

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI ÉS INFORMATIKAI KAR
OPTIKAI ÉS KVANTUMELEKTRONIKAI TANSZÉK

SZAKDOLGOZAT

Fedési kettős rendszerek fotometriája

Photometry of Eclipsing Binaries

Nagy Kristóf
Fizika BSc szakos hallgató

Témavezető:
Dr. Szalai Tamás
tudományos munkatárs

Szeged, 2019

Tartalomjegyzék

Célkitűzés	2
1. Bevezetés	2
2. Fedési kettős rendszerek	2
2.1. Fedési kettőscsillagok	2
2.1.1. Osztályozás a fénygörbe típusa alapján	3
2.1.2. Osztályozás Roche-térfogat kitöltöttsége alapján	4
2.2. A fotometriai eljárás egyéb alkalmazásai - a tranzitos exobolygók detektálása	5
2.2.1. Exobolygókat kutató távcsövek	7
2.2.2. A tranzitos fénygörbe tulajdonságai	8
2.3. A tranzitos fénygörbe alakja	11
2.3.1. Szélsőtédés	12
2.3.2. A kitakart felület	14
2.3.3. A fluxuscsökkenés a tranzit következtében	14
2.4. A tranzitos fénygörbeillesztő eljárás analitikus vizsgálata	15
3. Mérések és adatfeldolgozás	16
3.1. A képfeldolgozás lépései	16
3.1.1. A nyers képek korrigálása	16
3.1.2. A képfeldolgozás további lépései	18
3.2. Apertúra-fotometria	19
3.3. Periódusvizsgálat O-C diagram segítségével	19
4. Eredmények	21
4.1. Az előállított fénygörbék	21
4.2. A minimumidőpontok meghatározása	21
4.3. A fázisgörbék	23
4.4. A DF CVn O-C diagramja	25
Összefoglalás	25
Köszönetnyilvánítás	25
Irodalomjegyzék	26

Célkitűzés

Szaktervezésem témájaként a fedési kettős rendszerek fotometriáját választottam. A fedési rendszerek a csillagászat gyakran vizsgált célpontjai. Előnyük, hogy ha egy rendszerben két vagy annál több objektum található, akkor a rendszer és az azt alkotó tagok számos paramétere pontosabban – vagy egyáltalán – meghatározható. A dolgozat elsősorban két típusal foglalkozik, a fedési kettőscsillagokkal, valamint a tranzitos exobolygókkal. Utóbbi objektumok képezték projekt munkám témáját is, a távlati cél továbbra is az ilyen objektumok vizsgálata. Ehhez érdekes volt egy, hasonlóan vizsgálható fedési kettőscsillagot elemezni. A cél a DF Canum Venaticorum rendszerrel szerzett eddigi ismeretek gyarapítása, új fénygörbe-minimumidőpontok kimérése és a mért adatokat egy O-C diagramon vizsgálva a rendszer irodalmi keringési periódusidejének ellenőrzése.

1. Bevezetés

Dolgozatom során a fedési kettős rendszerek fotometriájának alapjait mutatjuk be. Ez magába foglal egy rövid, elméleti összefoglalást a fedési kettőscsillagokról, valamint a tranzitos exobolygókról, utóbbit egy nemrégiben megjelent angol nyelvű tankönyv (Transiting Exoplanets, 2010) alapján. Ezek után a FITS képekkel való műveletvégzésről és a fotometriálás elvéről és módjáról is szót ejtek. A DF Canum Venaticorum fedési kettőscsillagot vizsgáljuk archív, piszkéstartói felvételek használatával. Új fényességminimum-időpontokat állapítottam meg a rendszerre vonatkozóan, fénygörbét és fázisgörbét állítam elő, ezek után a periódus változását vizsgáltam egy O-C diagram elkészítésével. Végül összefoglalom a dolgozatban tárgyalt eredményeket.

2. Fedési kettős rendszerek

A fedési kettősök olyan rendszerek, amelyekben kettő komponens kering a közös tömegközéppontjuk körül, miközben a Földről nézve időnként látszólag elhaladnak egymás előtt, emiatt a rendszer látszó összfényessége ezekben az időszakokban lecsökken.

2.1. Fedési kettőscsillagok

A Világegyetem számos csillaga között igen sokféle tulajdonság megjelenik. Az egyik ilyen – elsőre meglepőnek tűnő jelenség – a kettőscsillagok léte. Ezek olyan rendszerek, amelyekben két csillag kering a közös tömegközéppontjuk körül, közülük sokszor nem lehet kijelölni a domináns komponens, és nem lehet azzal a közelítéssel élni, mint a csillag-bolygó rendszerek esetén, hiszen a komponensek tömege nagyságrendileg megegyezik. Az ilyen kettős- vagy többescsillagok keletkezése egyáltalán nem triviális, ráadásul az égen ragyogó csillagok nagyjából fele kettős (vagy többes) rendszer tagja, tehát egyáltalán nem ritka jelenségről van szó. Az egyik magyarázat lehet, hogy a születőfélben lévő protocsillag az impulzusmomentumának csökkentése végett kettéhasad, és így a két keletkező protocsillagból két csillag alakul ki, melyek gravitációsan kapcsolatban állnak egymással. Számos ismert csillag is kettős- vagy többes rendszer tagja, például az éjszakai égbolt legfényesebben ragyogó csillaga a Szíriusz, melynek B komponense egy fehér törpecsillag, valamint a Nap utáni legközelebbi csillag, a

Proxima Centauri egy hármas rendszer (az Alfa Centauri) tagja, amelyben az említett vörös törpecsillag a két főkomponensénél jóval nagyobb pályán kering a tömegközéppont körül. A kettőscsillagok között igen fontos szerepet töltenek be a fedési kettősök. Ezek olyan kettőscsillagok, amelyek keringési síkja közel esik látóirányunkhoz, így a Földről nézve időnként fedik egymást. Természetesen, mivel a keringés is, a fedések is periodikus folyamatok.

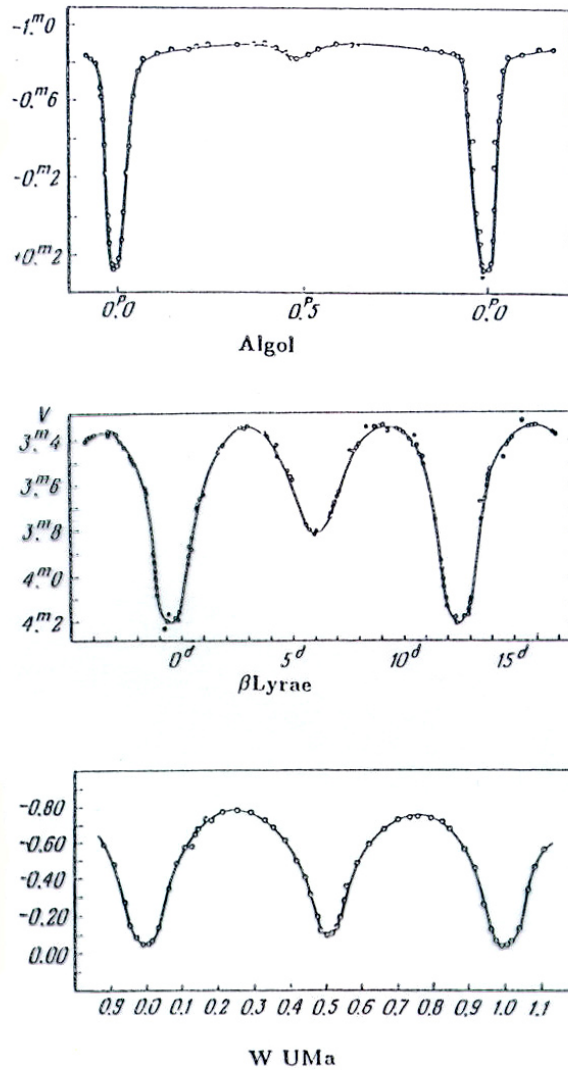
2.1.1. Osztályozás a fénygörbe típusa alapján

A fedési kettőscsillagok úgynevezett fénygörbéjét vizsgálva képet kaphatunk a csillagok számos paraméteréről, például a keringési idejükről, de akár a méretükről is. Ez a fénygörbe lényegében a csillagok fényességének (azaz észlelt fluxusának) vizsgálata az idő folyamán. Egy fedési kettőscsillag fénygörbéjében a periodikus fedések következtében ciklikusan ismétlődő minimumok jelennek meg, melyek mélysége a komponensek felületi fényességétől függ. Ezek alapján csoportosíthatók:¹

- Algol-típusú: A fénygörbét szignifikánsan megkülönböztethető fő- és mellékminimumok jellemzik. Mivel az ilyen kettősrendszerek komponensei igen távol találhatók egymástól, alakjuk közel gömb, így a fénygörbe a minimumokon kívül közel konstans fényességű szakaszokból áll.
- β Lyrae típusú: A fénygörbén a fő-és mellékminimumok közötti különbség jelentős. Az ilyen rendszerek tagjai közelebb vannak egymáshoz, így alakjuk a gravitációs vonzás miatt torzul, ellipszoid alakúvá válnak, emiatt a fénygörbén a minimumokon kívül is folyamatosan változó fényesség tapasztalható.
- W Ursae Majoris típusú: A fénygörbén a minimumok közel azonos mélységűek. A rendszer itt is ellipszoid alakú komponensekből áll, ezért a görbe további részei folyamatosan változó fényességet mutatnak.

A három csoportot a 1. ábrán mutatjuk be.

¹<http://astro.u-szeged.hu/oktatas/csillagaszat.html>



1. ábra. Az Algol, a β Lyrae és a W UMa típusú fedési kettősök fénygörbéjének idealizált alakjai; jól látszódnak az egyes a fő- és mellékminimumok viszonyai (forrás: astro.u-szeged.hu)
2

2.1.2. Osztályozás Roche-térfogat kitöltöttsége alapján

A kettőcsillagokat továbbá osztályozhatjuk a Roche-térfogat kitöltöttsége alapján is. A két csillagot két tömegpont alkotta rendszernek tekintjük, a gravitációs teret e kettő tömegpont tere adja. Ehhez a térhez ekvipotenciális felületek tartoznak, amelyeken egyes fizikai paraméterek, mint például a nyomás és a sűrűség, állandónak tekinthető. A két csillag ekvipotenciális felületei a belső Lagrange-pontban érnek össze, ezek jelölik ki a csillag Roche-térfogatát.

²<http://astro.u-szeged.hu/oktatas/asztrofizika/html/node75.html>

Ezek alapján három csoport különböztethető meg (Kopal 1955):

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

A két csoportosítás jó közelítéssel rendre megfeleltethető egymásnak. A kettőscsillagok Roche-térfogat kitöltöttsége alapján való csoportosítását a 2. ábrán mutatjuk be.

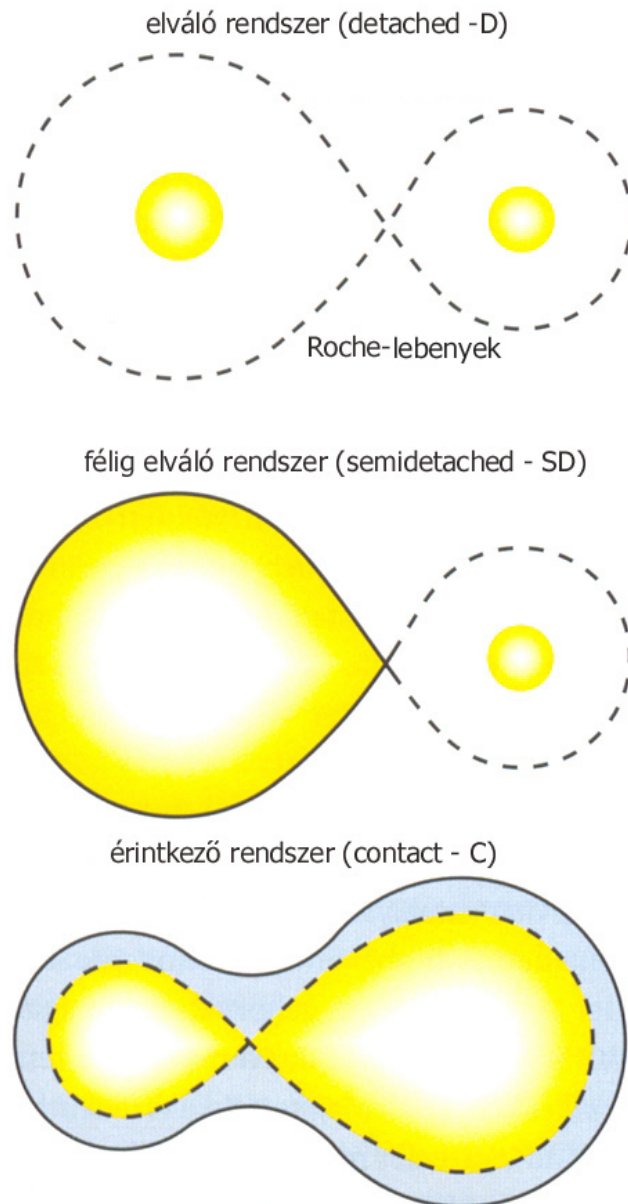
2.2. A fotometriai eljárás egyéb alkalmazásai - a tranzitos exobolygók detektálása

Az exobolygók, azaz a más csillagok körül keringő bolygók, felfedezése 1992-ben kezdődött. Ebben az évben Wolszczan és Frail (1992) egy pulzár periodikus fényimpulzusaiiban mérhető parányi modulációk segítségével három, a pulzár körül keringő bolygót fedeztek fel. Ezután 1995-ig várnunk kellett a további felfedezésekre, mivel abban az évben Mayor és Queloz (1995) egy az 51 Pegasi körül keringő bolygót publikáltak. Ez az objektum az 51 Pegasi b nevet kapta. Az exobolygók elnevezése a központi égitestük után a felfedezési sorrendnek megfelelő betűt kapják az ábécéből, kezdve a 'b'-vel (az 'a' a csillagra vonatkozik). A kétezres években aztán a témakörre koncentrált kutatások, valamint az űrtávcsövek és földi eszközök ilyen irányú felhasználásának következtében az exobolygók száma napjainkra több mint négyezer ³, nem beszélve a már feldezt, de még nem megerősített planétákról.

Az exobolygók detektálása egyáltalán nem egyszerű feladat. Lévén az égitestek saját fényvel nem rendelkeznek, a detektálásuk ugyan egyes esetekben lehetséges volt közvetlen kimutatással, mégis a közvetett módszerek a gyakoribbak. A felfedezési módszerek közé tartozik a már említett direkt kimutatás, amelyet általában infravörös tartományban végeznek, valamint az infravörös többletsugárzás észlelése, mely szintén közvetlen módszernek tekinthető. Közvetett módszerek az asztrometriai, spektroszkópiai, gravitációs perturbáló- és gravitációs-lencse-hatás, a pulzárjelek vizsgálata, valamint a dolgozat témájául szolgáló fotometriai vizsgálat. Az említett módszerek lényegében mindegyike a vizsgált csillagról érkező fény tulajdonságait vizsgálja, ebből vonva le következtetéseket a körülötte keringő bolygók létéről.

A csillagok látszó fényességváltozásán alapuló módszer a fotometria, ezzel exobolygók is felfedezhetők. A módszert tranzitos módszernek is nevezzük, mivel a bolygók a csillaguk előtti áthaladását vizsgáljuk. Egy ilyen helyzetben, a csillaga előtt elhaladó bolygó miatt a csillag fényessége minimálisan (néhány ezred vagy század magnitúdónyi értékkel) lecsökken. Ez a fénycsökkenés a bolygó keringéséből kifolyólag nyilván periodikus, ezért egyrészt szükséges a bolygójelöltek csillagait hosszabb ideig figyelni, hiszen az egyszeri fényességcsökkenések akár foltokra is utalhatnak, másrészt akár más módszerekkel, például a spektroszkópiai módszerrel együttesen használni, hiszen egyes csillagokon igen stabil foltok is kialakulhatnak. Az elsődleges fedésen túl úgynevezett másodlagos fedések is megfigyelhetők, ekkor a csillag

³<http://exoplanet.eu/>

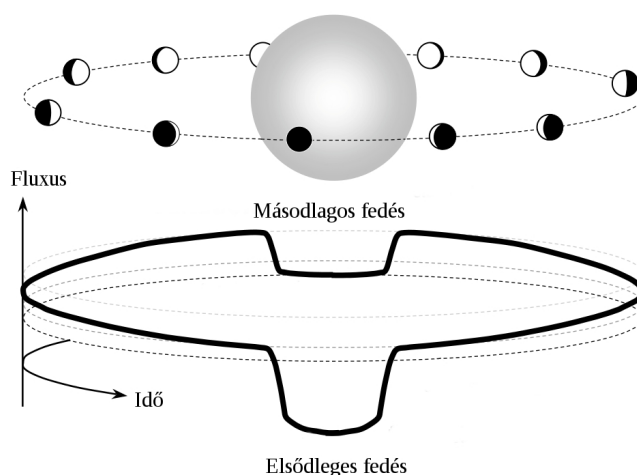


2. ábra. Az elváló-, a félig elváló- és az érintkező kettős rendszerek a Roche-lebenyük kitöltöttsége alapján (forrás: astro.u-szeged.hu) ⁴

takarja el bolygóját, és a bolygó járulékanak hiánya okoz egy, az előzőnél kisebb fényességcsökkenést. Természetesen ez a folyamat is periodikus, egy ilyen tranzitos exobolygóval rendelkező csillag fénygörbéje igen jellegzetes, két periodikus csökkenéssel is rendelkezik. A módszer nagy hiányossága, hogy nem minden exobolygó tranzitos, hiszen a Földről nézve nem mindegyik keringési síkja esik látóirányunkba. A felfedezett exobolygók közül mintegy 2800 ezzel a módszerrel került felfedezésre, ebből is látszik, hogy egy életképes módszerről van szó. Egy példa egy tranzitos fénygörbére a 3. ábrán látható.

A dolgozat bevezetőjéhez John W. Manson Exoplanets - Detection, Formation, Proper-

⁴<http://astro.u-szeged.hu/oktatas/asztrofizika/html/node75.html>



3. ábra. Egy idealizált tranzitos fénygörbe a két, az elsődleges- és másodlagos fedésből származó, minimummal⁵

ties, Habitability, illetve Carole A. Haswell *Transiting Exoplanets* című könyvét használtam fel, valamint nagy segítségemre voltak a Szegedi Tudományegyetem "Asztrofizika" elektronikus tanyagának⁶ témabavágó fejezetei, illetve az exoplanet.eu weboldal, ahonnan kapcsolatos számértékek származnak.

2.2.1. Exobolygókat kutató távcsövek

A kétezres évek óta az űrkutatásban igen komoly hangsúlyt fektetnek az exobolygók kutatására. A két legfontosabb műszer a Kepler és a CoRoT űrtávcső, valamint a nemrég felbocsátott TESS űrteleszkóp. Ezeken túl érdemes megemlíteni egyéb, földfelszíni kistávcsöves programokat is, mint a HAT vagy a WASP.

A Kepler-űrtávcső

Előbbi a legismertebb műszer a területen, amely 2009-es felbocsátása óta 2327 bolygót fedezett fel, ezzel a legtöbb planétát felfedező műszernek számít. Az eszköz működése alatt a Hattyú és Lant csillagképek régióját vizsgálta, mintegy 150000 fősorozati csillag fényét figyelve, ebben a régióban ugyanis kellően sok csillag található. Fontos volt, hogy a vizsgált égterületet bármely napszakban megfigyelhessük, ezért a műszer nem az ekliptika síkjában keringett, hanem abból kilépve, elkerülve ezzel a Napot. A méréshez a műszer 1 méteres tükörrátmérőjű, 105 négyzetfok látómezejű Schmidt-teleszkópját, valamint az ehhez rögzített 42 darab, egyenként 2200x1024 pixeles CCD-kamerák alkotta rendszert használhatták eddig a kutatók. Az eredetileg 3,5 évre tervezett missziót további 9 évig meghosszabbították, amely végül 2018 őszén állt le. A meghosszabbított, úgynevezett K2 misszió alatt a műszer azonban már nem csak egy adott égterületet vizsgált.

⁵<https://heatherbloemhard.files.wordpress.com/2013/05/transitjw.png>

⁶<http://astro.u-szeged.hu/oktatas/asztrofizika/html/all.html>

A CoRoT

A Naprendszeren kívüli planéták kutatásában a másik nagyon fontos műszer a francia CoRoT (Convention, Rotation and Planetary Transits) űrtávcső. Az eszköz missziója 2006-ban kezdődött és 2013-ban ért véget. A maga 27 centiméteres tükörátmérőjű teleszkópjával és a hozzá tartozó 4, 2048x2048 pixeles CCD-kamerájával a Kepler után a második leghatékonyabb exobolygókutató űreszköz volt, a maga 30 felfedezett bolygójával. Ezek közül említésre méltó a COROT-7b, amely az elsőnek felfedezett, földszerű kőzetbolygó. Az eszköz 896 km magasan a felszín felett, egy kör alakú, poláris pályán keringett, a megfigyelt égterület egy, a pályára merőleges, 10° -os szögű, kúp alakú tartomány volt.

A TESS

E két, pályafutását már befejező műszeren túl megemlítjük a TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) űrtávcsövet. A műszert 2018 nyarán bocsátották fel, az első képek 2018 szeptemberében érkeztek meg. A műszer a tervek szerint képes detektálni egyaránt gáz- és kőzetbolygókat. Az eszköz egy két évig tartó küldetés során mintegy 200000 csillag fényességét vizsgálja majd a rászerezelt 4 darab, egyenként kb. 10 cm átmérőjű teleobjektívvel, összetett kamerarendszert alkotva, ezzel jóval pontosabb méréseket végezve, mint elődje, a Kepler. Az elvárások szerint akár 1500 új exobolygót is felfedezhet működése két éve során.

Földfelszíni távcsövek

A HAT (Hungarian-made Automated Telescope Network) egy hét távcsőből álló tranzitos exobolygókat kereső rendszer. A teleszkópokat más-más helyeken helyezték el, öt található a Fred Lawrence Whipple Observatory (FLWO) területén a Arizonában a Mount Hopkins területén, kettő pedig Hawaii-on, Mauna Keán. Eddigi működése alatt 61 exobolygót detektáltak. A programot azóta a déli féltekére elhelyezett, további 6 teleszkóppal is kibővítették (HatSouth projekt).

A WASP (Wide Angle Search for Planets) 1999-ben alapított projekt. Műszerei a Kanári-szigeteken, La Palmán található SuperWASP-North, valamint a dél-afrikai WASP-South, mindkét műszer robotikus. Napjainkra a projekt több mint 100 exobolygót detektált.

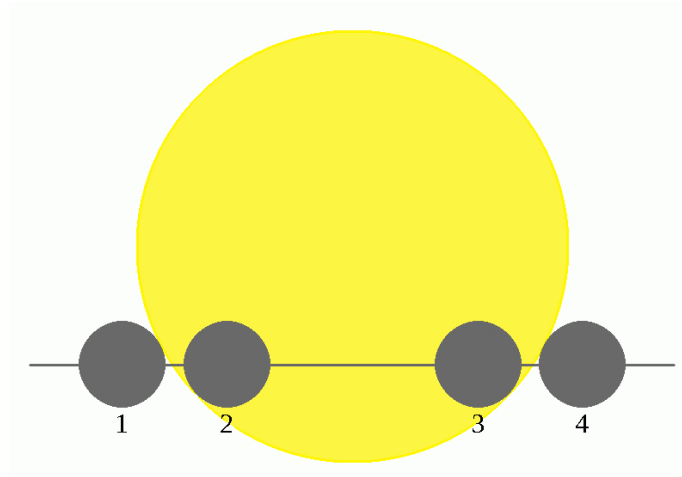
2.2.2. A tranzitos fénygörbe tulajdonságai

A fotometriai módszernél egy csillag fénygörbéjét vizsgáljuk. Ez abban nyilvánul meg, hogy a csillag fényességének (fluxusának) időbeli változásában keresünk periodikus változásokat, amelyek egy körülötte keringő bolygó jelenlétére utalnak. Egy bolygó áthaladását a csillaga előtt elsődleges fedésnek nevezzük. Ekkor a fénygörbében egy nagy meredekségű, de kis mértékű, hirtelen csökkenés áll be. A fényességcsökkenés néhány ezred- vagy század magnitúdó csupán.

A tranzit fázisai

A tranzitnak, vagyis az átvonulásnak négy, karakterisztikus fázisát különböztethetjük meg. Ezek közül az első fázis, amikor a bolygó és a csillagának korongja látszólag egy pontban metszi egymást, azaz amikor a bolygó elkezd belépni a csillaga elé. A második fázis mikor éppen a teljes bolygókorong bekerül a csillag korongja elé. A harmadik fázis, mikor a bolygó

még éppen teljesen a csillag korongja előtt látszik, lényegében a második eset fordítottja. A negyedik pedig az első fordítottja, mikor a bolygó éppen elhagyni látszik csillagát. Ezeket a fázisokat a 4. ábrán szemléltetjük.



4. ábra. A tranzitos fénygörbe fázisai⁷

A tranzit időtartama

Természetesen, mint már említettük, nem minden bolygó esetén észlelhetünk tranzitot, hiszen nem minden esetben vonul át a bolygó a csillaga előtt, ez nyilván attól függ, hogy a rendszer keringési síkja a Földről milyen szög alatt látszik, ezt a szöget pályainklinációnak nevezzük. Ezen kívül megfigyelhetünk egy távolság jellegű mennyiséget a tranzit láthatóságára, ez lesz az úgynevezett hatásparaméter, amely megmutatja a tranzit középpontjának síkbeli távolságát a csillag korongjának középpontjától. A rendszer geometriája a 5. ábrán látható. A két mennyiség között az alábbi formula teremt kapcsolatot:

$$b = a \cdot \cos(i) \quad (1)$$

Ezen mennyiségek segítségével lehetőségünk nyílik a tranzit időtartamának jellemzésére. Vegyük azt az esetet, mikor a bolygó éppen negyedik fázisban található, tehát látszólag éppen elhagyta csillag korongját. A geometria ebben a helyzetben a 6. ábrán látható. Az ábra alapján egy egyszerű Pitharogasz-tétellel könnyedén adódik az alábbi összefüggés:

$$l = \sqrt{(R_* + R_p)^2 - a^2 \cdot \cos^2(i)} \quad (2)$$

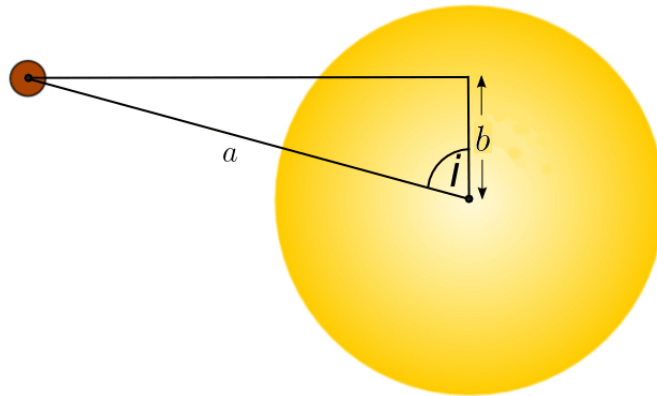
Tegyük fel, hogy a vizsgált bolygó körpályán kering csillaga körül, ekkor az 1. és 4. fázisát jelöljük A és B pontokkal. A két pont és a csillag középpontja által meghatározott szög legyen α , a rendszert a 7. képen láthatjuk. Ekkor némi közelítéssel a szög szinusza:

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{l}{a} \quad (3)$$

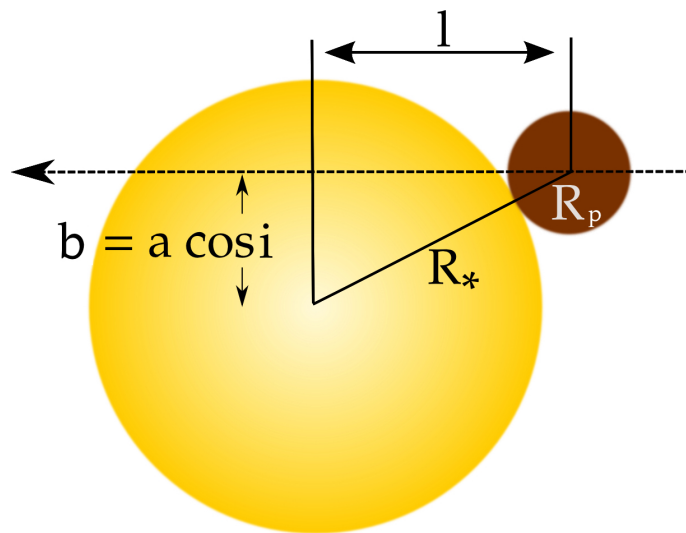
Ezzel a tranzit időtartama egyszerűen adódik:

⁷<https://www.astro.uni-jena.de/wasp-3/gfx/wasp3-lc.gif>

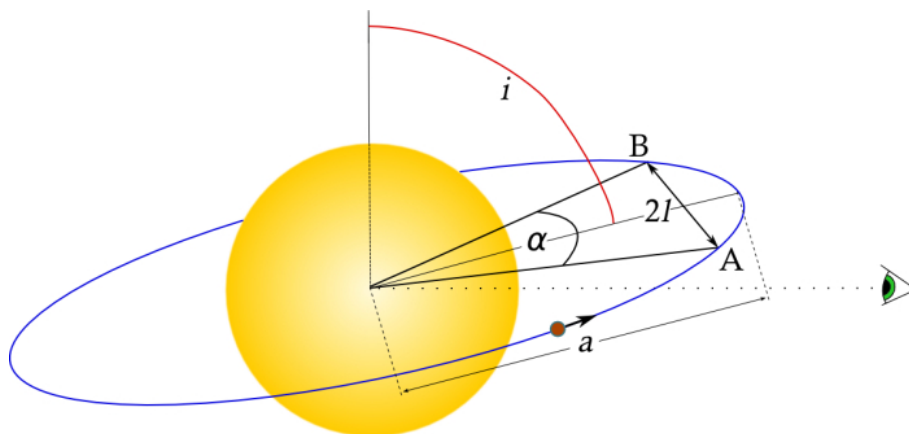
$$b = a \cos i$$



5. ábra. A pályainklináció és a hatásparaméter szemléltetése⁸



6. ábra. A rendszer geometriája a negyedik fázisban, feltüntetve a használt mennyiségeket⁹



7. ábra. A tranzit időtartamának kiszámításához használt mennyiségek¹⁰

$$T_t = P \frac{\alpha}{2\pi} = \frac{P}{\pi} \arcsin \left(\frac{l}{a} \right). \quad (4)$$

Behelyettesítve (2) egyenletet:

$$T_t = \frac{P}{\pi} \arcsin \left(\frac{\sqrt{(R_* + R_p)^2 - a^2 \cos^2(i)}}{a} \right). \quad (5)$$

Éljünk néhány közelítéssel a felállított egyenlet kapcsán! Ha feltesszük, hogy $a \gg R_* \gg R_p$, akkor az előző egyenlet az alábbi formára egyszerűsödik:

$$T_t = \frac{P}{\pi} \sqrt{\left(\frac{R_*}{a} \right)^2 - \cos^2(i)} \quad (6)$$

valamint, hogyha $i = 90^\circ$, vagyis $b = 0$, akkor:

$$T_t = \frac{P}{\pi} \arcsin \left(\frac{R_*}{a} \right). \quad (7)$$

Az előbbi formula segítségével, ismert M_* csillagtömeg és R_* csillagsugár esetén, ezeket jó közelítéssel a csillag színektípusából is származtathatjuk, valamint a T_t tranzitidő és P keringési periódus mérésével a pályainklináció előáll.

Mindezekon túl, hogyha a pályainklinációt a megadott módon kiszámoltuk, az első és második fázis közti idő mérésével becslést adhatunk a bolygó sugarára. A már említett első két fázis között a bolygó teljesen belép a csillag korongja elé, az ehhez szükséges idő függ a pályainklinációtól, a két korong sugarától, valamint a pályasebességtől. A bolygó sugarát ezen kívül egy más módszerrel is megbecsülhetjük, ugyanis a csillag fluxusának megváltozása, azaz a tranzit mélysége és a teljes fluxus úgy aránylanak egymáshoz, mint a bolygó és a csillag sugarainak négyzetei:

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{R_p^2}{R_*^2} \quad (8)$$

2.3. A tranzitos fénygörbe alakja

Megtekintve egy mérésekből származó fénygörbét, láthatjuk, hogy a fénygörbe alja nem egyenes, sokkal inkább egy ívelt, középen minimumot felvevő görbe, ez jól látszik a 3. ábrán is. Ezt a viselkedést az eddigi egyenleteinkkel nem tudjuk megmagyarázni. A (8) egyenlet jobb oldala a két égitest sugarainak négyzetes aránya, ez a folyamat során érthetően nem változhat, ezért a bal oldalon a fluxusmélység megváltozásával a teljes fluxusnak is változnia kell, hogy a kifejezés értéke konstans lehessen. Erre az eredményre a szélsötétedés nevű jelenség ad magyarázatot.

⁸<https://www.physicsforums.com/attachments/transit-2-png.81474/> alapján

⁹<https://www.paulanthonywilson.com/wp-content/uploads/2014/08/star-next-to-planet1.png> alapján

¹⁰<https://www.paulanthonywilson.com/wp-content/uploads/2014/08/complicado-700x330.png>; valamint Transiting Exoplanets 94. oldal

2.3.1. Szélsötétedés

Véve egy Napról készült képet, szembeötlő, hogy a középpont jóval fehérebbnek, a szélek jóval vörösebbnek tűnnek. Ezt a jelenséget nevezzük szélsötétedésnek, a csillagok fénye a teljes korongjukra véve nem egyenletes, sokkal inkább a középponttól kifelé gyengül. A jelenség oka abban keresendő, hogy mennyi és milyen frekvenciájú fotonok jutnak az egyes irányokból a megfigyelőhöz. Egy csillagból érkező fotonok a csillag számos rétegéből érkehetnek. Egy foton megszökésének valószínűsége egy adott rétegből a réteg optikai mélységétől függ. Egy adott frekvenciájú adott X pozícióból a végtelenbe távozó fotonra ez a mennyiség az alábbi integrállal állítható elő:

$$\tau_\nu = \int_X^\infty \rho(s) \kappa_\nu ds \quad (9)$$

ahol s a távolság, ν a frekvencia, $\rho(s)$ a távolságtól függő sűrűség, κ_ν az úgynevezett opacitás, mely szintén függ a frekvenciától.

Mivel az opacitás egy frekvenciafüggő mennyiség, így az optikai mélység is ilyen lesz. Ezért a csillag azonos rétegeinek optikai mélysége eltérő az egyes frekvenciájú fotonokra. Annak valószínűsége, hogy egy foton elnyelődés vagy szóródás nélkül érkezik a megfigyelőhöz:

$$\frac{I}{I_{ki}} = e^{-\tau_\nu} \quad (10)$$

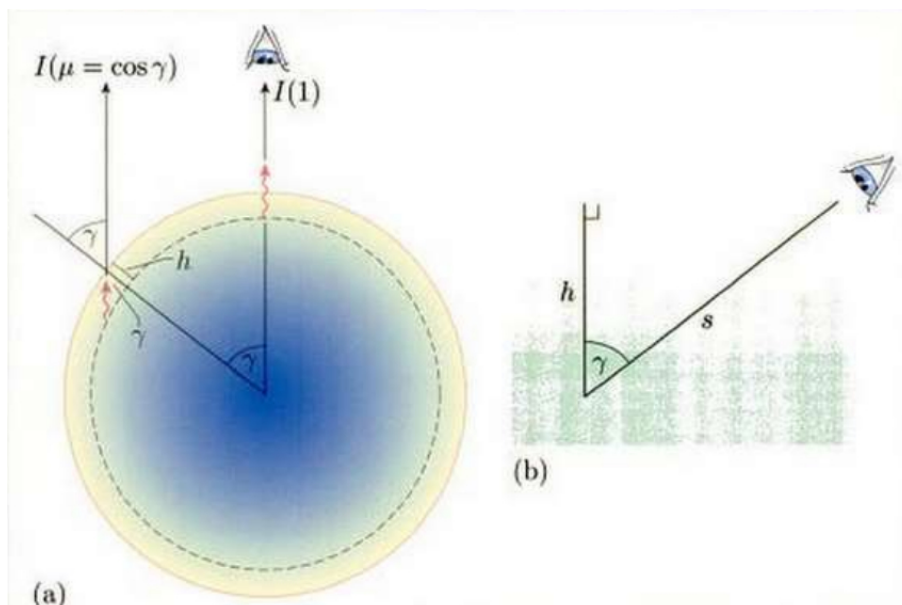
ahol I a kijövő intenzitás, I_{ki} a teljes kibocsátott intenzitás.

Mivel a csillagászatban egy valójában véges távolságban lévő fényforrást végtelen távolságúnak tekintünk, így az észlelő szemébe, vagy a távcsőbe elméletileg csak olyan fotonok jutnak, amelyek az egyenesen a megfigyelő irányába jutó fénysugarakat alkotják, vagyis nulla fokos az eltérésük ettől az iránytól. Feltehetjük, hogy alapvetően kétféle foton van az egyik hipotetikusan a csillag középpontjából érkezik, és radiálisan kifelé haladva egyenesen a megfigyelőhöz érnek el. Ezek a fotonok a lehető legrövidebb utat járják be, amely egyenlő a csillag középpontjának távolságával is. A másik típusú foton az irányát a csillag atmoszférájában lejátszódó emissziós- és abszorpciós folyamatok révén nyeri el. Mivel egy ilyen foton egyszerű geometriai megfontolások alapján nagyobb utat fut be, mint a radiálisan kifelé haladó, nyilvánvalóan a sugárirányban kifelé haladó fotonok a csillag mélyebb, tehát melegebb rétegéből érkeznak, mint a szélről érkezők, ezért utóbbiak hullámhossza inkább a vörös felé tolódik. Ez, valamint a szél felé egyre kevesebb, adott irányba kibocsátott foton okozza, hogy a csillagok halványabbak és vörösebbek a szélükön, mint a korongjuk középpontjában. Egy adott mélységből érkező foton útja a csillag légkörében:

$$s \approx \frac{h}{\cos \gamma} = \frac{h}{\mu} \quad (11)$$

ahol s a foton által a csillag légkörében megtett út hossza, h a mélység, amelyből érkezett, γ a radiális és a megfigyelési irányok által bezárt szög, valamint $\mu = \cos \gamma$. A rendszer geometriája a 8. ábrán látható.

Természetesen ennek a jelenségnek a vizsgálata közvetlen módon csak a Nap esetén lehetséges. A vizsgálódások már csak azért is nehezek, mert a jelenség egyaránt függ az opacitástól és az emisszióképességtől, ráadásul minden egyes rétegre különböző a csillagban. Mivel ezek a mennyiségek a hullámhossz függvényében változnak, sőt, a rendszer termodinamikai állapotától is függenek, ezért lényegében a csillagok spektráltípusával és összetételükkel



8. ábra. Egy foton útjának szemléltetése a csillagának légkörében¹¹

jellemezhető. A nehézségek miatt empirikus formulákkal igyekeznek leírni egy-egy csillag szélsőtétedését, amit összevetve a Napra vonatkozó mérésekkel, láthatóan nem egyezik elég jól minden fotonra, ez pedig a fotonnak a radiális iránytól való eltérülési szögétől függ.

A legegyszerűbb szélsőtétedési formula egyszerű lineáris függést feltételez:

$$\frac{I(\mu)}{I(1)} = 1 - u(1 - \mu) \quad (12)$$

ahol u a szélsőtétedési koeficiens, egy, az adott csillagra jellemző állandó, mely megadja a középpont és a szél közötti intenzitásváltozás gradiensét. A formula azért szerencsés, mert egy konstans meghatározására van csak szükség, viszont a legtöbb esetben kevésbé pontos leírási módszernek bizonyul.

Létezik logaritmikus függést feltevő törvény is:

$$\frac{I(\mu)}{I(1)} = 1 - u_l(1 - \mu) - \nu_l * \mu * \ln \mu \quad (13)$$

ahol u_l és ν_l egyaránt szélsőtétedési koeficiensek. Látható, hogy a formulában szereplő két konstans miatt használata nehezebb, ellenben esetleg jobb eredményre vezethet.

Két további összefüggés a kvadratikussal:

$$\frac{I(\mu)}{I(1)} = 1 - u_q(1 - \mu) - \nu_q(1 - \mu)^2 \quad (14)$$

és köbös törvények:

$$\frac{I(\mu)}{I(1)} = 1 - u_c(1 - \mu) - \nu_c(1 - \mu)^3 \quad (15)$$

ahol u_q , ν_q , u_c és ν_c szintén konstansok.

¹¹Transiting Exoplanets, 99. oldal

2.3.2. A kitakart felület

Érdekes kérdés, hogy hogyan lehetne leírni a bolygó által kitakart felületet a tranzit ideje alatt. Annál is inkább fontos lehet ezt meghatározni, mivel nyilván a fényesség függ a felület nagyságától. Fejezzük ki a távolságot és a bolygó sugarát a csillag sugarának segítségével:

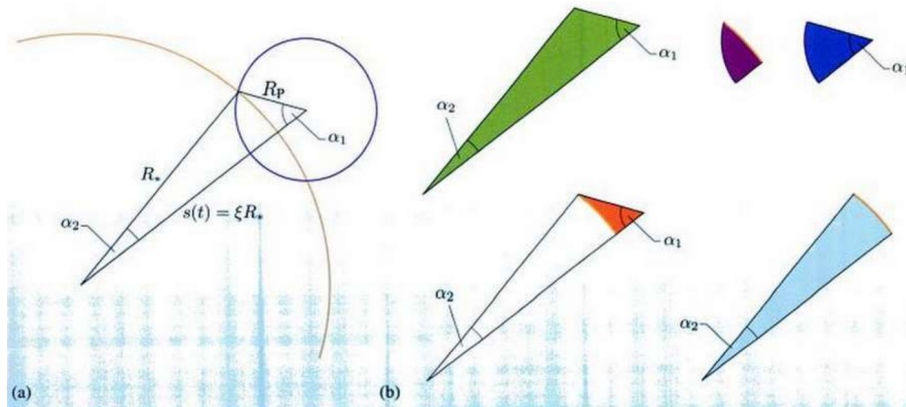
$$s(t) = \xi R_* \quad (16)$$

$$R_p = p R_* \quad (17)$$

ahol p egy konstans, míg ξ változik az idővel, $s(t)$ a két égitest síkvetületének távolsága. A rendszer jellemzése a 9. ábra alapján, megfelelő geometriai megfontolásokkal, feltételezve, hogy a bolygó egy kör alakú pályán kering csillaga körül, a kitakart felületre az alábbi formula áll elő:

$$A_e = \begin{cases} 0, & \text{ha } 1 + p < \xi, \\ R_*^2 \left(p^2 \alpha_1 + \alpha_2 - \frac{\sqrt{4\xi^2 - (1 + \xi^2 - p^2)^2}}{2} \right), & \text{ha } 1 - p < \xi \leq 1 + p, \\ \pi p^2 R_*^2, & \text{ha } \xi \leq 1 - p. \end{cases} \quad (18)$$

ahol A_e a kitakart felület nagysága, R_*^2 a csillag sugara. Látható tehát, hogy a fedésből származó felületcsökkenés leírása nem könnyű feladat.



9. ábra. A kitakart felület jellemzésére használt geometriai jellemzők szemléltetése ¹²

2.3.3. A fluxuscsökkenés a tranzit következtében

Az eddigiek alapján egy tranzitos exobolygó eltakar egy részt a csillagából, ezért abból kevesebb energia érkezik a földi megfigyelőhöz, kisebb a mért fluxusa. A fluxus a csillag által kibocsátott sugárzás intenzitásának a felületre vett integrálja. Abban az esetben, ha nincsen tranzit, vagyis a csillag teljes felületére végezzük az integrálást, a teljes fluxusról beszélünk, amely az integrálást elvégezve egyszerűen:

$$F = I \pi R_*^2. \quad (19)$$

¹²Transiting Exoplanets, 105. oldal

A fluxus csökkenése egyszerűen a kitakart felületre vett integrál. Ezek után:

$$\Delta F = I A_e \quad (20)$$

Természetesen ez egy közelítő formula, elvégre eltekintettünk a szélsötétedéstől. Ez abban nyilvánul meg, hogy a csillag intenzitása nem konstans, így a felállított formulák nem adnak helyes eredményt. Ahhoz, hogy ezt figyelembe vegyünk osszuk fel a csillagot azonos vastagságú, vékony gyűrűkre, melyekre az intenzitást már konstansnak tekinthetjük. Legyen r a normált axiális koordináta:

$$r = \frac{r'}{R_*} \quad (21)$$

ahol $0 \leq r \leq 1$. Ez adja meg, hogy milyen távol vagyunk a csillag középpontjától. Egy gyűrű területe:

$$dA(r) = \frac{dA_e}{dr'} dr'. \quad (22)$$

Felhasználva a korábban már látott változókat a teljes terület az alábbi integrállal áll elő:

$$\int_0^{r'=rR_*} \frac{dA_e}{dr'} dr' = A_e \left(rR_*, \frac{p}{r}, \frac{\xi}{r} \right). \quad (23)$$

ahol felhasználva, a p és ξ mennyiségek meghatározásait:

$$\int_0^{r'=rR_*} \frac{dA_e}{dr'} dr' = r^2 A_e \left(R_*, \frac{p}{r}, \frac{\xi}{r} \right). \quad (24)$$

ezt visszahelyettesítve a kiindulási formulába:

$$dA(r) = \frac{d}{dr} \left[r^2 A_r \left(R_*, \frac{p}{r}, \frac{\xi}{r} \right) \right] dr \quad (25)$$

ezzel a fluxusváltozás már megadható, figyelembe véve a szélsötétedést:

$$\Delta F = \int_{r=0}^{r=1} I(r) \frac{d}{dr} \left[r^2 A_r \left(R_*, \frac{p}{r}, \frac{\xi}{r} \right) \right] dr. \quad (26)$$

Ezzel a kifejezéssel megadható a tranzitos fénygörbe konkrét alakja, hogyha ismerjük a szélsötétedést leíró megfelelő formulát, a bolygó és a csillag sugarát, a keringési időt, a bolygó pályájának félnagy tengelyét, valamint a pályainklínációt.

2.4. A tranzitos fénygörbeillesztő eljárás analitikus vizsgálata

Látszik, hogy a tranzit mélysége a két objektum, a bolygó és a csillag sugarainak arányától függ. Azt azonban nem tudjuk, hogy nem kapunk értéket magára a bolygó sugarára. Viszont a tranzit mélységével a bolygó pályájának félnagy tengelye (egyszerűbb modellekben sugara) is megadható a sugarak valamelyikével, tehát megkaphatjuk $R_p : R_* : a$ arányt. A keringési periódus és a csillag tömege relatíve könnyen meghatározhatók, így ezekből az értékekből, akár Kepler III. törvényével, a félnagy tengelyt megadhatjuk.

Fontos, hogy a mérések során megkapott eredményeik összhangban legyenek a már egyébként végzett mérésekkel, valamint egyáltalán lehetséges értékek legyenek. Elvárhatjuk, hogy:

- a csillag R_* sugara legyen konzisztens a spektráltípus alapján elvárt mérettel;
- a tranzit időtartama összhangban kell legyen R_* és a értékekkel;
- a tranzitgörbe alakja szükség szerint egyenlő kell legyen a hatásparaméter alapján elvárt értékkel.

3. Mérések és adatfeldolgozás

A szakdolgozati munka gyakorlati részében elsősorban a DF Canum Venaticorum (szokásosan rövidítve DF CVn) W Ursae Majoris típusú fedési kettőscsillaggal foglalkoztam. A kettőscsillag a Vadászebek csillagképben helyezkedik el, az északi égbolt egy halványabb csillagképében. Lévén az objektum W UMa típusú, a fénygörbéjében a fő- és mellékminimumok közel azonosak. Természetesen a kettős számos katalógusban megtalálható más katalógusnéven (például 03021-02642 a GSC és J12433724+3844156 a 2MASS adatbázisában.) Égi koordinátái: $\alpha_{2000} = 12^h 41^m 37,24^s$ és $\delta_{2000} = +38^\circ 44' 15,62''$.¹³

A kettős a csillagászati szakirodalomban is megjelenik, ám nem tartozik a kifejezetten gyakran vizsgált fedési kettősök közé. A dolgozat során használt mérési adatok az MTA CSFK Csillagászati Intézet Pizskéstetői Observatórium 60/90/180 cm-s Schmidt-távcsövével készültek. Az említett intézmény hazánk legnagyobb obszervatóriuma, fennállása óta az ott dolgozó kutatók számos változócsillagot vizsgáltak. A mérési adatok 2003 május 16-án és 18-án este készült archív felvételekből származnak. A mérési adatok a csillagászati mérések és kutatómunka során igen gyakran használt FITS (Flexible Image Transport System) képfarmátumban készültek. Ezen képtípusok jellemzője, hogy tömörítésmentesek, valamint tartalmazzak egy, a mérés körülményeivel, mint paraméterekkel ellátott fejléct.

3.1. A képfeldolgozás lépései

Az IRAF (Image Reduction and Analysis Facility)¹⁴ programcsomag a FITS képek kezelésére használható. Segítségével a különböző korrekciók, valamint a fotometriai vizsgálatok is elvégezhetők.

3.1.1. A nyers képek korrigálása

A csillagászati mérésekhez használt FITS képek, mint bármely más mérési eljárás, rendelkezik némi mérési hibával. A hibák kiküszöbölésére bias-, dark- és flatkorrekciókat szokás végezni a képeken.

- Bias-korrekció: A CCD-chipek között úgynevezett offset-feszültség esik, ezért a képek kiolvasása esetén, még az azonali kiolvasás esetén is megjelenik egy alap jelszint, amely minden egyes képen megfigyelhető. Ezt a jelszintet a további vizsgálódások előtt le kell vonni a képekből. Ehhez több bias-képet készítünk az adott éjszakán, majd azokat átlagolva (az IRAF *noao.imred.ccdred.zerocombine* taszkjával) és az átlagolt képet az objektumképekből levonva (a *noao.imred.ccdred.ccdproc* taszkkal) bias-korrigált objektumképeket állíthatunk elő. Azonban, ha ez az alap jelszint és a lentebb leírt

¹³A Simbad adatbázisa: <http://simbad.u-strasbg.fr>

¹⁴<https://iraf.net>

dark-jelszint közel esik egymáshoz, akkor a felesleges képzajosítás elkerülése érdekében az előbbi az objektumképek esetében kihagyható. A mérés során ezért így jártam el.

- Dark-korrekción: A kamerában a töltéseket szolgáltató elektronok a nem nulla abszolút hőmérsékletű közeg miatt hőmozgást végeznek. Ez a sötétáram a képeken véletlenszerűen felfényesedő pixeleket okozhat. A sötétáram ellen a detektorok hűtésével lehet védekezni, mivel a sötétáram a hőmérséklettel exponenciálisan nő, így a hűtött rendszereknél jóval gyengébb a jelenség. A detektorokat Peltier-elemekkel vagy a drágább folyékony nitrogén keringetésével hűthetjük. A FITS képek korrekciója esetén a mérések éjszakáján, zárt kamerarekesszel készítünk képeket, azonos expozíciós idővel mint az objektumképeket. Az expozícióként átlagolt képeket aztán levonjuk az objektumképekből. Az átlagolás a *noao.imred.ccdred.darkcombine*, míg a levonás *noao.imred.ccdred.ccdproc* taszkkal végezhető el.
- Flat-korrekción: Természetesen az is előfordul, hogy a kamera felszínén egyszerűen valamilyen szennyeződés van, továbbá a pixelek kvantumhatásfoka sem teljesen egyenletes. Ezen hibák korrigálására a flat-korrekción alkalmazható. Ezeket a képeket egyenletesen kivilágított kamerával, szűrőnként külön-külön kell készíteni. A szűrőnként elkészült flatképeket medián-átlagolva, ehhez használható az IRAF *noao.imred.ccdred.flatcombine* taszkja, majd ezekkel leosztva a megfelelő objektumképeket előállnak a korrigált képek. Utóbbihoz a *noao.imred.ccdred.ccdproc* taszk nyújt segítséget.

Példaként bemutatok két képet, egy korrigálatlan, nyers objektumképet a 10. ábrán és ennek korrigált változatát a 11. képen. Mindkét kép a DF CVn égterületéről készült, B színszűrővel.



10. ábra. Egy korrigálatlan, nyers objektumkép a DF CVn égterületéről.



11. ábra. Az előző kép egy korrigált változata, látszik, hogy a felfényesedett pixelek eltűntek és tisztább lett a kép.

3.1.2. A képfeldolgozás további lépései

- **Julián-dátum írása a FITS képek fejlécébe:** A Julián-dátum (szokásos rövidítéssel JD) a Kr.e. 4713 január 1. 12:00 GMT óta eltelt napok számát adja meg. A nem egész napnyi értékek tizedestört formában adhatók meg. Ez a folyamatos időszámítási módszer nagyban megkönnyíti a csillagászati időpontok kezelését. A Julián-dátum pontos időmérésekhez szükséges formája az úgynevezett heliocentrikus Julián-dátum amely már a Föld Nap körüli keringéséből adódó időeltolódásokkal is korrigál, ezt szokásosan HJD-nek rövidítjük. A Julián-dátumokkal való fejlécbővítést egyszerűen az IRAF *noao.astutil.setjd* taszkjának segítségével tehető meg, amelynek az észlelés földrajzi koordinátáit, tengerszintfeletti magasságát, illetve a mérési pontos idejét megadva kiszámítja, majd a képek fejlécébe írja a heliocentrikus Julián-dátumot.
- **A képek összetolása:** A távcsövek ugyan nagy pontossággal képesek követni az égbolt látszólagos mozgását az éjszakák során, de hosszabb expozíciós idők esetén a vezetés pontatlansága miatt ezekbe némi hiba csúszhat. Végeredményként az egyes objektumok az egymás után készített képeken kissé elmozdulhatnak. Annak érdekében, hogy ezeket az elmozdulásokat kikorrigáljam, a *noao.images.immatch.imalign* taszkot használtam. Általános esetben a taszk használata igencsak hosszadalmas, azonban a vizsgált képeken kevés objektum található, nincsenek sűrű csillagmezők, ezért elegendő volt egy, az első kép néhány csillagának koordinátáit, mint referenciát tartalmazó fájlt elkészítenem, amelyet használva a program képes eltolni a képeket. Az objektumok koordinátáit az IRAF *imexam* taszkjával könnyedén előállítottam.

3.2. Apertúra-fotometria

A csillagok fényességét a fotometriai eljárással vizsgálható. Ennek egyik legfontosabb válfaja az úgynevezett apertúra-fotometria. Ebben az eljárásba az adott objektum fényességét egy adott, általában kör alakú, tartományban található pixelek intenzitásainak összegzésével határozzuk meg, ezt a tartományt nevezzük apertúrának. Az apertúra méretét célszerű a csillagprofil félértékszélességével megegyező méretűnek, illetve annál kicsit nagyobbnak választani, hiszen nyilvánvalóan cél, hogy a csillag teljes fényességét magába foglalja, ellenben a háttérből lehetőleg keveset tartalmazzon.

A háttér megnövelheti a mérés hibáját, amelyet csökkenthetünk, hogyha az apertúrán kívül egy nagyobb sugarú körgyűrűt is felveszünk, és a körgyűrűn belüli pixelek átlagintenzitását levonjuk az előzőleg kapott értékből. Ezután a magnitúdóban mért fényesség már könnyen előállítható az ismert képlet használatával:

$$m_\lambda = -2,5 \lg(F_\lambda) + k_\lambda. \quad (27)$$

ahol m_λ a magnitúdóban mért fényesség, adott hullámhosszon, F_λ a mért fluxus az adott hullámhosszon, míg k_λ pedig egy hullámhosszfüggő konstans.

Fontos azonban észrevenni, hogy a csillagok fényessége – még akkor is, ha valójában állandó – a földi légkör viszonyainak változásával csak igen komoly mérési hibák árán határozható meg. Éppen ezért differenciális fotometriálást végeztem. A differenciális fotometriálás lényege az, hogy felteszem, a távcső által vizsgált égterület kicsi, a benne lévő légköri viszonyok egy-egy képre a kép minden pontjában azonosnak tekinthetők. Ha ez igaz, akkor nem a vizsgált változócsillag fényességét direktben, hanem egy állandó fényességű összehasonlító-csillaggal vett fényességkülönbséget érdemes meghatározni, ezzel ugyanis kiejthetők a légkör okozta hibák. Az állandó fényességű összehasonlítókról kritérium, hogy közel a változóval megegyező látszó fényességük legyen. Változásokat nem mutató összehasonlítókat meghatározásához két összehasonlítót választottam, majd ezekkel is elvégeztem egy differenciális fotometriálást. A kapott fénygörbe egy adott érték körül szóró egyenes, így a két csillagot tekinthetjük állandó fényességűnek és bármelyik használható mint összehasonlító.

Az IRAF-ben a fotometriálást a *noao.digiphot.apphot.phot* taszk segítségével végeztem el, amely a vizsgálandó csillagok koordinátáit kéri be bemeneti adatként, és az eddigiekben tárgyalt módon meghatározza a csillagok fényességét. A taszk kimenetét **.mag.1* nevű fájlok képezik, amelyekből az adatok a *noao.digiphot.ptools.txdump* taszk segítségével nyerhetők ki egy egyszerű adatfájlba. Ezek után a differenciális fénygörbéket a Gnuplot ábrázolószoftverrel készítettem el.

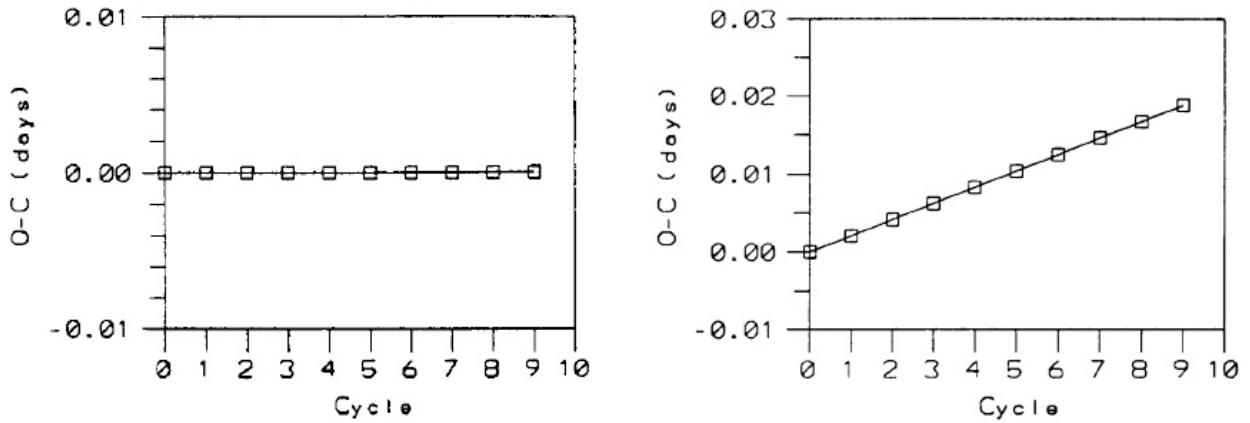
3.3. Periódusvizsgálat O-C diagram segítségével

A következő lépés az úgynevezett O-C diagram előállítása. Ez az eljárás a csillagászatban régóta használt periódusmeghatározási módszer. Az O-C diagram lényege, hogy a feltesszük, a csillag periodikusan változtatja a fényességét, amelyhez tartozik egy periódusidő. Ennek segítségével az úgynevezett ciklusszám és a periódus függvényében előállíthatók a fénygörbeminimumok:

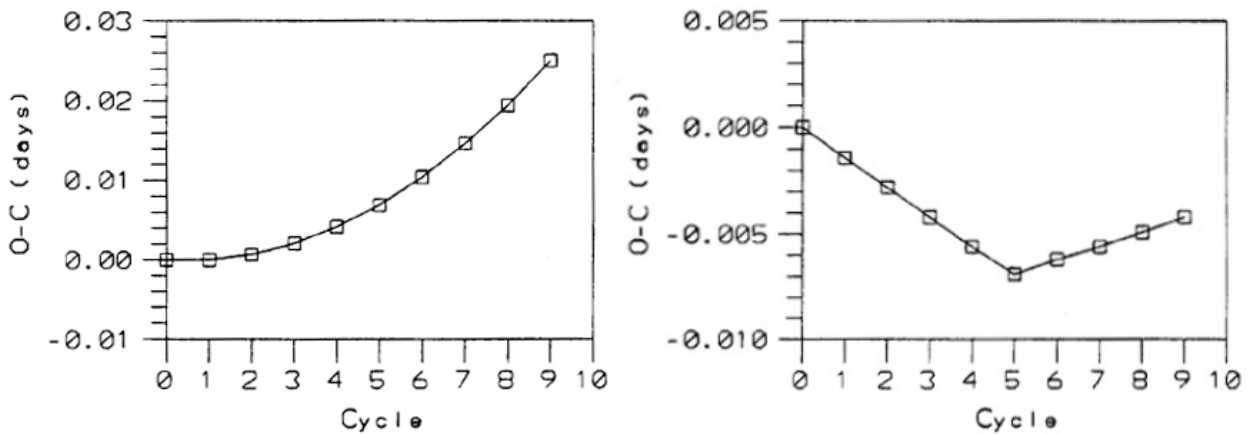
$$HJD_{min} = T_0 + Pn \quad (28)$$

ahol HJD_{min} a Julián-dátumban mért minimumidőpontok, T_0 egy referenciaidőpont (epocha), amelyet valamilyen cikkből származtathatunk, P a periódus, n pedig a ciklusszám.

Egy O-C diagramon a mért (observed) és a (28) képlettel számolt (calculated) fényesség-szélsőértékek (fedési kettős rendszereknél általában a jóval dominánsabb fényességminimumok) időpontjainak különbségét ábrázolhatjuk a ciklusszám, néha az idő, vagy a HJD-ben megadott időpontok függvényében.



12. ábra. Nulla meredekségű, nulla magasságú egyenessel illeszthető O-C diagram jól meghatározott, nem változó periódusra utal (bal oldali ábra). Pozitív vagy negatív meredekséggel rendelkező egyenes, nem változó, ám alul- illetve felülbecsült periódusidőre utal. (jobb oldali ábra)



13. ábra. Magasabbrendű görbe esetén a periódus nem állandó (bal oldali ábra). Egymást metsző egyenesek esetén a periódus pillanatszerűen változik (jobb oldali ábra).

A kapott görbe alakja sokféle lehet. A célunk, hogy a kapott görbe egy nulla értékű konstans függvény, vagyis egy vízszintes egyenes legyen (lásd 12. ábra), ez ugyanis azt jelenti, hogy a periódust megfelelően határoztuk meg.

Ha a függvény konstans, de nem nulla értékű, akkor egyszerűen rossz epochát választottunk, míg ha a görbe egyenes ugyan, de valamilyen meredekséggel rendelkezik, akkor a periódust alul -vagy felülbecsültük, korrekcióra szorul. Ha a görbe nem elsőfokú (13. ábra), akkor a periódus változik az idővel aminek számos oka lehet, például anyagátadás a két csillag között. Egyes kutatók a másodfokú görbék helyett két – vagy több – metsző egyenessel illesztnek, ez természetesen egy parabolával szemben pillanatszerűen változó periódusra utal, nem pedig folyamatosan változóra. A kettő eset mögötti fizikai magyarázat nyilvánvalóan nagyban eltér. Ha az O-C diagram egy parabola, akkor a periódus lineárisan változik, ekkor:

$$C = T_0 + PE + \frac{1}{2}\beta E^2 \quad (29)$$

ahol

$$\beta = P \frac{dP}{dt} \quad (30)$$

ahol a $\frac{dP}{dt}$ a periódusváltozás mértéke, melyet mérhetünk számos egységben, például nap/nap, nap/év, nap/ciklus formában.

4. Eredmények

4.1. Az előállított fénygörbék

A két mérési napra vonatkozó fénygörbét a 14. és a 15. képek ábrázolják. Látható, hogy a V szűrőben csak az első napról vannak adatpontok, az R szűrőben pedig vannak ugyan pontok a második napról, azonban a parabolaillesztésnél azonban valószínűleg nagy hibát vétettem volna, ezért az illesztést ott elhagytam.

4.2. A minimumidőpontok meghatározása

Az előállított fénygörbék segítségével meghatározhatók a fényességminimumok időpontjai. Ehhez a kapott fénygörbék a minimumokhoz közeli pontjaira – melyek közel parabola alakú görbét adnak – egy másodfokú függvényt illesztettem. Az illesztett függvény alakja az origótól való nagy távolság miatt a következő:

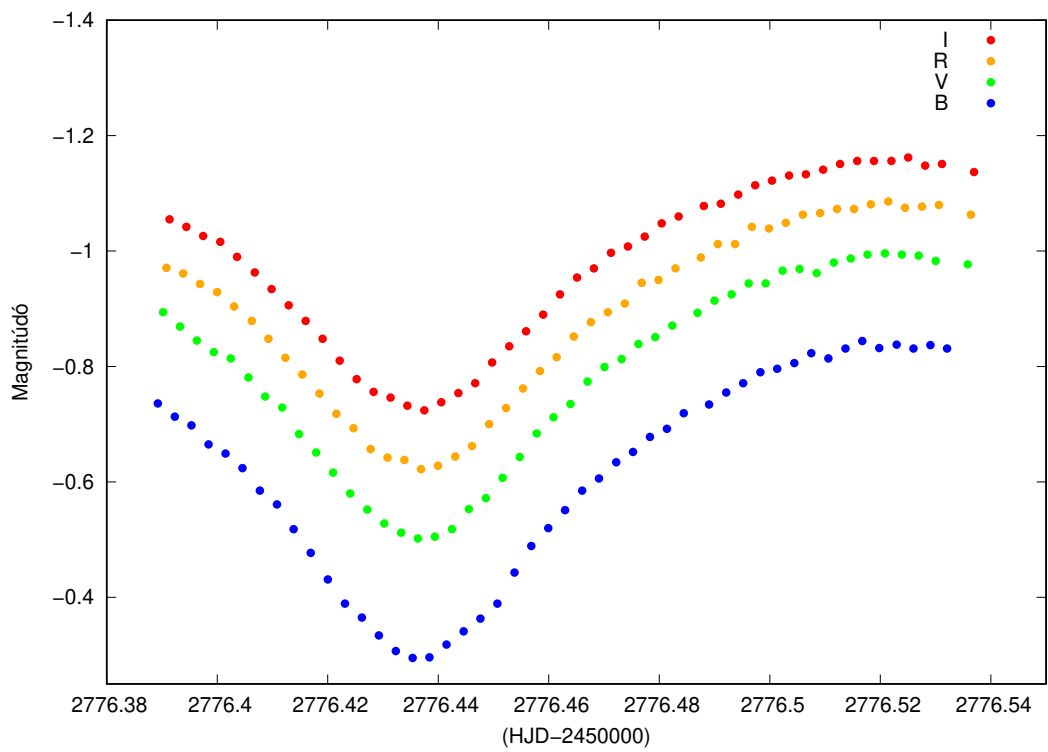
$$f(x) = a(x - x_0)^2 + b(x - x_0) + c. \quad (31)$$

A kifejezés deriváltját véve annak minimumhelye előállítható:

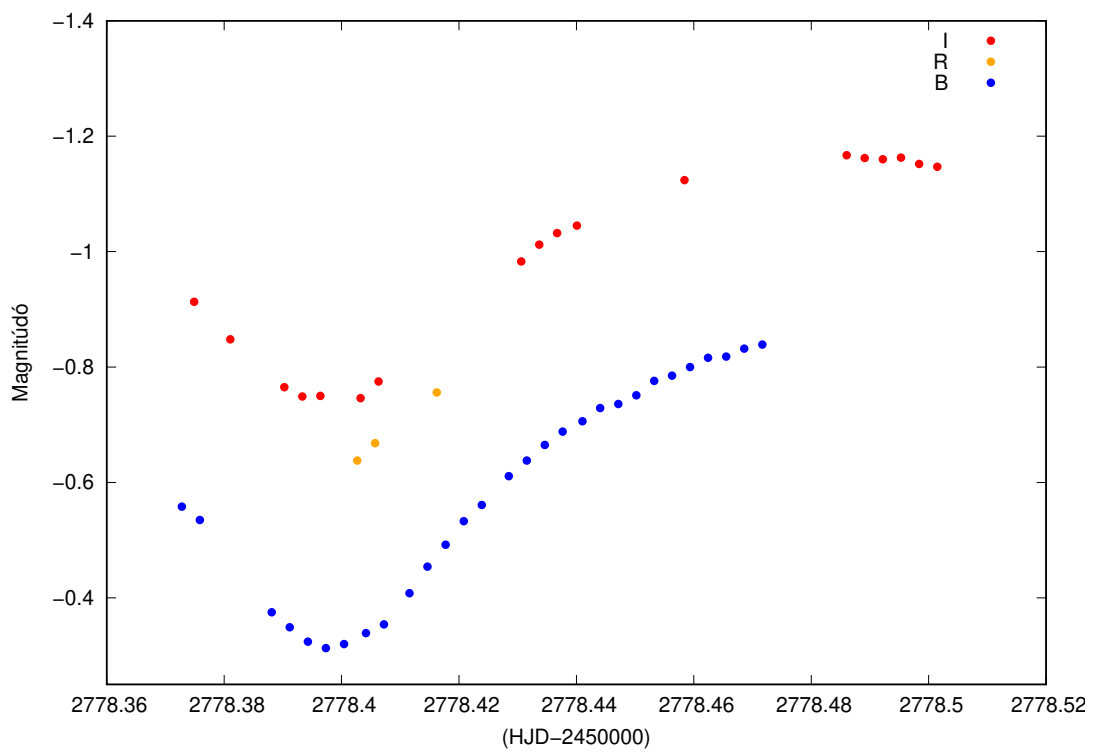
$$\frac{-b}{2a} + x_0. \quad (32)$$

Az illesztést a gnuplot szoftver segítségével végeztem el, a kapott paramétereket a program számította ki, a kapott fényesség-szélsőérték a 1. táblázat tartalmazza.

Az egyes napok esetén a meglévő adatokat átlagoltam, s így egy pontosabb fényességminimum időpont értéket kaptam a két napra. Ezeket az adatokat a 2. táblázatban teszem közzé.



14. ąbra. A nęgy szűrűben elkęszített fęnygűrbe 2003. mąjus 16-án.



15. ąbra. A nęgy szűrűben elkęszített fęnygűrbe 2003. mąjus 18-án.

Dátum	Szűrő	HJD_{min}	ΔHJD_{min}
2003-05-16	B	2452776,437467	0,000636751
2003-05-18	B	2452778,397797	0,000728962
2003-05-16	I	2452776,436511	0,000271286
2003-05-18	I	2452778,397993	0,000858438
2003-05-16	R	2452776,437100	0,000478464
2003-05-16	V	2452776,435504	0,000496643

1. táblázat. A fénygörbék minimumai szűrőnként

Dátum	HJD_{min}	ΔHJD_{min}
2003-05-16	2452776,436646	0,000470786
2003-05-18	2452778,397895	0,000793700

2. táblázat. A fénygörbék minimumai napokra átlagolva

4.3. A fázisgörbék

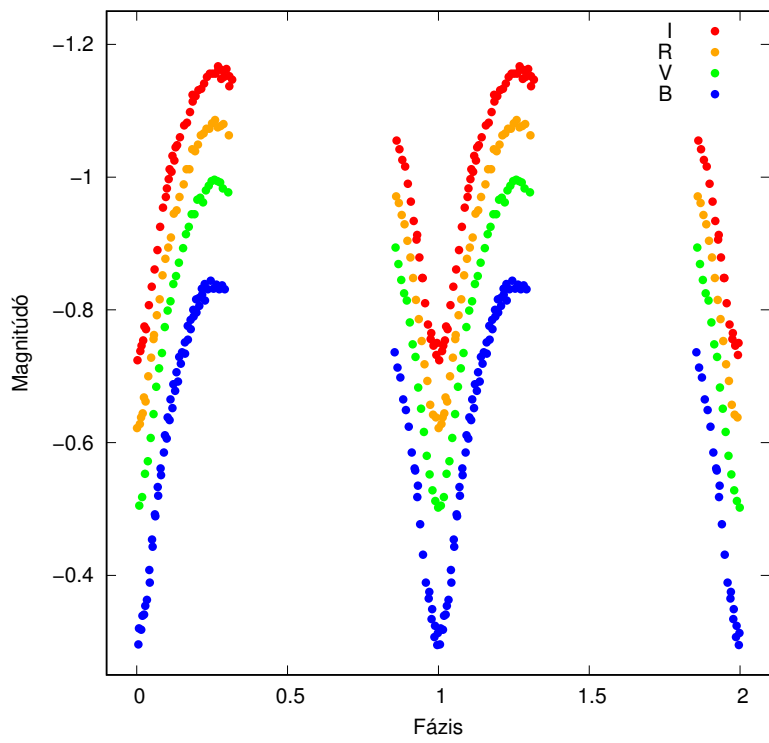
A fénygörbék előállítására után áttérhettem a fázisgörbék előállítására. Előbbiekben látható, hogy a vízszintes tengelyen a lineárisan változó idő található, és a mérési adatsorban szükségszerűen megjelenő üres részek, „lyukak” vannak (ennek oka, hogy a nappali időszakokban mérni nem lehet, valamint a rendelkezésre álló távcsőidők végesek), ezért a fénygörbe sokszor nehezen kezelhető. Ezért érdemes a meglévő adatokból csupán egy, viszont a teljes periódust lefedő görbét előállítani, ezt nevezzük fázisgörbének, ahol a vízszintes tengelyen már nem a heliocentrikus Julián-dátumban megadott idő, hanem a keringés fázisa ábrázolható. Egy fázisgörbén általában egységnyi hosszúnak veszünk egy teljes periódust, a 0 és 1 értékeknél a – fedési kettősök fénygörbéje esetén – a főminimum helyezkedik el, míg a 0,5 értéknél a mellékminimum. Én megkérdeztem a mérési pontokat, hogy a kevés adatpont ellenére főminimum szépen kirajzolódjon.

A fázis előállítására az alábbi képlet alkalmazható:

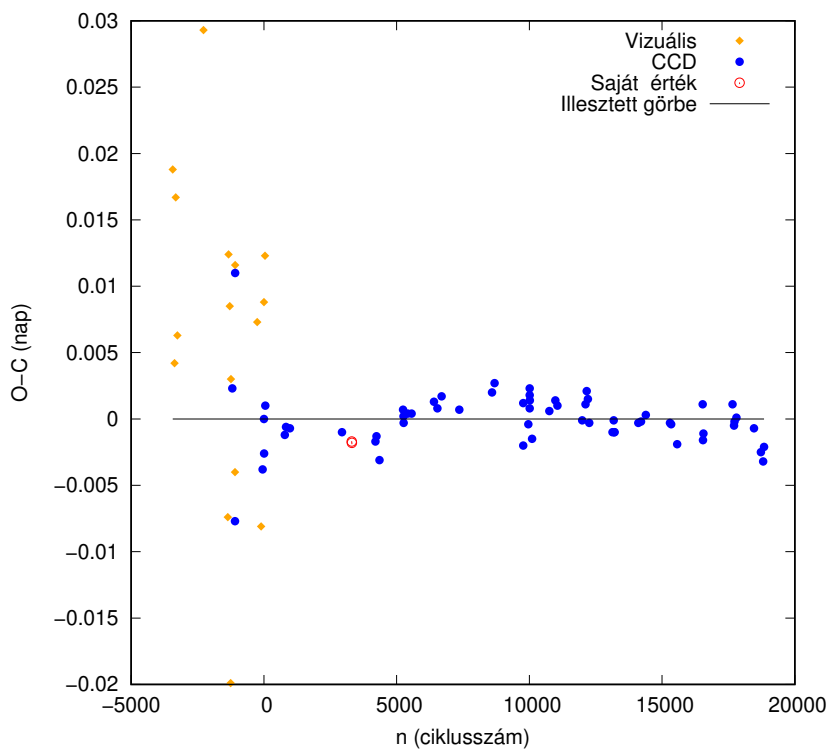
$$\varphi = \left[\frac{t - T_0}{P} \right] \quad (33)$$

ahol φ a keresett fázis, t a mérési időpontok, T_0 egy referencia-minimumidőpont, P a keringés periódusa. A $\lfloor \rfloor$ jelek arra utalnak, hogy a kiszámolt tört törtrészét vettem fázisnak. Mivel azonban olyan függvény nincsen beépítve a feladatok elvégzése során használt gnuplot ábrázoló programba, a teljes értékből levont egészrészt használtam ($int()$ függvény). A mérési időpontok saját mérésekből, míg az epocha valamint a periódusidő mások méréseiből, cikkekből származhatnak.

A négy szűrőben elkészült fázisgörbék a 16. ábrán tekinthetők meg.



16. ábra. A négy szűrőben elkészített fázisgörbék.



17. ábra. A főminimumokkal előállított O-C grafikon.

4.4. A DF CVn O-C diagramja

A diagramot a cseh „O-C gateway”¹⁵ weboldal segítségével állítottam elő. Az oldalon megtalálható a DF CVn összes publikált fényességminimum időpontja, így a diagramot kellően sok mérési pontból készíthettem el, valamint saját mérési adatot is adhattam hozzá. Az oldal $T_0 = 2451694,4142$ epochával és $P = 0,3268955$ [nap] periódussal számol. A főminimum-időpontokkal elkészített diagram a 17. ábrán látható. Az ábrán egy egyenest illesztettem az adatpontokra, feltehetően a kettős periódusa nem változik. A mért minimumidőpontok jól illeszkednek a többi adat közé.

Összefoglalás

A dolgozat során az egyik fő motiváció az exobolygók tranzitmódszerrel történő kimutatásának, illetve a tranzitos fénygörbék jellemzőinek átfogó leírása volt. Mindezt magyar nyelven, friss, angol nyelvű tankönyv alapján. Ilyen jellegű összefoglaló még nem született, ezért újdonságnak számít. A fotometriai módszer megismeréséhez szakdolgozati tevékenységem második fele gyakorlati jellegű munkavégzésből állt, ahol új mérési eredményekkel növeltem a meglévő információkat a DF Canum Venaticorum csillagról.

A fedési kettősök olyan rendszerek, amelyekben két komponens kering a közös tömegközéppontjuk körül, miközben a Földről nézve időnként látszólag elhaladnak egymás előtt, emiatt a rendszer összfényessége az ilyen időpontokban lecsökken. Az első a dolgozatban vizsgált típusuk a fedési kettőscsillagok. A másik típus az exobolygók, tehát nem naprendszerbeli bolygók.

Mindkét esetben igen fontos a fotometria, mint vizsgálati módszer. Az utóbbi esetben ez az egyik legfontosabb felfedezési módszer, amelyet tranzitos módszernek is nevezünk.

Az adatok feldolgozásával foglalkozó fejezetben beszéltem az IRAF programcsomagról, amellyel a FITS képek korrekciója és a fotometrázás elvégezhető. Az apertúra-fotometria elvéről is szót ejtettem, valamint kiemeltem a differenciális fotometriai eljárás fontosságát.

Bemutattam az O-C diagram lényegét, ezzel vizsgálható egy rendszer periódusának változása. Rajta a mért és számított fényességminimumok időpontjainak különbsége ábrázolható az időben. A kapott görbe alakjából következtethetünk a rendszer periódusára, annak változására.

Ezután az eredményekről szóló fejezetben közzé tettem a kapott fénygörbéket, meghatároztam a minimumidőpontokat, levontam a következtetéseket, elkészítettem egy fázisgörbét és végül egy O-C diagramot.

A fedési kettőscsillagok vizsgálata azért volt fontos, mert az ilyen rendszerek vizsgálata egyfajta előszobája az exobolygós méréseknek, távlati célként azok vizsgálatát és mérését tűztem ki.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm témavezetőmnek, Dr. Szalai Tamásnak a szakdolgozat elkészítéséhez nyújtott rengeteg segítséget és türelmet.

¹⁵<http://var2.astro.cz/ocgate/ocgate.php?star=DF+CVn&submit=Submit&lang=en>

Hivatkozások

- [1] Wolszczan A. & Frail D. A., 1992, Nature, 355, 145
- [2] Mayor M. & Queloz D., 1995, Nature, 378, 355
- [3] https://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/launch/index.html
- [4] <http://sci.esa.int/corot/>
- [5] <https://tess.gsfc.nasa.gov/>
- [6] http://astro.u-szeged.hu/oktatas/csillagaszat/6_Naprendszer/0108exobolygok/exobolygok.html
- [7] Exoplanets - Detection, Formation, Properties, Habitability, John W. Manson, Praxis Publishing Ltd, Chichester, UK, 2008
- [8] Transiting Exoplanets, Carole A. Haswell, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2010
- [9] <http://exoplanet.eu/>
- [10] Szalai, T.: 2008, Szoros kettőscsillagok fizikai paramétereinek meghatározása, valamint felszíni és kromoszférikus aktivitásuk vizsgálata, Diplomamunka, SZTE
- [11] Mitnyan, T.: 2015, A VW Cephei érintkező kettőscsillag fizikai modellezése és felszíni aktivitásának vizsgálata, Diplomamunka, SZTE
- [12] Kopal, Z.: 1955, Annales d'Astrophysique, 18, 379
- [13] <https://hatnet.org/>
- [14] <https://wasp-planets.net/story-of-wasp/>
- [15] <http://simbad.u-strasbg.fr>
- [16] <https://iraf.net>
- [17] <http://var2.astro.cz>
- [18] <https://hatsouth.org/>

Nyilatkozat

Alulírott Nagy Kristóf, Fizika BSc szakos hallgató (DLLJ7M), „Fedési kettős rendszerek fotometriája” című szakdolgozat szerzője fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy a dolgozatom önálló munkám eredménye, saját szellemi termékem, abban a hivatkozások és idézések általános szabályait következetesen alkalmaztam, mások által írt részeket a megfelelő idézés nélkül nem használtam fel.

Szeged,

.....
aláírás