

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM
CSILLAGÁSZATI TANSZÉK

A HD 181068 triplán fedő hármascsillag asztrofizikai vizsgálata a Kepler-űrtávcsővel

TDK-dolgozat

Készítette: Király Amanda, Földtudomány BSc-s csillagász
szakirányos hallgató
Témavezető: Dr. Kiss L. László, tudományos tanácsadó,
MTA CSFK CSI

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	2
2. Alapfogalmak	3
2.1. Állapothatározók	3
2.2. Fényesség	3
2.3. Fedési kettőscsillagok	4
2.4. Tömeg	5
2.5. Effektív hőmérséklet	6
2.6. A Hertzsprung–Russell-diagram	6
2.7. A fényidő-effektus	8
2.8. ETV diagram	9
2.9. Fémesség	9
3. A vizsgált rendszer	11
3.1. A fénygörbe jellegzetességei	12
4. Mérések és adatfeldolgozás	15
4.1. A Kepler-űrtávcső	15
4.2. Az adatok kiértékelése	17
4.2.1. A normálás	18
4.2.2. Az SC adatok feldolgozása	19
4.2.3. Az LC adatok feldolgozása	21
5. A csillagtömegek, a félnagy tengelyek és a körsebesség meghatározása	25
6. A rendszer korának meghatározása	28
7. Összefoglalás	32
8. Köszönetnyilvánítás	33

1. Bevezetés

A Kepler-űrtávcső minden korábbinál nagyságrendekkel pontosabb fotometriai műszer. Nem csak az exobolygó kutatás, hanem az asztroszeizmológia és a változócsillagok kutatása területén is jelentős sikereket ér el. Ezzel a műszerrel fedezték fel 2011-ben Derekas Aliz és munkatársai a HD 181068 jelű, a felfedezők által Trinity („Szentháromság”) néven is hivatkozott csillag asztrofizikai jelentőségét. A korábban egyvonalas spektroszkópiai kettősnek talált csillaggal azelőtt nem foglalkozott a szakirodalom. Kiderült azonban, hogy a több tagú csillagrendszerek egy új és ritka kategóriáját képviseli, a triplán fedő hármas rendszereket (triple eclipsing triple system): a három tagból álló rendszer főkomponense egy vörös óriás, mely körül egy vörös törpék alkotta szoros pár kering. A Földről nézve a rendszer tagjai mindannyian, kölcsönösen kitakarják egymást a keringés során.

A HD 181068 csillagai ráadásul igen rövid keringési időekkel jellemezhetők a több tagú rendszerek átlagos keringési idejeihez képest. Emiatt az égimechanikai hatások rövid időskálán is kimutathatóan jelentkezhetnek.

A munkám során kimértem a Trinity-rendszerben fellépő fényidő-effektust. Ehhez több mint két évnyi, gyakorlatilag teljesen folyamatos, nagy pontosságú Kepler adatot használtam fel. A rendelkezésemre álló adatok között voltak olyanok is, melyeknek a mérési gyakorisága megközelítőleg 30-szorosa volt a korábban vizsgált méréseknel. A rendszer fényidő-effektusát kimértem és ETV diagramon ábrázoltam, majd ennek alapján pontosítottam a Trinity-csillagok tömegét és kiszámoltam az egymástól való távolságukat is. Ezeket összehasonlítottam egy részletesebb és teljesebb dinamikai modellezés eredményeivel (Borkovits et al., 2012). Ezután izokrón-illesztéssel megbecsültem a rendszer korát.

Az alábbiakban először a munkámat keretbe foglaló alapfogalmakat tárgyalom. A 3. fejezetben részletesen ismertetem a vizsgált rendszert, kitérve annak ismert fizikai paramétereire és a fénygörbe jellegzetességeire. Az általam feldolgozott fotometriai adatokról és a fényidő-effektus kimérésének módjáról a 4. fejezetben írok. Az 5. fejezetben a Trinity-csillagok néhány paraméterét (tömeg, félnagy tengelyek, körsebesség) számítottam ki. A rendszer korának izokrón-illesztéssel történt meghatározását ismertetem a 6. fejezetben. Az összefoglalást a 7. fejezet tartalmazza.

2. Alapfogalmak

2.1. Állapothatározók

A csillagok állapothatározói a csillagfejlődés során változnak. A legfontosabb alapparaméterek közé tartozik az égitest tömege, sugara, felszíni hőmérséklete és a luminozitása. A csillagok életútja leginkább a kezdeti tömegtől és a fémességtől függ. Minél nagyobb tömegű egy égitest, annál gyorsabban felhasználja a magjában rendelkezésre álló hidrogént és annál gyorsabban elfejlődik a Hertzsprung–Russell-diagram fősorozatáról. A kis tömegű csillagok azonban hosszú évmilliárdokat eltölthetnek a magbéli hidrogénégetés állapotában. Tehát a különböző tömegű csillagok más-más csillagfejlődési útvonalakat követnek és ez nagyságrendekkel különböző idők alatt következik be.

2.2. Fényesség

A csillagok fényességét először Hipparkhosz katalogizálta, az i.e. II. században. A legfényesebb csillagokat 1. fényrendűnek, míg a szabad szemmel látható leghalványabbakat 6. fényrendűnek sorolta be. N.R. Pogson az 1850-es években helyezte fizikai alapokra a csillagok fényességét és tette mindezt úgy, hogy a fényességértékek nem nagyon térnek el a Hipparkhosz által definiált rendszertől. A fényesség definiálására szolgál az alábbi, Pogson-képlet néven ismert formula:

$$m = -2,5 \log_{10} i + c \quad (1)$$

ahol m a csillag fényessége magnitúdóban kifejezve, i a csillag sugárzási intenzitása a vizsgált hullámhossztartományban, míg c egy konstans. Két csillagra vonatkozóan a fényesség-különbség a következő:

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log_{10} \frac{i_1}{i_2} \quad (2)$$

Ez azonban semmit nem árul el a két égitest fizikai jellemzőiről, mivel nagyságrendekkel különböző távolságokban lehetnek a Földtől, a távolsággal pedig négyzetesen csökken az intenzitás. Bevezethetjük azonban az abszolút fényesség fogalmát, ami nem más, mint a 10 parszek távolságból mérhető látszó fényesség. Egy csillag látszó és abszolút fényessége között az alábbi összefüggés áll fenn:

$$m - M = -2,5 \log_{10} \frac{i}{I} = 5 \log_{10} \frac{d}{D}, \quad (3)$$

ahol m a csillag látszó és M az abszolút fényessége, d az égitest Földtől való távolsága parszekben kifejezve, míg D az abszolút fényesség kiszámításához használt távolság, 10 parszek. i a mért, I a D távolságról mérhető intenzitás. Az egyenletet egyszerűsítve a következő formulával tudjuk megadni egy csillag abszolút fényességét:

$$m - M = 5 \log_{10} d - 5, \quad (4)$$

amennyiben elhanyagoljuk a csillagközi fényelnyelést (Marik, 1989).

Vannak ún. változócsillagok, amelyeknek a fényessége emberi időléptékben változik. Amikor egy égitest fényességét az idő függvényében ábrázoljuk, akkor az ily módon elkészített diagramot fénygörbének nevezzük. A fénygörbe függ a vizsgált objektum fizikai tulajdonságaitól, így következtetni tudunk azokra.

2.3. Fedési kettőscsillagok

A sztéllárisztisztikai adatok alapján a csillagok több mint fele kettős, vagy többes rendszer tagja. Ezek között vannak olyan rendszerek is, amelyek a keringésük során a Földről nézve részben, vagy egészben kitakarják egymást. Ilyen nevezetes fedési kettőscsillag például az Algol (β Persei) is.

A fedési kettőscsillagok fénygörbéje nagyon jellegzetes. Amikor az egyik csillag kitakarja a másikat, akkor a csillagrendszer összfényessége lecsökken. Mikor a fedésnek vége, az összfényesség újból eléri a korábbi értéket. Ez a fénygörbében periodikus minimumokat eredményez és ezen minimumok megjelenése számos információval szolgál a rendszer egyes fizikai paramétereiről.

Minden második fedés között eltelt idő adja meg a kettőscsillag keringési periódusát. Azok a minimumok, amelyek a leszálló és a felszálló ág között egy konstans értéket vesznek föl, arra utalnak, hogy a fedések az egyik égitest teljesen kitakarja társát. Részleges fedés esetén a minimumok alja hegyes lesz. Amennyiben két különböző mélységű minimum váltakozik, akkor a rendszert két eltérő hőmérsékletű csillag alkotja. Főminimum akkor van, amikor a hidegebb csillag takarja ki a forróbbat, mellékminimum ellenkező esetben. A fényességcsökkenések mértékének aránya tehát utal az égitestek hőmérsékletének arányára is. A fedési rendszer fénygörbéjéből továbbá következtetni lehet a keringés excentricitására, a csillagok közötti esetleges anyagáramlásra, az egymásra gyakorolt árapály kölcsönhatásra, a komponensek tömegeinek és sugarainak arányára. Ezek alapján pedig meg lehet határozni a rendszer geometriai és dinamikai jellemzői, speciális esetben akár pusztán fotometriai adatok felhasználásával (megjegyzendő azonban, hogy általában fotometriai és spektroszkópiai mérések kombinálására van szükség a teljes modellezéshez).

2.4. Tömeg

Egy csillag tömegére legpontosabban annak gravitációs hatása alapján lehet következtetni. Egy szoros, több tagú rendszer esetében ebből a szempontból nagy szerencsénk van, hiszen a szóban forgó csillagok viszonylag közel vannak egymáshoz, így az egymásra gyakorolt gravitációs hatásuk is nagyobb és így könnyebben mérhető. Egy kéttagú rendszerben az egyik csillag ellipszispálya menti mozgást végez a másik csillaghoz képest. Ennek alapján az égitestek tömege a következő formulával számítható ki:

$$M_1 + M_2 = \frac{4\pi^2}{G} \cdot \frac{a^3}{T^2} \quad (5)$$

Ez a kéttest-probléma megoldásából adódó harmadik Kepler-törvény, ahol M_1 és M_2 a két csillag tömege, $G = 6,6742 \cdot 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2}$ a gravitációs állandó, a a félnagy tengely, és T a keringési idő (Marik, 1989).

2.5. Effektív hőmérséklet

Egy csillag effektív hőmérséklete egyenlő annak a feketetestnek a hőmérsékletével, amely egységnyi felületen és egységnyi idő alatt ugyanannyi energiát sugároz ki, mint a csillag. A Stefan-Boltzmann törvény alapján számíthatjuk ki.

$$\int_0^{\infty} B_{\lambda}(T) d\lambda = \sigma T^4, \quad (6)$$

ahol $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-4}$ a Stefan-Boltzmann állandó.

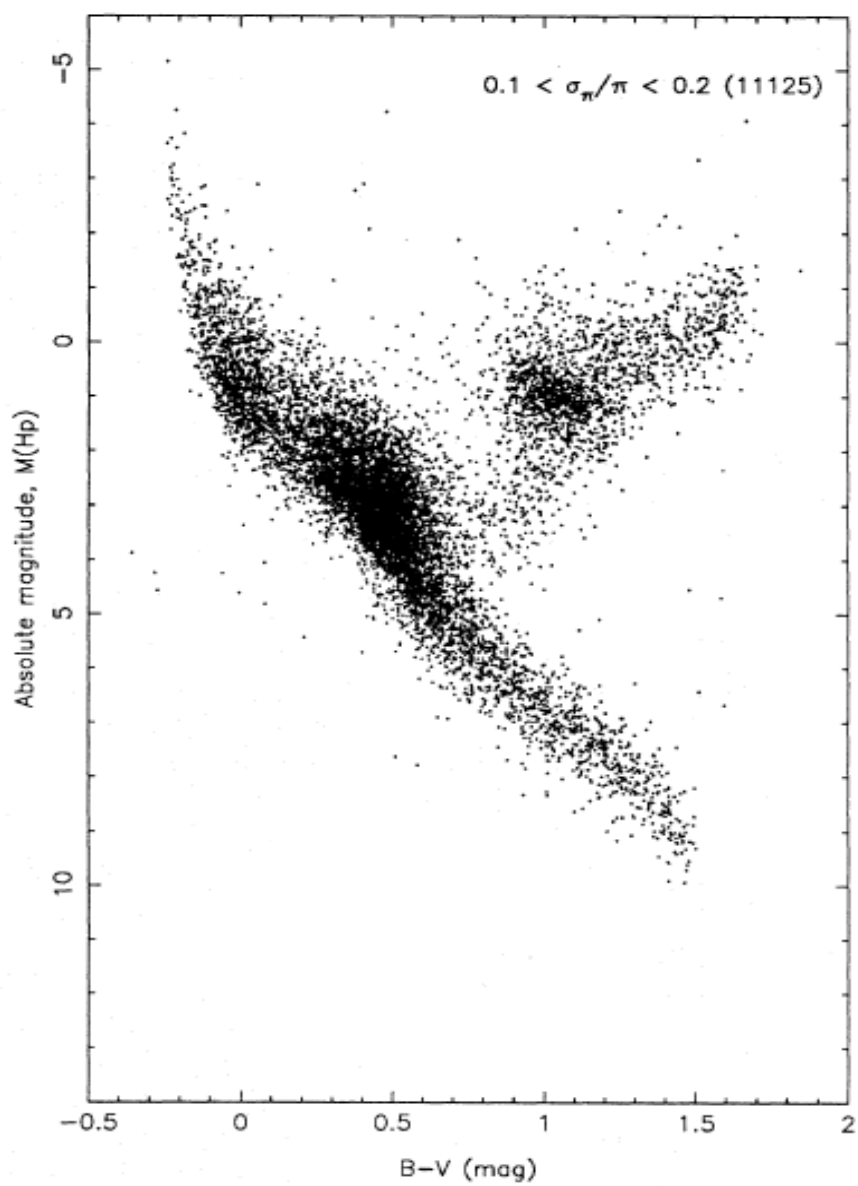
2.6. A Hertzsprung–Russell-diagram

H.N. Russell 1913-ban olyan grafikont készített, amelyen a vízszintes tengelyen a csillagok spektráltípusát, a függőleges tengelyen az abszolút fényességüket ábrázolta. Szembeötlő volt, hogy ezen az ábrán a csillagok ágakhoz hasonlatos rendben helyezkednek el. A Hertzsprung–Russell-diagram (röviden: HRD) szemléletes ábrázolás a csillagfejlődési állapot jelzésére. A spektráltípus helyett a vízszintes tengelyen ábrázolhatunk színindexet, vagy felszíni hőmérsékletet is, a függőleges tengelyen pedig abszolút fényesség helyett luminozitást.

A HRD legsűrűbben benépesített területe a nagy abszolút fényességű kék csillagoktól a halvány vörös csillagokig tartó ún. fősorozat (1. ábra), ahol a magbéli hidrogén-égető égitestek helyezkednek el. Huzamos időt töltenek ebben az állapotban, a csillag tömegétől függően néhány százezer évtől több milliárd évig terjedően.

A fősorozati csillag centrumában ezután a hidrogén koncentrációja annyira lecsökken, hogy az energiatermelés ott már nem képes végbemenni. Az ekkor kialakuló hidrogénégető héj látja el az energiaforrás szerepét. A HRD-n ilyenkor a csillag elhagyja a fősorozatot, a sugara a korábbi állapotához viszonyítva többszázszorosára nő, míg felszíni hőmérséklete lecsökken. Először a szubóriás-, majd később az óriáság tagja lesz. Ez az ág a HRD-n a fősorozattól jobbra fönt helyezkedik el.

A hidrogénégető héj idővel egyre távolabb helyezkedik el a csillag központi részétől. Eközben a mag zsugorodni kezd mindaddig, amíg el nem éri a héliumfúzióhoz



1. ábra. A Hipparcos parallaxismérései alapján készült Hertzsprung–Russell-diagram (Perryman et al., 1995).

szükséges hőmérsékletet. Ekkor a csillag egy második energiaforrásra is szert tesz, a héliumégető magra. Az ilyen energiatermelésű csillagokat horizontális óriásági csillagoknak hívjuk. Ezeknek a meglehetősen luminózus csillagoknak a sugaruk kisebb a vörös óriásokénál, felszíni hőmérsékletük pedig nagyobb.

A horizontális óriásági csillagok magjában egy idő után a hélium koncentrációja is lecsökken, és a héliumégető energiaforrás is egy gömbhéjba tevődik át. Ilyenkor a csillag sugara újra megnő és felszíni hőmérséklete lecsökken. Az olyan csillagokat, ahol az energiatermelés kettős héjégés útján történik, aszimptotikus óriásági csillagoknak nevezzük.

A kettős héjégető csillag magja ismét zsugorodni kezd, de a 8 naptömegnél kisebb csillagokban a hőmérséklet sosem éri el a szén fúzionálásához szükséges értéket. Az égitest centrumában az elektrongáz elfajulásával megáll az összehúzódás és egy fehér törpe alakul ki. Az egykori csillag külső rétegei planetáris ködöt hoznak létre. A HRD-n a fehér törpék a bal alsó sarokban helyezkednek el.

2.7. A fényidő-effektus

A fényidő-effektust 1676-ban Olaf Rømer használta fel először a fénysebesség megbecsüléséhez. A jelenség a fény véges terjedési sebességén alapul. Adott egy egyenletes, periodikus jelet kibocsátó rendszer, amelynek a Földtől való távolsága az időben periodikusan változik. Ha ismerjük a jelenség kezdeti időpontját, akkor a periódus ismeretében ki tudjuk számolni, hogy a jelenség mikor következik be újra. Mivel a távolság, amit a fénynek a detektorig be kell járnia, változik, az egyenletes periódusban fáziseltolódásokat észlelünk. Abban az esetben, amikor a távolság nagyobb, mint a kezdeti időpontkor, a fázis késni fog, míg ellenkező esetben sietni. Ezt a jelenséget használtam fel én is a munkám során.

2.8. ETV diagram

Egy fedési rendszerben bekövetkező minimumok periodicitásában történő eltérések kimutatására szolgál az ETV (eclipse timing variation) diagram¹. Esetünkben a Trinity Ba–Bb páros fedései között eltelt időben tapasztalunk időbeli eltolódásokat, amelyek a főkomponens körüli keringés következtében fellépő fényidő-effektussal magyarázhatóak. Először a periódus ismeretében meghatározzuk azokat az időpontokat, amikor a fedéseknek szabályos időközöket követve be kellene következniük. Másodszor a rendelkezésünkre álló adatokból megállapítjuk, hogy a csillagok mikor takarták el egymást valójában. Az utóbbiból kivonva a kiszámolt időpontokat és az eredményt diagramon ábrázolva megkapjuk a periodikus eseményben végbemenő időbeli torzulást az idő függvényében. Az ETV diagramból könnyedén megállapítható a Trinity fényidő-effektusa, pontosítható a vöröstörpe-pár keringési periódusa, illetve az esetleges változás a keringési periódusban is kimutathatóvá válik (Sterken, 2005).

2.9. Fémesség

A normális anyageloszlású csillagok összetétele csak kissé tér el a kozmikus elemgyakoriságtól. Mivel a kettőnél nagyobb protonszámú elemek darabszáma együttesen is elenyésző a hidrogénhez és a héliumhoz képest, ezért a csillagászati szóhasználatban ezeket az elemeket együttesen fémeknek nevezzük. Fémesség alatt a csillag héliumnál nehezebb elemekben való gazdagságát értjük. A csillagok kémiai összetételét többek között a következőképpen jellemezhetjük: jelölje X a hidrogén, Y a hélium és Z a fémek relatív arányát. A három szám összege értelemszerűen 1. A normális összetételen belül Z értéke $\sim 10^{-6}$ és $\sim 0,04$ között lehet, Y értéke $\sim 0,21$ és $\sim 0,35$ között (Cserepes & Petrovay, 2002). A Nap ezen paraméterei: $Z = 0,0198$ és $Y = 0,273$.

A csillagok fémessége másképp, az egyes izotópok gyakoriságával is megadható. Jelölje ϵ a 10^{12} db hidrogén atommagra jutó, adott típusú atommagok számát. A fémek relatív aránya jó közelítéssel azonosnak tekinthető, így a fémesség meghatározásához elég egyetlen elem gyakoriságát ismerni. A gyakran használt $[Fe/H]$ indexben a vasat használjuk a fémesség mennyiségi jellemzéséhez.

¹A klasszikus jelölés a legutóbbi időkgig az $O - C$ diagram volt, ezt azonban a kettőscsillagos szakmai közösség ma már kevésbé preferálja a fogalom többértelműsége miatt.

$$[Fe/H] := \log \left(\frac{\epsilon_{Fe}}{\epsilon_H} \right) - \log \left(\frac{\epsilon_{Fe}}{\epsilon_H} \right)_{\odot} \quad (7)$$

A fenti képlet alapján a Nap $[Fe/H]$ indexe értelemszerűen 0.

3. A vizsgált rendszer

A HD 181068 (KIC 5952403) jelű csillagrendszer jelenlegi ismereteink szerint három csillagból áll: egy vörös törpékből álló szoros pár kering egy távolabbi, nagyobb vörös óriás körül. A több tagból álló csillagrendszerek között az ilyen elrendezésűeket hierarchikus hármas rendszereknek nevezzük. Ráadásul a HD 181068 volt az elsőként felfedezett olyan hierarchikus hármas rendszer, melynek tagjai a Földről nézve, keringésük során mindannyian, kölcsönösen elfedik egymást (Derekas et al., 2011). Az ilyen rendszerek, a triplán fedő hármas csillagok (triple eclipsing triple system) a hierarchikus rendszerek ritka és új osztályát képviselik.

Az általam vizsgált égitest felfedezésével pontosan egy időben találtak egy másik triplán fedő hármas rendszert is, a KOI-126-ot (Carter et al., 2011). A KOI-126 esetében a szoros kettős keringési ideje $P_1 = 1,77$ nap, míg a főkomponens körüli keringési idő $P_2 = 33,92$ nap. Ez a két érték a Trinity esetében rendre $P_1 = 0,91$ nap, és $P_2 = 45,47$ nap. A két rendszer közül a HD 181068 a fényesebb (kb. öt magnitúdóval, aminek köszönhetően sokkal jobb minőségűek az adatok - még a pixelek telítésének nehézségei mellett is, l. később -, mint a KOI-126 fénygörbéje). Ezen kívül egy olyan hierarchikus hármas rendszert ismerünk még, melynek a külső periódusa rövidebb a Trinity-énél, a λ Tau-t, $P_2 = 33,03$ nap. Ott azonban nincsenek kölcsönös fedések (Borkovits et al., 2012).

A továbbiakban a rendszer főkomponensét jelöljük A -val és a két vörös törpéből álló szoros párt B -vel. A két vörös törpe közül a fényesebbet jelöljük Ba -val, a másikat Bb -vel. Ezeket alsó indexekként fogom használni a csillagok egyes fizikai paramétereit mellett. A keringések esetében, a Ba és Bb csillag egymás körül való keringését fogom $_1$ indexszel jelölni, míg a B csillagpárnak és az A csillagnak a rendszer tömegközéppontja körüli keringését $_2$ -vel.

A HD 181068-ról a különlegességének a felfedezése előtt az alábbi adatok álltak a rendelkezésünkre: a majdnem szabad szemmel is látható csillag látszó fényessége $V = 7,1$ magnitúdó, a rendszer távolsága pedig 250 pc (van Leeuwen, 2007).

A csillagrendszer különleges voltának felfedezése után Derekas Aliz és munkatársai a következő adatokat állapították meg: az abszolút fényesség $M_V = -0,^m 3$. A csil-

Tulajdonság	Érték
Látszó fényesség	$V = 7,1$
Luminozítás	$L = 93 \pm 19 L_{\odot}$
Sugár	$R = 12,4 \pm 1,3 R_{\odot}$
A komponens becsült tömege	$M_A \sim 3,0 \pm 0,4 M_{\odot}$
A komponens körsebessége	$37,20(2) \frac{\text{km}}{\text{s}}$
Effektív hőmérséklet	$T_{\text{eff}} = 5197\text{K}$
Fémesség	$[Fe/H] = -0,05$
Felszíni gravitációs gyorsulás	$\log g = 3,53$
Abszolút fényesség	$M_V = -0,^m 3$
Parallaxis	$\pi = 4 \pm 0,4 \text{mas}$

1. táblázat. A Trinity egyes fizikai jellemzői (Derekas et al., 2011)

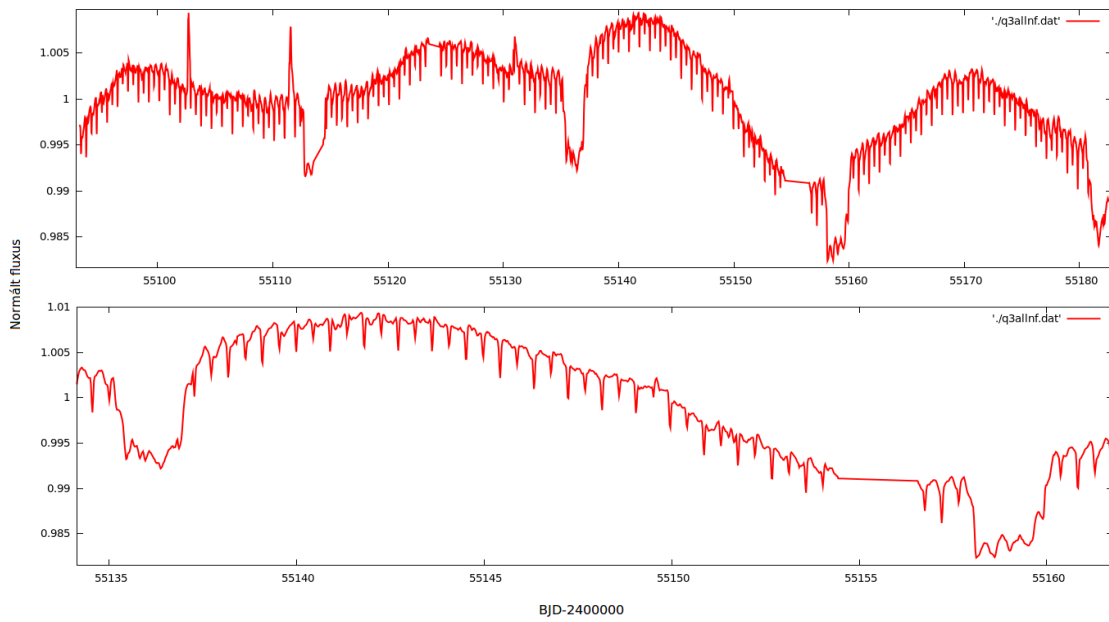
lag sugara $R = 12,4 \pm 1,3 R_{\odot}$, a luminozitása $L = 93 \pm 19 L_{\odot}$. Az effektív hőmérséklet $T_{\text{eff}} = 5197\text{K}$. Egy csillagevolúciós modell alapján megbecsült tömeg $M_A \sim 3,0 \pm 0,4 M_{\odot}$. A spektráltípusa G5, ami a Napnál kicsivel vörösebb csillagot jelent (Derekas et al., 2011). Az itt felsorolt adatokat az 1. táblázatban foglaltam össze.

Míg a Trinity-rendszer mindkét törpecsillaga fősorozati csillag, addig a főkomponens a csillagfejlődés szubóriás (SG) fázisában van.

3.1. A fénygörbe jellegzetességei

A kölcsönös fedéseknek köszönhetően a csillagrendszer fénygörbéje igen sajátos. A Trinity B csillagpár fedései $P_B = 0,90567$ nap periódusú, váltakozó mélységű, éles minimumokként jelennek meg. A fedések hossza $\sim 0,1$ nap.

Ezenkívül $\sim 22,7$ naponként találunk mélyebb, hosszabb ideig tartó és viszonylag lapos aljú minimumokat is a fénygörbében. Ezen minimumok alatt a Ba–Bb csillagpár fedései minden esetben eltűnnek. Valójában egy $P_1 = 45,2178(20)$ napos, gyakorlatilag kimutathatatlan excentricitású keringésről van szó. A vöröstörpe-pár fedései azért tűnnek el minden alkalommal, mert mindhárom csillag felületi fényessége igen hasonló,



2. ábra. Ezen az ábrán a HD 181068 két fénygörbéjét láthatjuk. Az x tengely baricentrikus Julián-dátumban, míg az y tengely normált fluxusban értendő. A felső ábrán jól megfigyelhetők a rendszer főkomponensének fényességváltozásai és a mélyebb, nagyobb periódusú minimumok. A hegyes, hirtelen felfényesedések flerek. Az alsó ábrán a szoros pár fedései is látszódnak, valamint hogy ezek eltűnnek a nagyobb minimumok folyamán. A hosszú, vízszintes szakasz műszaki okok miatt van, akkor éppen nem mért az űrtávcső.

s így nincsen egyértelműen érzékelhető kitakarás azokban az esetekben, amikor a B páros az A komponens előtt halad el. Nevezzük ezentúl a közel egy nap periódusú fedéseket „kis minimumoknak”, míg a ~ 45 nap periódusúakat „nagy minimumoknak” a könnyebb érthetőség és megfogalmazás kedvéért.

Még tovább növeli a csillagrendszer különlegességét, hogy azok a csillagok, amelyek a Trinity A-hoz hasonló helyen vannak a csillagfejlődésben, kivétel nélkül mutatják a szoláris oszcillációk jelenségét. Ez a jelenség a konvekciós zónával rendelkező csillagokban a konvekciós zóna keltette kis amplitúdójú, sztochasztikusan csillapított oszcilláció. Periódusa a pár percestől a napos skáláig változik, a Nap esetében körülbelül 5 perc. Az ilyen típusú rezgést az összes vörös óriás mutatja, ezért a Trinity A-ra is jellemzőnek kéne lennie. A csillagban azonban semmi nyoma ennek a jelenségnek, ellenben kimutathatóak árapály-súrlódás keltette fényességváltozások. A jelenlegi se-

jtések szerint az árapály-kölcsönhatás fojthatja el a szoláris oszcillációt (Fuller et al., 2013).

A 2. ábrán látható a Trinity fényességváltozásának legtöbb jellegzetessége, a kis, váltakozó mélységű minimumok, amelyek eltűnnek a nagy, mélyebb minimumok folyamán. Jól láthatóak a főkomponens fényességváltozásai is. Az amúgy is különleges fénygörbét még tovább gazdagítja néhány 6-8 órás lefutású fler is, melyekről kiderült, hogy az A komponenshez tartoznak (Borkovits et al., 2012).

4. Mérések és adatfeldolgozás

4.1. A Kepler-űrtávcső

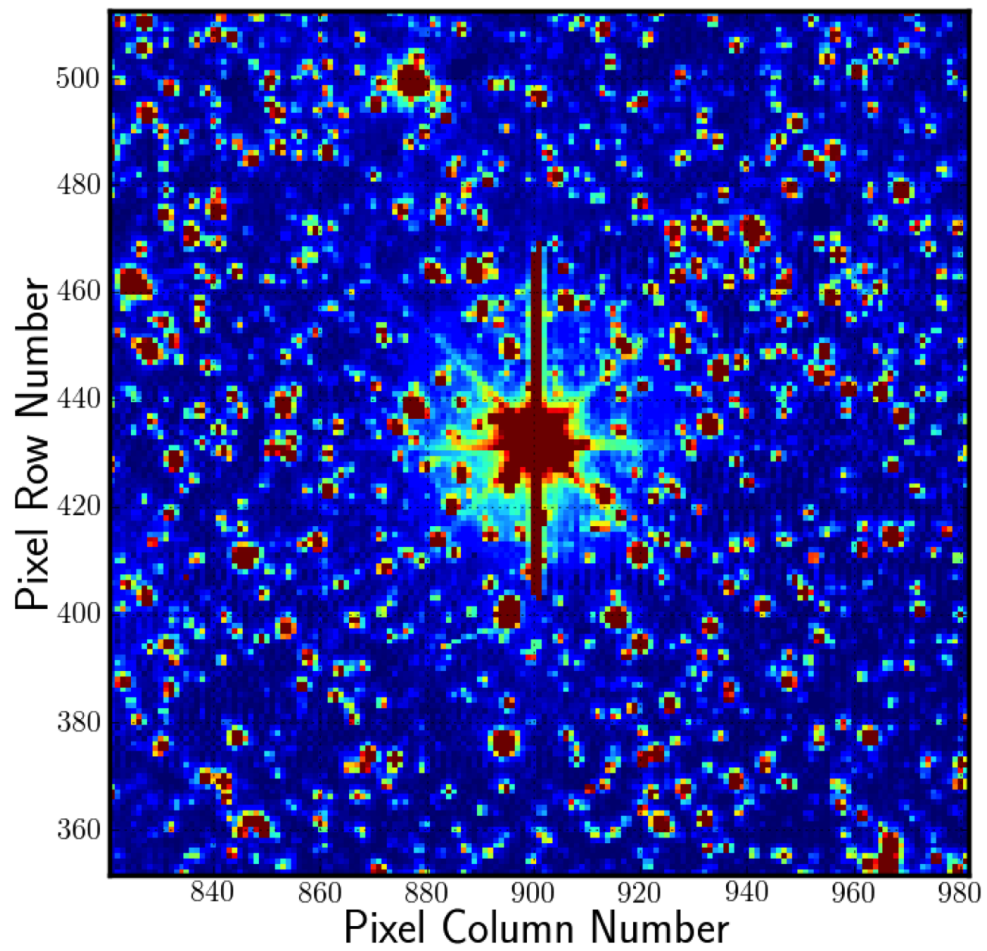
A Kepler-űrtávcsövet 2009 márciusában bocsátotta fel a NASA. Avégett készült, hogy fedési módszerrel Föld méretű exobolygókat találjon fősorozati csillagok körül, esetleg a lakható zónában. A program fő célja az, hogy megbecsülhetővé váljék, hogy a Tejútrendszerben milyen gyakoriak a lakható zónában keringő kőzetbolygók, hiszen ezek a legalkalmasabbak az élet kialakulása számára.

A Kepler-űrtávcső egy akár $\sim 10^{-5} - 10^{-6}$ relatív fényességmérési pontosságú fotometriai műszer, amely 2-3 nagyságrenddel pontosabb bármely földi fotometriai eszköznél. A Nap körül kering Föld-követő pályán, így az észlelést sem a napszakok változása, sem a földi időjárás, sem a Föld, vagy a Hold fénye nem befolyásolja. Az 1,4 méter tükrőátmérőjű Schmidt-teleszkóp fókuszában a 100 megapixeles CCD egy 105 négyzetfokos területet fed le. Az égbolt egy állandó, sok csillagot tartalmazó területén ~ 170000 fősorozati csillagot figyel meg folyamatosan (Koch et al., 2010).

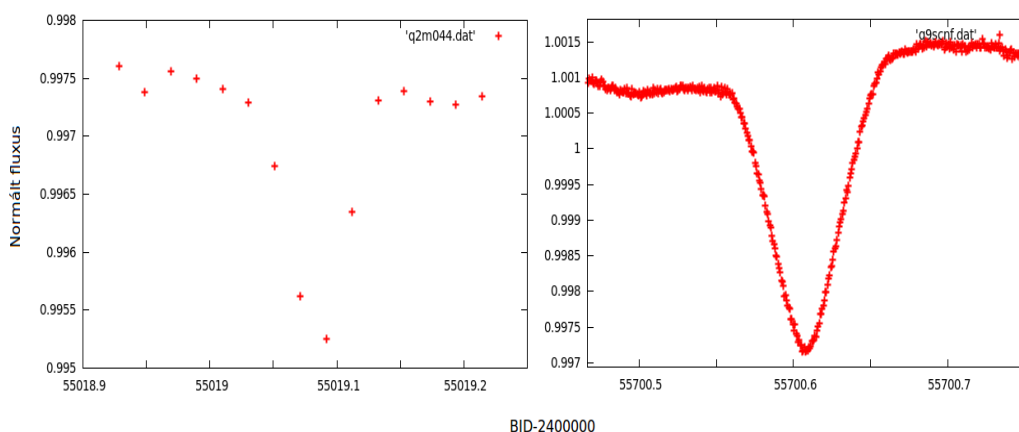
Az eszköz már most is sokat bizonyított az exobolygók felfedezése kapcsán (Latham et al., 2011), de nem csak erre, hanem minden olyan jelenség megfigyelésére kiválóan alkalmas, amelyek pontos fotometriai méréseket igényelnek. Ilyenek például az asztroszeizmológia, a Nap típusú oszcillációk, különböző változócsillagok vizsgálata (Chaplin et al., 2011; Bedding et al., 2010; Szabó et al., 2010).

A Kepler-űrtávcső Nap körüli keringése során évente négyszer 90° -kal elfordul, hogy a napelemtáblái a Nap irányába álljanak. A két elfordulás közötti negyed éves mérési periódust „quarter”-nek hívjuk, és Q-val és egy számmal jelöljük, ahol a szám megadja a mérési periódus sorszámát.

$V=7,1$ magnitúdós látszó fényességével a Trinity messze telíti a Kepler-űrtávcső detektorát, ahogy az a 3. ábrán is látható. Éppen ezért egy különleges mérési módszert alkalmaztak, amely során egy speciális pixelmaszk („Custom Made Aperture Mask”) területére eső összes képelem fényességét összeintegrálták. Így a telítésbe ment, valamint a „kifolyás” jelenségét mutató pixelek adatai sem vesztek el.



3. ábra. A Trinity a Kepler-űrtávcső felvételén. A csillag képén átmenő, nagy, vörös, függőleges csík amiatt alakult ki, hogy a csillag messze telítésbe viszi a detektor CCD pixeleit.



4. ábra. A bal oldali ábrán egy Long Cadence, míg a jobb oldalin egy Short Cadence módban készült Ba-Bb minimum látható.

Az űrtávcső kétféle mérési gyakorisággal képes mérni: a Long Cadence (a továbbiakban LC) mód 29,4 percenként egyszer mér, míg a Short Cadence (SC) mód 58,9 s-os mintavételezéssel mér. Ez utóbbi mérési gyakoriságot csak a jelentős csillagok mérésére használják. A két mérési mód közötti hatalmas különbség a 4. ábrán szembevetően látható.

4.2. Az adatok kiértékelése

A munkám során 9 mérési periódust dolgoztam fel, melyek közül a Q1 – Q6 mérési periódusok LC, míg a Q7 – Q9 mérési periódusok SC módban készültek. Az SC méréseket Derekas Aliz, Kiss László és munkatársaik pályázata alapján vette fel a Kepler az ún. vendégészlelői program („Guest Observers Program”) keretében. Munkám megkezdésekor ezek az adatok a magyar kutatócsoport kizárólagos felhasználása alá tartoztak. Az összesített fénygörbe 775 nap hosszú időintervallumot fed le, melynek során az A – B alrendszer ~ 17 periódust futott be, míg a Ba-Bb csillagpár ~ 885 -öt. Ez összesen 1770 kis minimumot jelent, de nem állt módomban mindet feldolgozni. Mivel a nagy fedések ideje alatt a kis minimumok eltűnnek, ezért az akkor bekövetkezett kis minimumokból nem származott értékelhető információ. Továbbá a negyedek között, amikor az űrtávcső elfordítja napelemtábláit, illetve amikor biztonsági állapotba kapcsol, a mérés szünetel, további adatok vesztek el. Így összességében 1177 minimum idejét sikerült kiménnem.

A fénygörbék feldolgozásához Awk programozási nyelven írtam meg a szükséges szkripteket, míg a függvényillesztésekhez a Gnuplot nevű programot használtam.

4.2.1. A normálás

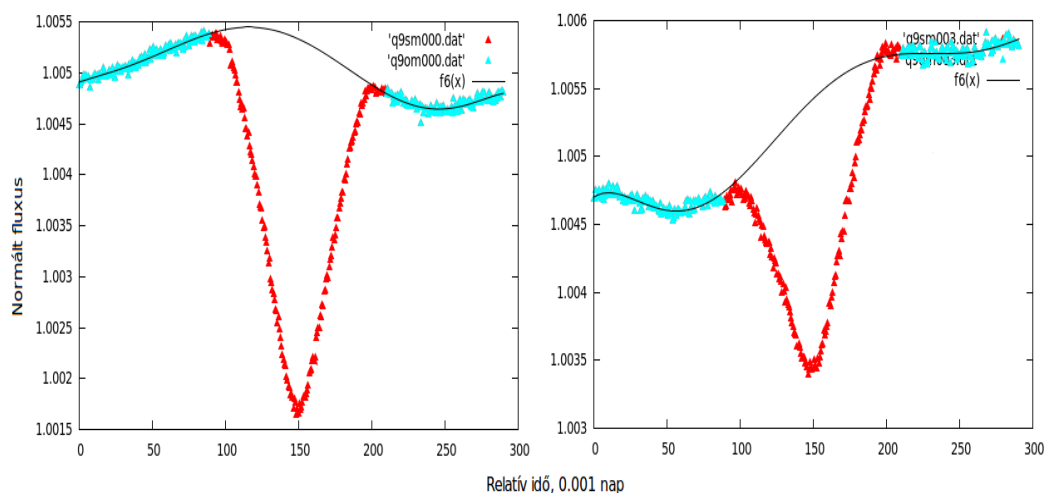
A Trinity-rendszer és a látszó fényességét befolyásoló jelenségek a fénygörbén egymás szuperpozíciójaként jelennek meg. Így a Trinity A fényességváltozásai hozzáadódnak a törpecsillagok fedéseihez is, és a minimumidőpontok meghatározásakor ki kellett küszöbölnünk az ebből adódó random és szisztematikus hibafaktort. A korrekció szükségességét részletes tesztekkel vizsgáltam előtte: egyik SC negyed adatait kimértem az alábbiakban ismertetett korrekcióval és a korrekció nélkül is. Noha mindkét mérés eredményeként kirajzolódott a B pár fényidő-effektusának gyakorlatilag tökéletesen szinuszos lefutása, a vörös óriás fényváltozási hatásait eltávolító korrekció eredménye sokkal simább, kb. 40%-kal kisebb rms szórású szinuszgörbével volt illeszthető.

A témavezetőmtől kapott fénygörbét körülbelül $\sim 0,3$ nap hosszúságú szakaszokra osztottam fel úgy, hogy minden szakasz közepén egy kis minimum helyezkedik el. Így mérési periódusonként közel 200 rövidebb fénygörbét kaptam, melyek a vöröstörpe pár egy fedését, illetve annak az időbeli környezetét tartalmazzák. A 4., 5. és 6. ábrán is egy-egy ilyen szakasz látható.

Ezután minden egyes fénygörbeszakaszból eltávolítottam azokat a mérési adatokat, amelyek a fedéshez tartoztak. Megtartottam azonban az esemény előtt és után felvett adatokat, melyekből csak a főkomponens fényességváltozása volt megállapítható. A 5. ábrán világoskékkel jelöltem azokat a pontokat, amelyeket meghagytam és pirossal azokat, amelyeket eltávolítottam.

A meghagyott adatokra egy alacsony rendű görbét illesztettem, a legtöbb esetben hatodrendűt, de előfordultak ötöd-, és negyedrendűek is. Egy fénygörbére több különböző függvényt is illesztettem, és a személyes belátásom alapján döntöttem el, melyik illeszkedik a célnak a legmegfelelőbb módon. A képfelismerésre ugyanis még mindig az emberi elme a legalkalmasabb eszköz, sokkal hatékonyabb a számítógépeknél.

A legtöbb minimumkörnyezetre illesztett hatodrendű függvény alakja a következő volt:



5. ábra. A minimum mérési pontjait háromszögek jelzik. Az illesztés során a világoskékkel jelölteket vettem figyelembe, míg a vöröseteket nem. Az illesztett függvényt, fekete, folytonos vonallal ábrázoltam.

$$f_6(x) = \sum_{i=0}^6 a_i \cdot x^i \quad (8)$$

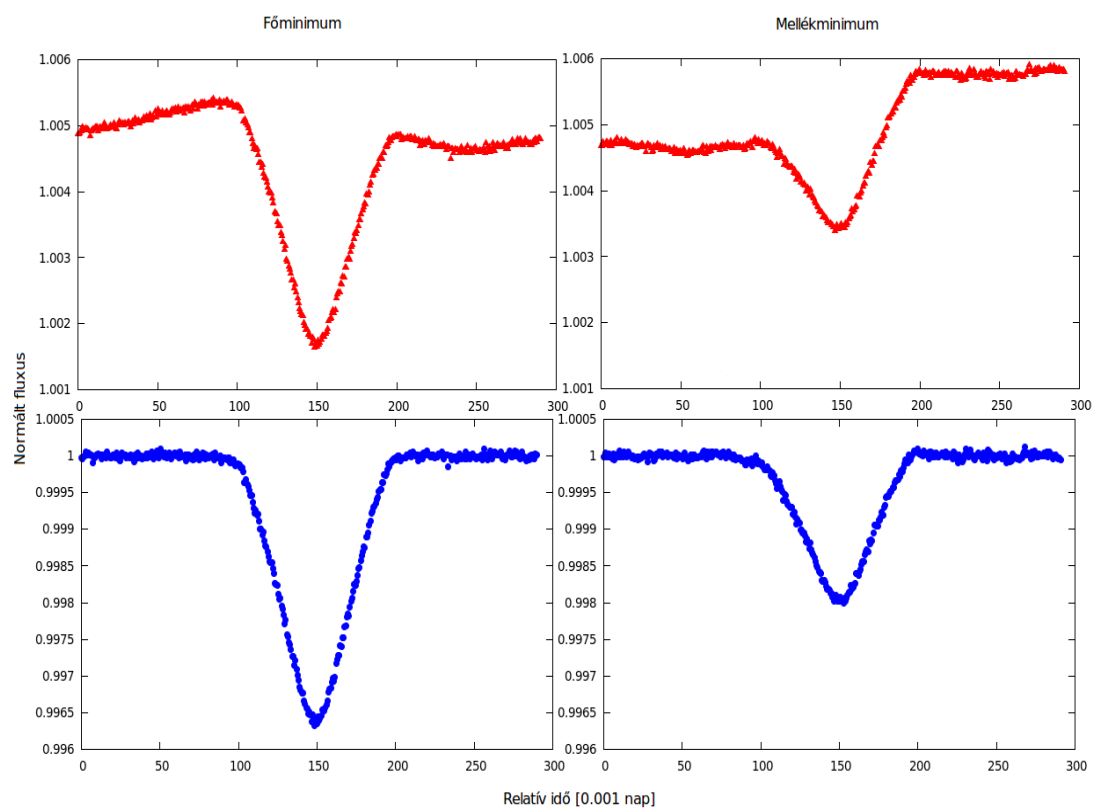
Az 5. ábrán az illesztett függvény fekete, folytonos vonallal látható.

Ezután az illesztett függvénnyel leosztottam azokat a fénygörbéket, amelyek a fedésekkor mért adatokat is tartalmazzák. Ezzel a művelettel olyan fénygörbéket kaptam, amelyeket nem torzít el a vörös óriás fényességváltozása. A 6. ábrán pirossal az eredeti fénygörbeszakaszt jelöltem, míg késsel ugyanazt, miután leosztottam a minimumkörnyezetre illesztett függvénnyel.

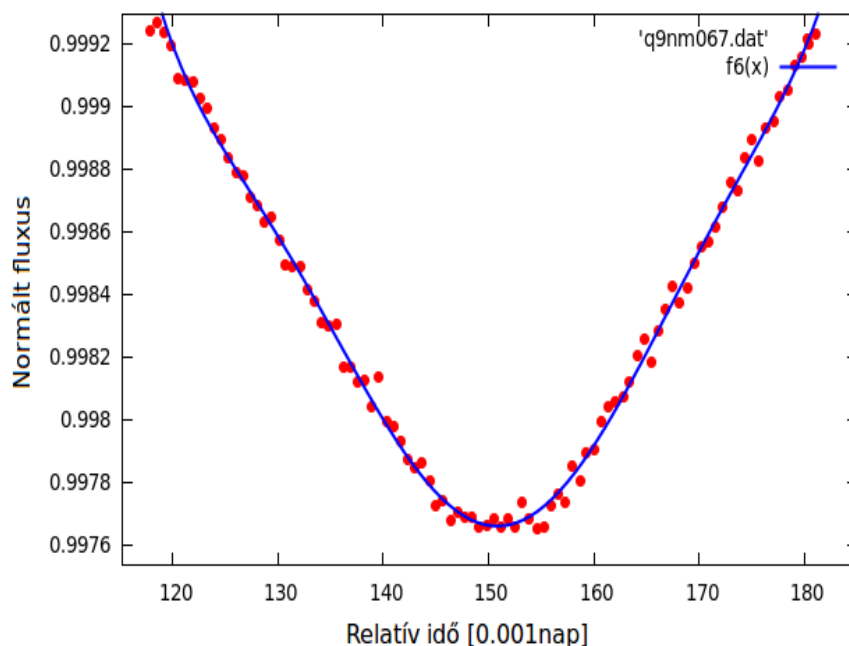
4.2.2. Az SC adatok feldolgozása

Az SC adatoknál a normálás után egy újabb hatodrendű görbét illesztettem, ezúttal a minimum alsó részére. Ennek meghatároztam a számunkra fontos lokális minimumának pontos időpontját.

A korábbi észleléseken alapuló periódus ismeretében kiszámoltam a fedések várható értékeit, amiket kivontam a kiértékelt fénygörbékből származó adatokból. A különbséget az idő függvényében ábrázolva lett meg az ETV diagram.



6. ábra. Ugyanazoknak a Ba-Bb minimumoknak a normálás előtti (piros háromszög) és normálás utáni (kék kör) állapota.



7. ábra. Egy normált SC minimum pontjait ábrázoltam piros körökkel. A rájuk illesztett hatodrendű függvényt folytonos kék vonal jelöli.

A 10. ábrán szereplő ETV diagramon az LC adatokat (Q1-Q6) zöld színnel jelöltem, míg a SC adatokat kék színnel. A diagram szinusz jellege kiválóan mutatja a rendszer fényidő-effektusát.

4.2.3. Az LC adatok feldolgozása

Az LC adatok esetében nem lett volna célravezető a normálás után egy hatodrendű görbét illeszteni a minimum aljára. A fél órás mintavételezésű minimumok az esetek túlnyomó többségében nem is tartalmaznak többet 4-5 pontnál, és ezekre végtelen mennyiségű hatodrendű polinomot lehet illeszteni. Alacsonyabb rendű függvény használata esetén pedig annak pontatlansága miatt nem kaptunk volna értékelhető eredményt. A Long Cadence módban készült fénygörbék minimumidejét más módszerrel mértem ki.

Az LC adatokat később dolgoztam fel a perces mintavételezésűeknél, így a Q7 normált fénygörbéi ekkor már a rendelkezésemre álltak. Ezeket és a Q1–Q6 minimu-

mait tartalmazó fájlokat szétválogattam aszerint, hogy fő- vagy mellékminimumot tartalmaznak-e. Ezután a mérés idejére vonatkozó adatokat baricentrikus Julián-dátumból a két törpecsillag egymás körüli keringési fázisába váltottam át. A Q7 összes normált főminimumát és mellékminimumát egy-egy közös fájlba másoltam be. Ezzel a művelettel minden azonos fázisú Q7 minimum ugyanazon időintervallumon belülre, egymással fedésbe került. Ezek a fájlok azonban túl nagy méretűek voltak ahhoz, hogy az illesztésekhez használt gnuplot nevű program kezelni tudja, így három pontonként kiátlagoltam az adatokat. Ezután mind a mellék-, mind a főminimumokat tartalmazó fájlra illesztettem az alábbi nyolcadrendű Fourier-polinomot.

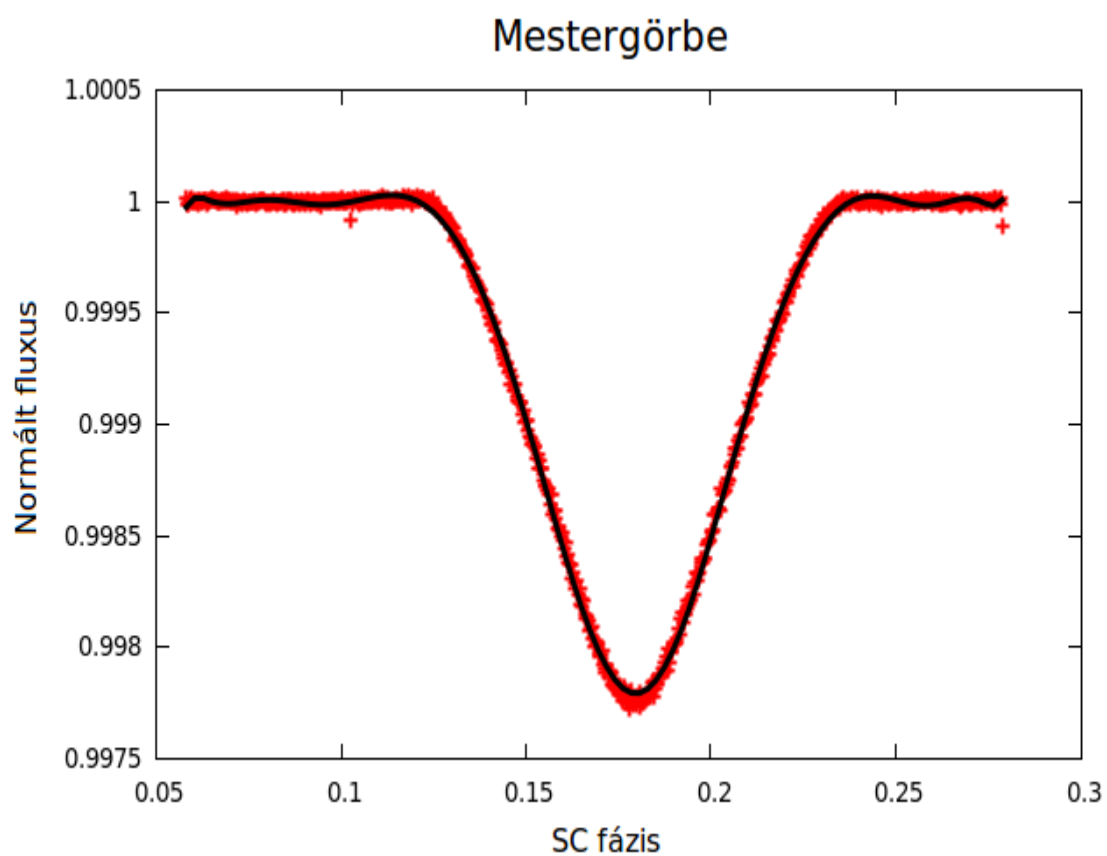
$$f(x) = a_0 + \sum_{k=1}^8 (a_k \cdot \cos(2k\pi x) + b_k \cdot \sin(2k\pi x)) \quad (9)$$

A 8. ábrán feketével látható, miként nézett ki a mellékminimumokra illesztett nyolcadrendű Fourier-polinom.

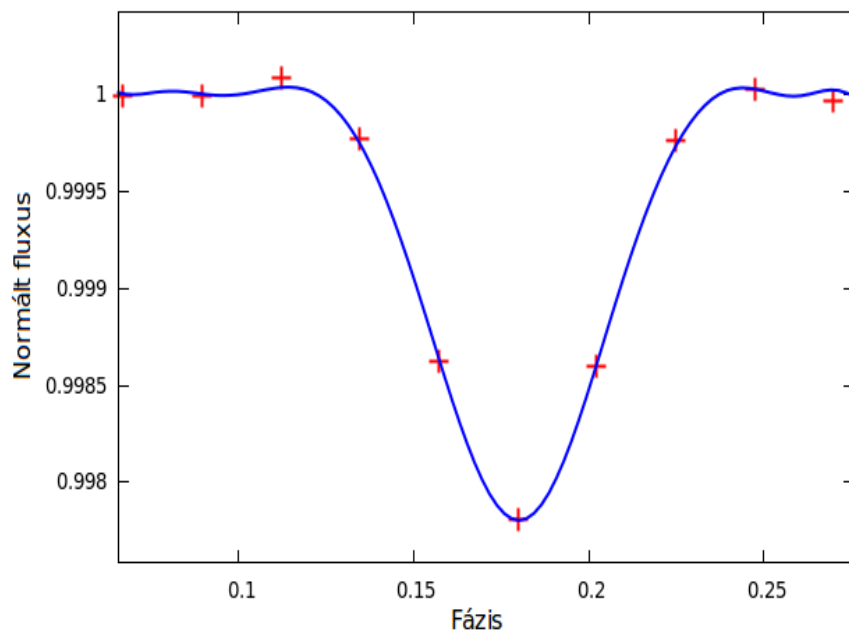
Az LC adatok minimumaira ezután egy másik, hasonló függvényt illesztettem ($g(x)$). Az a_k és b_k , $k = 1 \rightarrow 8$ együtthatók értékei megegyeztek az $f(x)$ Fourier-polinom ugyanezen adataival. Az LC minimumokra csak az a_0 és az újonnan bevezetett d_x változó szerint illesztettem. A $g(x)$ függvényben a zárójelekben szereplő d_x paraméter bevezetésével a függvény x tengely menti eltolását tesszük lehetővé. A d_x értéke pont a minimumidőpont időbeli elcsúszását adja meg fázisban kifejezve.

$$g(x) = a_0 + \sum_{k=1}^8 (a_k \cdot \cos(2k\pi(x - d_x)) + b_k \cdot \sin(2k\pi(x - d_x))) \quad (10)$$

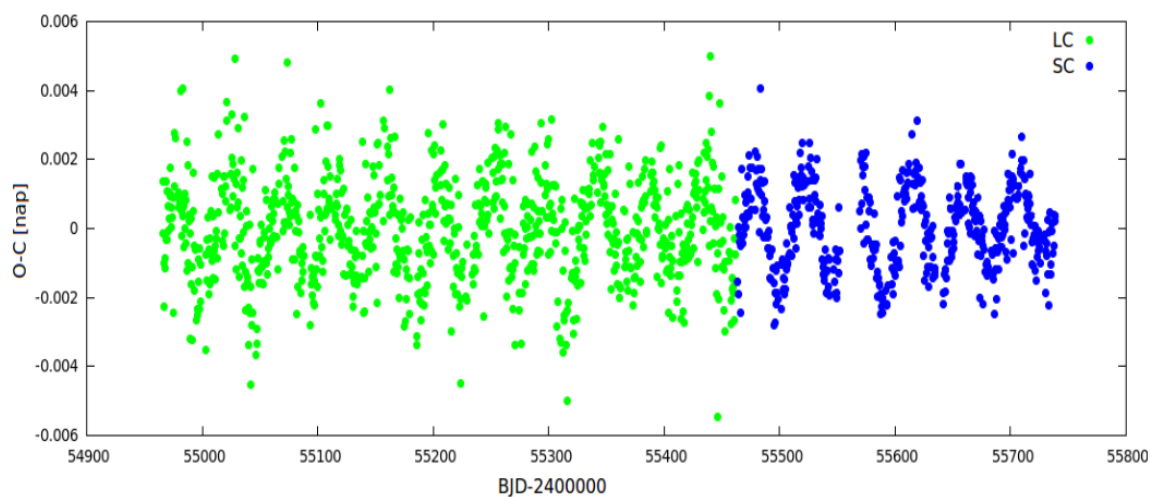
Az ETV diagram alapján a Trinity-rendszer törpecsillagainak keringési idejét 0,90567(2) napról 0,9056762 napra pontosítottam. A fényidő-effektus amplitúdója 150 ± 3 s, tehát az a távolság, amit a fény ennyi idő alatt megtesz, az a Ba-Bb páros közös tömegközéppontjának a Trinity tömegközéppontjától számított távolsága. A következőkben bemutatott egyszerűsített ETV vizsgálat, valamint a Borkovits et al. (2012) által publikált komplex analízis egyaránt az általam kimért minimumidőpontokon alapult. Ezen TDK dolgozat óhatatlanul egyszerűbb, mint a publikált tanulmány, hiszen az utóbbiban alkalmazott égimechanikai apparátus és formalizmus túlmutat jelenlegi ismereteimen.



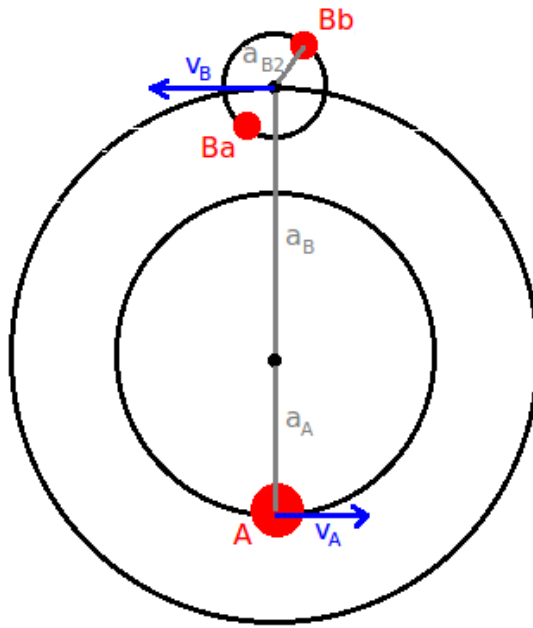
8. ábra. A piros pontok az összes Q7 mellékminimumnak a három pontonként kiátlagolt értékeit ábrázolják. A fekete vonal az a nyolcadrendű Fourier-polinom, amelyet később a mellékminimumok időpontjainak kimérésére használtam.



9. ábra. Egy LC módban készült minimum idejének kimérése. A piros keresztek jelölik a normált fénygörbe pontjait, a kék vonal pedig azt a nyolcadrendű Fourier-polinomot, amelyet a minimumidőpontok kiméréséhez használtam.



10. ábra. A Q1-Q9 adatsorok ETV diagramja. A zöld pontok az LC, míg a kékek az SC adatokat jelölik.



11. ábra. A Trinity sematikus ábrája. A piros körök jelzik a csillagokat, melyeket az egyértelműbb azonosítás miatt betűvel láttam el. A fekete körök az egyes keringési pályákat mutatják a rendszerben. Szürke vonalakkal az egyes félnagy tengelyeket jelöltem, míg kék nyilakkal az egyes körsebességeknek megfelelő vektorokat.

5. A csillagtömegek, a félnagy tengelyek és a körsebesség meghatározása

Meg tudtam határozni a Trinity teljes tömegét, külön a főkomponens, valamint a B csillagpár együttes tömegét, illetve a rendszer tagjainak az egymástól, és a rendszer tömegközéppontjától való távolságait.

$$A_1 = \frac{a_B}{c} = 150,336s \quad (11)$$

ahol A_1 a fényidő-effektus amplitúdója, a_B a Trinity B távolsága a rendszer tömegközéppontjától, és $c = 300000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$, a fénysebesség.

$$a_B = A_1 \cdot c = 45100800\text{km} = 0,30147(5)\text{AU} \quad (12)$$

$$v_B = \frac{2a_B\pi}{P_1} = 72,0558(2) \frac{\text{km}}{\text{s}}, \quad (13)$$

v_B a vörös törpék tömegközéppontjának a körsebessége az egész Trinity-rendszer tömegközéppontja körül, és $P_1 = 45, 5178$ nap, a B csillagpárnak a főkomponens körüli keringési ideje. A másik fontos adat:

$$v_A = 37, 20(5) \frac{\text{km}}{\text{s}} \quad (14)$$

ahol v_A a Trinity A körsebessége. Ez az érték korábbi radiálissebesség-mérési adatokból származik (Derekas et al., 2011).

$$a_A = \frac{v_A P_1}{2\pi} = 0, 1556(6) \text{AU}, \quad (15)$$

a_A a főkomponens félnagytengelye.

$$a = a_A + a_B = 0, 45713 \text{AU} \quad (16)$$

A félnagytengelyek összeadásával megtudjuk a Trinity A és a vörös törpék egymástól való távolságát.

$$M = M_A + M_B \rightarrow \frac{a^3[\text{AU}]}{P_1^2[\text{ev}]} = 6, 15 M_\odot \quad (17)$$

M a Trinity-rendszer, M_A a vörös óriás, az M_B pedig a B csillagpár tömege.

$$M_A = \frac{\frac{a_B}{a_A} \cdot M}{1 + \frac{a_B}{a_A}} = 4, 055(8) M_\odot \quad (18)$$

$$M_B = \frac{\frac{a_A}{a_B} \cdot M}{1 + \frac{a_A}{a_B}} = 2, 094 M_\odot \quad (19)$$

$$a_{B2} = \sqrt[3]{P_B \frac{G \cdot M_B}{4\pi^2}} = 5, 477 \cdot 10^{-4} \text{AU}, \quad (20)$$

ahol a_{B2} az a Ba és a Bb csillag közötti távolság, a $P_B = 0, 90567$ a B kettős egymás körüli keringési ideje, és a $G = 6, 6742 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}$ a gravitációs állandó.

Az eredményeket a 2. táblázatban foglaltam össze. Számításaim során valamivel nagyobb értékeket kaptam, mint az Borkovits Tamás és munkatársai (Borkovits et al., 2012) cikkében megjelent. Ennek az az oka, hogy a fentiekben pontszerűnek tekintettem a csillagokat, a felhasznált képletek egyszerűek voltak, elhanyagoltam számos

Elem	Saját eredményeim	Cikkben megjelent érték
a_A	0,15(5) AU	0,4202 AU
a_B	0,30(1) AU	
a	0,45(7) AU	
v_B	$72,05(5) \frac{\text{km}}{\text{s}}$	
M	$6,15 M_\odot$	$4,795 M_\odot$
M_A	$4,05 M_\odot$	$3,0(1) M_\odot$
M_B	$2,09 M_\odot$	$1,785 M_\odot$
a_{B2}	$5,47 \cdot 10^{-4} \text{AU}$	

2. táblázat. A Trinity általam kiszámolt értékeinek a táblázata, összehasonlítva Borkovits Tamás és munkatársai (2012) eredményével.

olyan korrekciót, melyet a részletesebb vizsgálat során figyelembe vettek. Mindazonáltal a rendszerről kapott kép meglepően közel áll a minden effektusokat figyelembe vevő bonyolultabb modell által kirajzolthoz, aminek az lehet az oka, hogy a rendszer szinte tökéletesen koplanáris, azaz a három csillag egy síkban kering, pályájuk pedig kimutathatatlan mértékben elliptikus, azaz az egyszerűsítő feltevéseim nem voltak teljesen alaptalanok.

	Ba	Bb	A
$m[M_{\odot}]$	0,915(34)	0,870(43)	3,0(1)
$R[R_{\odot}]$	0,865(10)	0,800(20)	12,46(15)
$T_{\text{eff}}[\text{K}]$	5100(100)	4675(100)	5100(100)
$L_{\text{bol}}[L_{\odot}]$	0,447(37)	0,270(27)	92.812(7615)

3. táblázat. A Trinity-csillagok izokrón-illesztésekhez használt adatai.

6. A rendszer korának meghatározása

A Trinity fémessége $[Fe/H] = -0,05$, ami gyakorlatilag szoláris összetételt jelent (Guillout et al., 2009).

A csillagok fémessége befolyásolja a csillagfejlődés során a HRD-n bejárt útjukat, így egy rendszer korának meghatározásánál elengedhetetlen ennek ismerete.

Az izokrón az azonos korú csillagok helyét ábrázoló görbe két állapothatározó függvényében. Ábrázolásuknál számos különböző paramétert figyelembe vehetünk, és így több módon is lehetőség nyílik az izokrón-illesztésre. Egy izokrónt meghatározott fémességérték mellett ábrázolnak. Izokrón-illesztéssel meghatározható egy csillag, vagy egy csillaghalmaz kora.

A kormeghatározáshoz felhasznált adatokat a 3. táblázatban foglaltam össze. Forrásuk Borkovits et al., (2012) volt. A saját eredményeim jóval pontatlanabbak az egyszerű számítások miatt, ezért láttam jónak a cikkben megjelent értékeket használni.

Az izokrónokat a BaSTI adatbázisból töltöttem le (Pietrinferni et al., 2009). A hozzá kapcsolódó honlapon (<http://193.204.1.62/>) lehetőség van számos csillagevolúciós model gyors és egyszerű letöltésére. Több különböző fémességre és tetszőleges korra elérhetők interpretált izokrónok. A BaSTI-ról származó izokrónok tartalmazzák a csillag kezdeti és aktuális tömegét (ugyanis figyelembe veszi a tömegvesztést), az effektív hőmérsékletet, az abszolút fényességet, a luminozitást és a különböző színindexeket is. Így az izokrón-illesztések során lehetőségem nyílt az állapothatározók több különböző kombinációját figyelembe vennem.

A letöltött izokrónok adatai a csillag sugarát nem tartalmazták. Ugyanakkor a fedési rendszerek esetében a sugár a legpontosabban meghatározható tulajdonság. A rendelkezésemre álló effektív hőmérséklet és luminozítás értékek alapján azonban kiszámítottam a sugarat, az alábbi formulák segítségével:

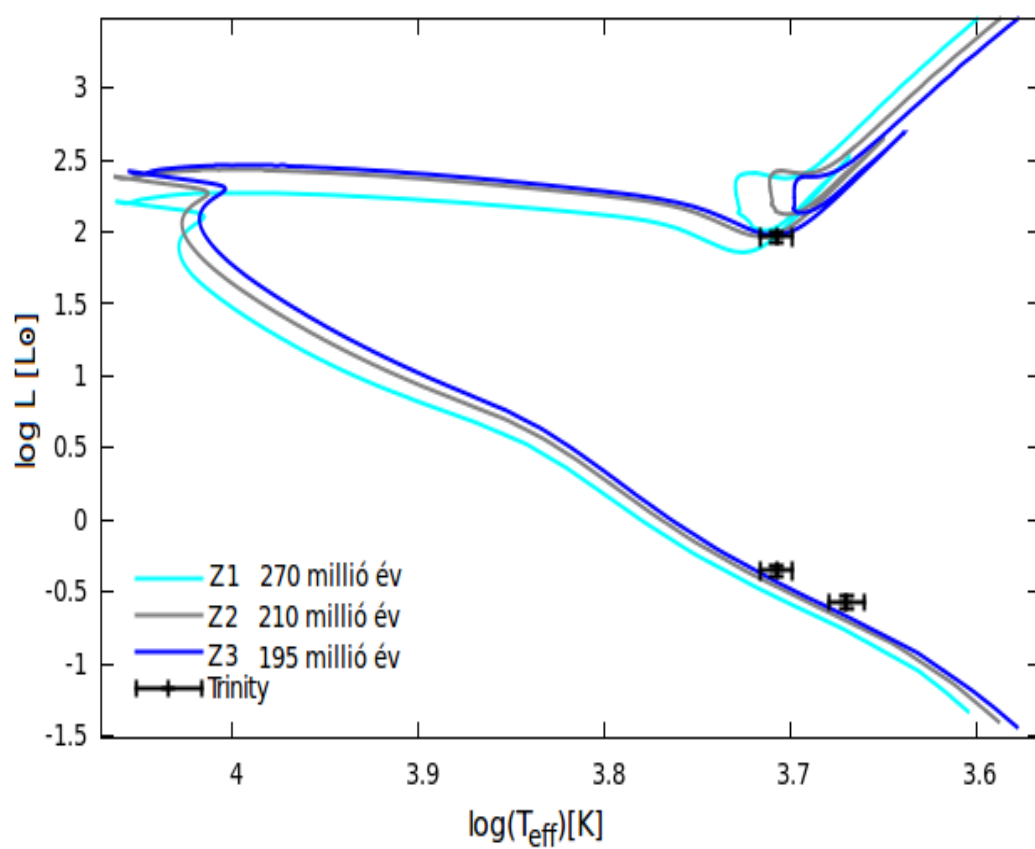
$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{R}{R_{\odot}} \right)^2 \cdot \left(\frac{T}{T_{\odot}} \right)^4, \quad (21)$$

ahol T az effektív hőmérséklet, R a csillag sugara, L a luminozitása. Az $\odot$ indexszel ellátott értékek a Napra vonatkozó adatok, melyeket a hőmérséklet kivételével egységyenként véve el is hagyhatunk. A hőmérséklet a Stefan-Boltzmann törvény (3. képlet) alapján van a negyedik hatványon.

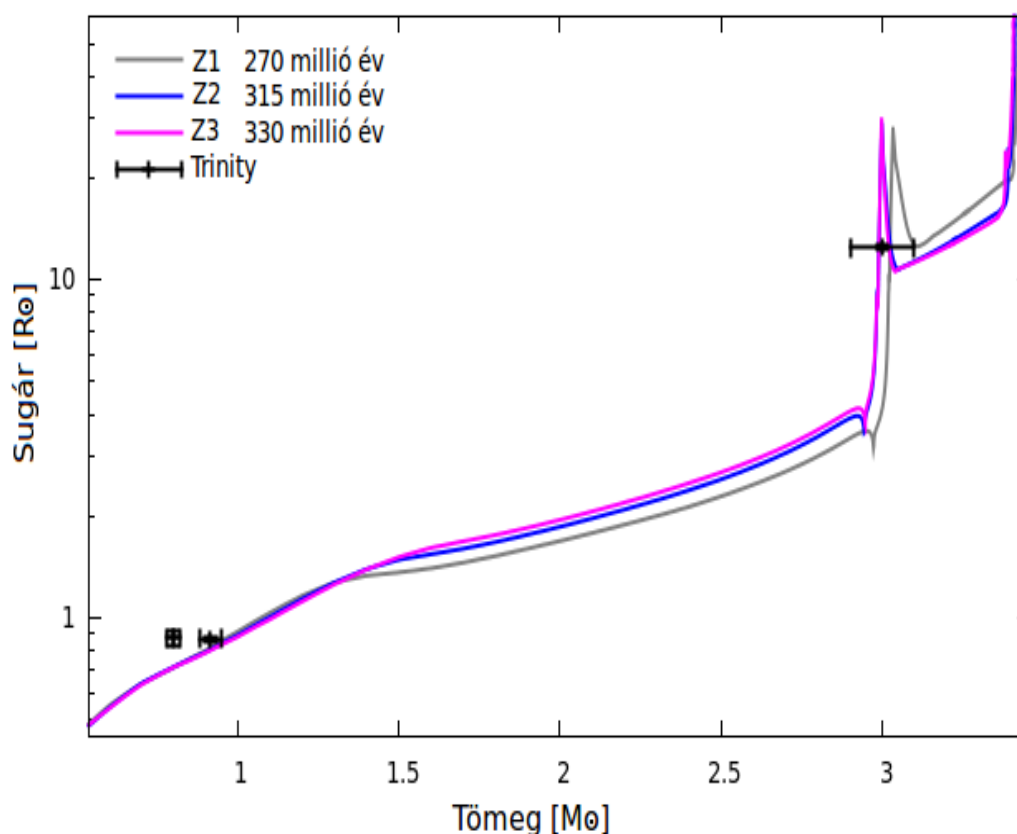
Az izokrón-illesztések során háromféle fémességértéket használtam. Nevezzük Z_1 -gyel a $Z = 0,01$; $Y = 0,259$ értékeket, a szoláris $Z = 0,0198$; $Y = 0,273$ -t Z_2 -vel, és a $Z = 0,03$; $Y = 0,288$ -t Z_3 -mal. Ezekre a fémtartalmakra 30 millió éves lépésközzel töltöttem le izokrónokat, hogy ezek segítségével becsüljem meg a rendszer korát. Több esetben azonban ezek egyike sem illeszkedett kellőképpen, így néhány további, köztes korú izokrónt is letöltöttem. 30 millió év egy nem kiugróan nagy tömegű csillag fejlődését tekintve rövid időtartam, ezért ennél pontosabb becslésre nem volt szükség.

A BaSTI-ról letöltött izokrónok és a Trinity rendelkezésemre álló adatai alapján tehát a következő paramétereket tudtam felhasználni az izokrón-illesztésekhez: tömeg, luminozítás, effektív hőmérséklet és sugár.

A 12. ábrán az effektív hőmérséklet logaritmusát ábrázoltam a luminozítás logaritmusának függvényében. Ez a diagram topológiailag megegyezik a HRD-vel. A színes vonalak jelzik az egyes fémességértékekhez tartozó izokrónokat, míg a Trinity csillagait feketével jelöltem, hibahatárokkal együtt. Z_1 -es fémesség értékre a 270 millió, a szolárisra a 210 millió, míg a legnagyobb fémességre a 195 millió éves izokrón illeszkedett a legjobban. Tehát a fémtartalom növelésével a rendszer becsült kora csökkent. Míg a főkomponens jól illeszkedik, addig a két törpecsillag az izokrónok által kirajzolt fősorozat fölött helyezkedik el. A szoros kettőscsillagoknál gyakori, hogy a sugaruk nagyobb, mint amekkorának a tömegük alapján lenni kellene. Ezt a jelenséget sugártöbbletnek nevezzük, oka jelenleg vitatott.



12. ábra. A színes vonalak a három különböző fémességértékre vonatkozó, legjobban illeszkedő izokrónok. A fekete hibahatáros keresztek a Trinity-csillagokat jelölik.



13. ábra. Izokrónok a sugár és a tömeg függvényében, a három fémességértékre vonatkozóan. A vizsgált égitesteket hibahatárokkal ellátott fekete keresztek jelzik.

A következő izokrón-illesztés esetén a sugarat ábrázoltam a tömeg függvényében (lásd: 13. ábra). Ebben az esetben a $Z_1 = 270$, $Z_2 = 315$ és $Z_3 = 330$ millió éves izokrónok illeszkedtek a legjobban, vagyis egyre nagyobb korokat jeleztek az izokrónok a fémesség növelésével.

A 4. táblázatban összefoglalom az izokrón-illesztés eredményeit. Az oszlopokban a három különböző fémességi adatot tüntettem fel, míg a sorokban azt a két-két paramétert, amelyekre az adott illesztést végeztem. A kapott eredmények alapján tehát a Trinity-rendszer kora 195 millió, illetve 330 millió év között van.

	Z=0,01 Y=0,259	Z=0,0198 Y=0,273	Z=0,03 Y=0,288
$x = T_{\text{eff}}; y = L$	270	210	195
$x = M; y = R$	270	315	330

4. táblázat. A Trinity rendszer kora, millió évben kifejezve. Az oszlopokban a különböző fémességértékekhez tartozó korokat tüntettem fel, míg a sorokban a különböző állapothatázorók szerinti izokrón-illesztéseket.

7. Összefoglalás

A HD 181068 jelű, triplán fedő hármas rendszer fényidő-effektusát mértem ki, és ezt ETV diagramon ábrázoltam. Ehhez a Kepler-űrtávcső méréseit használtam fel, melyek több mint két évnyi időtartamot ölelnek át. Egyaránt felhasználtam Long Cadence és Short Cadence adatokat is.

A fényidő-effektus kiméréséből származó eredményeim alapján pontosítani tudtam a rendszer tagjainak ismert tömegét és egymástól való keringési távolságukat is. Az eredményeimet összehasonlítottam a Borkovits Tamás és munkatársai (2012) által meghatározott értékekkel. Ezután izokrón-illesztésekkel megbecsültem a rendszer korát. Utóbbi eredmény önálló vizsgálat, és ilyen részletességgel az első a szakirodalomban.

A Trinity-rendszerrel azóta készült még két negyed (Q10, Q11) SC fénygörbe. A rendszer jelentősége miatt fontos, hogy ezekről és az ezután elkészülő fénygörbékről is készüljön ETV diagram. Az ETV diagramok alapján kimutathatóvá válnának a rendszer csillagainak esetleges pályaváltozásai is, amely a közeli keringés miatt emberi léptékű időskálán is történhet.

8. Köszönetnyilvánítás

Mindenekelőtt szeretném megköszönni dr. Kiss L. Lászlónak, a témavezetőmnek, hogy bekapcsolódhattam a tudományos munkába, és hogy az egész munkám során önzetlenül mellettem állt. Lehetőséget adott arra, hogy az MTA CSFK CSI könyvtárában dolgozhassam, és ezzel nagyban megkönnyítve az életem, a dolgozat elkészültéhez ezúton is hozzájárult.

Különös köszönettel tartozom Turtóczki Tímeának, aki a dolgozabb időkben engedett a TDK-dolgozatommal foglalkozni.

A munkám nem jöhetett volna létre az alábbi támogatások nélkül: OTKA K76816, K83790 és MB08C 81013, ESA PECS C98090, a Magyar Tudományos Akadémia Lendület-2009 fiatal kutatói programja és az EU FP7/2007-2013 no. 269194 jelzésű támogatási szerződése. A Kepler Team-nek, és a Kepler Vendégkutatói Irodának a Short Cadence adatokért tartozunk köszönettel.

Hálával tartozom Édesanyámnak, aki mindvégig kitartott mellettem, és a Páromnak fáradhatatlan ösztönzéséért.

Hivatkozások

- [1] Bedding, T. R. et al., 2010, *ApJ*, 713, 176
- [2] Borkovits, T. et al., 2012, *MNRAS*, megjelenés alatt (arXiv:1210.1061)
- [3] Carter, J. A. et al., 2011, *Science*, 331, 562
- [4] Chaplin, W. J. et al., 2011, *Science*, 332, 213
- [5] Cserepes, L., Petrovay, K., 2002, *Kozmikus fizika*, Eötvös Kiadó
- [6] Derekas, A. et al., 2011, *Science*, 332, 216
- [7] Fuller, J. et al., 2013, *MNRAS*, közlésre elfogadva
- [8] Guillout, P. et al., 2009, *Astron. Astrophys.*, 504, 829
- [9] Koch, D. G. et al., 2010, *ApJ*, 713, L79
- [10] Latham, D. W. et al., 2011, *ApJ*, 732, L24
- [11] Marik, M., 1989, *Csillagászat*, Akadémiai Kiadó
- [12] Perryman, M. A. et al., 1995, *Astron. Astrophys.*, 304, 69
- [13] Pietrinferni, A. et al., 2004, *ApJ*, 612, 168
- [14] Sterken, C. 2005, *ASPC*, 335, 3S
- [15] Szabó, R. et al., 2010, *MNRAS*, 409, 1244
- [16] van Leeuwen, F., 2007, *Astron. Astrophys.*, 474, 653