

Szegedi Tudományegyetem Természettudományi és Informatikai Kar

Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

SZAKDOLGOZAT

A KR Com jelű szoros kettőscsillag vizsgálata

Készítette: Szányi Balázs

Fizika BSc szakos hallgató

Témavezető: Dr. Szalai Tamás, tudományos munkatárs

Konzulens: Mitnyan Tibor, tudományos segédmunkatárs

Szeged

2019

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	2
2. Elméleti áttekintés	2
2.1. Fedési kettőscsillagok	2
2.2. W UMa típusú kettőscsillagok	5
2.3. Kettőscsillagok spektroszkópiai vizsgálata	6
2.4. A vizsgált rendszer adatai	8
3. Mérés és adatfeldolgozás	9
3.1. Spektroszkópiai mérések	9
3.2. Radiális sebességek kinyerése	10
3.3. Fotometriai mérések	11
3.4. Fotometriai mérések feldolgozása	12
3.4.1. Korrekciók	12
3.4.2. Fotometria	14
3.5. Fénygörbék modellezése a PHOEBE-vel	15
4. Eredmények	18
Összefoglalás	23
Köszönetnyilvánítás	24
Felhasznált irodalom	25
Nyilatkozat	26

1. Bevezetés

A szakdolgozati munkám során folytattam a projektmunkámban vizsgált rendszer, a KR Com vizsgálatát, az ott meghatározott paraméterek – tömegarány, sebességamplitúdók, gamma-sebesség – felhasználásával. Munkám során saját fotometriai mérésekkel és azok feldolgozásával a rendszer teljes leírását és modellezését végeztem el. A tevékenységem alkalmával 4 napot töltöttem a Szegedi Tudományegyetem Bajai Observatóriumában, ahol a távcsőkezelés mellett a fotometriai mérések felvételével is megismerkedtem.

2. Elméleti áttekintés

2.1. Fedési kettőscsillagok

Kettőscsillag alatt dinamikailag összetartozó rendszert értünk, ahol a komponensek egy közös tömegközéppont körül keringenek. Jelenlegi tudásunk szerint a csillagok legalább fele kettős vagy többes rendszerben található. Ezen rendszerek tagjai vélhetően azonos csillagkeletkezési régióban jöttek létre és közösen fejlődnek a fősorozati állapotig. Későbbi fejlődésük eltér a magányos csillagokétól. Akkor beszélhetünk fedési kettősökről, ha a keringés során a komponensek kölcsönösen elfedik egymás. A fedés létrejöttének feltétele a következő:

$$R_1 + R_2 \geq a \cdot \cos i, \quad (1)$$

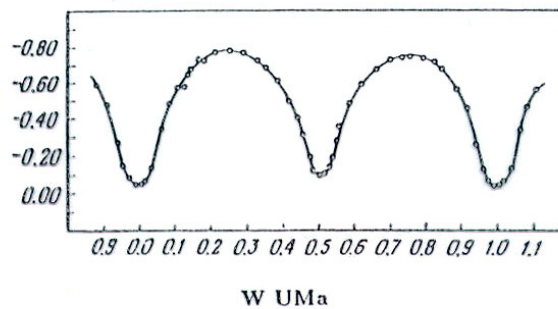
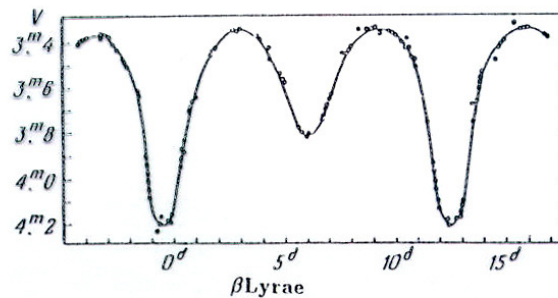
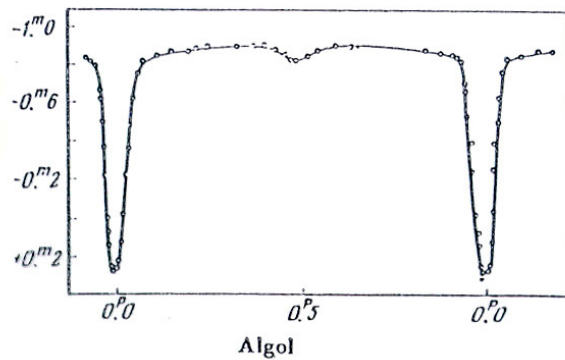
ahol R_1, R_2 a csillagok sugarai, a a pályasugár, i pedig a pályasík és a látóirányra merőleges közötti szög. A fedési kettősöket fénygörbéjük alapján és geometriai úton csoportosíthatjuk. Előbbi a fénygörbe látszólagos alakja szerint történik, utóbbi a Roche-térfogat kitöltöttségén alapul.

Osztályozás fénygörbe alapján

- Algol típusú: A két csillag sugaraikhoz viszonyítva nagy távolságra helyezkedik el egymástól, ezáltal jó közelítéssel gömb alakúak. Fényességük a fedéseket leszámítva közel állandó, fedés során a fő-, és mellékminimumok jól elkülöníthetőek. Periódusuk néhány órától több tíz évig is terjedhet.
- β Lyr típusú: Az ilyen rendszerekben a komponensek közelebb találhatóak egymáshoz, így a csillagok alakja már nem gömb, hanem ellipszoid. Emiatt a keringés során a

fényességük folyamatosan változik, hiszen minden fázisban más-más a geometriai összkép. A fő-, és mellékminimumok ennél a típusnál is jól elkülöníthetőek. A periódus jellemzően 1 napnál hosszabb.

- W UMa típusú: Hasonlóan a β Lyr kettősökhöz a komponensek ellipszoid alakúak, viszont a fénygörbéjükön a fő-, és mellékminimumok között nincs nagy eltérés. Periódusuk néhány tized nap körüli.

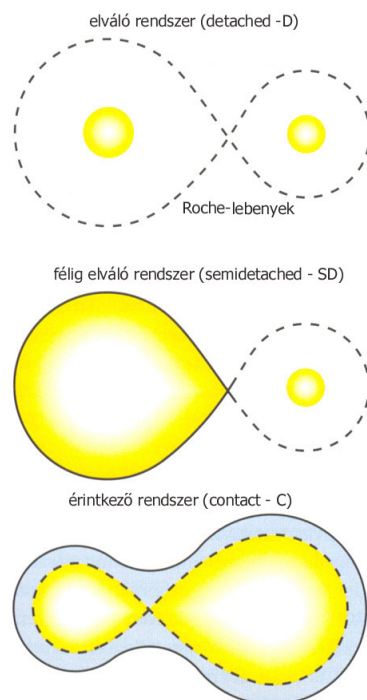


1. ábra. A fedési kettőscsillagok osztályai fénygörbe alapján (forrás: www.astro.u-szeged.hu)

Geometriai osztályozás

Ha a komponenseket tömegpontoknak tekintjük, az általuk létrehozott gravitációs potenciáleret könnyen tudjuk vizsgálni. Emellett feltesszük, hogy a rendszer tagjai hidrosztatikai egyensúlyban vannak, azaz a gravitációs ekvipotenciális felületek mentén a nyomás és a sűrűség állandó, ekkor az egyensúlyi állapotok kiszámításához elég a felületek geometriáját meghatározni. Ezen felületek egy kritikus potenciálértéknél, az ún. belső Lagrange-pontban érnek össze, így meghatározva mindkét komponens számára a Roche-térfogatot. Ezen térfogatok kitöltöttsége alapján három típust tudunk megkülönböztetni:

- Nem érintkező (detached) rendszer: Mindkét komponens a Roche-lebenyen belül található.
- Félig érintkező (semi-detached) rendszer: Az egyik tag kitölti a Roche-térfogatát, míg a másik azon belül helyezkedik el.
- Érintkező (contact) rendszer: Mindkét csillag kitölti a Roche-üreget (sőt, akár még nagyobb térfogatúak is lehetnek - ún. "túlsordulás").



2. ábra. A fedési kettőscsillagok osztályai Roche-térfogat kitöltöttsége alapján (forrás: www.astro.u-szeged.hu)

A két osztályozási mód jó közelítéssel megfeleltethető egymásnak (az ismertetés sorrendjében). Asztrofizikai vizsgálatoknál a geometriai osztályozási módot szokás alkalmazni.

2.2. W UMa típusú kettőscsillagok

A kettőscsillagok legnépesebb alosztályát alkotják az érintkező (contact), avagy W UMa típusú kettősök. A kialakulásukat és fejlődésüket leíró modellek helyessége a mai napig nem tekinthető teljesnek. Az érintkező kettősök főbb tulajdonságai (Vinkó, 1992):

- A komponensek fősorozati, vagy a fősorozathoz nagyon közeli állapotban lévő csillagok.
- Periódusuk rövid, egy napnál kisebb, és gyakran erős változást mutat.
- Tömegarányuk jellemzően 0,1 és 0,9 közötti.
- A komponensek hőmérséklete közel azonos.
- A főkomponens luminozitása kisebb, a mellékkomponensé pedig nagyobb mint egy ugyanakkora tömegű, magányos fősorozati csillagé.

Az érintkező rendszerek jelenleg elfogadott modellje szerint a kettőst egy konvektív burok veszi körül, ami túlnő a belső Lagrange-felületen (Lucy, 1967). Ez a réteg anyag- és energia-áramlást tesz lehetővé a komponensek között. Ez az elmélet jól magyarázza a luminozításokban tapasztalt eltérést, az alacsony hőmérséklet-különbséget és a tömegarány megváltozása miatt fellépő periódusváltozást, de a fejlődésükről és belső szerkezetükről nem hordoz kielégítő mennyiségű információt.

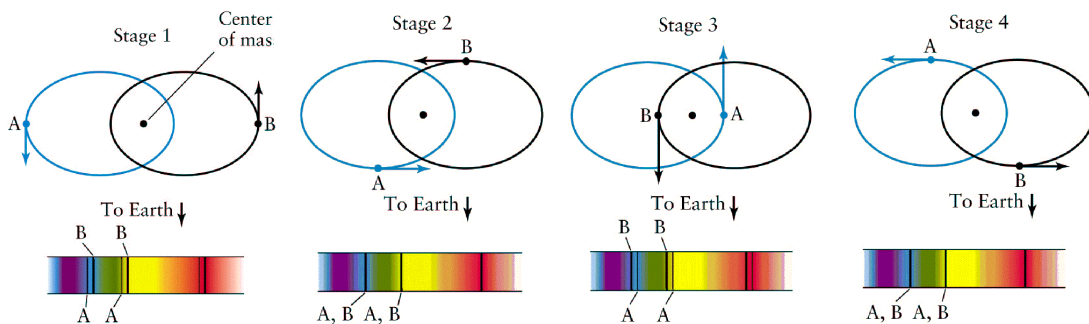
Kialakulásukról két elmélet létezik (Mészáros, 2004). Az első felvetés szerint már érintkező kettősként jöttek létre, azaz már a fősorozatra lépés előtt összeértek. A másik, realisabb elmélet szerint a fősorozaton alakul ki a kontaktus, a nagyobb tömegű tag kitölti a Roche-térfogatát, onnan anyagáramlás indul a kisebb komponensre, ami ezután szintén eléri a kritikus térfogatot és létrejön az érintkezés. A kontaktus után beindul a hőkiegyenlítődé, ami néhány millió év alatt lejártszódik. Ezután a rendszer hosszú ideig stabil állapotba kerül.

A W UMa csillagok fejlődésére létezik egy alternatív, máig még megfigyelésekkel nem alátámasztott elmélet, a termális relaxációs oszcilláció (Lucy, 1976; Lucy és Wilson, 1979; Sarna és Fedorova, 1989). Eszerint a termikus egyensúly beállta után a kisebb tömegű csillagról elkezd anyag áramlani a nagyobb tömegű komponensre, ezáltal a sugara csökkenni kezd, idővel már nem fogja kitölteni a Roche-lebenyét, így a rendszer félig érintkezővé válik. A főkomponens fejlődése miatt a tömegátadás iránya megfordul és a folyamat újraindul.

Az érintkező kettősök típusai (Binnendijk, 1965; Lucy és Wilson, 1979; Csizmadia és Klagyivik, 2004):

- A-típusú: A főkomponens hőmérséklete nagyobb mint a mellékkomponensé. Keringési periódusuk, össztömegük és felszíni hőmérsékletük átlagosan nagyobb mint a W-típusú csillagoké, viszont a tömegarányuk általában kisebb.
- W-típusú: Ennél az alosztálynál a mellékkomponens a forróbb. Az ún. kitöltöttségi faktor (megadja hogy a komponensek mennyire vannak egybeolvadva) 10-20 százalék körüli, ami kisebb mint az A-típusúak esetében.
- B-típusú: A komponensek közötti hőmérséklet-különbség nagy, akár az 1000 K-t is elérheti, ami azt jelenti, hogy nem alakult ki termikus egyensúly.
- H-típusú: Ennél a típusnál a komponensek tömegaránya nagyobb mint 0,72, illetve az ún. tömeg-luminozitás függvény is jelentősen eltér a többi alosztálynál tapasztaltaktól.

2.3. Kettőscsillagok spektroszkópai vizsgálata



3. ábra. Színképvonalak eltolódása a keringés során (forrás: www.astro.u-szeged.hu)

Színképelemzéssel információt kaphatunk egy égitest látóirányú mozgásáról, a radiális sebességéről. Ha egy égitest v_r sebességgel közeledik a megfigyelőhöz, akkor a színképvonalak hullámhossza csökken, távolodása esetén pedig nő. Ezt a hatást a Doppler-effektussal írhatjuk le:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v_r}{c}, \quad (2)$$

ahol $\Delta\lambda$ az eltolódás mértéke, λ a vonal centrális hullámhossza, c pedig a fénysebesség. Az összefüggés csak kis sebességekre érvényes, fénysebességhez közeli sebességeknél már relativisztikus összefüggés szükséges. A Doppler-effektus segítségével a színképvonalak eltolódásából meghatározhatjuk tehát a komponensek radiális sebességét. Ha a látóirányú se-

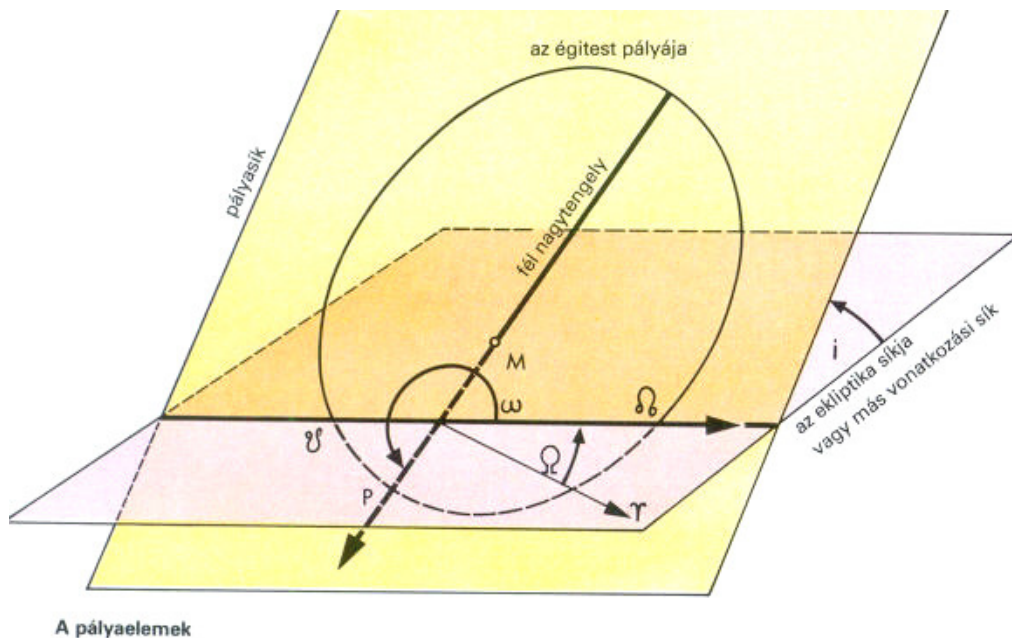
bességeket a keringés során minél többször megfigyeltük, akkor ki tudjuk rajzolni a kettős radiálissebesség-görbéjét. A görbén a látóirányú sebességeket - rendszerint km/s egységben - ábrázoljuk a keringési fázis, ritkább esetben a heliocentrikus Julián dátum (HJD) függvényében (a Julián dátum Kr. e. 4713. első napjának delétől eltelt napok száma, a HJD pedig a Föld Nap körüli mozgására korrigált időpont). A két komponens sebességgörbéjének metszéspontja határozza meg a rendszer közös tömegközéppontjának radiális sebességét (v_γ). A görbék csúcsai adják meg az adott komponens maximális radiális sebességét (v_r^{max}), amelyek az ún. kvadratúrafázisokban (0,25-ös és 0,75-ös fázisokban) találhatóak. Ezek után a

$$K = v_r^{max} - v_\gamma \quad (3)$$

képlet segítségével meghatározhatjuk a komponens sebességamplitúdóját (K). A sebességamplitúdó félnagy tengellyel (A) való kapcsolatát a következő összefüggéssel írhatjuk le:

$$K = \frac{2\pi}{P\sqrt{1-e^2}} A \cdot \sin i, \quad (4)$$

ahol P a keringési periódus, e a pálya excentricitása, i a pálya inklinációja. Az excentricitás és az inklináció is az egy égitest gravitációs terében keringő objektumok - így a kettőscsillagok komponensei - pályájának pontos meghatározására szolgáló (általában 6) paraméterek, az ún. pályaelemek egyike. Az inklináció a keringési sík hajlásszögét adja meg az alapsíkhoz



4. ábra. Pályaelemek (forrás: www.astro.u-szeged.hu)

képest, míg az excentricitás a pályaellipszis lapultságát. Mivel szoros kettőscsillagok esetében a keringési pálya jó közelítéssel kör, így az excentricitás értéke 0-nak vehető, az előző képlet leegyszerűsödik:

$$K = \frac{2\pi}{P} A \cdot \sin i. \quad (5)$$

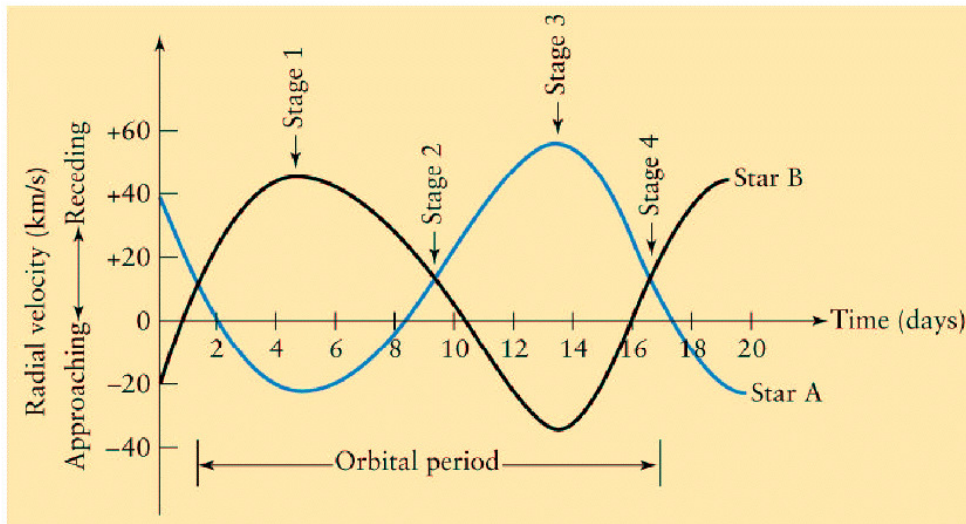
A komponensek sebességamplitúdóinak az aránya megadja a pálya félnagy tengelyek arányát, illetve a tömegük arányának reciprokát:

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{A_1}{A_2} = \frac{M_2}{M_1} = q, \quad (6)$$

ahol a komponensek sebesség-amplitúdói K_1, K_2 , a pálya félnagy tengelyeinek hossza A_1, A_2 , tömegeinek nagysága M_1, M_2 és ahol a q a tömegarány. Ezen összefüggések mellett Kepler III. törvényének segítségével

$$M_1 + M_2 = \frac{4\pi^2}{G} \frac{(A_1 + A_2)^3}{P^2}, \quad (7)$$

ahol G a gravitációs állandó, a rendszer legfontosabb paramétereinek meghatározása elvégezhető.



5. ábra. Radiális sebesség-görbe felvétele (forrás: www.astro.u-szeged.hu)

2.4. A vizsgált rendszer adatai

A vizsgált rendszer - KR Com (fontosabb katalógusok szerint: HIP 65069; 2MASS J13201579 +1745572; Gaia DR2 3938466185591624704) - három komponensből áll, két komponense szo-

ros kettőst alkot (KR Com A) kiegészülve egy harmadik, fényesebb és a tömegközéppontól sokkal távolabb keringő csillaggal (KR Com AB). A rendszer koordinátái (rektaszcenzió, deklináció): Ra: $200^{\circ}3'56,97''$ Dec: $+17^{\circ}45'57,01''$. Az AB rendszer asztrometriai kettős magas excentricitással ($e=0,9$) és körülbelül 11,15 éves periódussal. A rendszer A jelű tagja W UMa típusú fedési kettős, melynek keringési periódusa $0,40797003 \pm 0,00000239$ nap. A vizsgálatom erre a rendszerre terjed ki.

A KR Com-ról korábban készült spektroszkópai elemzés S. M. Rucinski és mtsai által 2002-ben, akik azt találták, hogy a rendszer tömegaránya elég kicsi ($q = 0,09$), illetve D'Angelo és mtsai által 2006-ban, akik a komponensek tömegeit is meghatározták ($M_1 = 1,420 M_{\odot}$ és $M_2 = 0,129 M_{\odot}$). Fotometriai analízis P. Zasche és R. Uhlár által készült 2010-ben, ők többek között a rendszer komponenseinek effektív hőmérsékletére ($T_{eff,1} = 5549 \pm 244$ K, illetve $T_{eff,2} = 6072 \pm 270$ K), sugaraikra ($R_1 = 1,33 \pm 0,04 R_{\odot}$ és $R_2 = 0,49 \pm 0,02 R_{\odot}$) és a rendszer inklinációjára ($i = 52,14 \pm 0,46^{\circ}$) tettek felvetéseket.

3. Mérés és adatfeldolgozás

3.1. Spektroszkópai mérések

A spektroszkópai méréseket az MTA CSFK Csillagászati Intézet Piskésetetői Observatóriuma 1 méter tükörátmérőjű, Ritchey-Crétien-Coudé elrendezésű távcsövével végezték, 2018. március 22-én és 23-án, melyek során a színképfelvétel mellett az alapvető korrekciókhoz bias-, dark- és flatképek, illetve a hullámhossz-kalibrációhoz spektrállámpa-képek készültek. A nyers képeket és a spektrállámpa-képeket korrigálták a különböző műszeres zajokra, majd elvégezték a hullámhossz-kalibrációt, végül pedig a spektrumok intenzitásértékeit 1-re normálták. A mérést és a mérési adatok feldolgozását a konzulensem végezte el.

3.2. Radiális sebességek kinyerése

A radiális sebességeket keresztkorrelációs technikával tudjuk meghatározni. A módszer lényege hogy, a hullámhossz-kalibrált és kontinuumnormált spektrumokat egy hasonló spektráltípusú és ismert radiális sebességű csillag spektrumaival korreláltatjuk, amely során előáll az ún. keresztkorrelációs függvény (Cross-Correlation Function, CCF) a következő alakban:

$$C_{f,g}(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)g(x - y)dx, \quad (8)$$

ahol f és g az egyes spektrumokat jelölik. Ezáltal a keresett sebességeket az azonos színképvonalak eltolódásából meg tudjuk határozni. A komponensek sebességprofiljára Gauss-görbét illesztve, azok maximumhelyei megadják a komponens aktuális látóirányú sebességét. A kinyert radiális sebességekre ezután heliocentrikus korrekciót szükséges alkalmazni, ami kiküszöböli a Föld Nap körüli keringésének hatását.

A kapott spektrumokat a 6,52 km/s látóirányú sebességű, β CVn jelű csillag hasonlóan korrigált spektrumaival keresztkorreláltam a 4800-5600 angström hullámhossztartományon, a széles H α és Na D vonalakat a nagyobb pontosság érdekében nem vettem számításba. Ehhez az IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) nevű csillagászati képfeldolgozó programcsomag *noao.rv.fxcor* taszkját használtam.

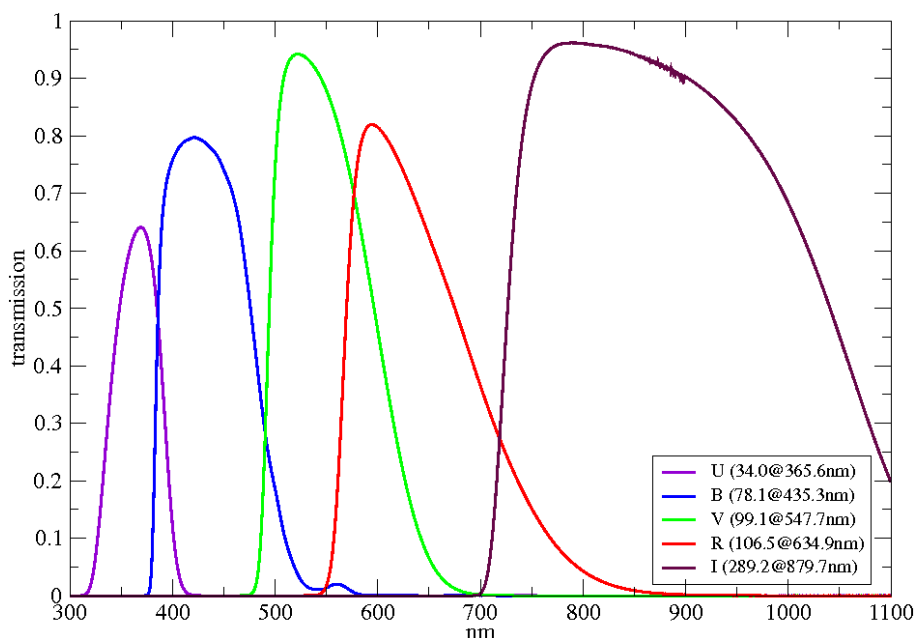
A sebességek meghatározásához a keresztkorrelációs függvények -500 és +500 km/s közti tartományát vizsgáltam. A Gauss-függvények illesztését a Fityk nevű programmal végeztem. Az illesztést megnehezítette a spektrumok gyenge jel/zaj viszonya, illetve a rendszer harmadik komponense. A kapott radiális sebességekre ezután elvégeztem a heliocentrikus korrekciót, az IRAF *noao.rv.rvcorrect* taszkja segítségével. Befejezésékképp a mérések időpontjait átszámoltam HJD-ről keringési fázissá (ϕ), az alábbi képlet használatával:

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

ahol T a mérési időpont HJD-ben, T_0 az epocha, P pedig a keringési periódus. Ezek után megkaptam a modellezéshez szükséges fázis-radiálissebesség párokat.

3.3. Fotometriai mérések

A fotometriai méréseket saját magam végeztem a Szegedi Tudományegyetem Bajai Observatóriuma 51 centiméter átmérőjű, f8,4-es fényerejű, Ritchey-Chrétien szerelésű távcsövével. A távcső egy SBIG STL-6303 CCD kamerával rendelkezik, amely 3000x2000 darab, 9 mikrométer nagyságú pixelből áll. Egy pixel 0,571 ívmásodpercet fed le, így a kamera teljes látómezeje 29,2 ívperc x 19,5 ívperc. A nyers képeket Johnson B és V, illetve Cousins R és I szűrőkben készítettem 2019. február 19-én és 20-án. A észlelés során az objektumról és környezetéről készült képek mellett a korrekcióhoz szükséges bias-, dark-, és flat-képeket is készítettem.



6. ábra. A Johnson-Cousins szűrőrendszer áteresztési sávjai (forrás: www.aip.de)

Kép típusa	Szűrő	Expozíciós idő (s)	19-ei képek (db)	20-ai képek (db)
objektum	R	6	74	147
objektum	R	8	25	0
objektum	V	10	74	147
objektum	V	15	25	0
objektum	B	25	74	147
objektum	B	40	25	0
objektum	I	10	74	147
objektum	I	15	25	0
bias	-	-	0	11
dark	-	6	11	11
dark	-	8	11	0
dark	-	10	11	11
dark	-	15	11	0
dark	-	25	11	11
dark	-	40	11	0
flat	R	10	0	5
flat	V	20	0	5
flat	B	10	0	5
flat	I	10	0	5

1. táblázat. A mérés során készült képek statisztikája

3.4. Fotometriai mérések feldolgozása

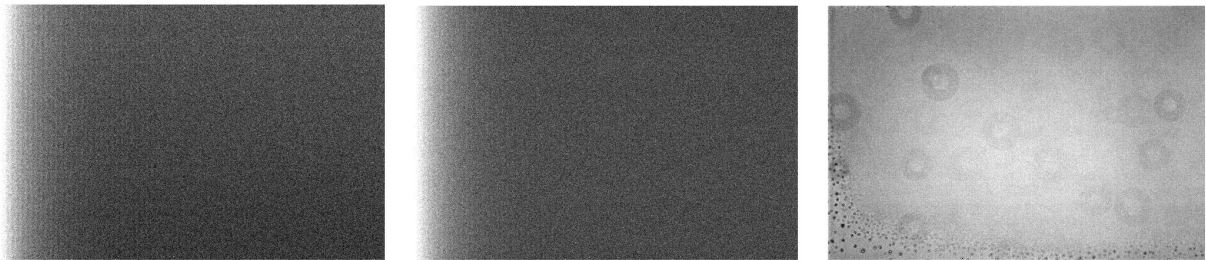
3.4.1. Korrekciók

A mérés során készült objektumképeket - zajcsökkentés, és ezáltal a lehető legpontosabb eredmény elérése céljából - a fotometria előtt korrekciós eljárásoknak szokás alávetni, amik rendszerint az alábbiak:

- Bias-korrekció: A bias a CCD-chip alap jelszintjét adja meg, ami kiolvasás során ráakódik a készült képekre. Ennek kiküszöbölésére 0 expozíciós idejű képeket készítünk, amivel aztán korrigáljuk a feldolgozásra szánt képeket. Célszerű egy éjszaka során több bias-képet készíteni, és azok átlagával korrigálni. A feldolgozás során - mivel a bias-, és dark-képek jelszintje közel állt egymáshoz - csak a flat-képekre végeztem bias korrekciót, miután az IRAF *noao.imred.ccdred.zerocombine* taszkjának segítségével kombináltam a bias-képeimet.
- Dark-korrekció: A CCD-kamerára jellemző az ún. sötétáram, ami azt jelenti, hogy a fotodiódákból nem csak foton, hanem hőmérséklet hatására is lépnek ki elektronok. A

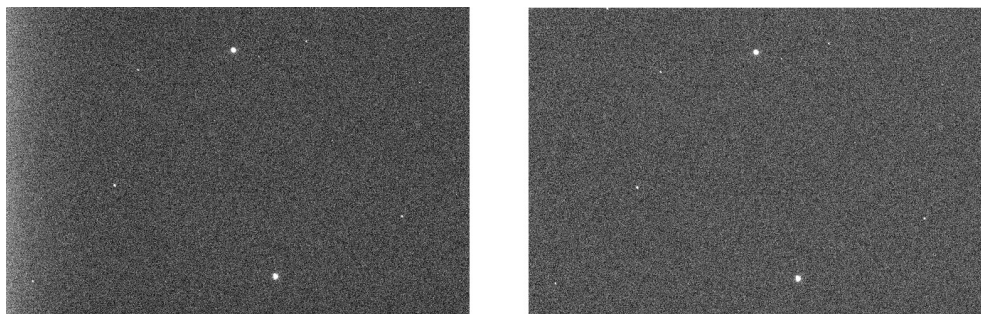
sötétáram csökkentésére a CCD-kamerát hűteni szokták, de teljesen megszüntetni (alap körülmények között) nem lehetséges. A dark-képek készítése során a kamera rekesze zárva marad - hasonlóan a bias-képek esetében - de zéró expozíciós idő helyett hosszabakat használunk. Mivel a hőmozgás következtében kilépő elektronok száma függ az expozíciós időtől és a hőmérséklettől, ezért fontos, hogy ezek a dark-, és objektumképeken megegyezzenek. Az elkészült dark-képeket expozíciós időnként külön-külön az IRAF *noao.imred.ccdred.darkcombine* taszk segítségével átlagoltam.

- Flat-korrekción: A képeken további hibákat okoz a pixelek eltérő fényérzékenysége; a kamerára, szűrőkre és a távcső optikai leképező egységeire rakódó szennyeződések; illetve az optikai rendszer beállításának esetleges hibái. A flat-képeket egyenletesen kivilágított területekről kell készíteni, ami lehet napfelkelte vagy napnyugta során az égbolt, vagy akár a kupolában egy kivilágított fehér ernyő. A flat-képeket szűrőnként kell elkészíteni, szintén több darabszámban. A flat-képeket előbb bias-korrigálni kell, amit az IRAF *noao.imred.ccdred.ccdproc* taszkjának használatával tettem meg, majd a korrigált flat-képeket a *noao.imred.ccdred.flatcombine* taszk segítségével medián átlagoltam.



7. ábra. Az átlagolt bias, dark és az R szűrős bias-korrigált flat

Az objektumképeket az átlagolt dark-, és flat-képekkel korrigáltam az IRAF *noao.imred.ccdred.ccdproc* taszk segítségével.



8. ábra. Egy R szűrőn készült eredeti, illetve korrigált objektumkép

3.4.2. Fotometria

Az észlelés során szűrőnként készült 244 képen a csillagok nem mindig ugyanazon a pixelkoordinátákon találhatóak, ezért a fotometriai eljárások előtt célszerű a képeket összetolni, hogy a csillagok pozíciója minden képen megegyezzen. Az általam használt távcső követése nem volt pontos, így a képek között már túl nagy eltérések mutatkoztak. Mivel így az IRAF már nem tudta megoldani a képek összetolását, ezért az *imexamine* taszkjának és a DS9 képmegjelenítő program segítségével minden képről feljegyeztem a vizsgálatához szükséges csillagok koordinátáit, a fotometriát pedig a képek összetolása nélkül végeztem el.

Az apertúrafotometria lényege, hogy a csillag köré egy kör alakú apertúrát definiálunk, és az azon belül található pixelek intenzitásértékeinek összegét tekintjük a csillag fényességének. A képeken a csillagok nem pontszerűek, a fényelhajlás és a légkör hatásának következtében egy jellegzetes elhajlási korongként jelennek meg. Az apertúrát célszerű úgy megválasztani, hogy az átmérője a lehető legkisebb legyen, de a csillagprofilt teljes mértékben tartalmazza. Ha kisebb apertúrát választunk, nem a csillag teljes fényességével számolunk, ha nagyobb, többletfény kerülhet a kalkulációba, ami szintén ront az eredményeken.

Az apertúra megválasztásához jó közelítést szolgáltat a csillag félértékszélessége (FWHM). A háttér intenzitása is hozzáadódik a kapott fényességértékhez, ezért azt ismernünk kell, és le kell vonnunk. Az FWHM és a háttér fényessége az IRAF *imexamine* taszkja segítségével könnyen leolvasható, így szűrőnként meg tudtam határozni az apertúra méretét, és a háttér szórását. Az apertúrafotometriát a *noao.digiphot.apphot.phot* taszk segítségével végeztem el. Az így kapott *.mag.1 kiterjesztésű fájlokból a *noao.digiphot.ptools.txdump* taszk használatával kinyertem az észlelés időpontját (óra, perc, másodperc), illetve a csillagok magnitúdóit.

A differenciális fotometria lényege, hogy a vizsgálni kívánt csillag fényességét egy hasonló, állandó fényességűnek feltételezett csillagéhoz hasonlítjuk. A hiteles analízis miatt az összehasonlító csillagot is vizsgáljuk, egy harmadik, ellenőrző csillaghoz viszonyítva, és ha ezen objektumok fényességkülönbségét ábrázolva az idő függvényében, egy közel 0 meredekségű egyenest kapunk, alkalmazhatjuk az összehasonlító csillagot a fotometriához. Az apertúrafotometria során kinyert időpont-magnitúdó párokból álló fájlokat AWK-szkriptek segítségével átalakítottam, hogy a keringési fázist és a változó, illetve az összehasonlító csillag fényességkülönbségét kapjam. A továbbiakban ezen adatokat használtam fel a modellezéshez.

3.5. Fénygörbék modellezése a PHOEBE-vel

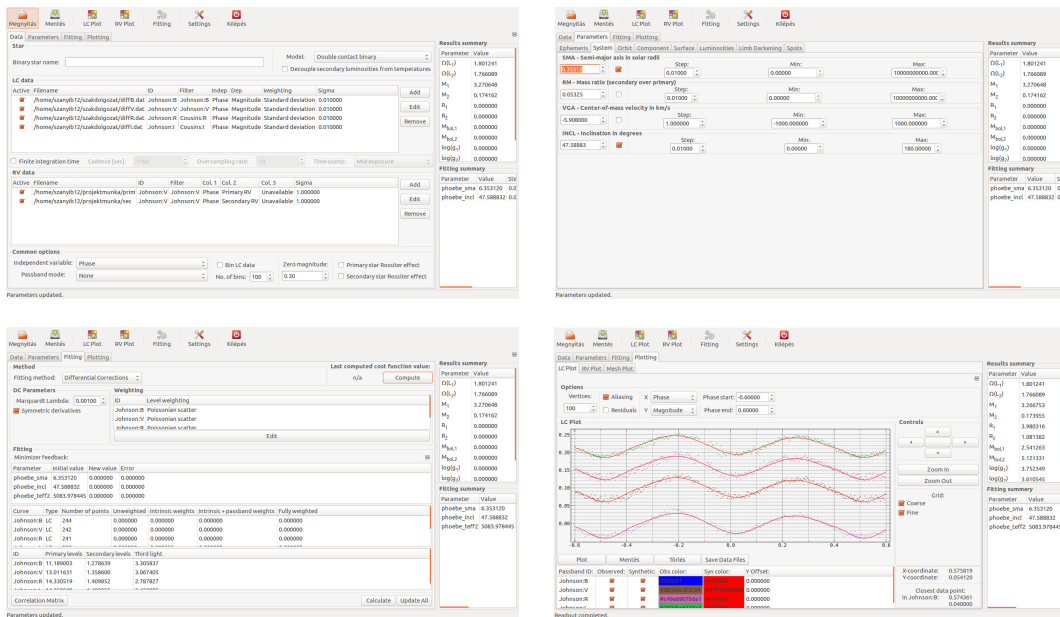
A kapott radiális sebesség és differenciális magnitúdó adatokból numerikus modellek használatával meghatározhatóak a kettős rendszerek pályaelemei és fizikai paraméterei. A modellezéshez a PHOEBE (PHysics Of Eclipsing BinariEs, magyar fordításban a fedési kettősök fizikája) nevű programcsomag 1.0-ás verzióját használtam. A program az R. E. Wilson és E. J. Devinnay által 1971-ben fejlesztett Wilson-Devinney-kódra épül, és 4 részből tevődik össze:

- A könyvtár (phoebe-lib): A program tudományos és számítási magja, ez tartalmazza a modellezéshez szükséges algoritmusokat és függvényeket. A felhasználó a könyvtárral csak a többi részegységen keresztül tud kommunikálni.
- A grafikus interfész (phoebe-gui): A legegyszerűbb módja a lib használatának, grafikus felület segítségével minden szükséges paramétert, kezdeti értéket, stb. be tudunk állítani.
- A scripter (phoebe-script): A PHOEBE terminál központi része, főként haladó szintű felhasználóknak. Itt parancsok segítségével kommunikálhatunk a könyvtárral, illetve lehetőségünk nyílik saját, lib kezelő parancsok írására.
- A python modul (phoebe-py): A program python környezet alatt használható egysége, a 2.0 verzió kizárólag ebben a formában jött létre.

Én a program grafikus felületét használtam a modellezésre. A GUI négy ablakból áll:

- Mérési adatok: Itt adhatjuk meg a használni kívánt, mérési adatokat tartalmazó fájlok elérési útját, és beállíthatjuk, hogy az adatfájlok egyes oszlopai milyen mennyiségnek felelnek meg. Fotometriai mérések (LC data) esetében megadhatjuk hogy az adatok HJD-ben vagy fázisban, illetve fluxusban vagy magnitúdóban értendőek-e, továbbá hogy milyen szűrőn keresztül lettek felvéve. Spektroszkópiai mérések esetén a HJD/fázis mellett beállítható, hogy a megadott radiális sebességek a primer vagy a szekunder komponenshez tartoznak. Fontos paraméter, amit szintén ennél az ablaknál kell meghatározni, a modellezni kívánt kettős típusa (érintkező, félig érintkező, nem érintkező).
- Paraméterek: Ebben az ablakban adhatjuk meg az illesztési kívánt, illetve az illesztések során fixen tartott paraméterek kezdeti értékeit. Az illesztés során változtatni kívánt paramétereket ki kell pipálni, továbbá megadható az iteráció alatt használt lépésköz és intervallumhatárok.

- Illesztés: A program itt végzi el a kívánt iterációkat. A Calculate gomb megnyomásával indíthatjuk el a folyamatot, ami végén a program megadja a kezdőértékek mellett az iteráció során kapott új értékeket, az illesztés "jóságát", a számítási időt és az illesztett paraméterek hibáját. Ha elfogadjuk az új értékeket, az Update all gomb megnyomásával fixálhatjuk azokat és kezdhetjük előlről a folyamatot, amíg az illesztés "jósága" szignifikánsan nem változik.
- Ábrázolás: Ebben az ablakban ábrázolhatjuk a kettős mért, illetve illesztett fénygörbéjét és radiálissebesség-görbéjét, az illesztett és mért görbék eltérését, illetve a rendszer geometriai modelljét bármely fázisban. Az ábrázolást minden illesztés után el tudjuk végezni, így bármikor tudjuk ellenőrizni a modellünk helyességét.



9. ábra. A PHOEBE ablakai

A modellezés során bizonyos paramétereket nem illesztettem, ilyen volt a q és a v_γ , ahol a projektmunkám során kapott, illetve a $T_{eff,1}$, ahol a mérési adatok B-V színindexéből számolt értéket használtam. Utóbbi számítást az alábbi képlet segítségével végeztem el (Gray, 1992):

$$\begin{aligned} \log T_{eff} = & 3,988 - 0,881(B - V) + 2,142(B - V)^2 - 3,614(B - V)^3 + \\ & + 3,2637(B - V)^4 - 1,4727(B - V)^5 + 0,26(B - V)^6. \end{aligned} \quad (10)$$

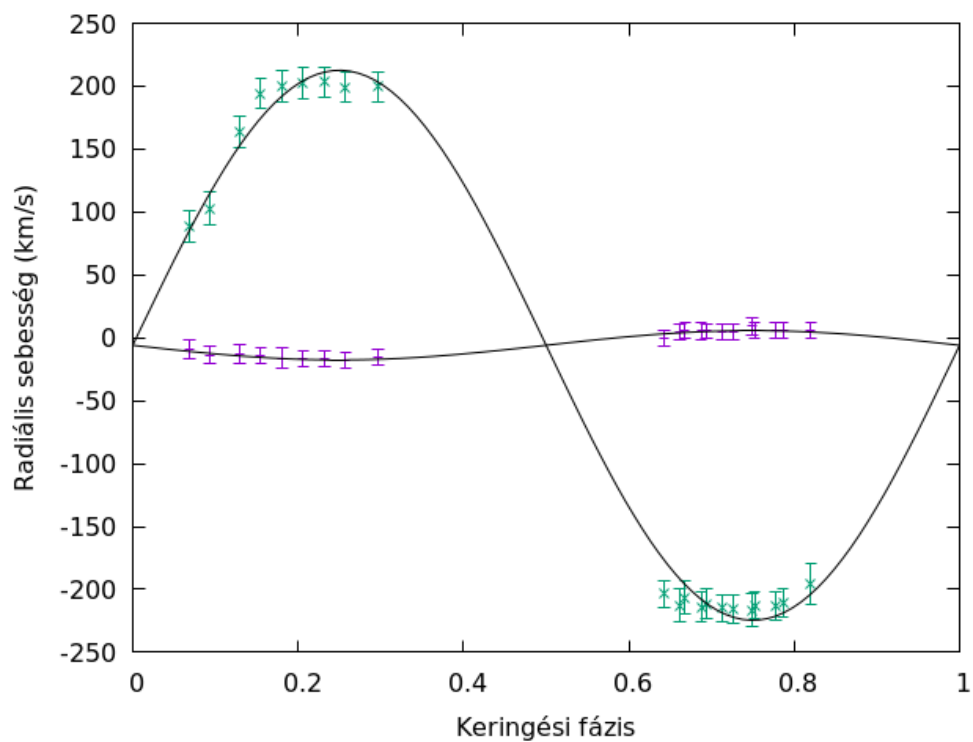
Az illesztett paraméterek a következők voltak: i , A , $T_{eff,2}$, az egyes komponensek luminozitásértékei (a harmadik komponens fényével együtt), illetve a foltparaméterek. Minden paraméternek egy reális kezdőértéket adtam meg, illetve a luminozításjellemzőket a programmal számítottam. A folt jelenlétét a fénygörbék eltérő fényességmaximumai indokolták. A folt hőmérsékletére és szélességi koordinátájára fix értéket állítottam be, a folt sugarát és hosszúsági koordinátáját pedig illesztettem. Az IRAF által kiadott hibaértékek, a mérési adatok szórásából kiindulva irreálisan alacsonyak voltak, így az iteráció során a fénygörbék vastagságából felülről becsült, 0,03 magnitúdós hibaértékeket használtam.

4. Eredmények

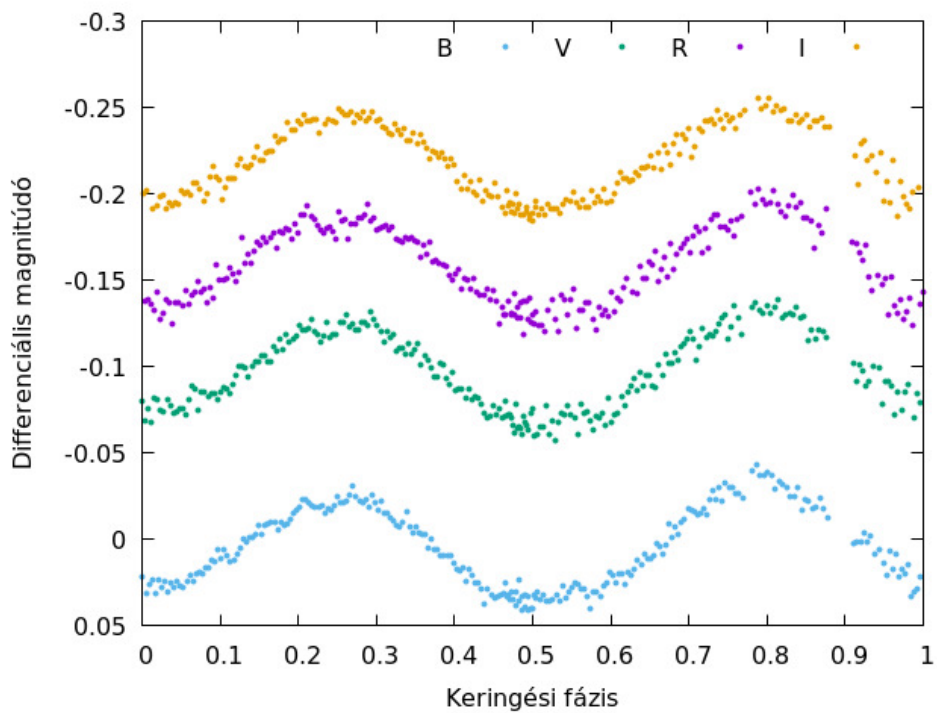
HJD	Fázis	V_2 (km/s)	V_2 hibája (km/s)	V_1 (km/s)	V_1 hibája (km/s)
2458200,37229	0,66181	-212,663	13,290	4,778	6,460
2458200,38276	0,68748	-213,892	12,008	5,455	6,592
2458200,39323	0,71315	-214,989	10,541	4,930	6,021
2458200,40812	0,74965	-216,436	12,748	9,351	6,833
2458200,42303	0,78619	-210,373	11,337	5,686	5,965
2458200,43696	0,82034	-195,957	16,152	5,731	6,252
2458201,35395	0,06802	88,202	12,369	-8,756	7,487
2458201,36441	0,09366	102,776	12,801	-13,924	6,775
2458201,37885	0,12907	163,859	12,288	-12,803	7,673
2458201,38931	0,15470	194,138	12,192	-14,672	6,328
2458201,39977	0,18034	199,680	12,214	-16,399	7,895
2458201,41023	0,20598	202,265	12,430	-16,914	6,385
2458201,42069	0,23163	203,482	11,813	-16,209	6,096
2458201,43115	0,25727	199,202	12,281	-18,168	6,123
2458201,44708	0,29630	199,659	11,566	-15,796	6,279
2458201,58832	0,64252	-203,705	11,062	-0,502	5,942
2458201,59878	0,66816	-206,570	12,810	5,633	5,981
2458201,60925	0,69380	-211,779	11,874	5,480	5,988
2458201,62263	0,72661	-215,288	11,157	4,512	5,983
2458201,63309	0,75226	-212,583	10,261	6,325	6,146
2458201,64356	0,77791	-213,322	11,278	5,588	5,955

2. táblázat. A kinyert radiális sebességek és azok hibái

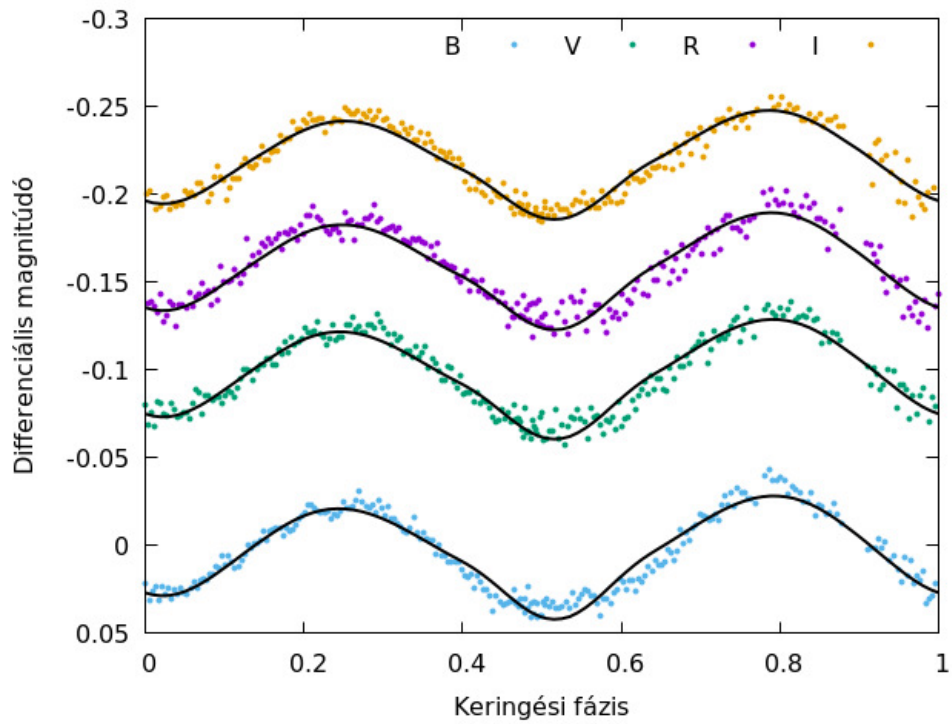
A 2. táblázatban a keresztkorreláció, a függvényillesztés és a heliocentrikus korrekció után kapott radiális sebességeket, illetve a függvényillesztési hibákat ismertetem időpont és keringési fázis szerint. A radiális sebességeket, a modellezés során illesztett radiális sebesség-görbével a 10. ábrán szemléltetem.



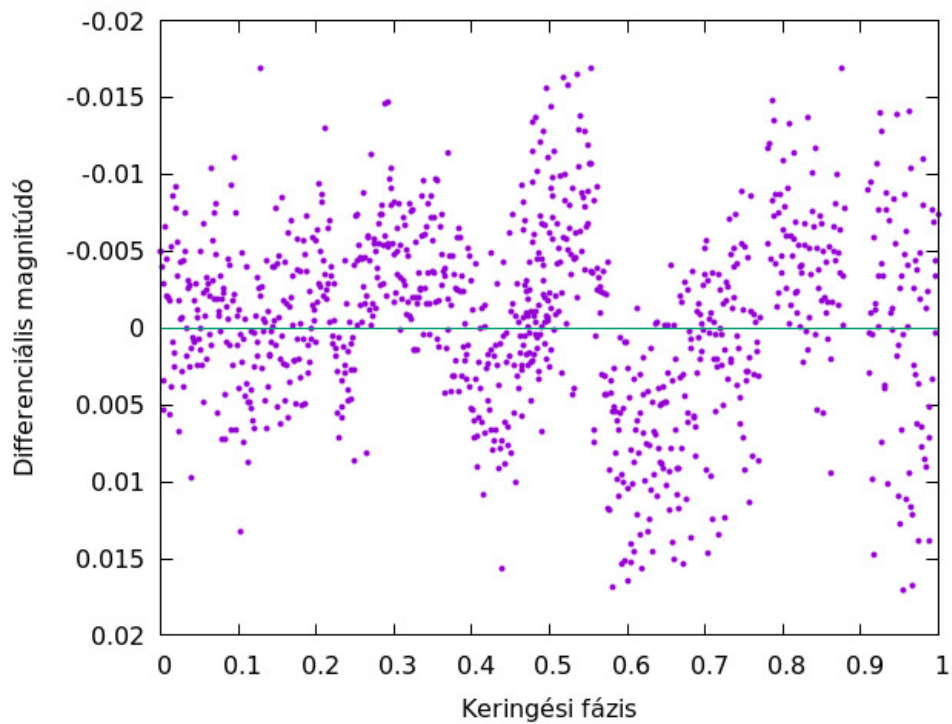
10. ábra. A mérési adatok és a rájuk illesztett radiális sebesség-görbe



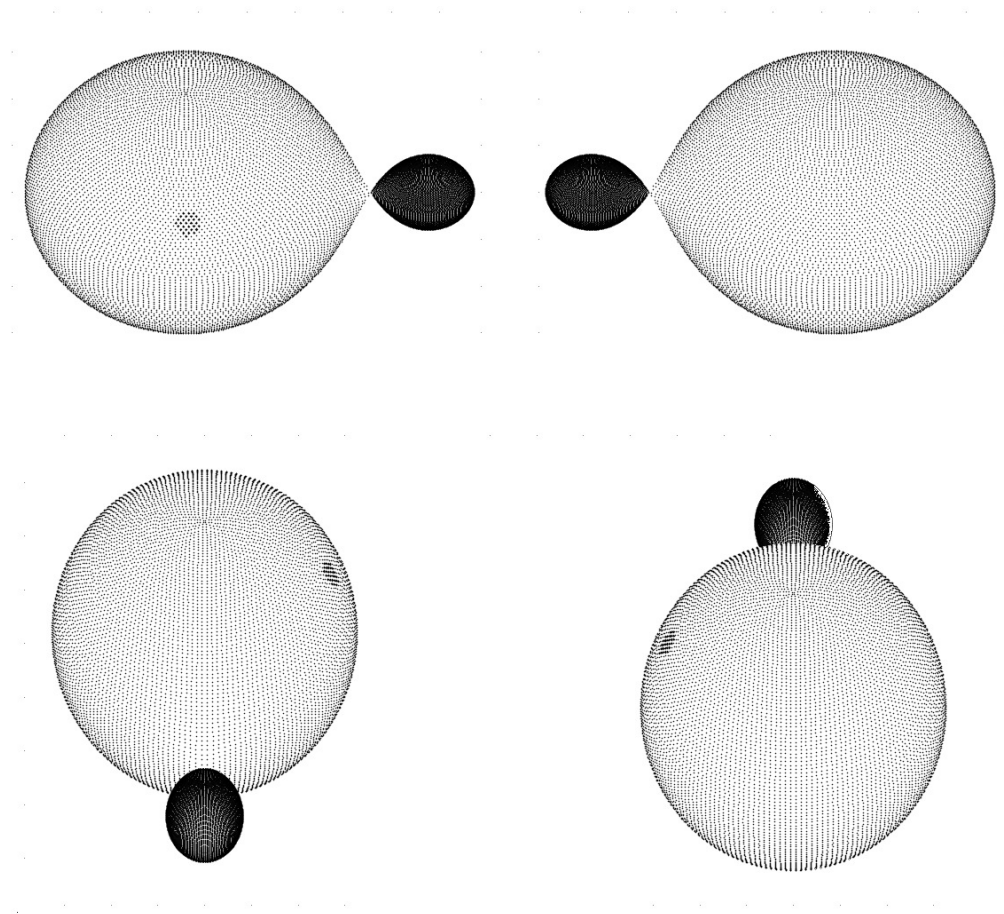
11. ábra. A különböző szűrőkben mért differenciális fénygörbék



12. ábra. A különböző szűrőkben mért és az illesztett differenciális fénygörbék



13. ábra. A fénygörbeillesztés hibája



14. ábra. A rendszer geometriai modellje 0,25, 0,75, 0 és 0,50 fázisban

A 11. ábrán a fotometriai eljárás során kinyert differenciális magnitúdókat ábrázolom a keringési fázis függvényében. A modellezés során ezen adatpontokra szintetikus fénygörbéket illesztettem. Az illesztés eredménye a 12. ábrán, míg a mért és az illesztett fénygörbék különbségei a 13. ábrán láthatók. A hibákat a jobb átláthatóság kedvéért nem ábrázoltam. A 14. ábrán a kettős geometriai modellje látható, amiből leolvasható a két csillag közötti méretkülönbség, a Roche-lebenyek kitöltöttsége, illetve egy, a főkomponensen található hűvös folt.

Paraméter	Érték	Hiba
K_1 (km/s)	11,646	6,436
K_2 (km/s)	218,703	11,546
v_γ (km/s)	-5,908	1,376
q	0,053	0,017
A (R_\odot)	6,353	0,119
i ($^\circ$)	47,588	0,220
M_1 (M_\odot)	3,267	-
M_2 (M_\odot)	0,174	-
R_1 (R_\odot)	3,980	-
R_2 (R_\odot)	1,081	-
$T_{eff,1}$ (K)	4800	-
$T_{eff,2}$ (K)	5084	25,573

3. táblázat. A rendszer illesztés után kapott paramétereit, illetve azok hibái

A 3. táblázatban tüntetem fel azokat a paramétereket, amelyeket az adatpontokra legjobban illeszkedő fénygörbe alkalmazásával kaptam. A sebességamplitúdók hibáit a radiális sebességek hibaértékeiből számoltam, a további paraméterek ezen értékeit PHOEBE-vel végzett illesztési folyamat során kaptam meg. A tömeg, illetve sugárértékeknél nincs információm a hibákra vonatkozóan, míg a főkomponens effektív hőmérsékleténél a már említett fix értéket használtam.

A spektroszkópiai vizsgálatok után kapott paraméterek (K_1, K_2, v_γ, q) nagyságrendileg meg-
egyeznek a S. M. Rucinski és mtsai által 2002-ben tapasztaltaktól, a 0,053-s tömegarány
viszont meglehetősen kicsi a W UMa típusú kettősöknél. A 13. ábra alapján elmondható,
hogy az illesztett fénygörbék az adatsor becsült hibáján belül jól leírják a mért fénygörbét.
Ennek ellenére a fénygörbemodellekből származtatott fizikai paraméterek jócskán eltérnek
Zasche és Uhlár 2010-ben kapott értekeitől. Ennek egyik lehetséges oka, hogy a hőmérsékle-
tek más módon lettek kezelve a modellezés folyamán. Az említett cikkben a szerzők mindkét
komponens hőmérsékletét szabadon engedték az iterációk során (eltekintve attól, hogy ezek
erősen korrelálnak egymással). Ezzel szemben én fizikailag megalapozott módon (a B-V
színindex alapján) rögzítettem a főkomponens hőmérsékletét, és csak a mellékkomponens
hőmérsékletét változtattam az illesztések során, kiküszöbölve ezzel az említett paraméterek
közötti korrelációt.

Összefoglalás

Szakedolgozatomban ismertettem a tudományos feladatom témáját, a fedési kettőscsillagok lényeges tulajdonságait, bővebben ismertetve a W UMa típusú csillagokat, és a vizsgálatukhoz szükséges adatokat, illetve az általam analizált rendszer fontosabb paramétereit. Továbbá összefoglaltam a spektrumok kiértékelésének lépéseit, az észlelésem fontosabb adatait, illetve a fotometriai mérések feldolgozásának folyamatát. Végül a kapott radiális sebességek és differenciális magnitúdók segítségével elvégeztem a KR Com A rendszer modellezését, illetve meghatároztam a fizikai és geometriai paramétereit.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom elsősorban témavezetőmnek, Dr. Szalai Tamásnak az útmutatásokért, a rendszeres konzultációs lehetőségekért és az új ismeretekért, amiket elsajátíthattam a munkám alatt. Szeretném megköszönni Mitnyan Tibornak a munkám során alkalmazott programok használatának megtanítását, és az adatok feldolgozásában nyújtott segítségét. Köszönöm továbbá a Bajai Obszervatórium munkatársainak, hogy pár napot eltölthettem ott és első távcsöves mérésemet lehetővé tették, illetve Csányi Istvánnak a távcső kezelésének bemutatását és segítségét a mérés alatt.

Felhasznált irodalom

- Binnendijk, L.: 1965, Kleine Veröff. Remeis-Sternwarte Bamberg, 40, 36
- Csizmadia, Sz.; Klagyivik, P.: 2004, Astronomy & Astrophysics, 426, 1001
- Czavalinga, D. R.: 2017, Válogatott nyílthalmazok griz szűrős fotometriai vizsgálata. Diplomamunka, SZTE
- D'Angelo, C., van Kerkwijk, M. H., & Rucinski, S. M. 2006, Astrophysical Journal, 132, 650
- Gray F. 1992, The Observation and Analysis of Stellar Photospheres 343
- Kaszás, G.; Vinkó, J.; Szatmáry, K.; et al.: 1998, Astronomy & Astrophysics, 331, 231-243
- Lucy, L. B.: 1967, Zeitschrift für Astrophysik, 65, 89
- Lucy, L.B.: 1976, Astrophysical Journal, 342, 1003
- Lucy, L.B.; Wilson, R.E.: 1979, Astrophysical Journal, 231, 502
- Makai, Z.: 2006, Galaktikus nyílthalmazok fotometriai vizsgálata. Diplomamunka, SZTE
- Mészáros, Sz.: 2004, Érintkező kettőscsillagok fejlődésének modellezése, Diplomamunka, SZTE
- Mitnyan, T.: 2015, A VW Cephei érintkező kettőscsillag fizikai modellezése és felszíni aktivitásának vizsgálata. Diplomamunka, SZTE
- Rucinski, S. M., Lu, W., Capobianco, C. C., et al. 2002, Astrophysical Journal, 124, 3
- Sarna, M.J.; Fedorova, A.V.: 1989, Astronomy & Astrophysics, 208, 111
- Szalai T.: 2008, Szoros kettőscsillagok fizikai paramétereinek meghatározása, valamint felszíni és kromoszférikus aktivitásuk vizsgálata. Diplomamunka, SZTE
- Zasche, P., Uhlár, R. 2010, Astronomy & Astrophysics, 519, A78
- <http://astro.u-szeged.hu/oktatas/asztrofizika/html/asztrofizika.html>
- <https://lco.global/observatory/sbig-stl-6303/>
- <http://phoebe-project.org/1.0/>

Nyilatkozat

Alulírott Szányi Balázs BSc szakos hallgató (ETR azonosító: SZBXABT.SZE) a "A KR Com jelű szoros kettőscsillag vizsgálata" szakdolgozat szerzője fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy 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, 2019.05.15.

Aláírás: