

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI ÉS INFORMATIKAI KAR
OPTIKAI ÉS KVANTUMELEKTRONIKAI TANSZÉK

DIPLOMAMUNKA

Excentrikus kettőscsillag-rendszerek
apszizmozgásának vizsgálata a *TESS*
mérései alapján

Nagy Kristóf
Csillagász MSc szakos hallgató

Témavezető:

Dr. Borkovits Tamás
tudományos főmunkatárs,
SZTE Bajai Obszervatóriuma

Konzulens:

Mitnyan Tibor
tudományos segédmunkatárs,
SZTE Bajai Obszervatóriuma

Szeged, 2021

Tartalomjegyzék

Bevezetés	2
1. Elméleti összefoglaló	2
1.1. Kettős- és többes csillagrendszerek	2
1.2. Julián-dátum	5
1.3. O–C diagram	6
1.4. A <i>TESS</i> űrtávcső	10
2. Irodalmi áttekintés	12
2.1. AS Camelopardalis	12
2.2. CO Lacertae	13
2.3. CW Cephei	13
2.4. DI Herculis	13
2.5. HP Aurigae	14
2.6. PV Cassiopeiae	14
2.7. Y Cygni	14
3. Adatfeldolgozás	16
3.1. Az adatsorok előkészítése	16
3.2. Fedési minimumidőpontok meghatározása	17
3.3. Az O–C diagramok előállítása	18
3.4. Az O–C diagramok modellezése	20
4. Eredmények	22
4.1. AS Camelopardalis	22
4.2. CO Lacertae	23
4.3. CW Cephei	24
4.4. DI Herculis	26
4.5. HP Aurigae	27
4.6. PV Cassiopeiae	29
4.7. Y Cygni	31
5. Összefoglalás és kitekintés	33
6. Köszönetnyilvánítás	34
Hivatkozások	35
Függelék	38

Bevezetés

Az excentrikus kettőscsillag-rendszerekben a két csillag pályája eltér a körtől, vagyis ellipszis alakú. Az ilyen csillagrendszerekben felléphet az apszismozgás jelensége, amely a pályák félnagy tengelyének időbeli körbefordulását jelenti. Hasonló rendszerek vizsgálatára a múlt században már voltak törekvések és számos rendszerről sikerült megállapítani (vagy legalább megsejteni), hogy apszismozgás játszódhat le bennük, azonban a megfigyelések egyúttal újabb kérdéseket is felvetettek az effektussal kapcsolatban. Ezek megválaszolásához az igazán nagy áttörést az űrtávcsövek korszaka hozhatja el, amik az eddigi mérésekhez képest nagyságrendekkel nagyobb pontosságot és időbeli lefedettséget elérő fotometriai adatsorokkal látják el a csillagászközösséget. Ezen programok közül kiemelkedő a *TESS* űrtávcső, hiszen elődjeihez képest nem egyetlen parányinak tekinthető égterületre koncentrálnak, hanem a teljes égbolt egy jelentős részét vizsgálja, ezáltal már ismert rendszerekről is méréseket végez.

Ami engem illet már a BSc szakdolgozatomban is kettős rendszerekkel foglalkoztam. Egy kiszemelt rendszert, a DF CVn nevű kettőscsillagot vizsgáltam fotometriai úton, egyúttal ellenőrizve annak periódusváltozását. A kettős rendszerekben fellépő apszismozgás szintén periódusváltozással járó jelenség, így vizsgálatához a szakdolgozatomban alkalmazottakhoz hasonló módszerek használhatók. Ennek fényében korábbi TDK dolgozatom, illetve jelen diplomamunkám témájaként korábban is ismert excentrikus kettősök apszismozgásának vizsgálatát választottam a *TESS* űrtávcső adatainak felhasználásával.

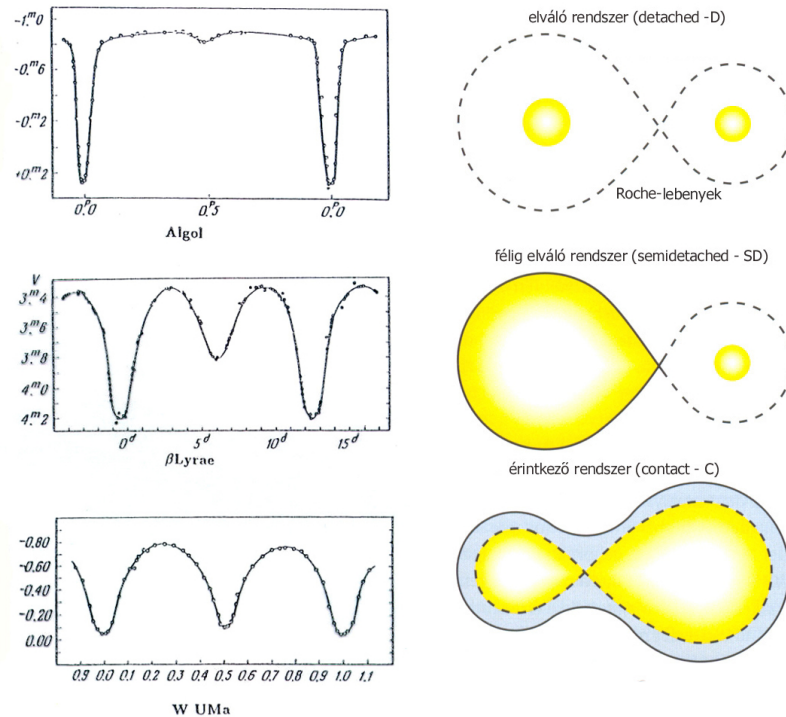
1. Elméleti összefoglaló

1.1. Kettős- és többes csillagrendszerek

A csillagoknak legalább fele rendelkezik egy, vagy több társsal. Ez a mondat már önmagában nagy súllyal bír, hiszen azt jelenti, hogy a csillagok mintegy felére életútja során komoly hatással lehet egy másik csillag (és ez számos esetben meg is történik). A kettős rendszerekben két csillag kering a közös tömegközéppont körül kör- vagy ellipszis alakú pályán. Munkám szempontjából a legfontosabbak az úgynevezett fedési kettősök. A fedési kettőscsillagok úgynevezett fénygörbéjét, azaz észlelt fényességük időbeli változását vizsgálva, képet kaphatunk a csillagok számos paraméteréről, például a keringési idejükről, de akár a méretükről is. Egy fedési kettőscsillag fénygörbéjében a periodikus fedések következtében ciklikusan ismétlődő elhalványodások (minimumok) jelennek meg, melyek mélysége a komponensek felületi fényességétől függ. Fénygörbéjük alakja szerint a következő csoportjaik különböztethetők meg:

- Algol-típusú: A fénygörbét szignifikánsan megkülönböztethető fő- és mellékminimumok jellemzik. Mivel az ilyen kettős rendszerek komponensei igen távol találhatók egymástól, alakjuk közel gömb, így a fénygörbe a minimumokon kívül közel konstans fényességű szakaszokból áll.
- β Lyrae-típusú: A fénygörbén a fő- és mellékminimumok közötti különbség jelentős. Az ilyen rendszerek tagjai közelebb vannak egymáshoz, így alakjuk az árapálykölcönhatás miatt torzul, ezért a fénygörbén a minimumokon kívül is folyamatosan változó fényesség tapasztalható.

- W Ursae Majoris-típusú: A fénygörbén a minimumok közel azonos mélységűek. A rendszer itt is torzult (csepp-alakú) komponensekből áll, ezért a fénygörbe egésze folyamatosan változó fényességet mutat.



1. ábra. Bal oldalon: Az Algol-, a β Lyrae- és a W UMa-típusú fedési kettősök névadóinak fénygörbéi, melyeken jól látszódnak az egyes fő- és mellékminimumok viszonyai. Jobb oldalon: az elváló, a félig elváló és az érintkező kettős rendszerek a Roche-lebenyük kitöltöttsége alapján. (forrás: astro.u-szeged.hu)

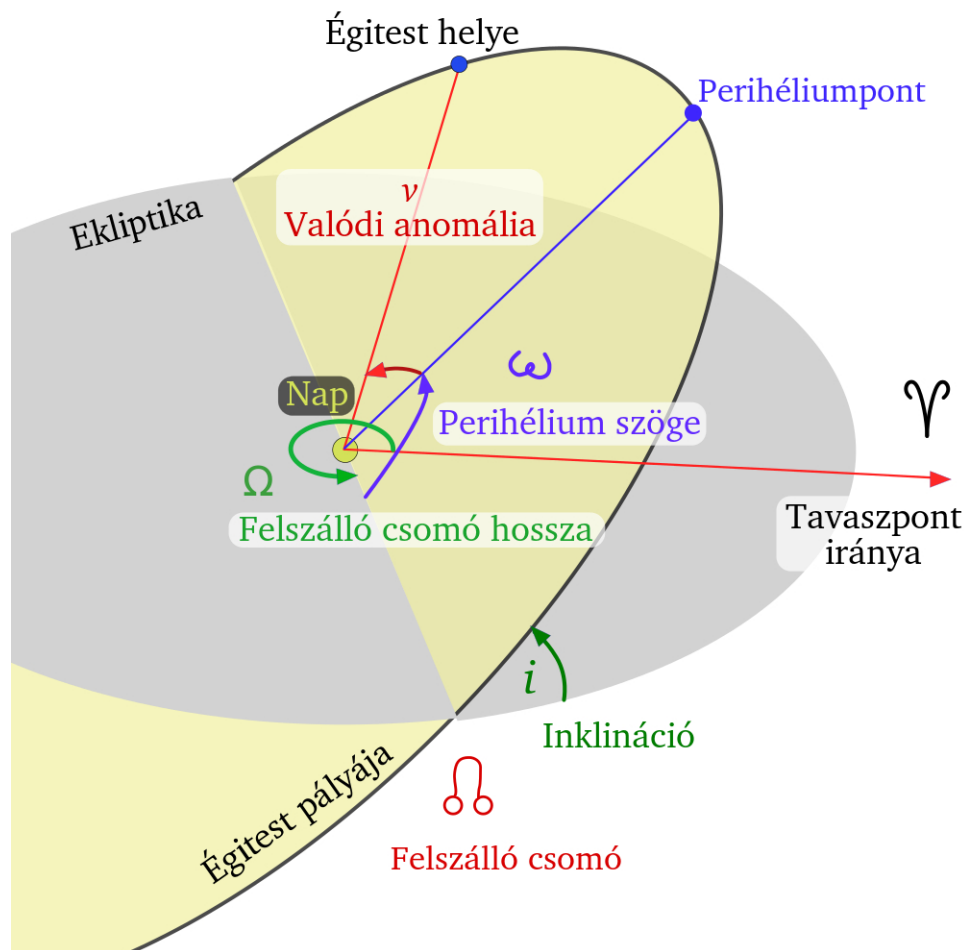
A kettőscsillagokat továbbá osztályozhatjuk a Roche-térfogat kitöltöttsége alapján is. A kettős rendszereket két tömegpont gravitációs terével írhatjuk le. Ehhez a térhez ekvipotenciális felületek tartoznak, amelyeken egyes fizikai paraméterek, mint például a nyomás és a sűrűség, állandónak tekinthetők. A két csillag ekvipotenciális felületei a belső Lagrange-pontban érnek össze, ezek jelölik ki a csillag Roche-térfogatát. Ez alapján három csoport különböztethető meg (Kopal 1955):

- Nem érintkező: Ebben a konfigurációban mindkét csillag a Roche-lebenyén belül helyezkedik el, így távolságuk relatíve nagy és alakjuk közel gömb.
- Félig érintkező: Az ilyen rendszerekben az egyik csillag kitölti a Roche-térfogatát, míg a másik nem.
- Érintkező: Ekkor mindkét csillag kitölti a Roche-térfogatát, ami azt jelenti, hogy a két csillag a belső Lagrange-pontban közvetlenül összeér.

A két csoportosítás – az 1. ábrán látható módon – általában rendre megfeleltethető egymásnak.

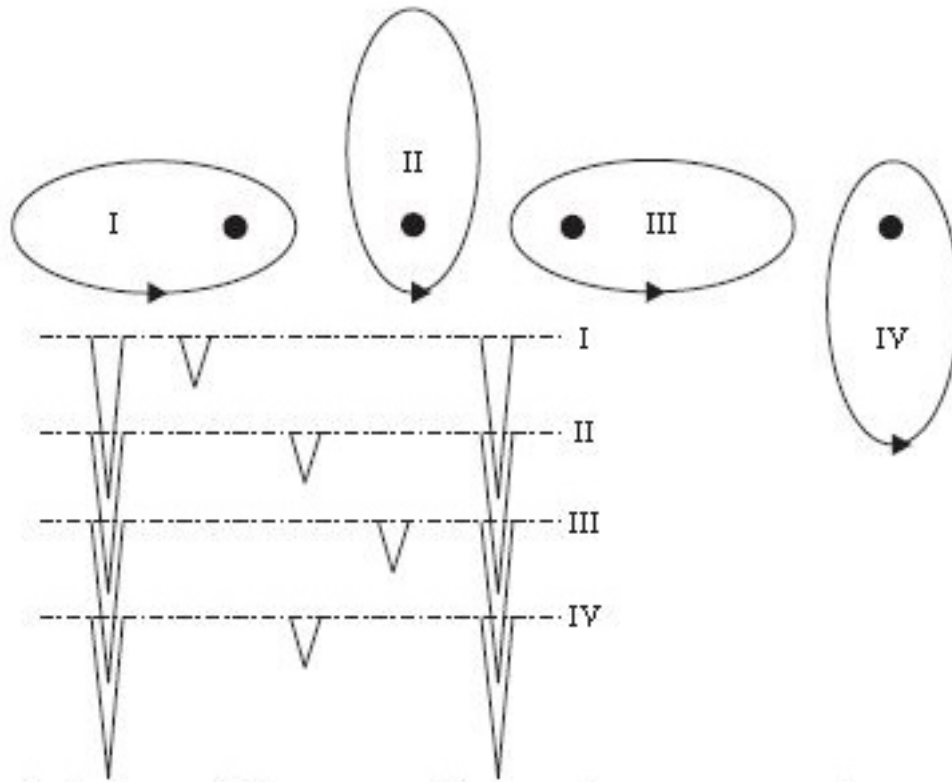
Fontos kérdés, hogy hogyan adható meg egy rendszer pályája. Mint ahogyan azt említettem, a kettőscsillagok keringhetnek kör- vagy ellipszis alakú pályákon, ez azonban önmagában még nem mond semmit a pálya orientációjáról. Hagyományos esetben egy bolygó vagy csillag pályaelemei a következők:

- a : az ellipszis félnagy tengelye,
- e : a pálya lapultsága, azaz az excentricitás,
- i : az inklináció, a pálya- és a referenciasík által bezárt szög,
- Ω : a felszálló csomó hossza, amely megadja, hogy a pálya hol metszi a referenciasíkot,
- ω : a pericentrum argumentuma (a Nap esetében perihéliumnak nevezik), mely megadja, hogy a pályasíkon belül hol található a pericentrum a referenciasíkhoz képest,
- τ : egy pericentrum-átvonulás időpontja.



2. ábra. A pályaelemek szemléltetése a Naprendszer bolygói esetében. (forrás: <https://hu.wikipedia.org>)

Léteznek olyan kettős rendszerek is, ahol a csillagok ellipszis alakú (excentrikus) pályákon keringenek. Az ilyen excentrikus rendszerekre jellemző, hogy a fénygörbéjükön a mellékminimumok nem féelperiódussal követik a főminimumokat (lásd 3. ábra). Az excentrikus kettősök jellemzően nem érintkező rendszerek, mivel a két csillag között fellépő erős árapály-kölcsönhatás rövid úton a pálya körösödéséhez vezetne. Ebből kifolyólag általában Algol-típusú fénygörbét mutatnak, amelyen a fő- és mellékminimumok nem egyenlő időközönként követik egymást.



3. ábra. Egy excentrikus kettős rendszer fénygörbéjének változása az apszismozgással (Borkovits, 2009).

1.2. Julián-dátum

A Julián-dátum (szokásos rövidítéssel JD) a Kr.e. 4713. január 1. 12:00 GMT óta eltelt napok számát adja meg. A nem egész napnyi értékek tizedestört formában adhatók meg. Ez a folyamatos időszámítási módszer nagyban megkönnyíti a csillagászati időpontok kezelését és összevethetőségét. Idősorok vizsgálatánál fontos azonban figyelembe venni a Föld mozgásából adódó esetleges hamis periódusokat. Bolygónk egy éves keringési periódusa miatt érdemes bevezetni az úgynevezett heliocentrikus Julián-dátumot (HJD), amely a Nap tömegközéppontját referenciapontként alkalmazva már a Föld Nap körüli keringéséből adódó időeltolódásokkal is korrigál. Ez azonban azt is jelenti egyúttal, hogy a Föld pályáját rendkívül pontosan kell ismernünk, hiszen enélkül nem végezhető el a korrekció. Egyel ennél is továbbléphetünk, ha a Nap helyett a Naprendszer tömegközéppontját tekintjük a megfigyelés központjának (mivel a Nap tömegközéppontja a Naprendszerbeli égitestek, főként a Jupiter,

hatására szintén mozgásban van). Ekkor baricentrikus Julián-dátumról (BJD) beszélünk. A BJD pontos méréséhez a Naprendszer bolygóparamétereinek nagyon pontos ismerete szükséges, emiatt gyakorlatilag a HJD és a BJD időmérési módszer hibája bár nagyobb mint a JD-é, mégis megéri használni a már említett hamis periódusok elkerülése végett. A dolgozat szempontjából érdekes, hogy a *TESS* űrtávcső adatsoraiban az úgynevezett TBJD-t (*TESS* Barycentric Julian Date) használják. Az TBJD-be történő átváltás a BJD ismeretében az alábbi egyszerű képlettel tehető meg: $TBJD = BJD - 2457000$.

1.3. O–C diagram

Az úgynevezett O–C diagram eljárás a csillagászatban régóta használt periódusvizsgálati módszer, melynek lényege, hogy amennyiben a csillag periodikusan változtatja a fényességét, akkor ennek ismeretében egy T_0 referencia-időponttól (epocha) számított keringési ciklusok során bekövetkező fényességminimumok időpontja (C) előrejelezhető:

$$C = T_0 + Pn \quad (1)$$

ahol P a periódus, n a ciklusszám.

Egy O–C diagramon ennek megfelelően a mért (**O**bserved) és a fenti képlettel számolt (**C**alculated) fényesség-szélsőértékek (fedési kettős rendszereknél általában a fényességminimumok) időpontjainak különbségét ábrázoljuk a ciklusszám vagy az idő függvényében.

Az ilyen módon kapott diagram alakja sokféle lehet, így általában különböző függvényekkel, vagy ezek szuperpozíciójával írható le, amelyek segítségével valós vagy látszólagos effektusokra következtethetünk. Ha a kapott görbe egy nulla értékű konstans függvény (lásd 4. ábra), akkor a periódust és a referencia-időpontot megfelelően határoztuk meg. Amennyiben a függvény konstans, de nem nulla értékű, akkor egyszerűen rossz epochát használtunk, és a rendszer periódusa időben nem változik. Ha a görbe egyenes ugyan, de valamilyen meredekséggel rendelkezik, akkor a periódust alul- vagy felülbecsültük (korrekcióra szorul), azonban időben állandó a periódus. Ha a görbe nem elsőfokú (5. ábra), akkor a periódus változik az idővel, aminek számos oka lehet, például anyagátadás a két csillag között. Ebben az esetben az O–C diagram egy parabola és a periódus lineárisan változik:

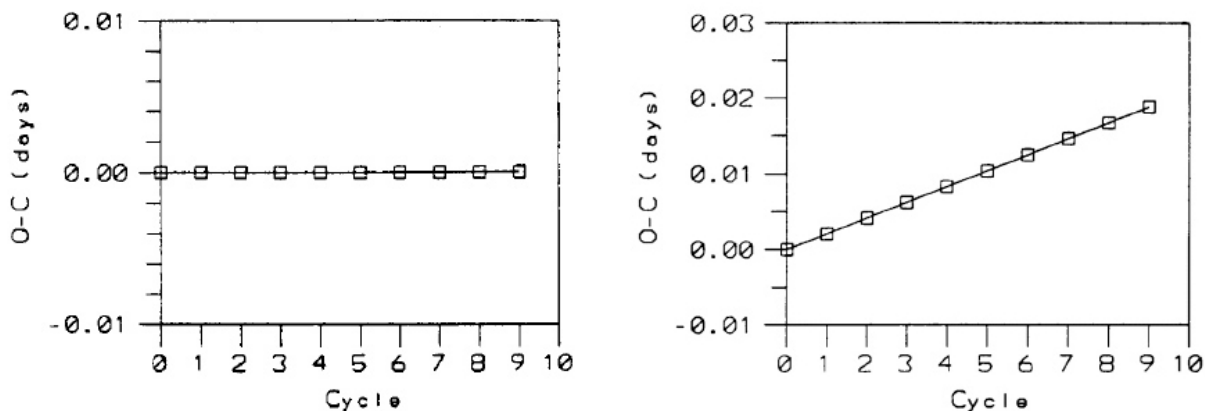
$$C = T_0 + Pn + \frac{1}{2}\beta n^2 \quad (2)$$

illetve

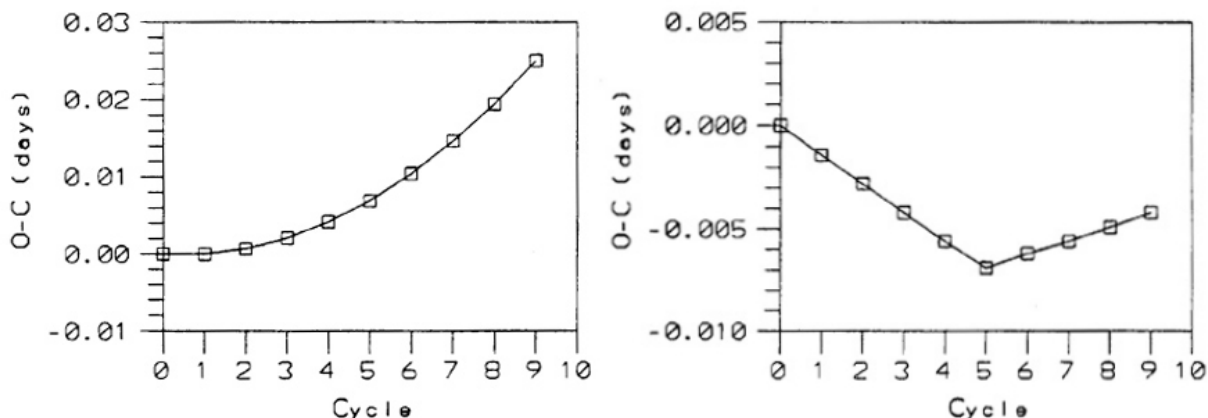
$$\beta = P \frac{dP}{dt} \quad (3)$$

ahol $\frac{dP}{dt}$ a periódusváltozás mértéke. Egyes kutatók a másodfokú görbék helyett két – vagy több – metsző egyenessel illesztnek, ez természetesen egy parabolával szemben pillanatszerűen változó periódusra utal, nem pedig folyamatosan változóra. A kettő eset mögötti fizikai magyarázat nyilvánvalóan nagyban eltér.

Látható tehát, hogy az O–C diagramok modellezésével képet kaphatunk a görbét kialakító fizikai jelenségről. Amikor fedési kettőscsillagok kétféle minimumidőpontjaival dolgozunk, akkor arra az angol terminológiából ismert *eclipse timing variaton (ETV)* kifejezést is használhatjuk, melyet magyar nyelvre Borkovits Tamás nagydoktori értekezésében



4. ábra. Nulla meredekségű, nulla magasságú egyenessel illeszthető O–C diagram jól meghatározott, nem változó periódusra utal (bal oldali ábra). Pozitív vagy negatív meredekséggel rendelkező egyenes nem változó, ám alul-, illetve felülbecsült periódusidőre utal (jobb oldali ábra). (forrás: <https://www.aavso.org>)



5. ábra. Magasabb rendű görbe esetén a periódus nem állandó (bal oldali ábra). Egymást metsző egyenesek esetén a periódus pillanatszerűen változik (jobb oldali ábra). (forrás: <https://www.aavso.org>)

fedésimínimumidőpont-változás formában ültette át. Az ETV matematikai leírása az alábbi formulával lehetséges (Borkovits és mtsai 2015):

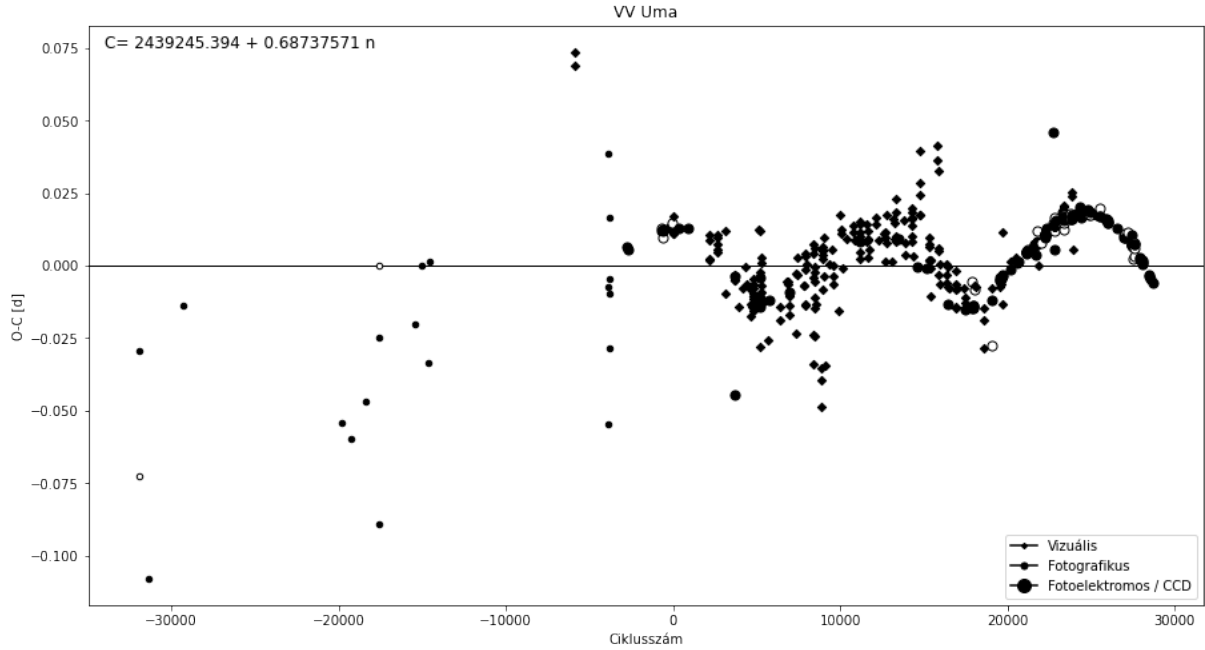
$$\Delta = \sum_{i=0}^2 c_i n^i + [\Delta_{LTTE} + \Delta_{dyn} + \Delta_{apse}]_0^n, \quad (4)$$

ahol a c_0 és a c_1 konstansok T_0 és P korrekciói, $c_2 = \frac{\Delta P}{2}$ vagyis a konstans periódus-változási ráta fele, Δ_{LTTE} , Δ_{dyn} és Δ_{apse} pedig rendre a fényidőeffektus (*light-travel time effect*), a rövid periódusú dinamikai perturbációk, valamint az apszismozgás járuléka a fedésimínimumidőpont-változáshoz. A dolgozatomban végzett munka során számomra az

első és leginkább a harmadik tag volt lényeges, a dinamikai perturbációk okozta taggal így most nem is foglalkozom. A másik kettőből az első a fényidőeffektus. Ez a jelenség akkor lép fel, amikor egy kettőscsillag körüli harmadik kísérő miatt a kettős tömegközéppontja maga is mozgásban van – vagyis a Rømer-effektus jön létre. Ekkor a fény véges terjedési sebessége miatt periodikusan változó időközönként detektáljuk a fedéseket, ami természetesen nem egy fizikai vagyis valódi, hanem egy látszólagos periódusváltozás. A belső pályán található kettőscsillagot és a külső pályán keringő kísérőt egy-egy tömegpontnak tekintve a kéttestprobléma megfelelő megoldásával a fényidőeffektus egyenlete előállítható:

$$\Delta_{LTTE} = -\frac{a_{AB} \sin(i_2)}{c} \frac{(1 - e^2) \sin(v_2 + \omega_2)}{1 + e_2 \cos(v_2)} \quad (5)$$

ahol a_{AB} a belső fedési kettősnek a hármas rendszer közös tömegközéppontja körüli pályájának félnagy tengelye, i_2 a külső pálya inklinációja, e_2 a külső pálya excentricitása, v_2 a külső pálya valódi anomáliája, míg ω_2 a külső pálya pericentrum argumentuma, és c a fénysebesség. Egy ilyen rendszerre példa a VV UMa kettőscsillag O–C diagramja (6. ábra), amin megjelenik ez a fajta periodicitás.



6. ábra. A VV UMa kettőscsillag O–C diagramja. Az ábrán a teli és üres szimbólumok rendre a fő- és a mellékminimumokat jelölik. A későbbiekben bemutatott O–C diagramokon szintén ugyanezt a konvenciót fogom követni. (<http://var2.astro.cz> és <https://www.as.up.krakow.pl> alapján)

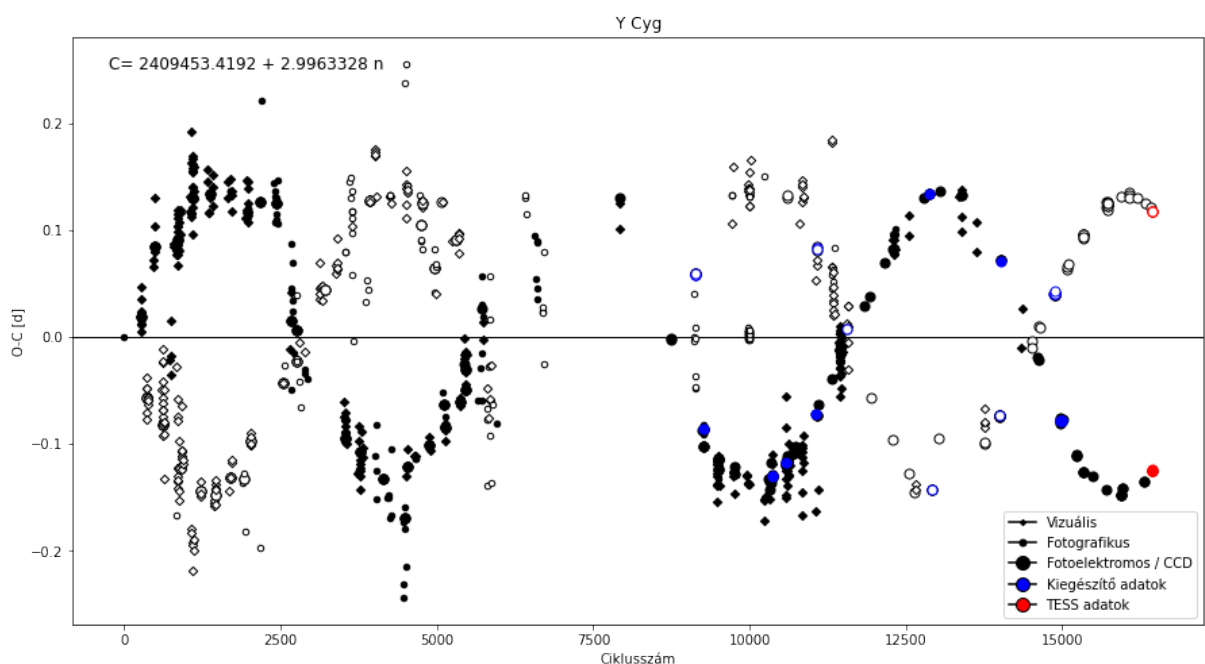
A másik, a dolgozat szempontjából kulcsfontosságú jelenség, a szintén periodikus O–C diagramot létrehozó apszismozgás. A jelenséget produkáló rendszerek tagjai, excentrikus, ellipszis alakú pályákon keringenek, s ennek a pályának nagytengelye időben körbefordul, változik a pericentrum argumentuma. Az apszismozgásnak számos oka lehet, például a csillagok között fellépő árapály-kölcsönhatás, a csillagok gömbszimmetrikustól eltérő tömegeloszlása, egy harmadik test perturbáló hatása, illetve relativisztikus effektusok. Fotometriai módszerekkel a jelenség kimutatásának egy kézenfekvő módja a rendszer O–C diagramjának

vizsgálata, hiszen a fényidőeffektushoz hasonlóan látszólagos periodikus változást okoz. A két jelenség O–C diagramja közötti legszembevetőbb különbség a fő- és mellékminimumokból származó görbék ellentétes fázisú változása. A Kepler-egyenlet analitikus megoldásából adódik az apszismozgás egyenlete:

$$\Delta_{apse} = \frac{P_1}{2\pi} \left[\arctan \left(\frac{\pm e_1 \cos(\omega_1)}{1 + \sqrt{1 - e_1^2} \mp e_1 \sin(\omega_1)} \right) \pm \sqrt{1 - e_1^2} \frac{e_1 \cos(\omega_1)}{1 \mp e_1 \sin(\omega_1)} \right] \quad (6)$$

ahol P_1 a kettős keringési periódusa (egészen pontosan a fedési periódusa), e_1 a pályaeccentricitás, ω_1 pedig a pericentrum argumentuma és a felső előjelek mindig a fő-, míg az alsók mindig a mellékminimumokra vonatkoznak.

Egy szép példa ilyen rendszerekre a 7. ábrán látható.



7. ábra. Egy tipikus példa apszismozgást mutató rendszerekre az Y Cyg, Algol-típusú fedési kettőscsillag. (<http://var2.astro.cz> és <https://www.as.up.krakow.pl> alapján)

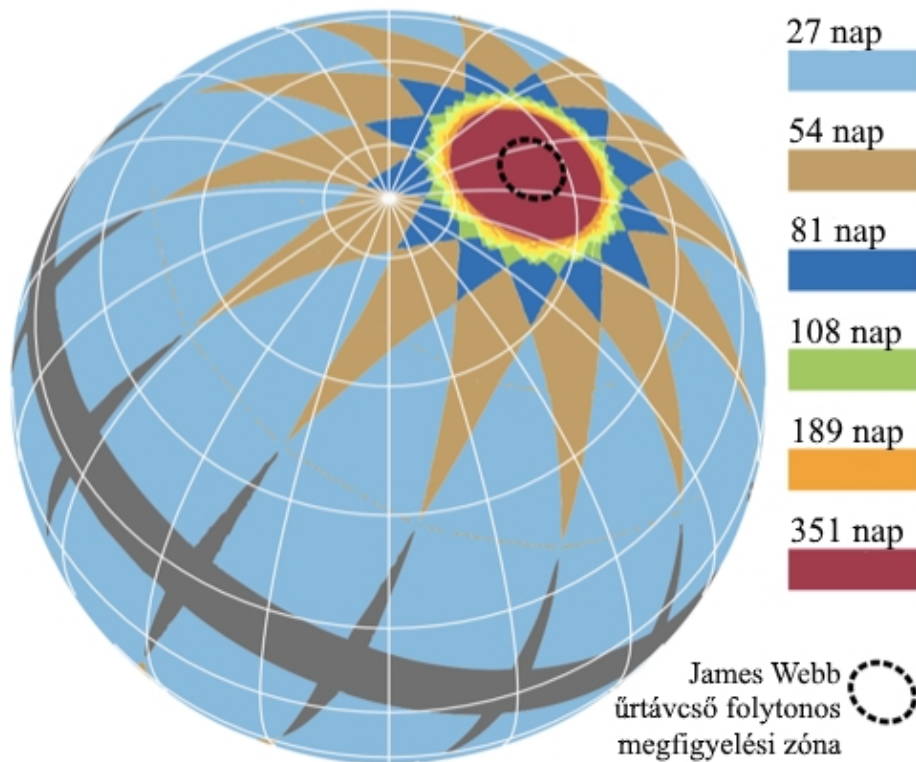
Az O–C diagramok modellezésével a rendszerek különböző fizikai paraméterei is meghatározhatók. Az egyik ilyen fontos paraméter az úgynevezett apszismozgási ráta. Állandó apszismozgási rátát feltéve – ami egyáltalán nem számít durva közelítésnek – a pericentrum argumentuma a következő alakban áll elő:

$$\omega_1(n) = \omega_1(0) + \Delta\omega_1 n, \quad (7)$$

ahol $\omega_1(0)$ a pericentrum argumentuma a kezdeti időpontban, n a ciklusszám, $\Delta\omega_1$ pedig az egy fedési periódusra vonatkozó, konstans apszismozgási ráta, amely az O–C diagram segítségével meghatározható. Ebből a relativisztikus járulékokat levonva előáll a klasszikus apszismozgási szögsebesség, $\Delta\omega_{cl}$, amely az árapály-kölcsönhatásból származik. Ezt a mennyiséget felhasználva meghatározható a $k_{2,obs}$ átlagos belső szerkezeti állandó:

$$k_{2,obs} = \frac{1}{c_{21} + c_{22}} \frac{\Delta\omega_{cl}}{2\pi}, \quad (8)$$

ahol c_{21} , valamint c_{22} függ az excentricitástól, a tömegaránytól, a relatív csillagsugaraktól és a rotációs rátáktól. Ez a mennyiség a csillag belsejében történő sűrűségváltozásokkal áll kapcsolatban, és egyben a csillagok evolúciójának fontos paramétere. Fontosságát jól szemlélteti, hogy az asztroszeizmológia térnyerése előtt gyakorlatilag ez volt az egyetlen lehetőség az elméleti csillagszerkezeti modellek pontosságának ellenőrzésére. Mivel ezt a mennyiséget excentrikus rendszerek esetében lehet megállapítani ezzel a módszerrel, látszik, hogy az ilyen rendszerek mennyire lényegesek a csillagfejlődés szempontjából. A 2000-es évek közepére számos olyan rendszert fedeztek fel, amelyben a fedési időpontok méréséből származó apszismozgási ráta jelentősen eltért az elméleti modellek alapján várt értékektől. Az ilyen rendszerekben rendellenesen lassú apszismozgás zajlik, amit a jelenlegi elképzelések szerint vagy egy harmadik test perturbáló hatása vagy a pályasík és az egyenlítői sík által bezárt szög nullától való eltérése okozhat. Teljesen kialakult konszenzus azonban még nincs a szakirodalomban, ezért is érdemes ennek méréseken alapuló vizsgálatával foglalkozni.



8. ábra. A *TESS* űrtávcső által vizsgált égterületek. (forrás: <https://tess.mit.edu/> alapján)

1.4. A *TESS* űrtávcső

A *TESS* (Transiting Exoplanet Survey Satellite) űrtávcsövet 2018 nyarán bocsátották fel, az első képek 2018 szeptemberében érkeztek meg, és azóta is havonta újabb, nyilvánosan elér-

hető mérési adatokat szolgáltat különböző égterületekről. A műszer elsősorban exobolygók detektálására készült, legfőbb célja pedig ezek számának felmérése a legfényesebb csillagok környezetében. Ebből következően mintegy 200 000 csillag fényességét vizsgálja a rászertelt 4 darab, egyenként kb. 10 cm átmérőjű teleobjektívvel, összetett kamerarendszert alkotva, ezzel mintegy $24 \times 96^\circ$ -os égterületet lefedve. A teljes égbolt több mint 80%-áról végzett legalább 1 hónap hosszúságú fotometriai méréseket az elmúlt 2 évben, így a már korábban vizsgált rendszerek nagy részéről is. Az észlelési stratégia része, hogy a műszer mérései egy adott égterület felé fordulva nagyjából 1 hónap hosszúságú szektorokra bonthatók, így 13 szektor segítségével lefedhető az égbolt felének jelentős része. A *TESS* adatai között kétféle expozíciós idővel készült mérési adatok vannak: a "short cadence" (SC) mérések, melyek 2 perces, illetve az FFI-k (Full-Frame Image), amelyek 30 perces expozíciós idővel készültek.

2. Irodalmi áttekintés

Az apszismozgás, illetve úgy általában a különböző, kettőscsillagokkal kapcsolatos szakirodalom elég gazdag. A dolgozat elkészítése során hét olyan rendszert válogattam ki, amelyekről szélesebb körben is ismert apszismozgás játszódhat le, és elvégeztem az O–C diagramjaik modellezését. Ehhez a *TESS*-méréseiből új minimumidőpontokat is határoztam meg, amiket korábbi, irodalmi mérésekkel kombináltam. A vizsgálatokhoz használt korábbi mérési adatpontok jelentős része az O-C gateway ¹ nevű weboldalról származik. A kiválasztott objektumok elsődleges forrása Petrova és Orlov 1998-as katalógusa volt. A katalógus még 128 objektumot sorol fel, amikben végbemehet a folyamat. Ezen rendszerek között nem csak fedési kettősök vannak, hiszen az apszismozgás például kompakt rendszerekben is végbemehet. Ezzel együtt még a szokványos csillagokat tartalmazó kettősökben is előfordulnak olyanok, amelyeknek az apszismozgása spektroszkópiai úton mutatható ki, ami az én vizsgálódásaimon már túlmutatott. A hét kiválasztott objektumot egyesével is bemutatom, részletezve a fontosabb irodalmi vonatkozásokat, különös tekintettel az apszismozgás vizsgálatára. Együtt minden rendszerről a cseh O–C gateway weboldalon fellelhető számos minimumon túl további adatok is elérhetők a szakirodalomban, amiket szintén itt említek meg, az egyes csillagokat bemutató alfejezetek végén. Az egyes rendszerek koordinátái a Simbad ² adatbázisból, a keringési periódusokat pedig a Krakói Egyetem "O–C Diagrams and Up-to-Date Linear Elements of Eclipsing Binaries" ³ weboldaláról választottam.

2.1. AS Camelopardalis

Az AS Camelopardalis (égi koordináták: $\alpha = 5 : 29 : 46,9$ $\delta = +69 : 29 : 45,4$) egy Algol-típusú fedési kettőscsillag, melynek keringési periódusa $P \approx 3,43$ nap, pályaexcentricitása $e \approx 0,17$ (Kozyreva és mtsai 2018). Khaliullin és Kozyreva (1983) többszín-fotometria segítségével kimutatta a rendszer apszismozgását. Érdekeség, hogy a pericentrum argumentum mért változása $\Delta\omega_{obs} = 16^\circ$ száz évente, ami lassabb mint az elméletileg jósolt $\Delta\omega_{th} = 44^\circ$ -os évszázadonkénti érték. Ezzel a második ismert olyan rendszer lett, ahol az apszismozgási ráta lassabb mint ahogy azt elméleti modellekből várnánk (az első ilyen rendszer a DI Her volt). Zakharov és mtsai (1988), majd Khaliullin és mtsai (1991) egy harmadik test perturbáló hatását feltételezték. Az ötletet Borkovits és mtsai (2007) numerikus és analitikus számításokkal erősítették meg. 1999-ben Kozyreva és Khaliullin valóban találtak bizonyítékot egy harmadik komponens jelenlétére a rendszerben, mely a fő- és mellékminimumok fázisaiban ciklikus változást okoz. Az objektum periódusa $P \approx 805$ nap, excentricitása $e \approx 0,5$. 2011-ben Pavlovski és mtsai spektroszkópiai módszerekkel vizsgálták a rendszert és azt találták, hogy a rendellenesen lassú apszismozgást a csillagok ferde forgástengelye okozhatja, de már ők is megjegyzik, hogy egy harmadik test jelenléte, amely a belső kettős pályájához képest rendkívül nagy inklinációjú, tág pályán keringene, szintén okozhat ilyet. Kozyreva és mtsai 2018-ban kimutatták, hogy a rendszer excentricitása változik, ami szintén egy harmadik csillag jelenlétét és az általa okozott perturbációt feltételezi, a már említett nagy inklinációjú pályán, azonban ennek a feltételezett harmadik komponensnek a létezését Pavlovski és mtsai (2011) spektroszkópiai úton nem tudta igazolni és megjegyezték, hogy a rendszer O-C di-

¹<http://var2.astro.cz/ocgate/>

²simbad.u-strasbg.fr/

³<https://www.as.up.krakow.pl/ephem/>

agramjának kielégítő modellezéséhez sincs feltétlenül szükség a jelenlétére. A rendszerről az O–C gateway-en elérhető minimumokon túl Maloney és mtsai 1989-es, Kozyreva és Zakharov 2006-os és Kozyreva és mtsai 2018-as cikkében található minimumokat is felhasználtam, ám az előbbiből a fotografikus minimumokat nem vettem át, mivel azok nagyon erősen szórtak a meglévő adatokhoz képest.

2.2. CO Lacertae

A CO Lacertae (égi koordináták: $\alpha = 22:46:30,0$ $\delta = +56:49:31,6$) fedési kettőscsillag keringési periódusa $P \approx 1,54 nap$, pályaeccentricitása $e \approx 0,027$ (Bulut és mtsai 2017). Uitterdijk 1934-ben vetette fel elsőként a rendszer apszizmozgását, Semeniuk (1967), Mossakovskaya és Khaliullin (1987), valamint Wolf (1994) is vizsgálta. Švaříček 2006-ban relatíve pontos értékét adta meg a rendszer excentricitásának ($\approx 0,029$) és az apszizmozgás periódusának. A rendszer abszolút paramétereit 1993-ban Claret és Giménez határozta meg. Bulut és mtsai 2017-ben elvégeztek egy illesztést is a rendszer O–C diagramjára, amiből meghatároztak számos paramétert, például az apszizmozgási rátát, ami $\Delta\omega_{obs} = 0,0359^\circ/ciklus$ -nak adódott. A kiegészítő minimumok ennél a rendszernél Wolf 1994-es, Švaříček 2008-as és Samolyk 2009-es, valamint 2010-es cikkeiből származnak.

2.3. CW Cephei

A CW Cephei (égi koordináták: $\alpha = 23:04:2,2$ $\delta = +63:23:48,6$) fedési kettőscsillag keringési periódusa $P \approx 2,73 nap$, pályaeccentricitása $e \approx 0,029$ (Bulut és mtsai 2017). A rendszer apszizmozgását 1975-ben Nha fedezte fel, és több más szerző mellett, további vizsgálatokat Han és mtsai, Erdem és mtsai és Wolf és mtsai végeztek 2002-ben, 2004-ben és 2006-ban. A rendszer abszolút paramétereit spektroszkópiai úton Popper és Hill 1991-ben, valamint Terrell 1991-ben és Clausen és Giménez, szintén ugyabban az évben vizsgálta. Bulut és mtsai 2017-ben elvégeztek egy illesztést is a rendszer O–C diagramjára, amiből meghatároztak számos paramétert, például az apszizmozgási rátát, ami $\Delta\omega_{obs} = 0,0590^\circ/ciklus$ -nak adódott. A rendszer viszonylag rövid apszizmozgási periódusa és nagy fényessége ideális célponttá tette dinamikai és evolúcióval kapcsolatos vizsgálatokra. Johnston és munktarásai (2019) szerint a rendszer apszizmozgását hajtó mechanizmus mibenléte azonban még nem világos, ezért is érdemes a *TESS* igen pontos méréseit segítségül hívnunk. A rendszer esetében további O–C adatokat találtam Han és mtsai 2002-es, valamint Wolf és mtsai 2006-os cikkében, amiket szintén figyelembe vettem.

2.4. DI Herculis

A DI Herculis (égi koordináták: $\alpha = 18:53:26,2$ $\delta = +24:16:40,8$) egy Algol-típusú fedési kettőscsillag, melynek keringési periódusa $P \approx 10,55 nap$, pályaeccentricitása $e \approx 0,49$ (Philippov és Rafikov, 2013). A rendszer az AS Cam-hoz hasonlóan rendellenesen lassú apszizmozgással rendelkezik, értéke: $\Delta\omega_{obs} = 1,24^\circ \pm 0,18^\circ/100$ év (Martynov és Khaliullin 1980), ami az elméleti $\Delta\omega_{GR} = 2,35^\circ/100$ éves ráta majdnem fele. Shakura (1985) vetette fel, hogy a jelenség oka a forgási- és a pálya-impulzusmomentumok tengelye közötti különbség lehet. Albrecht és kollégái 2009-ben ki is mutatták ezt az eltérést. Már csak azért is fontos ezt megemlíteni mert a rendszer esetében (ellentétben az AS Cam-mal) nem találtak harmadik

komponensre utaló jeleket (Claret és mtsai 2010). Philippov és mtsai 2013-ban további vizsgálatnak vetették alá a rendszert. A rendszerről, a gateway minimumain túl, további adatok érhetőek el Guinan és Maloney 1985-ös, Kozyreva és Bagaev 2009-es és Claret és mtsai 2010-es cikkében.

2.5. HP Aurigae

A HP Aurigae (égi koordináták: $\alpha = 5:10:21,8$ $\delta = +35:47:46,6$) fedési kettőscsillag keringési periódusa $P \approx 1,42$ nap. A rendszer fényességváltozásának magyarázatát többféle módon igyekeztek már megadni az egyes kutatók. Kozyreva 1990-ben apszizmozgást, majd 2005-ben mtsaival egy harmadik, 13,7 éves periódusú kísérő által előidézett fényidőeffektust feltételez, míg Liu és mtsai 1989-ben kromoszférikus aktivitást javasol, mint lehetséges megoldás. Kozyreva és mtsai 2005-ös cikkükben a modellillesztéseikben $e = 0,0025$ excentricitást rögzítenek, Lacy és mtsai 2014-ben azonban már $e = 0$ excentricitással illesztenek és határozzák meg a rendszer abszolút paramétereit. Utóbbi csoport a rendszer harmadik komponensének egy körülbelül 4,3 éves periódust határozott meg. A fényidőeffektus jelenléte a rendszerben tehát sejthető, de az apszizmozgás már nagyobb kérdés, ezért is érdemes megvizsgálni a rendszert a *TESS*-adatok tükrében. A rendszerről Kozyreva és mtsai 2005-ös, valamint Lacy és mtsai 2014-es cikkeiben található meg az általam felhasznált kiegészítő minimumok.

2.6. PV Cassiopeiae

A PV Cassiopeiae (égi koordináták: $\alpha = 23:10:2,58$ $\delta = +59:12:6,15$) fedési kettőscsillag keringési periódusa $P \approx 1,75$ nap, excentricitása $e \approx 0,032$ (Bulut és mtsai 2017). A rendszer apszizmozgását Giménez és Margrave írta le 1982-ben, majd 1993-ban Krzesinski és mtsai is vizsgálták. Yıldız 2005-ben megmutatta, hogy a rendszerben csak differenciális rotációval terhelt csillagmodellek hozhatók összhangba a megfigyelt apszizmozgással és a komponensek szinkronizált forgásával. A rendszert 2017-ben Bulut és mtsai (más rendszerekkel együtt) O-C analízisnek vetették alá, a rendszer apszizmozgási rátája $\Delta\omega_{obs} = 0,0192^\circ/ciklus$ -nak adódott. A rendszerről a gateway-en nem megjelenő minimumok találhatóak Švaříček és mtsai 2008-as, illetve Samolyk 2009-es, valamint 2010-es cikkeiben, amiket szintén felhasználtam.

2.7. Y Cygni

Az Y Cygni (égi koordináták: $\alpha = 20:52:03,6$ $\delta = +34:39:27,5$) egy Algol-típusú fedési kettőscsillag, melynek keringési periódusa $P \approx 2,996$ nap, pályaexcentricitása $e \approx 0,15$ (Harmanec és mtsai 2014). Az egyik leggyakrabban vizsgált és legpontosabban megállapított apszizmozgással rendelkező kettős. Dunér (1900) írta le először az effektust a rendszerben, míg az első teljes fotometriai tanulmányt Dugan (1931) készítette. További adatokat szolgáltatott kutatásaival O'Connell (1977) és Stickland és mtsai (1992). Wolf és mtsai 2013-as poszterükben, Harmanec és mtsai pedig 2014-es cikkükben számolnak be a rendszer apszizmozgásának legfrissebb vizsgálatáról, valamint az általuk meghatározott paramétereikről. Utóbbi kutatócsoport megjegyzi, hogy hosszú ideje tartó részletes észlelési történetének és gyors apszizmozgási rátájának köszönhetően a rendszer egy kiváló jelölt a nagytömegű csillagok fejlődésének vizsgálatához. Harmanec és mtsai 2014-es cikkében a rendszer apszizmozgási

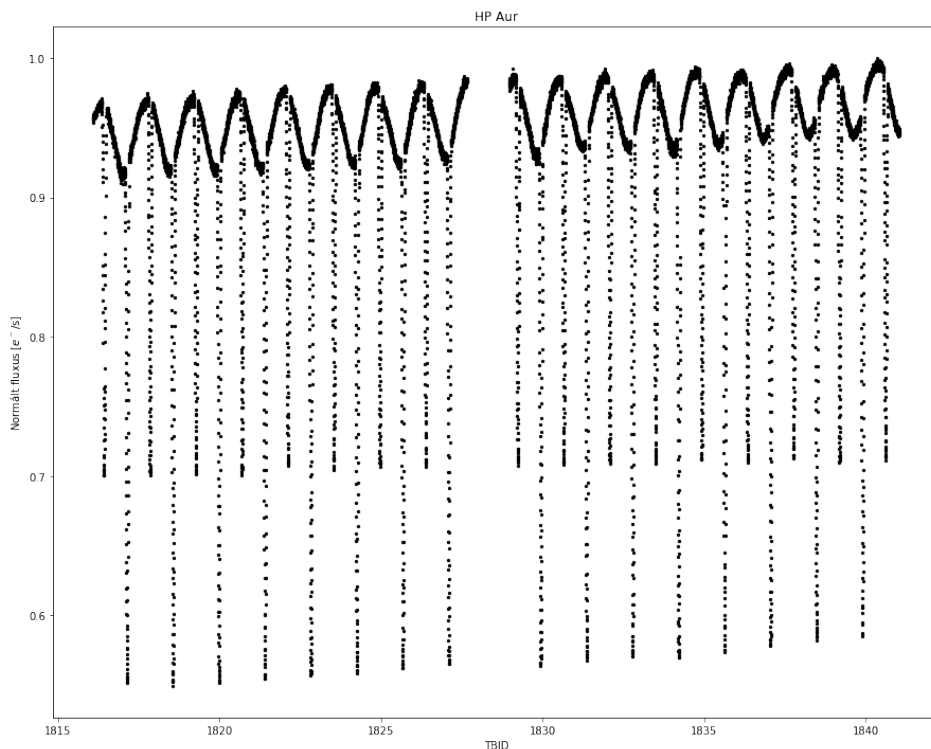
rátáját $\Delta\omega_{obs} = 0,020648^\circ/nap$ -nak mérte, egyúttal az említett kutatók cikkéből származik néhány kiegészítő minimum is.

3. Adatfeldolgozás

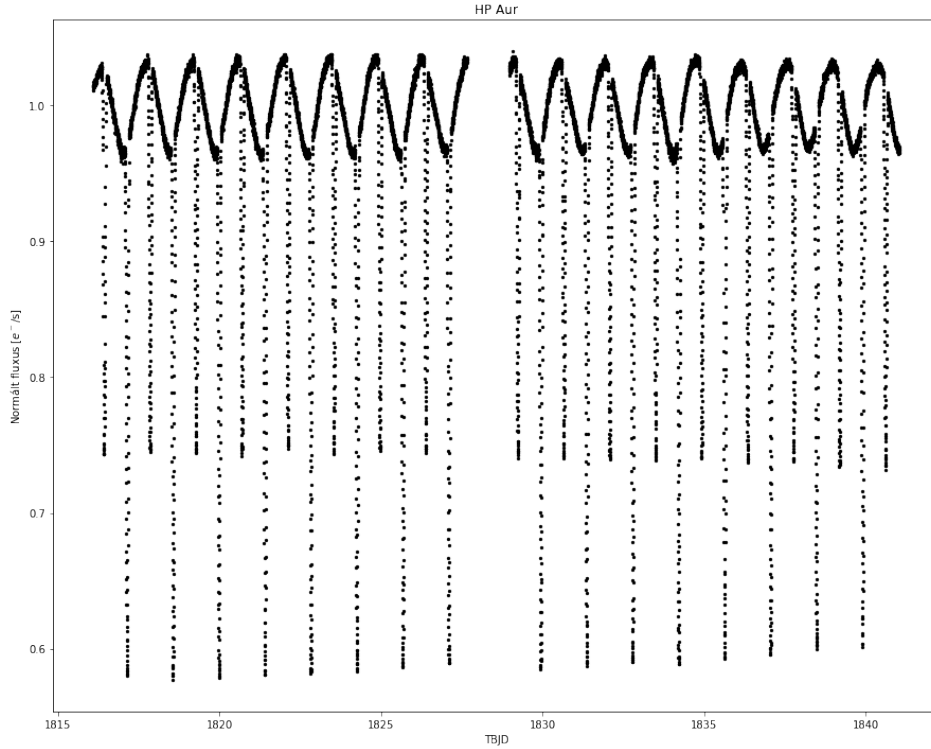
A diplomamunkám megalapozását az említett hét rendszer szakirodalmának tanulmányozásával kezdtem. A következő lépés egy saját fejlesztésű, Python-környezetben írt kóddal a *TESS*-mérésekből kinyerhető új minimumidőpontok megállapítása volt. Ezeket az új minimumokat ezután az irodalomban fellelhető további minimumokkal kiegészítve előállítottam a rendszerek frissített O–C diagramjait. Miután ez megvolt, Borkovits és mtsai 2015-ös cikkében közzétett, az apszismozgást és (ahol kellett) a fényidőeffektust leíró formulákkal illesztettem meg a görbéket, meghatározva ezzel a rendszerek fontos fizikai paramétereit. Ebben a fejezetben bemutatom a Python-kód működését, néhány példával illusztrálva.

3.1. Az adatsorok előkészítése

A *TESS* adatai közül az SC mérésekből származó fénygörbék érhetőek el közvetlenül a MAST (The Mikulski Archive for Space Telescopes) portálról⁴, míg az FFI-k esetében saját adatfeldolgozást kell végezni. A dolgozatban én csak az előbbiekkal foglalkoztam. Egyes adatsorokban *nan* értékkel szereplő, hibás sorok is voltak, ezeket egy előszűréssel eltávolítottam a fájlokból. Egyes rendszereknél előfordult, hogy a teljes fénygörbén egy fényesedő trend jelent meg. Ez minden bizonnyal annak az eredménye, hogy az űrteleszkóp pályája során éppen olyan tartományon haladt keresztül, ahol folyamatosan nőtt a távcsőbe szóródott fény mennyisége. Ezt a későbbi illesztések miatt azonban kiküszöböltem Hippke 2019-ben közzétett, *Wotan* elnevezésű Python-csomagjának *flatten* függvényével, amely elvégzi a fénygörbék normálását a meghatározott trendekkel. Egy nyers *TESS*-fénygörbére a 9., míg egy redukálásra a 10. ábrán mutatok példát.



9. ábra. A HP Aur nyers *TESS*-fénygörbéje.



10. ábra. A HP Aur fénygörbéje a trendek eltávolítása után.

3.2. Fedési minimumidőpontok meghatározása

A következő lépés a fázisgörbe előállítása. Ehhez a normált fénygörbe minimumának időpontját határozom meg, a Python beépített *min* függvényének segítségével és ezt referencia-időpontként felhasználva állítom elő a rendszerek feltekert fázisgörbéjét. A művelet matematikailag az alábbi képlet írja le:

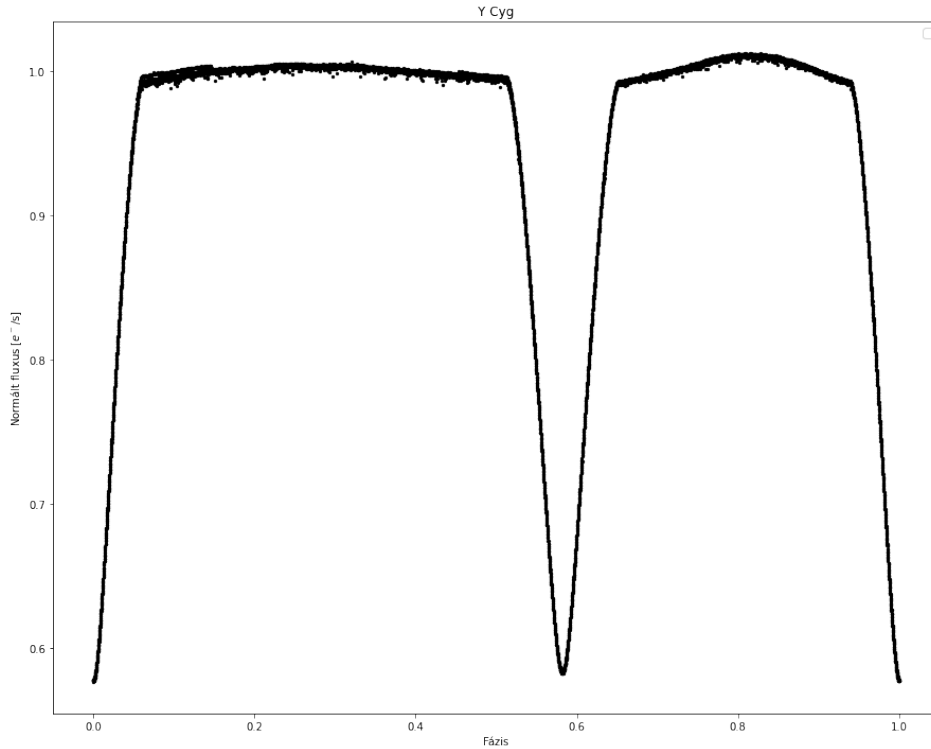
$$\phi = \left[\frac{t - T_0}{P} \right], \quad (9)$$

ahol ϕ a keresett fázis, t a mérési időpont, T_0 egy referencia-minimumidőpont, P a keringés periódusa. A szögletes zárójelek arra utalnak, hogy a kiszámolt érték törtrészét vettem fázisnak. Egy feltekert fázisgörbe a 11. ábrán látható. Ezután a mintavételezési idő függvényében eltérő mennyiségű pontonként kiátlagoltam a mérési pontokat ami jól alkalmazva elsimítja az esetleges kiugró pontokat. Így kaptam egy "sima", vagy, az angolból átvett kifejezéssel élve binnelt fázisgörbét, amin utána a minimumokat magasabbrendű polinomokkal illesztettem meg. Egy példa egy ilyen binnelt fázisgörbére a 12. ábrán látható. A nagyon magas fokszámoknál a későbbi illesztések helyenként teljesen rossz illeszkedéseket is produkáltak, ezért rendszerint 4-8-ig terjedő fokszámokra kellett hagyatkoznom. Ezt feltehetőleg a fedési határok megválasztására alkalmazott feltétel okozta, amely egy olyan probléma, amin a kódfejlesztés további szakaszaiban javítanom kell majd. Ennek ellenére a meghatározott minimumidőpontok ígyis relatíve pontosnak tekinthetőek, hiszen az illesztett polinomok szimmetrikusak. A megillesztett polinomok alakja a következő:

⁴<https://archive.stsci.edu/mast.html>

$$f(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i, \quad (10)$$

ahol n természetes szám, a polinom fokszáma. Ezek az illesztett polinomok lettek a minták, vagy template-ek, a fő- és mellékminimumokra, melyeket aztán a teljes fázisgörbe egyes minimumaira illesztettem a fázistolás függvényében. A teljes és a feltekert fázisgörbe között az a különbség, hogy míg a feltekert fázisgörbén egyetlen keringési fázisra vonatkoztatva vannak ábrázolva a fényességek, addig a teljes fázisgörbén az adott keringési ciklusokra vonatkoztatott értékek szerepelnek. Egy teljes fázisgörbe a 13. ábrán, míg az Y Cyg megillesztett mellékminimum template-je a 14. ábrán látható. Természetesen a későbbi illesztések során a korábbi polinom képletét az alábbi módon kellett módosítani:



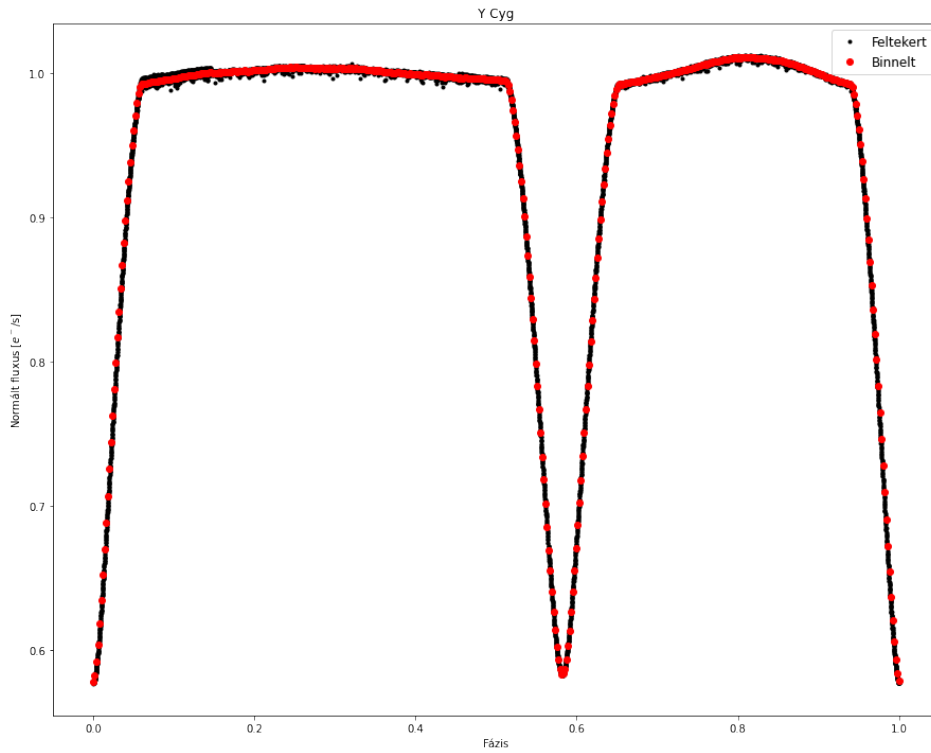
11. ábra. Az Y Cyg feltekert fénygörbéje.

$$f(x) = \sum_{i=0}^n a_i (x - x_0)^i. \quad (11)$$

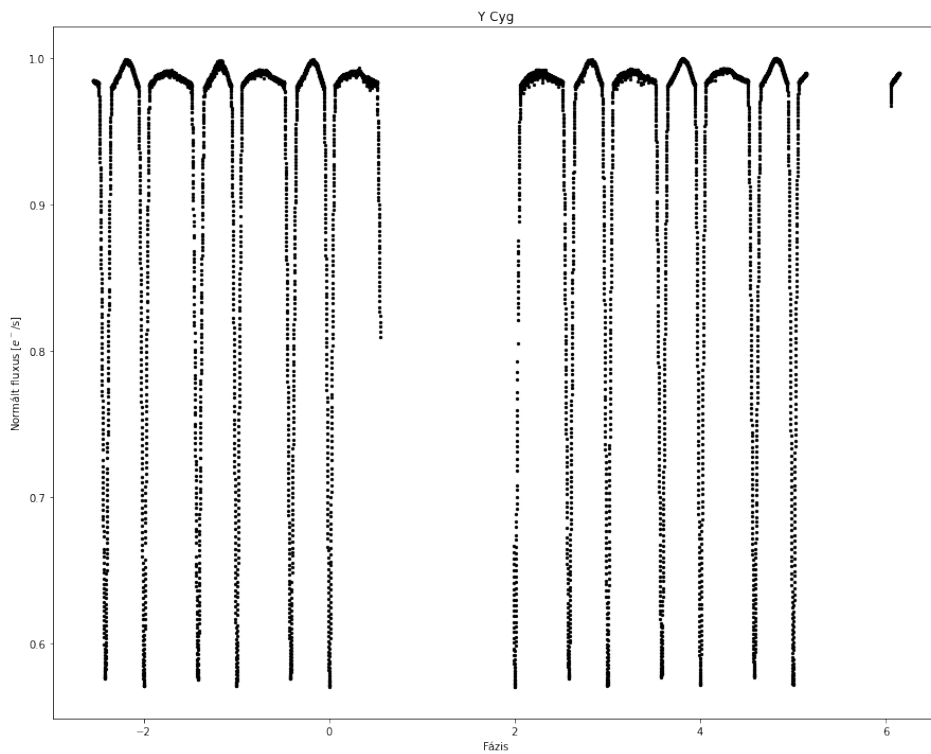
A minimumok illesztésénél az x_0 érték a fáziseltolás, amelyet időbe visszszámolva előálltak a minimumidőpontok, a mérési hibát a hibaterjedés általános formulájával számoltam.

3.3. Az O–C diagramok előállítása

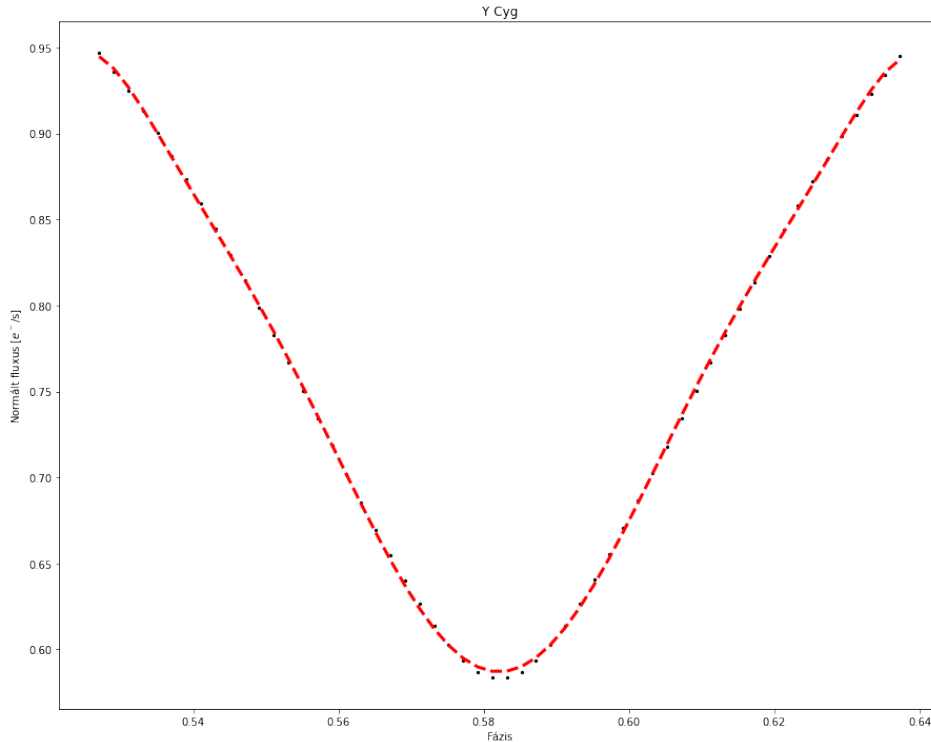
Az előállított új minimumidőpontokat egybevetve az O–C gateway adatbázissal, valamint egyéb, a szakirodalomban közölt minimumokkal, előállítottam az új, frissített O–C diagramokat. A weboldalon található és a szakkikkekben közzétett minimumidőpontok nem TBJD-ben, hanem HJD-ben (néha JD-ben) vannak megadva, ezért a TBJD értékeket először JD-be



12. ábra. Az Y Cyg binnelt fázisgörbéje, a feltekert görbével együtt ábrázolva.



13. ábra. Az Y Cyg teljes fázisgörbéje.



14. ábra. Az Y Cyg mellékminimumjainak template-je.

konvertáltam az Eastman és mtsai (2010) módszerével fejlesztett webes kalkulátorral ⁵, majd onnan a British Astronomical Association hasonló kalkulátorával HJD-be ⁶.

Az O–C értékek kiszámításához a krakkói weboldalon elérhető efemerisszel számoltam. Az O–C gateway saját adataira ez már a weboldalon könnyen elvégezhető, a saját és a kiegészítő adatok esetén pedig a saját programommal számoltam ki a szükséges értékeket. Ezeket a lépéseket elvégezve előállítottam a hét rendszer frissített O–C diagramját, amiket a következő fejezetben mutatok majd be.

3.4. Az O–C diagramok modellezése

Az utolsó lépés az O–C diagramok modellezése volt. Ehhez az elméleti összefoglalóban már bemutatott apszismozgás-formulát illesztettem a kiszemelt rendszerekre. A HP Aur esetén már a szakirodalom is arról beszél, hogy az O–C diagramot uraló jelenség sokkal inkább a fényidőeffektus lehet, ezért ennél a rendszernél az apszismozgás helyett ennek az illesztését végeztem el. Mindkét jelenség esetén a rendszer abszolút paramétereivel kapcsolatos eredmények álltak elő. Az illesztéseket Python *scipy.optimize* csomagjában található *least_squares* függvény segítségével végeztem el. A függvény a legkisebb négyzetek módszerét használja, az illesztett függvény, illetve a mért adatpontok különbségének minimalizálásával keresi meg a mért pontokat legjobban leíró fizikai paramétereket. Ezen kívül a későbbi diagramokon jól látható, hogy a különböző módszerekkel készült mérések más-más hibahatárral rendelkeznek. Emiatt az adatpontokat a megfigyelési módszer típusától függően súlyoztam. Azt

⁵<http://astrutils.astronomy.ohio-state.edu/>

⁶<https://britastro.org/>

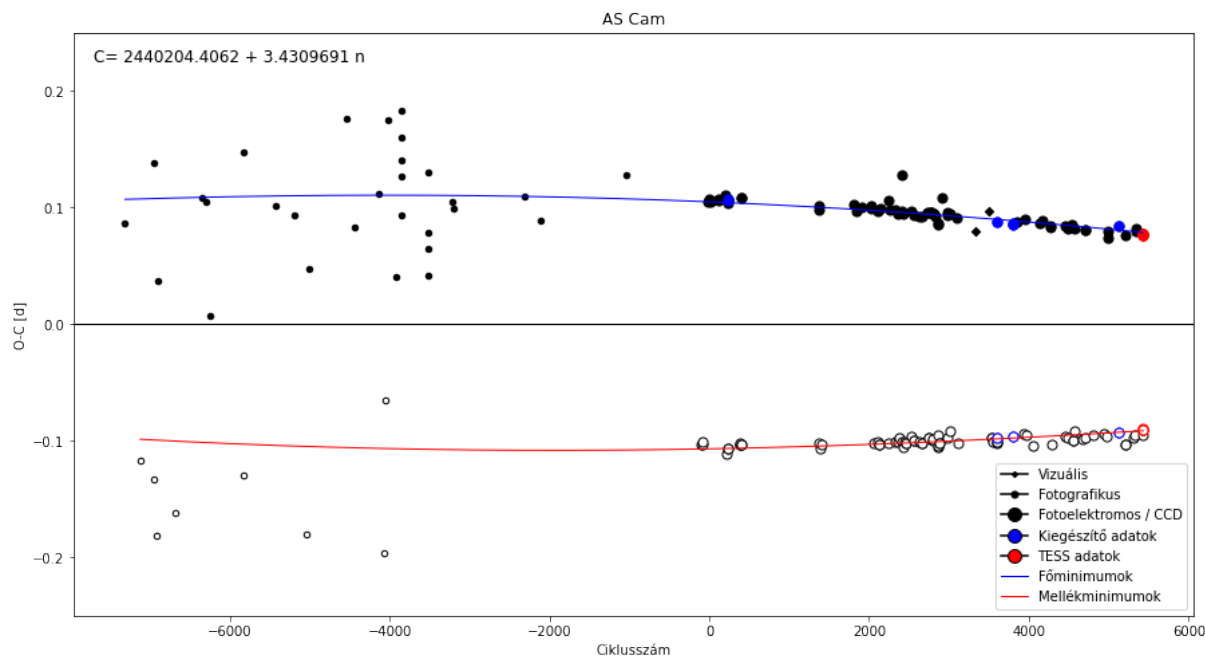
találtam, hogy a vizuális adatokat 0, 1-es, a fotografikusokat 1-es, a fotoelektromosokat 5-ös, a CCD-méréseket pedig 10-es súllyal érdemes ellátni.

4. Eredmények

Ebben a fejezetben mutatom be a frissített O–C diagramokat, a rájuk illesztett modellekkel együtt, illetve közzéteszem az illesztett paramétereket is. Utóbbiakat ellenőrzés céljából összevettem a szakirodalomban található legfrissebb mérésekkel. A rendszerek általam meghatározott *TESS*-minimumai a dolgozat *Függelékében* találhatóak. Mivel a vizsgált rendszerek közül hatban biztosan zajlik apszizmozgás, ezért azt is megadom egy *Várt érték* oszlop formájában, hogy a referenciacikkben szereplő és az általam használt epocha közötti időben történt pályae fordulás alapján mekkorának várhatjuk az ω pályaelemet a megadott konstans apszizmozgási ráta függvényében. A többi mennyiségnél az említett oszlopban egyszerűen az irodalmi érték szerepel hibák nélkül.

4.1. AS Camelopardalis

Az AS Cam-ban rendellenesen lassú apszizmozgás zajlik. Ráadásul az apszizmozgási ráta maga is elég nagy, hiszen a rendszer O–C diagramjára (15. ábra) pillantva felsejlik a dupla szinuszos trend, ám egyrészt a korai idők mérései nagyon szórnak, és ez miatt kérdés a függvény menete, másrészt az mindenképpen megállapítható, hogy a rendszer teljes apszizmozgási periódusának még csak töredékét láthattuk az eddigi, most már több mint 100 éves időszakban. A rendszert spektroszkópiai úton vizsgálták Pavlovski és mtsai 2011-ben. Az ő eredményeik alapját egy 5 éjszakás spektroszkópiai mérési program adta. A két vizsgálat eredményei között viszonylag jelentős eltérés látható, azonban a vizsgálatok eltérő jellegű adatsorokon készültek. Pavlovski és mtsai (2011) spektroszkópiai tanulmányukban szintén elvégezték a rendelkezésükre álló fotometriai méréseken alapuló O–C diagram modellezését, melynek során megállapították, hogy az excentricitás és apszizmozgási ráta között a rendszer esetében jelentős korreláció áll fenn. Ez alapján megállapították, hogy a rendszer ilyen jellegű modellezésekor 0,1 és 0,2 közötti excentricitás értékek statisztikailag mind elfogadhatók, a legjobb illeszkedést $e \approx 0,11$ -es érték esetén kapták. A kettős paraméterillesztéséhez Bozkurt és Değirmenci 2007-es cikke volt a referenciám, amelynek eredményei a saját eredményeimmel együtt az 1. táblázatban szerepelnek. A szerzők ráadásul hozzám hasonlóan nem spektroszkópiai, hanem fotometriai úton vizsgálták a rendszert. A cikkükben megjelenik egy fényidőeffektus-illesztés is a reziduálra, ami Kozyreva és mtsai 2018-as cikkében szintén felbukkan. Rátekintve az általam kapott reziduálra (16. ábra) nem igazán látható ennek nyoma. Ez pusztán azért érdekes, mert a fényidőeffektus (még ha csak kis amplitúdóval is) egy harmadik test meglétét jelentené a rendszerben, ami magyarázat lehet a rendellenesen lassú apszizmozgás kialakulására. Ám, mint ahogy azt már említettem, ennek a harmadik objektumnak (a kevésbé szignifikáns fényidőeffektus-illesztést leszámítva) nincsen fotometriai vagy spektroszkópiai nyoma a mérésekben, ezért a reziduál illesztésétől eltekintettem a dolgozatban.



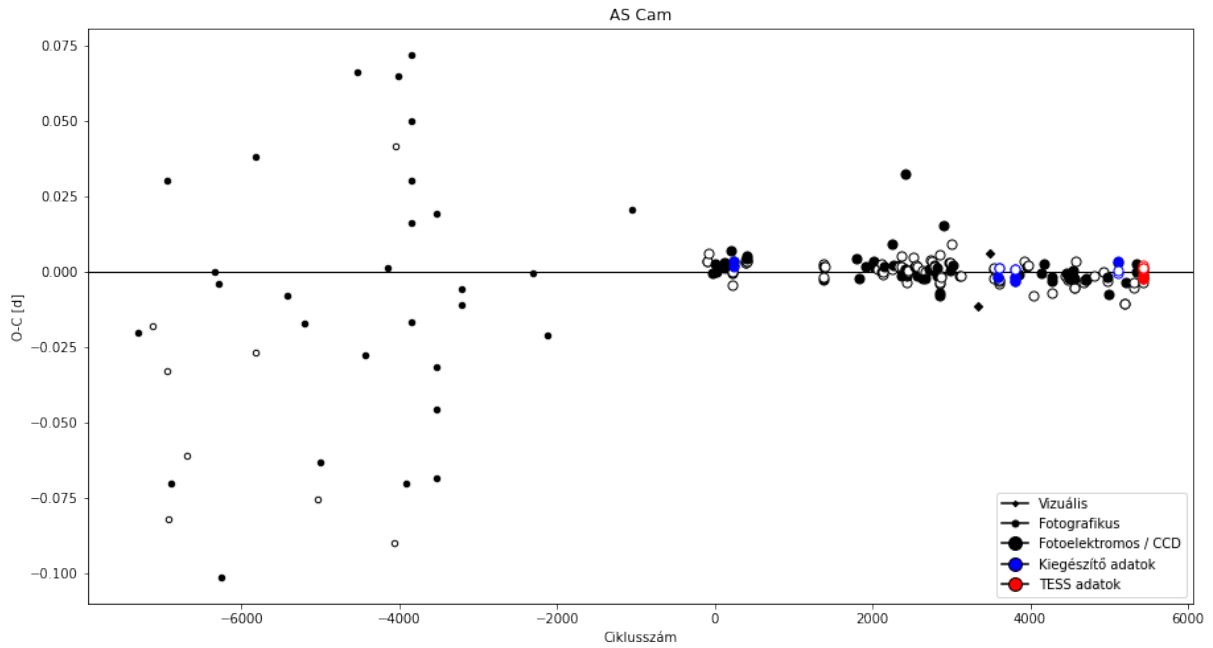
15. ábra. Az AS Cam frissített O–C diagramja az illesztett apszizmozgás-moddal. A kék és piros folytonos vonalak rendre a fő- és mellékminimumokhoz tartozó modellt ábrázolják, és a továbbiakban is ezt a konvenciót fogom követni.

Mennyiség	Bozkurt és Değirmenci (2007)*	Várt érték	Saját érték
e	0,1018	0,1018	0,100 ± 0,007
ω [°]	196,4	196,4	193,8 ± 12,7
$\Delta\omega$ [°/ciklus]	0,00457	0,00457	0,0046 ± 0,0017

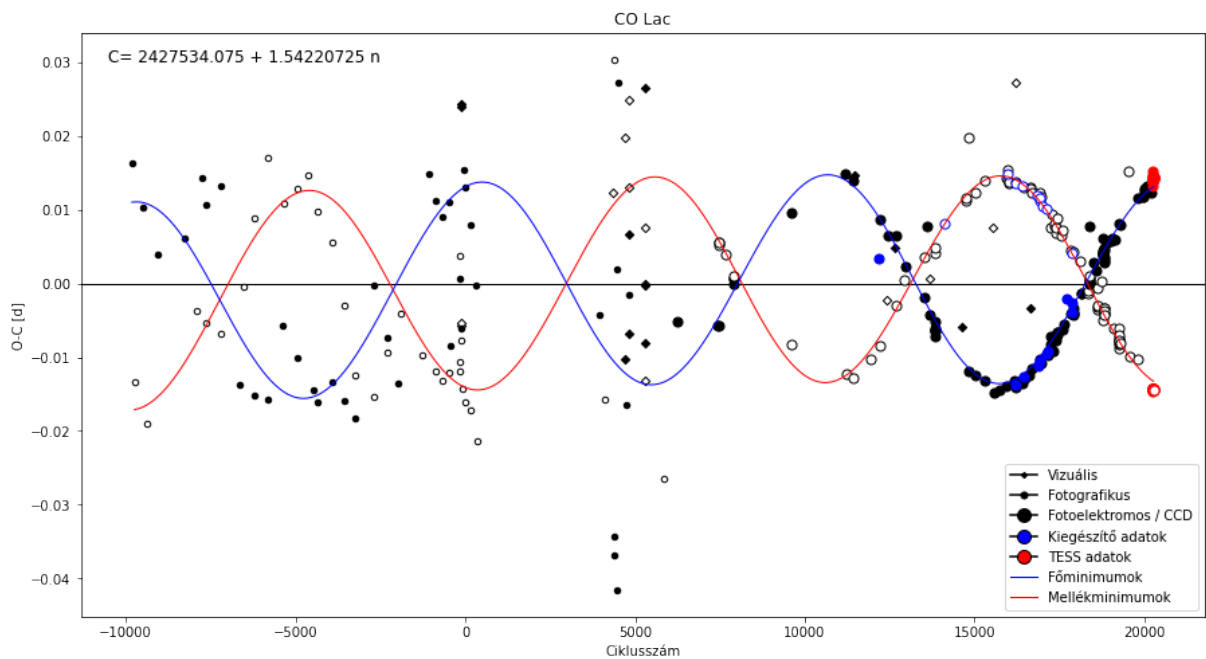
1. táblázat. Az AS Cam irodalmi és általam meghatározott paramétere. *A cikkben nem szerepel hibaérték a paraméterekre.

4.2. CO Lacertae

A CO Lac rendszernél (17. ábra) egy relatíve szépen kirajzolódó szinuszos trend látszódik a megfigyelési időszak második felében/harmadában, de a megfigyelési időszak elején is fel lehet fedezni erre utaló jeleket. Az illeszkedés relatíve gyorsan szép formát ölt, az illesztett paraméterek kezdőértékét Bulut és mtsai 2017-es cikkéből származtatom, az értékeket a 2. táblázat tartalmazza. Lévén az apszizmozgás már több periódust megélt a megfigyelési időszakban a saját értékeim az irodalmitól való eltérése nem számottevő. A rendszer reziduálját a 18. ábrán mutatom be, amin szintén nem jelennek meg további trendek, ráadásul Bulut és mtsai, említett cikkükben, szintén nem végeztek fényidőeffektus-illesztést, ezért ettől a továbbiakban én is eltekintettem.



16. ábra. Az AS Cam O–C diagramjának modellezése után kapott reziduál. Látható, hogy szignifikáns trend, ami a fényidőeffektusra utalna nem tapasztalható.



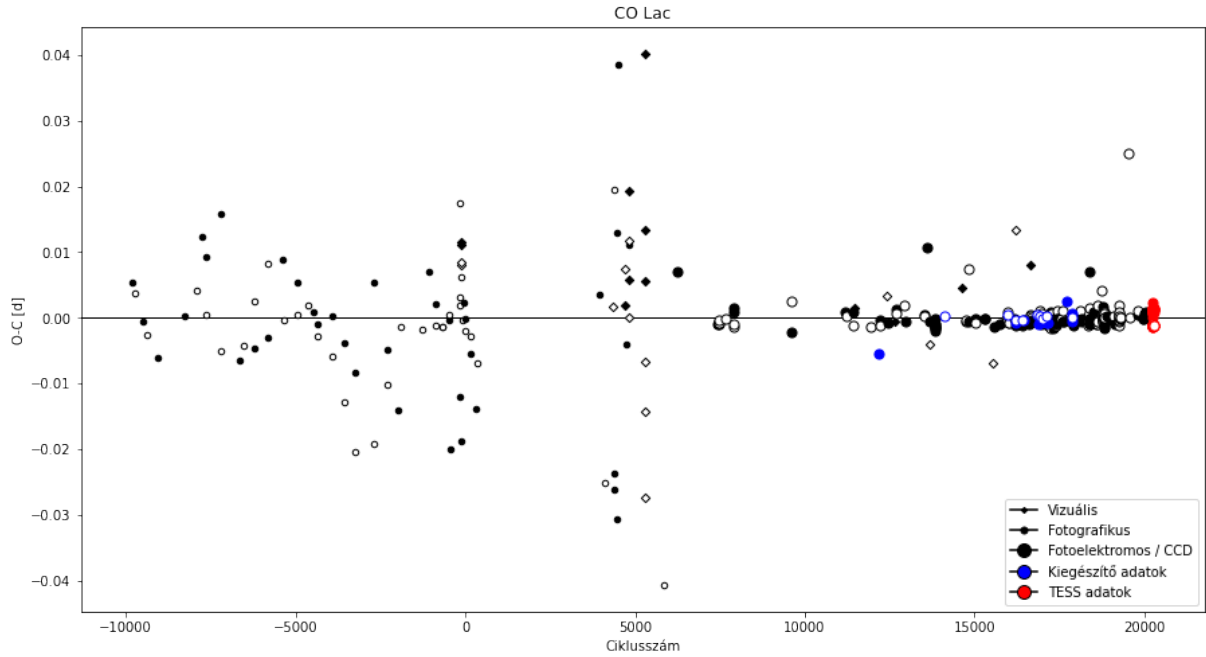
17. ábra. A CO Lac frissített O–C diagramja az illesztett apszismozgás-moddellel.

4.3. CW Cephei

A CW Cep rendszerben szintén Bulut és mtsai (2017) cikkét használtam referenciának, a meghatározott paraméterek a referenciákkal együtt a 3. táblázatban találhatóak. A rendszer frissített O–C diagramja a 19. ábrán látható. A szinuszos trend, a képre pillanatva, azonnal

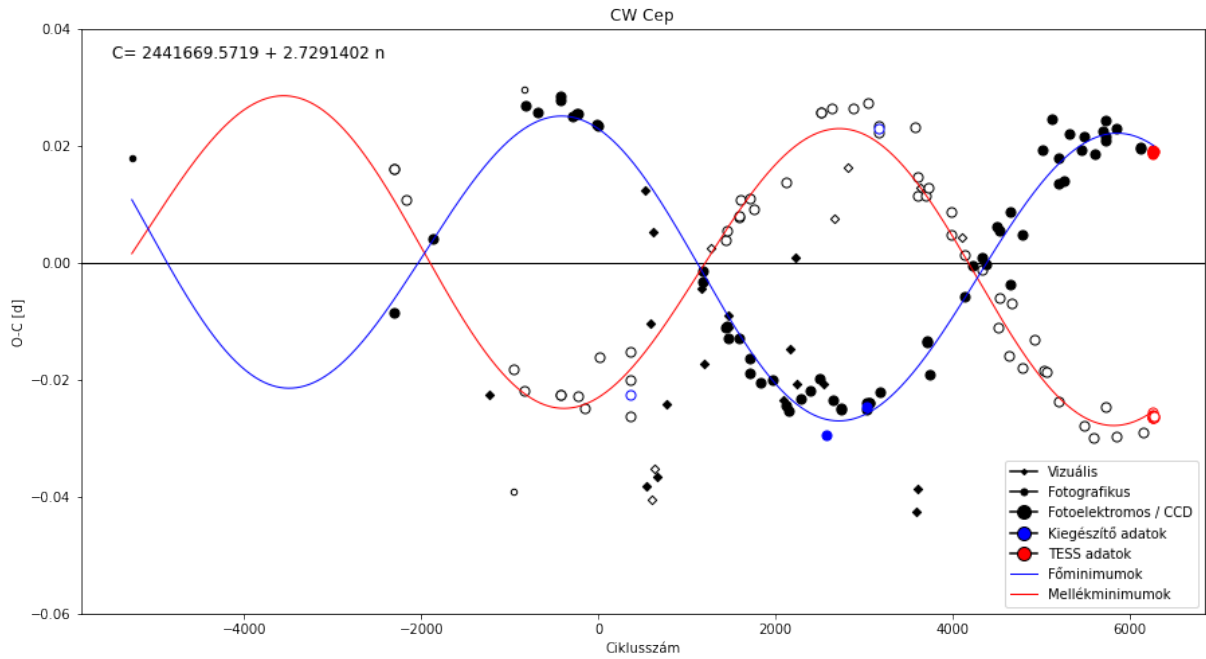
Mennyiség	Bulut és mtsai (2017)	Várt érték	Saját érték
e	$0,029 \pm 0,003$	0,029	$0,029 \pm 0,001$
$\omega [^\circ]$	163 ± 1	163	$164,9 \pm 6,0$
$\Delta\omega [^\circ/\text{ciklus}]$	0,0359*	0,0359	$0,0353 \pm 0,0004$

2. táblázat. A CO Lac irodalmi és általam meghatározott paraméterei. *Bulut és mtsai 2017 cikkében a $\Delta\omega$ mennyiségről nincsenek közölt hibaértékek.



18. ábra. A CO Lac diagramjának illesztése után visszamaradt reziduál. Jól látható, hogy az eleve kilógó pontokat leszámítva a különbség nulla érték körül szól, így feltehetően nincsen más effektus az O–C diagramon.

adja magát, habár némi szórás felfedezhető, illetve kiemelném a csökkenő lineáris trendet, ami valószínűleg arra utal, hogy az irodalmi periódusérték pontatlan. Mivel már majdnem másfél periódusnyi megfigyelés áll rendelkezésünkre az illeszkedés ránézésre szépnek tűnik és a kapott paraméterek is jól visszaadják a várt irodalmi értékeket. A referenciacikk szerzői ennél a rendszernél egy fényidőeffektust is illesztettek, mégpedig úgy, hogy az apszismozgás görbéjét egy további, kisebb amplitúdójú, trenddel terhelték. Az általam kapott reziduálra (20. ábra) pillantva, abban szinuszos trend első ránézésre nem tapasztalható, ráadásul a kapott értékek enélkül is nagyon jó összhangban vannak az irodalmi értékekkel, ezért a továbbiakban eltekintettem a fényidőeffektus illesztésétől. Későbbi vizsgálatok esetén, a kódom további fejlesztési fázisaiban, azonban érdemes lehet visszatérnem még a rendszerhez.



19. ábra. A CW Cep frissített O–C diagramja az illesztett apszizmozgás-moddal.

Mennyiség	Bulut és mtsai (2017)	Várt érték	Saját érték
e	$0,029 \pm 0,004$	0,029	$0,029 \pm 0,001$
$\omega [^\circ]$	201 ± 2	201	$203,2 \pm 5,7$
$\Delta\omega [^\circ/\text{ciklus}]$	0,0590	0,0590	$0,0577 \pm 0,0016$

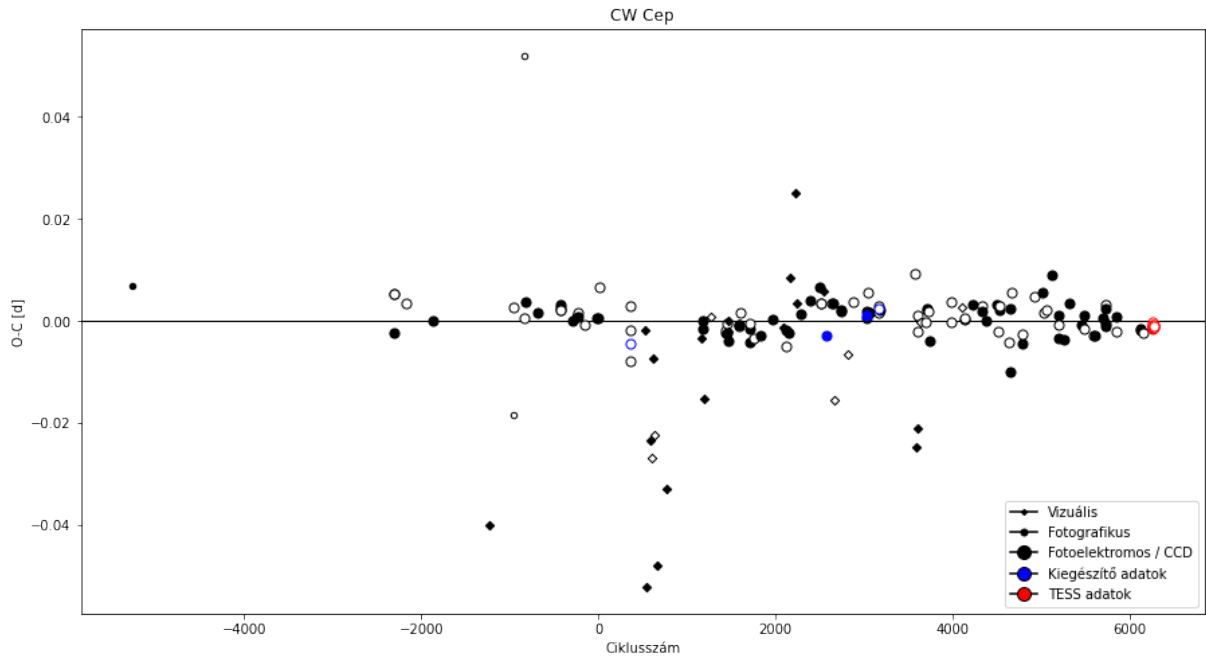
3. táblázat. A CW Cep irodalmi és általam meghatározott paraméterei.

4.4. DI Herculis

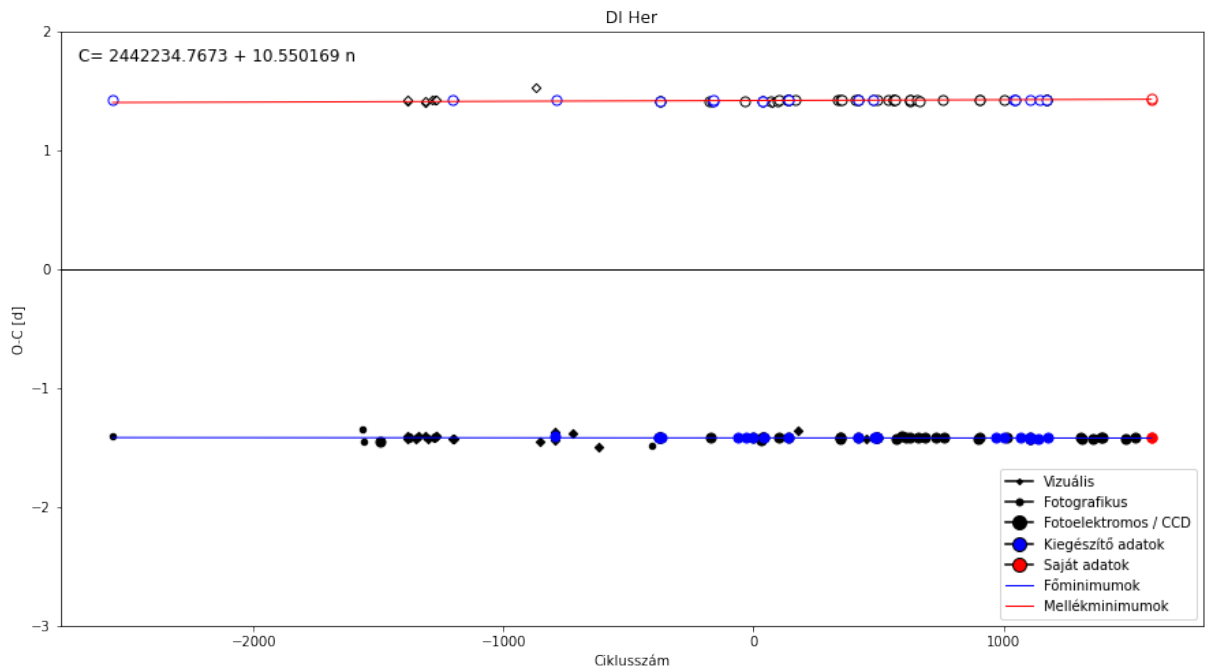
A DI Her a másik, köztudottan rendellenesen lassú apszizmozgást produkáló rendszer, ezzel együtt rendkívül kicsi apszizmozgási rátája van. Tekintve a rendszer O–C diagramját (21. ábra), a szinuszos trend jelenléte nem is kézenfekvő, azt is nehéz lenne megmondani, hogy a periódus mekkora részét sikerült már észlelnie a kutatóknak. A kapott eredmények a 4. táblázatban olvashatók, a referenciaértékeket ennél a rendszernél Claret és mtsai 2010-es cikke szolgáltatotta. Látható, hogy az általam meghatározott értékek az irodalmi értékektől csak kis mértékben térnek el, az illesztés relatíve jó. Mindazonáltal a visszamaradt reziduálban, habár van még valamekkora trend, az feltehetően nem egy harmadik test okozta fényidőeffektusnak köszönhető.

Mennyiség	Claret és mtsai (2010)	Várt érték	Saját érték
e	$0,4895 \pm 0,0008$	0,4895	$0,4872 \pm 0,0927$
$\omega [^\circ]$	$330,0 \pm 0,1$	329,8	$334,1 \pm 29,1$
$\Delta\omega [^\circ/\text{ciklus}]$	$0,00042 \pm 0,00012$	0,00042	$0,00043 \pm 0,00052$

4. táblázat. A DI Her irodalmi és általam meghatározott paraméterei.



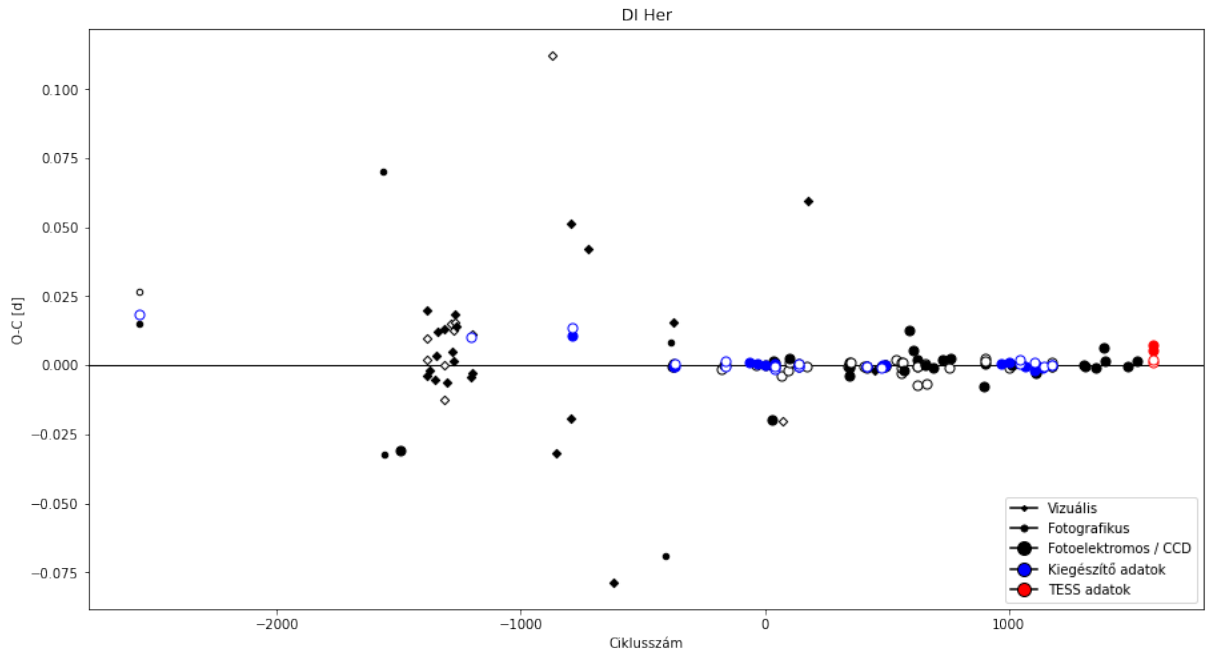
20. ábra. A CW Cep diagramjának illesztése után visszamaradt reziduál. Jól látható, hogy az eleve kilógó pontokat leszámítva a különbség nulla érték körül szól, így feltehetően nincsen más effektus az O–C diagramon.



21. ábra. A DI Her frissített O–C diagramja a rá illesztett apszismozgás-moddellel.

4.5. HP Aurigae

A HP Aur rendszer kivételt képez a többi között. A rendszerben a 2000-es évek előtti szakirodalomban még feltették az apszismozgás lehetőségét, ám mára már úgy tűnik, hogy

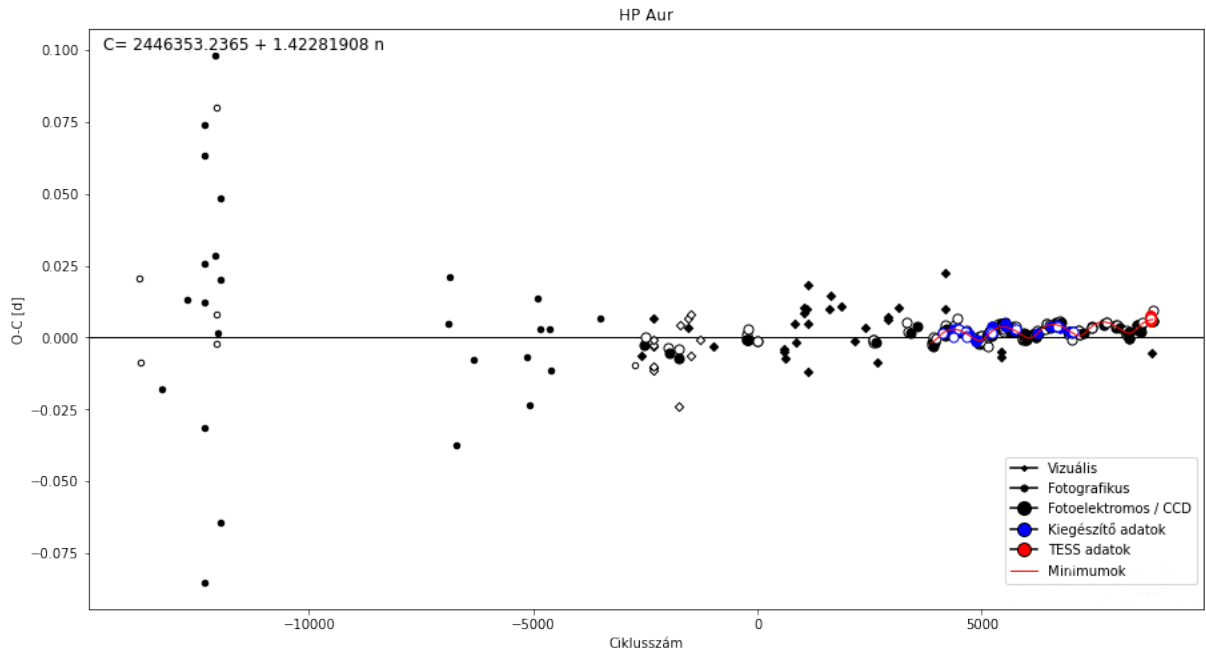


22. ábra. A DI Her diagramjának illesztése után visszamaradt reziduál.

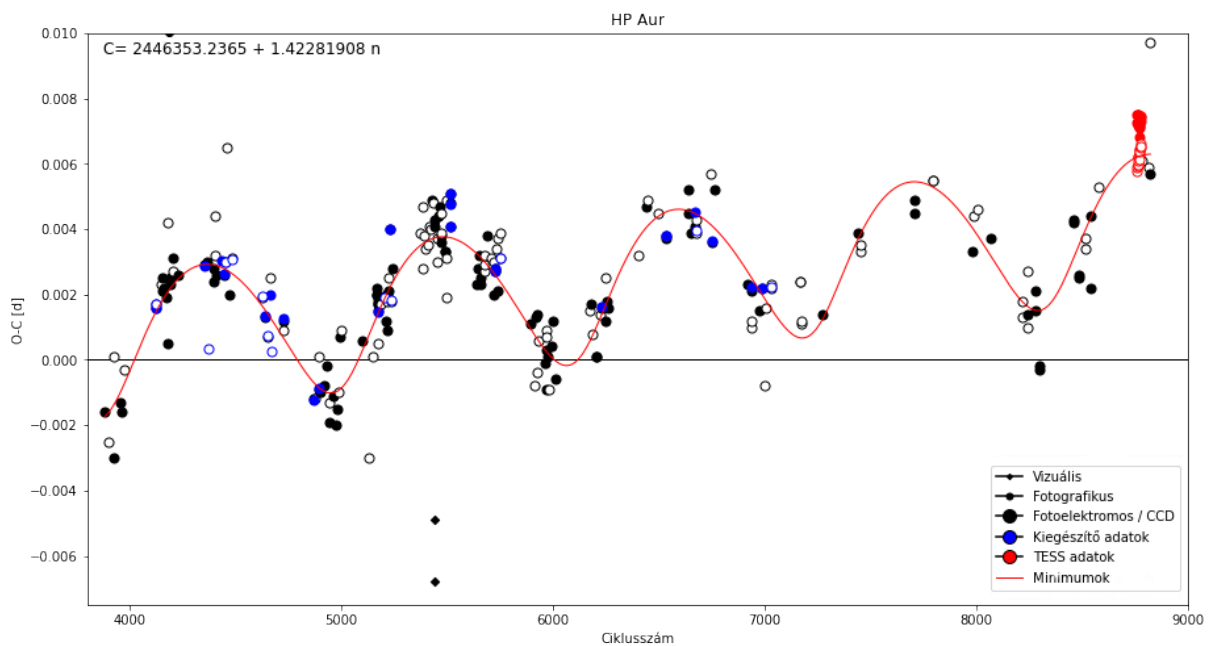
valójában nincs szó a jelenségről. A frissített O–C diagram a 23. ábrán látható. A képen a körülbelül 4000 ciklus után feltűnik egy emelkedő szinuszos trend. Kinagyítva a trendet (24. ábra) látszik, hogy a kétféle minimumok nem válnak el egymástól, azonos fázisban haladnak, így a dolgozatban az apszismozgás helyett fényidőeffektus illesztését hajtottam végre. Az illesztett függvény relatíve szépen illeszkedik a kapott adatsorra. A visszamaradt reziduálra (25. ábra) pillantva nem tűnik úgy, mintha a kétféle minimumok ellentétes fázisban változnának, ráadásul az újabb szakirodalom sem említi apszismozgást, így annak illesztésétől a reziduálon eltekintettem.

Mennyiség	Lacy és mtsai (2014)	Saját érték
$a_{AB} \sin(i) [R_{\odot}]$	$95,21 \pm 3,733$	$82,67 \pm 5,31$
$P [nap]$	$1582,1 \pm 4,0$	$1584,3 \pm 12,9$
e	$0,471 \pm 0,050$	$0,278 \pm 0,115$
$\tau [HJD]$	$2\,450\,403 \pm 20$	$2\,445\,539,8 \pm 28\,445,0$
$\omega [^{\circ}]$	$318,3 \pm 4,8$	$301,7 \pm 24,3$

5. táblázat. A HP Aur irodalmi és általam meghatározott paramétereit.



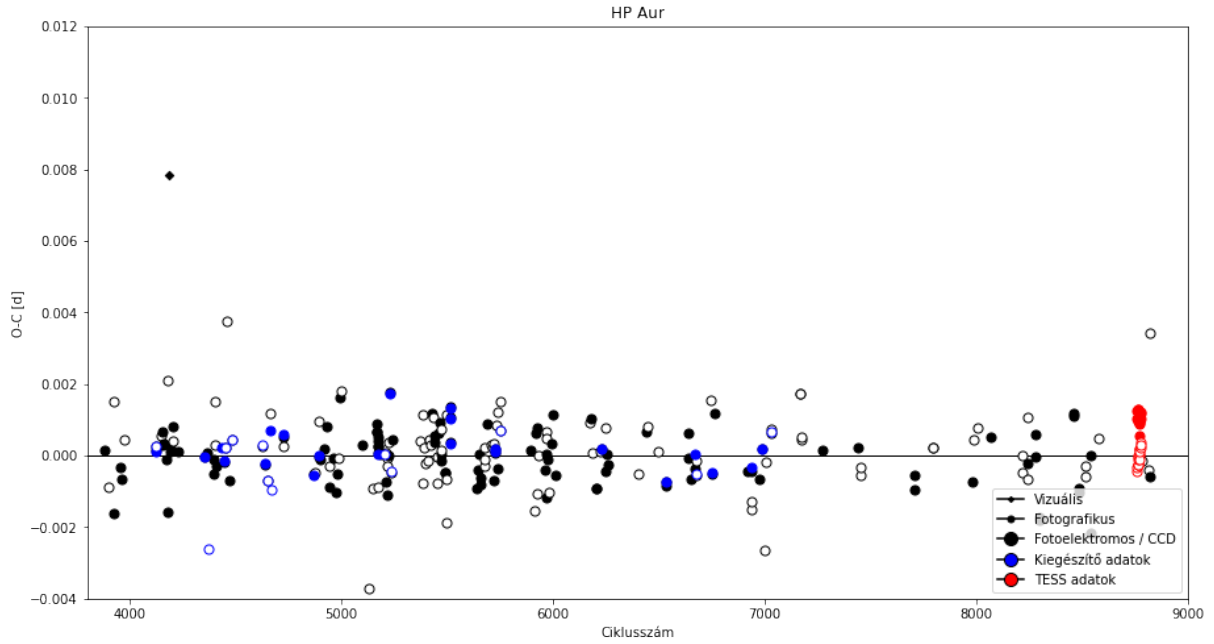
23. ábra. A HP Aur frissített O–C diagramja a rá illesztett fényidőeffektus-moddellel.



24. ábra. A HP Aur frissített O–C diagramjának egy szelete, kinagyítva a frissebb megfigyeléseket, az ábrán jól látható a fényidőeffektus jelenléte és az illesztett függvény menete.

4.6. PV Cassiopeiae

A PV Cas esete a CO Lac-hoz hasonló, annyi különbséggel, hogy az O–C diagramján (26. ábra) a régebbi mérések nagyon szórnak. Ettől függetlenül az újabb méréseken tisztán ki-rajzolódik a két szinuszos trend, amire az illesztés elvégezhető. A referenciaértékek itt is Bulut és mtsai 2017-es cikkéből származnak a saját modellem paraméterei jól egyeznek az

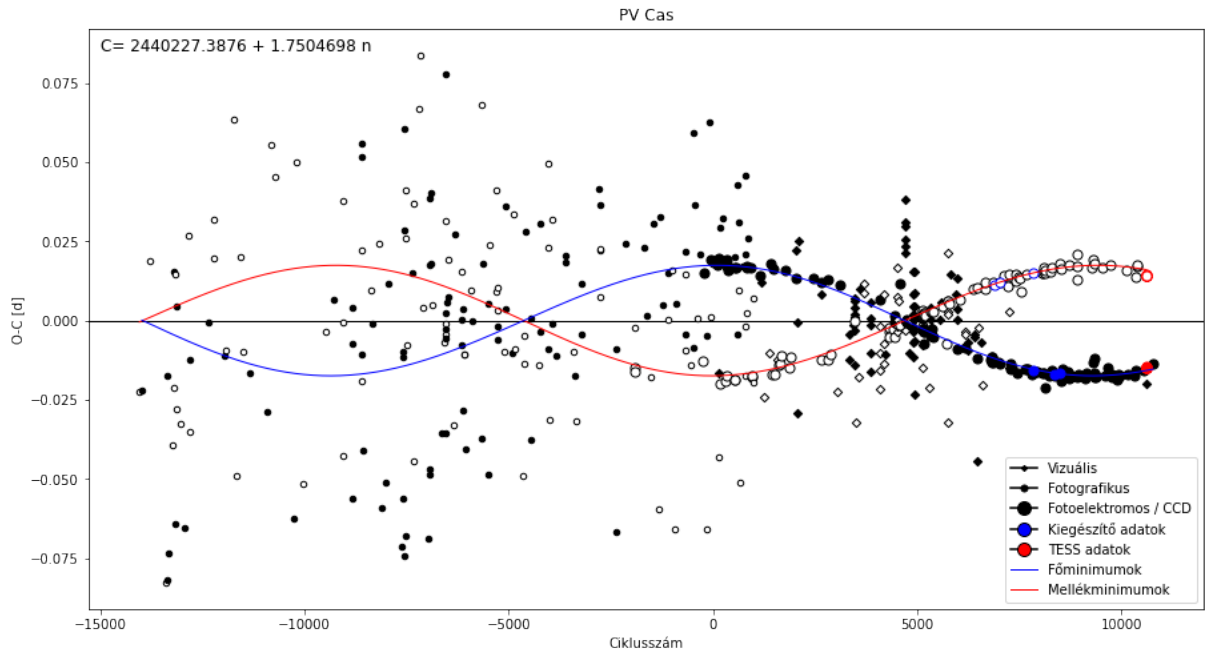


25. ábra. A HP Aur diagramjának illesztése után visszamaradt reziduál.

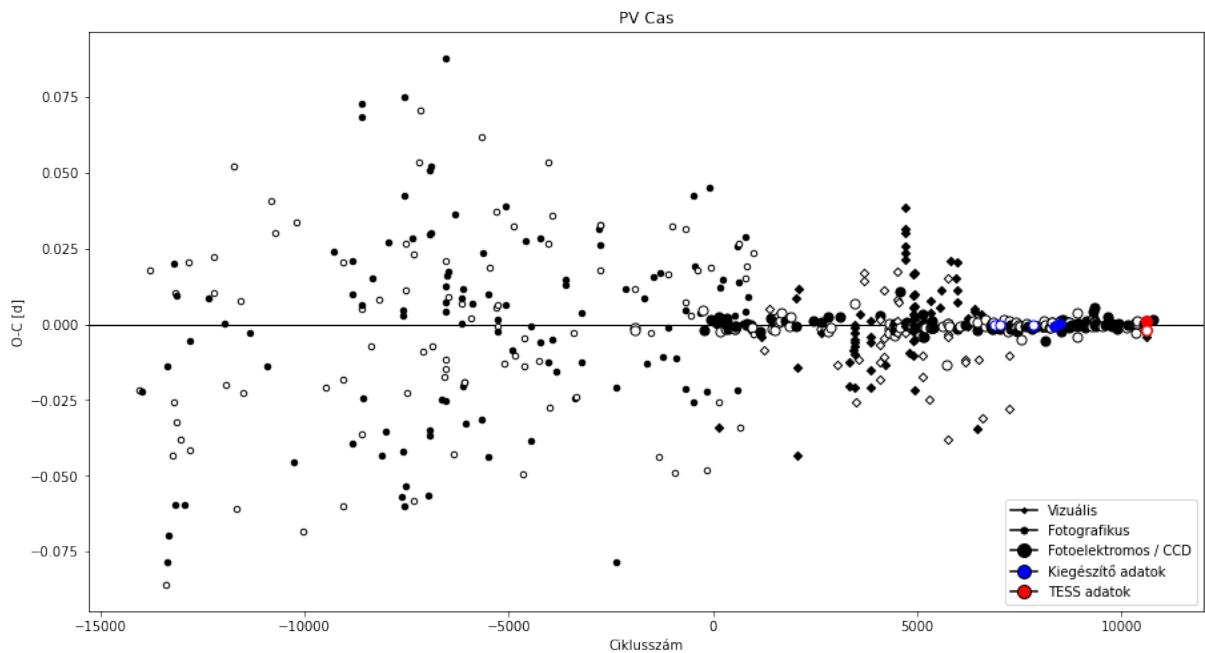
Mennyiség	Bulut és mtsai (2017)	Várt érték	Saját érték
e	$0,032 \pm 0,003$	0,032	$0,031 \pm 0,005$
$\omega [^\circ]$	179 ± 1	179	$179,5 \pm 13,9$
$\Delta\omega [^\circ/\text{ciklus}]$	0,0192	0,0192	$0,0193 \pm 0,0023$

6. táblázat. A PV Cas irodalmi és általam meghatározott paramétere.

övökkel, amelyeket a 6. táblázatban foglalok össze. A reziduál görbe (27. ábra) a jól illeszkedő pontok esetén szintén egy 0 körül alig szóró konstans egyenest ad, vagyis feltehetően az O–C diagramot nem terheli egyéb periódusváltozás. Ezt az állítást az is megerősíti, hogy az említett kutatók sem illesztették meg a modelljeiket fényidőeffektussal, ezért azt én is bátorkodtam elhagyni.



26. ábra. A PV Cas frissített O–C diagramja a rá illesztett apszismozgás-moddal.



27. ábra. A PV Cas diagramjának illesztése után visszamaradt reziduál. Jól látható, hogy az eleve kilógó pontokat leszámítva a különbség nulla érték körül szól, így feltehetően nincsen más effektus az O–C diagramon.

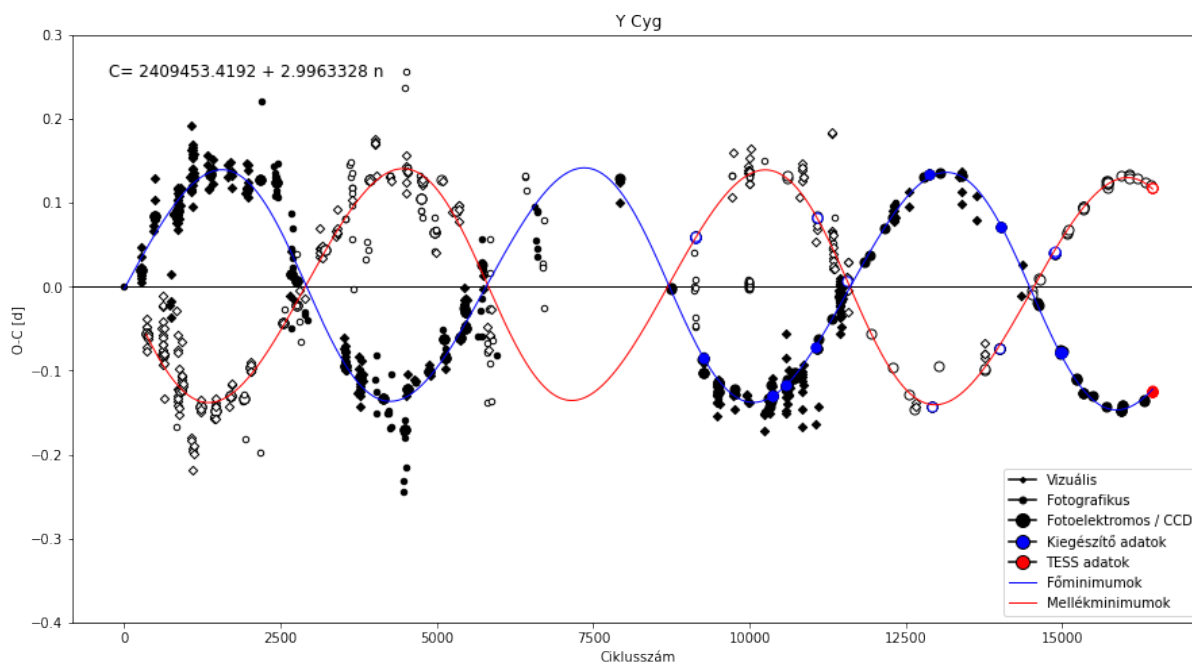
4.7. Y Cygni

Az Y Cyg volt az első rendszer, amelyet munkám során vizsgáltam, a rendszer frissített O–C diagramja a 28. ábrán látható. Mint ahogy már említettem, nagy fényessége és a

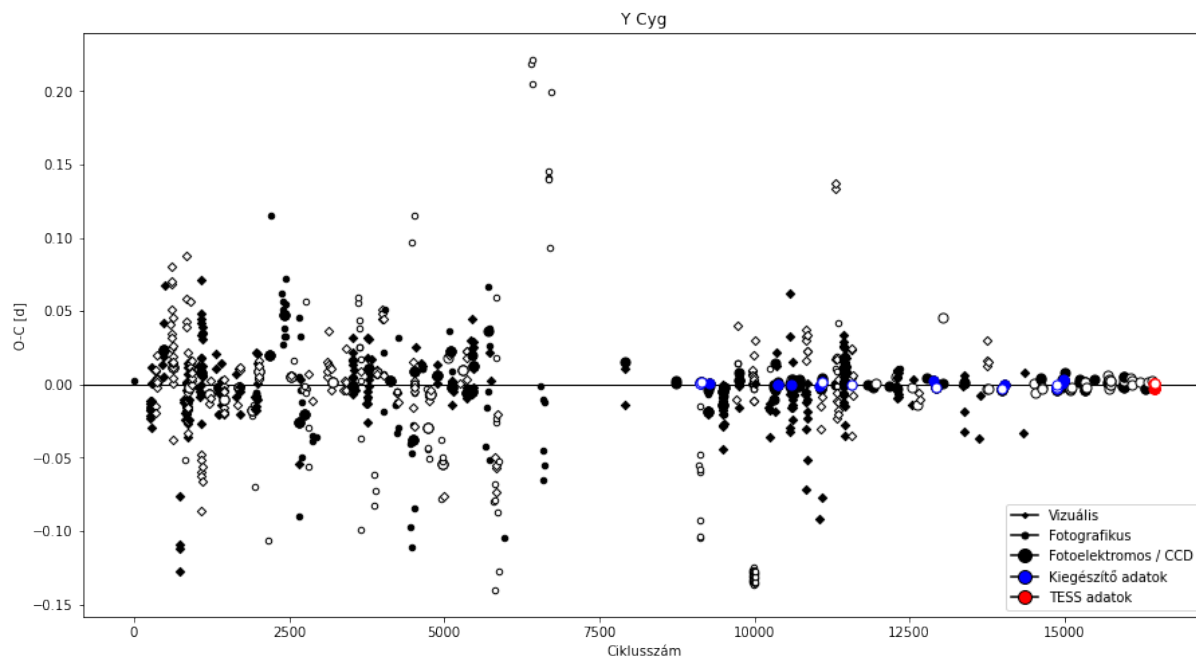
Mennyiség	Harmanec és mtsai (2014)	Várt érték	Saját érték
e	$0,1448 \pm 0,0012$	0,1448	$0,145 \pm 0,003$
$\omega [^\circ]$	$132,54 \pm 0,18$	91,49	$89,7 \pm 2.7$
$\Delta\omega [^\circ/nap]$	$0,020648 \pm 0,00009$	0,020648	$0,0207 \pm 0,0003$

7. táblázat. Az Y Cyg irodalmi és általam meghatározott paramétereit.

pontosan megmért minimumidőpontoknak köszönhetően a rendszer O–C diagramján már a korai, zömmel fotografikus méréseket tartalmazó időszak adatai is szépen illeszkednek a későbbi, pontosabb mérésekéhez, hiszen három teljes (az itt-ott fellépő hézagoktól eltekintve), jól megállapítható periódus is látszik. Az illesztéshez bemenő paraméternek Harmanec és mtsai 2014-es cikkében szereplő 11. táblázat adatait vettem alapul, ahol ők is O–C diagramot modelleztek. A 7. táblázatban mutatom be az illesztett paramétereket, jól látható, hogy az elvárt értékeknek jó közelítéssel megfelelő illesztést kaptam. A diagramra illesztett függvény szépen követi a pontok menetét, a 29. ábrán látható reziduálon pedig nincs nyoma további jelenségeknek.



28. ábra. Az Y Cyg frissített O–C diagramja a rá illesztett apszismozgás-modellel.



29. ábra. Az Y Cyg diagramjának illesztése után visszamaradt reziduál. Jól látható, hogy az eleve kilógó pontokat leszámítva a különbség nulla érték körül szól, így feltehetően nincsen más effektus az O–C diagramon.

5. Összefoglalás és kitekintés

A dolgozat során apszismozgást mutató kettősökkel foglalkoztam. A rendszer O–C diagramjait frissítettem a *TESS* adatsorainak segítségével, majd ezeken a görbéken modellillesztéseket hajtottam végre. Hat olyan rendszer volt, ahol apszismozgást illesztettem, (az AS Cam, a CO Lac, a CW Cep, a DI Her, a PV Cas és az Y Cyg). A hat rendszerben a szakirodalomhoz viszonyítva relatíve jó paraméterek adódtak az illesztésekből. Mindezeket túl egy rendszer, a HP Aur, esetén fényidőeffektust illesztettem az O–C diagramra, amely nagyságrendileg szintén illeszkedni látszik, bár vannak eltérések az irodalomban található és általam kapott paraméterek értékei között. A meghatározott új minimumidőpontjaimat és a modellek eredményeit a dolgozatban közzétettem.

A dolgozatra való felkészülés idejében számos olyan rendszert találtam, amelyben szintén potenciálisan zajlik az apszismozgás. Petrova és Orlov 1998-as említett katalógusában például 128 rendszer szerepel (habár ezek között számos akad, amely e dolgozat módszereivel nem lehetne vizsgálható). Én csupán hét rendszert választottam a lehetségesek közül, a továbbiak vizsgálata egy olyan téma, amivel a későbbiekben szeretnék majd foglalkozni. Továbbá az előállt reziduálokra érdemes lehet megnézni, hogy tartalmaznak-e további ránézésre észre nem vehető, mégis szignifikáns periodikus jeleket, melyek további fizikai folyamatokra vagy extra komponensek jelenlétére utalhatnak a rendszerben. Valamint a dolgozatban is említett belső szerkezeti állandók értékeit is tervezem majd megadni. Ezenkívül a dolgozat elkészítése során használt, saját fejlesztésű Python-kódomat szintén fejleszteni szeretném, hogy az eddigi hibák (például a magasabb fokú illesztések kérdése) és egyéb problémák kiküszöbölődjenek.

6. Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom konzulensemnek, Mitnyan Tibornak a dolgozat elkészítése közben nyújtott rengeteg segítségért, időért és türelméért. Köszönöm továbbá témavezetőmnek, Borkovits Tamásnak meglátásaiért és tanácsaiért, illetve köszönet illeti Hajdu Tamást is, a Python-kód elkészítésében nyújtott segítsége miatt. Ezenkívül köszönet illet mindenkit, aki csak egy hajszállal is hozzájárult, hogy ez a dolgozat elkészülhessen. Köszönöm nektek!

Hivatkozások

- [1] Albrecht, S.; Reffert, S.; Snellen, I. A. G.; Winn, J. N., 2009, *Nature*, Volume 461, Issue 7262, pp. 373-376
- [2] Borkovits, T.; Forgács-Dajka, E.; Regály, Zs., 2007, *A&A*, 473, 191
- [3] Borkovits, T.; Rappaport, S.; Hajdu, T.; Sztakovics, J., 2015, *MNRAS*, Volume 448, Issue 1, p.946-993
- [4] Bozkurt, Z.; Değirmenci, Ö. L., 2007, *MNRAS*, Volume 379, Issue 1, pp. 370-378.
- [5] Bulut, İ.; Bulut, A.; Demircan, O., 2017, *MNRAS*, Volume 468, Issue 3, p.3342-3346
- [6] Claret, A.; Giménez, A., 1993, *Inside the stars; Proceedings of the 137th IAU Colloquium, Univ. of Vienna, Austria, Apr. 13-18, 1992. Astronomical Society of the Pacific (ASP Conference Series. Vol. 40)*, Edited by Werner W. Weiss and Annie Baglin, 1993, p.469
- [7] Claret, A.; Torres, G.; Wolf, M., 2010, *Astronomy and Astrophysics*, Volume 515, id.A4, 6 pp.
- [8] Clausen, J. V.; Gimenez, A., 1991, *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 241, p. 98
- [9] Dugan, R. S., 1931, *Contributions from the Princeton University Observatory*, vol. 12, pp.1-50
- [10] Dunér, N. C., 1900, *Astrophysical Journal*, 11, 175-191 (1900)
- [11] Erdem, A.; Soyduğan, E.; Soyduğan, F.; Özdemir, S.; Çiçek, C.; Bulut, I.; Demircan, O.; Budding, E., 2004, *Astronomische Nachrichten*, Vol.325, Issue 4, p.336-342
- [12] Giménez, A.; Margrave, T., 1982, *Astronomical Journal*, Vol. 87, p. 1233-1236
- [13] Guinan, E. F.; Maloney, F. P., 1985, *Astronomical Journal*, Vol. 90, p. 1519-1528
- [14] Han, W.; Kim, C.-H.; Lee, W.-B.; Koch, R. H., 2002, *The Astronomical Journal*, Volume 123, Issue 5, pp. 2724-2732.
- [15] Harmanec, P., et al., 2014, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 563, id.A120, 12 pp.
- [16] Hippke, M., et al., 2019, *AJ*, 158, 143
- [17] Johnston, C.; Pavlovski, K.; Tkachenko, A., 2019, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 628, id.A25, 16 pp.
- [18] Khaliullin, Kh. F.; Khodykin, S. A.; Zakharov, A. I., 1991, *Astrophysical Journal* v.375, p.314
- [19] Kozyreva, V. S., 1990, *Astrophysics and Space Science*, Volume 165, Issue 1, pp.1-7
- [20] Kozyreva, V. S.; Khaliullin, Kh. F., 1999, *Astronomy Reports*, Volume 43, Issue 10, pp.679-683

- [21] Kozyreva, V. S.; Kusakin, A. V.; Khaliullin, Kh. F., 2005, *Astronomy Letters*, vol. 31, Issue 2, p.117-128
- [22] Kozyreva, V. S.; Zakharov, A. I., 2006, *Astronomy Letters*, vol. 32, Issue 5, p.313-319
- [23] Kozyreva, V. S.; Bagaev, L. A., 2009, *Astronomy Letters*, Volume 35, Issue 7, pp.483-493
- [24] Kozyreva, V.; Kusakin, A.; Bogomazov, A., 2018, *Research in Astronomy & Astrophysics*, vol. 18, Issue 1
- [25] Krzesinski, J.; Pajdosz, G.; Drozd, M., 1993, *Astrophysics and Space Science*, Volume 204, Issue 2, pp.191-197
- [26] Lacy, C. H. S.; Torres, G.; Wolf, M.; Burks, C. L., 2014, *The Astronomical Journal*, Volume 147, Issue 1, article id. 1, 11 pp. (2014).
- [27] Liu, X.; Cai, Z.; Tan, H., 1989, *Astrophysics and Space Science*, Vol. 154, p. 1-6
- [28] Maloney, F. P.; Guinan, E. F.; Boyd, P. T., 1989, *Astronomical Journal* v.98, p.1800
- [29] Martynov, D. Ia.; Khaliullin, Kh. F., 1980, *Astrophysics and Space Science*, Volume 71, Issue 1, pp.147-170
- [30] Mossakovskaya, L. V.; Khaliullin, Kh. F., 1987, *Astronomicheskii Tsirkulyar*, Vol. 1495, p. 5-6 (1987)
- [31] Nha, I. -S., 1975, *Astronomical Journal*, Vol. 80, p. 232-238 (1975)
- [32] O'Connell, D. J. K., 1977, *Ricerche Astron.*, 8 (1977)
- [33] Pavlovski, K.; Southworth, J.; Kolbas, V., 2011, *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 734, Issue 2, article id. L29, 6 pp.
- [34] Petrova, A. V.; Orlov, V. V., 1999, *The Astronomical Journal*, Volume 117, Issue 1, pp. 587-602.
- [35] Philippov, A. A.; Rafikov, R. R., 2013, *The Astrophysical Journal*, Volume 768, Issue 2, article id. 112, 13 pp.
- [36] Popper, D. M.; Hill, G., 1991, *Astronomical Journal* v.101, p.600
- [37] Samolyk, G., 2009, *The Journal of the American Association of Variable Star Observers*, vol. 37, no. 1, p. 44
- [38] Samolyk, G., 2010, *The Journal of the American Association of Variable Star Observers*, vol. 38, nr. 2, p. 183
- [39] Semeniuk, I., 1967, *Acta Astronomica*, Vol. 17, p.223
- [40] Shakura, N. I., 1985, *Soviet Astronomy Letters*, vol. 11, July-Aug. 1985, p. 224-226. Translation *Pisma v Astronomicheskii Zhurnal*, vol. 11, July 1985, p. 536-541

- [41] Stickland, D. J.; Lloyd, C.; Koch, R. H.; Pachoulakis, I.; Pfeiffer, R. J., 1992, The Observatory, Vol. 112, p. 150-157
- [42] Švaříček, P., 2006, Open European Journal on Variable Stars, Vol. 23, Proceedings of the 37th Conference on Variable Stars Research, Edited by L. Brát., p.24
- [43] Švaříček, P.; Wolf, M.; Claret, A.; Kotková, L.; Brát, L.; Šmelcer, L.; Zejda, M., 2008, Astronomy and Astrophysics, Volume 477, Issue 2, January II 2008, pp.615-620
- [44] Terrell, D., 1991, MNRAS, Vol. 250, 209
- [45] Uitterdijk, J., 1934, Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands, Vol. 7, p.159
- [46] Wolf, M. et al., 2013, Massive Stars: From α to Ω , held 10-14 June 2013 in Rhodes, Greece; Online at
- [47] Wolf, M., 1994, Astronomy and Astrophysics, Vol. 286, p.875-878
- [48] Wolf, M.; Kučáková, H.; Kolasa, M.; Štastný, P.; Bozkurt, Z.; Harmanec, P.; Zejda, M.; Brát, L.; Hornoch, K., 2006, Astronomy and Astrophysics, Volume 456, Issue 3, September IV 2006, pp.1077-1083
- [49] Yıldız, M., 2005, MNRAS, Volume 363, Issue 3, pp. 967-976.
- [50] Zakharov, A. I.; Khaliullin, Kh. F.; Khodykin, S. A., 1988, Astronomicheskii Tsirkulyar, Vol. 1529, p. 13-15
- [51] Borkovits, T.; 2016, A fedési kettős és többes csillagrendszerek vizsgálatának járatlan útjain, Akadémiai doktori értekezés, SZTE Bajai Obszervatórium
- [52] Borkovits, T., Fizikai Szemle 2009/2. 41.o.
- [53] <https://www.aavso.org>
- [54] <http://astro.u-szeged.hu/>
- [55] <https://archive.stsci.edu/>
- [56] <https://www.as.up.krakow.pl>
- [57] <http://simbad.u-strasbg.fr>
- [58] <https://TESS.gsfc.nasa.gov/>
- [59] <https://hu.wikipedia.org>
- [60] <http://var2.astro.cz>

Függelék

Minimum típusa (I/II)	TBJD	Hiba
I	1817,4904	0,0002
II	1819,0387	0,0003
I	1820,9212	0,0002
II	1822,4698	0,0002
I	1824,3521	0,0003
II	1825,9005	0,0001
II	1829,3329	0,0002
I	1831,2144	0,0002
II	1832,7626	0,0002
I	1834,6450	0,0003
II	1836,1938	0,0001
I	1838,0772	0,0001
II	1839,6247	0,0003

8. táblázat: Az AS Cam rendszer általam meghatározott új minimumidőpontjai a *TESS* mérései alapján. Az I. főminimumot, a II. mellékminimumot jelöl.

Minimum típusa (I/II)	TBJD	Hiba
I	1739,1105	0,0008
II	1739,8533	0,0002
I	1740,6528	0,0007
II	1741,3955	0,0002
I	1742,1947	0,0007
II	1742,9377	0,0002
I	1743,7370	0,0008
II	1744,4798	0,0002
I	1745,2794	0,0007
II	1746,0221	0,0002
I	1746,8216	0,0008
II	1747,5644	0,0002
II	1752,1909	0,0002
I	1752,9909	0,0008
II	1753,7332	0,0002
I	1754,5328	0,0007
II	1755,2753	0,0002
I	1756,0751	0,0007
II	1756,8176	0,0002
I	1757,6183	0,0007
II	1758,3598	0,0002

Minimum típusa (I/II)	TBJD	Hiba
I	1759,1593	0,0007
II	1759,9020	0,0002
I	1760,7019	0,0007
II	1761,4440	0,0002
I	1765,3272	0,0007
II	1766,0705	0,0002
I	1766,8704	0,0007
II	1767,6130	0,0002
I	1768,4131	0,0007
II	1769,1552	0,0002
I	1769,9546	0,0007
II	1770,6973	0,0002
I	1771,4969	0,0007
II	1772,2395	0,0002
I	1773,0392	0,0007
II	1773,7819	0,0002
I	1774,5811	0,0007
II	1775,3239	0,0002
II	1778,4084	0,0002
I	1779,2083	0,0007
II	1779,9506	0,0002
I	1780,7507	0,0007
II	1781,4928	0,0002
I	1782,2927	0,0007
II	1783,0350	0,0002
I	1783,8348	0,0007
II	1784,5772	0,0002
I	1785,3771	0,0007
II	1786,1193	0,0002
I	1786,9190	0,0007
II	1787,6616	0,0002

9. táblázat: A CO Lac rendszer általam meghatározott új minimumidőpontjai a *TESS* mérései alapján. Az I. főminimumot, a II. mellékminimumot jelöl.

Minimum típusa (I/II)	TBJD	Hiba
I	1764,9250	0,0004
II	1766,2443	0,0000
I	1767,6543	0,0005
II	1768,9734	0,0001
I	1770,3835	0,0005

Minimum típusa (I/II)	TBJD	Hiba
II	1771,7033	0,0000
I	1773,1122	0,0005
II	1774,4317	0,0001
I	1778,5708	0,0005
II	1779,8903	0,0001
I	1781,3002	0,0005
II	1782,6190	0,0001
I	1784,0291	0,0005
II	1785,3485	0,0000
I	1786,7584	0,0005
II	1788,0776	0,0000

10. táblázat: A CW Cep rendszer általam meghatározott új minimumidőpontjai a *TESS* mérései alapján. Az I. főminimumot, a II. mellékminimumot jelöl.

Minimum típusa (I/II)	TBJD	Hiba
I	2018,6721	0,0001
II	2016,2407	0,0006
II	2026,7917	0,0004
I	2029,2207	0,0001

11. táblázat: A DI Her rendszer általam meghatározott új minimumidőpontjai a *TESS* mérései alapján. Az I. főminimumot, a II. mellékminimumot jelöl.

Minimum típusa (I/II)	TBJD	Hiba
II	1816,4260	0,0001
I	1817,1389	0,0005
II	1817,8489	0,0001
I	1818,5619	0,0004
II	1819,2718	0,0001
I	1819,9845	0,0004
II	1820,6946	0,0001
I	1821,4073	0,0005
II	1822,1175	0,0002
I	1822,8302	0,0004
II	1823,5404	0,0001
I	1824,2530	0,0005
II	1824,9634	0,0001
I	1825,6761	0,0004

Minimum típusa (I/II)	TBJD	Hiba
II	1826,3862	0,0001
I	1827,0989	0,0004
II	1829,2319	0,0001
I	1829,9443	0,0005
II	1830,6547	0,0001
I	1831,3670	0,0004
II	1832,0777	0,0001
I	1832,7898	0,0004
II	1833,5002	0,0001
I	1834,2123	0,0003
II	1834,9233	0,0001
I	1835,6355	0,0004
II	1836,3461	0,0001
I	1837,0584	0,0003
II	1837,7690	0,0001
I	1838,4814	0,0003
II	1839,1919	0,0002
I	1839,9042	0,0003
II	1840,6147	0,0002

12. táblázat: A HP Aur rendszer általam meghatározott új minimumidőpontjai a *TESS* mérései alapján. Az I. főminimumot, a II. mellékminimumot jelöl.

Minimum típusa (I/II)	TBJD	Hiba
I	1764,8479	0,0002
II	1765,7523	0,0002
I	1766,5985	0,0002
II	1767,5027	0,0002
I	1768,3489	0,0002
II	1769,2532	0,0002
I	1770,0994	0,0002
II	1771,0036	0,0002
I	1771,8498	0,0002
II	1772,7541	0,0002
I	1773,6003	0,0002
II	1774,5046	0,0002
I	1775,3508	0,0002
II	1778,0057	0,0002
I	1778,8517	0,0002
II	1779,7560	0,0002
I	1780,6022	0,0002

Minimum típusa (I/II)	TBJD	Hiba
II	1781,5064	0,0002
I	1782,3527	0,0002
II	1783,2569	0,0002
I	1784,1032	0,0002
II	1785,0074	0,0002
I	1785,8538	0,0002
II	1786,7578	0,0002
I	1787,6042	0,0002

13. táblázat: A PV Cas rendszer általam meghatározott új minimumidőpontjai a *TESS* mérései alapján. Az I. főminimumot, a II. mellékminimumot jelöl.

Minimum típusa (I/II)	TBJD	Hiba
II	1711,7501	0,0000
I	1713,0049	0,0002
II	1714,7464	0,0000
I	1716,0014	0,0002
II	1717,7427	0,0000
I	1718,9979	0,0002
I	1724,9921	0,0002
II	1726,7312	0,0000
I	1727,9870	0,0002
II	1729,7276	0,0000
I	1730,9834	0,0002
II	1732,7239	0,0000
I	1733,9799	0,0002

14. táblázat: Az Y Cyg rendszer általam meghatározott új minimumidőpontjai a *TESS* mérései alapján. Az I. főminimumot, a II. mellékminimumot jelöl.

Nyilatkozat

Alulírott Nagy Kristóf, Csillagász MSc. szakos hallgató (DLLJ7M), „Excentrikus kettőscsillagrendszerek apszismozgásának vizsgálata a *TESS* mérései alapján” című diplomamunka szerzője fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy a dolgozatom önálló munkám eredménye, saját szellemi termékem, abban a hivatkozások és idézések általános szabályait következetesen alkalmaztam, mások által írt részeket a megfelelő idézés nélkül nem használtam fel.

Szeged,2021.05.22.....


.....
aláírás