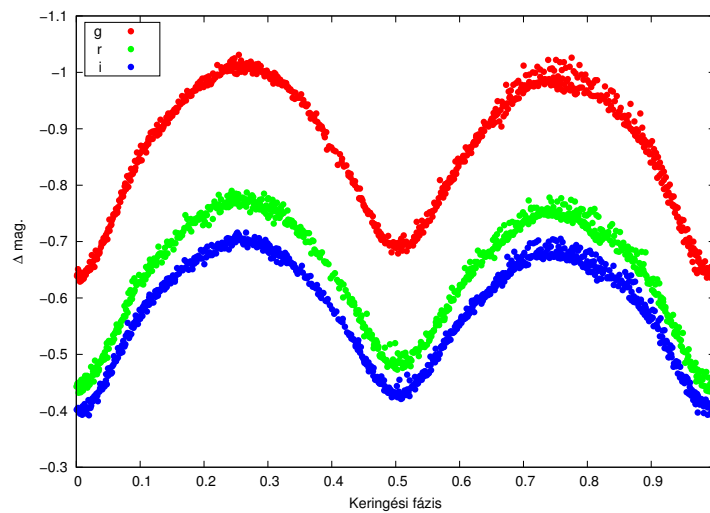


Szegedi Tudományegyetem
Természettudományi és Informatikai Kar
Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

A VW Cephei érintkező kettőscsillag fizikai modellezése és felszíni aktivitásának vizsgálata

Diplomamunka



Készítette: **Mitnyan Tibor**

Fizikus MSc szakos hallgató

Témavezető: **Dr. Szalai Tamás**

tudományos munkatárs

Konzulens: **Dr. Vinkó József**

egyetemi docens

Szeged

2015

Az érintkező kettőscsillagok kialakulásáról, fejlődéséről, illetve a rajtuk végbemenő fizikai folyamatokról még ma sincsenek kielégítő ismereteink. Az ilyen típusú objektumok vizsgálata ezért napjainkban is fontos, egyúttal globálisabb képet adhatnak a csillagfejlődés asztrofizikájáról. A VW Cephei az egyik legismertebb érintkező kettős rendszer, melynek fizikai paraméterei a szakirodalomból jól ismertek. Korábbi vizsgálatok alapján kiderült, hogy a rendszer tartalmaz egy harmadik komponenst is. A keringési periódus változásában kimutattak továbbá egy 7-8 éves ciklust, amit a főkomponens felszíni aktivitásának periodikus változásával próbáltak magyarázni.

Tudományos munkám célja az volt, hogy saját mérések alapján tanulmányozzam a VW Cephei-t, és képet kapjak az elmúlt egy évtizedben a rendszerben bekövetkezett változásokról. A fotometriai méréseket a Bajai Csillagvizsgáló 51 cm-es távcsövével végeztem, míg a spektroszkópai felvételek elkészítéséhez a szombathelyi Gothard Asztrofizikai Observatórium közepes felbontású echelle spektrográfját használtam. A csillag fénygörbéinek előállítására parabolaillesztéssel 3 új főminimum-időpontot határoztam meg, majd ezek segítségével periódusvizsgálatot hajtottam végre és megállapítottam, hogy az előzőleg kimutatott perióduscsökkenés tovább folytatódott. Ezen felül elvégeztem az általam mért, illetve eddig publikálatlan, 2009 júliusából származó fénygörbék modellezését, amihez a Wilson-Devinney-kódra épülő PHOEBE nevű programot használtam. A feldolgozott spektrumokat a keresztkorrelációs technikát alkalmazva összevetettem egy elméleti csillagspektrummal. Az így kapott radiális sebesség-görbe alapján meghatároztam a rendszer tömegarányát ($q=0,34$), ami jó egyezést mutat az irodalmi értékekkel. A fénygörbe-maximumok eltérő értékei, a fénygörbe-modellezések eredményei valamint a $H\alpha$ -vonalprofil keringéshez kötött változásai arra utalnak, hogy a felszíni aktivitás jelenleg is a főkomponensen intenzív.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
1.1. Fedési kettőscsillagok	3
1.1.1. Fénygörbe szerinti osztályozás	3
1.1.2. Geometriai osztályozás	4
1.1.3. O-C diagram módszer	5
1.1.4. Spektroszkópiai jellemzők	6
1.2. Érintkező kettőscsillagok	7
1.3. Irodalmi áttekintés a VW Cepheiről	8
2. Mérések és adatfeldolgozás	10
2.1. A fotometriai mérések feldolgozása	10
2.1.1. A szükséges képkorrekciók és további képfeldolgozási lépések	11
2.1.2. Az apertúra- és a differenciális fotometria elve	12
2.1.3. A fotometrálás menete	13
2.2. Fénygörbe-modellezés	13
2.2.1. PHOEBE	14
2.3. A spektroszkópiai mérések feldolgozása	17
2.3.1. Hullámhossz-kalibrált és kontinuumnormált spektrumok előállítás	17
2.3.2. Radiális sebesség-görbe elkészítése	17
3. Eredmények	21
3.1. Az elkészült fénygörbék	21
3.2. Minimumidőpontok	22
3.3. Periódusvizsgálat	23
3.4. Fénygörbe-modellek és meghatározott paraméterek	25
3.4.1. A 2009-es fénygörbék modelljei	25
3.4.2. A 2014-es fénygörbék modelljei	30
3.5. Radiális sebességek	32
3.6. Spektrumok összehasonlítása korábbi mérési adatokkal	33
4. Diskusszió	36
Összefoglalás	38
Köszönetnyilvánítás	39
Hivatkozások	40

1. Bevezetés

Tudományos dolgozatomban az egyik legrégebben ismert, legjobban tanulmányozott, azonban mégis rejtélyes és különleges érintkező kettőscsillag fotometriai és spektroszkópai vizsgálatát mutatom be. Először bemutatom a fedési kettőscsillagok, ezen belül részletesebben az érintkező rendszerek elméleti hátterét, továbbá egy irodalmi áttekintést a VW Cephei-ről eddig megjelent tudományos publikációk alapján. Ezután leírom, milyen méréseket végeztem, valamint ezeket miként dolgoztam fel és értékeltem ki. Végül ismertetem a kapott eredményeket és a belőlük levont következtetéseket.

1.1. Fedési kettőscsillagok

A kettőscsillagok olyan objektumok, amelyek egymással gravitációsan kötött állapotban vannak, és emiatt a rendszer tömegközéppontja körül keringést végeznek. Ha a két csillagra éppen úgy látunk rá, hogy azok keringésük során látszólag periodikusan kitárnak egymásból egy részt, akkor fedési kettőscsillagról beszélünk. A fedési kettőscsillagok a változócsillagok közé sorolhatóak, hiszen látszó fényességük időben nem állandó, a fénygörbéjük periodikus változásokat mutat, amely változások alapján három különböző típusukat különböztethetjük meg:

1.1.1. Fénygörbe szerinti osztályozás

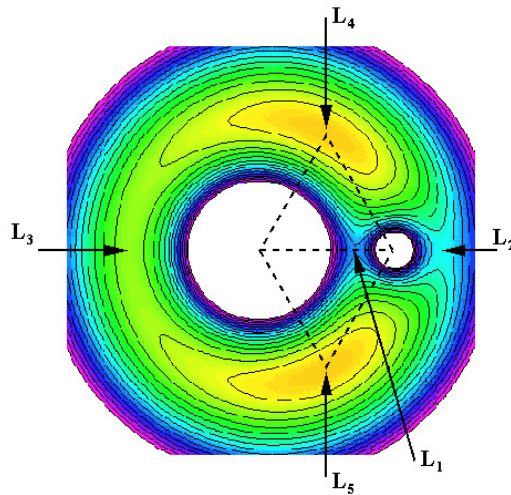
- **Algol típus:** Az ilyen rendszerekben a két csillag sugarukhoz képest nagy távolságra található egymástól, alakjuk emiatt nagyjából gömb. Fénygörbéiken ezért a fedéseken kívüli rész gyakorlatilag konstans fényességű, a fő-, és mellékminimumok mélysége között erős kontraszt látható. Periódusuk igen széles skálán mozoghat (néhány órától akár több 10000 napig).
- **β Lyr típus:** Ezen rendszerekben már sokkal közelebb található egymáshoz a két komponens, alakjuk ellipszoid. Emiatt keringésük során a rendszer fényessége folyamatosan változik, hiszen a csillagok, ha nem is fedik egymást, a különböző helyzetekben más-más geometriai összképet látunk. Fénygörbéiken a fő- és mellékminimumok mélysége közötti különbség jelentős, periódusuk jellemzően hosszabb egy napnál.
- **W UMa típus:** Ez a csoport szintén ellipszoid alakú tagokkal rendelkezik, ezért a fényességük a β Lyr típusúhoz hasonlóan folyamatosan változik, de ezek fénygörbéin a fő-, és mellékminimumok közel egyforma mélységűek, periódusuk pedig általában néhány tized nap.

1.1.2. Geometriai osztályozás

A fénygörbék szerinti osztályozás a fénygörbék látszólagos alakjára támaszkodik, ezért az asztrofizikai vizsgálatokhoz inkább az ilyen típusú rendszerek geometriai osztályozását szokás alkalmazni, amely az ún. Roche-térfogat kitöltöttségén alapul. A rendszer komponenseit tömegpontoknak tekintjük, így egy, a közös gravitációs térükben lévő P pontban az eredő potenciált a következő képlet írja le:

$$\Phi = -\frac{G \cdot M_1}{R_1} - \frac{G \cdot M_2}{R_2} - \frac{\omega^2}{2} \cdot R_0^2 \quad (1)$$

ahol R_1 és R_2 a P pontnak a két tömegponttól mért távolsága, M_1, M_2 a komponensek tömegei, G a gravitációs állandó, R_0 a P pont forgástengelytől mért távolsága és ω a keringés körfrekvenciája. Feltesszük, hogy a komponensek hidrosztatikai egyensúlyban vannak, azaz a gravitációs ekvipotenciális felületek mentén a sűrűség és a nyomás állandó, így az egyensúlyi állapotok kiszámításához csak a felületek geometriáját kell meghatároznunk.



1. ábra. Egy kettős rendszer gravitációs ekvipotenciális felületei a Lagrange-pontokkal. (Forrás: astro.u-szeged.hu)

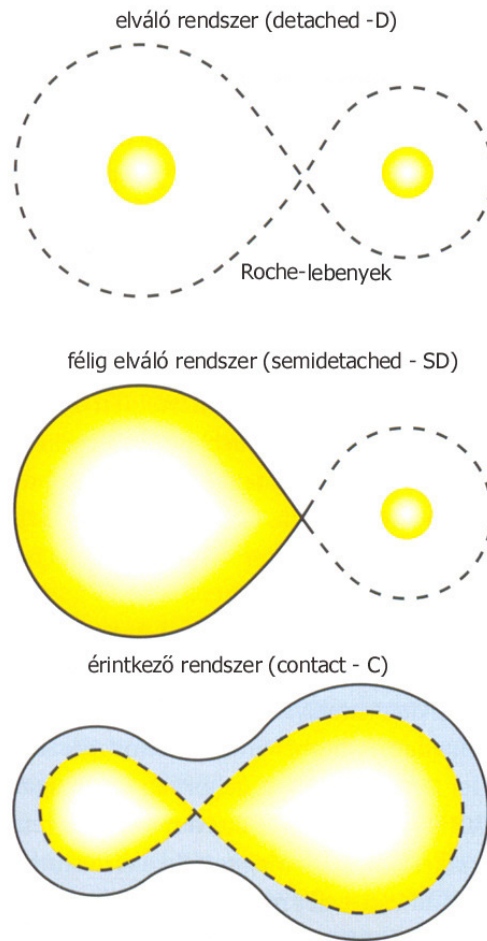
A potenciál jellegéből adódóan a rendszerben vannak olyan pontok, amelyekbe egy próbatestet helyezve az arra ható erők eredője zérus, ezeket hívjuk Lagrange-pontoknak. A Roche-térfogatot a rendszer azon gravitációs ekvipotenciális felülete által határolt térrész definiálja, amely tartalmazza az L1 Lagrange-pontot. Az egyes komponensek Roche-lebenyével egyező térfogatú gömbök sugarai számszerűleg is egyszerűen kiszámítható az alábbi közelítő képletek segítségével:

$$s_1 = A \cdot (0,38 - 0,2 \cdot \log q) \quad (2)$$

$$s_2 = A \cdot (0,38 + 0,2 \cdot \log q), \quad (3)$$

ahol s_1 és s_2 a kérdéses gömbök sugarai, A a pálya félnagytengelye, q pedig a komponensek tömegaránya.

Ez alapján megkülönböztetünk szétválasztott (*detached*), félig szétválasztott (*semi-detached*) és érintkező (*contact*) rendszereket, amelyek általában (ilyen sorrendben) megfeleltethetők az Algol-, β Lyr- és W UMa típusoknak. Szétválasztott rendszer esetén egyik komponens sem tölti ki Roche-térfogatát, félig szétválasztott esetén csak az egyik, míg érintkező esetén mindkettő.



2. ábra. Fedési kettőscsillagok geometriai osztályozása. (Forrás: astro.u-szeged.hu)

1.1.3. O-C diagram módszer

A fedési kettőscsillagok keringési periódusa általában hosszú távon valamilyen változást mutat. Ennek kimutatására az egyik legelterjedtebb eljárás az O-C diagram módszer,

melynek keretében a megfigyelt (Observed, O), illetve egy korábbi cikkből vett epochával (T_0) és periódussal (P) számolt (Calculated, $C = T_0 + P \cdot E$) minimumidőpontok különbségét ábrázolják a ciklusszám (E) vagy az idő függvényében. Az O-C görbe alakja utal a keringési periódus időbeli változásaira:

- Egyenes esetén a rendszer keringési periódusa időben állandó. Ha az egyenes nulla meredekségű, akkor a kalkulált időpontok számolásához használt periódusunk pontos volt, ha pozitív meredekségű, akkor az általunk használt periódus kisebb, illetve negatív meredekségű egyenes esetén nagyobb, mint a valódi keringési periódus. Ebből kifolyólag, ha két egymást metsző egyenest látunk, akkor az hirtelen periódusugrást jelenthet a metszéspont időpontjában.
- Parabola alakú O-C görbe esetén a keringési periódus az idővel lineárisan változik. Ilyenkor az O-C pontokat a következő kifejezés adja meg:

$$C = T_0 + P \cdot E + \frac{1}{2} \cdot P \cdot \frac{dP}{dt} \cdot E^2 \quad (4)$$

Az O-C pontokat pedig az alábbi képlet:

$$O - C = \Delta T_0 + \Delta P \cdot E + \frac{1}{2} \cdot P \cdot \frac{dP}{dt} \cdot E^2 \quad (5)$$

Attól függően, hogy a parabola felfelé vagy lefelé nyílik, a valódi keringési periódus nő vagy csökken. Ilyen változást okoz az érintkező rendszer komponensei közötti tömegátadás folyamata.

- Periodikus jellegű O-C görbe periodikus változást jelent a keringési periódusban. Ilyet okozhat például az apszisvándorlás, illetve harmadik komponens jelenléte a rendszerben. A tömegközéppont ilyenkor kis mértékű periodikus mozgást végez, a jelenséget fény-idő effektusnak nevezik.

1.1.4. Spektroszkópiai jellemzők

A komponensek egymáshoz, illetve a megfigyelőhöz viszonyított helyzetének folyamatos változása a színeképvonalak periodikus Doppler-eltolódását okozza, amit az alábbi összefüggéssel tudunk leírni:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{V_{rad}}{c} \quad (6)$$

ahol $\Delta\lambda$ az adott színeképvonal laboratóriumi körülmények között mért hullámhosszától (λ_0) vett eltérése, V_{rad} az adott komponens látóirányú (radiális) sebessége, c a fénysebesség.

A radiális sebességek a keringés során ciklikusan változnak egy alkalmasan választott nullszinthez képest, amely nem más, mint a rendszer tömegközéppontjának látóirányú

sebessége (gammasebesség, V_γ). Az ettől mért maximális eltéréssel definiáljuk a sebességamplitúdó (K) fogalmát:

$$K = V_{rad,max} - V_\gamma \quad (7)$$

amely közvetlen kapcsolatban áll a félnagy tengellyel (A):

$$K = \frac{2 \cdot \pi}{P \cdot \sqrt{1 - e^2}} \cdot A \sin i \quad (8)$$

ahol e a pálya excentricitása, i a pálya inklációja. Szoros kettőscsillagok esetén a keringés közelítőleg körpályán történik, tehát az excentricitás zérusnak vehető, így az előző képlet a következővé redukálódik:

$$K = \frac{2 \cdot \pi}{P} \cdot A \sin i \quad (9)$$

A komponensek tömegarányát (q) ezáltal a sebességamplitúdók hányadosa adja meg:

$$q = \frac{M_2}{M_1} = \frac{A_1}{A_2} = \frac{K_1}{K_2} \quad (10)$$

1.2. Érintkező kettőscsillagok

Az ilyen típusú rendszerekben mindkét komponens kitölti a Roche-térfogatát, tehát fizikai kontaktus jön létre közöttük az L1 Lagrange-ponton keresztül, ezáltal a két csillag hőmérséklete nagyjából azonos nagyságú. A komponensek általában fősorozati vagy ahhoz közeli állapotban vannak, tömegarányuk 0,1 és 0,9 között változik, keringési periódusuk rövid, jellemzően kevesebb, mint 1 nap.

Az érintkező kettőscsillagok keletkezésére és fejlődésére vannak elméleti modelljeink, de helyességük mindmáig nem teljesen tisztázott. Jelenleg úgy gondolják, hogy ilyen rendszerek kétféle módon jöhetnek létre:

1. A komponensek eleve érintkeznek egymással már a fősorozatra lépés előtti időben is. Ennek valószínűsége azonban csekély.
2. A komponensek között csak a fősorozaton alakul ki a kontaktus. Először a nagyobb tömegű, ezáltal gyorsabban fejlődő csillag növeli méretét mindaddig, amíg ki nem tölti a Roche-térfogatát, s ekkor anyagot kezd el átadni a másik csillagnak. Az átáramló anyag hatására idővel a másik csillag is eléri kritikus méretét, és az L1 pontban érintkezésbe kerülnek. Ezután megindul a komponensek közötti hőki-egyenlítődés, amely néhány millió év alatt végbemegy, és a rendszer stabilizálódik (Mészáros 2004).

A jelenleg leginkább elfogadott modell szerint az érintkező kettőscsillagokat egy, a belső Lagrange-felületen túlnövő, konvektív burok veszi körül, amely lehetőséget biztosít tömeg-

és energiátanszportra a komponensek között (Lucy 1967). Ez megfelelő magyarázatot ad a mellékkomponens megfigyelt többletluminozitására, a viszonylag kis hőmérsékletkülönbségekre, illetve a komponensek közötti tömegátadás által létrejövő periódusváltozásra, azonban a komponensek fejlődéséről és belső szerkezetéről keveset mond.

Egy alternatív elmélet szerint a termális egyensúly beálltakor a kisebbik csillagról kezd el átáramlani anyag a nagyobbikra, így az egyik csillag sugara csökkeni, a másiké nőni fog és idővel a rendszer félig érintkezővé válik. A főkomponens fejlődése miatt viszont a tömegátadás iránya ismét megfordul, majd az egész folyamat kezdődik előlről. Ezt nevezik *termális relaxációs oszcillációnak* (TRO, Lucy 1976, Lucy & Wilson 1979, Sarna & Fedorova 1989) Ezzel a feltevéssel csak az a probléma, hogy az eddigi megfigyelések nem támasztják alá.

Érintkező kettőscsillagok típusai (Binnendijk 1965, Lucy & Wilson 1979, Csizmadia & Klagyivik 2004):

- **A-típus:** A főkomponens hőmérséklete nagyobb, mint a mellékkomponensé. Nagyobb keringési periódus, össztömeg és felszíni hőmérséklet, azonban kisebb tömegarány jellemzi őket, mint a W-típust.
- **W-típus:** A mellékkomponens forróbb, mint a főkomponens. Az ún. kitöltöttségi faktor, amely az egybeolvadás mértékét adja meg, 10-20% közé esik, ami kisebb, mint az A-típusúaknál.
- **B-típus:** A komponensek közötti hőmérsékletkülönbség viszonylag nagy, akár az 1000 K-t is elérheti, azaz gyakorlatilag nem alakul ki köztük a termális egyensúly.
- **H-típus:** Ezen rendszerekben a komponensek tömegaránya igen nagy ($> 0,72$), és tömeg-luminozitás függvényük jelentős eltérést mutat a többi típushoz képest.

1.3. Irodalmi áttekintés a VW Cepheiről

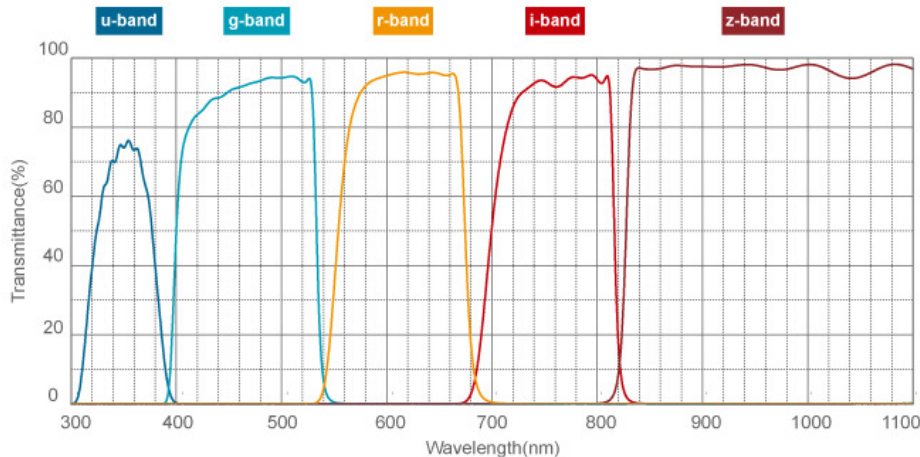
A VW Cephei (HD 197433, BD +75 752, HIP 101750) az egyik legtöbbet észlelt és tanulmányozott érintkező kettőscsillag, melynek fényváltozását először Schilt figyelte meg 1926-ban. Népszerűségét viszonylag nagy fényességének (V szűrőben 7,5 magnitúdó) és rövid keringési periódusának ($P=0,27831$ nap) köszönheti, hiszen a rövid periódusidő lehetővé teszi egy teljes keringés fotometriai leészlelését egy éjszaka alatt, illetve nagy fényessége miatt kisebb távcsövek számára is lehetőséget biztosít a mérésre. A rendszer szerencsére megéri az észlelést, ugyanis több különleges tulajdonsággal is rendelkezik: a két különböző fotometriai maximum nem egyforma magasságú a fénygörbén (*O'Connell-effektus*), a felszíni aktivitás változtatja a fénygörbe alakját és a fedések mélységét, illetve egy harmadik komponens is található a rendszerben, melynek létezését az általa okozott

fény-idő effektus segítségével Herczeg és Schmidt már 1960-ban megjósolta, és Hershey 1974-ben asztrometriai módszerekkel ki is mutatta.

A fénygörbealak változásának kimutatása az első nemzetközi észlelőprojektnek köszönhető, melynek leírására több lehetséges magyarázattal is előálltak: csillagkörüli gyűrű, rotációs tengelyek precessziója, anyagáram okozta forró folt, csillagfoltok. Végül a legutóbb említett csillagfoltok bizonyultak a megfelelő magyarázatnak a modellezések alapján (lásd pl. Kaszás és mtsai 1998). A rengeteg fotometriai adat mellett relatív kevés, spektroszkópai adatokat is felhasználó fizikai modellezés született a rendszerről: először Hill által 1989-ben, majd Kaszás és mtsai által 1998-ban. Emellett több cikk is született a kromoszférikus aktivitás vizsgálatáról $H\alpha$ vonalprofil-analízis felhasználásával: Barden 1985, Herbst és Bischel 1987, Frasca és mtsai 1996, Kaszás és mtsai 1998, Hendry és Mochnacki 2000. A VW Cephei-ről az előzőkön kívül még számos cikk látott napvilágot különböző, a rádiótól a röntgenig tartó hullámhossztartományokban végzett méréseknek köszönhetően (Szalai 2008).

2. Mérések és adatfeldolgozás

A fotometriai méréseket három egymást követő éjszakán, 2014. augusztus 8-a és 10-e között végeztem a Baján található, Bács-Kiskun Megyei Csillagvizsgáló Intézet 51 cm tükörátmérőjű, f/8,4 fényerejű, Ritchey-Chrétien szerelésű távcsövével, SDSS g, r és i szűrőkkel.



3. ábra. Az SDSS szűrőrendszer áteresztési sávjai. (Forrás: asahi-spectra.com)

A választás azért erre a távcsőre esett, mert a VW Cephei egy igen fényes csillag. ezért a fotometriához egy viszonylag fényes összehasonlító csillagra volt szükségem, és ez a távcső, illetve a rászertelt CCD-kamera tette lehetővé, hogy a legközelebbi, erre alkalmas csillag beférjen a látómezőbe.

A spektrumok 2014. augusztus 17-én és 18-án, az Eötvös Loránd Tudományegyetem Szombathelyen található, Gothard Asztrofizikai Observatórium és Multidiszciplináris Kutatóközpontjának 50 cm tükörátmérőjű, f/9 fényerejű, Ritchey-Chrétien szerelésű távcsövére kötött eShel spektrográffal készültek, amely egy 27 elhajlási rendben dolgozó, $R=11000$ -es felbontású echelle spektrográf, ezáltal képes a 420 és 870 nm közötti hullámhossztartományt egyenletesen lefedni.

2.1. A fotometriai mérések feldolgozása

A képek feldolgozását az Image Reduction and Analysis Facility, röviden IRAF nevű programmal végeztem. Az éjszakák folyamán előfordult, hogy felhők zavarták a mérést, ezért készültek rossz minőségű képek is, amelyeket a feldolgozás megkezdése előtt ki kellett válogatnom. Ehhez először a *.fits* képeket a kényelmesebb kezelés érdekében *.jpeg* formátumba alakítottam egy shell-scripttel, amely a DS9 nevű képkezelő programot hívja ehhez segítségül.

2.1.1. A szükséges képkorrekciók és további képfeldolgozási lépések

Ahhoz, hogy pontos eredményekhez juthassak, az elkészült *.fits* (Flexible Image Transport System) formátumú képeken először néhány korrekciót kellett végrehajtanom.

- **Bias-korrekció:** A CCD-chip pixelei közt lévő offset-feszültségnek köszönhetően, melynek segítségével a kiolvasást elvégezzük, még az alapállapotban lévő chip azonnali kiolvasása esetén is észlelünk egy alap jelszintet, amely minden képhez hozzáadódik. Ezt az alapértéket a képekből le kell vonnunk, ezért ehhez általában 0 s expozíciós idejű bias-képeket kell készíteni minden éjszaka méréseihez, melyeket utána a *noao.imred.ccdred.zerocombine* taszkkal összeátlagolva, az elkészült átlagolt bias-képpel az összes többi képet korrigáljuk a *noao.imred.ccdred.ccdproc* taszk segítségével (dark, flat, objektum). Én viszont ettől eltérően, arra a tényre alapozva, hogy a dark-képek is tartalmazzák ezt az alap jelszintet, nem készítettem külön bias-képeket, így a bias-korrekciót a dark-korrekcióval egy lépésben tudtam elvégezni.
- **Dark-korrekció:** Mivel a kamera nem abszolút nulla fokon üzemel, a hőmozgásból adódóan a pixelekben a hőmérséklettől függően különböző mennyiségű többletelektron válik ki (sötétáram), melyek növelik a mérési zajt. Ezen hatás mértékét a kamera egyszerű Peltier-elemmel való hűtésével ugyan igyekszünk csökkenteni, de megszüntetni nem tudjuk, ezért az adatfeldolgozás során figyelembe kell venni. (Kivételt képeznek ez alól a nagy obszervatóriumokban használt, folyékony nitrogénes hűtessel rendelkező kamerák, amelyek -180 °C körüli hőmérsékleten üzemelnek, ugyanis ekkor a sötétáram már elhanyagolhatóan kismértékűvé válik.)

Dark-képek készítésekor, a kamera rekesze (shutter) zárt állapotban van, így a kamera nem jut semmilyen fényhez és csak a hőmozgásból adódó többletelektronokat detektálja. A flat- és objektumképekhez egyaránt különböző expozíciós idejű darkokat készítettem minden éjszaka. A dark-képeket a *noao.imred.ccdred.darkcombine* nevű taszkkal tudtam összeátlagolni, majd az elkészült átlagolt képekkel korrigáljuk a flat- és objektumképeket, szintén a *noao.imred.ccdred.ccdproc* taszk használatával.

- **Flat-korrekció:** Az optikai elemeken lévő szennyeződések okozta képi hibákat, valamint a CCD-kamera pixeljeinek különböző kvantumhatásfokából eredő hibákat lehet vele korrigálni. A flat-képek elkészítésére praktikusán napnyugta után, illetve napkelte előtt van időnk, ha az ilyenkor körülbelül egyenletes fényességű égboltról készítünk képeket. Mivel én háromféle színszűrővel dolgoztam, ezért mindegyik szűrőhöz külön-külön szükséges volt flat-képeket készítenem.

A már bias- és dark-korrigált flat-képeket a *noao.imred.ccdred.flatcombine* nevű

taszkkal összeátlagoltam, majd a *noao.imred.ccdred.ccdproc* taszk segítségével, az elkészült átlagolt képpel korrigáltam az objektumképeket.

A képek megfelelő kiértékeléséhez további lépésekre is szükség volt:

- **A Julián-dátum beírása a *.fits* fájllokba:** A Julián-dátum (JD) a Kr.e. 4713.január 1. 12 UT-től eltelt napok számát adja meg úgy, hogy a nem egész napokat tizedesértékeknek felelnek meg, így ez a formátum nagyban megkönnyíti az időpontokkal végzett számolásokat. A Föld Nap körüli keringéséből adódó időeltolódás korrigálására szokás még elvégezni az időpontok heliocentrikus korrekcióját, ezáltal heliocentrikus Julián-dátumhoz (HJD) jutunk.

Ahhoz, hogy a különböző obszervatóriumokban készült mérések fénygörbéit egységes időformátumban, célszerűen heliocentrikus Julián-dátumban tudjuk megjeleníteni, át kell konvertálnunk a *.fits* fájllok fejlécében, UT-ban szereplő időket. Ehhez a *noao.astutil.setjd* taszkot alkalmaztam, amely az obszervatórium adatainak megadása után átszámolja a fejlécekben található UT értékeket heliocentrikus Julián-dátumba, majd beírja azokat.

- **A képek összetolása:** Mivel a távcső nagy pontossággal képes követni a csillagot, de tökéletesen nem, az éjszaka során a csillag helyzete a képeken kismértékben változik. A fotometria elvégzéséhez először el kell érniünk, hogy a csillag minden egyes képen ugyanabban a pozícióban legyen. Ezt a *noao.immatch.xregister* taszkkal tudtam megtenni a legegyszerűbb módon, amely az összes képet egy megadott referenciaképhez illeszti. Mivel így a képek szélénél elvesz néhány sornyi/oszlopnyi információ, a mérésnél ügyelni kell arra, hogy a mérendő objektum nagyjából a kép közepén tartózkodjon.

2.1.2. Az apertúra- és a differenciális fotometria elve

Apertúra-fotometria esetén a csillag fényességét úgy határozzuk meg, hogy a képeken egy képzeletbeli, leggyakrabban kör alakú nyílást (apertúrát) helyezünk a csillag köré, és az ezen belül található pixelek intenzitását összeadjuk:

$$I_{teljes} = \sum I_i \quad (11)$$

Az apertúra méretét minden esetben úgy kell megválasztani, hogy a csillag minél nagyobb részét lefedje a képen (ez célszerűen a csillagprofil félértékszélességével megegyező nagyságú apertúrát jelent), de emellett a háttérből minél kisebb részt tartalmazzon, ugyanis ez növeli a mérésünk hibáját. Ennek a hibának a kiszűrésére még egy gyűrű alakú nyílást is felveszünk, és a benne lévő háttér pixeleinek átlagintenzitását (I_h) a pixelek

számával (N) felszorozva levonjuk az összintenzitásból:

$$I_{csillag} = \sum I_i - N \cdot I_h \quad (12)$$

Ezután a csillag intenzitásából az instrumentális fényességet egyszerűen megkaphatjuk a következő összefüggésből:

$$m = -2,5 \cdot \lg \left(\sum I_i - N \cdot I_h \right) \quad (13)$$

Az ilyen módon kapott magnitúdó-értékekből levonjuk egy állandó fényességű, ún. összehasonlító csillag fényességét. Ellenőrzés céljából képezzük az összehasonlító és egy harmadik, ún. ellenőrző csillag fényességének különbségét is, amit ha az idő függvényében ábrázolva egy jó közelítéssel nulla meredekségű egyenest kapunk, akkor a kiválasztott csillag valóban alkalmas az összehasonlító szerepre. Ezt az eljárást differenciális fotometriának nevezzük, amely megadja a csillag relatív fényességváltozását, amit az idő függvényében ábrázolva megkapjuk a csillag fénygörbéjét.

2.1.3. A fotometrázás menete

Miután elkészültek a korrigált, összetolt és heliocentrikus Julián-dátummal ellátott képeink, hozzákezdhettem a fotometriához. Először az *imexamine* taszkkal elmentettem a vizsgált, az összehasonlító, valamint az ellenőrző csillag képi koordinátáit, majd a lementett koordináták megadása után az egyes csillagok heliocentrikus Julián-dátumához tartozó fényességét a *noao.digiphot.apphot.phot* taszkkal nyertem ki.

A kapott „*.mag.l” fájlokból a szükséges információkat (heliocentrikus Julián-dátum, magnitúdó, magnitúdó-hiba) a *noao.digiphot.ptools.txdump* taszkkal egy egyszerű adatfájlba irányítottam, s utána ezt egy *awk*-szkripttel úgy alakítottam át, hogy azokból a különböző időpontokhoz tartozó fényességkülönbségeket kapjam meg.

Végül az elkészült fénygörbéket a Gnuplot nevű programmal ábrázoltam.

2.2. Fénygörbe-modellezés

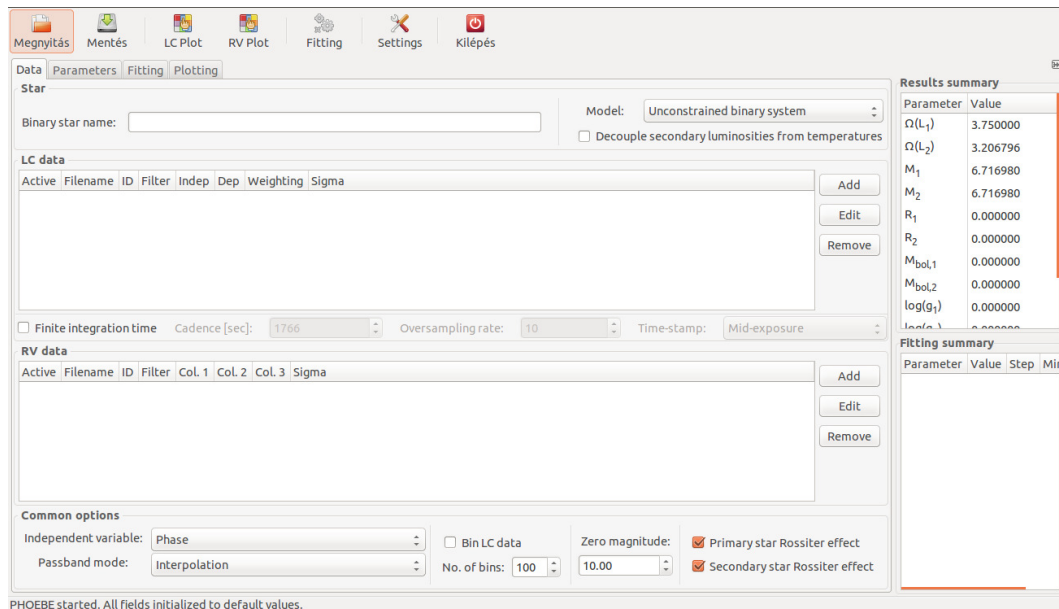
A mérési adatokból numerikus modellek segítségével kinyerhetők a kettős rendszerek fizikai és geometriai paraméterei. Erre a feladatra leggyakrabban az R. E. Wilson és E. J. Devinney által 1971-ben készített Wilson–Devinney-kódot használják, ami eredetileg egy FORTRAN nyelven íródott program volt. Az idők során számos frissítéssel és fejlesztéssel bővült, illetve néhány grafikus felülettel rendelkező programcsomag alapjául is szolgált, mint például a BinaryMaker vagy a PHOEBE. Munkám során az utóbbit használtam a 2009-ben és 2014-ben készült fénygörbék illesztéséhez.

2.2.1. PHOEBE

A programot egy csillagászokból álló nemzetközi csoport fejlesztte¹, ingyenesen letölthető és használható bárki számára. Neve egy mozaikszó, amely az angol **PH**ysics **O**f **E**clipsing **B**inari**E**s („az érintkező kettősök fizikája”) kifejezésből ered. A program három alapvető részből épül fel: *lib*, *gui* és *scripter*.

- *lib*: A program központi része, ami tartalmazza a modellezéshez szükséges függvényeket, illetve algoritmusokat. A felhasználó a *gui*-n és a *scripter*-en keresztül kommunikálhat ezen résszel.
- *gui*: A program grafikus felülete, amelyen keresztül irányíthatjuk a *lib*-et. Megadhatjuk a mérési adatok elérhetőségét, az illesztéshez használni kívánt paraméterek kezdeti értékét, illetve ábrázolhatjuk a mért és a szintetikus fénygörbéket.
- *scripter*: Használata opcionális, főként statisztikai tesztek és nagyobb adathalmazok vizsgálatának elvégzésekor lehet hasznos. Lehetőséget nyújt különböző, a *lib*-et vezérlő *szkript*-ek írására, amihez azonban a program működésének és felépítésének magasfokú ismerete szükséges.

A program grafikus felülete négy ablakból tevődik össze: mérési adatok, illesztési paraméterek, illesztés és ábrázolás.

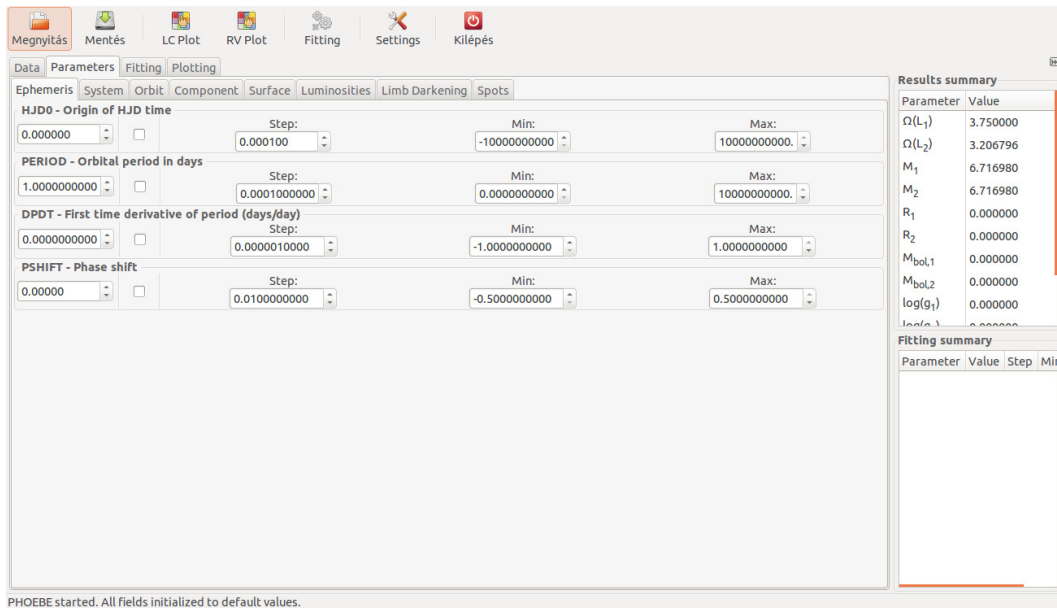


4. ábra. A mérési adatokhoz tartozó ablak a PHOEBE programcsomagban.

Itt adhatjuk meg a modellezéshez használni kívánt mérési adatok elérési útját. Kiválaszthatjuk, hogy milyen szűrővel mértünk, illetve az adatfájlokban található mérési

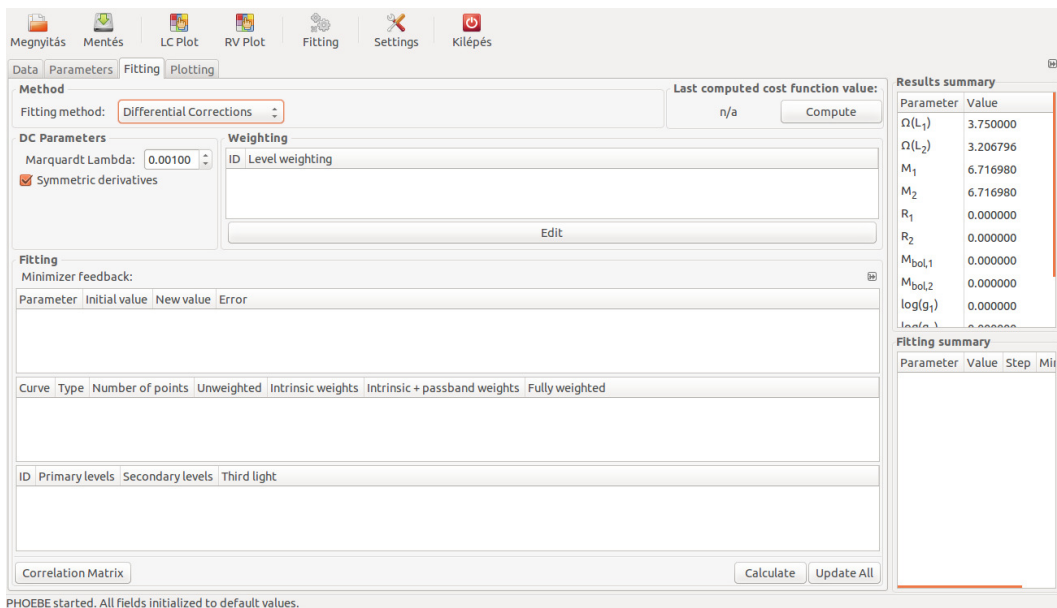
¹<http://www.phoebe-project.org/?q=node/7>

adatok milyen mennyiségeket fejeznek ki (HJD/fázis, magnitúdó/fluxus). Szintén itt kell megadnunk még, hogy milyen típusú kettőst szeretnénk modellezni (érintkező, félig érintkező, stb.).



5. ábra. Az illesztési paraméterekhez tartozó ablak a PHOEBE programcsomagban.

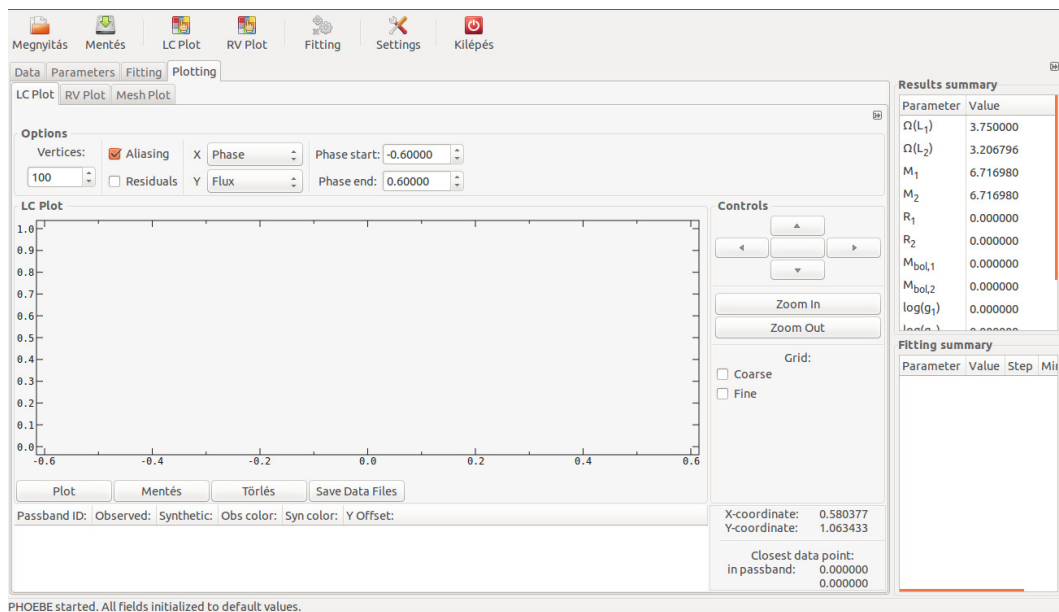
Itt beállíthatjuk a különböző paraméterek kezdeti értékeit, illetve kiválaszthatjuk, hogy melyeket szeretnénk illeszteni és melyeket fixen tartani. Megadhatjuk továbbá az iteráció során alkalmazni kívánt lépésközt és intervallumhatárokat.



6. ábra. Az illesztési folyamathoz tartozó ablak a PHOEBE programcsomagban.

Miután beállítottuk a kezdeti paramétereket, az illesztési ablakban a *Calculate* gomb megnyomására a program elvégző egy iterációs lépést, majd kiírja az illesztett paraméterek kezdeti és új értékét, illetve az illesztési hibákat. Ezt követően eldönthetjük, hogy elfogadjuk-e az új értékeket vagy sem. Ha elfogadjuk akkor az *Update all* gombot kell megnyomnunk és iterálhatunk tovább, ha nem fogadjuk el, akkor pedig a paraméterek ablakhoz visszatérve manuálisan finomíthatunk az értékeken.

Ennek eldöntését nagy mértékben megkönnyíti, hogy a beépített ábrázoló ablakban akár minden egyes iteráció után megnézhetjük, a kapott paraméterekkel mennyire jó az aktuális modellünk. Ábrázolhatjuk a mért és illesztett fénygörbét, ezek különbségét illetve a rendszer geometriai modelljét bármilyen keringési fázisban a paraméterek aktuális konfigurációja alapján.



7. ábra. A beépített ábrázoló ablak a PHOEBE programcsomagban.

2.3. A spektroszkópiai mérések feldolgozása

2.3.1. Hullámhossz-kalibrált és kontinuumnormált spektrumok előállítása

Spektroszkópiai mérések alkalmával szintén bias-, dark-, flat- és objektumképek készülnek, de ezeken felül még spektrállámpa-képeket is kell készíteni az objektumspektrumok későbbi hullámhossz-kalibrációjához. A nyers képeket, hasonlóan a fotometriai mérésekhez, az IRAF segítségével dolgoztam fel. Először itt is az alapvető korrekciók elvégzésére volt szükségem. A bias- és a dark-korrekció teljesen ugyanúgy zajlik, mint a fotometriánál, annyi kiegészítéssel, hogy értelemszerűen a spektrállámpa-képekre is el kell végezni őket. A flat-korrekció egy kicsit módosul, ugyanis a nyers flatképeken az apertúrákon kívül eső részeken az intenzitás nulla, így nem oszthatunk le rögtön az átlagolt flatképpel. Ezt a *noao.imred.echelle.apflatten* taszk használatával tudjuk kiküszöbölni, amely a beadott átlagolt flatkép pixelértékeit 1-re normalálja és az így kapott képpel a flat-korrekció már elvégezhető.

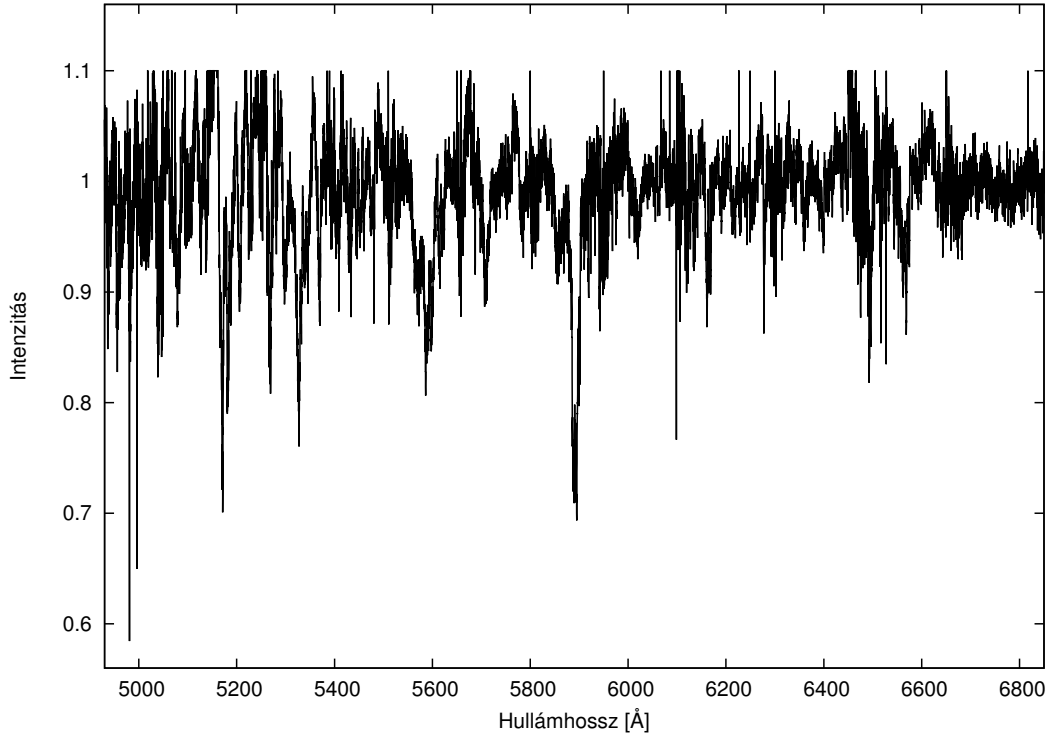
Ezután következik az objektumképek hullámhossz-kalibrációja a ThAr-spektrállámpáról készült felvételek alapján. Ehhez a *noao.imred.echelle.doecslit* taszkot hívtam segítségül, amellyel az objektum-, illetve spektrállámpa-képek listájának megadása után egy ThAr-spektrálatlasz alapján először manuálisan be kellett azonosítanom rendenként legalább 2-3 spektrumvonalat. Ezt követően az IRAF a saját spektrálatlasza alapján be tudta azonosítani közel az összes többi vonalat a képen, majd előállítottam a diszperziós függvényt, amely megadja, hogy az egyes pixelkoordinátákhoz milyen hullámhossz rendelhető. Ezzel aztán az összes képen elvégeztem a pixelkoordináták átváltását hullámhosszértékekre, és így előálltak a hullámhossz-kalibrált objektumspektrumok.

Végző lépésben még szükséges volt az objektumspektrumok kontinuumnormálása is, azaz a spektrumok intenzitásértékeinek 1-re való normálása, ami W UMa-típusú csillagok esetében a spektrumvonalak erős kiszélesedése miatt nem egyszerű feladat. Ezt a *noao.imred.echelle.continuum* taszkkal végeztem el, kétlépcsős polinomfüggvény-illesztéssel.

2.3.2. Radiális sebesség-görbe elkészítése

A hullámhossz-kalibrált, kontinuum-normált spektrumokból a komponensek látóirányú sebességeit (V_{rad}) keresztkorrelációs technikával határoztam meg, melynek lényege, hogy a vizsgált objektum színeképét keresztkorreláltatjuk egy hasonló spektráltípusú, ismert és időben állandó radiális sebességgel rendelkező csillagéval. Ily módon előáll az ún. keresztkorrelációs függvény (Cross-Correlation Function, CCF) a következő összefüggés szerint:

$$C_{f,g}(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot g(x - y) dx \quad (14)$$



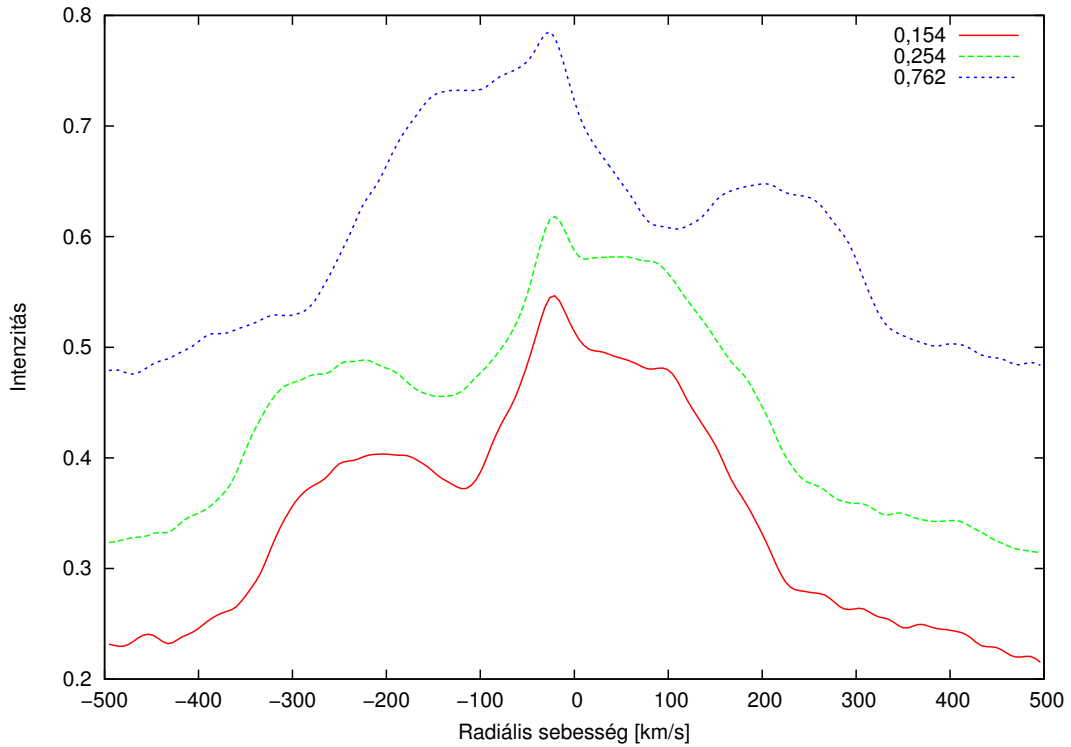
8. ábra. A VW Cephei hullámhossz-kalibrált, kontinuumnormált színképe.

ahol f és g függvények az egyes spektrumokat jelentik. A sebességeket ezáltal az azonos spektrumvonalak hullámhosszeltolódásából határozhatjuk meg úgy, hogy az egyes komponensek sebességprofiljaira Gauss-görbéket illesztünk, és ezek maximumhelyeit azonosítjuk a komponensek aktuális látóirányú sebességeivel.

A keresztkorrelációhoz egy 5000 K effektív hőmérsékletű elméleti csillagspektrumot használtam, amit egy a Munari és mtsai által 2005-ben leközölt weboldalról² töltöttem le a következő paraméterek mellett: felszíni gravitációs gyorsulás: $\log g = 4,0$, fémeség: $[Fe/H] = 0,0$, forgási sebesség: $v_{rot} = 0 \frac{km}{s}$. Az objektumspektrumok különböző hullámhossztartományú rendjeit először össze kellett illesztenem, ehhez a szükséges tartományokat a *noao.imred.echelle.scopy* taszkjával vágtam ki a spektrumokból, majd a *noao.imred.echelle.scombine* taszkkal egymáshoz fűztem őket. Ezt minden egyes spektrum esetében a 4930-6850 Å tartományra végeztem el, mert a jel/zaj arány ezen tartományon bizonyult elfogadhatónak.

A keresztkorrelációs függvényeket a *noao.rv.fxcor* taszkkal hoztam létre úgy, hogy a széles $H\alpha$, illetve Na D vonalakat a nagyobb pontosság elérése érdekében kihagytam a keresztkorrelációból. A továbbiakban a CCF-profilok -500 és $+500 \frac{km}{s}$ közötti részeivel dolgoztam.

²http://archives.pd.astro.it/2500-10500/download_single1.php (Munari és mtsai, 2005)

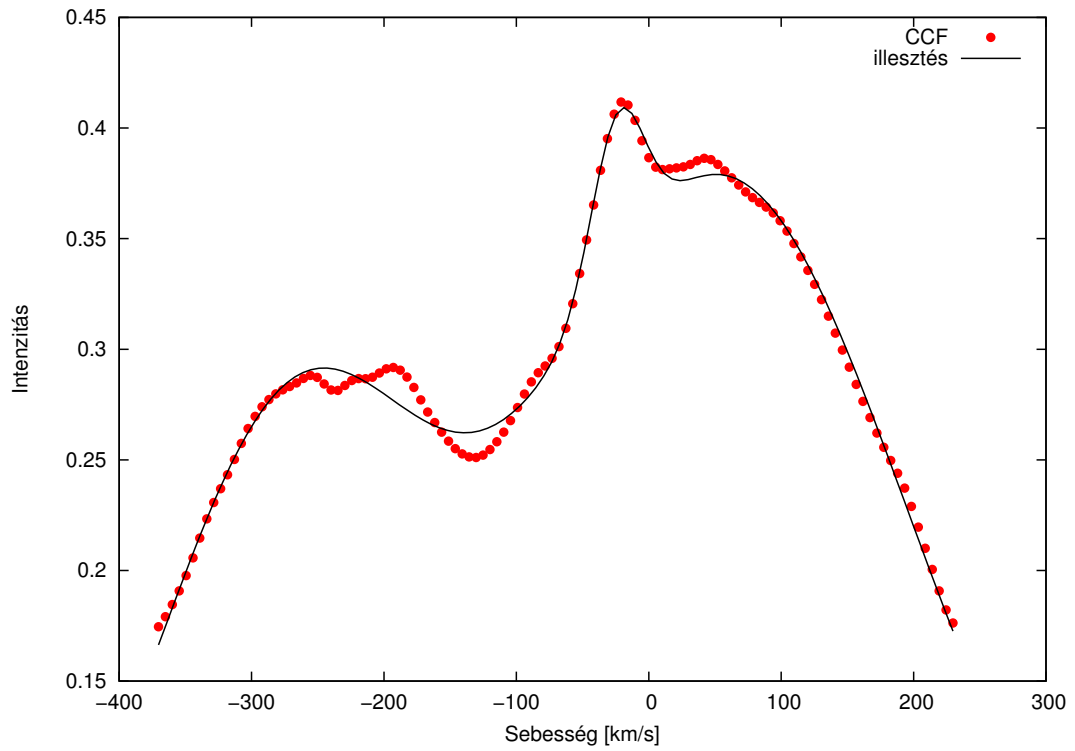


9. ábra. CCF-profilok különböző fázisoknál. (A megfelelő szemléltetéshez a görbékelt egymáshoz képest függőlegesen eltoltam.)

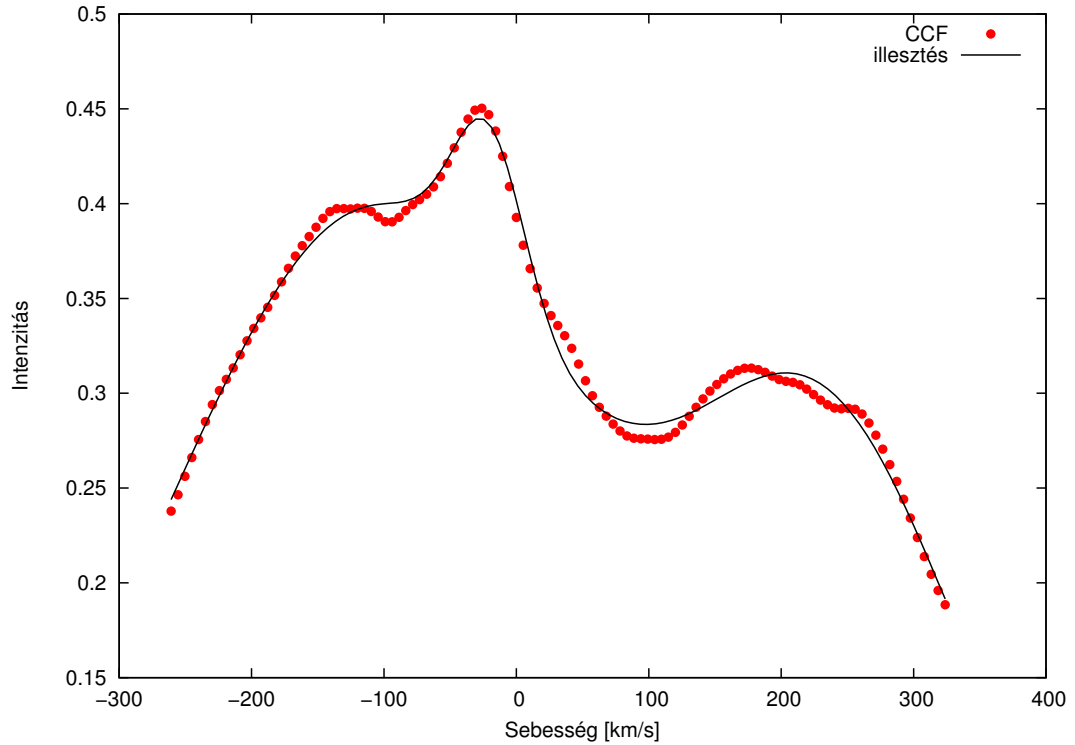
A CCF-profilokon látható három csúcs a rendszerben található három komponens jelzi, melyek közül a harmadik komponens sebességprofilja $0 \frac{km}{s}$ környékén található. Az egyes komponensek sebességprofiljaira a Gnuplot segítségével három darab

$$f(x) = \frac{c}{a \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{\frac{-(x-b)^2}{2 \cdot a^2}} \quad (15)$$

alakú Gauss-függvény összegét illesztettem, melyek maximumai az $x=b$ helyen található, azaz a b illesztési paraméter közvetlenül megadja a komponensek aktuális radiális sebességét. A Föld mozgásának figyelembevételéhez a kapott sebességekre még el kellett végezni a heliocentrikus korrekciót az IRAF *noao.rv.rvcorrect* nevű taszkjával.



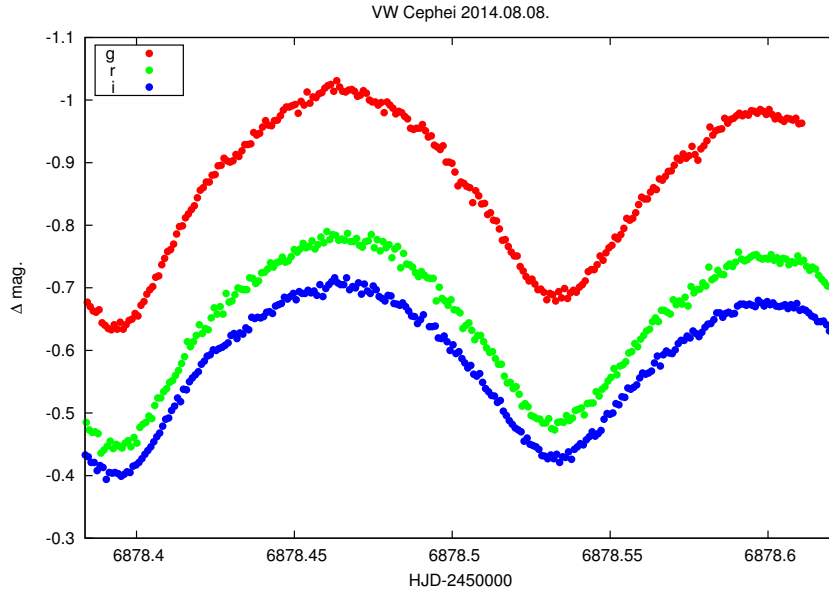
10. ábra. 0,278 fázisú CCF-profil a ráillesztett Gauss-görbék összegével.



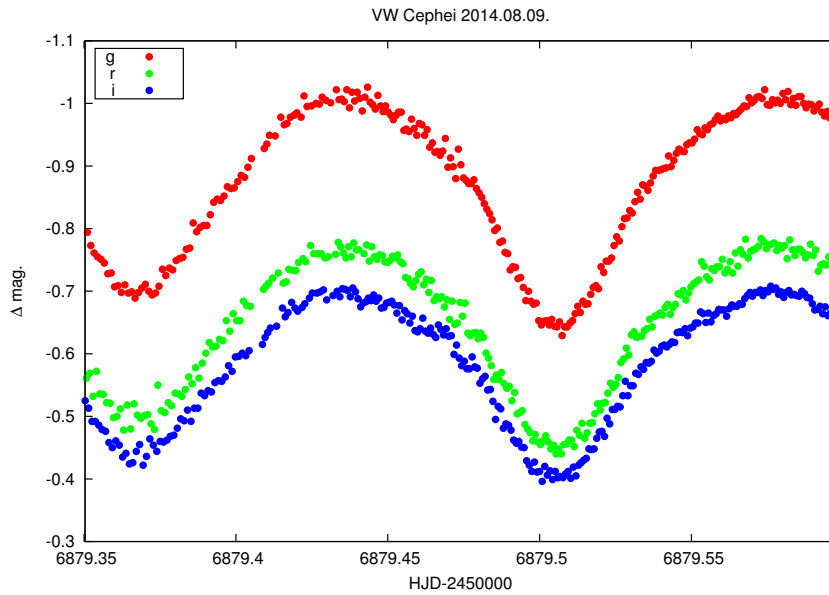
11. ábra. 0,767 fázisú CCF-profil a ráillesztett Gauss-görbék összegével.

3. Eredmények

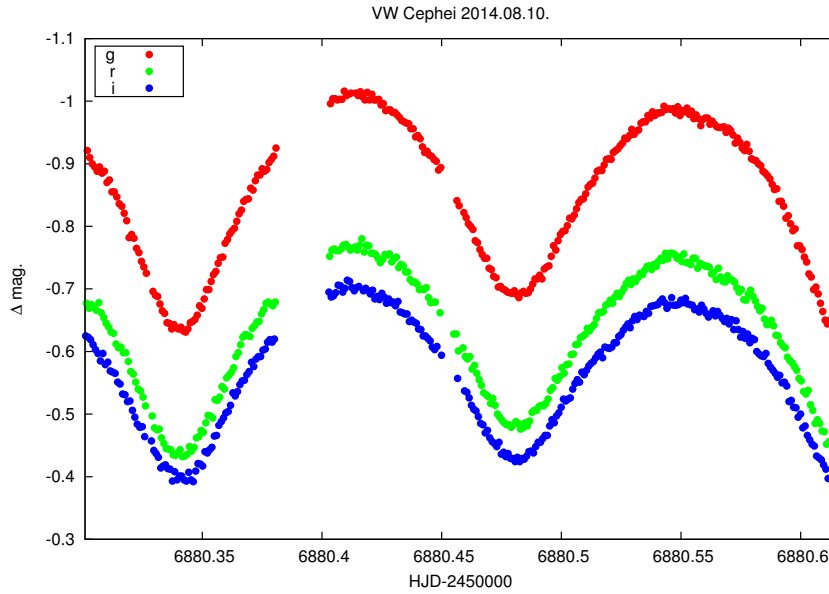
3.1. Az elkészült fénygörbék



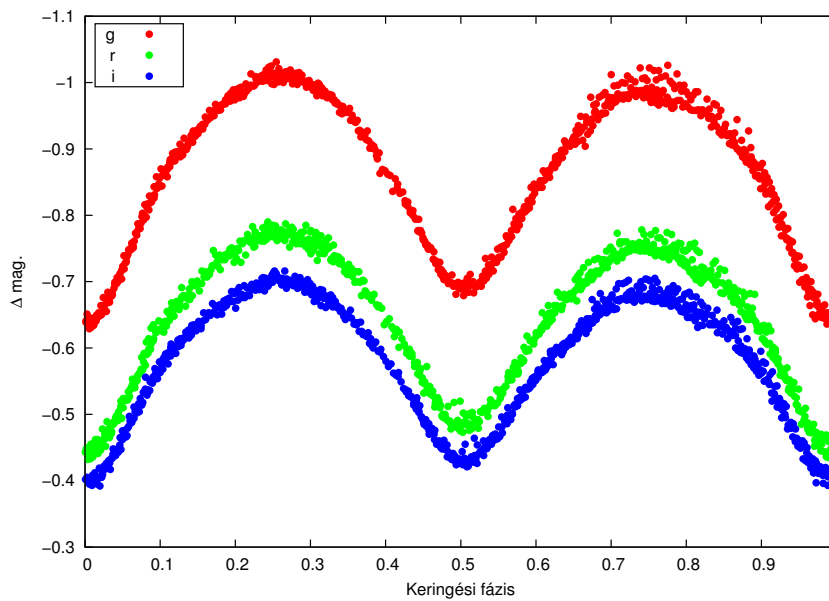
12. ábra. A VW Cephei 2014. augusztus 8-i differenciális fénygörbéi g,r és i szűrőkben.



13. ábra. A VW Cephei 2014. augusztus 9-i differenciális fénygörbéi g,r és i szűrőkben.



14. ábra. A VW Cephei 2014. augusztus 10-i differenciális fénygörbéi g,r és i szűrőkben.



15. ábra. Az előző fénygörbék keringési fázis szerint rendezve.

3.2. Minimumidőpontok

A kilenc fénygörbe minden fő- és mellékminimumára illeszttem a Gnuplot segítségével egy $a \cdot x^2 + b \cdot x + c$ alakú másodfokú polinomot, melynek $2 \cdot a \cdot x + b$ alakú deriváltját nullával egyenlővé téve x -re egy elsőfokú egyenletet kaptam. Ennek $x = \frac{-b}{2a}$ megoldása a polinom lokális szélsőértékét, jelen esetben lokális minimumát, azaz a görbe minimumidőpontját adja. A hibákat az illesztés paramétereinek hibáiból, a hibaterjedés képlete segítségével számoltam ki. A különböző szűrővel készült fénygörbék minimumidőpontjait és azok

hibáit a nagyobb pontosság érdekében éjszakánként átlagoltam és ezeket használtam fel a továbbiakban a periódusvizsgálathoz.

Dátum	HJD_{min}	ΔHJD_{min}	Típus
2014.08.08.	2456878,39353	0,047620	I
2014.08.08.	2456878,53417	0.022393	II
2014.08.09.	2456879,50608	0,019470	I
2014.08.09.	2456879,36845	0.037772	II
2014.08.10.	2456880,34075	0,013315	I
2014.08.10.	2456880,48214	0.020257	II

1. táblázat. A fénygörbékből meghatározott minimumidőpontok.

A későbbiekben a keringési fázisokat (ϕ) minden esetben az utolsó általam kimért főminimum-időpont segítségével számoltam ki a következő összefüggés alapján:

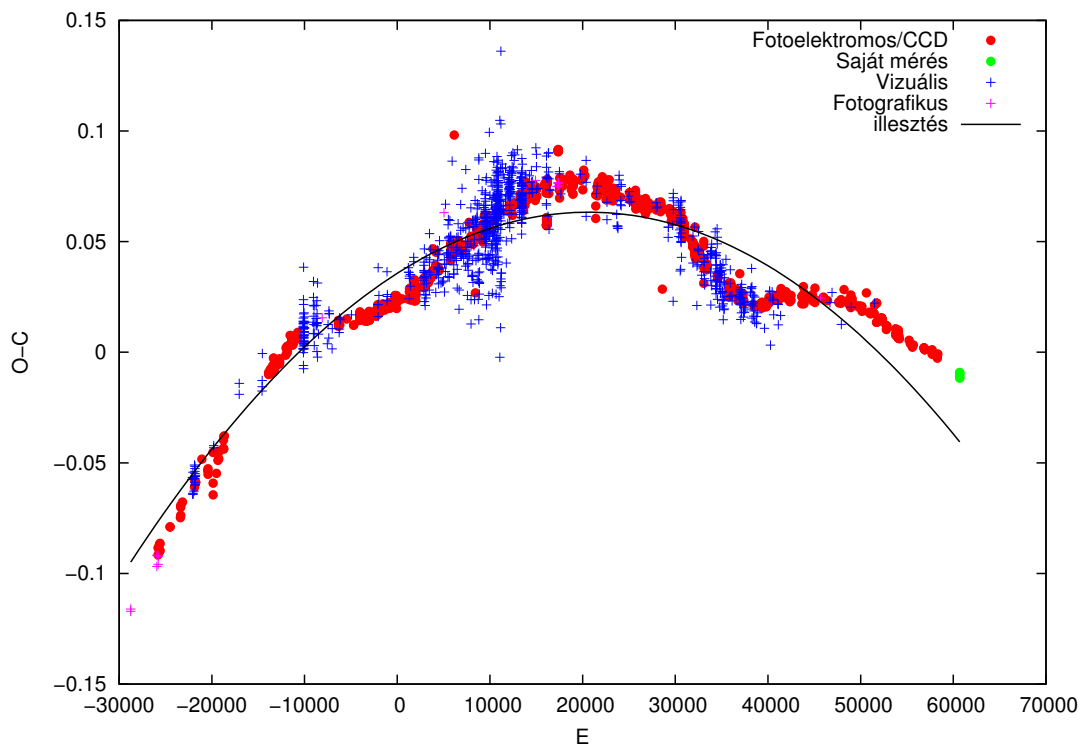
$$\phi = \frac{HJD - HJD_{min}}{P} - \left[\frac{HJD - HJD_{min}}{P} \right] \quad (16)$$

Tehát a dolgozatban fázis alatt mindenhol ezt az ún. fotometriai fázist értem, és minden alkalommal ezt használom.

3.3. Periódusvizsgálat

Az O-C diagram előállításához az Anton Paschke és Bc.Lubos Brát által szerkesztett „O-C gateway„ nevű weboldalt³ hívtam segítségül. Az oldalon megtalálható az irodalomban eddig megjelent összes minimumidőpont a VW Cephei-hez, illetve ezekhez saját mérésekből származó minimumidőpontokat is hozzáadhatunk, majd kiszámoltathatjuk a hozzájuk tartozó O-C értékeket, melyek számolásához az oldal a $T_0 = 2439987,401$ epochát és a $P_0 = 0,2783115$ napos periódust használja. Miután ez megtörtént, az adatokat lementettem egy fájlba, majd egy *awk* parancs segítségével kiszűrtem a számomra szükséges főminimum-időpontokat a hozzájuk tartozó O-C értékekkel és ciklusszámokkal együtt. Végül ezekből a Gnuplot segítségével kirajoltam az O-C diagramot.

³<http://astro.sci.muni.cz/variables/ogate/>



16. ábra. A VW Cephei O-C diagramja a ráillesztett parabolával ($T_0 = 2439987,401$, $P_0 = 0,2783115$).

Az O-C görbe ránézésre összetett. Első közelítésben egy parabolikus trend figyelhető meg rajta, ezért a Gnuplot segítségével illesztettem rá egy $a \cdot E^2 + b \cdot E + c$ alakú polinomot, majd az

$$O - C = \Delta T_0 + \Delta P \cdot E + \frac{1}{2} \cdot P \cdot \frac{dP}{dt} \cdot E^2 \quad (17)$$

összefüggés alapján, ahol $\Delta P = P - P_0$, az illesztési paraméterek felhasználásával meghatároztam a jelenlegi periódust, illetve a periódusváltozás ütemét.

Paraméter	Érték	Hiba
P [nap]	0,2783141762	$3,765 \cdot 10^{-8}$
$\frac{dP}{dt}$ [$\frac{\text{nap}}{\text{nap}}$]	$-4.655 \cdot 10^{-10}$	$6.85 \cdot 10^{-12}$

2. táblázat. A meghatározott fizikai paraméterek és hibáik.

3.4. Fénygörbe-modellek és meghatározott paraméterek

Az általam mért fénygörbéken kívül Borkovits Tamás jóvoltából lehetőségem nyílt 2009 júliusában készült, eddig publikálatlan fénygörbék modellezésére is. Mivel ezek az enyé-
mekhez hasonlóan differenciális fénygörbék voltak, így nem tudtam belőlük meghatározni
a komponensek effektív hőmérsékletét, ezért a Kaszás és mtsai (1998) cikkben szereplő
értékeket használtam kezdeti értéként. A fényesebb komponens effektív hőmérsékletét
fixen tartottam a modellezés során, amire azért volt szükség, mert a komponensek effek-
tív hőmérsékletei között erős korreláció van. Fix paraméterként használtam továbbá a
spektroszkópai mérésekből meghatározott tömegarányt (q) és gammasebességet (V_γ), va-
lamint a csillagfoltok relatív hőmérsékletét ($T_{folt}/T_{eff,1} = 0,7$). Az illesztett paraméterek
a főkomponens effektív hőmérséklete, az inklináció, a három komponens luminozitása, a
szélsőtétedési koeficiensek, a csillagfoltok koordinátái és sugarai voltak.

A legjobb illeszkedésű görbéket a következő táblázatban felsorolt értékek alkalmazá-
sával kaptam:

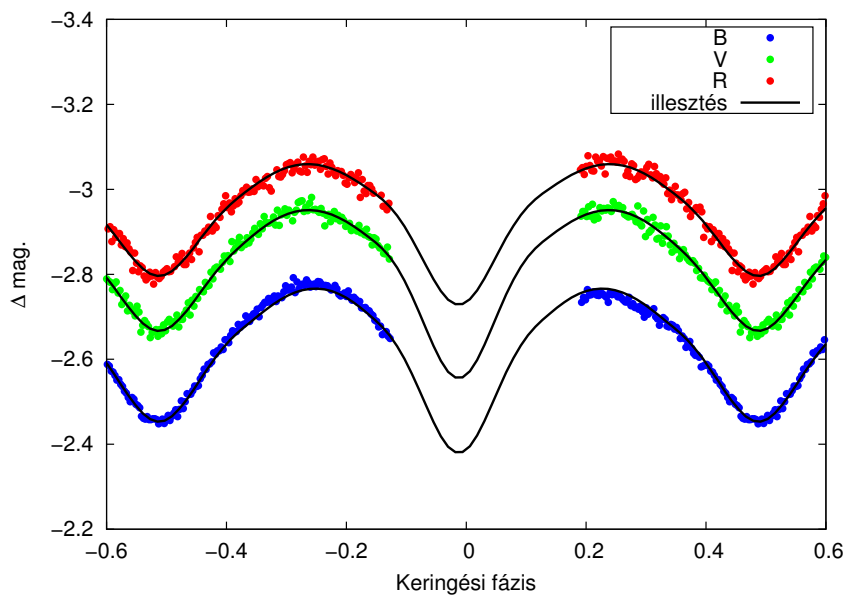
Paraméter	Érték	Kaszás és mtsai (1998)
q^*	0,341	0,35
$V_\gamma^* \left[\frac{km}{s}\right]$	-22,22	-16,4
$a \ [10^6 km]$	1,385	1,388
$i \ [^\circ]$	63,0	65,6
$T_{eff,1} \ [K]$	4922	4656
$T_{eff,2}^* \ [K]$	5050	5050
$\Omega(L_1)$	2,56	–
$\Omega(L_2)$	2,34	–
$M_1 \ [M_\odot]$	1,02	1,01
$M_2 \ [M_\odot]$	0,35	0,36
$R_1 \ [R_\odot]$	0,95	–
$R_2 \ [R_\odot]$	0,58	–

3. táblázat. A fénygörbe-illesztésekből meghatározott paraméterek (a csillag azt jelöli,
hogy az adott paramétert az illesztés során fixen tartottam).

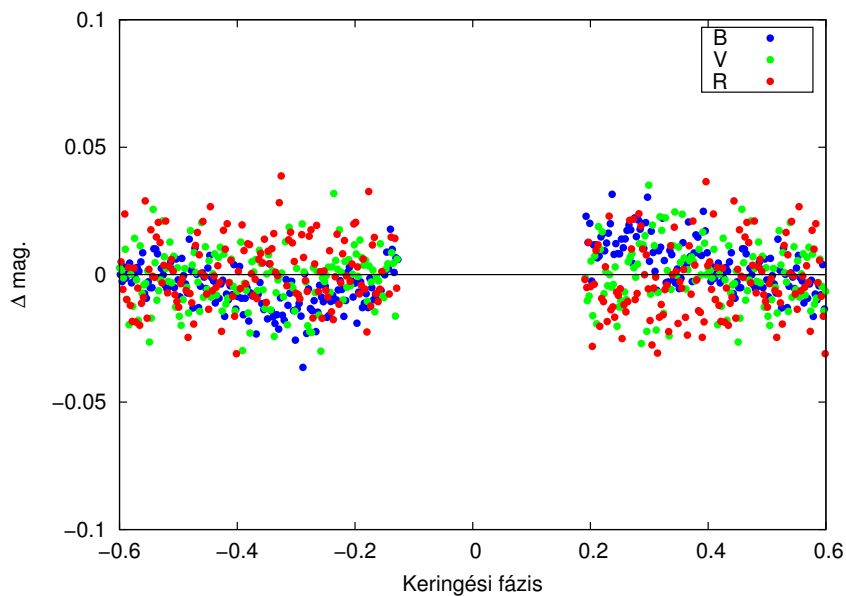
3.4.1. A 2009-es fénygörbék modelljei

A Kaszás és mtsai (1998) cikkben kimutatott aktivitási ciklus alapján 2009-re jelentősebb
felszíni aktivitás volt előrejelezhető. Ennek vizsgálatához 2009 júliusából kilenc éjszaka
fénygörbéi álltak a rendelkezésemre, melyek közül itt csak kettőt mutatok be, a maradék

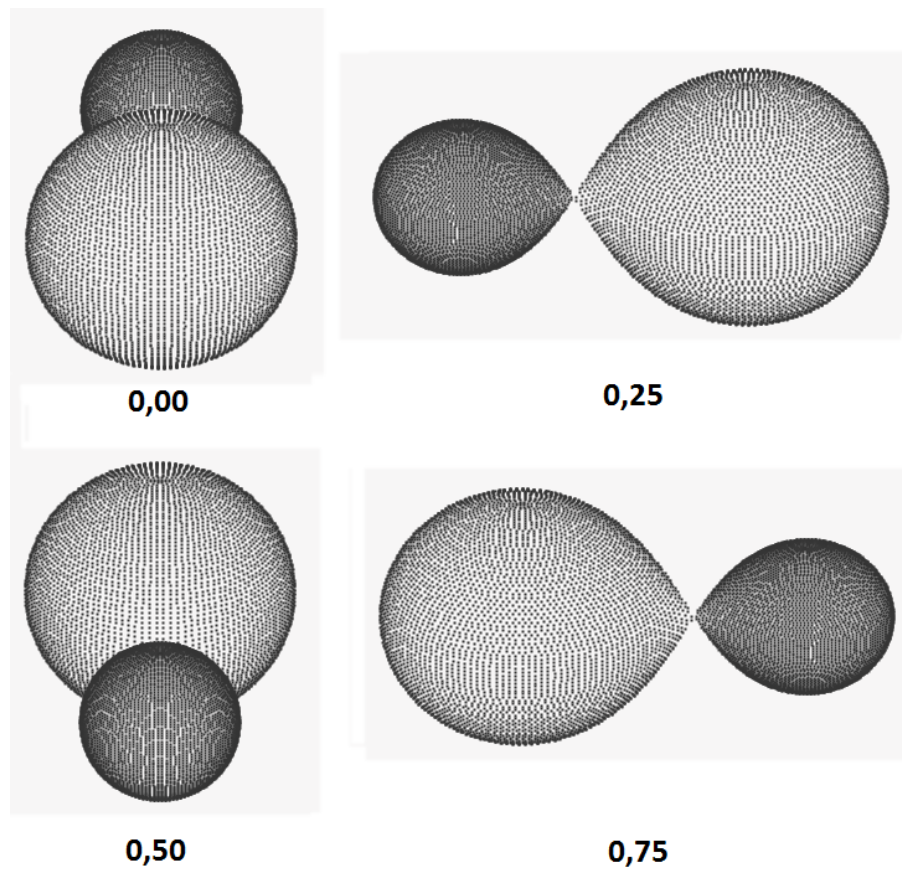
hét a dolgozat végén található függelékben megtekinthető. A mérések összefüggő éjszakákon készültek, így segítségükkel a folttevékenység rövidtávú változásai is kimutathatóak voltak.



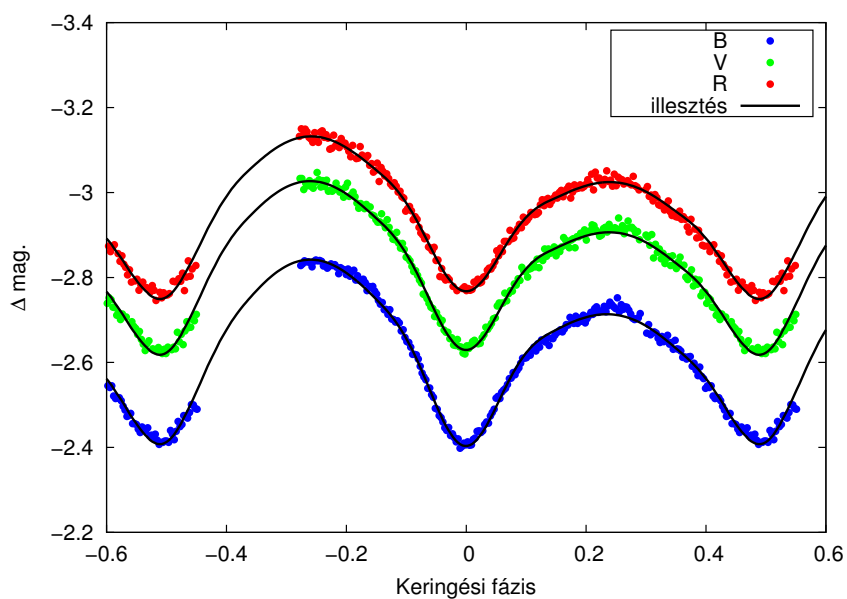
17. ábra. A megfigyelt és illesztett fénygörbék 2009. július 16-án.



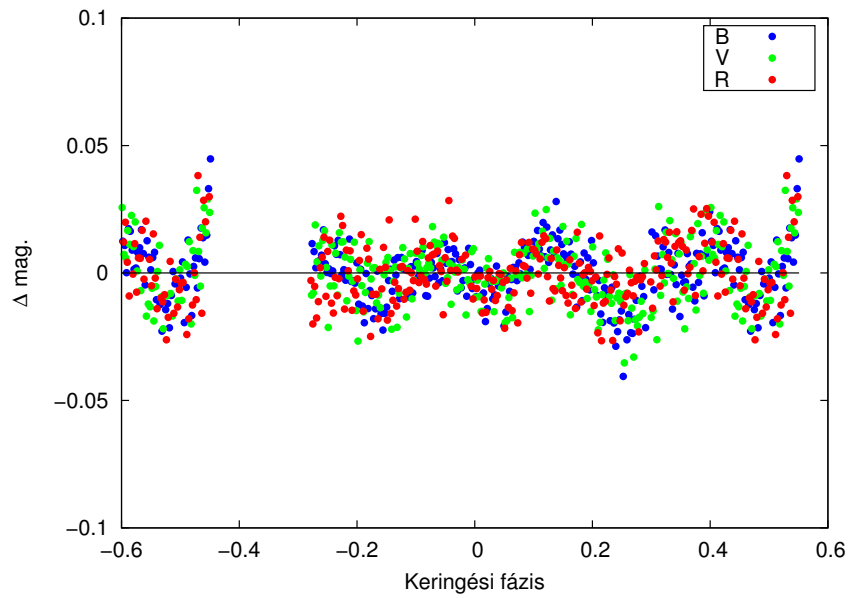
18. ábra. A megfigyelt és illesztett fénygörbék különbségei 2009. július 16-án.



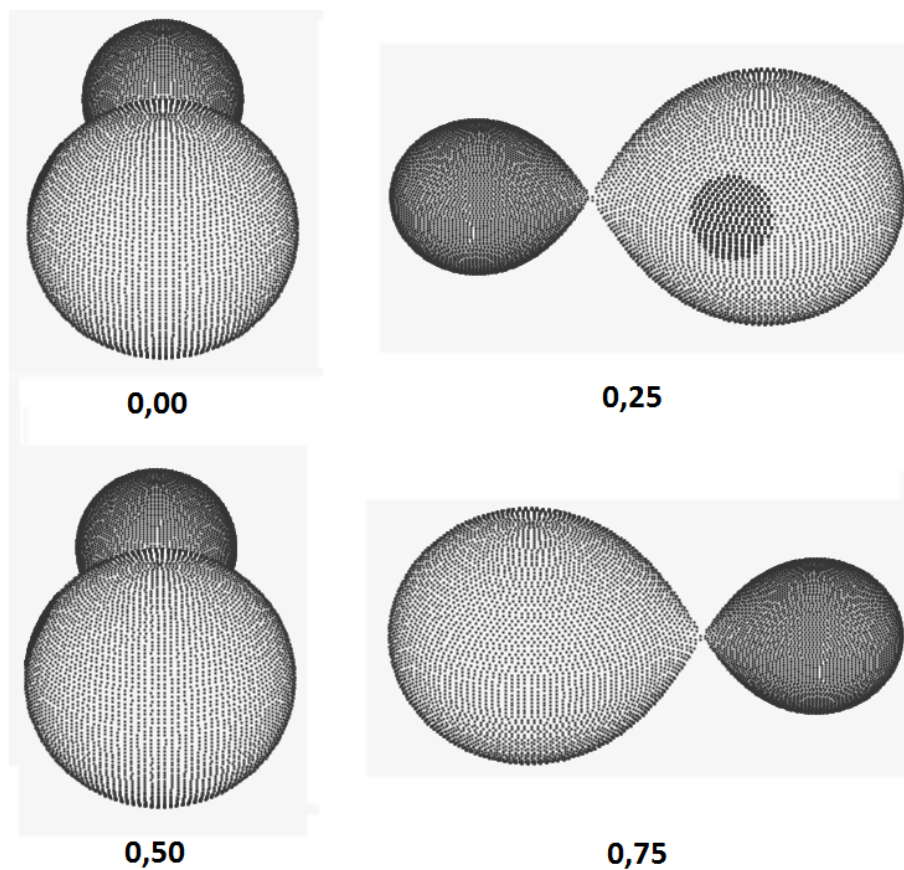
19. ábra. A kettős geometriai modellje a 2009. július 16-i fénygörbe-modellezés alapján. Az illesztés során nem volt szükség foltokra.



20. ábra. A megfigyelt és illesztett fénygörbék 2009. július 17-én.



21. ábra. A megfigyelt és illesztett fénygörbék különbségei 2009. július 17-én.



22. ábra. A kettős geometriai modellje a 2009. július 17-i fénygörbe-modellezés alapján.

Paraméter	Első folt
ϕ [°]	72,99
λ [°]	75,38
r [°]	18,76

4. táblázat. A csillagfoltok paraméterei a 2009. július 17-i fénygörbe-modellezés alapján.

A foltok sugarainak felhasználásával meghatározható, hogy a csillag mekkora felületét fedik le a foltok:

$$\frac{\sum \pi \cdot r_i^2}{41253} \cdot 100\% \quad (18)$$

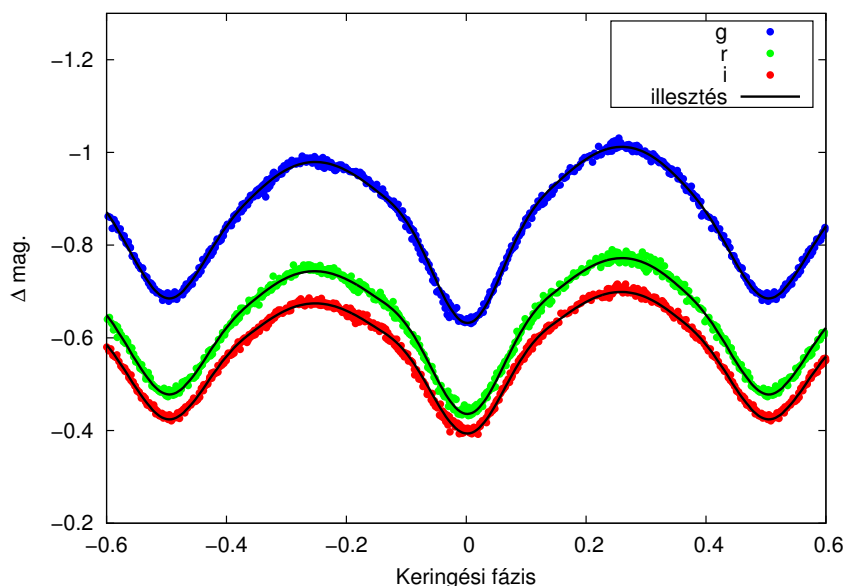
, ahol r_i az i -edik folt sugara fokokban.

Dátum	Lefedettség [%]
2009.07.16.	0,0
2009.07.17.	2,7
2009.07.20.	3,9
2009.07.21.	1,2
2009.07.22.	1,9
2009.07.23.	2,2
2009.07.24.	2,3
2009.07.25.	5,0
2009.07.26.	0,0
Átlag	2,1

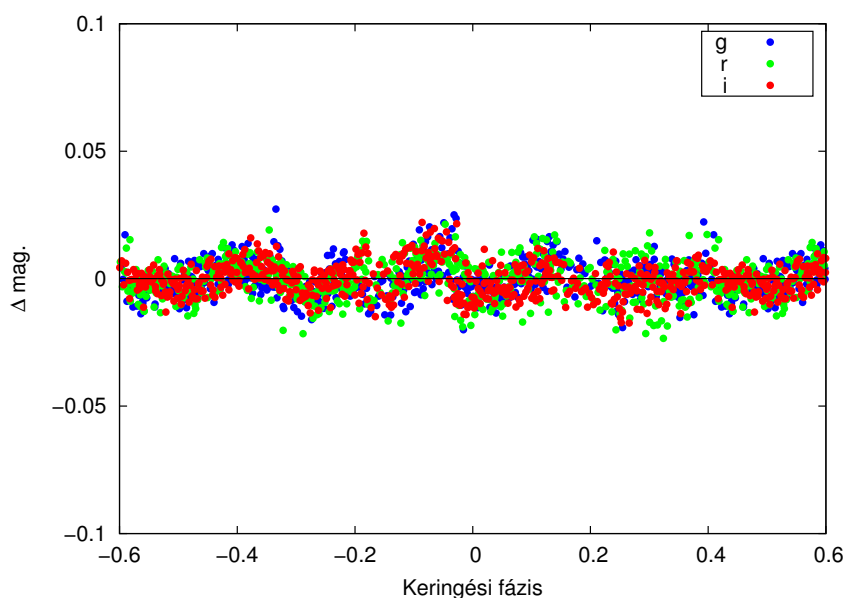
5. táblázat. A csillagfoltok által borított felületek a csillag egészéhez viszonyított aránya 2009 júliusában.

3.4.2. A 2014-es fénygörbék modelljei

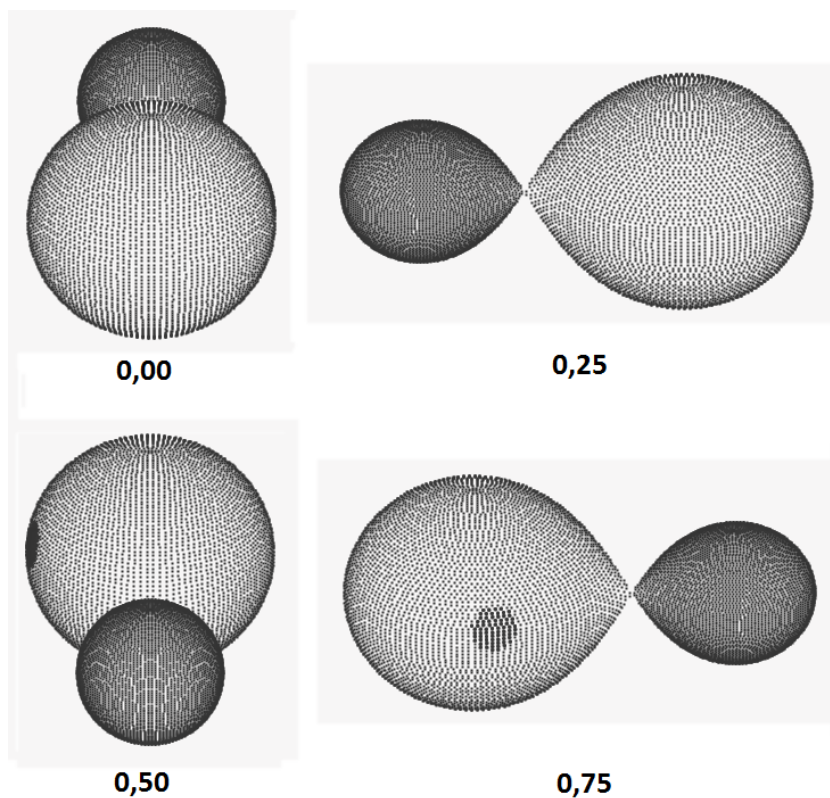
Az előrejelzés szerint 2014-ben kisebb mértékű aktivitást kellett volna tapasztalnunk. Ennek vizsgálatához az általam mért fénygörbéken is végrehajtottam a modellezést. A három fénygörbéből itt csak egyet mutatok be, a másik kettő a dolgozat végén található függelékben tekinthető meg.



23. ábra. A megfigyelt és illesztett fénygörbék 2014. augusztus 8-án.



24. ábra. A megfigyelt és illesztett fénygörbék különbségei 2014. augusztus 8-án.



25. ábra. A kettős geometriai modellje a 2014. augusztus 8-i fénygörbe-modellezés alapján.

Paraméter	Első folt
ϕ [°]	80,63
λ [°]	279,39
r [°]	10,92

6. táblázat. A csillagfoltok paraméterei a 2014. augusztus 8-i fénygörbe-modellezés alapján.

Dátum	Lefedettség [%]
2014.08.08.	0,9
2014.08.09.	0,0
2014.08.10.	2,8
Átlag	1,2

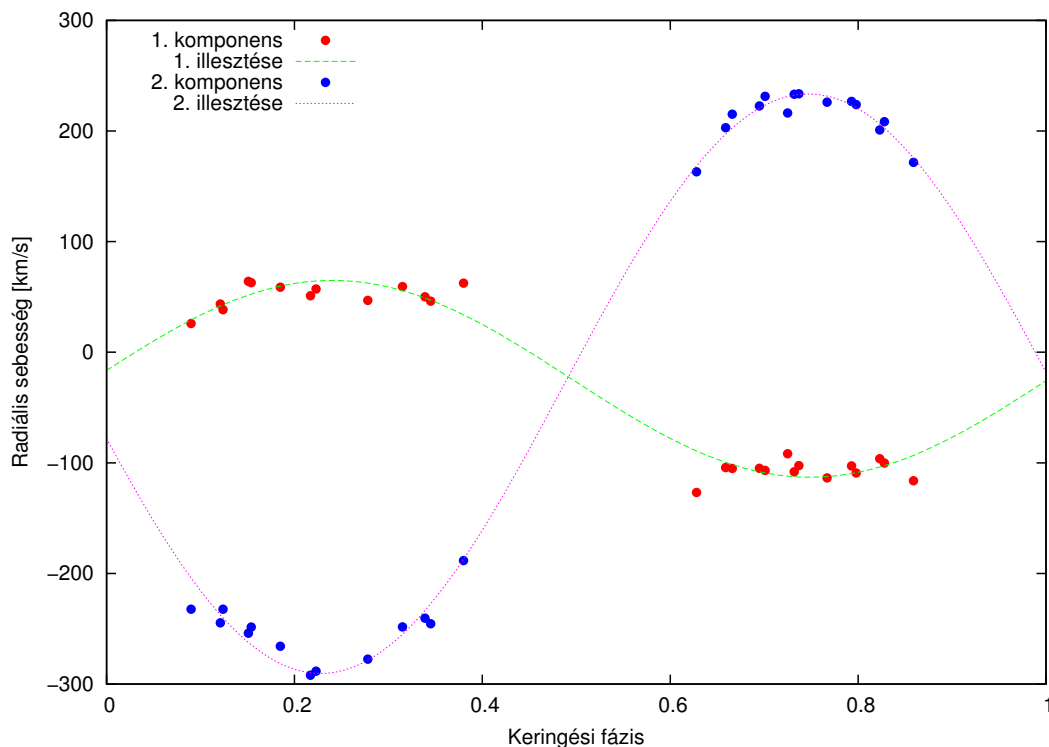
7. táblázat. A csillagfoltok által borított felületek a csillag egészéhez viszonyított aránya 2014 augusztusában.

3.5. Radiális sebességek

Fázis	$V_{1,rad} [\frac{km}{s}]$	Hiba $[\frac{km}{s}]$	$V_{2,rad} [\frac{km}{s}]$	Hiba $[\frac{km}{s}]$
0,090	25,9608	2,318	-232,336	1,731
0,121	43,6268	2,05	-244,676	1,796
0,124	38,4573	1,81	-232,338	1,933
0,151	64,1309	2,841	-254,077	2,627
0,154	62,8819	3,506	-248,432	3,479
0,185	58,7588	4,467	-265,856	4,132
0,217	51,1042	2,036	-291,987	1,693
0,223	57,2164	2,83	-288,344	2,984
0,278	46,8671	1,879	-277,512	1,739
0,315	59,3539	2,331	-248,357	2,192
0,339	50,1656	3,344	-240,495	3,171
0,345	46,2262	2,257	-245,491	1,827
0,380	62,5263	4,488	-188,309	5,077
0,628	-126,769	4,263	163,143	4,722
0,659	-104,255	2,295	203,054	2,059
0,666	-105,035	2,082	215,185	1,731
0,695	-104,9	1,976	222,687	1,508
0,701	-106,87	2,093	231,355	1,653
0,725	-91,7924	1,781	216,304	1,691
0,732	-108,018	1,883	233,285	1,418
0,737	-102,483	1,499	233,672	1,185
0,767	-113,623	2,737	226,041	2,296
0,793	-102,714	2,141	226,747	1,456
0,798	-109,129	2,149	223,94	1,642
0,823	-96,2463	2,154	200,947	1,864
0,828	-100,217	2,262	208,42	1,698
0,859	-116,165	5,048	171,692	5,732

8. táblázat. A mért radiális sebességek és hibáik.

A radiális sebességeket a fázis függvényében ábrázoltam, az így kapott radiális sebesség-görbére két szinuszfüggvényt illesztettem, és ezek metszéspontjából meghatároztam a rendszer gammasebességét (V_γ), illetve az egyes komponensek sebességamplitúdóit (K_1, K_2).



26. ábra. A VW Cephei radiális sebesség-görbéje.

Paraméter	Érték	Hiba
K_1 [$\frac{km}{s}$]	88,88	4,15
K_2 [$\frac{km}{s}$]	260,82	3,28
V_γ [$\frac{km}{s}$]	-22,22	2,04
q	0,341	0,02

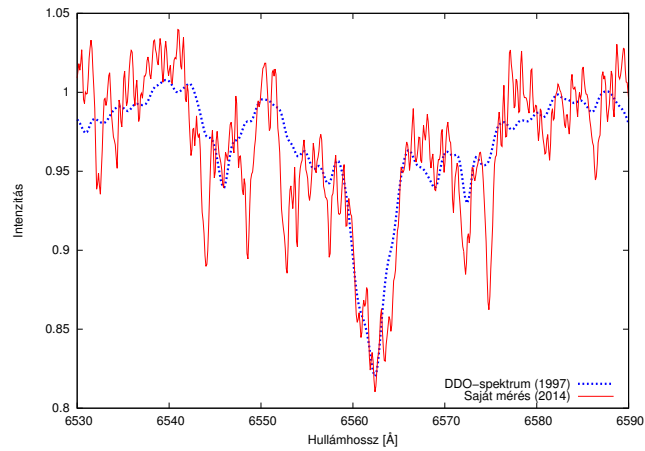
9. táblázat. A meghatározott fizikai paraméterek és hibáik.

3.6. Spektrumok összehasonlítása korábbi mérési adatokkal

Témavezetőm jóvoltából lehetőségem volt az általam mért spektrumoknak az ő diplomamunkájában (Szalai 2008) bemutatott, 1997-ből származó spektrumokkal való közvetlen összevetésére. Ezeket a közepes felbontású ($R \approx 11000$) színeképeket Vinkó József és Kaszás Gábor rögzítették a torontói David Dunlap Obszervatórium (DDO) 1,88 m átmérőjű távcsövére szerelt Cassegrain-spektrográffal. Az összehasonlítás elvégzéséhez mindkét spektrumsorozatból kivágtam a 6530 Å-től 6590 Å-ig terjedő hullámhossztartományt, hogy a $H\alpha$ -vonalprofil alakjának fázisfüggő változását összehasonlítás alapján, kvalitatíve vizsgálni tudjam.

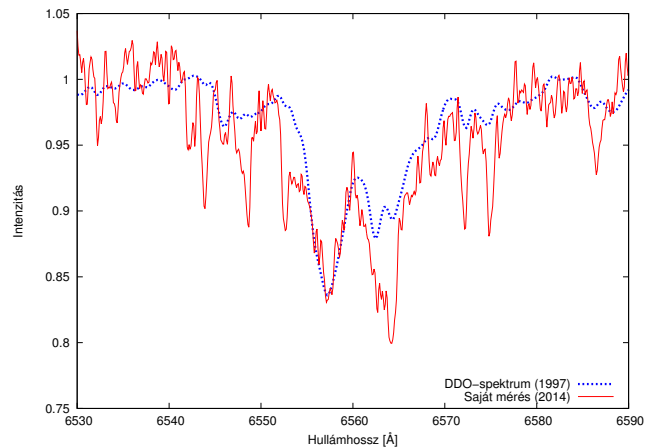
Az ábrákon jól látszik, hogy a torontói spektrumoknak sokkal jobb a jel/zaj arányuk,

egyrészt a telluric vonalak korrekciója (amit én telluric-standard spektrum hiánya révén nem végeztem el), másrészt a rajtuk alkalmazott Gauss-simítás miatt.



27. ábra. Az egyes spektrumok 0,02 fázisnál.

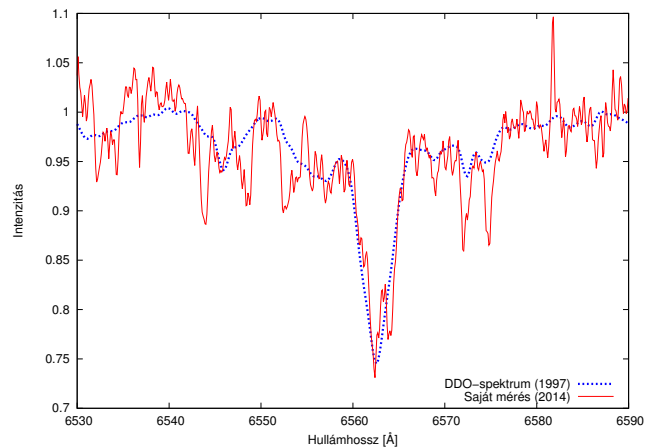
Mivel fotometriai fázisokat használtam, ezért $\phi = 0$ -nál a mellékkomponens van fedésben, így csak egyetlen, a főkomponenstől származó vonalprofilt figyelhetünk meg. Ilyenkor a csillag látóirányunkba eső sebességkomponense zérus, ezért hullámhosszeltolódást nem érzékelünk.



28. ábra. Az egyes spektrumok 0,25 fázisnál.

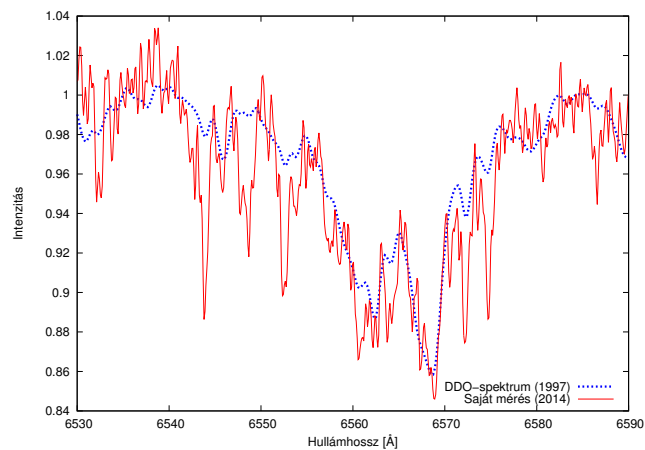
Ezt követően láthatjuk, hogy $\phi = 0,25$ -nél már nincs fedés, a főkomponens távolodik tőlünk, ezért a hozzá tartozó vonal a nagyobb hullámhosszak felé mozdul el, azaz vöröseltolódást szenved. Mivel a két komponens újra egymás mellett látjuk, megjelenik a mellékkomponenshez tartozó vonal is a rövidebb hullámhosszak felől, tehát jól látszik, hogy éppen közeledik felénk, kékeltolódást szenved. A mellékkomponens vonala elég jó egyezést mutat az 1997-es spektrumon láthatóval, míg a főkomponens vonala nem egyfor-

ma mélységű a két spektrumon. Az 1997-es spektrumon megfigyelhető emissziós többlet kromoszférikus aktivitásra utal a főkomponensen, míg a 2014-es spektrumon gyakorlatilag nem tapasztalunk emissziót.



29. ábra. Az egyes spektrumok 0,50 fázisnál.

A következő, 0,5-ös fázisértéknél csak a mellékkomponenstől származó vonalat látjuk, hiszen ilyenkor a főkomponens fedésben van. Hullámhosszeltolódást szintén nem tapasztalunk a $\phi = 0$ fázisnál már kifejtett ok miatt.



30. ábra. Az egyes spektrumok 0,74 fázisnál.

Végül $\phi = 0,75$ -nél ismét megjelennek mindkét csillag vonalkomponensei, azonban most fel vannak cserélődve, ugyanis a mellékkomponens távolodik tőlünk nézve, míg a főkomponens közeledik. A mellékkomponens vonala ismét jól illeszkedik, illetve a főkomponens vonalmélysége sem mutat olyan mértékű eltérést, mint $\phi = 0,25$ -nél. A 2014-es spektrumon is tapasztalható a kromoszférikus aktivitásra utaló emisszió a főkomponenshez tartozó vonalprofilon, de kisebb mértékű, mint 1997-ben.

4. Diszkusszió

Bár az O-C görbe alakjából már sejthető volt, de a jelenlegi keringési periódus meghatározása által kvantitatíve is megállapítottam, hogy a rendszer keringési periódusa továbbra is csökkenő trendet mutat. Ennek fizikai magyarázata az, hogy a komponensek közelednek egymáshoz, tehát a főkomponensről anyag áramlik át a mellékkomponensre.

Az általam meghatározott tömegarány ($q=0,341$) jó egyezést mutat a legutóbbi ilyen irányú vizsgálatok eredményeivel: Binnendijk 1966 ($q=0,409\pm 0,011$), Anderson és mtsai 1980 ($q=0,40\pm 0,05$), Kaszás és mtsai 1998 ($q=0,35\pm 0,01$), Hendry & Mochnecki 2000 ($q=0,395\pm 0,016$). Az esetleges eltéréseket a mérések eltérő pontossága, illetve a radiális sebességek kinyeréséhez használt módszerek különbözősége okozhatja.

A fénygörbe-modellekből meghatározott paraméterek jó egyezésben vannak a Kaszás és mtsai (1998) cikkben szereplő adatokkal, azonban a mellékkomponens effektív hőmérsékletében közel 300 K eltérés tapasztalható a modellek között.

Az általam kimért differenciális fénygörbék modelljei, valamint a most készült és az 1997-ben rögzített színeképfelvételek összehasonlítása révén a VW Cephei felszíni aktivitásának időbeli változásairól néhány kvalitatív állítás tehető. Az egy keringési perióduson belül a fénygörbéken tapasztalt eltérő fényességmaximumok alapján az mondható el, hogy jelenleg is van kimutatható felszíni aktivitás. Mivel a 0,75-ös fotometriai fázisnál lévő maximum a gyengébb, ezért a fényességkülönbséget okozó folttevékenység vagy a főkomponens közeledésekor felénk eső oldalán, vagy a mellékkomponens távolodásakor felénk forduló oldalán intenzívebb. A fénygörbe-modellek ezek közül az első esetet támasztják alá, tehát a folttevékenység a főkomponens közeledésekor felénk forduló oldalán erősebb.

A felszíni aktivitás egy másik fontos nyomjelzője a $H\alpha$ -vonalprofilban jelentkező emisszió mértéke. Spektrummodellezés hiányában ezt közvetlenül nem tudtam vizsgálni, de az 1997-es és 2014-es spektrumok összehasonlítása ad néhány támpontot. A 17. ábrán látható, hogy a 2014-es mérések idején a főkomponenshez tartozó vonal $\phi=0,25$ fázisnál jóval kisebb mértékű az emissziós járuléka, mint az 1997-es spektrumon. Ugyanakkor a $\phi=0,75$ fázisnál jó közelítéssel azonos főkomponens-vonalmélység tapasztalható a két spektrumon, akárcsak a mellékkomponenshez tartozó vonal esetében. Ezen állításokból arra lehet következtetni, hogy a 2014-ben tapasztalt felszíni aktivitás gyengébb, mint az 1997-ben tapasztalt, és jelentősebb folttevékenység – összhangban a fénygörbéken látható fényességmaximum-különbségekkel – feltehetőleg a főkomponens közeledésekor tőlünk megfigyelhető oldalán zajlik (ellentétben az 1997-es idősakkal, amikor a felszíni aktivitás a főkomponens másik oldalán volt a legintenzívebb).

Bár a 2009 júliusában készült fénygörbékkel párhuzamban nem készültek spektroszkópiai mérések, azonban a fénygörbék is lehetőséget nyújtanak egyfajta aktivitásvizsgálatra. A fényességmaximumokban bekövetkező erős, éjszakáról éjszakára történő változások,

illetve a fénygörbék modelljei arra utalnak, hogy intenzívebb folttevékenység zajlott akkoriban a főkomponensen, mint 2014-ben. Ezt a fénygörbe-modellekből meghatározott, folttal borított területek százalékos aránya is jól szemlélteti.

Kaszás és mtsai (1998) az O-C diagram részletes elemzése alapján egy ~ 7 éves aktivitási ciklus létezésére utaló jeleket találtak. Cikkükben bemutatták azt is, hogy az 1993-as spektrumok (Frasca és mtsai 1996) gyengébb aktivitást jeleznek, mint saját, 1995-ös méréseik (és egyúttal mint a nem publikált 1997-es spektrumok). Ezen előrejelzés alapján 2009-ben az 1995-öshöz hasonlóan aktívabb időszak, míg 2014-ben a 21 évvel korábbihoz hasonló, inaktívabb állapot volt várható, így ez egyfajta megerősítéssel szolgálhat a ~ 7 éves aktivitási ciklusra.

Mindezen eredmények azt mutatják, hogy a rendelkezésre álló hazai fotometriai és spektroszkópai infrastruktúrával versenyképes tudományos eredmények érhetőek el a VW Cephei és a hasonlóan fényes, szoros kettőscsillagok vizsgálatára területén.

Összefoglalás

Tudományos dolgozatomban röviden bemutattam az érintkező kettőscillagok elméletét, ezen belül is a VW Cephei-ről eddig publikált főbb tudnivalókat. Ismertettem az általam végzett mérések helyszínét, idejét és a használt műszereket, majd részletesen kifejtettem a mérések alkalmával készült nyers képek feldolgozásának menetét, a kapott adatok kiértékelésének folyamatát, illetve az eközben felhasznált módszereket.

Bemutattam a fotometriai mérésekből kapott fénygörbéket, melyekből hat új minimumidőpontot határoztam meg, és segítségükkel előállítottam az irodalmi értékeket is tartalmazó O-C diagramot. Az O-C diagram alapján periódusvizsgálatot végeztem, melynek során megállapítottam, hogy a keringési periódus csökkenő trendet mutat, illetve kiszámoltam a jelenlegi periódusértéket ($P = 0,2783141762 \pm 3,765 \cdot 10^{-8}$ nap) és a perióduscsökkenés ütemét ($\frac{dP}{dt} = -4.655 \pm 0,069 \cdot 10^{-10} \frac{\text{nap}}{\text{nap}}$). Elkészítettem továbbá az általam mért, valamint eddig publikálatlan, 2009 júliusából származó fénygörbék modelljeit, melyeket később a felszíni aktivitás vizsgálatához is felhasználtam.

A kiredukált spektrumokból keresztkorrelációs módszerrel meghatároztam az egyes keringési fázisokhoz tartozó radiális sebességeket, melyekből létrehoztam a csillag radiális-sebesség-görbéjét. Az erre történő szinuszfüggvény-illesztésből kiszámoltam a rendszer tömegközéppontjának látóirányú sebességét ($V_\gamma = -22,2 \pm 2,0 \frac{\text{km}}{\text{s}}$), a sebességamplitúdókat, illetve az ezek hányadosaként előálló, spektroszkópiai tömegarányt ($q = 0,34 \pm 0,02$). Emellett az általam előállított színeképeket összevetettem a 1997-ben rögzített színeképekkel. A H α -vonalprofilok azonos fázisban történő összehasonlítása alapján, figyelembe véve a fénygörbéken tapasztalható változásokat, kvalitatíve megállapítottam, hogy bár kisebb mértékben, mint 1997-ben, de a felszíni aktivitás 2014-ben is a főkomponensen jelentősebb, azonban a legintenzívebb aktivitással rendelkező területek a főkomponens közeledésekor felénk forduló oldalán helyezkednek el. A 2009-ben tapasztalható erősebb, valamint a 2014-ben észlelhető gyengébb folttevékenység összhangban van a Kaszás és mtsai (1998) által a felszíni aktivitás ~ 7 év periódusú ingadozására tett előrejelzéssel.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom témavezetőmnek, Dr. Szalai Tamásnak a dolgozat elkészítésében nyújtott rengeteg segítségéért, illetve Dr. Vinkó Józsefnek a sok hasznos tanácsáért és iránymutatásáért. Köszönöm továbbá Dr. Hegedüs Tibornak és Dr. Szabó M. Gyulának a mérések lehetővé tételét, Dr. Csák Balázsnak és Dózsa Ákosnak a spektroszkópiai mérések, illetve Dr. Bíró Imre Barnának a fotometriai mérések elvégzése során nyújtott sok segítségét. Végül pedig Dr. Borkovits Tamásnak is szeretném megköszönni a modellezéshez kapott fénygörbéket.

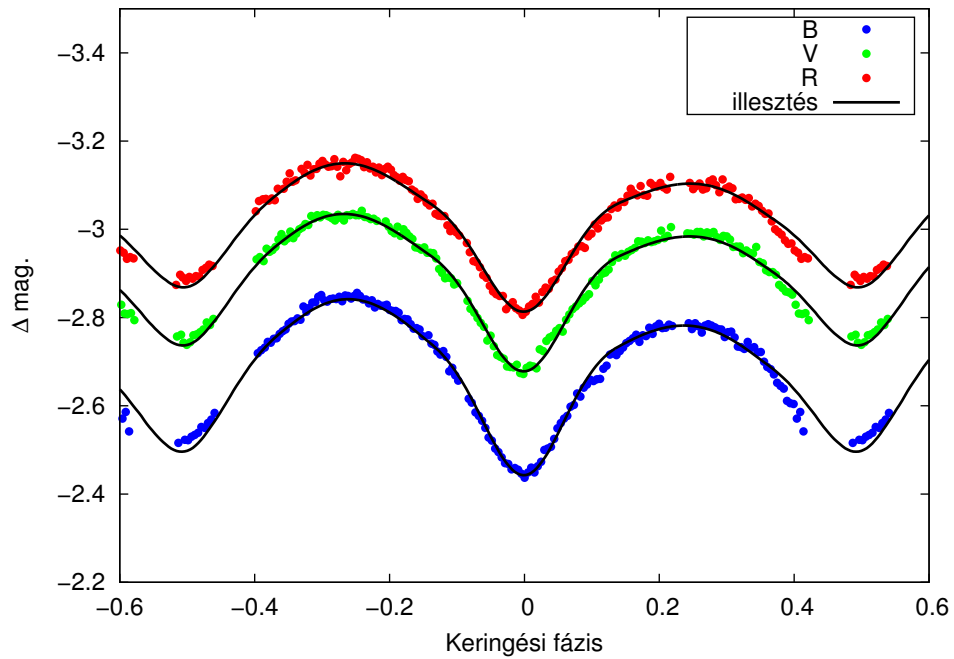
Hivatkozások

- [1] Anderson, L.; Raff, M.; Shu, F.H.: 1980, IAU Symp. 88, 485
- [2] Binnendijk, L.: 1965, Kleine Veröff. Remeis-Sternwarte Bamberg, 40, 36
- [3] Binnendijk, L.: 1966, Publ. Dominion Astrophys. Obs., 13, 27
- [4] Carroll, B.W.; Ostlie, D.A.: 2007, An Introduction to Modern Astrophysics Second Edition, Appendix E, Pearson Education Inc.
- [5] Csizmadia, Sz.; Klagyivik, P.: 2004, Astronomy & Astrophysics, 426, 1001
- [6] Frasca, A.; Sanfilippo, D.; Catalano S.: 1996, Astronomy & Astrophysics, 313, 532
- [7] Hendry, P.D.; Mochnacki, S.W.: 2000, Astrophysical Journal, 531, 467
- [8] Herbst, W.; Bischel, L.E.: Astronomical Journal, 94, 1051
- [9] Hill, G.: 1989, Astronomy & Astrophysics, 218, 141
- [10] Kaszás, G.; Vinkó, J.; Szatmáry, K.; et al.: 1998, Astronomy & Astrophysics, 331, 231-243
- [11] Kepler, S.O.; Winget, D.E.; Nather, R.E.; et al.: 1991, Astrophysical Journal, 378, 46
- [12] Lucy, L. B.: 1967, Zeitschrift für Astrophysik, 65, 89
- [13] Lucy, L.B.: 1976, Astrophysical Journal, 342, 1003
- [14] Lucy, L.B.; Wilson, R.E.: 1979, Astrophysical Journal, 231, 502
- [15] Mészáros, Sz.: 2004, Érintkező kettőscsillagok fejlődésének modellezése, Diplomamunka, SZTE
- [16] Mitnyan, T.: 2013, Fedési kettőscsillagok fotometriája a DWARF projekt keretében, BSc Szakdolgozat, SZTE
- [17] Munari, U.; Sordo, R.; Castelli, F.; Zwitter, T.: 2005, Astronomy & Astrophysics, 442, 1127
- [18] Pribulla, T.; Chochol, D.; Tremko, J.; et al.: 2000, Contr. Astron. Obs. Skalnaté Pleso, 30, 117-139
- [19] Prša, A.; Zwitter, T.: 2005, The Astrophysical Journal, Volume 628, Issue 1, pp. 426-438.

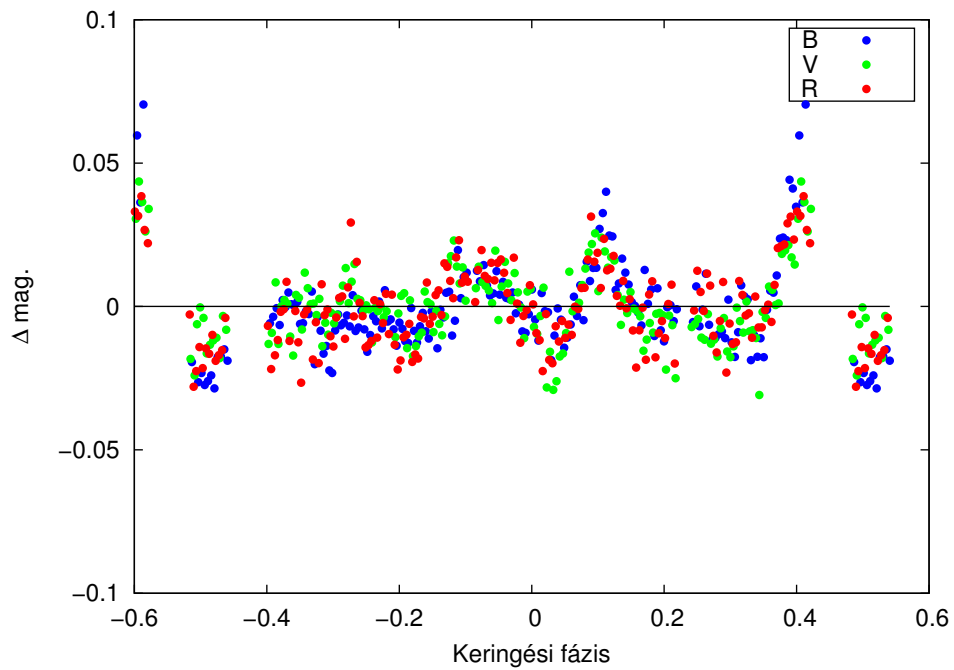
- [20] Sarna, M.J.; Fedorova, A.V.: 1989, *Astronomy & Astrophysics*, 208, 111
- [21] Schilt, J.: 1926, *Astrophysical Journal*, 64, 221
- [22] Szalai, T.: 2006, Szoros déli kettőscsillagok fizikai paramétereinek meghatározása, TDK dolgozat, SZTE
- [23] Szalai, T.: 2008, Szoros kettőscsillagok fizikai paramétereinek meghatározása, valamint felszíni és kromoszférikus aktivitásuk vizsgálata, Diplomamunka, SZTE
- [24] Wilson, R.E., Devinney, E.J.: 1973, *Astrophysical Journal*, 182, 539
- [25] Zasche, P.: 2008, Multiple stellar systems under photometric and astrometric analysis, Doctoral thesis, Charles University in Prague
- [26] <http://astro.sci.muni.cz/variables/ocgate/>
- [27] http://archives.pd.astro.it/2500-10500/download_single1.php
- [28] <http://astro.u-szeged.hu/oktatas/asztrofizika/html/asztrofizika.html>
- [29] <http://phoebe-project.org/1.0/>

Függelék: További éjszakák modellezései

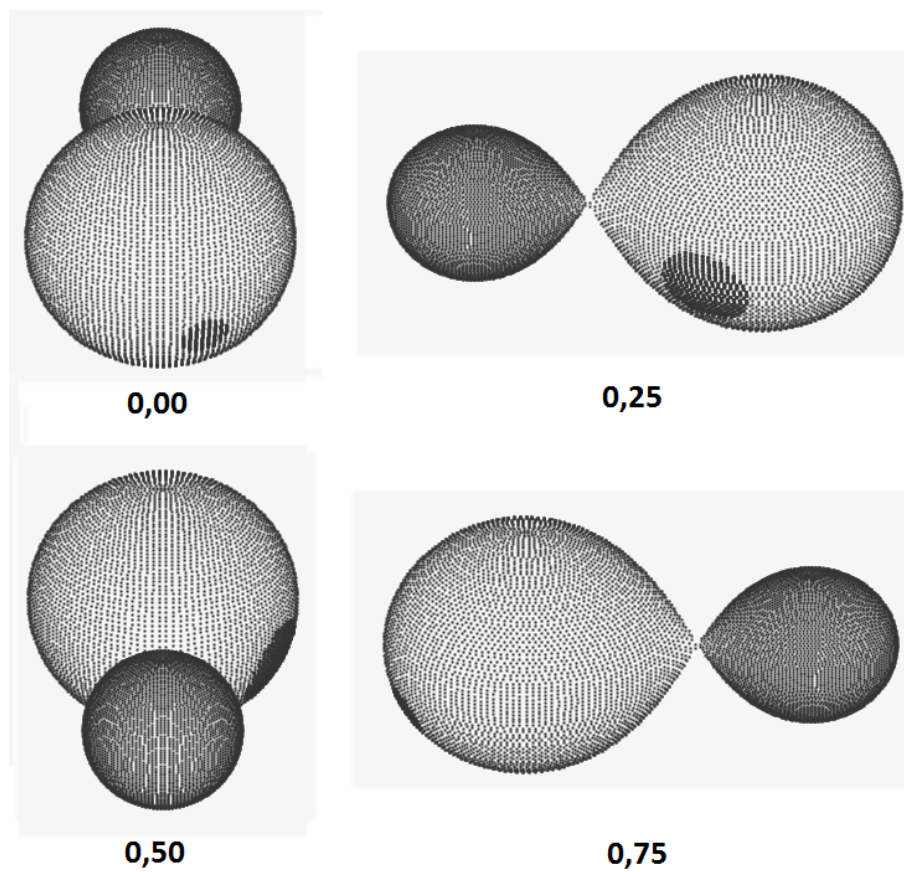
2009.07.20.



31. ábra. A megfigyelt és illesztett fénygörbék 2009. július 20-án.



32. ábra. A megfigyelt és illesztett fénygörbék különbségei 2009. július 20-án.

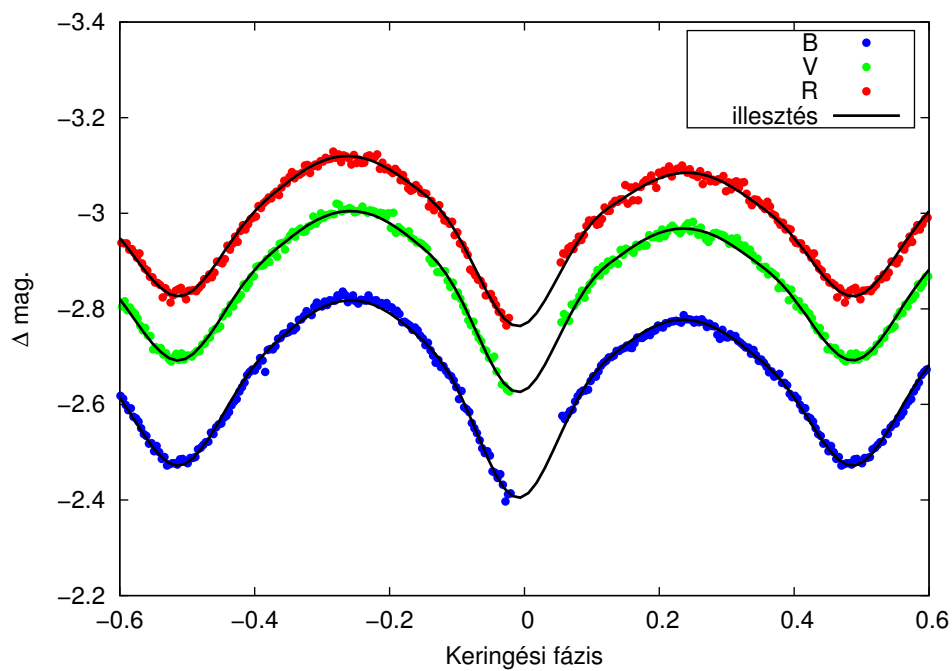


33. ábra. A kettős geometriai modellje a 2009. július 20-i fénygörbe-modellezés alapján.

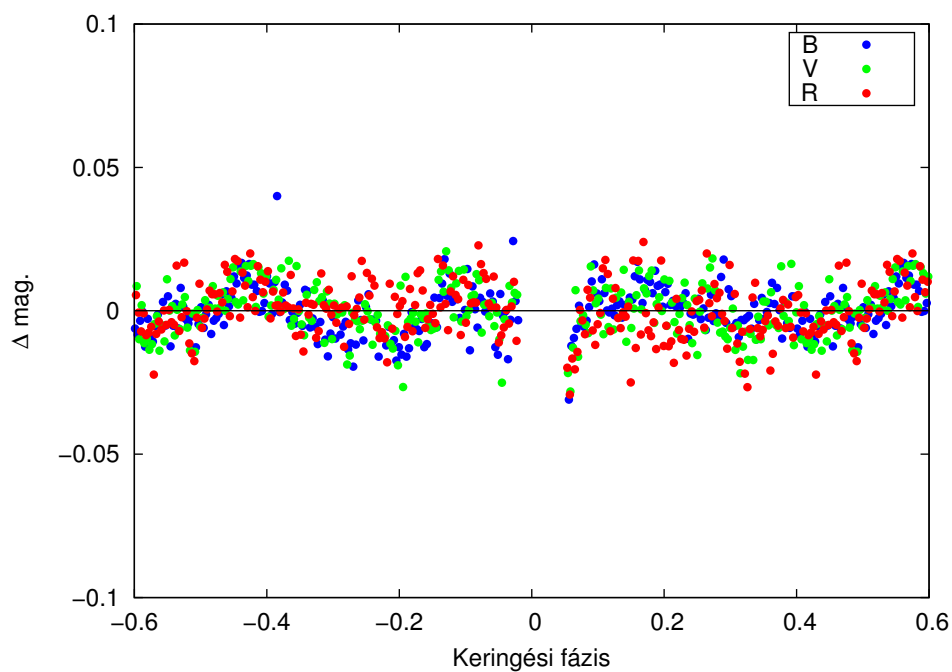
Paraméter	Első folt	Második folt
ϕ [°]	108,14	111,56
λ [°]	63,46	200,20
r [°]	20,16	10,47

10. táblázat. A csillagfoltok paramétere a 2009. július 20-i fénygörbe-modellezés alapján.

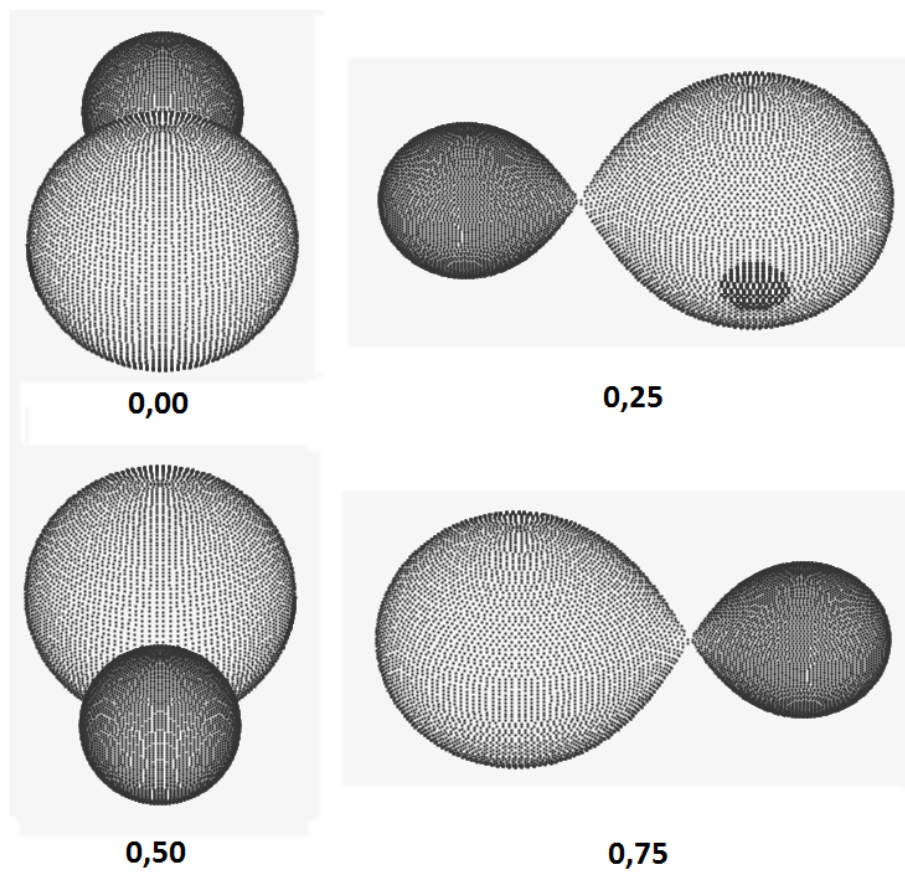
2009.07.21.



34. ábra. A megfigyelt és illesztett fénygörbék 2009. július 21-én.



35. ábra. A megfigyelt és illesztett fénygörbék különbségei 2009. július 21-én.

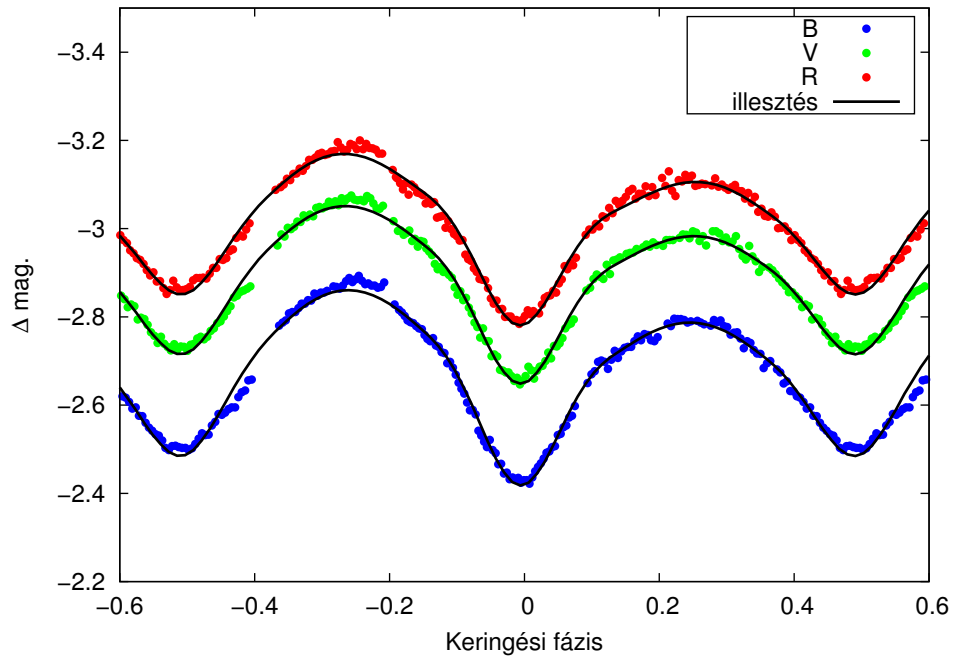


36. ábra. A kettős geometriai modellje a 2009. július 21-i fénygörbe-modellezés alapján.

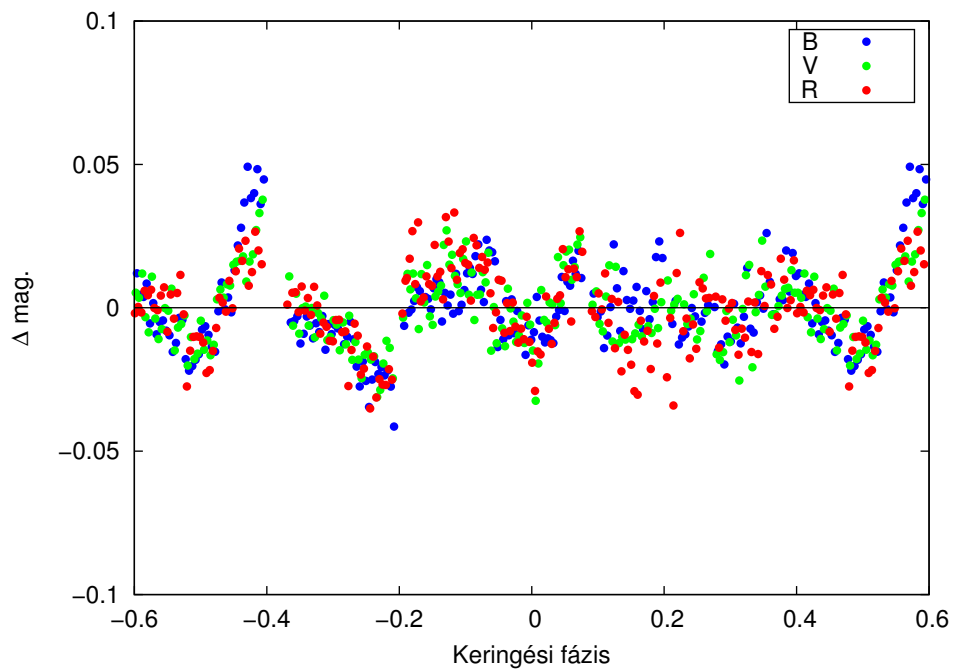
Paraméter	Első folt
ϕ [°]	86,52
λ [°]	90,53
r [°]	12,61

11. táblázat. A csillagfoltok paramétereit a 2009. július 21-i fénygörbe-modellezés alapján.

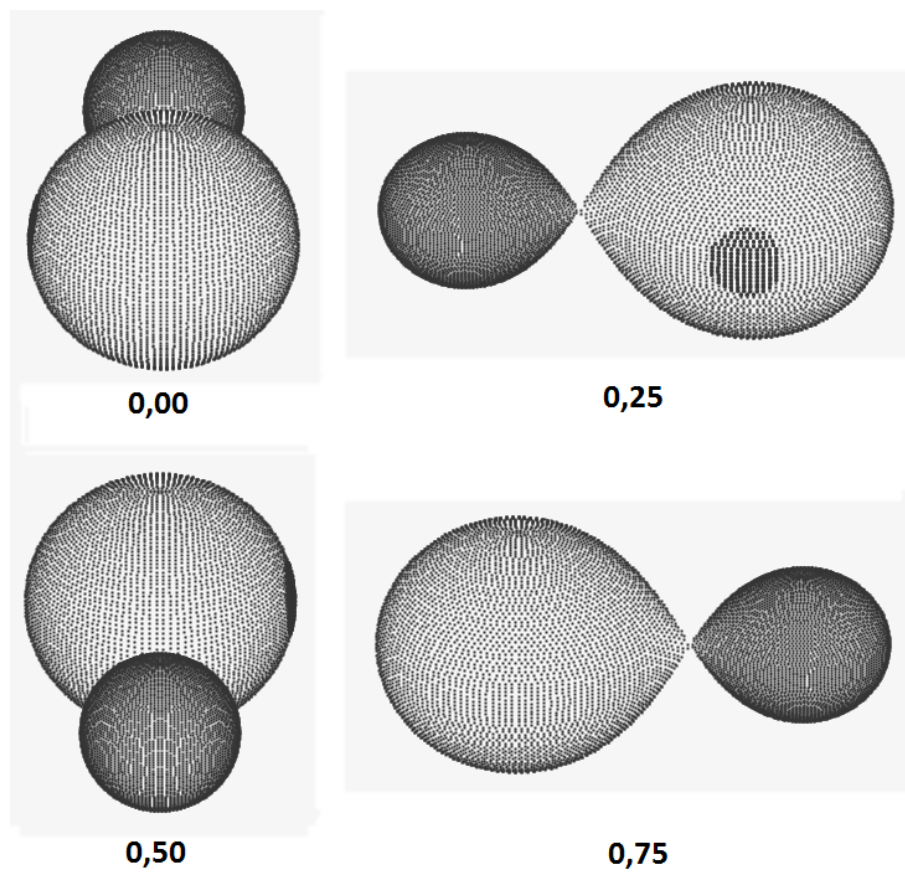
2009.07.22.



37. ábra. A megfigyelt és illesztett fénygörbék 2009. július 22-én.



38. ábra. A megfigyelt és illesztett fénygörbék különbségei 2009. július 22-én.

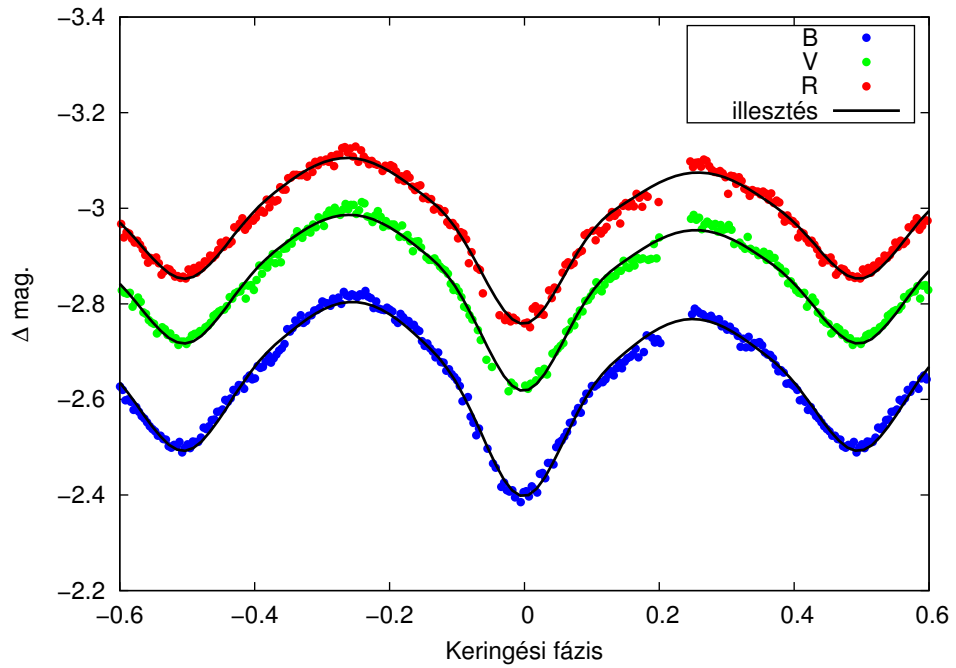


39. ábra. A kettős geometriai modellje a 2009. július 22-i fénygörbe-modellezés alapján.

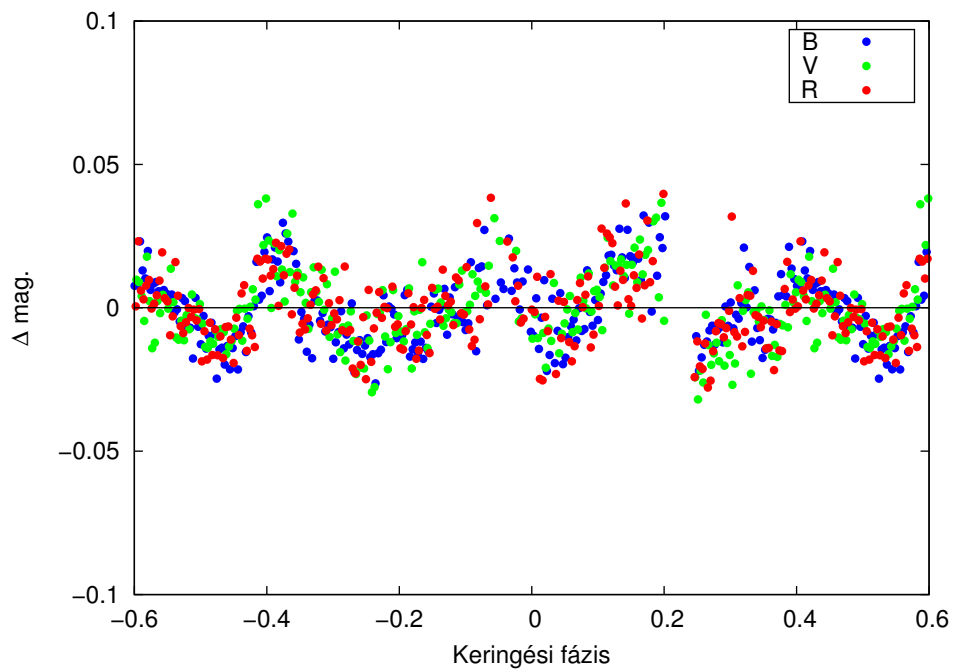
Paraméter	Első folt
ϕ [°]	86,52
λ [°]	87,87
r [°]	15,84

12. táblázat. A csillagfoltok paramétereit a 2009. július 22-i fénygörbe-modellezés alapján.

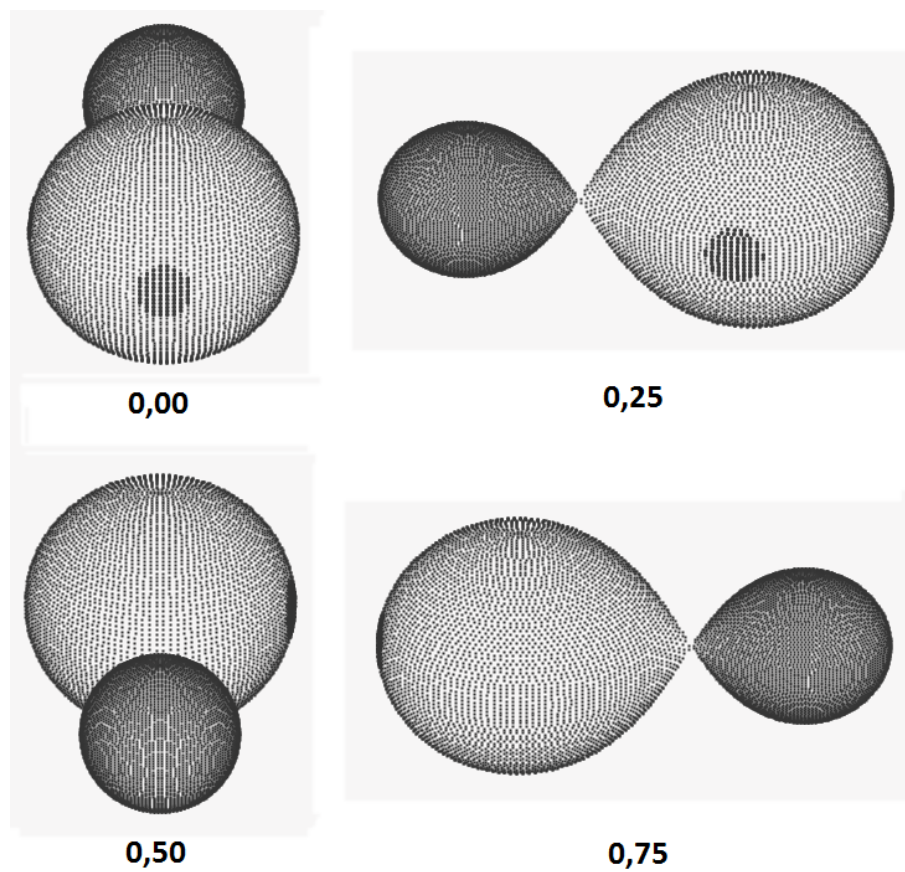
2009.07.23.



40. ábra. A megfigyelt és illesztett fénygörbék 2009. július 23-án.



41. ábra. A megfigyelt és illesztett fénygörbék különbségei 2009. július 23-án.

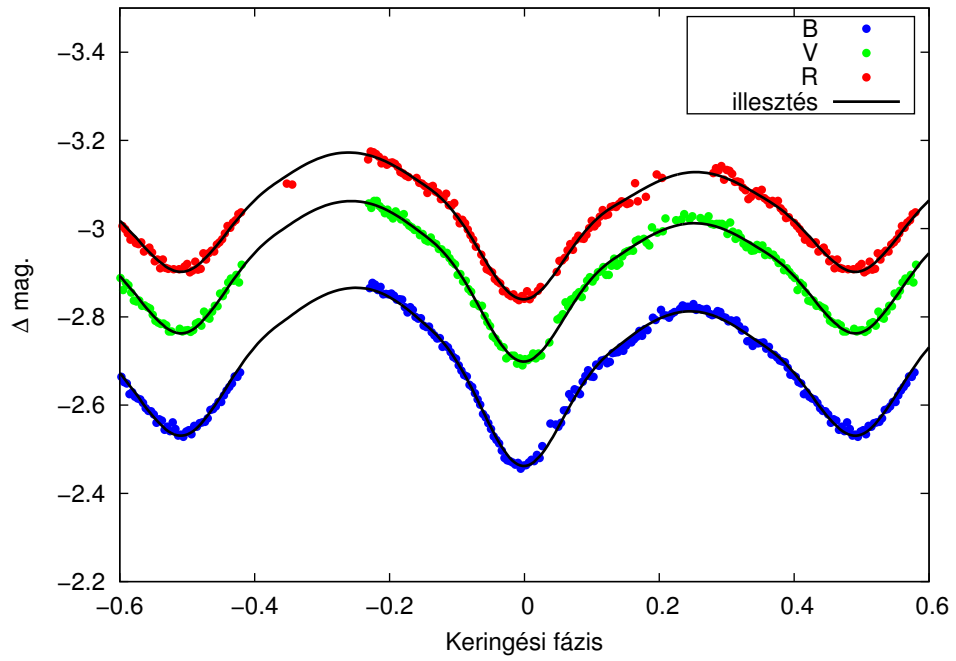


42. ábra. A kettős geometriai modellje a 2009. július 23-i fénygörbe-modellezés alapján.

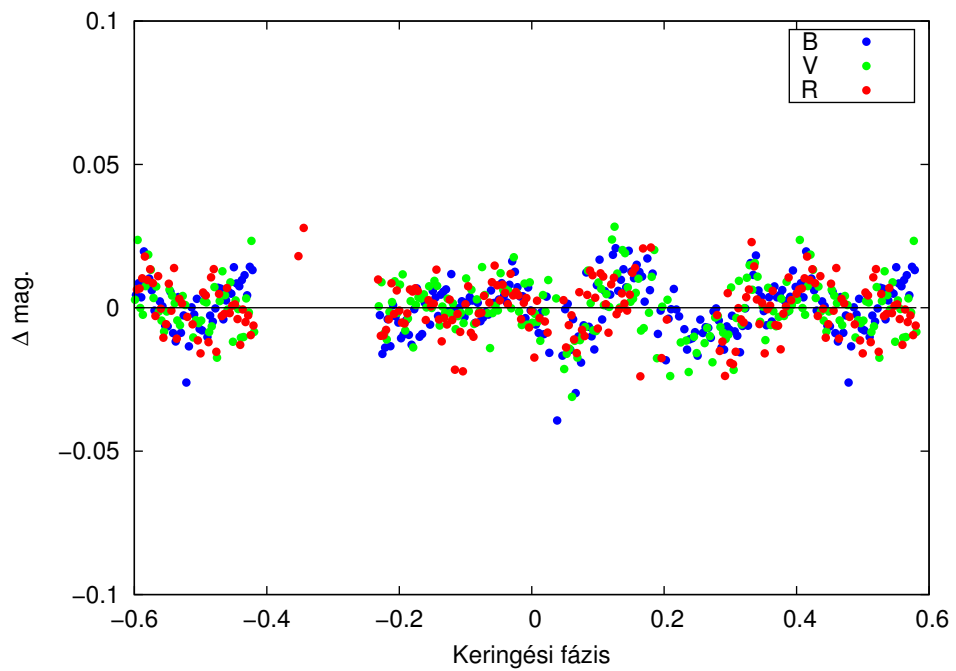
Paraméter	Első folt	Második folt
ϕ [°]	87,66	88,24
λ [°]	179,91	83,08
r [°]	11,46	12,61

13. táblázat. A csillagfoltok paramétere a 2009. július 23-i fénygörbe-modellezés alapján.

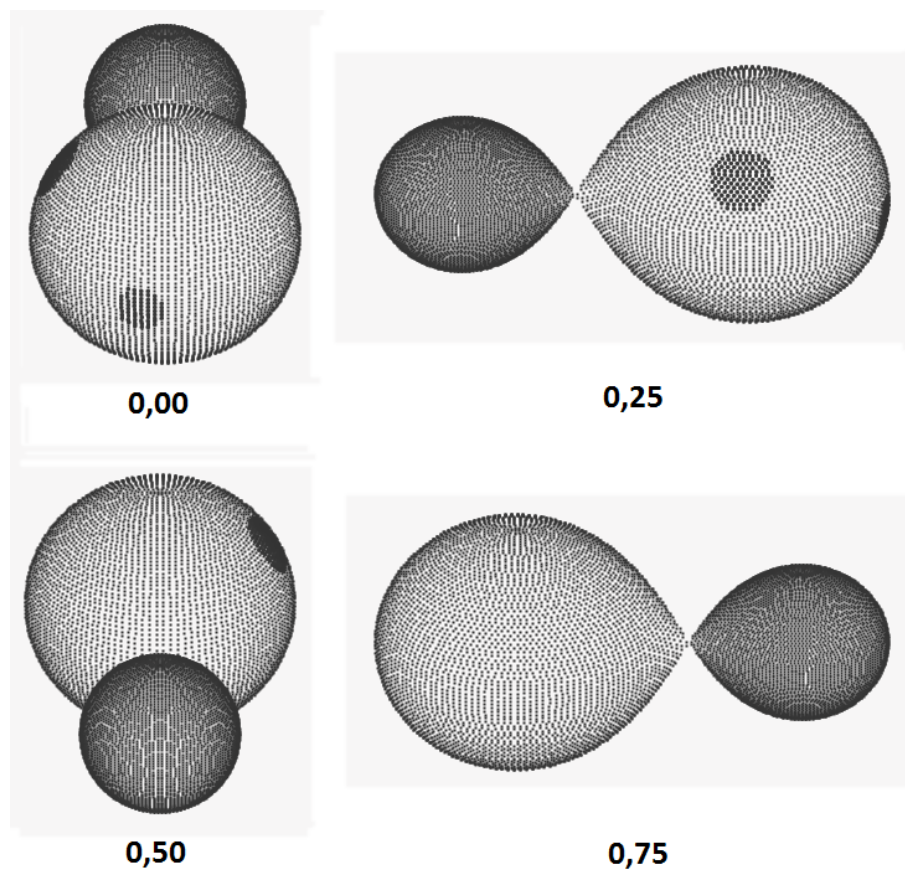
2009.07.24.



43. ábra. A megfigyelt és illesztett fénygörbék 2009. július 24-én.



44. ábra. A megfigyelt és illesztett fénygörbék különbségei 2009. július 24-én.

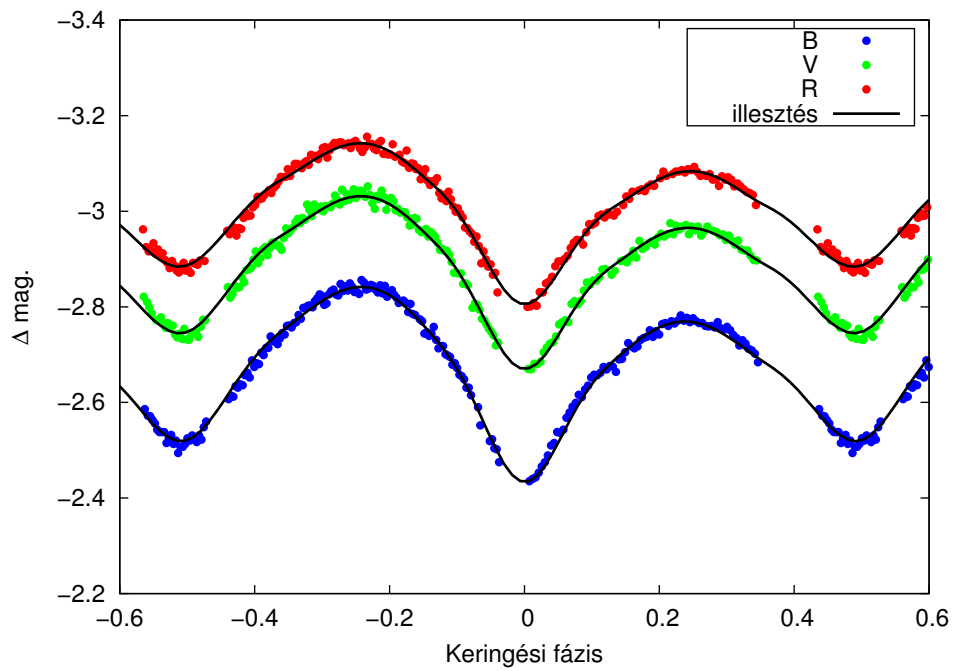


45. ábra. A kettős geometriai modellje a 2009. július 24-i fénygörbe-modellezés alapján.

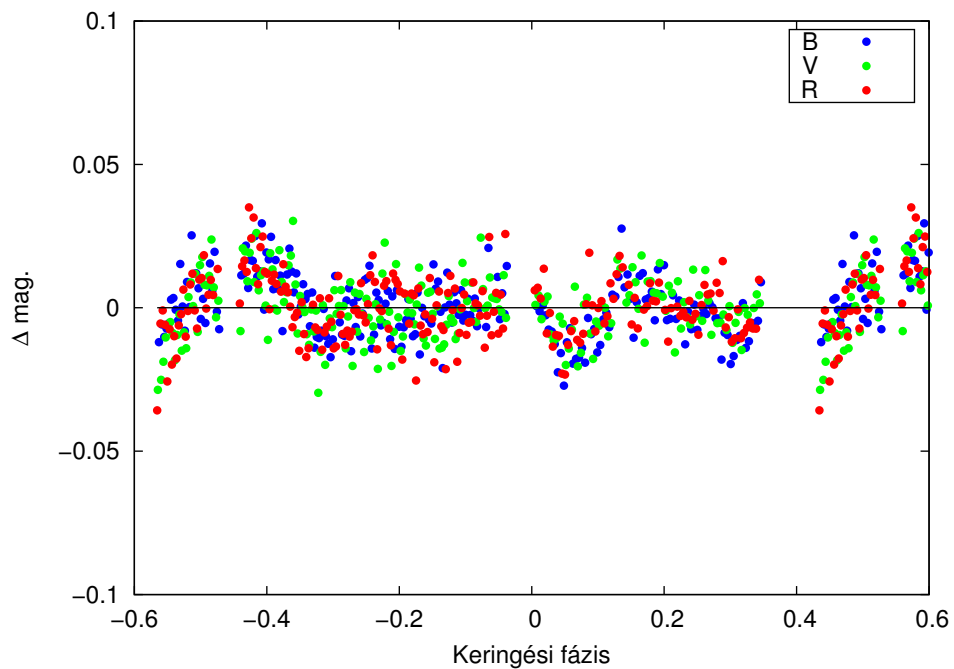
Paraméter	Első folt	Második folt
ϕ [°]	56,82	95,75
λ [°]	87,50	169,70
r [°]	14,18	10,12

14. táblázat. A csillagfoltok paramétere a 2009. július 24-i fénygörbe-modellezés alapján.

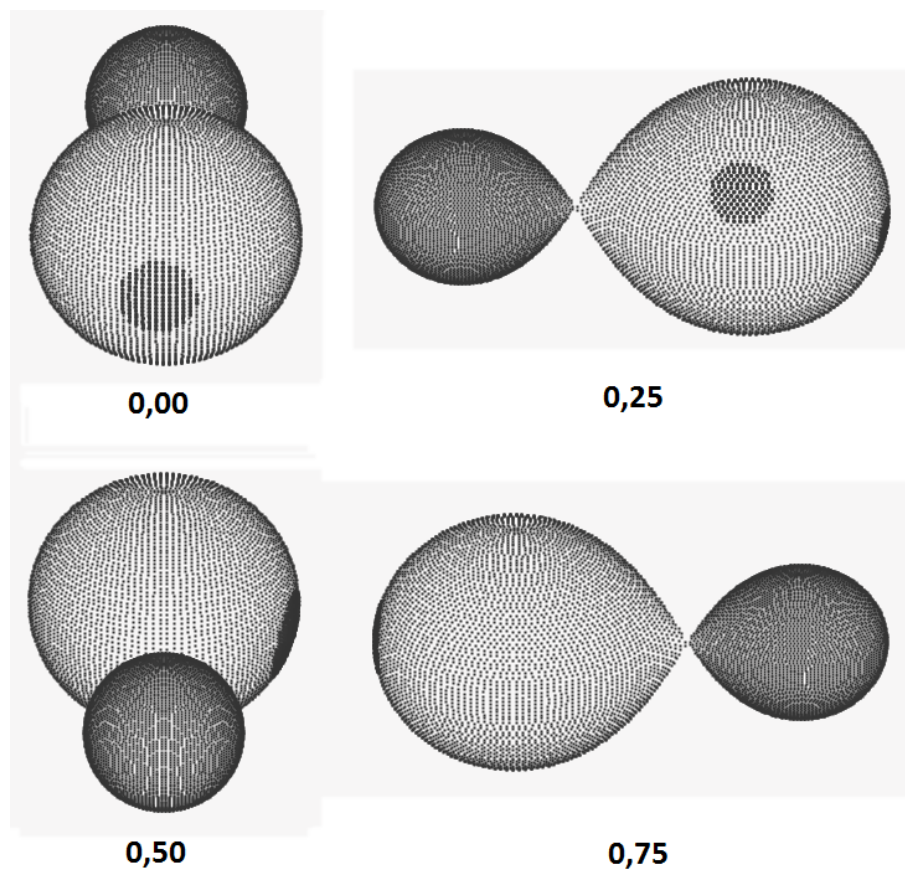
2009.07.25.



46. ábra. A megfigyelt és illesztett fénygörbék 2009. július 25-én.



47. ábra. A megfigyelt és illesztett fénygörbék különbségei 2009. július 25-én.

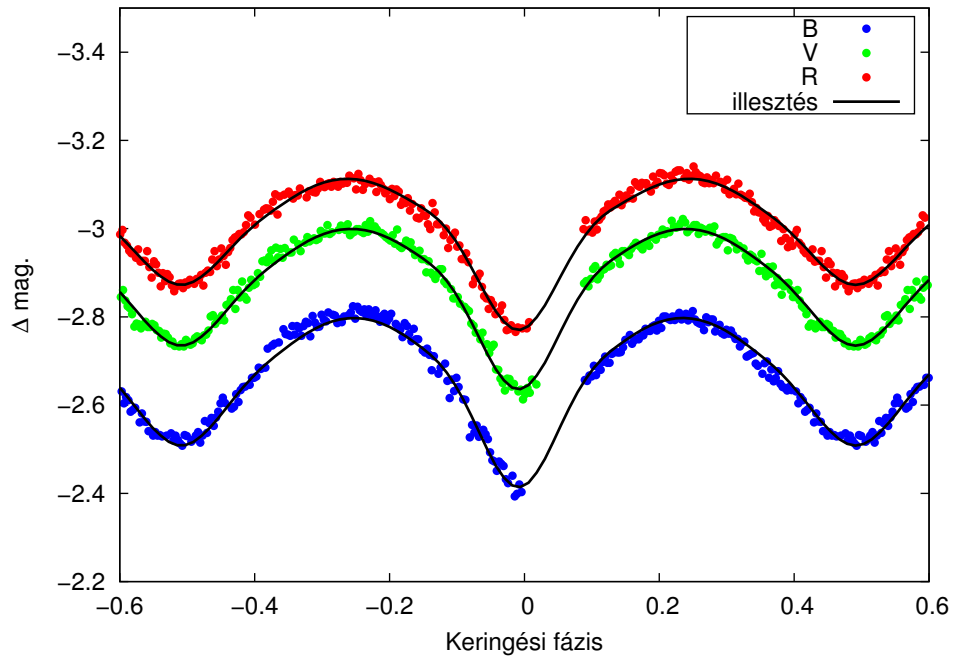


48. ábra. A kettős geometriai modellje a 2009. július 25-i fénygörbe-modellezés alapján.

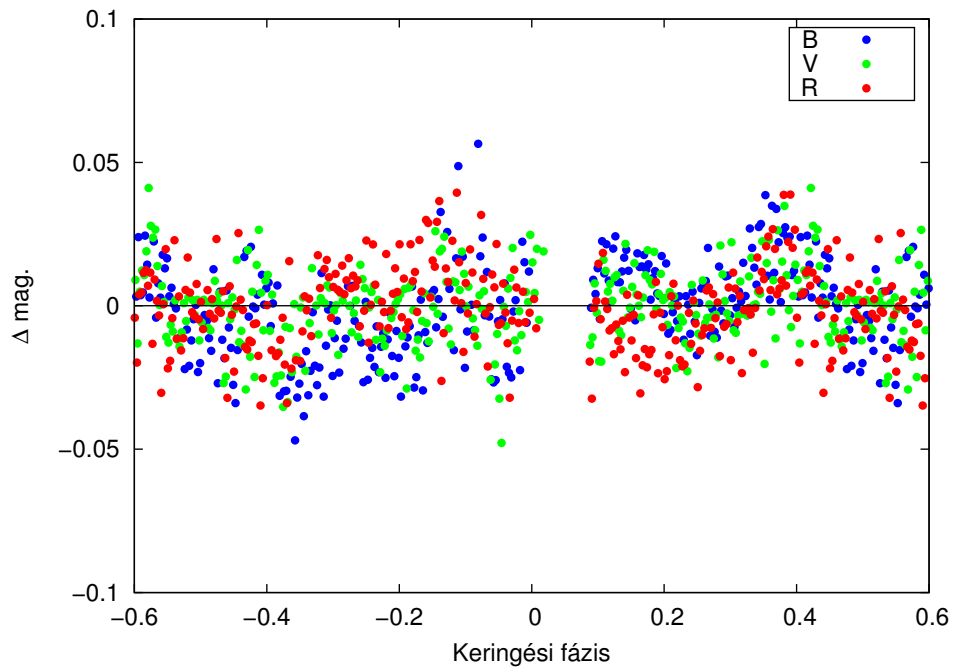
Paraméter	Első folt	Második folt
ϕ [°]	98,83	90,34
λ [°]	76,29	176,28
r [°]	19,74	16,36

15. táblázat. A csillagfoltok paramétere a 2009. július 25-i fénygörbe-modellezés alapján.

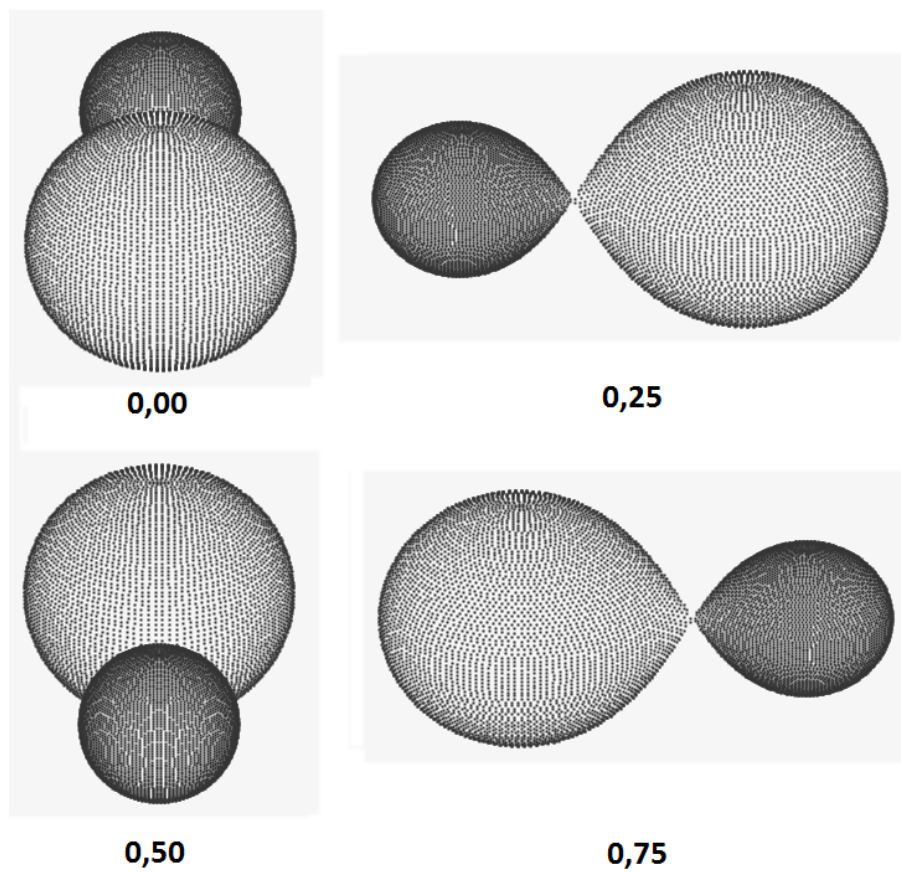
2009.07.26.



49. ábra. A megfigyelt és illesztett fénygörbék 2009. július 26-án.

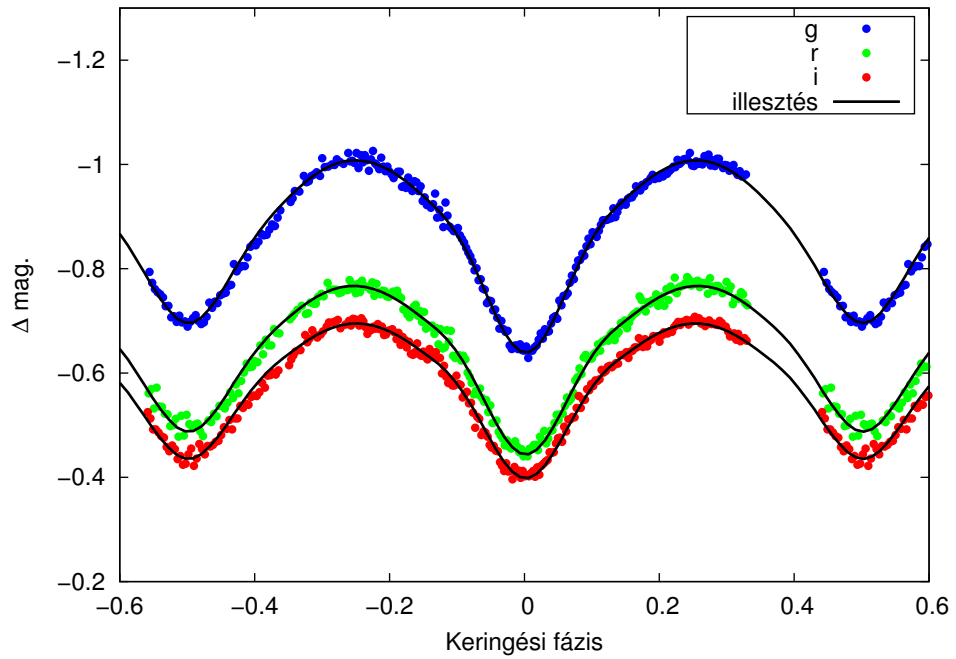


50. ábra. A megfigyelt és illesztett fénygörbék különbségei 2009. július 26-án.

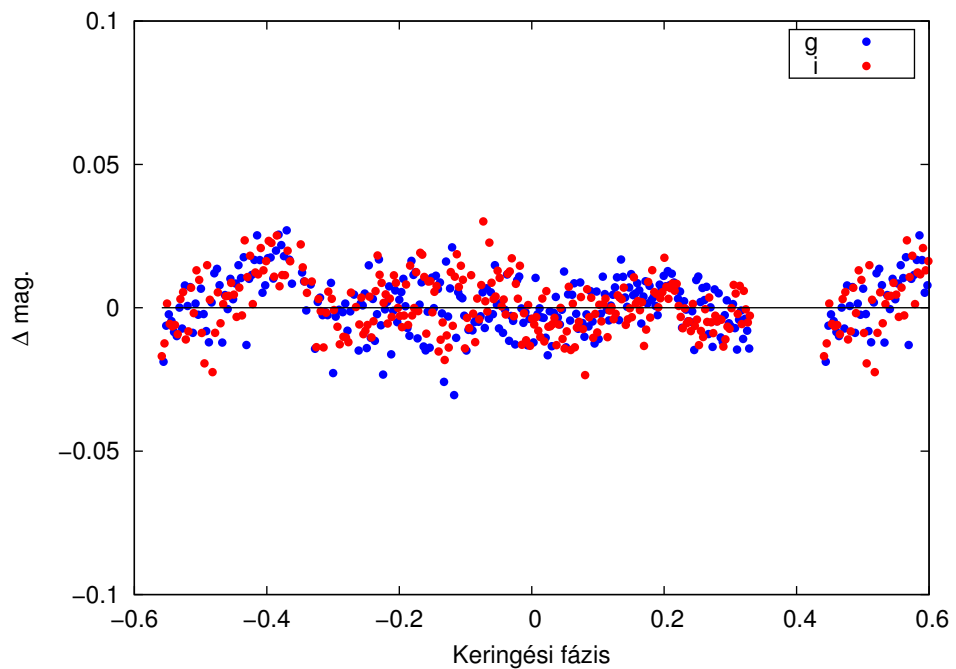


51. ábra. A kettős geometriai modellje a 2009. július 26-i fénygörbe-modellezés alapján. Az illesztés során nem volt szükség foltokra.

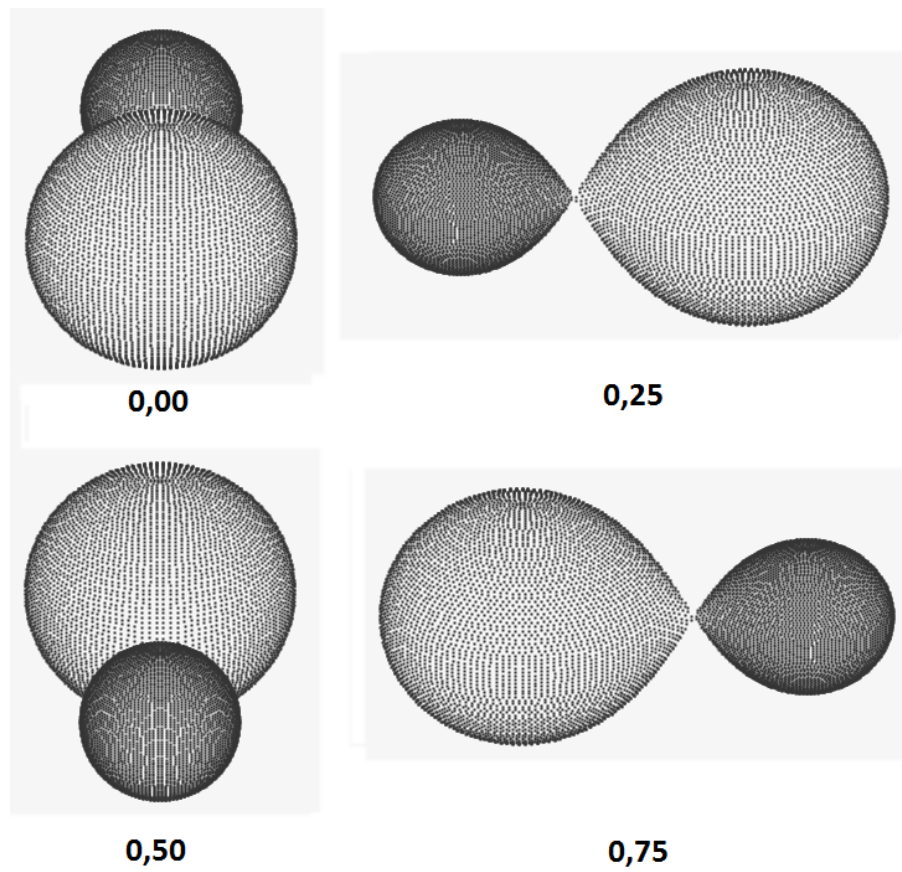
2014.08.09.



52. ábra. A megfigyelt és illesztett fénygörbék 2014. augusztus 9-én.

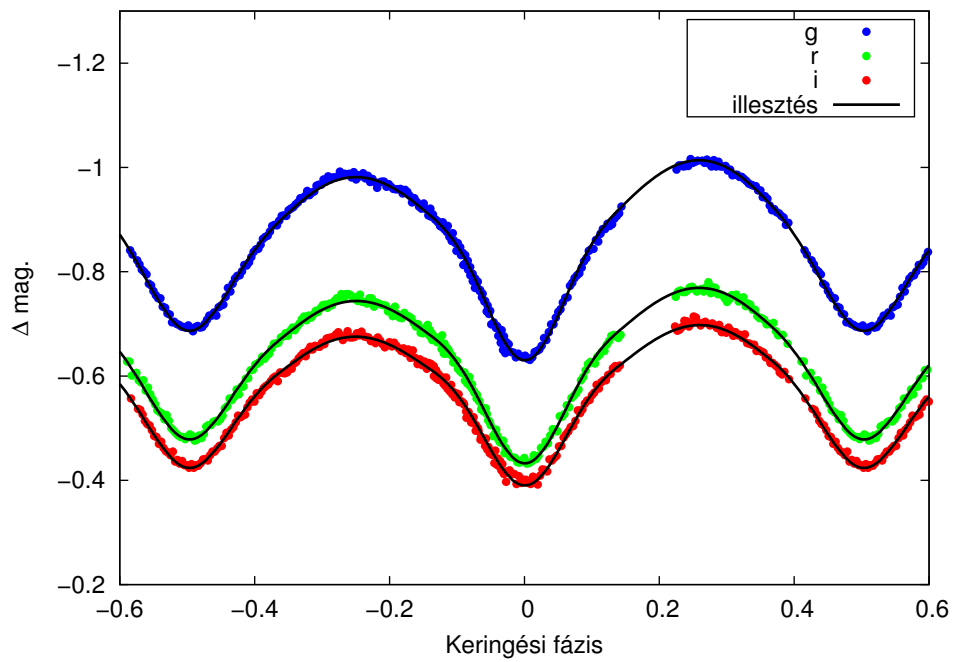


53. ábra. A megfigyelt és illesztett fénygörbék különbségei 2014. augusztus 9-én.

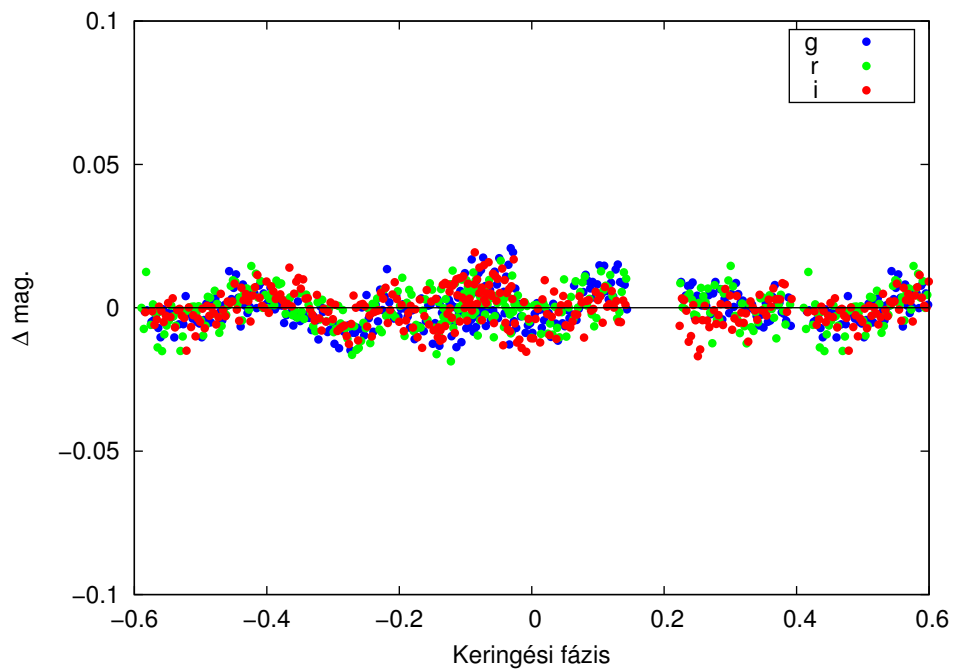


54. ábra. A kettős geometriai modellje a 2014. augusztus 9-i fénygörbe-modellezés alapján. Az illesztés során nem volt szükség foltokra.

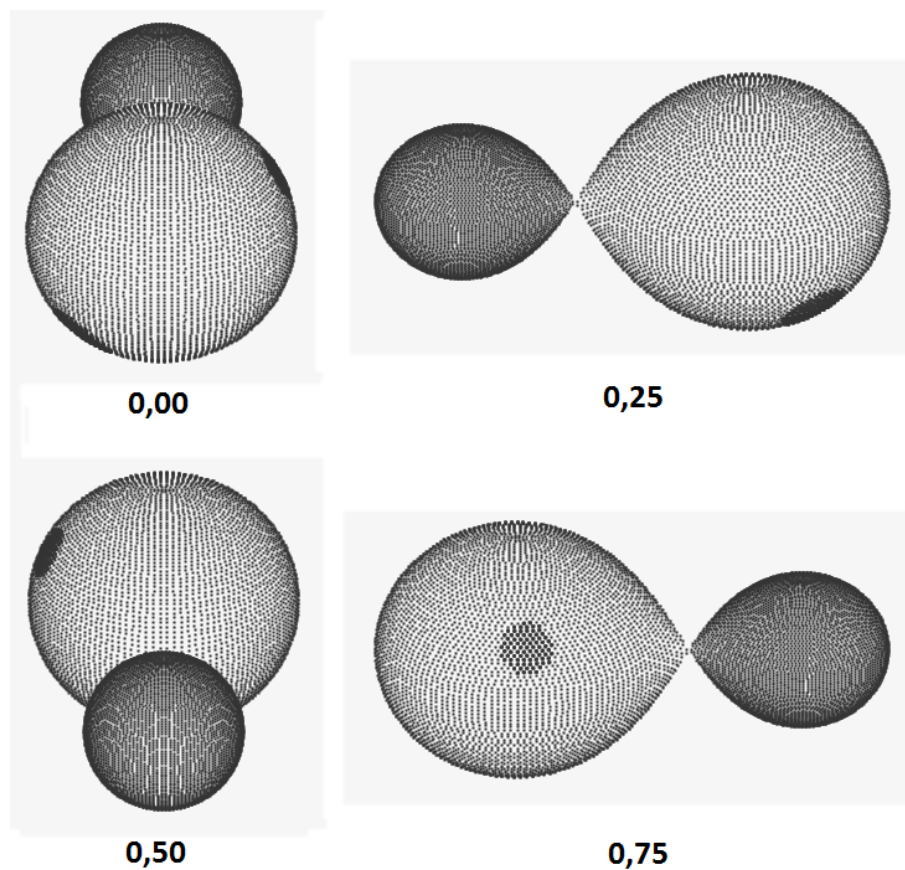
2014.08.10.



55. ábra. A megfigyelt és illesztett fénygörbék 2014. augusztus 10-én.



56. ábra. A megfigyelt és illesztett fénygörbék különbségei augusztus 10-én.



57. ábra. A kettős geometriai modellje a 2014. augusztus 10-i fénygörbe-modellezés alapján.

Paraméter	Első folt	Második folt
ϕ [°]	62,53	127,46
λ [°]	274,52	129,62
r [°]	11,58	15,49

16. táblázat. A csillagfoltok paramétere a 2014. augusztus 10-i fénygörbe-modellezés alapján.

Nyilatkozat

Alulírott **Mitnyan Tibor** Fizikus MSc szakos hallgató (ETR azonosító: **MITSABT.SZE**) a „**A VW Cephei érintkező kettőscsillag fizikai modellezése és felszíni aktivitásának vizsgálata**” című diplomamunka 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, 2015.május....

.....
a hallgató aláírása