olyan esetet találtak, ahol az eredmények elemzése után is feltételezhetően valós értékeket kaptak. Mivel az olyan kettőscsillagokat, amelyek hol látszólag felbontottak, hol pedig összeolvadónak tűntek, kizárták az elemzésből, ezért csak olyan kettőscsillagok kerültek az asztrometriai kettőscsillagok közé, amelyek nincsenek felbontva. Ezeknél tehát a *Gaia* a fotocentrum periodikus mozgását tudta elkülöníteni a sajátmozgástól. A távcső a véges felbontása miatt nem képes a kettős vagy többes rendszert felbontani, így a csillagokat egy pontforrásként érzékeli ezt a pontot nevezzük fotocentrumnak. A pontforrás helye függ a csillagok elhelyezkedésétől és a fényességétől. Fotocentrum helyének kiszámításához használhatjuk a következő egyenletet (Rappaport és mtsai, 2022):

$$\vec{r}_{col}(t) = \frac{\mathcal{R}_B(t)L_B - \mathcal{R}_A(t)L_A}{L_A + L_B} \hat{r} = \frac{(M_A L_B - M_B L_A)}{(M_A + M_B)(L_A + L_B)} \mathcal{R}(t) \hat{r} \quad (13)$$

ahol, a $\mathcal{R}_B(t)$ a harmadik komponens távolsága a teljes rendszer tömegközéppontjától, $\mathcal{R}_A(t)$ a kettőscsillag tömegközéppontjának távolsága a teljes rendszer tömegközéppontjától. Az L_A és L_B a kettőscsillag és a harmadik komponens luminozitása, az M_A és M_B a kettőscsillag és a harmadik komponens tömege. Az \hat{r} vektor az égbolt vetületén mutat a rendszer tömegközéppontjából a harmadik komponens irányába.

Asztrometriai megoldások esetén különböző modellekkel lehetséges a kettőscsillagok égboltra vetített mozgását leírni. Amennyiben a keringés periódusa sokkal hosszabb, mint a megfigyelés hossza, a látszólagos pályát egy parabola közelíti, és ilyenkor elegendő csak egy konstans értéket hozzáadni a pálya modellezéséhez, amely mintha valamelyik irányba gyorsítaná a „fotocentrumot” az egyenesvonalú sajátmozgáshoz képest. Ezt a modellt nevezik a „konstans gyorsulási” modellnek és a *Gaia* NSS adatbázisban *acceleration7* néven hivatkoznak rá. Amennyiben a keringés periódusa még hosszabb, mint a megfigyelés által átfogott időtartomány, de már összehasonlítható azzal, a sajátmozgáshoz már egy folyamatosan változó gyorsulási értéket is hozzáadtak. Ilyen esetben a „változó gyorsulási modell” a neve a megoldásnak, és a *Gaia* adatbázisában az *accelera-*

tion9 nevet viseli. Amennyiben a periódus rövidebb, mint a megfigyelés ideje, lehetőség van teljes kepleri pályamodellek illesztésére, és a pályaelemek asztrometriai módszerrel való meghatározására.

Az asztrometriai módszerrel kapott periódus, excentricitás, és inklináció pályaparaméter egyértelműen meghatározható. A félnagy tengely esetén pedig csak a látszó átmérőt kaphatjuk meg szögtávolság értékben. Ezt a távolság ismeretében, amit meghatározhatunk a *Gaia* saját trigonometrikus parallaxisméréséből, átszámolhatjuk abszolút értékbe, de ez egy új hibaforrást hoz be az eredménybe. Az így meghatározott abszolút hosszúság-érték pedig a fotocentrum pályájának a félnagy tengelye, így még ezt sem tudjuk közvetlenül összehasonlítani más módszerekből, mint például fotodinamikai vagy LTTE analízisből kapott értékekkel. A periastron argumentuma esetén pedig attól függően, hogy a hármas csillagrendszerben a fotocentrum látszólagos pályáját a belső kettőscsillag vagy a külső komponens dominálja megjelenhet egy $\pm 180^\circ$ különbség más módszerekhez képest.

Spektroszkópiai megoldások esetén kevesebb szűrés alkalmazása elegendő volt. Az első lépésben kizárták az elemzésből azokat a csillagokat, amelyek túl hidegek < 3875 K vagy pedig túl forróak voltak > 8125 K. A hőmérsékletek meghatározását a mért spektrumokra illesztett modellspektrumokkal végezték el. Emellett kiszűrték azokat a csillagokat is, amelyek esetén nem állt rendelkezésre kilencnél több mérés, vagy pedig a modellspektrumok illesztésének jósága nem ért el egy bizonyos értéket. Az első lépésként periodicitást kerestek a radiális sebesség-görbékben, majd utána egyszerű kepleri pályával modellezték a lehetséges sebességgörbéket.

A *Gaia* átlagosan 70 fotometriai mérést végzett egy-egy csillagra, ami már elegendő mennyiségű mérés ahhoz, hogy fedési kettőscsillagokat keressenek az adatok között. Több mint 2 millió lehetséges fedési kettőscsillagot találtak, majd a fénygörbék fázis szerinti feltekerése után a Wilson-Devinney LC kód modell segítségével a kettőscsillagok fénygörbéiből megkapható főbb paramétereit határozták meg.

Attól függően, hogy milyen módszer alapján vizsgálták meg a kettőscsillagokat, más paraméterek határozhatóak meg a kettősök pályáját tekintve, amelyet az 1. táblázat mutat.

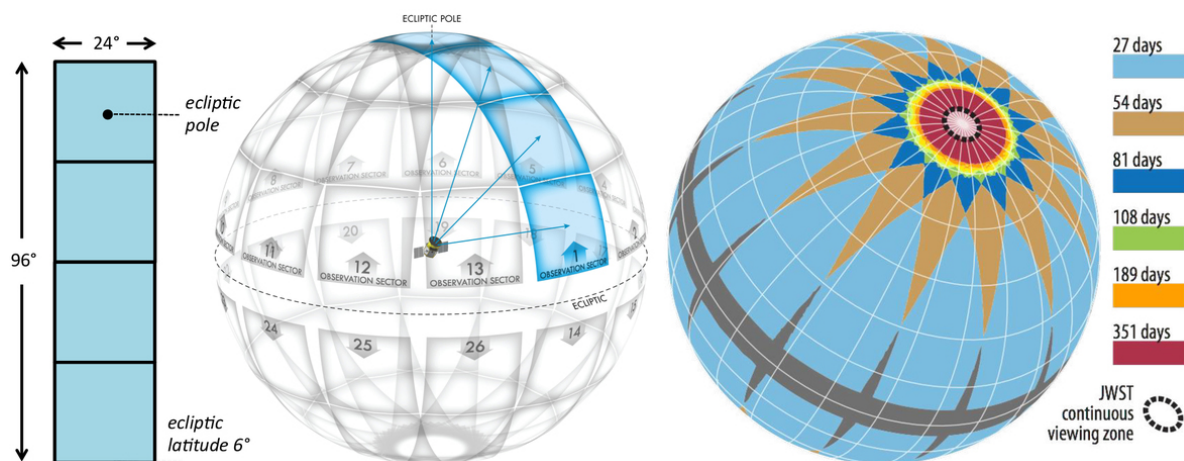
Bár a *Gaia* űrtávcső rendelkezik időben felbontott fotometriai mérésekkel, több sokkal pontosabb fényességmérést lehetővé tevő és jobb időbeli felbontással rendelkező égboltpelfelmérő méréseket végző űrtávcső tartózkodik jelenleg is a világűrben. Így érdemes a *Gaia* űrtávcső által biztosított adatokat kiegészíteni ezen űrtávcsövek adataival. Ilyen többek között a *TESS* űrtávcső is.

Pályaparaméterek	Asztro	SB1	Fotometria	SpektroAsztro
periódus (P)	✓	✓	✓	✓
félnagytengely	látszó	$a \cdot \sin(i)$	×	valódi
inklináció	✓		✓	✓
excentricitás (e)	✓	✓	✓	✓
periasztron argumentuma (ω)	✓	✓	✓	✓

1. táblázat. A *Gaia* űrtávcső különböző nem egyedülálló csillagokra vonatkozó megoldásai-
sáiból származtatható főbb pályaparaméterek. SpektroAsztro - spektroszkópai és asztro-
metriai mérés is létezik.

2.6. TESS űrtávcső

A *TESS* (Transiting Exoplanet Survey Satellite) égboltfelmérő űrtávcső célja fedési exo-
bolygók keresése az egész égbolton (Ricker és mtsai, 2015). Elődjéhez, a *Kepler* űrtávcső-
höz hasonlóan ultraprecíz fotometriát végez egy szűrővel a csillagokról, majd a fénygörbe
vizsgálatával exobolygófedéseket keresnek. A *Kepler* űrtávcső eredeti programjához képest
nem csak az ég egy relatíve kis területét figyeli meg, hanem az egész égboltot. 2018-ban
bocsátották fel, a Föld körül kering, keringési periódusa a Hold keringési idejének a fele.
Erre azért volt szükség, mert a *TESS* űrtávcső látómezeje hatalmas, a 4 db kamera össze-
esen $24^\circ \times 96^\circ$ látómezőt fed le. Ennek okán gyakori probléma, hogy fényes objektumok
kerülnek a látómezőbe, amely nehezíti a méréseket. A keringési pályája lévén így a
Hold nem kerül bele a látómezőbe, ezzel minimalizálni tudták a Hold okozta szórt fény
hatását.



7. ábra. A *TESS* űrtávcső észlelési programja. Forrás: tess.mit.edu

A négy kamera egy oszlopban sorakozik, egy kamerának a látómezeje $24^\circ \times 24^\circ$. Né-
mi hátrány, hogy kamerák felbontóképessége viszonylag alacsony: mindössze 21 ívperces.

Az elsődleges küldetés során egy égterületet (szektort) 27 napig figyelt meg, majd lépett a következőre. Elsődleges célja az volt, hogy minimum 26 szektor észlelését végezze el, 13-at az északi féltekén és 13-at a déli féltekén lefedve ezzel a teljes égbolt nagy részét. Szerencsére az elsődleges küldetése végén is jól működött, így meghosszabbították a küldetését. Ezen dolgozat írása közben már a 70. szektort észleli. A meghosszabbításnak köszönhetően egy égterületre többször is visszatért, ami által hosszabb fénygörbék állnak rendelkezésünkre. Ki kell még emelni, hogy a szektorok között átfedések vannak, így vannak olyan területek, amelyek esetén még hosszabb idősorok állnak rendelkezésre. Érdeemes még megemlíteni, hogy a Naprendszer égitestjeiről érkező szórt fény, a nagy látómező és a 21 ivperces felbontás miatt nehéz kellő pontosságú fotometriát elvégezni, főleg sűrű csillagmező esetén. Így jellemzően jól bevált fotometriai szoftvercsomagokat használunk a fénygörbék előállításához.

3. Szoros hierarchikus hármas csillagrendszerek azonosítása a *Gaia* űrtávcső segítségével

3.1. Bevezetés

Hierarchikus hármas csillagrendszerek egyik nagyon izgalmas alcsoportja a szoros hierarchikus hármas csillagrendszerek. Azokat a rendszereket soroljuk a szoros rendszerek közé, ahol a külső harmadik komponens kevesebb mint ~ 1000 nap alatt kerüli meg a belső kettőscsillagot. Az ilyen rendszerekben a dinamikai perturbáló hatások jóval jelentősebbek lehetnek, emellett ezen rendszerek esetén számíthatunk azokra a különleges evolúciós utakra, amelyek kompakt kettős objektumok kialakulásához vezethetnek. Fontosságuk ellenére mind a mai napig relatíve kevés ilyen rendszert ismerünk. Tokovinin (2018) a Multiple Star Catalog-ban összesen 201 db ilyen rendszert említ meg, de ezek közé háromnál több csillagot tartalmazó rendszereket is belevett. Az egyre növekvő földi és a világűrbe telepített égboltfelmérő programok segítségével az elmúlt években ugrásszerűen nőtt az ismert szoros hármas rendszerek száma. Hajdu és mtsai 2019-ben az OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment; Udalski és mtsai, 1992) adatainak áttanulmányozása után először 177 db, majd később 2022-ben még 16 db szoros hierarchikus hármas csillagrendszert találtak. A legtöbb rendszert az elméleti összefoglalóban már részletezett módszerek segítségével találták meg. A *Gaia* DR3-as adatkibocsátása egy új lehetőséget adott arra, hogy ezekkel a módszerekkel nagy számban találjunk eddig nem ismert szoros hierarchikus hármas csillagrendszereket. A *Gaia* DR3 nem egyedülálló csillagokra vonatkozó megoldásait kihasználva rejtett hierarchikus hármas rendszereket kerestem az adatok között. A nem egyedülálló csillagokra vonatkozó megoldások az elméleti összefoglalóban tárgyalt módon csak kettőscsillagok megoldásait tartalmazza, de mivel mind az asztrometriai, mind pedig a spektroszkópiai módszerrel csak fel nem bontott csillagokat vizsgáltak, ezért feltételezhetünk olyan konfigurációt, ahol egy hierarchikus hármas rendszer esetén a *Gaia* űrtávcső a külső tág pályát figyelte meg, és a belső kettőscsillag és pályája rejtve maradtak. Ezt a lehetőséget kihasználva a szakirodalomban már ismert fedési kettőscsillagok nem egyedülálló csillagokra létező megoldásait kerestem. A keringési periódust összehasonlítva a fedési kettőscsillagok periódusával, arra a következtetésre juthatok, hogy itt valójában egy hármas rendszerről van szó. Amennyiben az eltérés jelentős volt ($P_{NSS}/P_{EB} > 5$, ahol P_{NSS} a *Gaia* megoldás, míg P_{EB} a fedési kettőscsillag periódusa), olyankor feltételezhető, hogy a *Gaia* a fedési kettőscsillag körül keringő harmadik komponens pályát figyelte meg, vagy magának a kettőscsillagnak a keringését a harmadik komponens körül. Azért választottam ezt az arányszámot, mivel a jelenleg ismert legkisebb P_{out}/P_{in} ¹¹ aránnyal rendelkező

¹¹a belső pálya paramétereire \square_{in} , a külső pálya paramétereire \square_{out} alsó indexszel fogok hivatkozni

hierarchikus hármas csillagrendszer esetén a külső komponens keringési periódusa 5,4-szer nagyobb mint a belső kettős keringési periódusa (Xia és mtsai, 2019). Ennél kisebb érték esetén már valószínűsíthetően nem lenne stabil a rendszer, rövid időn belül szétesne. A fedési kettőscsillagokat, amelyek körül kerestem a *Gaia* megoldásokat a szakirodalomból válogattam össze. A következő katalógusokat használtam fel ehhez:

- APASS (AAVSO Photometric All Sky Survey; Munari és mtsai, 2014): 4 516 fedési kettőscsillag
- ASAS-SN (All-Sky Automated Survey for Supernovae; Shappee és mtsai, 2014): 35 464 fedési kettőscsillag
- GCVS (General Catalog of Variable Stars; Samus és mtsai, 2017): 6 849 fedési kettőscsillag
- *Kepler* (*Kepler* Eclipsing Binary Stars; Kirk és mtsai, 2016): 2 876 fedési kettőscsillag
- *TESS* (*TESS* Eclipsing Binary Stars; Prša és mtsai, 2022): 4 584 fedési kettőscsillag
- VSX (The International Variable Star Index; Watson és mtsai, 2006): 971 757 fedési kettőscsillag

Ezzel összesen 1 026 046 fedési kettőscsillagot válogattam ki, ebbe beleszámolva a több különböző katalógusban is szereplő objektumokat. A duplikátumok azért maradtak benne a listában, mert később egyszerűbb volt kiszűrni ezeket a csillagokat. Ezt követően a fedési kettőscsillagok katalógusbeli koordinátáit felhasználva megkerestem a *Gaia* adatbázisban a hozzájuk tartozó *Gaia* azonosítókat. Ezután megnéztem, hogy ezekhez a csillagok megtalálhatóak-e megoldások a nem egyedülálló csillagokra vonatkozó katalógusban.

3.2. A *Gaia* Archive NSS katalógusa

A *Gaia* Archive-on¹² elérhető katalógusban való keresés során több problémába is belefutottam. A *Gaia* DR3 adatkibocsátása során a csillagok fő asztrometriai paraméterei, mint pl. égi koordináták, sajátmozgás, parallaxis és fotometriai adatok egy külön katalógusban találhatóak a *Gaia* nem egyedülálló csillagokra vonatkozó katalógusához képest. Az eredeti katalógusban csak egyetlen paraméter, a *non-single star* utal arra, hogy a csillag megtalálható-e az NSS katalógusban. Viszont valamilyen oknál fogva ennek a paraméternek a kézikönyvbéli leírása nem igazán volt felhasználóbarát. Nehezen lehetett értelmezni ezen paraméter értékét, mert látszólag véletlenszerűen változott 0-7 érték között. Amennyiben 0-nál nagyobb értéket vett fel, az arra utalt, hogy a csillag szerepel a

¹²<https://gea.esac.esa.int/archive/>

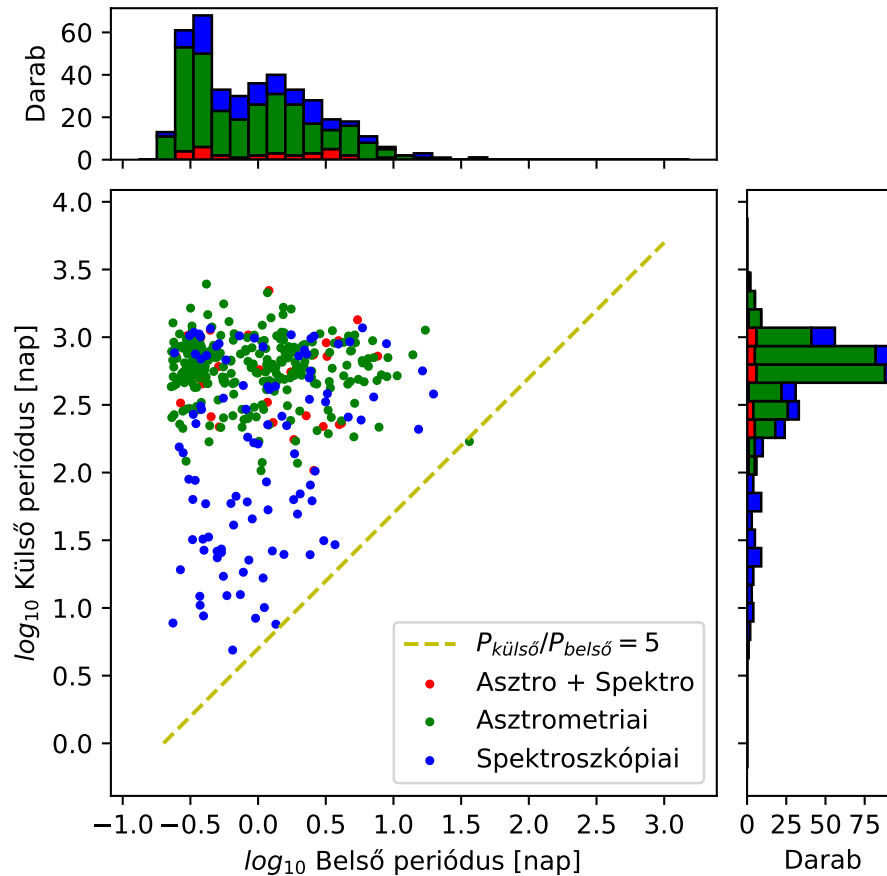
nem egyedülálló csillagokra vonatkozó katalógusban, viszont bizonyos esetekben mégsem találtam meg. Későbbiekben sikerült megfejteni a *non-single star* paramétert. A paraméter által megadott 10-es számrendszerbeli számot át kell váltani 2-es számrendszerbe, például az 5 érték 2-es számrendszerben „101” lesz és ennek a 3 számjegynek az értéke arra utal, hogy milyen típusú megoldások találhatóak meg az NSS katalógusban. Ha az érték egyet vesz fel, akkor van az adott módszerrel megoldása a csillagnak, ha 0, akkor nincs. Az első számjegy utal az asztrometriai megoldásra, a második a spektroszkópiára, a harmadik pedig a fotometriai úton nyert megoldásra. Viszont ez továbbra sem magyarázta, hogy miért hiányoznak bizonyos csillagok a NSS katalógusból annak ellenére is, hogy a *non-single star* paraméter nem volt egyenlő 0-val. Végül a *Gaia* Archive helyett a Vizier¹³ (*Gaia* kollaboráció, 2022; Ochsenbein és mtsai, 2000) katalógusát használtam, mivel a *Gaia* kollaboráció a Vizier adatbázismegosztó honlapra is feltöltött minden táblázatot és adatot. Letöltöttem az egész nem egyedülálló csillagokra vonatkozó katalógust, majd egy saját magam által írt program segítségével, a *Gaia* azonosítók alapján kikerestem az összes olyan csillagot, amely megtalálható volt a fedési kettőscsillagokat tartalmazó katalógusokban. Megvizsgálva a katalógusban található adatokat, bizonyos nem egyedülálló csillagokra vonatkozó katalógusban nem szerepeltek égi koordináták. Feltételezésem szerint ezért nem találtam meg bizonyos esetekben a *Gaia* Archive-on egyes csillagokat, mivel ott koordináták alapján próbáltam keresni. Másik előnye volt még a Vizier adatbázis használatának, hogy ott nem ömlesztve, hanem a különböző módszerekkel talált kettőscsillagok külön táblázatban voltak közzétéve, ezért lehetőségem volt arra, hogy ha a kettőscsillagnak több különböző NSS megoldása is van, akkor az összes különböző paramétert ki tudtam nyerni a megoldásokból.

3.3. Eredmények

Az összes fedési kettőscsillag esetén megvizsgáltam, hogy van-e olyan *Gaia* NSS pályamegoldása, amely esetén a periódus legalább 5-szörösen meghaladja a fedési kettőscsillag periódusát. A listában maradt duplikált csillagok kiszűrése után összesen 403 hierarchikus hármas csillagrendszer jelölt maradt. Nem meglepő módon a jelöltek között sok olyan rendszer van, amely esetén a fotometriai megoldás megtalálta a belső kettőscsillag fedéseit és a másik asztrometriai vagy spektroszkópiai megoldás utal a rendszer hármas mivoltára. A 403 csillagból a külső pályák megoldásai közül 100 volt tisztán spektroszkópiai, 267 tisztán asztrometriai, 31 pedig ezen két megoldás kombinációja volt. Kombinált megoldásokra a *Gaia* NSS katalógusban az *AstroSpectro* megnevezést használják. A csillag kettős természete mind a radiálissebesség-görbén, mind pedig asztrometria segítségével

¹³<https://vizier.cds.unistra.fr/viz-bin/VizieR>

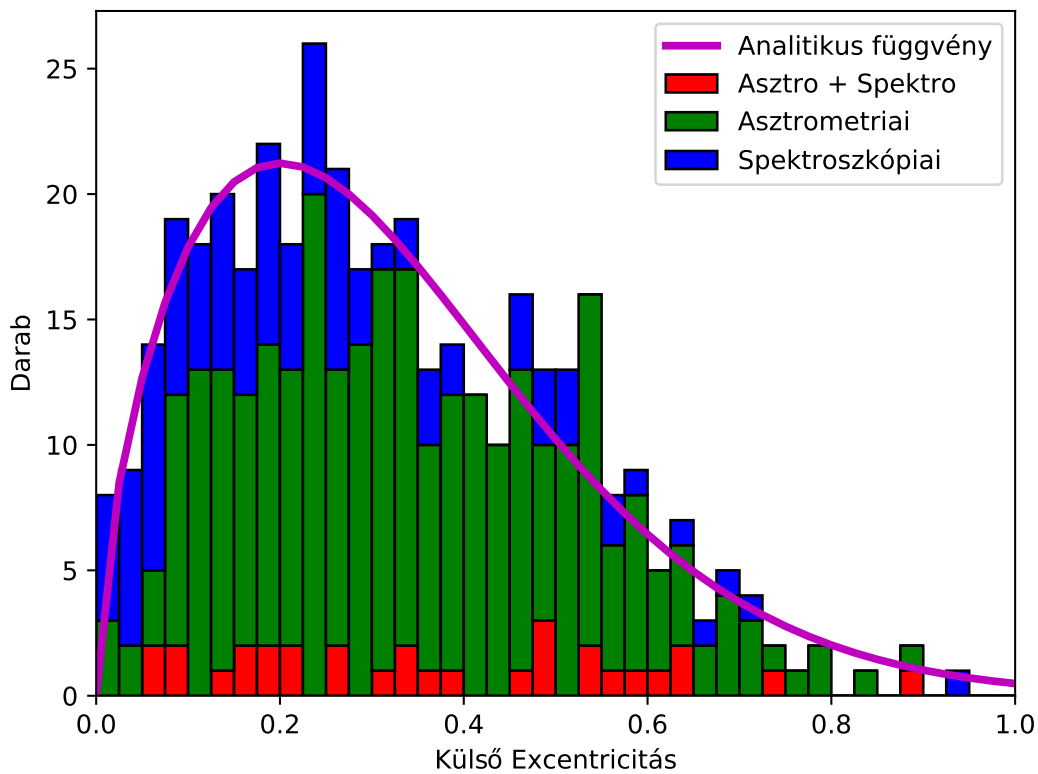
látszik, így ilyenkor a két különböző módszerrel gyűjtött mérési adatokat együtt modellezték. Három objektum esetén pedig nem kombinálták az eredményeket, hanem külön illesztették őket, így két különböző típusú megoldásuk is volt. Az ilyen esetekben sem tértek el a periódusok egymástól jelentősen, így mind a két megoldás valószínűsíthetően jó lehet, viszont én minden esetben az asztrometriai megoldást vettem alapul.



8. ábra. A belső pálya periódusának eloszlása a külső pálya periódusának függvényében. A szaggatott vonal jelképezi a periódusarány ötszörösét, a két panel pedig a külső és belső pálya periódusainak eloszlását. A különböző színek a különböző típusú megoldásokat jelölik. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023a)

A 8. ábrán látható a külső, tág pálya periódusának eloszlása a belső kettős periódusának a függvényében a 403 talált jelölt esetén. Megvizsgálva a hármas csillagrendszer jelöltek külső pályáinak a periódusát, látható, hogy ez a csillagok nagy részénél nem haladja meg az 1000 napot. A legrövidebb periódusú hármas csillagrendszer jelöltek esetén 10 napig sem tart a feltételezett harmadik komponensnek a rendszer tömegközéppontja körüli teljes keringése. A legtöbb jelölt 300 és 1000 nap közötti külső pálya periódussal rendelkezik. A belső kettőscsillagok keringési ideje pár órától a körülbelül 10 napos ideig terjed. Ezek a szélsőértékek alapvetően az általam használt katalógusok és a *Gaia*

űrtávcső megfigyelési effektusaiból következnek. A *Gaia* DR3 katalógusában található adatok 34 hónapnyi azaz körülbelül 1000 napnyi mérést fednek le, tehát ennél hosszabb külső periódussal rendelkező csillagokat már nem nagyon talált a *Gaia* űrtávcső. A belső periódus esetén pedig sokkal gyakrabban találunk olyan fedési kettőscsillagokat, amelyek rövid periódussal rendelkeznek. A megfigyelési effektusokhoz tartozik még az asztrometria megoldások alacsony száma is a 100 nap alatti külső periódussal rendelkező jelöltek esetén. A rövidebb keringési idő egyben kisebb szeparációt is jelent, ezt pedig nehezebben tudja detektálni a *Gaia* asztrometria módon. A kutatásomat megelőzően összesen körülbelül 400 olyan hármas rendszert ismertünk, amely esetén a külső periódus nem haladja meg az 1000 napot. Olyan csillagok esetén, ahol a külső periódus még a 200 napot sem éri el pedig mindössze megközelítőleg 30 rendszert ismertünk (Tokovinin, 2018; Borkovits és mtsai, 2016; Hajdu és mtsai, 2019; Hajdu és mtsai, 2022).

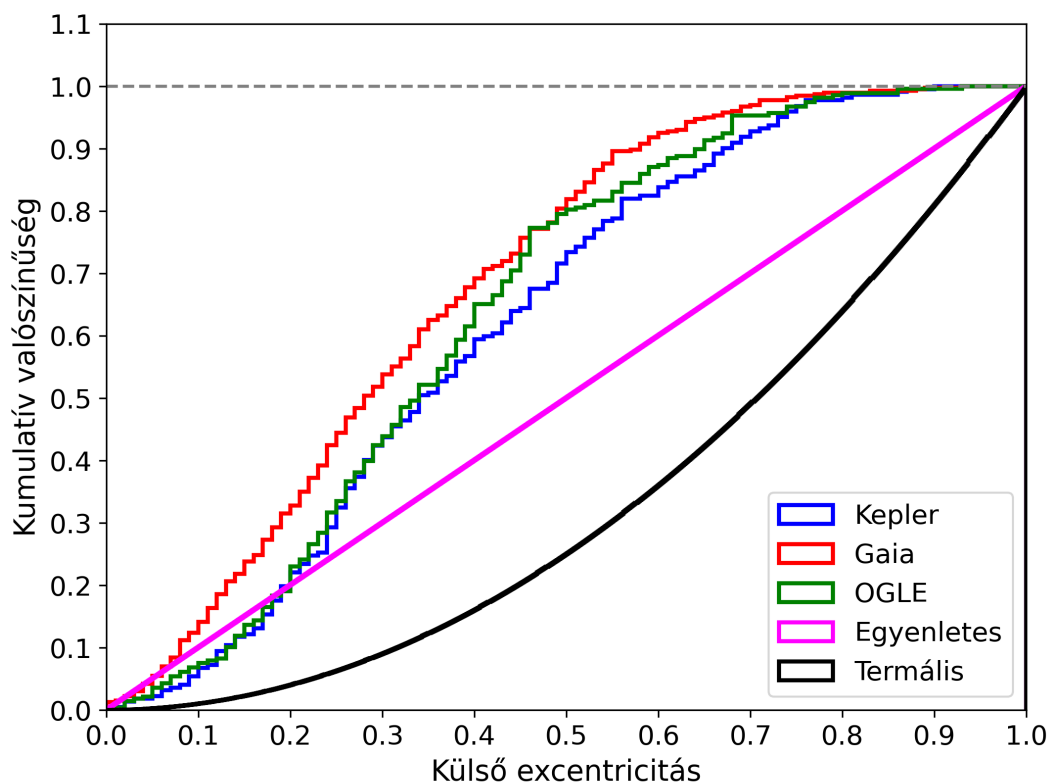


9. ábra. A külső pálya excentricitásának eloszlása. A különböző színek a különböző megtalálási módszereket jelölik. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023a)

A 9. ábra mutatja a külső pályák excentricitásának eloszlását. A különböző színek a különböző megtalálási módszereket jelölik. A lila görbe az eloszlást legjobban leíró analitikus függvény:

$$\frac{\delta N}{\delta e} = 8,34e^{0,618} \cdot \exp[-5,15e^{1,618}], \quad (14)$$

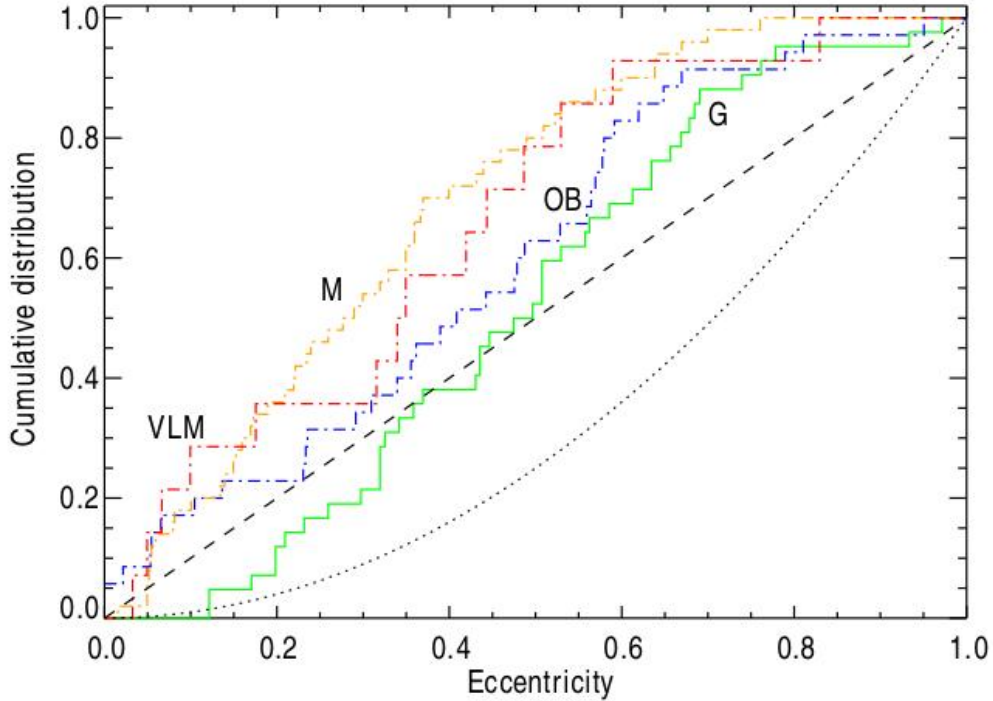
ahol az N darabszámot az e a külső pálya excentricitását jelöli (nem pedig a exponenciális függvényt, amelyet megkülönböztetésképpen exp-ként jelöltem).



10. ábra. A külső pályaeccentricitás kumulatív eloszlása. zöld: OGLE mérések (Hajdu és mtsai, 2019), kék: *Kepler* mérések (Borkovits és mtsai, 2016), piros: *Gaia* mérések (Czavalinga és mtsai, 2023a), lila: egyenletes eloszlás, fekete: „termális” eloszlás, ahol $\delta N/\delta e \propto e$. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023a)

A 10. ábra mutatja a kumulatív eloszlását a külső pályák excentricitásának. Az ábrán összehasonlításként szerepelnek különböző korábbi tanulmányokban meghatározott ugyanilyen eloszlások. A *Kepler* űrtávcső adatait átvizsgálva jutottak Borkovits és mtsai 2016-ban a kék színnel jelölt kumulatív eloszlásra. Hajdu és mtsai pedig 2019-ben az OGLE adatokat átvizsgálva a zöld színnel jelölt eredményt kapták. A fekete és lila görbe pedig két elméleti úton meghatározott kumulatív eloszláshoz tartozik. A lila „egyenletes” görbe esetén az eloszlás minden excentricitás értékre ugyanaz ($\delta N/\delta e = \text{állandó}$). A fekete vonal a „termális” eloszlást mutatja, amelyet Jeans (1919) határozott meg. Megfigyelhető, hogy mind a két elméleti görbétől jelentősen eltérnek a mért értékek, viszont hasonlítanak

a Duchêne és mtsai (2013) cikkében található mezőbeli kettőscsillagok excentricitásainak kumulatív eloszlásához (lásd 11. ábra). Az általam meghatározott kumulatív eloszlást legjobban a következő analitikus egyenlet írja le:



11. ábra. Duchêne és mtsai (2013) cikkében található kettőscsillagok excentricitásainak kumulatív eloszlása. Zöld színű görbe: Naphoz hasonló csillagok esetén (Raghavan és mtsai, 2010); narancs színű görbe: kis tömegű csillagok esetén (Pourbaix és mtsai, 2004); piros színű görbe: nagyon kis tömegű csillagok $M < 0,1M_{odot}$ és barna törpék esetén (Dupuy és mtsai, 2011); kék színű görbe: nagy tömegű csillagok esetén (Abt és mtsai, 2005; Sana és mtsai, 2012)

$$N(> e) \simeq 1 - \exp[-(e/0,363)^{1,618}] \quad (15)$$

Ennek az analitikus függvénynek a deriváltja értelemszerűen a (14) egyenletet adja vissza. A nagyobb excentricitású rendszerek esetén valószínűsíthetően a rendszer nem lesz hosszútávon stabil. Rappaport és mtsai (2013) cikkében szereplő egyenlete alapján lehet meghatározni a lehetséges excentricitásokat a periódusarány függvényében, amennyiben a rendszer dinamikailag stabil:

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} \gtrsim 4,7(1+e)^{3/5}(1-e)^{-9/5}, \quad (16)$$

tehát, például ha a periódusarány 1000, akkor a még stabil pálya csak maximálisan 0,97 excentricitásnál lehetséges. 100-as periódusarányánál már csak 0,78-as excentricitásértéknél marad stabil a rendszer. Ez pedig okozhat egy megfigyelési effektust, hiszen nagyobb excentricitású rendszerek már széteshettek hamarabb.

3.4. Hierarchikus hármas jelöltek megerősítése

Céлом volt, hogy ezeket a jelölteket megerősítsem a *Gaia* módszereihez képest más független módszer segítségével. Ennek egyik hozadéka, hogy így lehetőségem volt tesztelni a *Gaia* méréseinek pontosságát, emellett pedig számot adhatok arról, hogy mennyire megbízható a *Gaia* NSS katalógusa és az általam kidolgozott módszer. Első lépésként azt vizsgáltam meg, hogy a hármas jelöltek között van-e már ismert hierarchikus hármas rendszer.

3.4.1. Ismert hierarchikus hármas rendszerek

Az összes jelöltre megnéztem az elérhető publikációkat a SIMBAD (Wenger és mtsai, 2000) és a NASA ADS ¹⁴ adatbázisában. A legtöbb objektumra nem találtam hasznos információt, csak nagyobb égboltfelmérő programokban szerepeltek. Viszont összesen 27 rendszer esetén találtam arra utaló információkat a szakirodalomban, hogy ezek hierarchikus hármas vagy többes csillagrendszerek lehetnek. Ezeket a rendszereket a 2. és a 3. táblázatok tartalmazzák.

A külső pálya periódusát megvizsgálva 14 rendszer esetén (KIC 8330092, KIC 6525196, KIC 8043961, KIC 9665086, KIC 8719897, KIC 10991989, HD 181068, KIC 7955301, TIC 229785001, TIC 437230910, TIC 99013269, SAO 167450, HD 81919 és HD 190583) az irodalmi értékekkel összehasonlítva a *Gaia* megoldásokból származó értékeket azok jó egyezést mutatnak. Ezeket a rendszereket így meg tudtam erősíteni. Az egyedüli kivétel a SAO 167450, amely a szakirodalom szerint az AA Ceti fedési kettőscsillag vizuális párja. Az egész rendszer valójában egy 2+2 négyes rendszer, amelynek egyik kettőscsillaga az AA Ceti, míg a másik halványabb párja a SAO 167450. A *Gaia* űrtávcső a belső kettős pályáját találta meg, nem pedig a két kettőscsillag közös tömegközéppontja körüli keringési pályáját. 7 rendszer többes természetét a szakirodalomban egyértelműen azonosították, viszont a külső pálya periódusát nem sikerült meghatározni. A V0857 Her esetén a spektroszkópiai úton meghatározott kiszélesedési függvény utal egy harmadik komponens léteire. A TIC 229082842 és TIC 59042291 esetén a fedési minimumidőpontok változása egyértelműen szinuszos jellegűek, viszont a külső pálya periódusát nem sikerült belőlük megállapítani. A TIC 305635022 esetén a *TESS* fénygörbét vizsgálva

¹⁴<https://ui.adsabs.harvard.edu/>

Név	<i>Gaia</i> periódus [nap]	Ref. periódus [nap]	Ref.	Leírás
GN Boo	637,46 (A)	3492,96	1, 2	
V0899 Her	454,30 (A)	1351,43	3, 4	A komponens, valószínűleg fel nem bontott kettőscillag
V0857 Her	292,87 (S)	–	5	valószínűsíthető harmadik komponens
TIC 99013269	609,52 (A)	604,23	6	triplán fedő hármas
LO And	329,92 (A)	10782,18	7, 8	
KIC 8330092	549,93 (A)	581,00	9, 11	
KIC 6525196	422,56 (A)	418,20	10, 11	
KIC 8043961	487,90 (A)	478,60	10, 11	
KIC 9665086	856,41 (A)	856,00	9, 11	
KIC 8719897	332,89 (S)	333,10	10, 11	
KIC 10991989	550,64 (AS)	548,00	10, 11	
HD 181068	45,47 (S)	45,47	12, 13	triplán fedő hármas
KIC 7955301	208,80 (S)	209,10	10, 11	
TIC 305635022	843,88 (A)	–	14	
TIC 229785001	165,99 (S)	165,29	6	triplán fedő hármas
EM Psc	844,67 (A)	1205,33	15	

2. táblázat. Ismert rendszerek a szakirodalomból a referencia periódussal, és a hozzájuk tartozó *Gaia* megoldás periódusa (A: asztrometriai, S: spektroszkópiai, AS: kombinált megoldás). (1) Yang és mtsai, 2013; (2) Wang és mtsai, 2015; (3) Lu és mtsai, 2001; (4) Qian és mtsai, 2006; (5) Pribulla és mtsai, 2009; (6) Visual Survey Group (VSG; Kristiansen és mtsai, 2022); (7) Gürol és mtsai, 2005; (8) Huang és mtsai, 2021; (9) Conroy és mtsai, 2014; (10) Rappaport és mtsai, 2013; (11) Borkovits és mtsai, 2016; (12) Derekas és mtsai, 2011; (13) Borkovits és mtsai, 2013; (14) Zasche és mtsai, 2022; (15) Qian és mtsai, 2008. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023a)

Név	<i>Gaia</i> periódus [nap]	Ref. periódus [nap]	Ref.	Leírás
TIC 229082842	847,00 (A)	–	16	szinuszos változás az ETV-n
TIC 438071843	910,91 (A)	2,62	17	exobolygó 2,6 napos periódussal
TIC 437230910	292,98 (A)	293,94	18, 19	
TIC 59042291	1275,11 (A)	–	16	szinuszos változás a ETV-n
TIC 24704862	1126,71 (A)	–	20, 21	a HD 10607 alrendszere
SAO 167450	25,68 (S)	25,68	22, 23	fedési periódusa a vizuális párnak, az AA Ceti-nek
TIC 410654298	169,60 (AS)	–	24, 25	a HD 102579 alrendszere
HD 81919	690,31 (S)	721,33	26, 27	Aab komponens
HATS-26	193,54 (A)	3,30	28	forró Jupiter 3 napos periódussal
TIC 301956407	63,15 (S)	–	29, 21	a HD 155875 alrendszere
HD 190583	671,51 (A)	662,50	30	

3. táblázat. Ismert rendszerek a szakirodalomból a referencia periódussal, és a hozzájuk tartozó *Gaia* megoldás periódusa (A: asztrometriai, S: spektroszkópiai, AS: kombinált megoldás). (16) Lohr és mtsai, 2015; (17) Vanderburg és mtsai, 2016; (18) Pourbaix és mtsai, 2004; (19) Griffin, 2006; (20) Luyten, 1955; (21) Tokovinin, 2014; (22) Herschel, 1782 Washington Double Star Katalógus alapján (WDS Mason és mtsai, 2001); (23) Fekel és Willmarth, 2009; (24) Gilliss, 1868 WDS alapján (Mason és mtsai, 2001); (25) Tokovinin, 1997; (26) van den Bos, 1921; (27) Tokovinin, 2019; (28) Espinoza és mtsai, 2016; (29) Innes, 1895; (30) Triaud és mtsai, 2017. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023a)

ugyanarról a pixelről származó fluxusértékekből egyértelműen egy másik fedési kettős jele is megfigyelhető, így valószínűsíthető, hogy egy 2+2 négyes rendszerrel van dolgunk. A maradék 3 objektum (TIC 24704862, TIC 301956407, TIC 410654298) pedig alrendszere már ismert, több csillagot tartalmazó rendszereknek. Ezekben az esetekben feltételezhetjük, hogy a *Gaia* valós pályákat talált meg, így ezek a rendszerek is megerősítést nyertek. Viszont 6 rendszer esetén egyértelmű különbségek vannak a *Gaia* által mért periódusok és a szakirodalomban elérhető periódusok között. 2 csillag (TIC 438071843, HATS-26) bár fedési kettőscsillagként van kategorizálva, ám a szakirodalom szerint magányos csillagok exobolygóval. Elképzelhető, hogy a *Gaia* által meghatározott pálya egy távolabbi komponenshez tartozik. A maradék 4 csillag esetén pedig megfigyelhető, hogy a *Gaia* által mért periódus és a szakirodalomban elérhető periódus hányadosa egész-, vagy félegész számot ad, amely arra utal, hogy a *Gaia* alulmértavételezte a pályát.

3.4.2. ETV-k elemzése a *TESS* űrtávcső adatai alapján

A *TESS* űrtávcső méréseit felhasználva konzulensem, Dr. Mitnyan Tibor a FITSH (Pál, 2012) programcsomag felhasználásával előállította a talált hierarchikus hármas csillagrendszer jelöltek fénygörbéit a Mitnyan és mtsai (2020) cikkében található módszerhez hasonlóan, majd a WOTAN Python csomag (Hippke és mtsai, 2019) segítségével levonta a fénygörbéken maradt nem asztrofizikai jeleket (pl. befénylés más objektumról). A fénygörbék elkészítése után meghatározta a fedési minimumidőpontokat, ezekből pedig megalkotta a rendszerek ETV diagramját.

A fénygörbék előállítása után több csillag esetén észrevettem, hogy a katalógusban szereplő periódusok nem egyeznek meg a *TESS* fénygörbéken mérhető fedési periódusokkal. Ezeket a csillagokat tartalmazza a 4. táblázat.

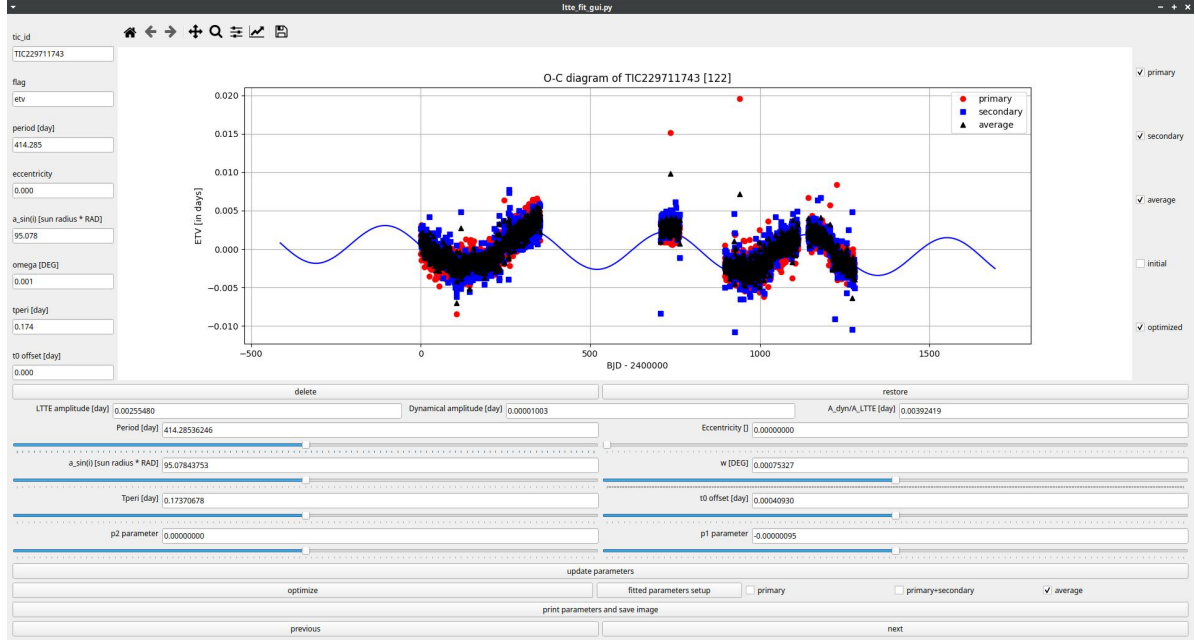
A ETV-k tanulmányozásához készítettem egy Python3 programozási nyelven alapuló, grafikus felülettel rendelkező programot. A célom ezzel az volt, hogy megkönnyítsem a csillagok ETV diagramjának a vizsgálatát. A programom képes az (7) egyenlet alapján az ETV-k LTTE illesztésére. Az egyenlethez hozzákapcsoltam még egy egyenes egyenletét, amelyben a paramétereket szabadon változtathattam. Ennek oka az volt, hogy így a pontatlan kezdőidőpont- és periódus értékeket ki tudtam küszöbölni. A programot képessé tettem interaktív illesztésre. Csúszkák segítségével különböző paraméterek értékeit tudom beállítani, miközben a program automatikusan változtatja és rajzolja fel az ETV pontokra az LTTE görbét. Ez lehetővé tette, hogy kevés ponttal rendelkező ETV-k esetén is tudjam tanulmányozni a lehetséges megoldásokat. Szemmel viszont nem lehet a legjobb illesztést megtalálni, ezért egy Nelder-Mead algoritmust¹⁵ is implementáltam a kódomba. Az algoritmus bemenő paramétereiként a kézi illesztés paramétereit használtam fel. Végző

¹⁵Optimalizáló algoritmus, segítségével a paramétertéren lokális minimumok kereshetőek

Név	Katalógus	Katalógusbeli periódus [nap]	Módosított periódus [nap]
T-Dra0-00240	VSX	6,7255	0,510774
TIC 71612483	<i>TESS</i>	1,2168732	2,432884
ROTSE1 J142907.71+391359.6	VSX	0,30255899	0,356598
CzeV3812	VSX	2,552908	5,099693
TIC 395459736	<i>TESS</i>	3,6081353	10,645300
TIC 156091346	<i>TESS</i>	2,3154933	4,635822
KIC 2583777	VSX	0,479052	0,958116
KIC 3869326	<i>Kepler</i>	8,586044	0,416574
NSVS 3410088	VSX	2,58401	5,165620
KELT KC03C02563	VSX	0,58604341	1,172104
ASASSN-V J042708,29+453939.7	VSX	2,954	5,908340
ASAS J072627-1613.8	VSX	0,356033	0,293739
TIC 44631957	<i>TESS</i>	15,3114276	7,649232
HD 47451	VSX	4,55025	9,100553
TIC 437230910	<i>TESS</i>	0,380517	0,761006
NSVS 3900682	VSX	4,43334098	2,216110
T-Cas0-13655	VSX	1,845491	4,655776
T-Cas0-04329	VSX	2,62607	3,227946
TIC 393870193	APASS, VSX	0,167114	0,286254
TIC 267352521	APASS, VSX	0,7224	0,530320
TIC 394340319	<i>TESS</i>	3,0375069	6,074511
TIC 394657952	<i>TESS</i>	0,8723736	1,744773
TIC 270507305	<i>TESS</i>	1,2282336	2,456490
TIC 410654298	<i>TESS</i>	19,9520732	36,397144
OGLE-GD-ECL-01161	VSX	0,38388394	3,925129
TIC 305536358	<i>TESS</i>	0,5464738	1,091392
TIC 402918064	<i>TESS</i>	1,2811614	2,562248
TIC 342782002	<i>TESS</i>	1,0971318	2,199392
TIC 337370789	<i>TESS</i>	0,8380236	0,449518
TIC 273571987	<i>TESS</i>	0,7514777	1,502912
TIC 197760286	<i>TESS</i>	0,6013042	1,202615
NSVS 4650785	VSX	2,74598	1,372904

4. táblázat. Módosított periódusok a katalógusokban található fedési kettőscsillagokra.
Forrás: Czavalinga és mtsai (2023a)

lépésként a kód képes a Markov-láncos Monte Carlo (MCMC)¹⁶ módszerrel feltérképezni a paraméterteret az illesztés hibáinak meghatározása céljából, és hogy a lokális minimumon kívül is kereshessenek lehetséges további megoldásokat. A programom grafikus felülete a 12. ábrán látható.



12. ábra. Az általam készített program grafikus felülete.

Első körben azt vizsgáltam meg, hogy a jelölt csillagok ETV-jén látható-e nemlineáris változás. Két okból volt elképzelhető, hogy nem láthatunk változást az ETV-ben: az egyik, hogy kevés adatpont állt a rendelkezésre, vagy pedig ténylegesen nem volt megfigyelhető nemlineáris változás. Amennyiben látható volt nemlineáris változás, azokat a csillagokat további vizsgálat alá vettem.

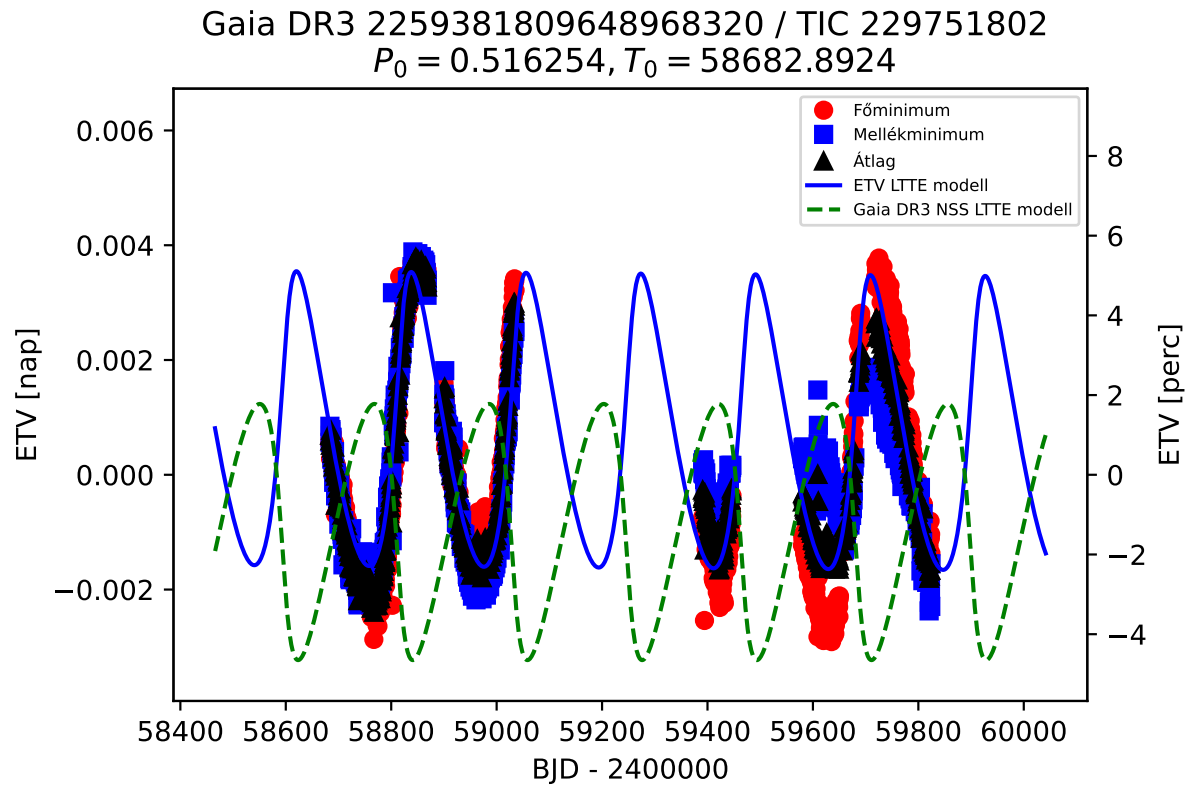
Első körben, a *Gaia* NSS adatbázisában található paramétereket helyettesítettem be a (8) és (12) egyenletekbe, hogy megvizsgáljam az LTTE és dinamikai hozzájárulást az ETV-hez. Arra jutottam, hogy azon rendszerek esetén, ahol jó lefedettséggel rendelkezett az ETV, a dinamikai perturbációk miatti minimumidőpont-változások elhanyagolhatóak voltak a LTTE-hez képest, így a kódomba csak a (7) egyenletet implementáltam.

3.4.3. Jól lefedett ETV-vel rendelkező hármas rendszerek

A *TESS* űrtávcső észlelési stratégiája, amelyről a 3.4.2. alfejeztben írtam bővebben, sok esetben nem teszi lehetővé, hogy egy éven belül 1 hónapnál hosszabb észlelési adatsor álljon rendelkezésre. Viszont az ekliptika pólusa közelében egy éven belül több szektorban

¹⁶A módszer képes, a paraméterteret feltérképezni, ezzel a lokális minimumon kívül is keres megoldásokat és hibaszámításra is használható

is megfigyelhette a jelölteket a *TESS* űrtávcső. 22 hierarchikus hármas csillagrendszer jelölt *TESS* fénygörbéi elegendőnek bizonyultak ahhoz, hogy modellezés segítségével egyértelműen el lehessen dönteni a harmadik komponens jelenlétét a rendszerben, így ezek a jelöltek megerősítettnek tekinthetők. Első körben a *Gaia* NSS megoldásaiból származó paramétereket helyettesítettem be az analitikus LTTE összefüggésbe. Legtöbb esetben nem volt megfelelő az illeszkedés, így utána az összes paramétert szabad paraméterként kezelve megkerestem a kódom segítségével a legjobb illeszkedéseket, és azok hibáit.

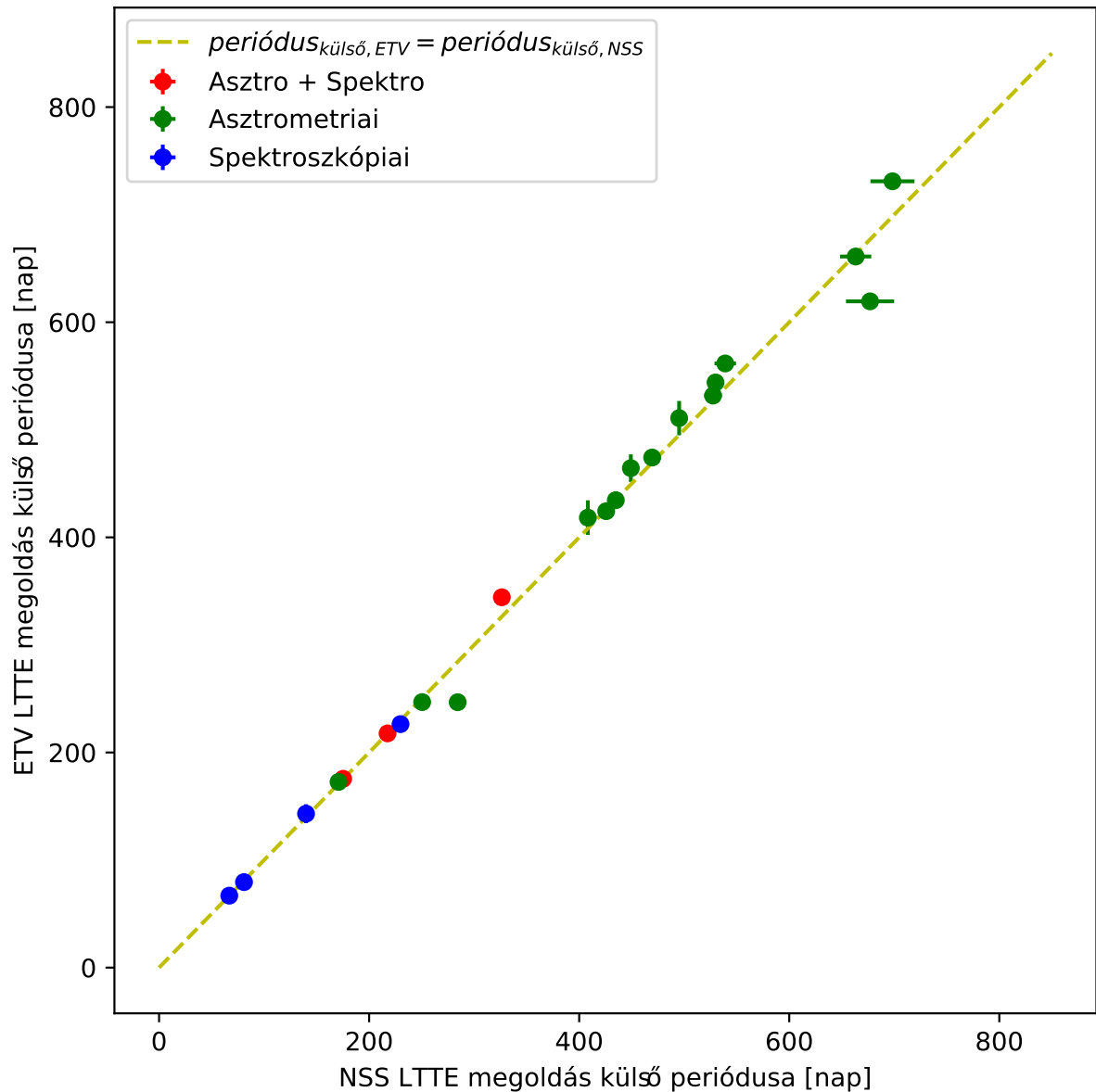


13. ábra. A *Gaia* DR3 2259293058444658432 rendszer ETV-jének LTTE illesztése. A zöld szaggatott vonal jelöli a *Gaia* NSS megoldásokból származó paraméterekkel számolt LTTE modellt, a kék vonal pedig a legjobb LTTE illesztést. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023a)

Egy példa a hierarchikus hármas rendszerek ETV-jére és az illesztett modellekre a 13. ábrán látható, a többi rendszer illesztése a 8.1. függelékben található. Az ábrákat megvizsgálva látható, hogy a fő különbséget sok esetben az okozza, hogy a *Gaia* megoldás periasztron argumentuma 180° -ban ($\omega_{NSS} = \pm\omega_{ETV}$) tér el az ETV-ből származó megoldásoktól. Ez nem véletlen, hanem annak a jelenségnek a következménye, hogy az ETV-k esetén mindig a belső fedési kettőscsillag tömegközéppontjának periasztron argumentuma szerepel az LTTE megoldásban, míg a *Gaia* megoldások esetében nem tudjuk az adatokból eldönteni, hogy a belső kettős jele dominálta-e a méréseket, vagy pedig a harmadik

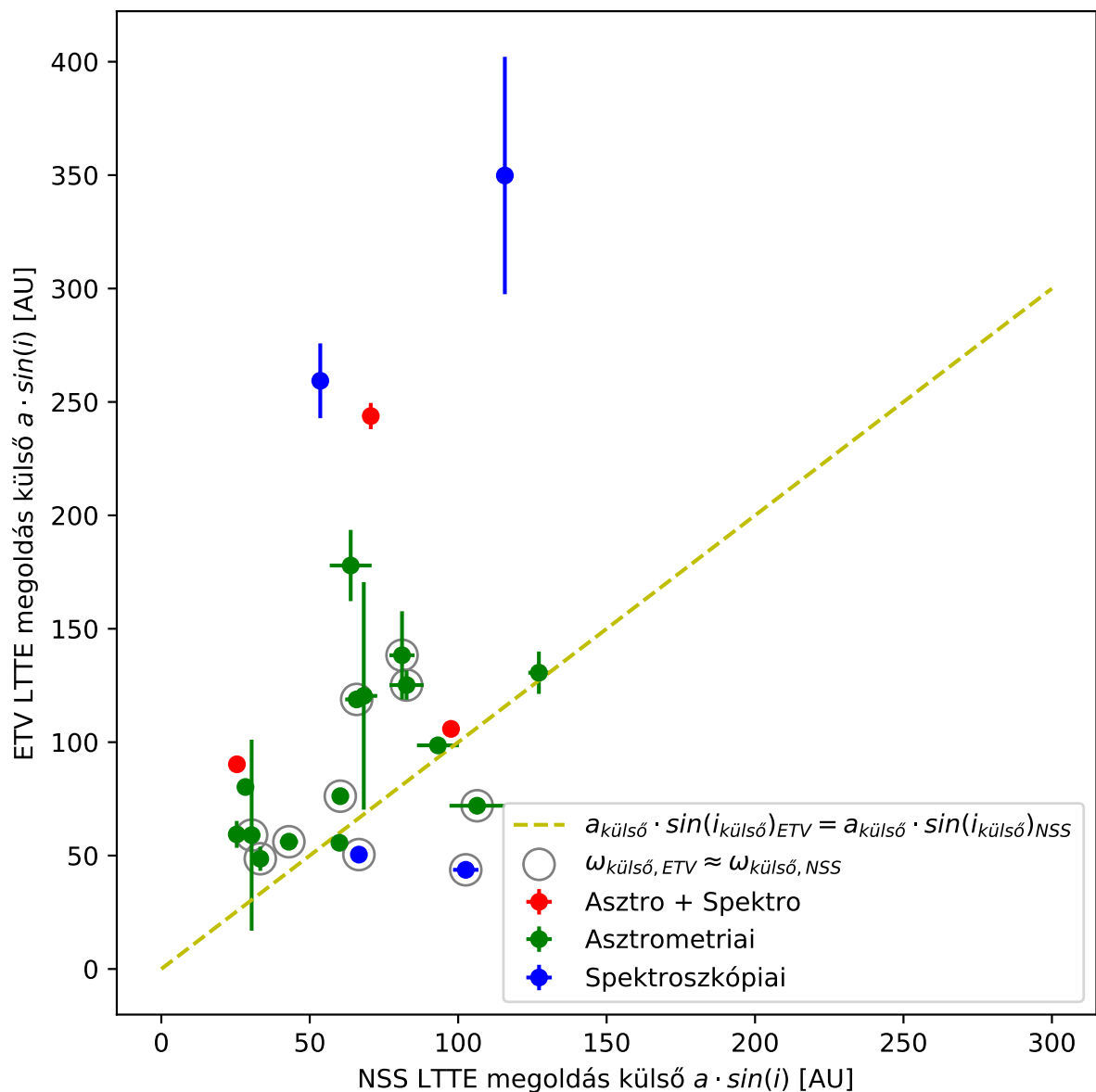
komponens jele. Miután mind a 22 rendszer esetén illesztettem az LTTE-ket, összehasonlítottam a *Gaia* NSS katalógusból és a saját illesztésekből kapott 4 főbb pályaparamétert.

A különböző megoldásokból származó periódusok összehasonlítása a 14. ábrán látható. A két érték az összes csillagnál nagyon jó egyezést mutat, ebből arra lehet következtetni, hogy a *Gaia* űrtávcső mind az asztrometriai, mind a spektroszkópai megoldások esetén a külső pálya periódusát pontosan tudta meghatározni. Ez egyértelműen arra utal, hogy a talált jelöltek valószínűsíthetően valósak.



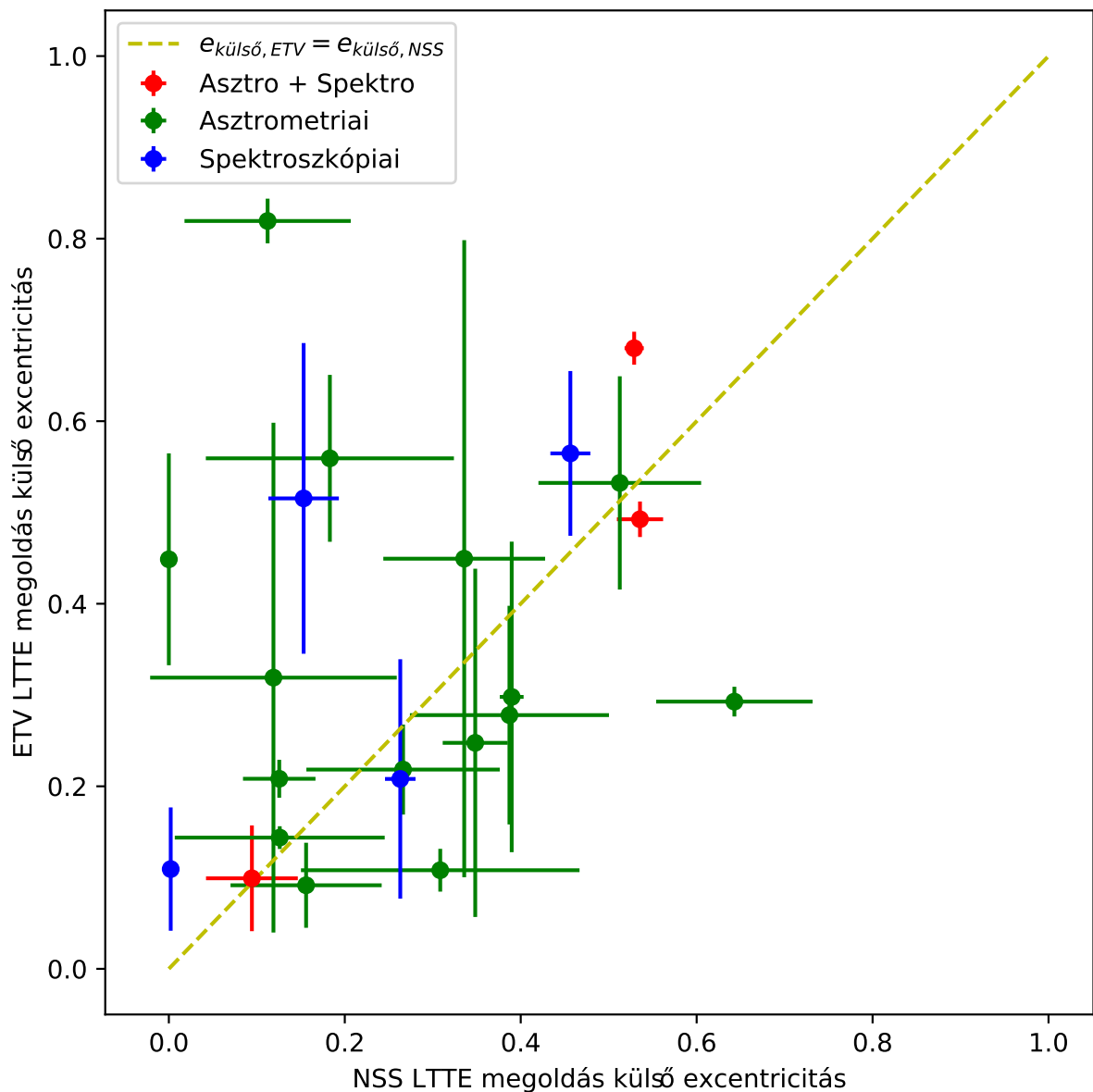
14. ábra. Korreláció a külső pálya periódusában a *Gaia* és az ETV megoldások esetén. A sárga szaggatott vonal mutatja a két érték egyenlőségét. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023a)

A félnagyengelyek vetületének különböző megoldásokból származó összehasonlítása a 15. ábrán látható. Látható, hogy a korreláció jóval gyengébb a két érték között, nagyobb különbségek is előfordulnak. Ennek egyik oka, amelyet a 2.5. alfejezetben fejtettem ki, hogy az asztrometriai megoldások esetén a *Gaia* a hármas rendszer fotocentrumát figyelte meg, és amennyiben a külső csillag és a belső kettős fényessége összehasonlítható, akkor a fotocentrum nem fog egybeesni a belső kettős látszólagos helyével. Ezt szemléletesen a későbbiekben részletezett 30. ábra is mutatja. Ilyen esetben alulbecsüli a félnagyengely vetületének valódi méretét.



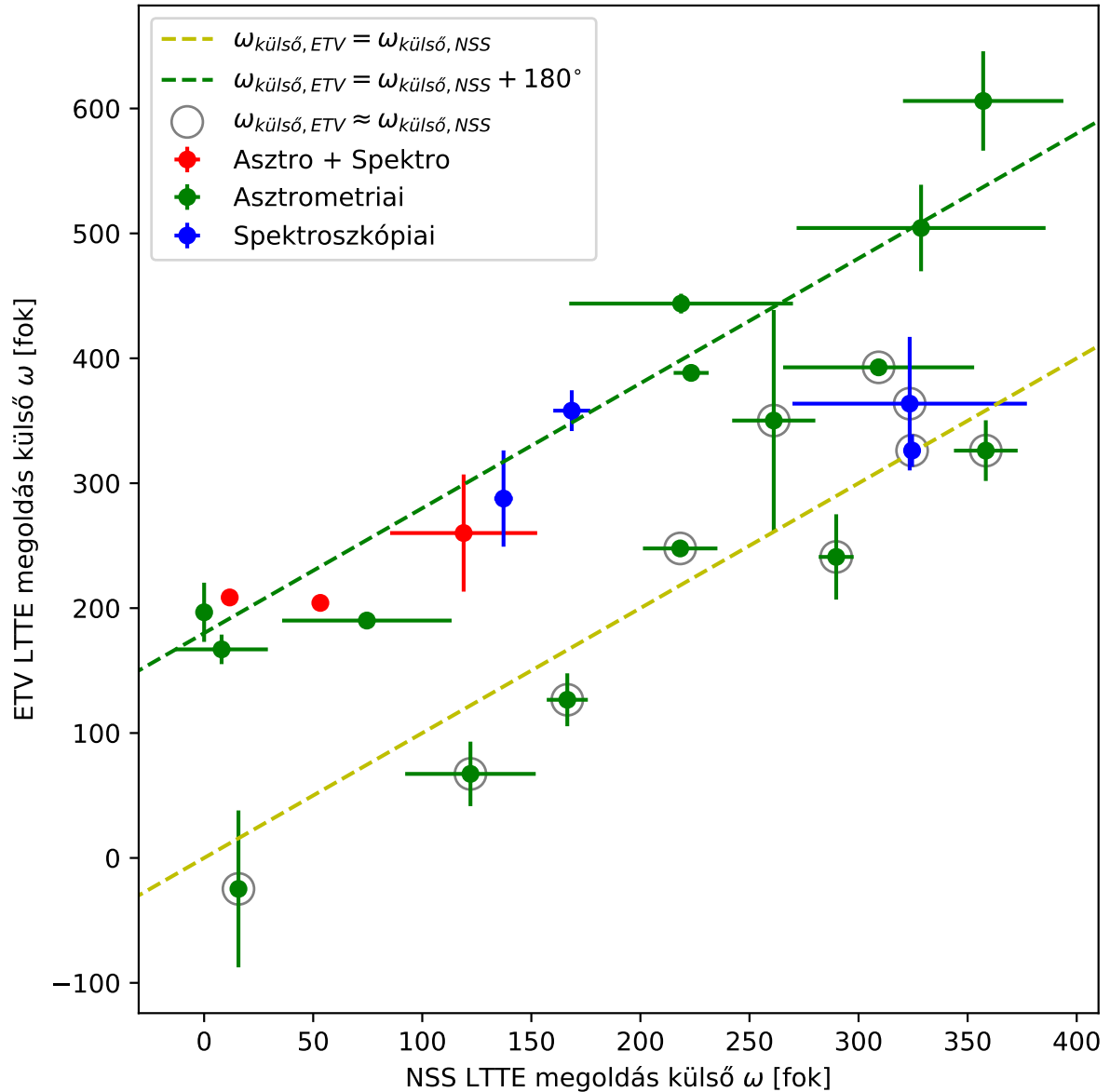
15. ábra. A külső pálya félnagyengelye látóirányunkra merőleges vetületének korrelációja az NSS és az ETV megoldások esetén. A sárga szaggatott vonal mutatja a két érték egyenlőségét. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023a)

A másik oka pedig, hogy asztrometriai módon az égbolton csak látszó szögméretként lehet a félnagy tengely látóirányunkra merőleges vetületét meghatározni, míg az LTTE esetén az abszolút méretet. Így a látszó méretet át kellett számolnom a parallaxis segítségével abszolút méretre, ami viszont újabb hibát hozhat be. A spektroszkópai megoldások esetén pedig a hiba mértékének meghatározásához látnom kellett volna az egyedi spektrumokat, de mivel a *Gaia* kollaboráció ezt még nem tette közzé, így nem lehet pontosan tudni, hogy mennyire megbízhatóak a keresztkorrelációs függvények, amivel a csillagok radiális sebességét határozták meg.



16. ábra. Korreláció a külső pálya excentricitásában az NSS és az ETV megoldások esetén. A sárga szaggatott vonal mutatja a két érték egyenlőségét. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023a)

A különböző megoldásokból származó excentricitásnak az összehasonlítása a 16. ábrán látható. A excentricitást mind az ETV-kből, mind pedig asztrometriai és spektroszkópiai módszerekkel nehéz pontosan meghatározni, ez látszódik az értékek hibájából is. A hibahatáron belül vizsgálva viszont hasonló értékeket kaptam.



17. ábra. Korreláció a külső pálya periasztron argumentumában az NSS és az ETV megoldások esetén. A sárga szaggatott vonal mutatja a két érték egyenlőségét, a zöld pedig a 180° -kal eltoltat. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023a)

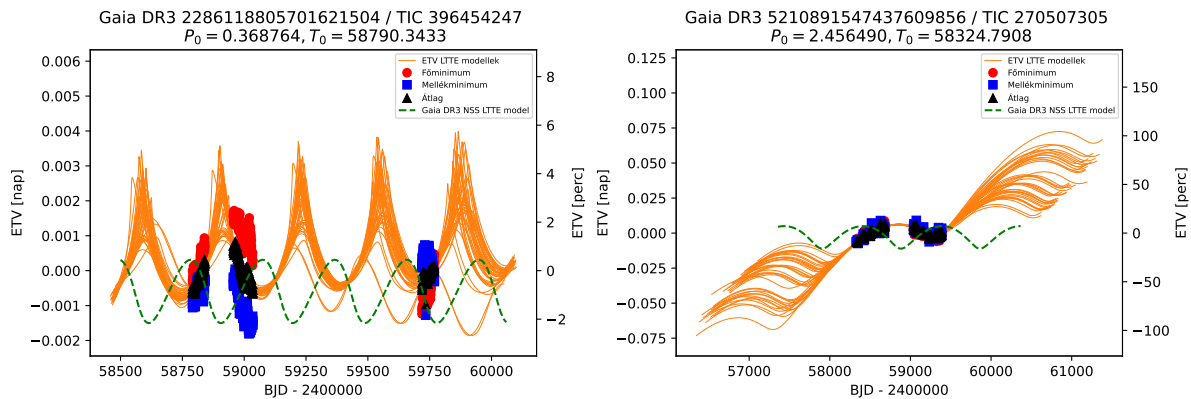
A periasztron argumentumának különböző megoldásokból származó értékek összehasonlítása a 17. ábrán látható. Az ETV-ből származó paramétert minden esetben a belső kettőscsillag pályájára határozzuk meg, míg a *Gaia* NSS megoldások esetén nem lehet eldönteni, hogy az úrtávcső melyik csillagot követte. Amennyiben nem a kettőscsil-

lagot, akkor a periasztron argumentuma 180° -kal eltér az ETV-ből mérthez képest. Az ábra jobb átláthatósága érdekében alkalmaztam egy $\pm 360^\circ$ eltolást. Ez értelem szerűen nem változtatott a méréseken a periasztron argumentumának periodicitása miatt.

A *TESS* űrtávcső méréseinek köszönhetően egy teljesen független eljárással tudtam tesztelni a *Gaia* űrtávcső által meghatározott paramétereket. Arra a következtetésre jutottam ebből, hogy a periódus a legmegbízhatóbb paraméter az összes közül. Az excentricitás bár jelentős hibával terhelt, de az értékek hibán belül megegyeznek. Viszont a vetített félnagy tengelyt és a periasztron argumentumát óvatosan kell kezelni, de az eltérés többek között a mérések közötti módszertani különbségből is származik.

3.4.4. Kevés ETV ponttal rendelkező hármas rendszerek

Ahogy fentebb említettem, a hármas rendszer jelöltek egy jelentős részénél csak 2-3 db szektor érhető el, ez pedig nem volt arra elegendő, hogy az LTTE illesztésével egyértelműen meghatározhassam a paramétereket. Viszont 192 csillag esetén egyértelműen nemlineáris változásokat mutat az ETV diagram, ebből arra következtettem, hogy ténylegesen egy harmadik test okozta LTTE, vagy dinamikai perturbáció okozta minimumidőpont-változást látok, emiatt ezeket a jelölteket is megerősítettnek tekintem. Legtöbb ilyen hierarchikus hármas csillagrendszerrel elegendő volt az ETV-t kézzel illeszteni, hogy meg lehessen állapítani, hogy nem található rá egyértelmű pályamegoldás. Több esetben viszont az MCMC módszer segítségével térképeztem fel a paraméterteret és ebből állapítottam meg, hogy létezik-e egyértelmű megoldás. A 18. ábrán látható egy ilyen próbaillesztés.



18. ábra. ETV illesztése több különböző paraméterű LTTE görbével. Látható, hogy több jelentősen különböző pályaparaméterekkel rendelkező megoldás is képes kielégítően leírni a mért adatpontokat. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023a)

A maradék 158 csillagrendszer esetén vagy nem volt egyáltalán *TESS* mérés, vagy csak nagyon kevés szektor állt rendelkezésre, ahol az ETV-n nem látszott jelentős nemlineáris változás. Ezekben az esetekben nem voltam képes megerősíteni a harmadik komponens

jelenlétét, így ezek a csillagok csak jelöltek maradnak továbbra is. Később érdemes majd újra megvizsgálni ezeket a fedési kettőscsillagokat harmadik tag keresése céljából.

3.4.5. Triplán fedő hierarchikus hármas csillagrendszerek

A *TESS* fénygörbéket áttanulmányozva összesen 4 olyan rendszert találtam, ahol egy harmadik test fedéseit is meg lehet figyelni. A harmadik komponens fedései egyértelműen megerősítik, hogy hierarchikus hármas rendszerről van szó. Ezeket a rendszereket a későbbiekben fotodinamikai módszerekkel is elemeztem.

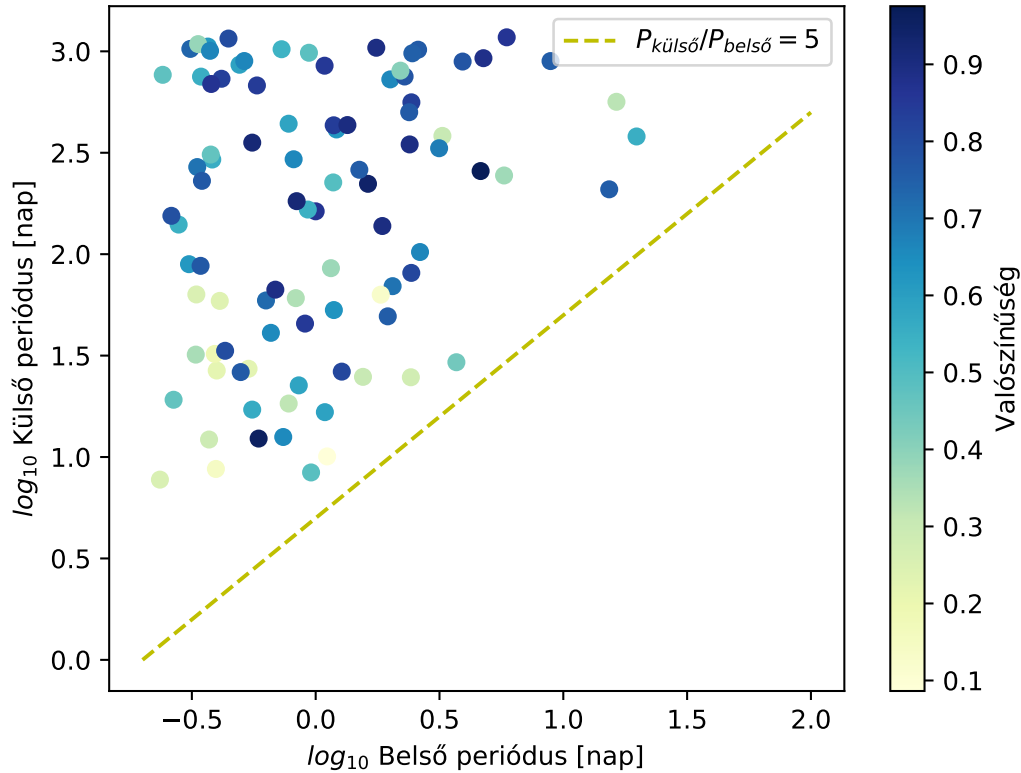
3.4.6. Jelöltek rövid külső keringési pályával

A jelenleg ismert hármas csillagrendszerek közül a legrövidebb külső keringési idővel rendelkező csillag a λ Tau (Ebbighausen és mtsai, 1956; Fekel és mtsai, 1981), amelyben a harmadik komponens mindössze 33 nap alatt kerüli meg a belső kettőscsillagot. A *Gaia* NSS megoldásaiból viszont több tucat olyan jelöltet találtam, amely esetén a külső pálya periódusa 35 nap alatt van. Jelenleg nagyon kevés ilyen rendszert ismerünk, tehát ezen rendszerek nagy számát óvatosan kell kezelni. Fontos lenne ezek megerősítése független módszerek segítségével. Sajnos az összes ilyen rendszer esetén vagy nem állt rendelkezésre elégséges mennyiségű *TESS* mérés, vagy pedig az ETV-ben nem találtam LTTE- vagy dinamikai effektusra utaló változást. Az LTTE esetén ez nem meglepő, mivel a nagyon rövid külső keringéssel rendelkező rendszerek esetén az LTTE amplitúdója minimális, a *TESS* űrtávcső méréseiből nem lehet kimutatni. Nagy felbontású spektroszkópia segítségével jó eséllyel ki lehetne mutatni hármas mivoltukat, de ez pedig jelenleg nem áll rendelkezésemre. A 8. ábrán látható, hogy a 35 nap alatti keringési periódussal rendelkező csillagrendszerek esetén az összes jelölt spektroszkópai NSS megoldással rendelkezik. Sajnos magukat az időben felbontott spektrumokat közvetlenül nem tudtam vizsgálni, mivel a *Gaia* kollaboráció ezeket egyelőre nem tette közzé, csak az átlagolt spektrumokat, amelyek azonban alkalmatlanok ilyen típusú vizsgálatokra. Így egyelőre csak egy kezdetleges elemzést tudtam elvégezni Bashi és mtsai (2022) munkája nyomán, akik a GALAH¹⁷ és a LAMOST¹⁸ már ismert spektroszkópai kettőscsillagai esetén vizsgálták meg, hogy a *Gaia* NSS spektroszkópai megoldásai mennyire megbízhatóak. A vizsgálat végén empirikus úton meghatároztak egy függvényt, amely segítségével megkaphatóak, hogy az adott *Gaia* NSS spektroszkópai megoldások mennyire megbízhatóak. Az összes spektroszkópai csillagrendszerre megvizsgáltam, hogy az empirikus összefüggés alapján mekkora valószínűséggel lehet megbízni a mérésekben. Az 19. ábrán ábrázoltam a hármas rendszer jelöltek külső periódusait a belső kettős periódusainak függvényében. A

¹⁷GALactic Archaeology with HERMES

¹⁸Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope

színek annak valószínűségét jelzik, hogy mennyire lehet valós a mérés, és hogy mennyire megbízhatóak az abból kapott paraméterek.



19. ábra. A belső pálya periódusának eloszlása a külső pálya periódusának függvényében. A színek jelölik a valószínűségét a megoldásoknak. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023a)

Ez alapján a 92 SB1 típusú jelöltből 64 legalább 50%-os, míg 36 rendszer legalább 75%-os valószínűséggel lehet valódi. Általánosan megfogalmazható, hogy a hosszabb periódusok esetén nagyobbak a valószínűségi értékek. Bár van olyan jelölt, amelyik bár nagyon rövid külső keringéssel rendelkezik, és magas valószínűségi értéket kaptunk, még nem biztos, hogy a rendszer valóban hármas. Egyrészt Bashi és mtsai (2022) csak kettőscsillagokat vizsgáltak, így nem tudjuk, hogy hármas rendszerek esetén is érvényes-e az empirikus összefüggés. Emellett pedig elképzelhető, hogy a *Gaia* NSS megoldása helyes, viszont nem egy külső pályát talált meg, hanem egy 2+2 elrendezésű négyes rendszer fedéseket nem mutató másik kettőscsillagát. Ilyen volt például a 3.4.1. alfejeztben említett SAO 167450 rendszer is. Ennek okán nem tudtam megerősíteni az empirikus összefüggéssel az SB1-es jelöltek valódiságát.

3.5. Összefoglaló

3.5.1. Hármás jelöltek azonosítása a *Gaia* űrtávcsővel

A *Gaia* űrtávcső NSS megoldásait felhasználva eddig nem ismert hármás rendszereket kerestem egy teljesen új, a szakirodalomban még nem ismert módszer segítségével. Összesen 403 hármás rendszer jelöltet találtam, amelyből 376 eddig nem ismert. A rendszerek alapvető paramétereinek eloszlásait elemezve arra jutottam, hogy az általam talált jelöltek jól illeszkednek az eddig ismert hármás rendszerek közé. A jelöltek valódi mivoltának megerősítése céljából a *TESS* űrtávcső adatait felhasználva fedésminimumidőpont-analízist hajtottam végre. 22 rendszerrel egyértelműen meg lehetett állapítani, hogy egy harmadik test által okozott LTTE effektus látható az ETV-ken. 192 rendszer esetén a nemlineáris fedési minimumidőpont-változásokból lehet következtetni egy harmadik komponens jelenlétére. A *TESS* fénygörbéit megvizsgálva találtam négy eddig nem ismert triplán fedő hierarchikus hármás csillagrendszert.

Mennyiség	Típus
403	Összes hármás rendszer jelölt
27	Szakirodalomból ismert rendszerek
22	Elegendő <i>TESS</i> minimumidőpont, hogy megerősítsük a külső pályát
192	Jelentős nemlineáris változás az ETV-n
4	Triplán fedő hierarchikus hármás rendszer
4	Valószínűsíthető 2+2 négyes rendszer
245	Összes megerősített hármás rendszer
218	Összes megerősített új hármás rendszer
158	Nincs elegendő adat a harmadik komponens megerősítésére

5. táblázat. A talált hierarchikus hármás csillagrendszer jelöltek számossága. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023a)

Így összesen 218 jelölt esetén sikerült megerősítenem, hogy ténylegesen szoros hierarchikus hármás csillagrendszerek. Ez pedig több, mint a fele az eddig ismert szoros hierarchikus hármás rendszereknek. Az általam megerősített rendszerek pontos számadatai a 5. táblázatban találhatóak.

3.5.2. A *Gaia* NSS megoldásainak ellenőrzése egy független módszer segítségével

Mint hogy az ETV lefedettsége elegendő volt 22 csillag esetén, így ezekre egy független módszer segítségével lehetőségem volt a *Gaia* NSS megoldásokból származó paraméterek

pontosságát vizsgálni. Az ETV pontokra egy analitikus LTTE függvényt illesztettem, az ebből származó paramétereket pedig összehasonlítottam a *Gaia* NSS megoldásokból származó paraméterekkel. Arra a következtetésre jutottam, hogy a külső pálya periódusai jó egyezést mutatnak. A excentricitások a hibahatáron belül megegyeznek, viszont a periasztron argumentuma és a vetített félnagy tengely paraméterek esetén nagyobb különbségek is előfordulnak, tehát ezekkel az értékekkel óvatosan kell bánni.

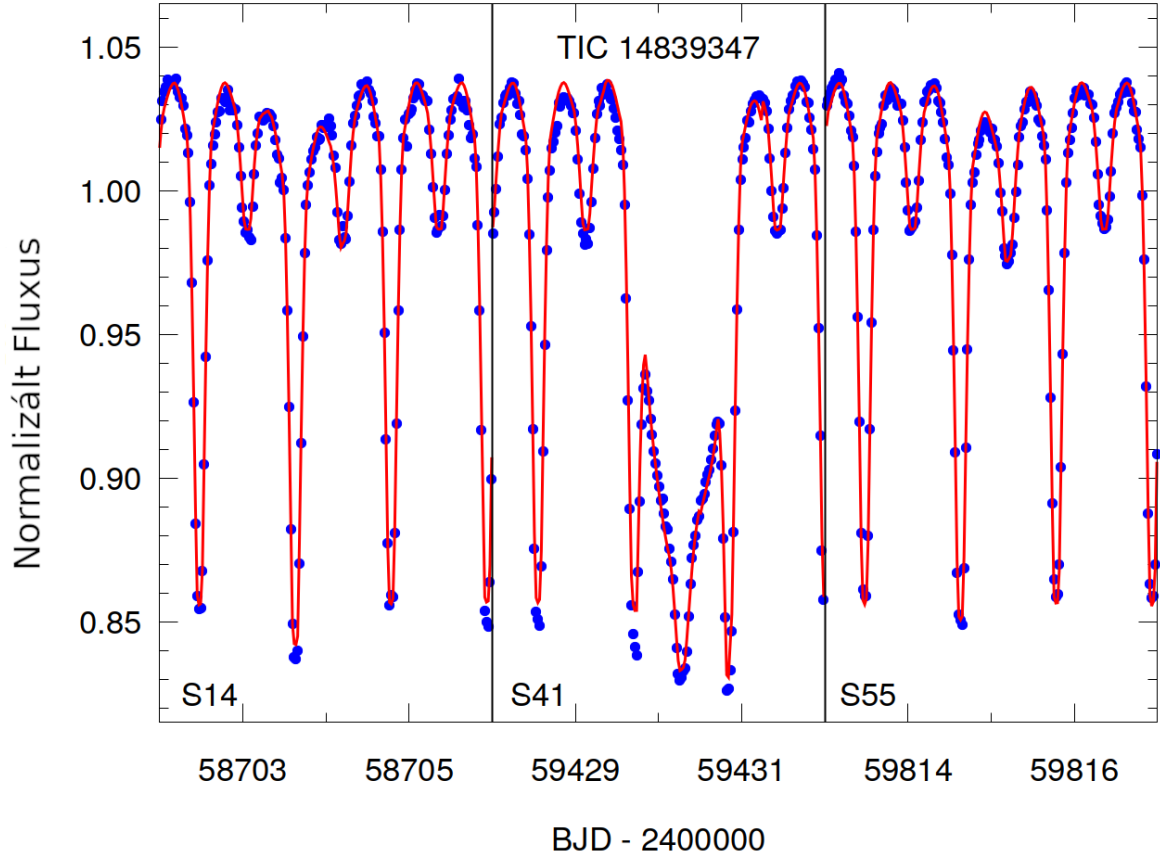
4. Szoros triplán fedő hármas csillagrendszerek fotodinamikai analízise

4.1. Bevezetés

Az olyan hierarchikus hármas rendszerek, amelyeknél a harmadik komponensek is fedéseket mutatnak, még nagyobb jelentőséggel bírhatnak, hiszen a harmadik komponens fedésének megfigyeléséből új információk nyerhetőek ki a rendszerből. Az előző fejezetben részletezett módon a *Gaia* NSS katalógusban találtam négy, eddig nem ismert triplán fedő rendszert. Az ilyen típusú rendszerek fénygörbéit elemezve egy sor orbitális és relatív sztelláris paramétert meg lehet határozni, és ha ezeket kombináljuk más mérési módszerekkel nyert adatokkal is, például a csillag spektrális energia eloszlásával, vagy a csillag radiálissebesség-görbéjével, akkor a rendszer fontosabb abszolút paraméterei is meghatározhatóak. A legtöbb, fedéseket mutató hierarchikus hármas csillagrendszert a nagy fotometriai égboltfelmérő programok (mint pl. a *Kepler* és *TESS* űrtávcsövek) adatainak áttanulmányozásával sikerült megtalálni. A 3.3. alfejezetben részletezett módon viszont e szakterületen most először sikerült azonosítanom triplán fedő hármas csillagrendszereket (Czavalinga és mtsai, 2023a). A korábbi ilyen jellegű kutatások során ezek a rendszerek rejtve maradtak, ami nem meglepő a rendszerek fénygörbéinek ismeretében. A *Gaia* katalógus lehetővé tette, hogy célzottan keressük ezeket a objektumokat, így feltűnt a harmadik test fedése. A keresés során valójában 6 db fedési hármas csillagot találtam, de ebből kettő már ismert rendszer volt. A négy újonnan felfedezett rendszer a következő: TIC 14839347, TIC 66893949, TIC 66893949, és a TIC 88206187.

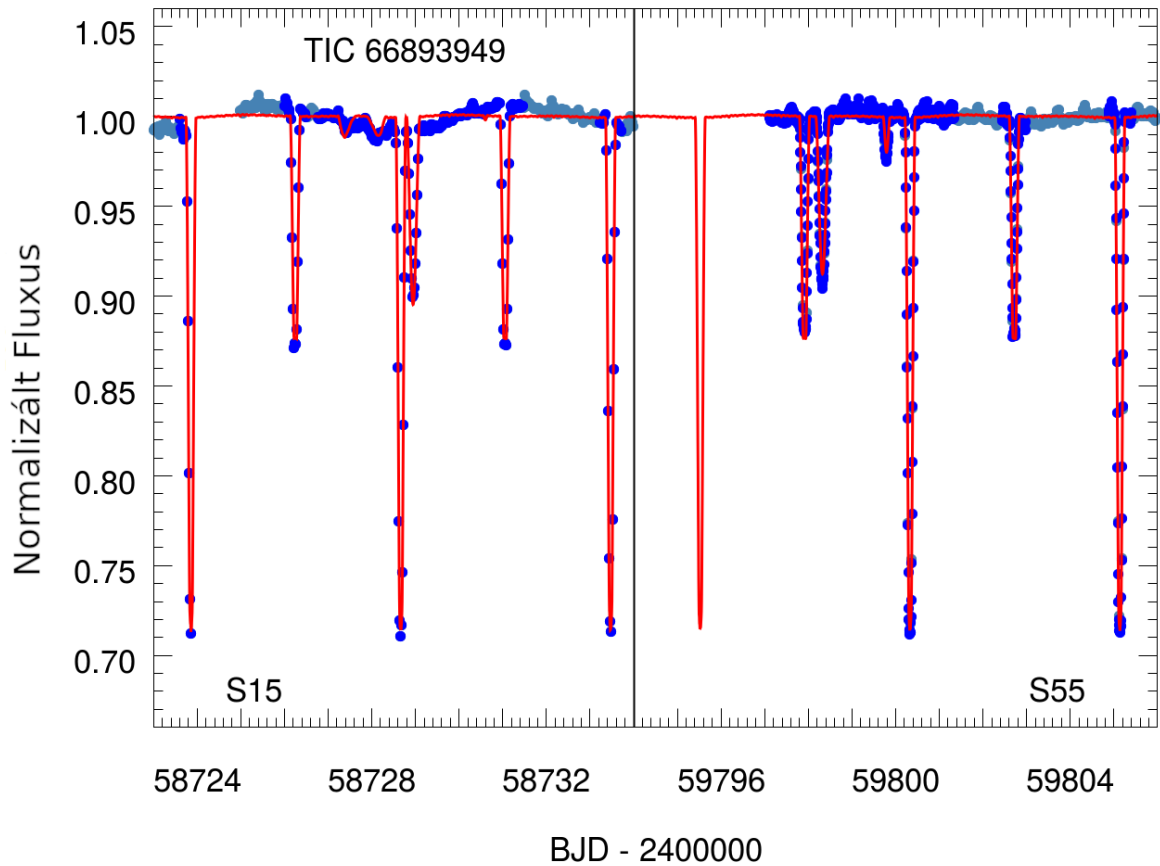
4.2. Triplán fedő hierarchikus hármas rendszerek *TESS* fénygörbéi

- A TIC 14839347-et a 14., 15., 41. és 55. *TESS* szektorban észlelték. A jól definiálható főminimum a 41. szektorban volt megfigyelhető. Emellett pedig a 14. és 55. szektorban éppen csak észrevehetően, de megtalálható a harmadiktest-fedések egy-egy mellékminimuma is. A fedések a 20. ábrán láthatóak.



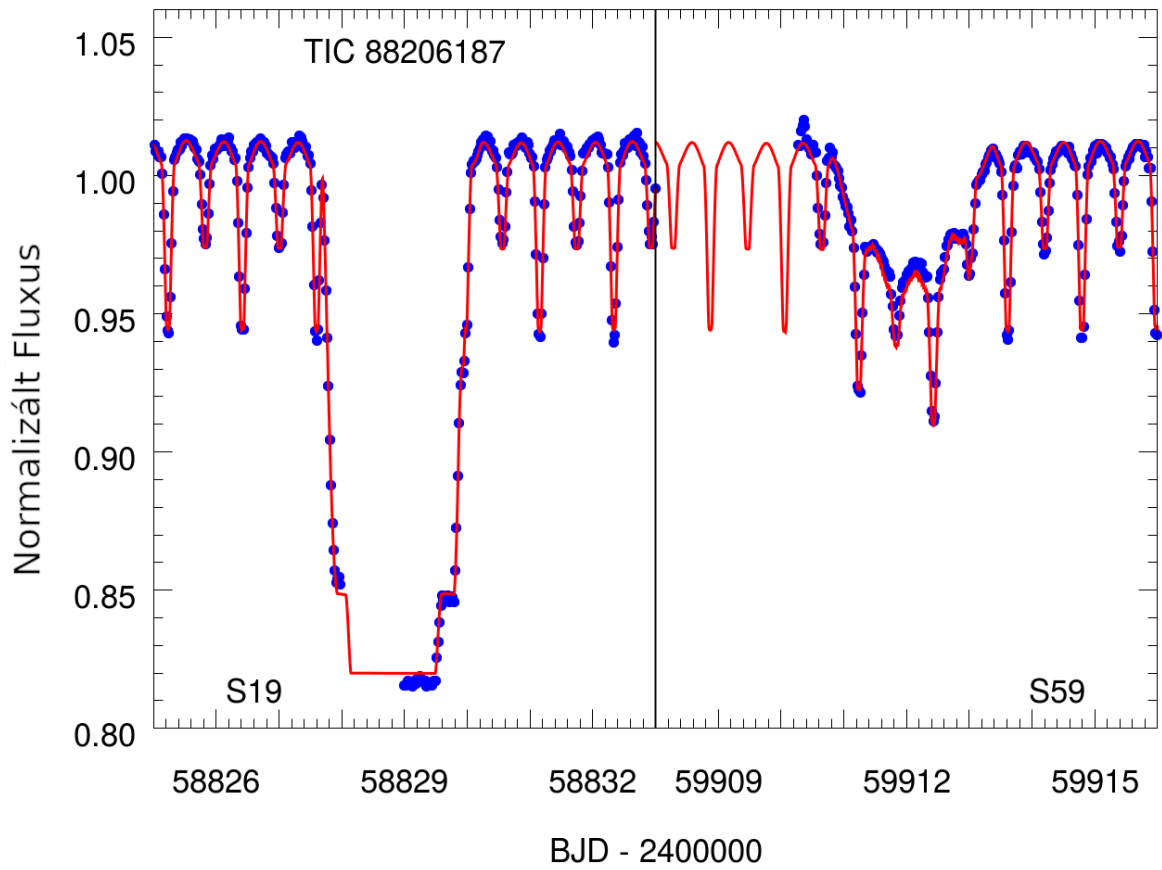
20. ábra. A TIC14839347 rendszer *TESS* fénygörbéi a harmadik test által okozott fedésekkel. A kék pontok a mérési adatok, a piros vonal a 4.4.1. alfejezetben részletezett modellillesztés. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023b)

- A TIC 66893949-et a 15., 41. és az 55. *TESS* szektorban észlelték. A 15. szektorban található egy extra fedés, amelyet a harmadik komponens okoz. Az 55. szektorban két extra fedést is azonosítottam, különböző fedésmélységgel. Ezt a rendszert később tőlünk függetlenül Rowan és mtsai is felfedezték 2023-ban, de részleteiben nem elemezték. A fedések a 21. ábrán láthatóak.



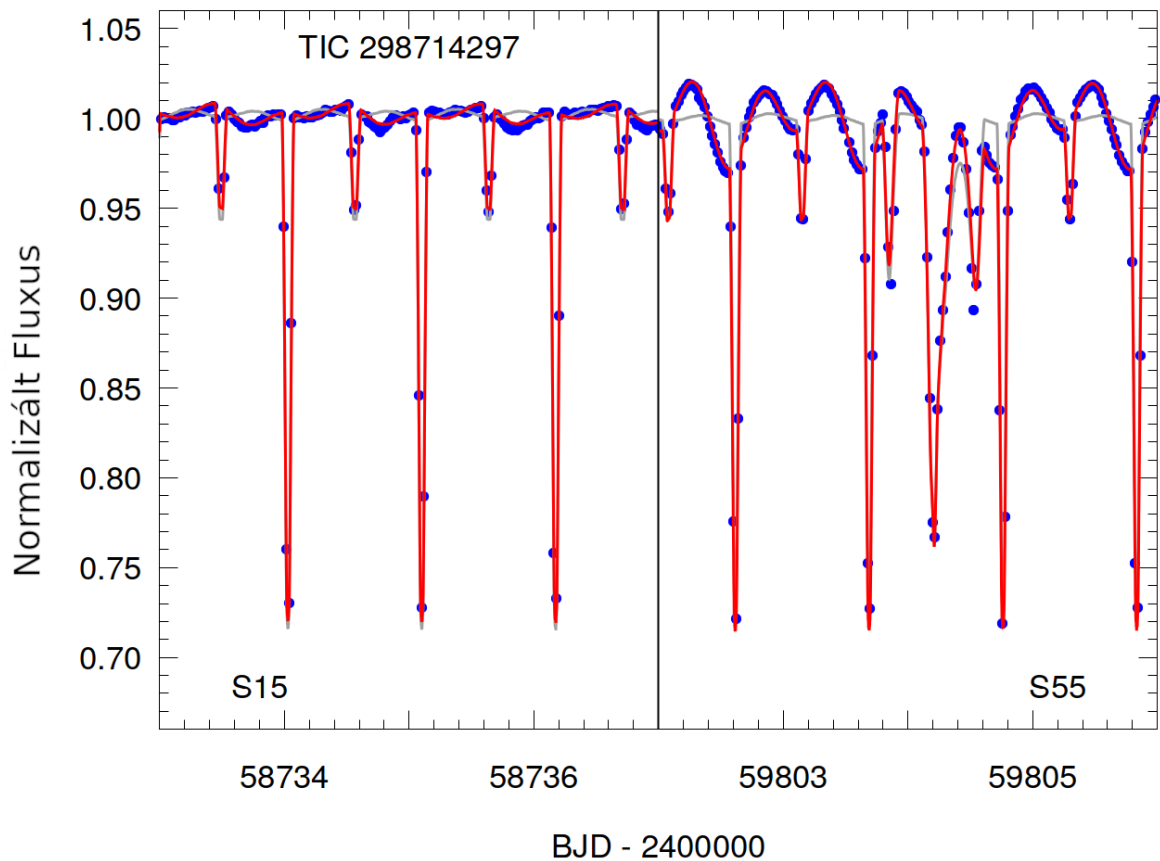
21. ábra. A TIC 66893949 rendszer *TESS* fénygörbéi a harmadik test által okozott fedésekkel. A kék pontok eredeti mérések, a halványabb kék pontokat a modellezés során nem vettem figyelembe a gyorsabb futás érdekében. A piros vonal a 4.4.1. alfejezetben részletezett modellillesztés. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023b)

- A TIC 88206187-et csak a 19. és 59. szektorban észlelték. A 19. szektorban egy nagyon mély, hosszú fedési eseményt sikerült megfigyelni. Az 59. szektorban is hasonlóan hosszú, de kevésbé mély fedést azonosítottam. A fedések a 22. ábrán láthatóak.



22. ábra. A TIC 88206187 rendszer *TESS* fénygörbéi a harmadik test által okozott fedésekkel. A kék pontok a mérési adatok, a piros vonal a 4.4.1. alfejezetben részletezett modellillesztés. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023b)

- A TIC 298714297-t a 15., 55. és 56. *TESS* szektorban észlelték. Az 55. szektort vizsgálva találtam meg az extra fedést. Ez a 23. ábrán látható.



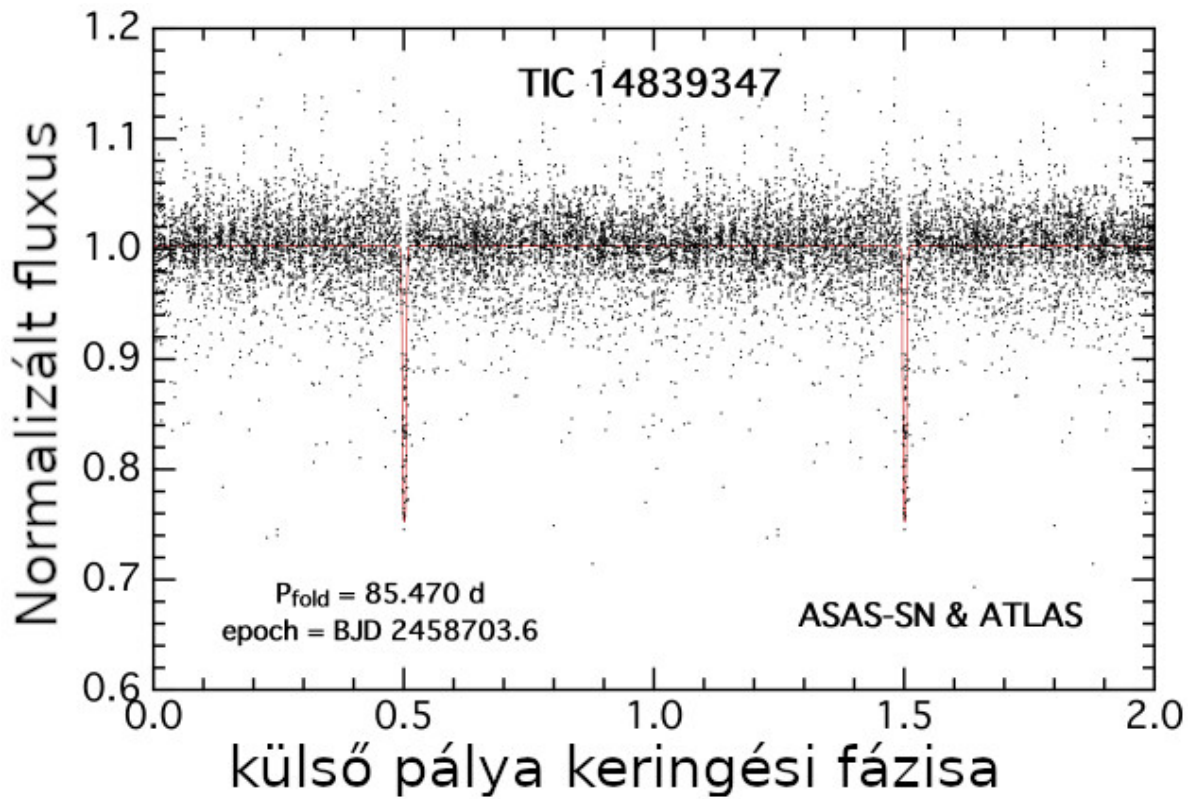
23. ábra. A TIC 298714297 rendszer *TESS* fénygörbéi a harmadik test által okozott fedésekkel. A kék pontok a mérési pontok. A kék pontok a mérési adatok, a piros vonal a 4.4.1. alfejezetben részletezett modellillesztés, kiegészítve a Fourier-modellezett rotációs fényességváltozással. A szürke vonal a rotációs változás nélküli modellillesztés. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023b)

A fénygörbékből a belső kettőscsillagok fedéseit felhasználva Dr. Mitnyan Tibor konzulensem az ETV-ket is elkészítette ezekre a rendszerekre.

4.3. ASAS-SN, ATLAS égboltfelmérő programok

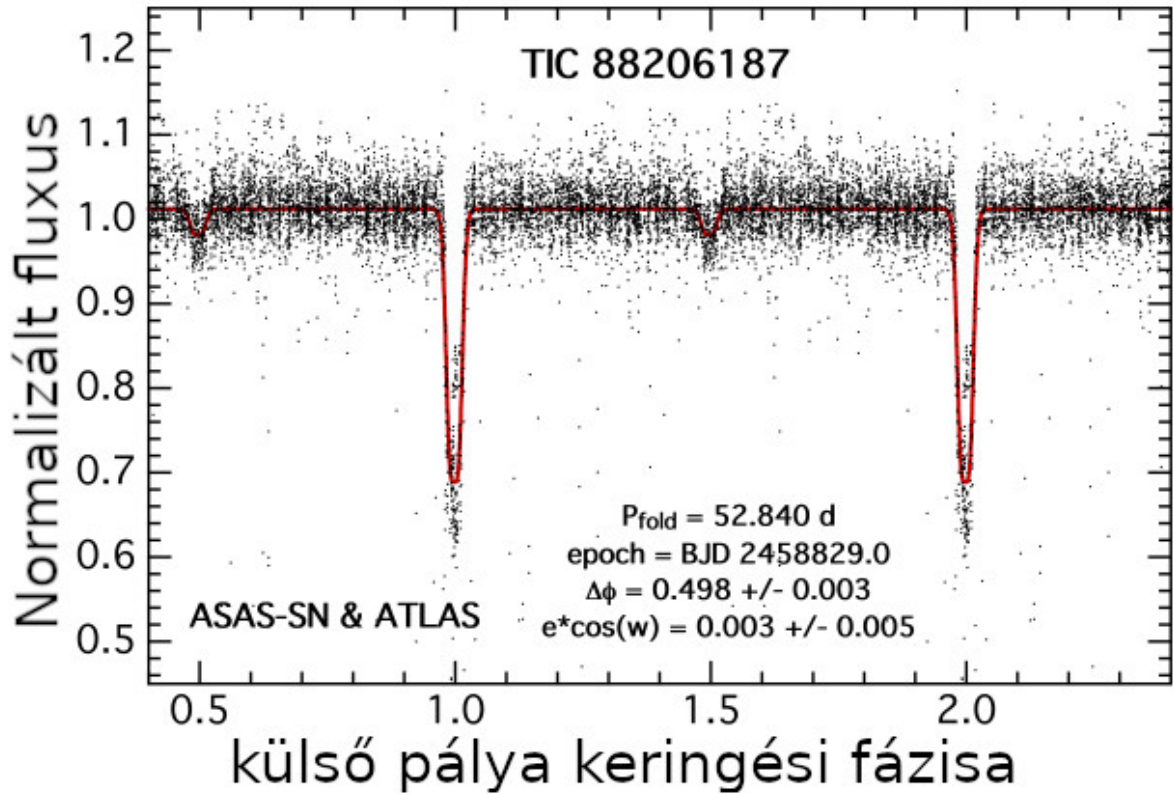
Az ASAS-SN (All-Sky Automated Survey for Supernovae; Shappee és mtsai 2014; Kochanek és mtsai, 2017), és ATLAS (Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System; Tonry és mtsai 2018; Smith és mtsai, 2020) égboltfelmérő programok méréseiben is megkerestem ezeket a rendszereket. Mind a négy esetén sikerült az ASAS-SN programból fénygörbét előállítani. Az ATLAS programból két csillag esetén sikerült fénygörbét létrehozni

(a TIC 298714297 és TIC 66893949 túl fényes volt az ATLAS mérőrendszere számára). Mind a négy rendszer esetén a fénygörbe a belső periódussal történő feltekerése után láthatóvá váltak a belső kettős fedései. A belső fedési kettőscillag periódusának pontos meghatározása után az adatokból levontam a fedések jelét, és BLS¹⁹ (Kovács és mtsai, 2002) módszer segítségével kerestem a harmadik test okozta fedéseket. A TIC 66893949 és TIC 298714297 esetén nem állt rendelkezésre elég adatpont, hogy láthatóvá váljanak a harmadik test okozta fedések. A TIC 14839347 és TIC 88206187 esetén viszont az ASAS-SN és ATLAS méréseket kombinálva egyértelműen kimutathatóvá váltak a harmadik test okozta fedések főminimumai és a TIC 88206187 esetén a mellékminimum is. Ennek köszönhetően megállapítható a TIC 88206187-re az $e_{out} \cos \omega_{out} = 0,003 \pm 0,005$ érték, amely alapján a külső pálya jó közelítéssel körpálya lehet. A fázis szerint feltekerett ASAS-SN és ATLAS fénygörbék a 24. és 25. ábrákon láthatóak.



24. ábra. A TIC 14839347 külső periódusa alapján fázis szerint rendezett fénygörbéje. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023b)

¹⁹BLS - Box Least Squares. A fedési kettőscillag fénygörbéjére ráillesztünk egy négyszögjelhez hasonló görbét és keressük a legjobb illeszkedést. Ezzel meghatározható a fedések periódusideje.



25. ábra. A TIC 88206187 külső periódusa alapján fázis szerint rendezett fénygörbéje. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023b)

4.4. Fotodinamikai elemzés

4.4.1. A LIGHTCURVEFACTORY programcsomag

A fotodinamikai elemzéshez a LIGHTCURVEFACTORY szoftvercsomagot használtam, amelyet konzulensem, Dr. Borkovits Tamás fejlesztett ki. A programcsomag triplán fedő rendszerek elemzésére alkalmas, szimultán képes a rendszer fénygörbéjét, radiálissebesség-görbéjét, ETV-jét és spektrális energiaeloszlását különböző evolúciós modellekkel együtt illeszteni. Legtöbb esetben nem áll rendelkezésre az összes előbb felsorolt típusú mérés, de a program ezt is képes kezelni. A programcsomagon belül választható, hogy a három test mozgását numerikusan integráljuk-e, vagy amennyiben a dinamikai perturbációk elhanyagolhatóak, a program két kepleri pályával írja le a belső és külső pályákat. A beépített integrátor hetedrendű Runge-Kutta-Nyström módszerre alapul. A program a paraméterteret egy MCMC módszerrel térképezi fel. A szoftver segítségével a rendszer szinte összes fontosabb sztelláris és orbitális paramétere meghatározható. A programról és a mögöttes elméleti megfontolásokról részletes leírások Dr. Borkovits Tamás: *A fedési kettős és többes csillagrendszerek vizsgálatának jármatlan útjain* című nagydoktori értekezésében és a Borkovits és mtsai (2020a, 2022), valamint Rappaport

és mtsai (2023) cikkekben találhatóak. Munkám során a kód segítségével párhuzamosan illesztettem a fénygörbéket, a fénygörbékből előállított ETV-eket, és a rendszerek különböző égboltfelmérő programokból előállított spektrális energiaeloszlását (SED) a PARSEC (PAдова TRIeste Stellar Evolutionary Code; Bressan és mtsai, 2012) csillagfejlődési kód evolúciós útvonalalaival együtt. A vizsgálatot a TIC 66893949 rendszer kivételével minden esetben a teljes *TESS* fénygörbén futtattam, mivel az ellipsziodális változás jelentősen befolyásolja a fedéseken kívüli részt, amit a modell pontosításának érdekében hasznos volt illeszteni. A TIC 66893949 esetén, amely 4,8 napos belső periódussal rendelkezik, erre nem volt szükség. A TIC 298714297 esetén az ellipsziodális változások mellett a rotáció miatti fényességváltozás is megfigyelhető. A 23. ábrán látható, hogy ez a hatás szektorról szektorra változik, így párhuzamosan illesztettem a rotációt a többi paraméterrel együtt, de a különböző szektorokra egyesével. A szakirodalomban nem voltak elérhetőek korábbi fedési minimumidőpontok, így csak a *TESS* fénygörbékből létrehozott fedési minimumidőpontokat használtam. Mivel nem voltak elérhetőek radiálissebesség-mérések sem, ezért a fénygörbeillesztést megtámogatva elkészítettem a csillagok spektrális energiaeloszlását archív adatokat felhasználva, amelyet a 6. és 7. táblázatokban foglaltam össze. Az illesztés során a SED illesztést és a PARSEC izokrónokot felhasználva a tömegekre és az effektív hőmérsékletekre lehet következtetni a radiálissebesség-görbék nélkül is.

A fotodinamikai analízist kiegészítő spektrális energiaeloszlásnak a hasznosságáról Borkovits és mtsai (2020a) és Borkovits és mtsai (2022) cikkében találhatóak bővebb információk.

A TIC 14839347 esetén az előzetes futások és a fénygörbe-analízis után arra a következtetésre jutottam, hogy a belső kettőscsillag másodkomponense kis tömegű, de még így is elegendően nagy ahhoz, hogy majdnem, vagy teljesen kitöltse a Roche-lebenyét. Valószínűsíthető, hogy a másodkomponens anyagot adott át a főkomponensnek. Ebből kifolyólag a PARSEC által biztosított evolúciós utak nem használhatóak fel az illesztéshez, mivel azokat magányos csillagokra határozták meg. Az izokrónok nem veszik figyelembe a tömegátadás miatt változó fejlődési utakat. Ezért ennél a rendszernél nem használtam a PARSEC izokrónon által adott további információkat, hanem egy iteratív eljárást dolgoztam ki. A LIGHTCURVEFACTORY programot használva csak a *TESS* fotometriából elérhető adatokat illesztettem, tehát a fénygörbét és az ETV-eket. Ennek köszönhetően a három csillagnak a pályák félnagy tengelyéhez képesti sugarára, avagy relatív sugarára és a csillagok felszíni hőmérsékleteinek arányára tudtam következtetni, majd ezeket az adatokat felhasználva és a *Gaia* által meghatározott távolságok segítségével egy független SED analízist végeztem el. Ezzel a módszerrel jól behatárolható tömeg- és hőmérsékletértékeket kaptam, majd a főkomponens tömegét és a harmadik komponens hőmérsékletét, valamint ezek hibáit bemenő paraméterként használtam egy új LIGHTCURVEFACTORY

Paraméterek	TIC 14839347	TIC 66893949
<i>Gaia</i> azonosító (ID ^a)	2058085351143518464	1870771652581668352
RA ^a [deg]	306,408	311,711
DEC ^a [deg]	37,895	36,352
T ^b [mag]	12,2117 ± 0,0448	11,6134 ± 0,0101
G ^a [mag]	13,070626 ± 0,002975	11,9993 ± 0,0002
G _{bp} ^a [mag]	13,866420 ± 0,004369	12,2891 ± 0,0008
G _{rp} ^a [mag]	12,175914 ± 0,005246	11,5470 ± 0,0005
B ^c [mag]	14,837 ± 0,048	12,47 ± 0,255
V ^c [mag]	13,807 ± 0,149	12,082 ± 0,057
g ^c [mag]	14,211 ± 0,016	12,408 ± 0,000
r ^c [mag]	13,176 ± 0,033	12,058 ± 0,000
i ^c [mag]	12,562 ± 0,019	11,869 ± 0,000
J ^d [mag]	10,81 ± 0,021	11,004 ± 0,021
H ^d [mag]	10,231 ± 0,018	10,737 ± 0,017
K ^d [mag]	9,999 ± 0,016	10,697 ± 0,016
W1 ^e [mag]	9,827 ± 0,023	10,685 ± 0,023
W2 ^e [mag]	9,857 ± 0,02	10,72 ± 0,021
W3 ^e [mag]	9,673 ± 0,088	10,666 ± 0,099
W4 ^e [mag]	7,836 ± 0,191	9,015 ± NaN
T _{eff} ^a [K]	-	5883 ± 27
Távolság ^f [pc]	1970 ⁺⁴⁸ ₋₄₁	587 ⁺⁹ ₋₇
E[B - V] ^c [mag]	0,772 ± 0,065	0,03929 ± 0,0124
μ_{α}^a	-2,657 ± 0,011	14,4171 ± 0,02024
μ_{δ}^a	-7,034 ± 0,012	-15,2782 ± 0,0241
RUWE ^a	1,221	1,9273869
NSS model ^a	SB1	Orbital
P _{binary} ^g [nap]	1,154060 ^{+0,000050} _{-0,000052}	4,805309 ^{+0,000004} _{-0,000005}
P _{triple} ^g [nap]	85,530 ^{+0,017} _{-0,017}	471,03 ^{+0,10} _{-0,07}

6. táblázat. Főbb paraméterek a TIC 14839347 és TIC 66893949 rendszer esetén. ‘-’ jelentése: nem elérhető (a) - *Gaia* DR3 (*Gaia* kollaboráció és mtsai, 2023), égi koordináták: ICRS J2016.0; (b) - TESS Input Catalog V8.2 (Paegert és mtsai, 2021); (c) - AAVSO Photometric All Sky Survey (APASS) DR9 (Henden és mtsai, 2015); (d) - 2MASS All-Sky Catalog (Skrutskie és mtsai, 2006); (e) - ALLWISE Data Release (Cutri és mtsai, 2021); (f) - (Bailer-Jones és mtsai, 2021); (g) - Czavalinga és mtsai (2023); RUWE - renormalised unit weight error. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023b)

Paraméterek	TIC 88206187	TIC 298714297
<i>Gaia</i> azonosító (ID ^a)	07943285475761280	1849392443551822848
RA ^a [deg]	82,739	324,463
DEC ^a [deg]	44,803	29,474
T ^b [mag]	11,8518 ± 0,0078	10,8136 ± 0,0069
G ^a [mag]	12,478771 ± 0,002864	11,542984 ± 0,003035
G _{bp} ^a [mag]	13,006023 ± 0,003710	12,203759 ± 0,004678
G _{rp} ^a [mag]	11,783351 ± 0,004393	10,743742 ± 0,004989
B ^c [mag]	13,403 ± 0,275	13,309 ± 0,399
V ^c [mag]	12,794 ± 0,069	11,584 ± 0,138
g ^c [mag]	13,007 ± 0,220	12,493 ± 0,040
r ^c [mag]	12,487 ± 0,072	11,529 ± 0,045
i ^c [mag]	12,135 ± 0,084	11,055 ± 0,051
J ^d [mag]	10,828 ± 0,022	9,717 ± 0,028
H ^d [mag]	10,351 ± 0,021	9,092 ± 0,034
K ^d [mag]	10,206 ± 0,016	8,965 ± 0,02
W1 ^e [mag]	10,099 ± 0,023	8,877 ± 0,023
W2 ^e [mag]	10,129 ± 0,02	8,878 ± 0,02
W3 ^e [mag]	10,011 ± 0,062	8,752 ± 0,024
W4 ^e [mag]	8,67 ± 0,36	8,82 ± 0,378
T _{eff} ^a [K]	-	5498 ± 121
Távolság ^f [pc]	2490 ⁺⁹⁶ ₋₇₈	111,9 ^{+0,7} _{-0,7}
E[B - V] ^c [mag]	0,2585 ± NaN	0,009 ± 0,00595
μ_{α}^a	0,720 ± 0,015	-28,768 ± 0,044
μ_{δ}^a	-2,416 ± 0,011	-58,138 ± 0,036
RUWE ^a	0,905	3,162
NSS model ^a	SB1	Orbital
P _{binary} ^g [nap]	1,184592 ^{+0,000055} _{-0,000063}	1,072891 ^{+0,000010} _{-0,000019}
P _{triple} ^g [nap]	52,922 ^{+0,041} _{-0,039}	117,24 ^{+0,36} _{-0,31}

7. táblázat. Főbb paraméterek a TIC 88206187 és TIC 298714297 rendszer esetén. ‘-’ jelentése: nem elérhető (a) - *Gaia* DR3 (*Gaia* kollaboráció és mtsai, 2023), égi koordináták: ICRS J2016.0; (b) - TESS Input Catalog V8.2 (Paegert és mtsai, 2021); (c) - AAVSO Photometric All Sky Survey (APASS) DR9 (Henden és mtsai, 2015); (d) - 2MASS All-Sky Catalog (Skrutskie és mtsai, 2006); (e) - ALLWISE Data Release (Cutri és mtsai, 2021); (f) - (Bailer-Jones és mtsai, 2021); (g) - Czavalinga és mtsai (2023); RUWE - renormalised unit weight error. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023b)

futtatáshoz. Többször iterálva ezt az eljárást, jó illeszkedést sikerült elérni, és a hibák értékeit is jelentősen csökkenteni tudtam. A TIC 14839347 rendszerrel kapcsolatban még a megfigyelhető erős reflexiós és besugárzási effektus miatt a LIGHTCURVEFACTORY-n belül bekapcsoltam az ezt illeszteni képes alprogramokat. A bolometrikus albedók értékeit $A = 1,0$ és $A = 0,5$ -nek választottam a fő-, és másodkomponens esetén, amelyek összhangban vannak az elméleti úton meghatározott értékekkel, viszont az illesztések jóságát vizsgálva az A_{Ab} ²⁰ másodkomponens esetén a 0,8 érték sokkal jobb illeszkedést adott. Így az illesztés javításának érdekében ezt az értéket használtam a bolometrikus albedóra, és a gravitációs sötétedési paraméter értékeit is változtattam. A rendszereket megvizsgálva egyik sem rendelkezik kicsi periódusarányal: a belső és külső periódus aránya 45-ös értéktől 109-ig terjed, ezért nem várhatóak erős dinamikai hatások, amelyek a kepleri pályától erősen eltérő mozgásokat tudnának okozni. Ennek ellenére úgy döntöttem, hogy numerikusan számolom a pályákat, nem pedig a kepleri esetet veszem alapul.

A sztelláris és pályaparamétereket az összes hierarchikus hármas csillagrendszerre megadtam. Fontos megjegyezni, hogy a meghatározott pályaparaméterek csak pillanatnyi (oszkuláló) pályaelemek, amelyek egy adott időpontra vannak meghatározva. A következőkben diszkutálnám a táblázatban található apszis-, és csomóvonalmozgással kapcsolatos paramétereket. A P_{apse} az elméleti apszismozgás periódusa az észlelési-, míg a P_{apse}^{dyn} a dinamikai koordinátarendszerbeli paraméter. Ez a két paraméter más jelentést hordoz magában, így az értékeik is jelentősen eltérhetnek egymástól. A megfigyelői (észlelési) koordinátarendszer alapsíkját az égbolt síkja jelöli ki, amely a hierarchikus hármas csillagrendszer látóirányára merőleges. A periasztron argumentuma ebben a koordinátarendszerben az a szög, amelyet az alapsík és a keringési pálya által kijelölt csomóvonaltól mérünk, a pálya periapszis pontjáig. A dinamikai koordinátarendszerben az alapsík az úgynevezett „invariábilis” sík. Ebben a síkban található a rendszer tömegközéppontja és a rendszer teljes impulzuszórájának vektora pedig erre a síkra merőleges. A periasztron argumentumát ebben a koordinátarendszerben már az invariábilis sík és a keringési pálya csomóvonalától mérjük. A megfigyelő szemszögéből a megfigyelői koordinátarendszerben definiált periasztron argumentum elfordulása a lényeges. Ez a mozgás jellemzően a belső fedési kettőscsillag főminimumainak és mellékminimumainak kvázi-szinuszos antikorrerált elmozdulásában nyilvánul meg. Ezzel szemben a dinamikai koordinátarendszerben a periasztron argumentumának elforgása közvetlenül nem figyelhető meg, hanem a rendszer dinamikai fejlődésének szempontjából lényeges. A megfigyelhető apszismozgás jellemzően a dinamikai apszismozgás és a dinamikai csomóvonalmozgás²¹ nemlineáris kombinációja.

²⁰A belső kettőscsillag főkomponensének paramétereit az \square_{Aa} , míg a másodkomponens paramétereit az \square_{Ab} alsó indexszel jelölöm, a harmadik komponens paramétereire pedig a \square_B alsóindexet használom.

²¹pályasík-precesszió

A dinamikai csomóvonalmozgás periódusát is megadtam, amelyet precessziós periódusnak $P_{\text{node}}^{\text{dyn}}$ nevezünk. A táblázatban még megadtam az apszizmozgás három különböző komponensét is. Az árapály-okozta apszizmozgás: Δ_{tide} , a relativisztikus effektus okozta apszizmozgás: Δ_{GR} és a dinamikai apszizmozgás okozta tag: Δ_{3b} .

A legjobb illesztéseket és a hibákat a beépített MCMC algoritmus segítségével kerestem meg.

4.5. Eredmények

4.5.1. TIC 14839347

A sztelláris és pályaparaméterek a 8. és 9. táblázatban találhatóak. Ahogy fentebb említettem, a TIC 14839347 esetén a rendszer paramétereit iterációs eljárás segítségével határoztam meg. A főkomponens tömegére $m_{Aa} = 2,5 \pm 0,13M_{\odot}$, a harmadik komponens effektív hőmérsékletére pedig $T_B = 5000 \pm 200K$ értéket kaptam a szeparált SED illesztésből, így a rendszer belső kettőscsillagának a tömegarányára $q_{in} = 0,25 \pm 0,02$ érték adódott. Ha ezt az értéket összevetjük a Roche-lebenyét majdnem kitöltő másodkomponenssel, akkor egy tipikus Algol típusú rendszert kapunk, fordított tömegarányal. A távoli harmadik komponens tömegére $m_B = 2,36_{-0,09}^{+0,17}M_{\odot}$ érték adódott, amely valamelyest kisebb, mint a belső főkomponens tömege. A sugarára $R_B = 8,2 \pm 0,3R_{\odot}$ értéket kaptam. Ebből is látható, hogy a harmadik komponens a fősorozatról már elfejlődött csillag, amely tovább erősíti azt a feltételezést, hogy a rendszerben korábban erős anyagátadási folyamatok zajlottak le. Ennek oka az, hogy bár a belső kettőscsillag főkomponense hasonló tömegű, mégsem fejlődött még el a fősorozatról, amit a sugarának mérete mutat ($R_{Aa} = 2,87 \pm 0,03R_{\odot}$). A belső kettőscsillag esetén be- és visszasugárzási effektusok figyelhetők meg a fénygörbén, emiatt ezt is illesztettem a szoftvercsomag segítségével. Az illesztés során a főkomponens albedója $A_{Aa} = 0,97 \pm 0,05$ értéket vett fel, amely jó egyezésben van az ilyen típusú csillagokra elméletileg meghatározott 1,0 értékkel. A másodkomponens esetén viszont az albedóra $A_{Aa} = 0,76 \pm 0,05$ értéket kaptam, amely már jelentősen eltér a konvektív csillagokra elméleti úton meghatározott értéktől ($A_{Aa}^{\text{elméleti}} = 0,5$). Az ilyen nagy albedó nem jellemző a konvektív csillagokra, viszont az illesztések egyértelműen ezt adták. A belső kettőscsillag pályája kör alakú, amely félig érintkező rendszer esetén egyáltalán nem meglepő. A külső pálya esetén viszont az excentricitás $e_{out} = 0,04 \pm 0,01$, azaz egyértelműen eltér a körpályától, mégha kis mértékben is. Ennek az értéknek a lehetséges pontatlanságát viszont növeli az a tény, hogy a harmadik test fedésének mellékminimuma pont fél fázisnál van. Ezt onnan lehet megállapítani, hogy a rendszer periasztron argumentuma $\omega_{out} = 270^{\circ} \pm 3^{\circ}$ és ebből pedig következik, hogy a $e_{out} \cos \omega_{out} \approx 0$. Más szóval: a külső pálya ellipszisének nagytengelye pont a Föld

irányába mutat.

TIC 14839347		
Pályaelemek		
	Alrendszer	
	Aa–Ab	A–B
t_0 [BJD - 2400000]	58 683,0	
P [nap]	$1, 154060^{+0,000050}_{-0,000052}$	$85, 530^{+0,017}_{-0,017}$
a [R_\odot]	$6, 769^{+0,043}_{-0,034}$	$144, 2^{+1,7}_{-0,9}$
e	$0, 0005^{+0,0005}_{-0,0003}$	$0, 042^{+0,013}_{-0,013}$
ω [fok]	147^{+138}_{-97}	$269, 6^{+2,8}_{-3,1}$
i [fok]	$88, 75^{+1,13}_{-1,13}$	$86, 51^{+0,12}_{-0,13}$
$\mathcal{T}_0^{\text{inf}}$ [BJD - 2400000] ^a	$58 684, 0427^{+0,0001}_{-0,0001}$	$59 430, 6949^{+0,0213}_{-0,0210}$
τ [BJD - 2400000] ^b	$58 683, 56^{+0,20}_{-0,46}$	$59 429, 6^{+0,8}_{-0,7}$
Ω [fok]	0, 0	$-2, 9^{+1,7}_{-3,1}$
i_{mut} [fok]	$3, 5^{+3,3}_{-1,0}$	
tömegarány [$q = m_{\text{se}}/m_{\text{pri}}$]	$0, 250^{+0,016}_{-0,015}$	$0, 757^{+0,050}_{-0,019}$
K_{pri} [km s^{-1}]	$59, 4^{+3,3}_{-3,1}$	$36, 7^{+1,7}_{-0,7}$
K_{sec} [km s^{-1}]	$237, 5^{+2,1}_{-2,3}$	$48, 4^{+0,5}_{-0,8}$
Apszis- és csomóvonalmozgással kapcsolatos paraméterek ^c		
P_{apse} [év]	$0, 80^{+0,02}_{-0,02}$	889^{+33}_{-33}
$P_{\text{apse}}^{\text{dyn}}$ [év]	$0, 79^{+0,02}_{-0,02}$	$48, 0^{+0,6}_{-1,6}$
$P_{\text{node}}^{\text{dyn}}$ [év]	$50, 7^{+1,8}_{-0,7}$	
$\Delta\omega_{3b}$ [ívmásodperc/ciklus]	156^{+7}_{-3}	6321^{+224}_{-79}
$\Delta\omega_{\text{GR}}$ [ívmásodperc/ciklus]	$3, 81^{+0,05}_{-0,04}$	$0, 315^{+0,008}_{-0,004}$
$\Delta\omega_{\text{tide}}$ [ívmásodperc/ciklus]	5014^{+123}_{-131}	$1, 7^{+0,1}_{-0,1}$

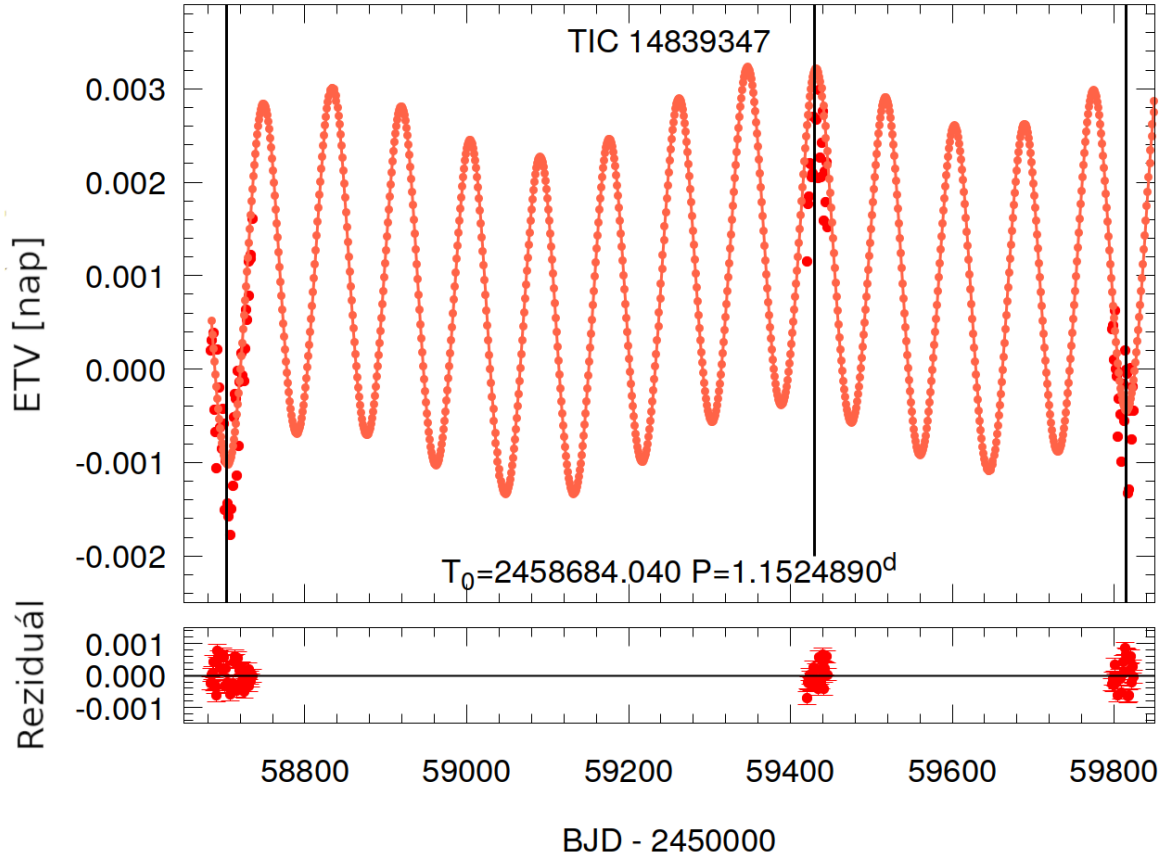
8. táblázat. A TIC 14839347 rendszer fotodinamikai elemzéséből kapott pályaparaméterek. Fontos megjegyezni, hogy a paraméterek valójában pillanatnyi (oszkuláló) pályaelemek az első sorban megadott epochára. ^a: $\mathcal{T}_0^{\text{inf}}$ jelöli a másodkomponens (Ab) és a harmadik komponens (B) alsó konjunkciójának pillanatát belső, illetve külső pályájuk mentén; ^b: periasztron-átmenet időpontja; ^c: ezen paramétereket a 4.4.1. alfejezetben diszkutáltam. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023b)

A külső és belső pálya köztes inklinációja közel nulla ($i_m = 3, 5^{+3}_{-1}$) és a körpályák miatt erős dinamikai perturbációkra nem számítunk. Annak ellenére sem, hogy első ránézésre a $P_{\text{apse}} = 0, 8 \pm 0, 02$ év nagyon rövid időnek tűnik, viszont ennek oka, hogy a belső kettős pályája gyakorlatilag kör alakú, így az apszimozgás lényegében virtuális, je-

lentős változást nem okoz a rendszer paramétereiben. Másrészt viszont a kicsi, de nem nulla köztes inklináció értéke miatt minimális inklinációváltozás elképzelhető, amelynek periódusa $P_{node}^{dyn} = 51 \pm 1$ év, emiatt minimális fedésmélység-változásra számíthatunk. A belső kettőscsillag esetén a klasszikus árapályerők miatti apszizmozgás érvényesül. Az illesztésekből a rendszer életkorára 520 ± 115 millió év jött ki, a csillagközi fényelnyelés értékére pedig $A_V = 2,2 \pm 0,16$.

TIC 14839347			
Csillagparaméterek			
	Aa	Ab	B
Relatív értékek és atmoszféraparaméterek			
fajlagos sugár [R/a]	$0,4239^{+0,0037}_{-0,0041}$	$0,2676^{+0,0046}_{-0,0045}$	$0,0573^{+0,0018}_{-0,0016}$
relatív hőmérséklet a $(T_{\text{eff}})_{\text{Aa}}$ -hoz	1	$0,548^{+0,016}_{-0,022}$	$0,559^{+0,024}_{-0,020}$
relatív fényesség [in <i>TESS</i> mag]	$0,3703^{+0,0122}_{-0,0125}$	$0,0372^{+0,0012}_{-0,0015}$	$0,5352^{+0,0478}_{-0,0265}$
grav, sötét, exponens [β]	$0,41^{+0,39}_{-0,25}$	$0,17^{+0,20}_{-0,13}$	
albedó [A]	$0,97^{+0,05}_{-0,06}$	$0,76^{+0,05}_{-0,05}$	„,
Sztelláris paraméterek			
m [M_{\odot}]	$2,497^{+0,030^d}_{-0,025}$	$0,625^{+0,041}_{-0,038}$	$2,359^{+0,166}_{-0,061}$
R [R_{\odot}]	$2,871^{+0,031}_{-0,032}$	$1,812^{+0,039}_{-0,038}$	$8,242^{+0,313}_{-0,191}$
T_{eff} [K]	8977^{+380}_{-371}	4906^{+95}_{-108}	$5019^{+40^c}_{-44}$
L_{bol} [L_{\odot}]	$48,0^{+8,2}_{-6,9}$	$1,71^{+0,13}_{-0,14}$	$38,7^{+3,7}_{-2,6}$
M_{bol}	$0,54^{+0,17}_{-0,17}$	$4,16^{+0,09}_{-0,08}$	$0,77^{+0,14}_{-0,10}$
M_V	$0,60^{+0,12}_{-0,11}$	$4,50^{+0,15}_{-0,12}$	$1,06^{+0,08}_{-0,10}$
$\log g$	$3,920^{+0,009}_{-0,008}$	$3,718^{+0,009}_{-0,009}$	$2,978^{+0,034}_{-0,025}$
Globális rendszerparaméterek			
$\log(\text{kor})$		–	
$[M/H]$		–	
$E(B - V)$ [mag]		–	
extra fény ℓ_4 [in <i>TESS</i>]		$0,054^{+0,025}_{-0,036}$	
$(M_V)_{\text{tot}}$		$0,03^{+0,10}_{-0,09}$	
távolság [pc]		...	

9. táblázat. A TIC 14839347 rendszer fotodinamikai elemzéséből kapott sztelláris és globális rendszerparaméterek. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023b)



26. ábra. A TIC 14839347 ETV görbájének fotodinamikai illesztése. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023b)

4.5.2. TIC 66893949

A sztelláris és pályaparaméterek a 10. és 11. táblázatban találhatóak. A vizsgált rendszerek közül ennek a rendszernek van a leghosszabb belső periódusa: $P_{in} = 4,805$ nap, és a leghosszabb külső periódusa: $P_{out} = 471,0$ nap. Bár a *TESS* űrtávcső csak a 15., 41. és 55. szektorban figyelte meg, és emiatt a pályájának csak mindössze 16%-át fedte le, a szerencsés körülményeknek köszönhetően viszont mind a mellék-, mind a főminimum látszódik a fénygörbén. Három, Napunkhoz hasonló tömeggel rendelkező csillag alkotja a rendszert ($m_{Aa} = 1,51 \pm 0,04M_{\odot}$, $m_{Ab} = 1,01 \pm 0,02M_{\odot}$, $m_B = 1,97 \pm 0,04M_{\odot}$). A vizsgált rendszereim közül ennek a harmadik komponense a legkisebb tömegű. A belső pálya nem teljesen kör alakú, ennek oka a viszonylagosan nagy szeparáció, a belső pálya excentricitásának értéke $e_{in} = 0,005 \pm 0,001$. A külső pálya excentricitása a legnagyobb az összes vizsgált rendszer közül: $e_{out} = 0,402 \pm 0,004$. A tág pályák ellenére a köztes inklináció értéke alacsony: $i_m = 0,7^{\circ} \pm 0,004^{\circ}$, emiatt és a szeparáció miatt erős dinamikai hatások nem jellemzik a rendszert. A dinamikai időskála több évszázados mind a belső, mind a külső pályára. Az apszismozgást a harmadik test perturbáló hatása uralja. Itt

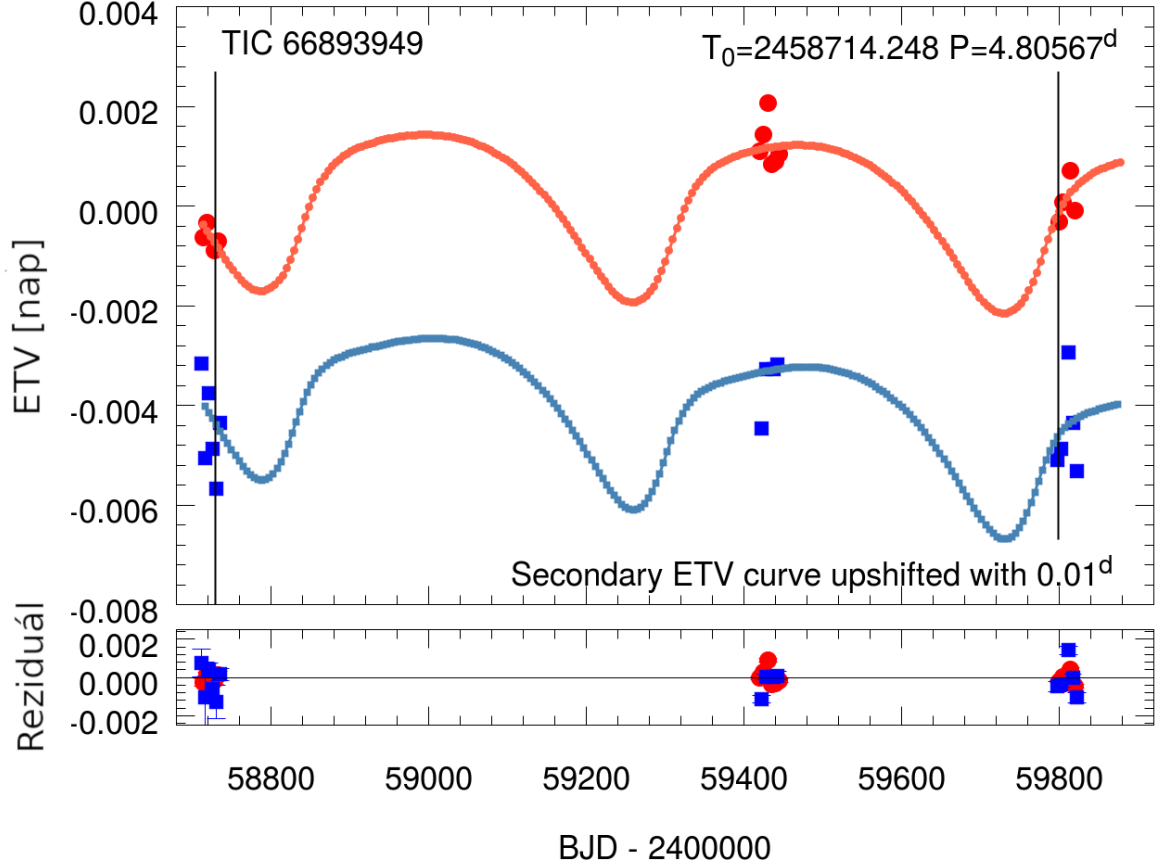
volt a legjelentősebb különbség a mért távolság, és a Bailer-Jones és mtsai (2021) által kiszámolt meghatározott érték között: $d_{lc} = 62517$ pc és $d_{EDR3} = 5879$ pc , ahol a d_{lc} az általam kapott érték.

TIC 66893949		
Pályaelemek		
	Alrendszer	
	Aa–Ab	A–B
t_0 [BJD - 2400000]	58 711,0	
P [nap]	$4,805309^{+0,000004}_{-0,000005}$	$471,03^{+0,10}_{-0,07}$
a [R_\odot]	$16,29^{+0,16}_{-0,13}$	$386,4^{+4,2}_{-3,4}$
e	$0,0050^{+0,0013}_{-0,0003}$	$0,4016^{+0,0039}_{-0,0038}$
ω [fok]	317^{+32}_{-35}	$25,8^{+1,3}_{-1,5}$
i [fok]	$90,18^{+0,34}_{-0,29}$	$90,222^{+0,010}_{-0,009}$
$\mathcal{T}_0^{\text{inf}}$ [BJD - 2400000] ^a	$58\,714,2412^{+0,0002}_{-0,0002}$	$58\,729,4535^{+0,0225}_{-0,0245}$
τ [BJD - 2400000] ^b	$58\,683,56^{+0,20}_{-0,46}$	$59\,429,6^{+0,8}_{-0,7}$
Ω [fok]	$58\,710,46^{+0,38}_{-0,42}$	$58\,349,1^{+1,4}_{-1,6}$
i_{mut} [fok]	$0,69^{+0,49}_{-0,35}$	
tömegarány [$q = m_{\text{se}}/m_{\text{pri}}$]	$0,670^{+0,005}_{-0,005}$	$0,388^{+0,007}_{-0,006}$
K_{pri} [km s^{-1}]	$68,84^{+0,44}_{-0,40}$	$12,67^{+0,28}_{-0,23}$
K_{sec} [km s^{-1}]	$102,80^{+1,30}_{-1,06}$	$32,67^{+0,27}_{-0,24}$
Apszis- és csomóvonalmozgással kapcsolatos paraméterek ^c		
P_{apse} [év]	417^{+6}_{-6}	2821^{+30}_{-29}
$P_{\text{apse}}^{\text{dyn}}$ [év]	204^{+2}_{-3}	350^{+3}_{-3}
$P_{\text{node}}^{\text{dyn}}$ [év]	399^{+5}_{-4}	
$\Delta\omega_{3b}$ [ívmásodperc/ciklus]	$79,4^{+1,0}_{-0,9}$	4779^{+47}_{-45}
$\Delta\omega_{\text{GR}}$ [ívmásodperc/ciklus]	$1,26^{+0,04}_{-0,05}$	$0,088^{+0,003}_{-0,004}$
$\Delta\omega_{\text{tide}}$ [ívmásodperc/ciklus]	$2,93^{+0,15}_{-0,12}$	$0,00102^{+0,0005}_{-0,00004}$

10. táblázat. A TIC 66893949 rendszer fotodinamikai elemzéséből kapott pályaparaméterek. Fontos megjegyezni, hogy a paraméterek valójában pillanatnyi oszkuláló pályaelemek az első sorban megadott epochára.^a: $\mathcal{T}_0^{\text{inf}}$ jelöli a másodkomponens (Ab) és a harmadik komponens (B) alsó konjunkciójának pillanatát belső, illetve külső pályájuk mentén; ^b: periasztron átmenet időpontja; ^c: ezen paramétereket a 4.4.1. alfejezetben diszkutáltam. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023b)

TIC 66893949			
Csillagparaméterek			
	Aa	Ab	B
Relatív értékek és atmoszféraparaméterek			
fajlagos sugár [R/a]	$0,0949^{+0,0007}_{-0,0006}$	$0,0549^{+0,0009}_{-0,0007}$	$0,00223^{+0,00008}_{-0,00006}$
relatív hőmérséklet a $(T_{\text{eff}})_{\text{Aa}}$ -hoz	1	$0,803^{+0,006}_{-0,006}$	$0,786^{+0,008}_{-0,009}$
relatív fényesség [in <i>TESS</i> mag]	$0,7644^{+0,0107}_{-0,0140}$	$0,1230^{+0,0016}_{-0,0016}$	$0,1039^{+0,0011}_{-0,0082}$
Sztelláris paraméterek			
m [M_{\odot}]	$1,503^{+0,050}_{-0,038}$	$1,007^{+0,026}_{-0,021}$	$0,974^{+0,043}_{-0,034}$
R [R_{\odot}]	$1,547^{+0,023}_{-0,023}$	$0,894^{+0,023}_{-0,018}$	$0,861^{+0,039}_{-0,029}$
T_{eff} [K]	6756^{+147}_{-157}	5421^{+81}_{-90}	5298^{+150}_{-119}
L_{bol} [L_{\odot}]	$4,47^{+0,55}_{-0,49}$	$0,618^{+0,074}_{-0,059}$	$0,523^{+0,117}_{-0,077}$
M_{bol}	$3,14^{+0,13}_{-0,13}$	$5,29^{+0,11}_{-0,12}$	$5,47^{+0,17}_{-0,22}$
M_V	$3,09^{+0,13}_{-0,13}$	$5,42^{+0,14}_{-0,15}$	$5,65^{+0,22}_{-0,27}$
$\log g$	$4,235^{+0,005}_{-0,004}$	$4,537^{+0,008}_{-0,011}$	$4,555^{+0,015}_{-0,020}$
Globális rendszerparaméterek			
$\log(\text{kor})$		$8,77^{+0,12}_{-0,21}$	
$[M/H]$		$0,36^{+0,04}_{-0,06}$	
$E(B - V)$ [mag]		$0,115^{+0,030}_{-0,034}$	
extra fény ℓ_4 [in <i>TESS</i>]		$0,007^{+0,009}_{-0,005}$	
$(M_V)_{\text{tot}}$		$2,88^{+0,13}_{-0,14}$	
távolság [pc]		623^{+19}_{-15}	

11. táblázat. A TIC 66893949 rendszer fotodinamikai elemzéséből kapott sztelláris és globális rendszerparaméterek. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023b)



27. ábra. A TIC 66893949 ETV görbéjének fotodinamikai illesztése. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023b)

4.5.3. TIC 88206187

A sztelláris és pályaparaméterek a 12. és 13. táblázatban találhatóak. A rendszert mindösszesen csak két szektorban észlelte a *TESS* űrtávcső, ennek ellenére jól illeszthető volt a fénygörbe. Ez főleg annak köszönhető, hogy a harmadik komponens mellék-, és főminimuma is látható a fénygörbén, emellett pedig a fedések teljesek, amelyek erősen meghatározzák a csillagok hőmérsékletarányát. A külső pálya periódusa $P_{out} = 52,84 \pm 0,01$ nap, amely a legrövidebb a vizsgált rendszerek közül, ezzel ez a legszorosabb rendszer. A 20. ábrára tekintve a harmadik komponens fedésének hosszából látszik, hogy valószínűsíthetően egy vörös óriáscsillag lehet. A fő-, és mellékminimum közötti fényességcsökkenés különbségéből sejthető, hogy a belső kettőscsillag sokkal kisebb lehet, mint a harmadik komponens. A fotodinamikai analízis meg is erősítette ezeket a feltételezéseket. A harmadik komponens tömege $m_B = 2,6 \pm 0,1 M_{\odot}$, sugara $R_B = 11,7 \pm 0,3 R_{\odot}$ és az effektív hőmérséklete $T_B = 4950 \pm 70 K$.

A belső kettőscsillag főkomponense egy A típusú csillag, melynek főbb paraméterei: $m_{Aa} = 2,05 \pm 0,05 M_{\odot}$, $R_{Aa} = 2,25 \pm 0,05 M_{\odot}$, $T_{Aa} = 8360^{+280}_{-160} K$, míg a másodkomponens

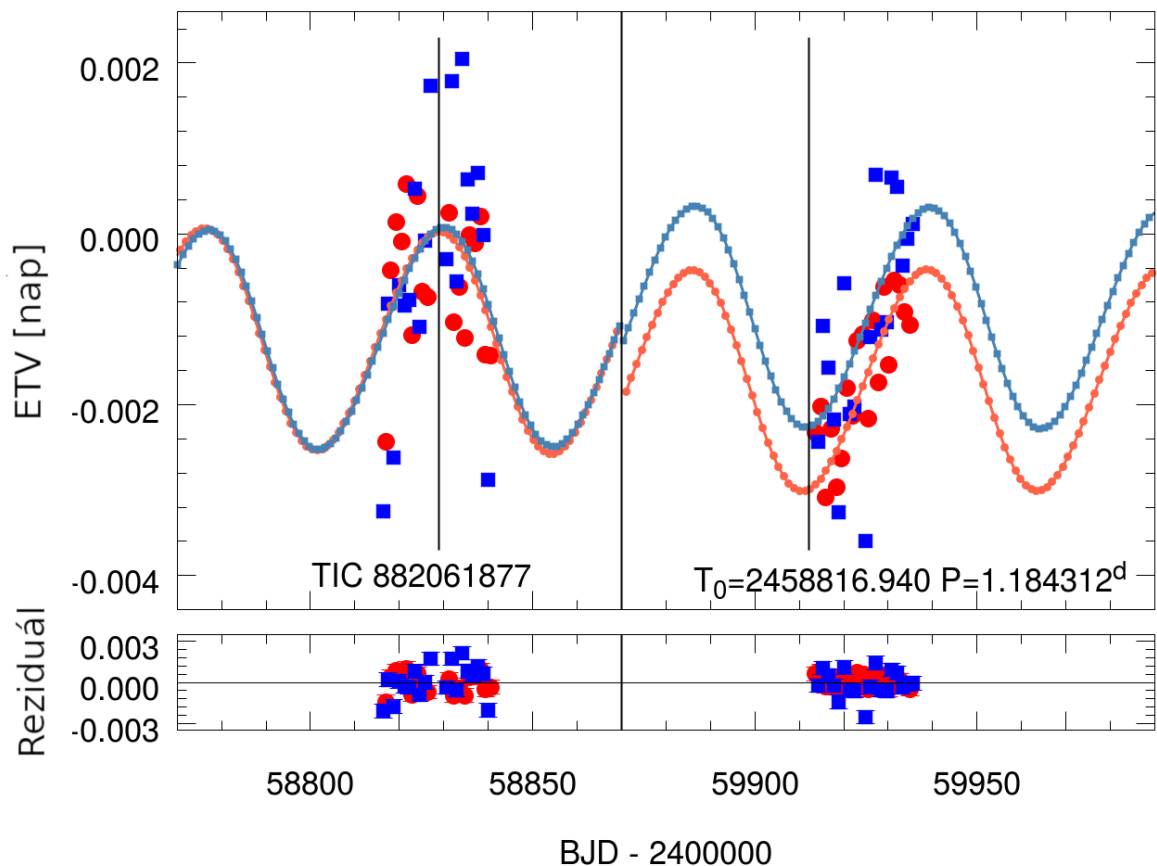
egy F típusú csillag, melynek főbb paramétereit: $m_{Aa} = 1,35 \pm 0,03M_{\odot}$, $R_{Aa} = 1,35 \pm 0,03M_{\odot}$, $T_{Aa} = 6590_{-70}^{+170}$ K.

TIC 88206187		
Pályaelemek		
	Alrendszer	
	Aa–Ab	A–B
t_0 [BJD - 2400000]	58 816,0	
P [nap]	$1,184592_{-0,000063}^{+0,000055}$	$52,922_{-0,039}^{+0,041}$
a [R_{\odot}]	$7,085_{-0,061}^{+0,053}$	$107,7_{-1,0}^{+1,1}$
e	$0,0012_{-0,0005}^{+0,0005}$	$0,026_{-0,013}^{+0,017}$
ω [fok]	75_{-27}^{+21}	147_{-99}^{+100}
i [fok]	$89,86_{-1,98}^{+2,36}$	$89,54_{-0,75}^{+0,73}$
$\mathcal{T}_0^{\text{inf}}$ [BJD - 2400000] ^a	$58\,816,9391_{-0,0002}^{+0,0002}$	$58\,828,8819_{-0,0081}^{+0,0081}$
τ [BJD - 2400000] ^b	$58\,816,292_{-0,094}^{+0,067}$	$58\,800,2_{-13,8}^{+15,1}$
Ω [fok]	0,0	$-1,17_{-2,18}^{+3,01}$
\dot{i}_{mut} [fok]	$2,90_{-1,37}^{+1,63}$	
tömegarány [$q = m_{\text{se}}/m_{\text{pri}}$]	$0,661_{-0,009}^{+0,009}$	$0,765_{-0,017}^{+0,010}$
K_{pri} [km s^{-1}]	$120,36_{-0,92}^{+1,02}$	$44,48_{-0,73}^{+0,97}$
K_{sec} [km s^{-1}]	$182,26_{-2,40}^{+1,83}$	$58,47_{-0,37}^{+0,41}$
Apszis- és csomóvonalmozgással kapcsolatos paraméterek ^c		
P_{apse} [év]	$7,3_{-0,3}^{+0,2}$	185_{-1}^{+1}
$P_{\text{apse}}^{\text{dyn}}$ [év]	$5,2_{-0,2}^{+0,1}$	$16,41_{-0,09}^{+0,16}$
$P_{\text{node}}^{\text{dyn}}$ [év]	$18,0_{-0,2}^{+0,1}$	
$\Delta\omega_{3b}$ [ívmásodperc/ciklus]	443_{-5}^{+4}	11433_{-113}^{+62}
$\Delta\omega_{\text{GR}}$ [ívmásodperc/ciklus]	$3,96_{-0,07}^{+0,06}$	$0,459_{-0,008}^{+0,10}$
$\Delta\omega_{\text{tide}}$ [ívmásodperc/ciklus]	362_{-17}^{+24}	$9,0_{-0,8}^{+0,9}$

12. táblázat. A TIC 88206187 rendszer fotodinamikai elemzéséből kapott pályaparaméterek. Fontos megjegyezni, hogy a paraméterek itt is pillanatnyi (oszkuláló) pályaelemek az első sorban megadott epochára.^a: $\mathcal{T}_0^{\text{inf}}$ jelöli a másodkomponens (Ab) és a harmadik komponens (B) alsó konjunkciójának pillanatát belső, illetve külső pályájuk mentén; ^b: periasztron-átmenet időpontja; ^c: ezen paramétereket a 4.4.1. alfejezetben diszkutáltam. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023b)

Ennek a rendszernek a jövőbeli fejlődése az egyik legizgalmasabb az általam vizsgált rendszerek közül. A rendszer szoros, így mind a belső kettőscsillag főkomponense, mind pedig a harmadik komponens kitöltheti majd a Roche-lebenyét életének egy szakaszá-

ban. A harmadik komponens Roche-lebenyének a sugara jelenleg $38,3R_{\odot}$, míg a csillag sugara $11,7R_{\odot}$. A főkomponens Roche-lebenyének a sugara $2,94R_{\odot}$ a csillag sugara pedig $2,25R_{\odot}$. Tehát a belső főkomponensnek elegendő csak körülbelül 30%-kal növelni a sugarát ahhoz, hogy kitöltse a Roche-lebenyét. A harmadik komponensnek több, mint háromszorosára kellene nőnie, hogy elérje ugyanezt. A MIST²² (Dotter és mtsai, 2016; Choi és mtsai, 2016) sztelláris evolúciós utak alapján a főkomponensnek még 260 millió év kell ahhoz, hogy elérje ezt az állapotot, viszont a külső komponens még ennél is gyorsabban fog fejlődni. A számítások alapján pár millió év múlva eléri a vörös óriás ág tetejét, bár ekkor még nem lesz elég nagy ahhoz, hogy kitöltse a Roche-lebenyét, de 180 millió év alatt el fogja érni az aszimptotikus óriáságot, és ott már eléggé felfúvódik ahhoz, hogy anyagot adhasson át a belső kettőscsillagnak. Maga a rendszer konfigurációja nem csak az anyagátadás szempontjából érdekes, hanem mert olyan árapályerők is felléphetnek, amelyek évtizedes skálán mérhető pályaszugorodáshoz vezethetnek.



28. ábra. A TIC 88206187 ETV görbéjének fotodinamikai illesztése. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023b)

Az eddig ismert összes triplán fedő hármas rendszer esetén ez a harmadik olyan csil-

²²MESA Isochrones and Stellar Tracks, MESA 1-dimenziós csillagevolúciós kód (Paxton és mtsai, 2011)

lagrendszer, ahol az úgynevezett fajlagos sugár eléri a 0,1 értéket. A fajlagos sugarat úgy definiáljuk, hogy a csillag sugarának abszolút értékét elosztjuk a pályája félnagy tengelyének abszolút értékével ($r_B = R_b/a_{out}$). Ennek köszönhetően a harmadik komponens okozta árapályerők fontosak lehetnek a rendszer fejlődésének szempontjából. A rendszer paramétereit alapján a várható erős árapály-kölcsönhatás okozta apszismozgás azonban még így is elhanyagolható a jóval erősebb dinamikai apszismozgáshoz képest. A fotodinamikai analízisből kapott távolságérték $d_{lc} = 2580 \pm 60$ pc jó egyezést mutat a *Gaia* méréseiből számolt távolságértékkel ($d_{EDR3} = 2490 \pm 90$ pc; Bailer-Jones és mtsai, 2021).

TIC 88206187			
Csillag paraméterek			
	Aa	Ab	B
Relatív értékek és atmoszféraparaméterek			
fajlagos sugár [R/a]	$0,3185^{+0,0047}_{-0,0039}$	$0,1905^{+0,0030}_{-0,0028}$	$0,1086^{+0,0021}_{-0,0020}$
relatív hőmérséklet a $(T_{\text{eff}})_{\text{Aa}}$ -hoz	1	$0,789^{+0,010}_{-0,010}$	$0,592^{+0,010}_{-0,012}$
relatív fényesség [in <i>TESS</i> mag]	$0,1600^{+0,0027}_{-0,0026}$	$0,0294^{+0,0011}_{-0,0011}$	$0,800^{+0,008}_{-0,015}$
Sztelláris paraméterek			
m [M_{\odot}]	$2,047^{+0,051}_{-0,061}$	$1,349^{+0,031}_{-0,026}$	$2,589^{+0,107}_{-0,090}$
R [R_{\odot}]	$2,253^{+0,048}_{-0,034}$	$1,349^{+0,030}_{-0,028}$	$11,71^{+0,28}_{-0,30}$
T_{eff} [K]	8358^{+279}_{-154}	6587^{+169}_{-72}	4947^{+70}_{-59}
L_{bol} [L_{\odot}]	$22,6^{+2,5}_{-2,0}$	$3,13^{+0,28}_{-0,23}$	$74,0^{+4,6}_{-4,3}$
M_{bol}	$1,39^{+0,10}_{-0,12}$	$3,53^{+0,08}_{-0,09}$	$0,10^{+0,07}_{-0,07}$
M_V	$1,35^{+0,09}_{-0,08}$	$3,50^{+0,09}_{-0,09}$	$0,38^{+0,07}_{-0,09}$
$\log g$	$4,040^{+0,010}_{-0,011}$	$4,307^{+0,010}_{-0,010}$	$2,713^{+0,016}_{-0,016}$
Globális rendszerparaméterek			
$\log(\text{kor})$		$8,81^{+0,04}_{-0,05}$	
$[M/H]$		$0,17^{+0,07}_{-0,16}$	
$E(B - V)$ [mag]		$0,28^{+0,04}_{-0,02}$	
extra fény ℓ_4 [in <i>TESS</i>]		$0,010^{+0,015}_{-0,008}$	
$(M_V)_{\text{tot}}$		$-0,03^{+0,07}_{-0,08}$	
távolság [pc]		2584^{+53}_{-68}	

13. táblázat. A TIC 88206187 rendszer fotodinamikai elemzéséből kapott sztelláris és globális rendszerparaméterek. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023b)

4.5.4. TIC 298714297

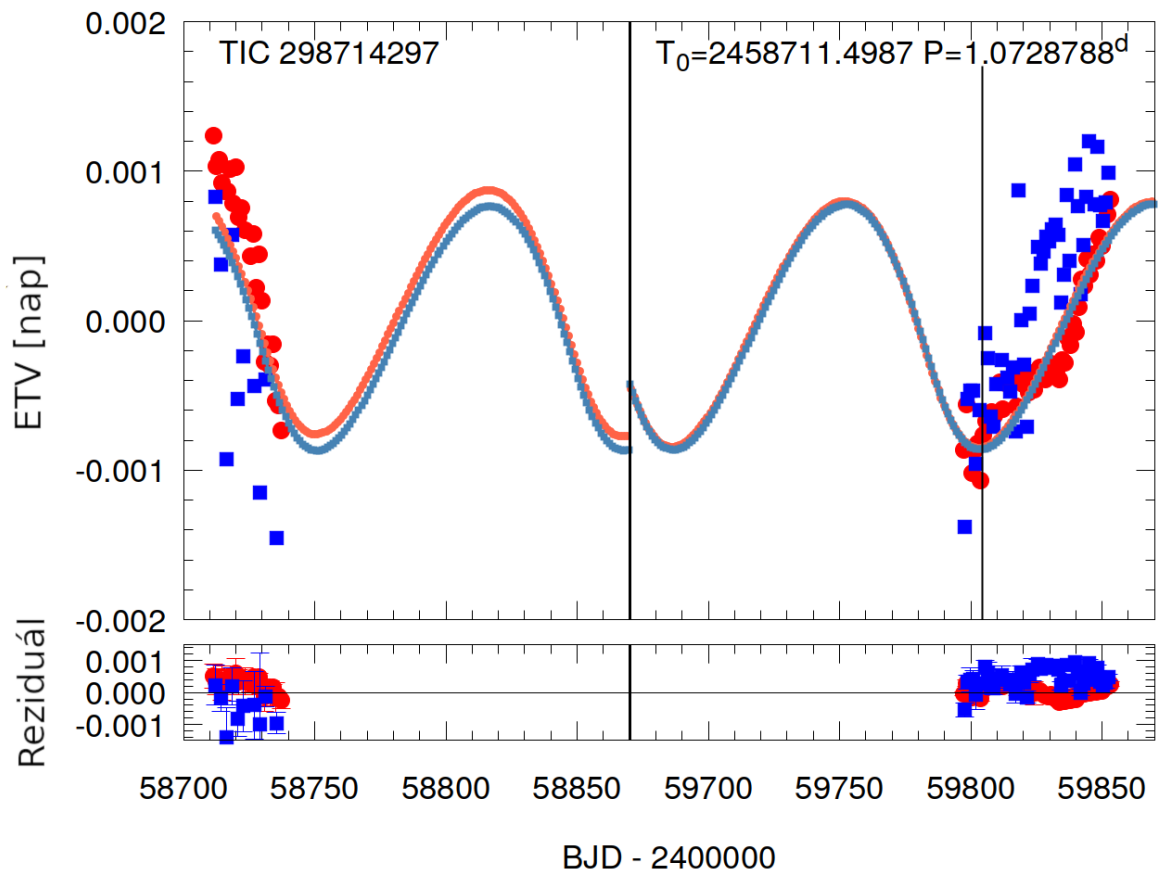
A sztelláris és pályaparaméterek a 14. és 15. táblázatban találhatóak. A többi rendszerrel összehasonlítva a TIC 298714297 K és F típusú, kis tömegű csillagokat tartalmaz ($m_{Aa} = 0,83 \pm 0,03M_{\odot}$, $m_{Ab} = 0,50 \pm 0,02M_{\odot}$, $m_B = 0,68 \pm 0,02M_{\odot}$). A harmadiktestfedések mellett erőteljes rotációs fényességváltozás is megfigyelhető a fénygörbéken, amely erőssége szektorról szektorra változik. A legjelentősebb rotációs változás az 55. és 56. szektorokban van. Emellett a fénygörbén azonosítottam három, rövid flereknek tűnő jelenséget is. Ez mind arra utal, hogy legalább az egyik csillagnak erős fotoszférikus és/vagy kromoszférikus aktivitása van. A rotációs periódus egybeesik a belső kettős periódusával, így valószínűsíthetően a belső kettőscsillag egyik komponenséről, méghozzá a főkomponenséről származik, amely a legnagyobb tömegű és fényességű a három csillag közül. A flerek esetén nem tudjuk eldönteni, hogy melyik csillag felelős értük, de a foltaktivitás és az ebből következő erős mágneses mező jelenléte miatt a legvalószínűbb forrás a főkomponens. A feltételezés esélyét valamennyire csökkentti az a tény, hogy a fler jelenséget a 15. szektorban figyeltük meg, amikor a rotáció okozta fényességváltozás minimális volt. Az evolúciós útvonalak alapján ez a rendszer a legidősebb, körülbelül 10 milliárd éves lehet. A vörösödésre $E(B - V) = 0,3 \pm 0,08$ érték jött ki, amely egy ennyire közeli rendszer esetén ($d_{lc} = 138 \pm 4$ pc; $d_{EDR3} = 111,9 \pm 0,7$ pc – Bailer-Jones és mtsai, 2021) nehezen elképzelhető, így ezeket az értékeket óvatosan kell kezelni. A belső pálya gyakorlatilag kör alakú, az excentricitás mindössze $e_{in} = 0,002^{+0,007}_{-0,001}$ értékű. A külső pálya viszont már nem kör, az excentricitása jóval jelentősebb: $e_{out} = 0,24 \pm 0,03$. Ebben a rendszerben az árapályerők okozta apszizmozgás dominál.

TIC 298714297		
Pályaelemek		
	Alrendszer	
	Aa–Ab	A–B
t_0 [BJD - 2400000]	58 711,0	
P [nap]	$1,072891^{+0,000010}_{-0,000019}$	$117,24^{+0,36}_{-0,31}$
a [R_\odot]	$4,863^{+0,050}_{-0,077}$	$127,5^{+1,3}_{-1,8}$
e	$0,0019^{+0,0072}_{-0,0009}$	$0,241^{+0,029}_{-0,028}$
ω [fok]	84^{+71}_{-10}	28^{+8}_{-6}
i [fok]	$89,00^{+0,93}_{-0,79}$	$89,86^{+0,10}_{-0,05}$
$\mathcal{T}_0^{\text{inf}}$ [BJD - 2400000] ^a	$58\,711,4972^{+0,0002}_{-0,0001}$	$59\,804,6649^{+0,0396*}_{-0,0385}$
τ [BJD - 2400000] ^b	$58\,710,942^{+0,213}_{-0,029}$	$59\,791,8^{+2,0}_{-1,6}$
Ω [fok]	0,0	$4,23^{+4,33}_{-4,13}$
i_{mut} [fok]	$4,41^{+4,18}_{-2,70}$	
tömegarány [$q = m_{\text{se}}/m_{\text{pri}}$]	$0,617^{+0,013}_{-0,016}$	$0,512^{+0,007}_{-0,009}$
K_{pri} [km s^{-1}]	$87,26^{+2,14}_{-2,02}$	$19,12^{+0,34}_{-0,27}$
K_{sec} [km s^{-1}]	$141,79^{+1,14}_{-1,94}$	$37,48^{+0,57}_{-0,60}$
Apszis- és csomóvonalmozgással kapcsolatos paraméterek ^c		
P_{apse} [év]	$27,8^{+1,9}_{-2,2}$	1124^{+30}_{-34}
$P_{\text{apse}}^{\text{dyn}}$ [év]	$22,4^{+1,2}_{-1,5}$	104^{+2}_{-3}
$P_{\text{node}}^{\text{dyn}}$ [év]	114^{+3}_{-2}	
$\Delta\omega_{3b}$ [ívmásodperc/ciklus]	$63,4^{+1,6}_{-1,5}$	4013^{+105}_{-85}
$\Delta\omega_{\text{GR}}$ [ívmásodperc/ciklus]	$2,28^{+0,05}_{-0,07}$	$0,014^{+0,004}_{-0,004}$
$\Delta\omega_{\text{tide}}$ [ívmásodperc/ciklus]	104^{+12}_{-9}	$0,025^{+0,002}_{-0,002}$

14. táblázat. A TIC 298714297 rendszer fotodinamikai elemzéséből kapott pályaparaméterek. Fontos megjegyezni, hogy ezek is az első sorban megadott epochára érvényes pillanatnyi (oszkuláló) pályaelemek. ^a: $\mathcal{T}_0^{\text{inf}}$ jelöli a másodkomponens (Ab) és a harmadik komponens (B) alsó konjunkciójának pillanatát a belső, illetve külső pályájuk mentén; ^b: a periasztron-átmenet időpontja; ^c: ezen paramétereket a 4.4.1. alfejezetben diszkutáltam. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023b)

TIC 298714297			
Csillagparaméterek			
	Aa	Ab	B
Relatív értékek			
fajlagos sugár [R/a]	$0,1728^{+0,0026}_{-0,0025}$	$0,1042^{+0,0050}_{-0,0043}$	$0,0053^{+0,0001}_{-0,0001}$
relatív hőmérséklet a $(T_{\text{eff}})_{\text{Aa}}$ -hoz	1	$0,678^{+0,006}_{-0,007}$	$0,840^{+0,015}_{-0,013}$
relatív fényesség [in <i>TESS</i> mag]	$0,6794^{+0,0386}_{-0,0335}$	$0,0532^{+0,0029}_{-0,0026}$	$0,2062^{+0,0191}_{-0,0217}$
Sztelláris paraméterek			
m [M_{\odot}]	$0,827^{+0,024}_{-0,036}$	$0,508^{+0,024}_{-0,025}$	$0,678^{+0,026}_{-0,022}$
R [R_{\odot}]	$0,839^{+0,021}_{-0,023}$	$0,506^{+0,030}_{-0,028}$	$0,669^{+0,022}_{-0,018}$
T_{eff} [K]	5332^{+106}_{-198}	3620^{+55}_{-121}	4463^{+133}_{-137}
L_{bol} [L_{\odot}]	$0,504^{+0,037}_{-0,040}$	$0,039^{+0,004}_{-0,004}$	$0,159^{+0,019}_{-0,016}$
M_{bol}	$5,51^{+0,09}_{-0,08}$	$8,30^{+0,11}_{-0,11}$	$6,77^{+0,11}_{-0,12}$
M_V	$5,67^{+0,15}_{-0,10}$	$9,82^{+0,33}_{-0,19}$	$7,41^{+0,23}_{-0,23}$
$\log g$	$4,505^{+0,010}_{-0,012}$	$4,733^{+0,027}_{-0,030}$	$4,617^{+0,009}_{-0,012}$
Globális rendszerparaméterek			
$\log(\text{kor})$		$10,02^{+0,04}_{-0,04}$	
$[M/H]$		$-0,01^{+0,28}_{-0,18}$	
$E(B - V)$ [mag]		$0,30^{+0,05}_{-0,09}$	
extra fény ℓ_4 [in <i>TESS</i>]		$0,05^{+0,05}_{-0,04}$	
$(M_V)_{\text{tot}}$		$5,45^{+0,17}_{-0,12}$	
távolság [pc]		138^{+4}_{-4}	

15. táblázat. A TIC 298714297 rendszer fotodinamikai elemzéséből kapott sztelláris és globális rendszerparaméterek. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023b)



29. ábra. A TIC 298714297 ETV görbéjének fotodinamikai illesztése. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023b)

4.6. Paraméterek összehasonlítása a *Gaia* NSS paraméterekkel

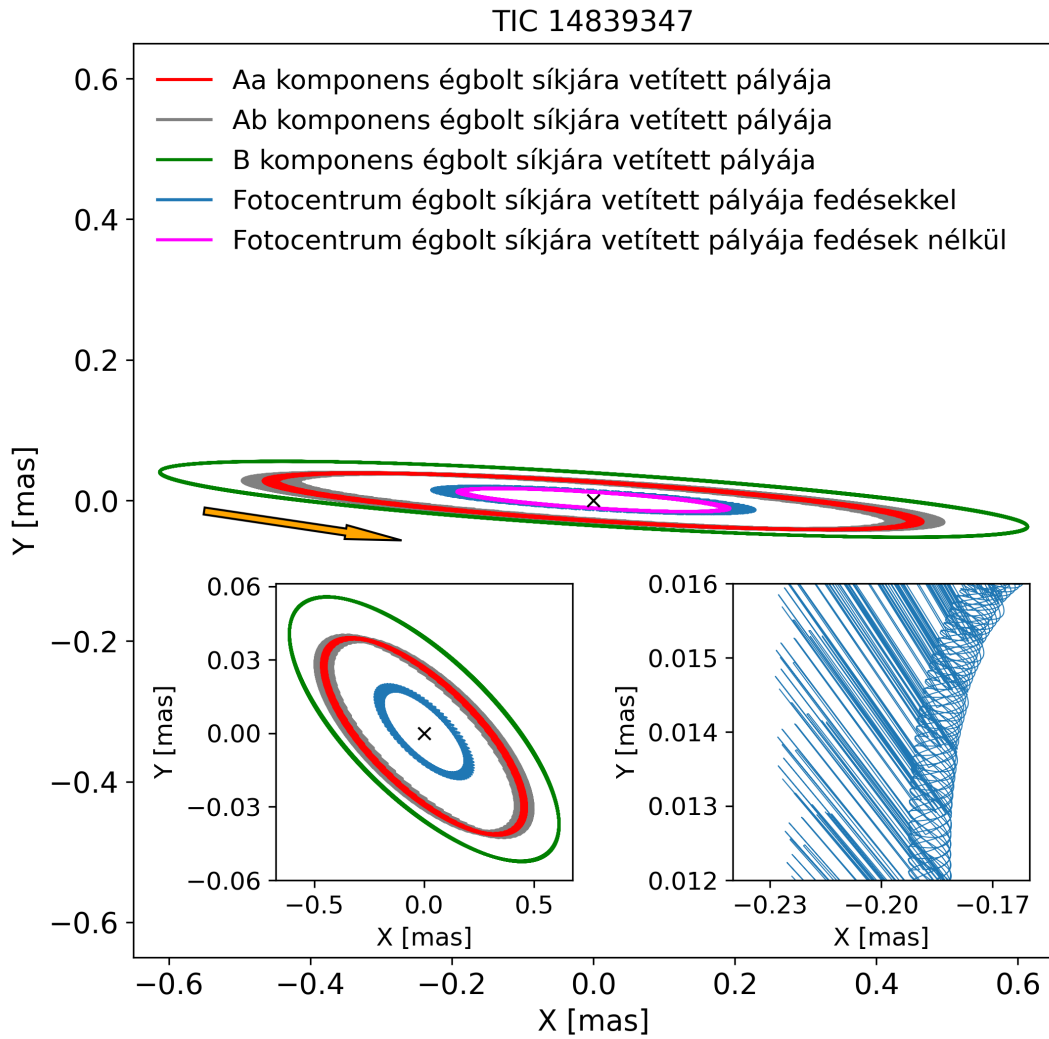
Annak köszönhetően, hogy ezeket a rendszereket a *Gaia* NSS katalógusa alapján találtam meg, az onnan származó pályaparamétereket összehasonlíthattam a LIGHTCURVEFACTORY szoftvercsomagból származó paraméterekkel. Ez lehetőséget adott a *Gaia* által megadott paraméterek jóságának ellenőrzésére, mivel a LIGHTCURVEFACTORY-ból származó paraméterek nagyobb pontosságúak a használt elemzési eljárások miatt, mint a *Gaia* NSS paraméterek. Fontos még kiemelni, hogy a *Gaia* és a LIGHTCURVEFACTORY paramétereik között módszertani eltérések vannak, így közvetlenül nem lehet egyes paramétereket összehasonlítani egymással. A *Gaia* NSS megoldások egyszerű kepleri pályák pályaelemei, míg a modellillesztésekből származó értékek pillanatnyi (oszkuláló) pályaelemek, viszont ahogy korábban megmutattam, a pályaelemek nem változnak jelentősen a *Gaia* űrtávcső észlelési ideje alatt. A külső pályák apszismozgása az összes rendszer esetén 185 és 2820 év közötti periódusú, ez pedig bőven meghaladja a *Gaia* űrtávcső várható élettartamát is. A paraméterértékek közötti eltérések még a 3.3. alfejezetben részben részletezett, fel nem bontottság miatti bizonytalanságból is származnak. Ez viszont az asztrometriai megoldások esetén okozhat eltérést a kepleri pályában, hiszen a fotocentrum helyzete a fedések miatt megváltozik, ez pedig ráakódhat a kepleri pályákra is extra mozgásként, ezért megvizsgáltam a fotocentrum mozgását a földi megfigyelő szempontjából. Ehhez a csillagok koordinátáit a LIGHTCURVEFACTORY szoftvercsomagból tudtam meghatározni. Utána a valódi távolságértékeket átszámoltam szögtávolságokra a rendszerek Földtől mért távolsága alapján, majd meghatároztam a csillagok fluxusait és kiszámoltam a fotocentrum helyét a (13) egyenlet alapján. Többek között a 30. ábra mutatja ezeket a pályákat, amelyekből meg lehet állapítani, hogy a *Gaia* asztrometriai pontossága nem elegendő ahhoz, hogy ezeket az apró eltéréseket a kepleri pályától megfigyelhesse. Ezeket figyelembe véve a 16. és 17. táblázatokban összehasonlítottam a *Gaia* NSS asztrometriai és spektroszkópiai megoldásokból származó paramétereket a LIGHTCURVEFACTORY-ból származó paraméterekkel. A külső pálya periódusa, inklinációja jó közelítéssel megegyezik, és az excentricitás is több esetben jó értéket ad.

	TIC 66893949	TIC 298714297
P[nap]	$471,03^{+0,10}_{-0,07}$	$117,25^{+0,36}_{-0,31}$
	$470,72 \pm 3,37$	$118,60 \pm 0,28$
e	$0,4016^{+0,0039}_{-0,0038}$	$0,242^{+0,029}_{-0,029}$
	$0,404 \pm 0,065$	$0,185 \pm 0,065$
ω [fok]	$25,8^{+1,3}_{-1,5}$	28^{+8}_{-7}
	$237,011 \pm 8,744$	161 ± 20
i	$90,222^{+0,010}_{-0,009}$	$89,86^{+0,09}_{-0,05}$
	$91,39 \pm 1,37$	$89,53 \pm 2,21$
a[R _☉]	$386,4^{+4,2}_{-3,4}$	$127,3^{+1,3}_{-1,8}$
	$72,09 \pm 2,48$	$16,37 \pm 0,50$
a[mas]*	$0,270 \pm 0,15$	$0,325 \pm 0,2$
	$0,5881 \pm 0,0255$	$0,6781 \pm 0,0212$

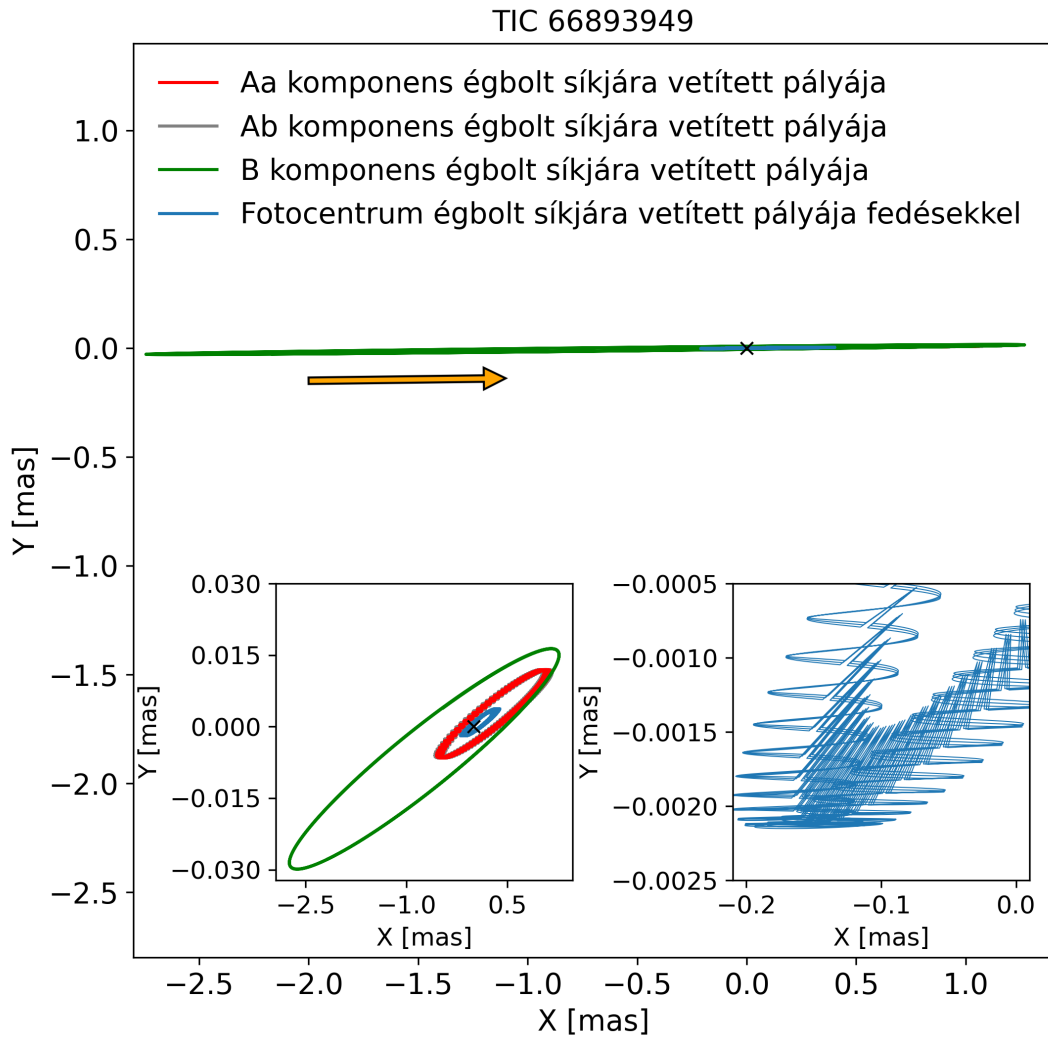
16. táblázat. A TIC 66893949 és TIC 298714297 asztrometriai *Gaia* NSS megoldásai-ból származó paraméterek összehasonlítása a LIGHTCURVEFACTORY-ból származó külső pályák paramétereivel. Minden rendszer esetén a felső érték tartozik a LIGHTCURVEFACTORY megoldáshoz, az alsó érték pedig a *Gaia* DR3 NSS megoldáshoz. *: a fotocentrum félnagy tengelye, szögértékben kifejezve a *Gaia* NSS megoldásból és a LIGHTCURVEFACTORY-ból számolva. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023b)

	TIC 14839347	TIC 88206187
P[nap]	$85,524^{+0,0017}_{-0,0015}$	$52,922^{+0,041}_{-0,039}$
	$85,315 \pm 0,2458$	$53,035 \pm 0,058$
e	$0,047^{+0,011}_{-0,013}$	$0,026^{+0,017}_{-0,013}$
	$0,022 \pm 0,057$	$0,100 \pm 0,044$
ω [fok]	$269,9^{+2,8}_{-3,3}$	147^{+100}_{-99}
	$44,0 \pm 156,3$	212 ± 9
K _{sec} [km/s]	$46,4^{+0,5}_{-0,7}$	$58,47^{+0,41}_{-0,37}$
	$50,3 \pm 2,6$	$65,23 \pm 3,54$

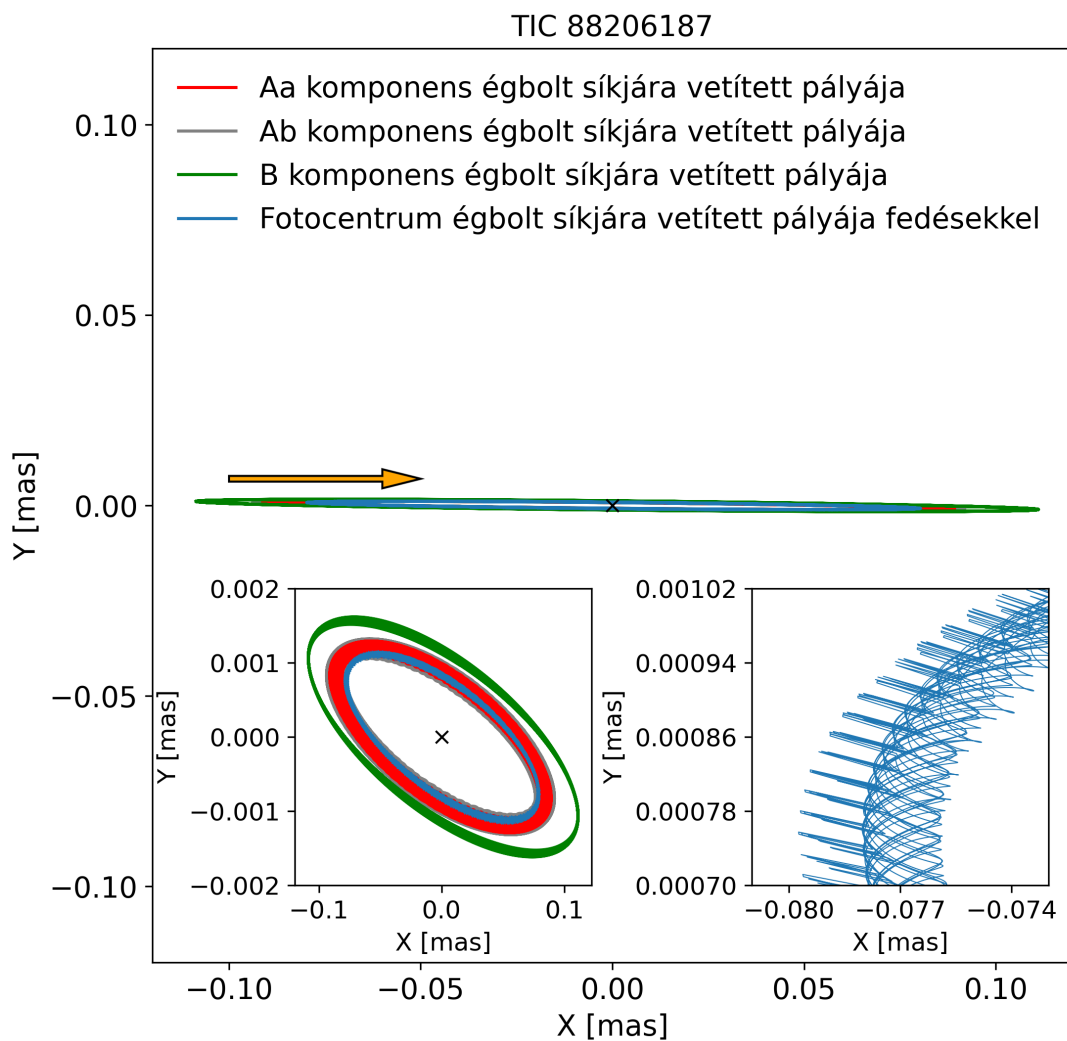
17. táblázat. A TIC 14839347 és TIC 88206187 spektroszkópiai *Gaia* NSS megoldásai-ból származó paraméterek összehasonlítása a LIGHTCURVEFACTORY-ból származó külső pályák paramétereivel. Minden rendszer esetén a felső érték tartozik a LIGHTCURVEFACTORY megoldáshoz, az alsó érték pedig a *Gaia* DR3 NSS megoldáshoz. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023b)



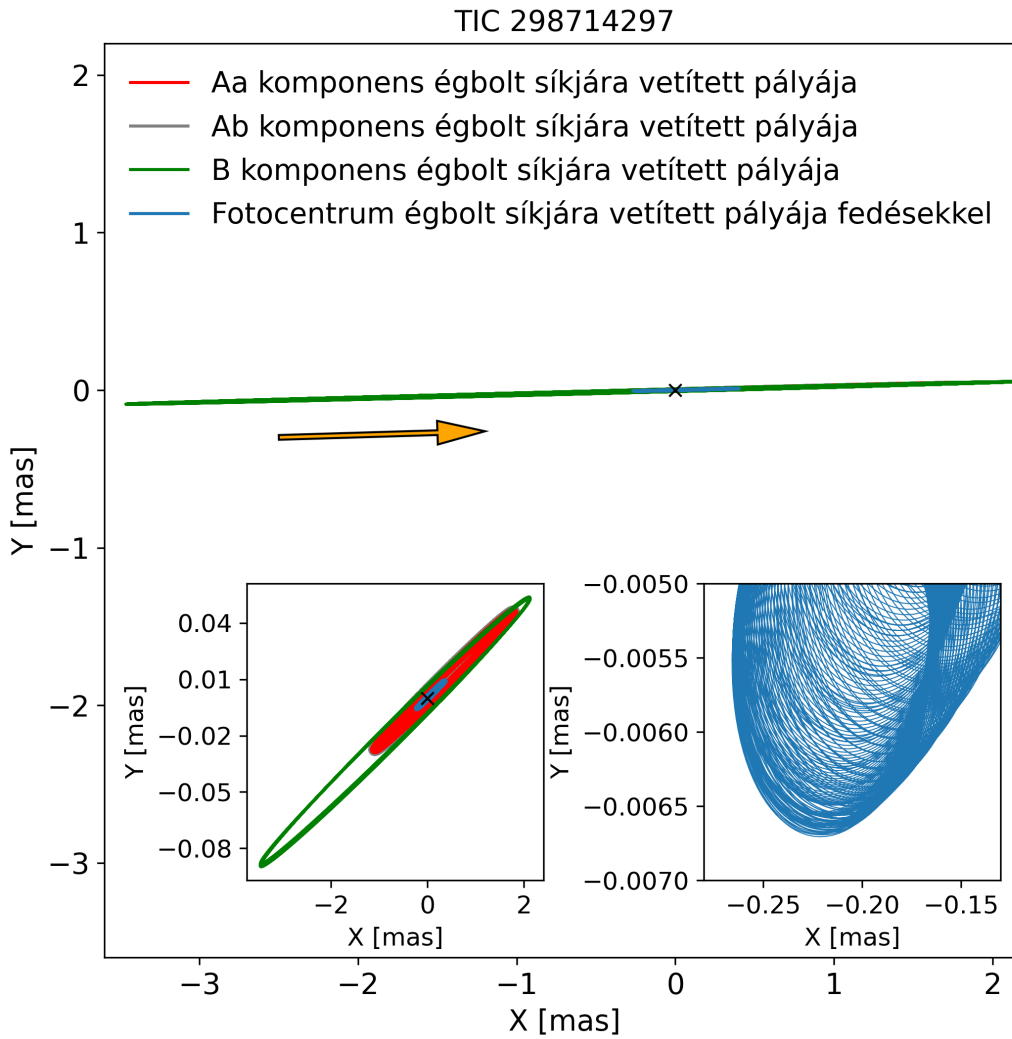
30. ábra. Asztrometriai pályák a TIC 14839347 rendszer esetén a meghatározott fotocentrumpályával együtt ábrázolva. A bal oldali belső ábrán ugyanez látható, csak különböző beosztású x és y skálán. A jobb oldali belső ábrán a fotocentrumpálya egy részének kinagyítása látható. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023b)



31. ábra. Asztrometriai pályák a TIC 66893949 rendszer esetén a meghatározott fotocentrumpályával együtt ábrázolva. A bal oldali belső ábrán ugyanez látható, csak különböző beosztású x és y skálán. A jobb oldali belső ábrán a fotocentrumpályája egy részének kinagyítása látható. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023b)



32. ábra. Asztrometriai pályák a TIC 88206187 rendszer esetén a meghatározott fotocentrumpályával együtt ábrázolva. A bal oldali belső ábrán ugyanez látható, csak különböző beosztású x és y skálán. A jobb oldali belső ábrán a fotocentrumpálya egy részének kinagyítása látható. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023b)



33. ábra. Asztrometriai pályák a TIC 298714297 rendszer esetén a meghatározott fotocent-rumpályával együtt ábrázolva. A bal oldali belső ábrán ugyanez látható, csak különböző beosztású x és y skálán. A jobb oldali belső ábrán a fotocent-rumpályája egy részének kinagyítása látható. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023b)

4.7. Összefoglaló

Egy új módszer, nevezetesen a *Gaia* NSS megoldásokban talált szoros hierarchikus hármas csillagrendszer jelöltek *TESS* fénygörbéinek elemzésével találtam négy, eddig nem ismert, triplán fedő hierarchikus hármas csillagrendszert. Ennek a négy rendszernek a fotodinamikai elemzését végeztem el a LIGHTCURVEFACTORY szoftvercsomag segítségével, és meghatároztam a rendszerek legfontosabb sztelláris és pályaparamétereit.

A TIC 14839347 rendszer esetén megállapítottam, hogy a másodkomponens teljesen, vagy majdnem kitöltötte a Roche-lebenyét. Ezért a paraméterek meghatározását egy iteratív eljárással végeztem. Megerősítettem, hogy a belső kettőscsillag közül a másodkomponens ténylegesen kitölthette a Roche-lebenyét, anyagot átadva a főkomponensnek. A rendszer belső kettőscsillaga 0,25 tömegarányal rendelkezik, ez pedig egy Algol-típusú rendszerré teszi, fordított tömegarányal. Megállapítottam, hogy a belső főkomponens és a harmadik komponens hasonló tömegű, ennek ellenére a külső komponens jobban elfejlődöttnek látszik a belső főkomponenshez képest, ami tovább erősíti azt a sejtést, hogy a belső főkomponens anyagot kapott a másodkomponensről.

A TIC 66893949 rendszer esetén megállapítottam, hogy három, Napunkhoz hasonló tömegű csillagot tartalmaz, és a leglapultabb²³ külső pályával rendelkezik a vizsgált rendszerek közül.

A TIC 88206187 rendszernek van a legrövidebb külső periódusa a vizsgált csillagok közül. Mindössze $P_{out} = 52,92 \pm 0,04$ nap alatt kerüli meg a harmadik komponens a belső kettőscsillagot. Meghatároztam többek között a harmadik komponens sugarát is, amely azt mutatta, hogy egy vörös óriáscsillag lehet. Ez a harmadik olyan ismert rendszer, ahol a fajlagos sugár meghaladja a 0,1-es értéket. A rendszer fejlődése egzotikusnak mondható, mivel pár száz millió éven belül valószínűsíthetően a harmadik komponens kitölti majd a Roche-lebenyét, és anyagot fog átadni a belső kettőscsillagnak.

A TIC 298714297 rendszer esetén megállapítottam, hogy az egyik legközelebbi eddig felfedezett hármas rendszer. Három kistömegű csillagot tartalmaz a rendszer, és valószínűsíthetően a belső kettőscsillag főkomponense mágnesesen aktív: folttevékenységet és fleraktivitást mutat.

Végül a LIGHTCURVEFACTORY illesztéseiből származó paramétereket összehasonlítottam a *Gaia* NSS megoldásokból származó paraméterekkel. A külső pálya periódusa és inklinációja jó közelítéssel megegyezik, és az excentricitás is több esetben jó értéket ad. A többi paramétert óvatosan kell kezelni, de ennek oka a módszertani különbségekből ered.

²³A két pálya közel egy síkban található, tehát a köztes inklináció értéke közel nulla

5. Összefoglalás és kitekintés

Munkám során szoros hierarchikus hármas csillagrendszerekkel foglalkoztam. Ezek a rendszerek még a kettőscsillagokhoz képest is extrém fejlődési utat képesek bejárni. Sok olyan kompakt objektum progenitorai lehetnek, amelyek jelenleg is az asztrofizika homlokterében állnak. A hierarchikus hármas csillagrendszerek emellett lehetőséget biztosítanak arra, hogy a rendszer tagjainak keringési pályáihoz, és a rendszert alkotó csillagokhoz kapcsolódó fontosabb paramétereket meghatározhassuk, ezzel pedig tesztelhesük az elméleti modelljeinket. Az elmúlt 15 évben új, az eddigiéknél még jobb űreszközök kerültek a világűrbe. A *Kepler* és *TESS* űrtávcsövek ultraprecíz fotometriájának köszönhetően ugrásszerűen elkezdett nőni az ismert hármas rendszerek száma, emellett pedig a *Kepler* űrtávcső adatait átvizsgálva felfedezték az első triplán fedő hierarchikus hármas csillagrendszert. Ezután további hasonló felfedezések következtek, többek között a később felbocsátott *TESS* űrtávcsőnek köszönhetően is, viszont még mindig kevés ilyen rendszert ismerünk ahhoz, hogy kielégítő statisztikai megfontolásokat is tehessünk sztelláris és pályaparamétereik alapján a kialakulásukra és fejlődésükre vonatkozóan.

Értekezésem első részében a *Gaia* űrtávcső harmadik adatkibocsátásával érkező, nem egyedülálló csillagokra vonatkozó megoldásait használtam fel fedési kettőscsillagok körüli harmadik komponensek után kutatva. A nem egyedülálló csillagokra vonatkozó katalógus olyan kettőscsillagokat tartalmaz, amiket a *Gaia* asztrometriai, spektroszkópiai vagy fotometriai módszerekkel fedezett fel. A harmadik komponens jelenlétét kerestem ezen adatok között úgy, hogy több, fedési kettőscsillagokat tartalmazó katalógusban megtalálható csillagot vizsgáltam meg, hogy szerepelnek-e a *Gaia* NSS katalógusában. Amennyiben igen, megnéztem, hogy a *Gaia* katalógusban szereplő periódus meghaladja-e a fedési kettőscsillag periódusának ötszörösét. Azért választottam ezt a határt, mert a jelenleg ismert legkisebb periódusarányal rendelkező csillagban a külső pálya periódusa 5,4-szerese a belső pályaperiódusnak. Amennyiben teljesül ez a feltétel, akkor feltehető, hogy a *Gaia* a kettőscsillaghoz tartozó harmadik komponens külső pályáját azonosította. Ennek oka, hogy a *Gaia* a három módszer egyikével sem tudja felbontani a csillagokat, így sok esetben a külső pályát látja annak tudta nélkül, hogy az egyik csillag valójában egy szoros kettőscsillag.

Az azonosítást a nagy számú fedési kettőscsillagot tartalmazó katalógusokban található rendszerek összegyűjtésével kezdtem. Majd a VizieR adatbázis felhasználásával az összes csillagra megvizsgáltam, hogy található-e róluk *Gaia* NSS megoldás. Összesen 403 szoros hierarchikus hármas csillagrendszer jelöltet találtam (Czavalinga és mtsai, 2023a). 100 rendszert tisztán spektroszkópiai úton talált a *Gaia*, 267-et pedig tisztán asztrometriai úton. 31 csillag esetén pedig kombinált megoldásokat tartalmazott a katalógus. Ezekből

27 már ismert rendszer volt, de a maradék 376 rendszer ismeretlen volt a tudományos közösség számára. A *Gaia* NSS megoldásainak paramétereit felhasználva elemeztem a rendszerek belső és külső pályaperiódusainak eloszlását, és megállapítottam, hogy a rendszerek nagy része szoros, amelyek a hierarchikus hármas csillagrendszerek egy igen szűk hányadát képezik. Ezzel jelentősen növelni tudtam az ilyen típusú rendszerek számát. Emellett megvizsgáltam a rendszerek külső pályáinak excentricitását, és arra a következtetésre jutottam, hogy ez az egyenletes eloszlástól, valamint az elméletileg számolt „termális” eloszlástól jelentősen eltér, viszont jól illeszkedik korábbi ilyen típusú mérésekhez.

A rendszerek valódiságának megerősítése érdekében a *TESS* űrtávcső adatait felhasználva Dr. Mitnyan Tibor konzulensem létrehozta a rendszerek fénygörbéit, és ebből meghatározta a belső kettőscsillagok fedési minimumidőpontjait.

22 rendszer esetén az ETV lefedettsége lehetővé tette, hogy egyértelműen azonosítsam a harmadik komponens okozta fényidőeffektust. Kiszámoltam a dinamikai hozzájárulást is ezekre a rendszerekre, és arra jutottam, hogy az összes rendszer esetében az LTTE amplitúdója jelentősen meghaladja a dinamikai amplitúdót, így az illesztést tisztán csak az analitikus LTTE összefüggés felhasználásával végeztem.

192 rendszer esetén nemlineárisan változik a fedési minimumidőpontok között eltelt idő, ebből pedig arra következtettem, hogy egy harmadik test dinamikai vagy fényidőeffektusa okozhatja a változásokat. Így ezeket a rendszereket is megerősítettnek tekintem.

Hat rendszer esetén harmadiktest-fedéseket azonosítottam. Ezek a fedések egyértelműen jelzik, hogy egy harmadik komponens is van a rendszerben. Ebből négy eddig ismeretlen volt a tudományos közösség számára.

Így összesen 218 rendszer esetén tudtam megerősíteni, hogy szoros hierarchikus hármas csillagrendszerekről van szó esetükben (Czavalinga és mtsai, 2023a). Dolgozatom elkészülését megelőzően mindösszesen 314 szoros hierarchikus hármas csillagrendszert ismertünk, munkámnak köszönhetően több mint az eddigi ismert rendszerek felével gazdagodott a szakirodalom.

22 rendszer esetén, az ETV görbék jó lefedettsége révén lehetőségem volt a *Gaia* űrtávcső által kimért paramétereket ellenőrizni egy független módszerrel. Erre írtam egy saját programot, amely segítségével az ETV-ket interaktív módon tudtam illeszteni analitikus LTTE függvényekkel. A legjobb illesztések paramétereit pedig összehasonlítottam a *Gaia* nem egyedülálló csillagokra vonatkozó katalógusában szereplő paraméterekkel. A periódusok között nagyon jó egyezést tudtam kimutatni. Ebben a paraméterben meg lehet bízni, és ez tovább erősíti az általam talált hármas csillagrendszer jelöltek valódiságát. Bár az excentricitásokban nagyobb eltéréseket figyeltem meg, a hibák is nagyobbak, de a legtöbb esetben a hibahatáron belüli egyezéseket kaptam. A félnagy tengely vetülete tekintetében

viszont jelentős eltérések mutatkoztak. Ez nem meglepő azt figyelembe véve, hogy a *Gaia* űrtávcső csak a három csillag fotocentrumát tudja követni, amely minden esetben kisebb értéket vesz fel, mint a félnagy tengely valódi vetülete. A periasztron argumentumánál pedig van egy 180° -os bizonytalanság, mivel míg az LTTE esetén minden esetben a belső kettőscsillag értékét határozzuk meg, addig a *Gaia* űrtávcső esetén nem tudjuk eldönteni, hogy a belső kettős pályáját látta, vagy a külső komponens pályáját.

Munkám második részeként négy, eddig nem ismert triplán fedő hierarchikus hármas rendszer (nevezetesen TIC 14839347, TIC 66893949, TIC 88206187 és TIC 298714297) komplex fotodinamikai analízisét végeztem el (Czavalinga és mtsai, 2023b). Ehhez a *TESS* fénygörbét használtam fel, valamint a konzulensem, Dr. Borkovits Tamás által fejlesztett LIGHTCURVEFACTORY szoftvercsomagot. Meghatároztam a rendszerek spektrális energiaeloszlását is, hogy több információ álljon rendelkezésre a rendszerek tekintetében. Az ASAS-SN és ATLAS égboltfelmérő programok archívumában is megkerestem ezeket a rendszereket, amelyekben a TIC 14839347 és a TIC 88206187 esetén sikeresen azonosítottam a harmadik test fedéseit. Végül pedig mind a négy rendszerre elvégeztem a komplex fotodinamikai elemzést.

A TIC 14839347 rendszer illesztése volt a legkomplikáltabb, mivel már előzetesen kiderült, hogy a másodomponens kitölthette a Roche-lebényét, tömeget átadva társának. Emiatt a PARSEC evolúciós utakat nem használhattam, mivel azokat magányos csillagokra határozták meg. Ennek okán egy iteratív eljárás keretében, a csillag spektrális energiaeloszlását használva határoztam meg a rendszer paramétereit. Az eredmények beigazolták a sejtésemet, miszerint a másodkomponens ténylegesen kitöltötte a Roche-lebényét. A korábbi tömegátadás jele még, hogy bár a fő-, és a harmadik komponens hasonló tömegű, a távoli csillag jobban elfejlődöttnek tűnik a főkomponenshez képest.

A TIC 66893949 rendszer három, Napunkhoz hasonló csillagot tartalmaz. A tág pályák ellenére a rendszer igen lapult²⁴, így erős dinamikai hatásokra nem számítok, amit az ehhez kapcsolódó paraméterek is megerősítenek. Ennek a rendszernek a legnagyobb a külső excentricitása a vizsgált rendszerek közül.

A TIC 88206187 az egyik legkülönlegesebb rendszer evolúciós szempontból azok közül, amelyeket vizsgáltam. Ez a harmadik olyan hármas rendszer, ahol a fajlagos sugár (R_b/a_{out}) eléri a 0,1-es értéket. Amikor majd a harmadik komponens az aszimptotikus óriáságra kerül, valószínűsíthetően ki fogja tölteni a Roche-lebényét, és anyagot fog átadni a belső kettőscsillagnak.

A TIC 298714297 az egyik legközelebbi triplán fedő hármas rendszer, amit eddig talál-

²⁴minél tágabb a pálya egyre inkább arra számíthatunk, hogy a két pálya síkja nem esik egybe, ennek oka, hogy távoli keringési pályákon levő külső komponens a belső kettőscsillaghoz képest külön, külön is kialakulhatott, így véletlenszerű köztér inklinációval rendelkezhet a rendszer

tak. Három kis tömegű csillagból áll. A főkomponens esetén a rotációs fényességváltozás alapján feltételezés valószínűsíthető, amelyet a főkomponens mágneses aktivitásával kötöttem össze. Ez magyarázhatja a rendszer fénygörbéjén látható flereket is.

Végül a négy rendszer esetén megvizsgáltam, hogy a *Gaia* NSS megoldásból származó pályaparaméterek mennyire megbízhatóak, mivel a fotodinamikai elemzésből származó paraméterek a módszertan okán sokkal pontosabbak. A periódus, excentricitás és az inklináció mind a négy csillag esetén jó közelítéssel megegyezik. A numerikus integrálásnak köszönhetően meghatároztam a csillagok látszólagos mozgását, ebből pedig kiszámoltam a fotocentrum látszólagos mozgását pályáját. Megállapítottam, hogy a *Gaia* ténylegesen a fotocentrumot láthatja.

A *TESS* űrtávcső jelenleg is hibátlanul működik, és remélhetőleg ez továbbra is így marad, de eközben új égboltfelmérő missziók is lassan a megfigyelési fázisba érnek, mint például a *PLATO*. Rengeteg új adat fog rendelkezésre állni, és mindegyik mélyén ott bújhat meg egy-egy újabb hierarchikus hármas csillagrendszer. A *Gaia* űrtávcső következő nagy adatkibocsátása 2025 végén várható, rengeteg új adattal, amelyeket áttanulmányozva további hierarchikus hármas csillagrendszereket találhatunk az általam először alkalmazott új keresési módszer felhasználásával.

Bizok benne, hogy munkámmal hozzájárultam a jelenlegi kutatásokhoz, és hogy a jövőben a jelenlegi eredményeimet felhasználva még mélyebbreható kutatómunkát tudok majd végezni ezen területen. A hierarchikus hármas csillagrendszerek már így is a Világegyetem egyik legizgalmasabb objektumai és a nagy égboltfelmérő programoknak köszönhetően remélhetőleg ez a jövőben még inkább így lesz.

6. Summary and conclusion

In my research, I have worked with compact hierarchical triple star systems, which have an extreme evolutionary path even compared to binary stars. This type of object can be the progenitors of many compact objects that are currently at the forefront of astrophysics. Hierarchical triple star systems also provide an opportunity to determine important parameters related to the orbits of the system members and the stars that make up the system, and thus to test theoretical stellar models. In the last 15 years, new and better space instruments have been launched into space. Thanks to the ultra-precise photometry of the *Kepler* and *TESS* space telescopes, the number of known triple systems has started to grow rapidly. In addition, the first triply eclipsing hierarchical triple star system has been discovered in 2011 in the *Kepler* space telescope data. Further discoveries followed, mostly found by *TESS* space telescope. However, we still know a relatively small amount of such systems to perform extensive statistical analyses based on their stellar and orbital parameters which could bring us closer to fully understand their formation and evolution.

In the first part of my thesis, I used parameters from Non-Single Stars (NSS) catalog of the *Gaia* space telescope's third data release to search for a third component around eclipsing binaries (Czavalinga et al., 2023a). The NSS catalog encompasses binaries detected by *Gaia* using astrometric, spectroscopic, and/or photometric methods. I employed a criterion that involved cross-referencing stars in various eclipsing binary catalogs with the *Gaia* NSS catalog and verifying whether the period in the *Gaia* NSS catalog exceeded five times the period of the eclipsing binary star. This threshold was selected because the smallest known outer/inner period ratio for a hierarchical triple star systems is 5.4 and according to theoretical studies such systems cannot be stable in long-term with a period ratio of 5 or below. Meeting this condition implied that *Gaia* had identified the outer orbit of the third component of the binary star, considering *Gaia*'s incapacity to spatially resolve stars in these systems.

I initiated the identification process by collecting systems from catalogs containing a large number of eclipsing binaries. Subsequently, I used the VizieR database to check for *Gaia* NSS solutions for all stars. In total, I found 403 hierarchical triple star system candidates. 100 systems were discovered through pure spectroscopy, 267 through pure astrometry, and 31 stars had combined solutions in the catalog. Out of these, 27 were already known systems, but the remaining 376 systems were previously unknown to the scientific community. Using the parameters from *Gaia* NSS solutions, I analyzed the distribution of inner and outer orbital periods of these systems and found that the majority of them belongs to the group of compact hierarchical triple star systems. This significantly expanded the number of such systems that we currently know. Additionally, I examined the eccentricity of the outer orbits and concluded that it deviates significantly from a

uniform distribution and the theoretically calculated „thermal” distribution but aligns well with the measurements of similar previous studies.

In order to confirm the validity of the systems, my advisor, Dr. Tibor Mitnyan, utilized data from the *TESS* space telescope to generate light curves for these systems and determined the eclipse times of these eclipsing binaries.

For 22 systems, the coverage of the Eclipse Timing Variation (ETV) curves allowed me to clearly identify the Light Travel Time Effect (LTTE) caused by the third component. I also calculated the dynamical contribution for these systems and found that the LTTE amplitude significantly exceeded the dynamical amplitude, leading me to perform the fitting purely using the analytical LTTE formula.

For 192 systems, there is a nonlinear variation in the ETVs, suggesting that the dynamic or LTTE effect of a third body could be causing this type of variation. Thus, I considered these systems confirmed as well.

I identified third-body eclipses for six systems, clearly indicating the presence of a third component in the system. Four of these were previously unknown to the scientific community.

In total, I confirmed that 218 systems are compact hierarchical triple star systems. Prior to my thesis, only 314 compact hierarchical triple star systems were known, hence my work added more than half of that to the number of known systems which may be a substantial contribution to the field.

For 22 systems, the extensive coverage of the ETV curves allowed me to verify the parameters measured by the *Gaia* space telescope using an independent method. For this purpose, I developed a Python3 program to interactively fit the ETVs with the analytical LTTE formula. The parameters of the best fits were then compared with those in the *Gaia* NSS catalog. I found a very good agreement between the periods, which can be trusted and further confirms the validity of the triple star system candidates I identified. While I observed larger variations in eccentricities, the errors were also larger, but in most cases, the matches fell within the error range. However, there were significant differences in the value of the projected semi-major axis. This is not surprising, considering that the *Gaia* space telescope can only track the photocenter of the system, which in all cases results in a smaller value for the projected semi-major axis than the real one. Additionally, the argument of periastron has an uncertainty of 180 degrees because, while in the case of the LTTE detected through ETVs, we always determine the orbit of the inner binary star around the common center of mass of the system, in the case of the *Gaia* space telescope, we cannot determine whether it observed the orbit of the inner binary or the outer component.

As the second part of my work, I performed a complex photodynamical analysis of four

previously unknown triply eclipsing triple systems (namely TIC 14839347, TIC 66893949, TIC 88206187, TIC 298714297) (Czavalinga et al., 2023b). For this purpose, I utilized the *TESS* light curves and the LIGHTCURVEFACTORY software package developed by my advisor, Dr. Tamás Borkovits. I also determined the spectral energy distribution (SED) of the systems to gain more information about them. Furthermore, I searched the archives of the ASAS-SN and ATLAS sky survey programs for these systems. In the case of TIC 14839347 and TIC 88206187, I successfully identified third-body eclipses in the archival data. Finally, I performed a complex photodynamical analysis for all four systems.

The modeling of TIC 14839347 was particularly challenging, as it was preliminarily found that the secondary component of the inner binary could fill its Roche lobe, transferring mass to its companion. Consequently, I could not use PARSEC evolutionary paths, as they are defined for single stars. Instead, I determined the system’s parameters using an iterative procedure based on the SED of the star. The results confirmed my suspicion that the secondary component indeed filled its Roche lobe. Further evidence of past mass transfer was apparent in the fact that, despite the primary and third components having similar masses, the distant star appeared to be more evolved compared to the primary component.

The TIC 66893949 system consists of three stars similar to our Sun. Despite the wide orbits, the system is highly flattened, and with wider orbits, we expect the orbital planes of the two components not to coincide. This is because the outer component in distant orbit may have formed separately from the inner binary star, resulting in a mutual inclination with a random value. Therefore, I did not expect strong dynamical effects, which was confirmed by the associated parameters. This system exhibited the highest outer eccentricity among the systems studied. TIC 88206187 is one of the most unique systems from an evolutionary perspective among those I investigated. It is the third triple system where the fractional radius (R_b/a_{out}) reaches 0.1. When the third component reaches the asymptotic giant branch, it is likely to fill its Roche lobe and transfer material to the inner binary components. TIC 298714297 is one of the closest triply eclipsing triple stars found to date. It consists of three low-mass stars. For the primary component, I inferred the presence of spot activity based on rotational brightness variations, which I connected to magnetic activity. This could also explain the observed flares in the system’s light curve. Finally, I examined in the case of the four systems how reliable the orbital parameters derived from the *Gaia* NSS solutions are, as the parameters obtained from photodynamical analysis are much more accurate due to the methodology. The periods, eccentricities, and inclinations for all four stars approximately match. Thanks to numerical integration, I determined the apparent motion of the stars and calculated the apparent motion

of the photocenter. I concluded that *Gaia* indeed observes the photocenter. The *TESS* space telescope is currently functioning flawlessly, and hopefully, it will continue to do so. Meanwhile, new sky survey missions are slowly entering the observation phase, such as PLATO. A wealth of new data will become available, and within it, new hierarchical triple star systems may be lurking. The next major data release from the *Gaia* space telescope is expected at the end of 2025, bringing a large amount of new data that, when studied, could reveal even more hierarchical triple star systems. I believe that my work has contributed to current research efforts, and with the results I have obtained, I hope to conduct further in-depth research in this field in the future. Hierarchical triple star systems are already some of the most exciting objects in the universe, and thanks to large sky survey programs, they are likely to become even more fascinating in the future.

7. Hivatkozások

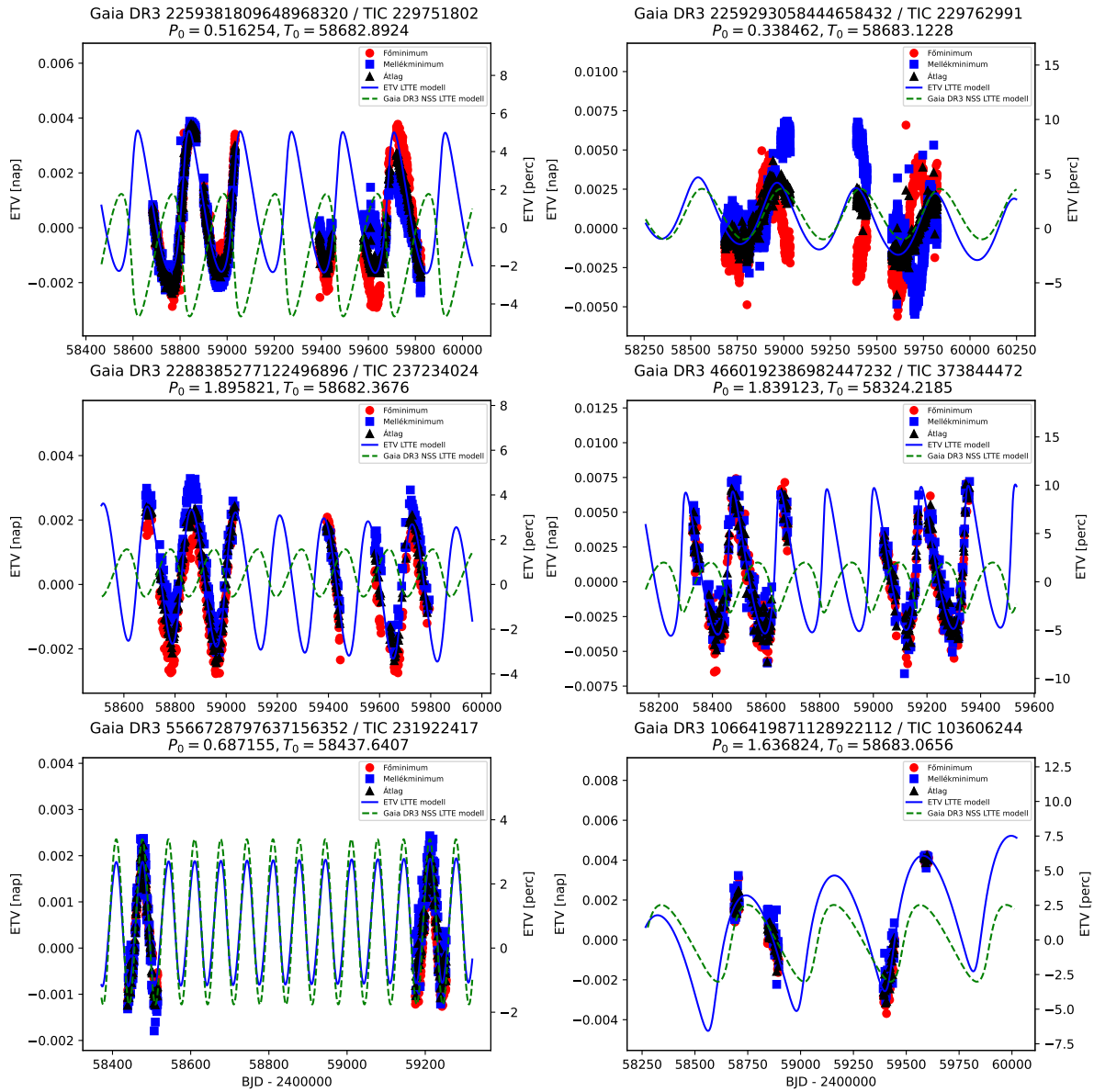
- Abt, H., 2005, *ApJ*, 629, 1
- Babusiaux, C., Fabricius, C., Khanna, S. és mtsai, 2022, arXiv e-prints, arXiv:2206.05989
- Bashi, D., Shahaf, S., Mazeh, T. és mtsai, 2022, *MNRAS*, 517, 3
- Borkovits, T., Derekas, A., Kiss, L. és mtsai, 2013, *MNRAS*, 428, 2
- Borkovits, T., Hajdu, T., Sztakovics, J. és mtsai, 2016, *MNRAS*, 455, 4
- Borkovits, T., Mitnyan, T., Rappaport, S. és mtsai, 2022, *MNRAS*, 510, 1
- Borkovits, T., Rappaport, S., Hajdu, T. és mtsai, 2015, *MNRAS*, 448, 1
- Borkovits, T., Rappaport, S., Hajdu, T. és mtsai, 2020, *MNRAS*, 493, 4
- Borkovits, T., Rappaport, S., Toonen, S. és mtsai, 2022, *MNRAS*, 515, 3
- Borkovits, T., Érdi, B., Forgács-Dajka, E. és mtsai, 2003, *A&A*, 398, 1091-1102
- van den Bos, W., 1921, *MNRAS*, 81, 474
- Bressan, A., Marigo, P., Girardi, L. és mtsai, 2012, *MNRAS*, 427, 1
- Carter, J., Fabrycky, D., Ragozzine, D. és mtsai, 2011, *Science*, 331, 6017
- Choi, J., Dotter, A., Conroy, C. és mtsai, 2016, *ApJ*, 823, 2
- Conroy, K., Prša, A., Stassun, K. és mtsai, 2014, *AJ*, 147, 2
- Czavalinga, D., Mitnyan, T., Rappaport, S. és mtsai, 2023a, *A&A*, 670, A75
- Czavalinga, D., Borkovits, T., Mitnyan, T. és mtsai, 2023b, *MNRAS*, elfogadva
- Derekas, A., Kiss, L., Borkovits, T. és mtsai, 2011, *Science*, 332, 6026
- Dotter, A., 2016, *ApJS*, 222, 1
- Duchêne, G., Kraus, A., 2013, *ARAA*, 51, 1
- Dupuy, T., Liu, M., 2011, *ApJ*, 733, 2
- Ebbighausen, E., Struve, O., 1956, *ApJ*, 124, 507
- Fekel, F., Tomkin, J., 1982, *ApJ*, 263, 289-301
- Fekel, F., Willmarth, D., 2009, *PASP*, 121, 886
- Gaia Collaboration, 2022, *VizieR Online Data Catalog*, I/357
- Gaia Collaboration, Prusti, T., de Bruijne, J. és mtsai, 2016, *A&A*, 595, A1
- Gaia Collaboration, Vallenari, A., Brown, A. és mtsai, 2023, *A&A*, 674, A1
- Griffin, R., 2006, *MNRAS*, 371, 3
- Gürol, B., Müyesseröglü, Z., 2005, *Astronomische Nachrichten*, 326, 43
- Hajdu, T., Borkovits, T., Forgács-Dajka, E. és mtsai, 2019, *MNRAS*, 485, 2
- Hajdu, T., Borkovits, T., Forgács-Dajka, E. és mtsai, 2022, *MNRAS*, 509, 1
- Halbwachs, J., Pourbaix, D., Arenou, F. és mtsai, 2023, *A&A*, 674, A9
- Harrington, R., 1968, *AJ*, 73, 190-194
- Hippke, M., David, T., Mulders, G. és mtsai, 2019, *AJ*, 158, 4
- Holl, B., Sozzetti, A., Sahlmann, J. és mtsai, 2023, *A&A*, 674, A10
- Huang, H., Yu, Y., Yu, T. és mtsai, 2021, *Research in Astronomy and Astrophysics*, 21, 5

Innes, R., 1895, MNRAS, 55, 312
Irwin, J., 1952, ApJ, 116, 211
Jeans, J., 1919, MNRAS, 79, 408
Kirk, B., Conroy, K., Prša, A. és mtsai, 2016, AJ, 151, 3
Kiseleva, L., Eggleton, P., Mikkola, S., 1998, MNRAS, 300, 1
Kochanek, C., Shappee, B., Stanek, K. és mtsai, 2017, PASP, 129, 980
Kovács, G., Zucker, S., Mazeh, T., 2002, A&A, 391, 369-377
Kozai, Y., 1962, AJ, 67, 591-598
Kristiansen, M., Rappaport, S., Vanderburg, A. és mtsai, 2022, PASP, 134, 1037
Lidov, M., Ziglin, S., 1976, Celestial Mechanics, 13, 4
Lohr, M., Norton, A., Payne, S. és mtsai, 2015, A&A, 578, A136
Lu, W., Rucinski, S., Ogłóza, W., 2001, AJ, 122, 1
Luyten, W., 1955, Luyten's Five Tenths. 1955, 0
Marchal, C., The three-body problem, 1990
Mason, B., Wycoff, G., Hartkopf, W. és mtsai, 2001, AJ, 122, 6
Mazeh, T., Shaham, J., 1979, A&A, 77, 145
Moe, M., Kratter, K., Badenes, C., 2019, ApJ, 875, 1
Munari, U., Henden, A., Frigo, A. és mtsai, 2014, AJ, 148, 5
Ochsenbein F. és mtsai, The VizieR database of astronomical catalogues, 2000
Offner, S., Kratter, K., Matzner, C. és mtsai, 2010, ApJ, 725, 2
Paxton, B., Bildsten, L., Dotter, A. és mtsai, 2011, ApJS, 192, 1
Pourbaix, D., Tokovinin, A., Batten, A. és mtsai, 2004, A&A, 424, 727-732
Pribulla, T., Rucinski, S., Blake, R. és mtsai, 2009, AJ, 137, 3
Prša, A., Kochoska, A., Conroy, K. és mtsai, 2022, ApJS, 258, 1
Pál, A., 2012, MNRAS, 421, 3
Qian, S., He, J., Soonthornthum, B. és mtsai, 2008, AJ, 136, 5
Qian, S., Liao, W., He, J. és mtsai, 2006, New Astronomy, 12, 1
Raghavan, D., McAlister, H., Henry, T. és mtsai, 2010, ApJS, 190, 1
Rappaport, S., Borkovits, T., Gagliano, R. és mtsai, 2023, MNRAS, 521, 1
Rappaport, S., Borkovits, T., Gagliano, R. és mtsai, 2022, MNRAS, 513, 3
Rappaport, S., Deck, K., Levine, A. és mtsai, 2013, ApJ, 768, 1
Ricker, G., Winn, J., Vanderspek, R. és mtsai, 2015, Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 1
Samus', N., Kazarovets, E., Durlevich, O. és mtsai, 2017, Astronomy Reports, 61, 1
Sana, H., de Mink, S., de Koter, A. és mtsai, 2012, Science, 337, 6093
Shappee, B., Prieto, J., Grupe, D. és mtsai, 2014, ApJ, 788, 1
Sidlichovsky, M., 1983, Celestial Mechanics, 29, 3

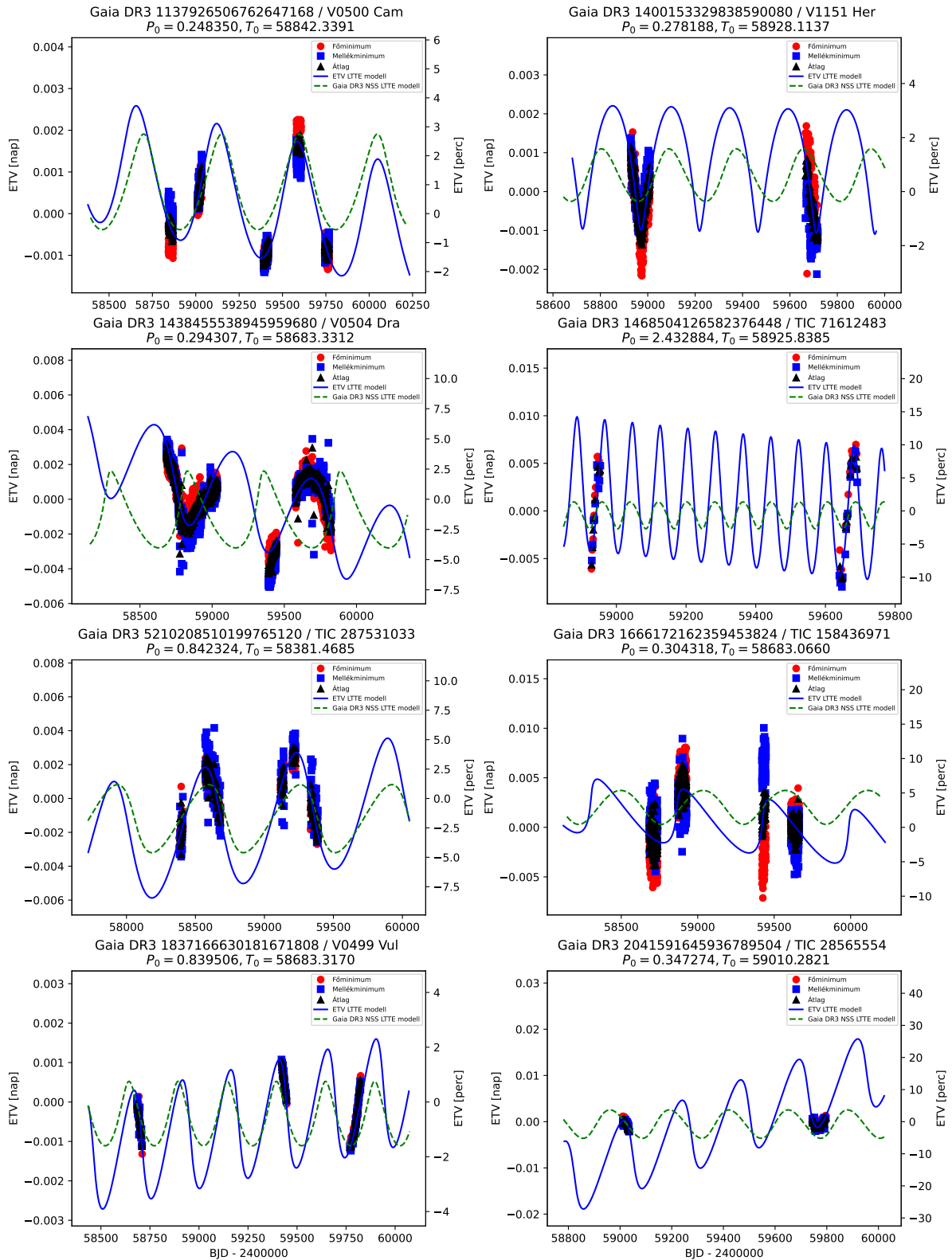
Smith, K., Smartt, S., Young, D. és mtsai, 2020, PASP, 132, 1014
Tokovinin, A., 1997, A&AS, 124, 75-84
Tokovinin, A., 2008, MNRAS, 389, 2
Tokovinin, A., 2014, AJ, 147, 4
Tokovinin, A., 2018, ApJS, 235, 1
Tokovinin, A., 2021, Universe, 7, 9
Tokovinin, A., Moe, M., 2020, MNRAS, 491, 4
Tonry, J., Denneau, L., Heinze, A. és mtsai, 2018, PASP, 130, 988
Toonen, S., Boekholt, T., Portegies Zwart, S., 2022, A&A, 661, A61
Toonen, S., Portegies Zwart, S., Hamers, A. és mtsai, 2020, A&A, 640, A16
Triaud, A., Martin, D., Ségransan, D. és mtsai, 2017, A&A, 608, A129
Udalski, A., Szymanski, M., Kaluzny, J. és mtsai, 1992, ACTAA, 42, 253-284
Vanderburg, A., Latham, D., Buchhave, L. és mtsai, 2016, ApJS, 222, 1
Wang, J., Qian, S., Zhang, Y. és mtsai, 2015, AJ, 149, 5
Watson, C., Henden, A., Price, A., 2006, Society for Astronomical Sciences Annual Symposium, 25
Wenger, M., Ochsenbein, F., Egret, D. és mtsai, 2000, A&AS, 143, 9-22
Xia, F., Fu, Y., Wang, X., 2019, ApJ, 882, 2
Yang, Y., Qian, S., Dai, H., 2013, AJ, 145, 3
Zasche, P., Henzl, Z., Mašek, M., 2022, A&A, 664, A96

8. Függelék

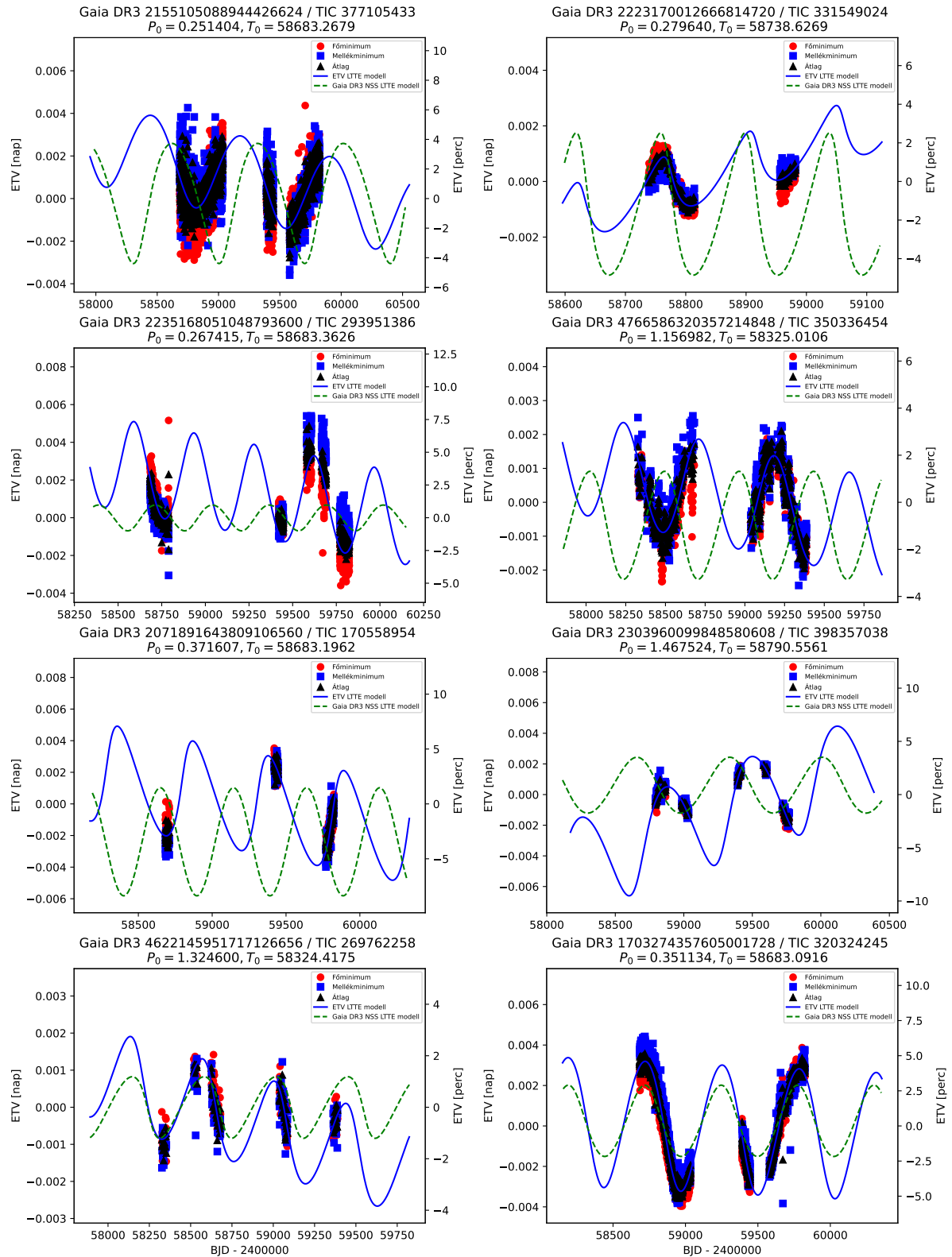
8.1. A TESS által jól lefedett 22 hierarchikus hármas csillagrendszer ETV illesztései



34. ábra. A hierarchikus hármas csillagrendszerek ETV-jének LTTE illesztése. A zöld szaggatott vonal jelöli a *Gaia* NSS megoldásokból származó paraméterekkel számolt LTTE modellt, a kék vonal pedig a legjobb LTTE illesztést. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023a)



35. ábra. A hierarchikus hármas csillagrendszerek ETV-jének LTTE illesztése. A zöld szaggatott vonal jelöli a *Gaia* NSS megoldásokból származó paraméterekkel számolt LTTE modellt, a kék vonal pedig a legjobb LTTE illesztést. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023a)



36. ábra. A hierarchikus hármas csillagrendszerek ETV-jének LTTE illesztése. A zöld szaggatott vonal jelöli a *Gaia* NSS megoldásokból származó paraméterekkel számolt LTTE modellt, a kék vonal pedig a legjobb LTTE illesztést. Forrás: Czavalinga és mtsai (2023a)

Köszönetnyilvánítás

Először is szeretném megköszönni témavezetőmnek Dr. Hegedüs Tibornak áldozatos munkáját, és hogy minden esetben támogatott az utamon. Szeretném még megköszönni konzulenseimnek, Dr Borkovits Tamásnak és Dr. Mitnyan Tibornak, hogy kérdéseimre és problémáimra mindig készségesen válaszoltak. Külön köszönöm Dr. Borkovits Tamásnak, hogy a HUN-REN Asztrofizikai Kutatócsoport vezetőjeként lehetőséget biztosított, hogy a kutatócsoport tagjaként hierarchikus hármas csillagrendszerekkel foglalkozzak, amelynek köszönhetően a disszertációm tudományos alapjait lefektethettem. Még külön köszönettel tartozok Dr. Mitnyan Tibornak, akihez mint barát és kolléga bármilyen kérdéssel fordulhattam. Nélkülük nem készülhetett volna el ez az értekezés.

Köszönet illeti még az SZTE Fizika Doktori Iskolát, az SZTE Kísérleti Fizikai Tanszéket, illetve a Bajai Observatóriumot is, amiért a munkám elvégzéséhez szükséges körülményeket biztosították.

Legvégül szeretném még megköszönni a családomnak és barátaimnak, hogy mindig támogattak a munkámban, nélkülük ez a disszertáció nem jöhetett volna létre.