

Szegedi Tudományegyetem TTIK
Kísérleti Fizikai Tanszék

Fedési kettőscsillagok fotometriai vizsgálata

BSc Szakdolgozat

Készítette: Pál Boróka Hanga
Témavezető: Dr. Székely Péter
egyetemi docens, PhD, habil.

Szeged
2020

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	2
2. Elméleti összefoglaló	3
2.1. Változócsillagok	3
2.2. Pulzáló változócsillagok	4
2.3. Eruptív változók	5
2.4. Kataklizmikus változók	6
2.5. Rotáló csillagok	6
2.6. Fedési kettőscsillagok	8
3. Észlelés	11
4. A használt műszerek	12
4.1. A távcsövek típusai	13
4.1.1. Newton-féle szerelés	14
4.1.2. Schmidt-Cassegrain elrendezés	15
4.1.3. Ritchey-Chrétien-távcső	16
4.2. A CCD kamerák működése	17
4.3. Szűrő típusok	18
4.3.1. Johnson-Cousins szűrő	19
4.3.2. Sloan Digital Sky Survey (SDSS)	20
5. A mérési eredmények feldolgozása	21
5.1. Korrekciós képek készítése	21
5.1.1. Bias-korrekció	21
5.1.2. Dark-korrekció	22
5.1.3. Flat-korrekció	22
5.2. A képek összetolása és HJD beillesztése	24
5.3. A differenciális apertúra fotometria	24
5.4. A fotometria menete	24
6. A mérésekből kapott fénygörbék	25
6.1. Az LS Del fénygörbéje	25
6.2. A V899 Her fénygörbéje	26
6.3. A V357 Peg fénygörbéje	27
6.4. A V351 Peg fénygörbéi	28
6.5. A V2150 Cyg fénygörbéi	29
6.6. A HX UMa fénygörbéi	31
7. Összefoglalás	34
8. Köszönetnyilvánítás	35
Hivatkozások	36
9. Nyilatkozat	37

1. Bevezetés

A szakdolgozatom célja, hogy ismertessem a fotometriai vizsgálatok alapjait. Az elméleti háttérben a különböző változócsillagok típusait tárgyalom, a műszereket, amelyekkel a szakmai gyakorlatomat végeztem és végezetül bemutatom a mérési eredményeimet.

A fotometria az égi objektumokról származó fényesség mérése. Ez a vizsgálati módszer kiváló ahhoz, hogy az időbeli fényességváltozásból meghatározzuk az objektum típusát és különböző paramétereit (keringési idő, inklináció, pálya excentricitás stb.).

2. Elméleti összefoglaló

A csillagok fényességét először *Hipparkhosz* (i.e. 160 - i.e. 125) görög csillagász osztályozta. A szabad szemmel látható csillagokat hat nagyságrendbe sorolta. Ez egy fordított skála, azaz a legfényesebbek voltak az elsőrendű csillagok, a szabad szemmel már alig láthatóak pedig a hatodrendűek. Ez az osztályozás viszont nem adott pontos összefüggést a csillagról jövő fénymennyiség és a magnitúdó nagyságrendek között, de tiszteletből a modern csillagászat megőrizte ezt a magnitúdóskálát [1]. Mivel az égitestek megfigyelésében elengedhetetlen a pontos fényesség meghatározása, így egy új definícióra volt szükség a magnitúdó értelmezéséhez. A *Fechner-Weber-féle pszichofizikai törvény* kimondja, hogy az ember érzete az azt kiváltó inger logaritmusával arányos. Így a megfigyelések során mérhető látszólagos fényesség a következővel lesz egyenlő:

$$m = -2,5 \cdot \log F + k \quad (1)$$

ahol F a mért fluxus, k egy hullámhosszfüggő konstans. A magnitúdóskála viszonyítási pontja minden hullámhosszon a Vega (α *Lyr*) fényessége ($0,0^m$) [4].

2.1. Változócsillagok

Az olyan csillagokat, amelyeknek valamilyen fizikai paraméterük időben változik, változócsillagoknak nevezzük [4]. Általában a csillag fényessége változik. Ha a fényességváltozást, a látszólagos fényességet az idő függvényében ábrázoljuk, akkor megkapjuk a változócsillag *fénygörbéjét*. Fő jellemzői az amplitúdó, illetve a periódusidő [1]. Később ezek alapján is csoportosíthatjuk a változócsillagokat. Vizsgálatuk azért fontos, mert lehetőség nyílik paramétereik, tulajdonságaik meghatározására.

A változócsillagokat több osztályba/típusba sorolhatjuk, attól függően, hogy a fényesség időbeli változása milyen okból történik. Megkülönböztetjük a külső, illetve a belső hatást:

- Extrinsic (a csillag fénykibocsátása nem változik)
- Intrinsic (a csillag fizikailag változik)

A legfőbb változócsillagokat 5 osztályba sorolhatjuk:

- Pulzáló változócsillagok (intrinsic)
- Eruptív változók (intrinsic)
- Kataklizmikus változók (intrinsic)
- Rotáló csillagok (extrinsic)
- Fedési kettőscsillagok (extrinsic)

A szakmai gyakorlatom során az utolsó, vagyis a *fedési kettőscsillagok* mérésével foglalkoztam.

Ma már több millióra nőtt a változócsillagok száma. Nagy részük a csillagkép nevét viseli, amelyben az objektum található. Kezdetben R-Z betűket használtak, majd a csillagok számának növekedésével betűpárokat alkalmaztak (pl. RR, ..., RZ, SS, ..., SZ, ..., ZZ), ily módon további 45 lehetőséget kaptunk. Ez sem volt elegendő, ezért használják a teljes angol ABC betűit (kivéve a J-t, mert az összekeverhető az I-vel). Fontos szabály, hogy az adott betűt megelőző betű nem lehetett a második (pl. nincsen ZA jelű változócsillag), így csillagképenként 334 kombináció állt rendelkezésre változócsillag elnevezésre. Később további változókat fedeztek fel, főleg a Tejút sávjában, így bevezették a V335-től kezdődő jelölést, utalva arra, hogy a 334-es hely már foglalt volt, illetve változócsillagról (variable star) van

szó. A véletlenül azonos szám kiadását, illetve a felfedezési sorrendiség eldöntésének vitáit, zavarait elkerülve, az IAU (International Astronomical Union) egyetlen intézetet bízott meg a katalogizálással: a moszkvai Sternberg Csillagászati Intézetet. A katalógus neve GCVS (General Catalogue of Variable Stars) [2, 4].

2.2. Pulzáló változócsillagok

A pulzáló változócsillagok rezgést végeznek. A pulzáció kétféleképpen is történhet:

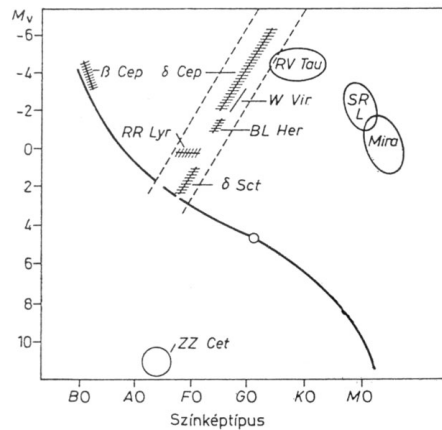
- Radiális pulzáció: A csillagban létrejövő rezgések során a csillag rétegei csak sugárirányban (radiálisan) mozdulnak el.
- Nemradiális pulzáció: A csillag rétegei horizontálisan is elmozdulnak. Megszűnik a csillag gömb-szimmetriája. A kvantumszámokhoz hasonlóan számhármassal tudjuk jellemezni a nemradiális pulzációt: n az összes csomófelület száma, l nemradiális csomófelületek száma, m a forgástengelyt is tartalmazó csomófelületek száma.

A csillag fizikai paraméterei (pl. sugár, felszíni hőmérséklet) változnak a pulzáció során. A módosított Stefan-Boltzmann¹ törvény alapján megkaphatjuk a csillagról jövő luminozítás (fényteljesítmény) értékét, amely egyben a fényesség is (fotometriával kimutatható).

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \quad (2)$$

ahol $4\pi R^2$ a csillag felszíne, σ a Stefan-Boltzmann-konstans és T a csillag effektív hőmérséklete.

A fényességváltozás nagysága és az időbeli lefolyása miatt több csoportba sorolhatjuk ezeket az objektumokat. A *Hertzsprung-Russel* (HRD) diagramon ezeknek a pulzáló változóknak kitüntetett helyük van. Legtöbbjük az ún. *instabilitási sávba* tartozik. A név kissé megtévesztő, mivel itt a csillagok nem instabilak, sőt épp az ellenkezője, stabilak, ugyanis itt sajátrezgést végeznek a csillagok. Viszont a sávba (ami 1000 K szélességű) bekerülve, a csillag valamilyen fényességváltozást fog mutatni, nem feltétlen pulzáció során, ugyanis megfelelő kémiai összetétel, rotációs sebesség és mágneses tér szükséges ahhoz, hogy annak feltétele teljesüljön.



1. ábra. Hertzsprung-Russel diagram. A fekete vonal a fősorozatot jelenti (üres karika a Nap helyzetét ábrázolja), és a rá merőleges szaggatott vonallal jelölt sáv, pedig a fent említett instabilitási sáv. Forrás: www.astro.u-szeged.hu.

¹Egy abszolút fekete test teljes energia sűrűsége (fluxusa) a hőmérséklet negyedik hatványával egyenesen arányos: $u(T) = \int u(\varphi, T) d\varphi = \sigma \cdot T^4$, ahol $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ az ún. Stefan-Boltzmann-konstans.

A pulzáló változók típusai, amelyek az instabilitási sávban találhatók:

- Cefeidák (δ Cephei csillagok): Radiálisan pulzáló, I. populációs, fémben gazdag, fiatal csillagok, főleg a Tejút spirálkarjaiban találhatók. I. típusú cefeidáknak vagy klasszikus cefeidáknak is szokás nevezni őket. Fényességváltozás 0,2–1 magnitúdó, periódusuk 1 és 135 nap között van. Van, amelyik többszörös periodicitást mutat (β cefeidák).
- W Vir: Hasonlóak a cefeidákhoz, de II. populációs, öreg, kis tömegű csillagokról van szó. II. típusú cefeidáknak is szokták nevezni őket. Periódusuk 6–35 napig terjed, fényességváltozása 0,3–1,2 magnitúdó.
- BL Her: A W Vir csillagokhoz hasonló, radiális pulzátor. Periódusidejük 1–8 nap.
- RV Tau: Szuperóriás II. populációs csillagok. Hasonlóak a W Vir változókhoz, csak hosszabb periódusidővel rendelkeznek (30–150 nap).
- RR Lyrae: II. populációs, öreg óriás csillagok. Periódusidejük kicsi, 0,2–1 napig terjed, fényességváltozásuk néhány tized és két magnitúdó között mozog. Abszolút fényességük általában 0,5–0,6 magnitúdó, így távolság meghatározásra alkalmasak². Főleg gömbhalmazokban találhatóak meg, emiatt halmaz-változóknak is nevezik őket. Általában radiálisan pulzálnak, de újabb kutatások eredményei alapján találtak olyanokat, amelyek nemradiálisan pulzálnak. 10–300 napos periódussal is rendelkezhetnek, valamint több tized magnitúdóval változik a fényességük (Blazsko-effektus³).
- δ Scuti: F vagy A színképosztályú csillagok néhány órás periódussal és pár század vagy tized magnitúdós amplitúdóval. Egy vagy több periódusú, radiális és nemradiális módusokkal rendelkeznek (Fourier-felbontással határozható meg a periódus). Régebben törpe cefeidáknak nevezték őket.

A felsorolt változócsillagok működése során a HeII részleges ionizációs zónája hajtja a pulzációt. Emellett a κ (Kappa) mechanizmus is az egyik oka a fényességváltozásnak. Az instabilitási sávban lévő változócsillagok külső rétegeiben lévő H, illetve HeII ionizációs zóna opacitása (átlátszatlanság) érzékenyen függ a hőmérséklettől. Ha a hőmérséklet nő, a zóna opacitása is megnő, ami a sugárnyomás megnövekedéséhez és a csillaglégkör kitágulásához vezet. A tágulás miatt a hőmérséklet lecsökken, így a sugárnyomás és az opacitás is, ami a csillag összehúzódását eredményezi, majd a folyamat kezdődik előlről.

Hosszú periódusú csillagok:

LPV (Long Period Variable): Mira változóként is ismertek. Első képviselőjük az o Ceti, amelynek érdekes viselkedése miatt a régiek Mirá-nak (csodálatosnak) nevezték el [1]. Radiálisan pulzáló vörös- és szuperóriások. Periódusuk 80–1200 nap között van, fényességváltozásuk általában 2,5 magnitúdónál is nagyobb lehet. Többszörös periodicitást is mutathatnak.

2.3. Eruptív változók

Olyan változócsillagok, amelyeknek a fényváltozásait a külső tartományaikban (kromoszféra, korona) lejátszódó heves folyamatok okozzák. Emiatt szabálytalan változást mutatnak. Többnyire ködök közelében találhatók meg. Fiatal csillagok. Jellemző rájuk a nagy mértékű anyagkifúvás. Ide tartoznak a *T Tauri*, a *FU Orionis*, és az *R CrB* típusú változók, illetve a *flercsillagok*.⁴ Általában a HRD főágán, vagy annak közelében találhatók.

²Távolságmodulust alkalmazni lehet, ha tudjuk a látszó és az abszolút fényességet (m_λ, M_λ), illetve az intersztelláris extinkciót (A_λ). Az egyenlet: $m_\lambda + M_\lambda = -5 + 5 \cdot \log(d) + A_\lambda$, ahol d a távolság parszek-ben.

³Az amplitúdó mellett a fázis (illetve frekvencia) is modulálódik.

⁴A fler rövid idő alatt lejátszódó kitörést jelent.

2.4. Kataklimikus változók

Az eruptív változókhoz hasonlóan itt is valamilyen egyszeri, vagy többszörös kitöréseket mutató csillagról van szó, amelyeknél a felszín közelében, vagy az objektum magjában lezajló termionukleáris folyamat, vagy egy másik komponensről történő anyagátáramlás során fellépő ingadozások okozzák a fényességváltozást. Több nagyságrenddel nagyobb energia szabadul fel ezen jelenség során. A kataklizmikus változók mindig kettős, vagy többes rendszerbe tartoznak. Leggyakrabban a főkomponense egy fehér törpe, a mellékkomponens pedig vörös óriás, vagy főszorozati csillag. A kataklizmikus változócsillagok típusai (a kitörés energiájának csökkenése sorrendjében):

- Szupernóvák: A szupernóvákat színképük szerint két típusba sorolhatjuk:
 - SNI típus: A színképben nincsenek hidrogén jelenlétére utaló vonalak. A kettős rendszer főkomponense egy fehér törpe, kísérőtársa pedig általában egy vörös óriás. Az elhalványodásuk először gyors (25–40 nap alatt 3 magnitúdó), majd lassú (60–70 nap alatt 1 magnitúdó). Az SNI típusban 3 csoportot tudunk elkülöníteni (Ia, Ib, Ic), amelyeket kémiai összetételük alapján osztályoztak (szilícium és hélium mennyisége alapján).
 - SNII típus: A hidrogén vonalai a legerősebbek a színképben. Nagy tömegű csillagok magjának összeomlásakor jön létre (neutroncsillag vagy fekete lyuk előtti állapot). Fénygörbéik igen változatosak, elhalványodásuk lassabb, így platók, púpok figyelhetők meg.
- Nóvák: A nóvák esetében a fehér törpe kísérője K-M típusú óriáscsillag. A kifényesedést a fehér törpe felszínén beinduló termionukleáris reakció okozza. A mellékkomponensről akkréciós korongon keresztül gáz áramlik át a fehér törpe felszínére, ahol a nyomás és a hőmérséklet egyre nő, amíg be nem indul a H-He fúzió. A csillag felszínén keletkező robbanás lefújja a felső réteget, amely több km/s-os sebességgel is tágulhat. A robbanás utáni fényességváltozás 7–19 magnitúdó között változik, amely 1–100 nap alatt következik be. A maximális kifényesedés után akár évekig is eltarthat az elhalványodás.
- Törpenóvák: Ismétlődő kitörést produkálnak, a kitörések időtartama néhány naptól kezdve akár 20 napig is lehetséges. A fényességváltozás amplitúdója 2–6 magnitúdó közé esik. Szoros kettőscsillagból álló rendszerben a főkomponens egy fehér törpe, mellékkomponense pedig egy K–M törpe, vagy szubtörpe csillag. A mellékkomponens kitölti a Roche-térfogatot, így az L_1 -es Lagrange-pontban anyagot ad át a fehér törpének. Ha a fehér törpe gyenge mágneses térrel rendelkezik, akkor az átáramló gáz az objektum körül akkréciós korongot formáz. Az ismétlődő kitörést az okozza, hogy az akkréciós korong külső részein ciklikusan sűrűségváltozás lép fel, amely ha elér egy kritikus mennyiséget, ráhullik a fehér törpe felszínére. Potenciális energia szabadul fel az összehúzódás közben, és ez jár a fényességváltozással.
- Szimbiotikus kettősök: Színképük kombinált, a hűvös csillag abszorpciós vonalakat és magasan gerjesztett emissziós vonalakat mutat. Ilyen típusú kettőscsillag például a *Z And*, amely egy szoros kettőrendszer, a főkomponense egy forró szubtörpe és mellékkomponense egy hideg óriás. A kettős rendszert egy vagy több közös héj, vagy gázkorong veszi körül, amelynek forrása a vörös óriás.

2.5. Rotáló csillagok

A fényességváltozás a tengely körüli forgásra vezethető vissza. A rotáló változócsillagokhoz tartoznak:

- Foltos csillagok: A rotáló csillagok legnagyobb csoportját teszik ki. A fényességváltozást az okozza, hogy a csillag felszínén folt vagy foltok vannak, amelyek a tengely körüli forgás során különböző mértékben látszanak a Földről nézve. Gyakran kettős rendszerekben fordulnak elő. Ilyen változócsillagok például a *BY Draconis*, *RS Canum Venaticorum* és a *FK Comae*.

- Ellipszoidális változók: Szoros kettős rendszerek, amelyeknek a komponensei deformált állapotban vannak (ellipszoid/tojás alakúak). Fedés nem jön létre, de annak ellenére is van fényességváltozás. Mivel a deformált csillag felszíni hőmérséklete (ezáltal a fényessége) függ a sugártól, így keringés, illetve forgás során a látóirányba kerülő részeknek más a látszó fényessége.
- Mágneses változók: A színeképtípusú csillagok, felszínükön különösen nagy mértékben találhatóak egyes kémiai elemek (pl. Si, Cr, Eu, Sr). A fényességváltozásukat a ferde rotátor modellel magyarázzák (mágneses, illetve forgás tengelyük nem esik egybe). Ilyen csillagtípus például a *roAp* (*Rapidly oscillating Ap stars*).
- Pulzárok: Gyorsan forgó neutroncsillagok, amelyeknek mágneses és forgási tengelyük nem esik egybe. A mágneses tengelyek mentén két irányban felgyorsuló, kifelé mozgó töltött részecskéket sugároznak ki. Ezeket a nyalábokat hívjuk *jet*-eknek és ezek mentén erős sugárzás figyelhető meg. Periódusidejük 0,001 s és néhány másodperc között van (ez idővel csökken).

2.6. Fedési kettőscsillagok

A csillagok többsége kettős vagy többes rendszerekhez tartozik, amelyek a rendszer közös tömegközéppontja körül keringenek. Ha a fedési kettős rendszerek inklinációja közel 90° , vagyis a keringési síkjuk közel esik a látóirányunkhoz, akkor a csillagok szabályos időközönként teljes vagy részleges fedést fognak mutatni. Ezáltal a rendszer látszólagos fényessége változni fog. A kettőscsillagokat két szempontból tudjuk kategorizálni: Roche-lebeny kitöltöttsége, illetve a fénygörbe alapján [3].



2. ábra. A fedés geometriai feltétele. Forrás: www.astro.u-szeged.hu.

A fedés feltétele:

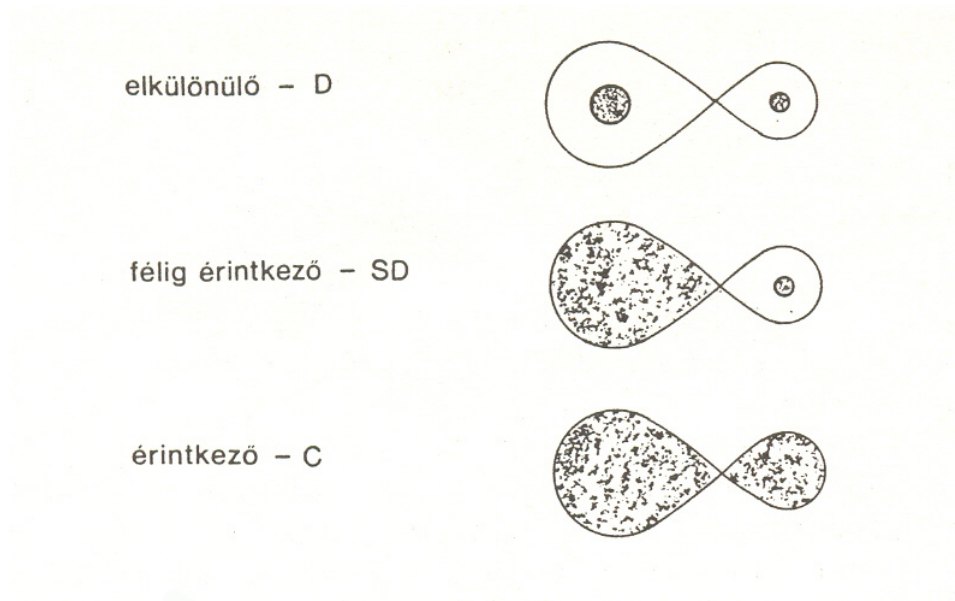
$$R_1 + R_2 \geq a \cdot \cos i \quad (3)$$

Ahol R_1 és R_2 a csillagok sugarai, a a pályasugár, i a pályahajlás vagy inklináció; a keringési sík hajlásszöge az alapsíkhoz képest.

Roche-lebeny alapján:

A kettős rendszerekben lévő csillagok körül azt a területet, amin belül az anyag a csillaghoz gravitációsan kötve van, Roche-lebenynek, vagy térfogatnak nevezzük. Ezt a határt gravitációs ekvipotenciális-felületnek definiáljuk. A kettős csillagok Roche-lebenyei az L_1 -es *Lagrange*-pontban érintkeznek. A Roche-lebeny kitöltöttsége alapján 3 kategóriát különböztetünk meg:

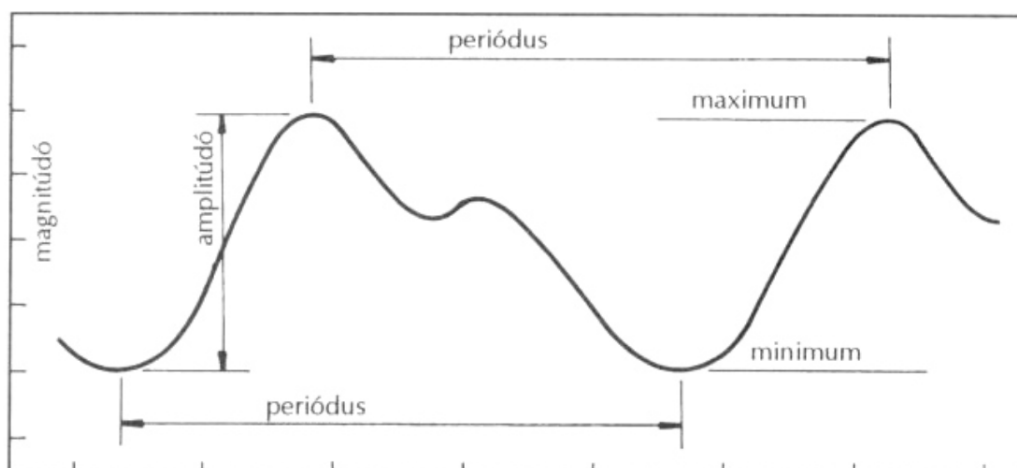
- Különálló rendszerek (Detached): Mindkét csillag a saját Roche-térfogatán belül helyezkedik el.
- Félig érintkező rendszerek (Semi-detached): Az egyik csillag teljesen kitölti a Roche-térfogatát, míg a másik nem. Az L_1 -es Lagrange ponton keresztül anyagot adhat át a másik komponensnek.
- Érintkező rendszerek (Contact): Mindkét csillag kitölti a Roche-térfogatot, közös légkörrel is rendelkeznek. Az L_1 -es Lagrange pontban anyagáramlás történik, tömeget, illetve energiát is adhatnak át egymásnak [3].



3. ábra. A szoros kettőscsillagok osztályozása a Roche-lebény kitöltöttsége alapján. Forrás: www.astro.u-szeged.hu.

Fénygörbe alapján:

Ha szabályos változócsillagokról beszélünk, akkor a fénygörbéik ismétlődő szakaszokat mutatnak. A változócsillag legnagyobb fényességét a maximum, a legkisebbet pedig a minimum ábrázolja. A maximum és a minimum közötti fényességváltozás az amplitúdó, a két egymást követő maximum, vagy minimum között eltelt időt pedig periódusidőnek nevezzük (lásd 4. ábra).

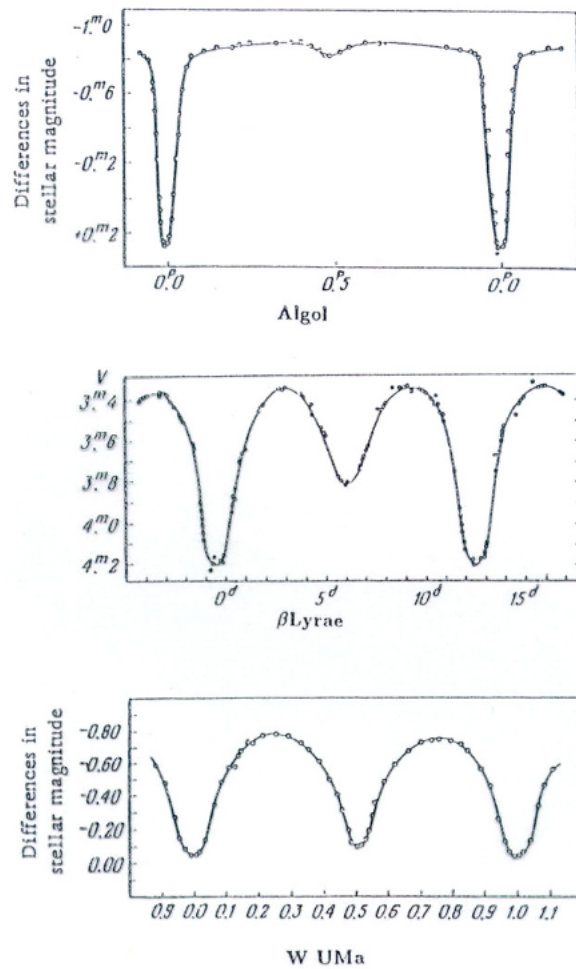


4. ábra. A fénygörbe jellemzői. Forrás: www.astro.u-szeged.hu.

A fedési kettőscsillagokat 3 osztályba tudjuk sorolni a fénygörbéjük alapján:

- Algol típus (β Per): Az Algol típusú változók képviselője az *Algol* néven ismert β Per. A fedési kettős egyik tagja kisebb fősorozati csillag, míg a nagyobb, de halványabb pedig a fősorozat felett helyezkedik el. A halvány objektum elfedésekor alig észrevehető a fényváltozás, a fényes eltakarásakor viszont igen erős minimum jelentkezik. A fedés idejét leszámítva a rendszer fényessége állandónak tekinthető. Ez egy félig érintkező rendszer, tehát lehetséges az anyagáramlás az L_1 -es Lagrange pontban. A fényességváltozás periódusa néhány óra és több évtized között is lehetséges.

- β Lyrae típus: Szintén félig érintkező rendszer, viszont itt mindkét komponens óriás vagy szuperóriás, és az alakjuk jelentősen eltorzult (ellipszoidális alakúak). A rendszer fényessége a keringés alatt folyamatosan változik, ha nincs fedés akkor is, mivel a csillagok különböző helyzetekből, eltérő felületeket mutatnak felénk. A fényességváltozás periódusa több mint egy nap.
- W UMa típus: Ezek a kettőscsillagok érintkező rendszerek. Komponensei igen közel vannak egymáshoz, valamint mindkettő ellipszoid alakú. Rendelkezik közös légkörrel. Fénygörbéjük alapján nem lehet megkülönböztetni a fő- és mellékminimumokat. Kevesebb mint egy nap a fényességváltozás periódusa.



5. ábra. Fénygörbe alakok fedési kettőscsillagoknál. Forrás: www.astro.u-szeged.hu.

3. Észlelés

A méréseket 2019 nyarán kezdtem el, 2020 tavaszáig igyekeztem minél többször mérni. Több esetben is évfolyamtársammal, Tóth Ákossal közösen végeztük a méréseket, de a feldolgozás egyénileg volt. Fedési kettőscsillagokat és azon belül is a W UMa típusú objektumokat figyeltünk meg.

Objektum	RA [h m s]	Dec [° ' ”]	Magnitúdó [mag]
LS Del	20 57 10,29	+19 38 59,24	8,72
V2150 Cyg	21 18 10,88	+30 35 21,59	8,11
V899 Her	16 35 0,16	+33 12 47,7	7,88
V351 Peg	23 25 25,19	+15 41 19,14	8,04
V357 Peg	23 45 35,07	+25 28 18,94	9,05
HX UMa	12 01 33,15	+43 02 29,29	8,88

1. táblázat. A mért objektumok.

4. A használt műszerek

A méréseket a Szegedi Csillagvizsgáló 40 cm-es távcsövével végeztem, két alkalmat leszámítva, amikor a SZTE Bajai Obszervatóriumában az 51 cm-es, illetve a 35 cm-es műszert használtam.

Szegedi Csillagvizsgáló:

Legtöbb mérésemet a Szegedi Csillagvizsgáló 40 cm főtükör átmérőjű, Newton-típusú távcsővel végeztem.

Optika	
Optikai elrendezés	Newton
Főtükör átmérője	40 cm
Fókusz távolság	1392 mm
Fényerő	f/3,48
Mechanika	
Szerelés	ekvatoriális (villás)
Pozicionálás	léptetőmotoros RA, DEC
Detektor, szűrő	
Kamera	ST-7 Dual CCD Camera
CCD Chips	Kodak KAF-0402ME + TI TC-237
Pixelszám	765 x 510 (RA x DEC)
Látómező	17' x 11'
Felbontás	1,33"/pixel
Szűrők	Johnson $UBVR_cI_c$

2. táblázat. A Szegedi Csillagvizsgáló távcsövének adatai.

Bajai Obszervatórium:

A szakmai gyakorlatom során lehetőségem nyílt a Bajai Csillagvizsgáló távcsöveivel való mérésre is. Az 51 cm-es műszer egy Ritchey-Chrétien felépítésű távcső volt, amely azóta már nem üzemel.

Optika	
Optikai elrendezés	Ritchey-Chrétien
Főtükör átmérője	51 cm
Fókusz távolság	4284 mm
Fényerő	f/8,4
Mechanika	
Szerelés	ekvatoriális (villás)
Pozicionálás	léptetőmotoros RA, DEC
Detektor, szűrő	
Kamera	Moravian Instruments G4-9000EC Mark II
CCD Chips	Kodak KAF-0900
Pixelszám	3056 x 3056 (RA x DEC)
Látómező	29,5' x 29,5'
Szűrők	SDSS (ugriz)

3. táblázat. A Bajai Obszervatórium 51 cm-es távcsövének adatai

A második bajai távcső pedig egy 35 cm-es Schmidt-Cassegrain volt.

Optika	
Optikai elrendezés	Schmidt-Cassegrain
Főtükör átmérője	35 cm
Fókusz távolság	1958 mm
Fényerő	f/5,5
Mechanika	
Szerelés	ekvatoriális (villás)
Pozicionálás	léptetőmotoros RA, DEC
Detektor, szűrő	
Kamera	Apogee Instruments
CCD Chips	AP47p (hátsó megvilágítású)
Pixelszám	1024 x 1024 (RA x DEC)
Látómező	23.4' x 23.4'
Szűrők	Bessel b,v,r,i

4. táblázat. A Bajai Obszervatórium 35 cm-es távcsövének adatai

4.1. A távcsövek típusai

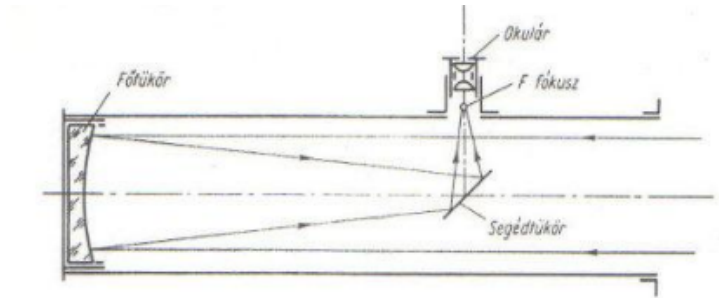
A távcsöveket három kategóriába sorolhatjuk aszerint, hogy milyen optikai elemeket tartalmaznak:

- Refraktorok (lencsés távcsövek)
- Reflektorok (tükrös távcsövek)
- Katadioptrikus műszerek (lencsét és tükröt is tartalmaznak)

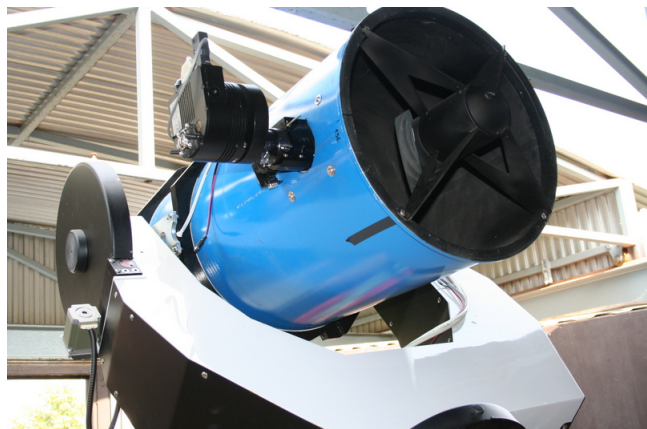
A gyakorlatom során katadioptrikus távcsövekkel mértem, a Szegedi Csillagvizsgálót leszámítva, ahol egy tükrös rendszer van. A tükrös távcsöveknél a kép előállítására szolgáló objektív egy tükrő, amely homorúra csiszolt gömb vagy paraboloid alakú. A reflektorok színi hibától mentesek, ezért kiválóak vizuális és fotografikus megfigyelésekre. Optikai elrendezésük alapján több fajtát különböztetünk meg (a felsorolásban azokat a típusúakat írom le, amelyeket használtam a szakmai gyakorlatom során) [1, 13] :

4.1.1. Newton-féle szerelés

Az első tükrös távcső, amelyet Sir Isaac Newton konstruált először 1668-ban. A beérkező fény egy paraboloid főtükréről a távcső belsejében elhelyezett sík segédtükörre vetül (a sík tükrő a távcső tengelyéhez képest 45° -os szöget zár be), a képet okuláron keresztül lehet nagyítva nézni, vagy annak helyére egy CCD érzékelőt tenni [1, 13].



6. ábra. A fény útja a Newton távcsőben. Forrás: www.astro.u-szeged.hu.

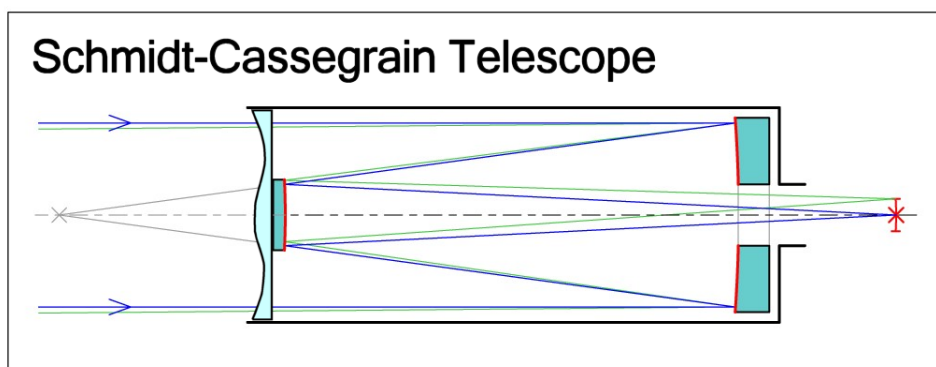


7. ábra. A szegedi 40 cm-es Newton-szerelésű távcső. Forrás: www.astro.u-szeged.hu.

4.1.2. Schmidt-Cassegrain elrendezés

Katadioptrikus távcső, a főtükörön kívül rendelkezik egy speciális korrekciós lemezzel, amely a leképezési hibák (szférikus és kromatikus aberráció) kiküszöbölésére szolgál. Két típust különböztetünk meg a Schmidt-Cassegrain távcsöveknél:

- Főtükre görbült fókuszfelületű, kis központi kitakarású (nagy nyújtású), kiváló vizuális megfigyelésekre.
- Főtükre viszonylag sík fókuszfelületű, nagy központi kitakarással (kis nyújtású), inkább fotografikus rendszereknél alkalmazzák.



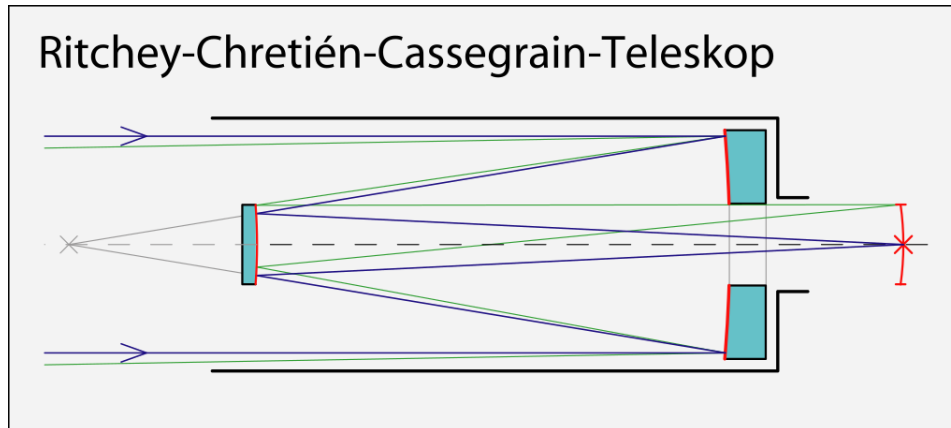
8. ábra. A fény útja egy Schmidt-Cassegrain távcsőben. Forrás: www.en.wikipedia.org.



9. ábra. A 35 cm-es bajai távcső (BAT - Beringer Automated Telescope). Forrás: www.bajaobs.hu.

4.1.3. Ritchey-Chrétien-távcső

A Ritchey-Chrétien-féle reflektor a Cassegrain rendszer egyik speciális változata, amelyet 1910-ben fejlesztettek ki. A távcső mindkét tükre hiperbolikus, emiatt széles látómezővel rendelkezik, nagyjából mentes a kómahibától, illetve a szférikus aberrációtól⁵.



10. ábra. A fény útja a Ritchey-Chrétien-Cassegrain távcsőben. Forrás: www.en.wikipedia.org.



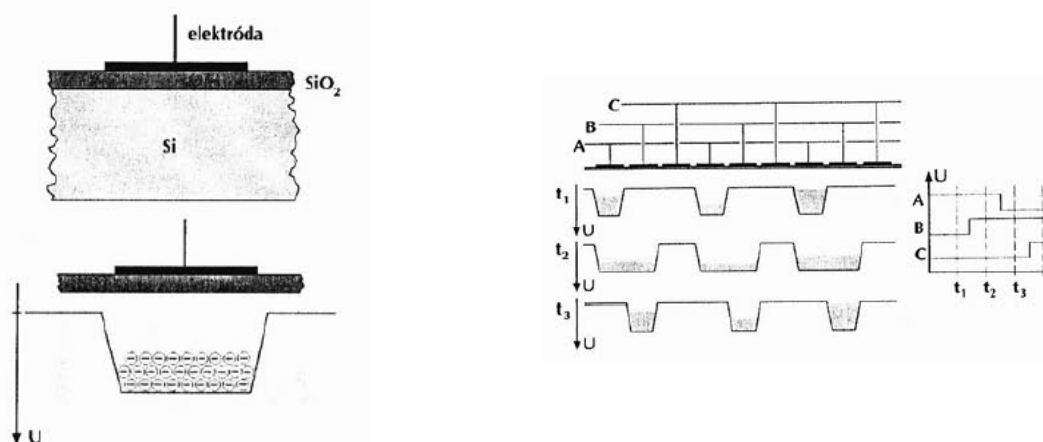
11. ábra. A bajai 51 cm-es Ritchey-Chrétien távcső. Forrás: www.bajaobs.hu.

⁵Az optikai lencsék, illetve tükrös távcsövek egyik tipikus leképezési hibája

4.2. A CCD kamerák működése

A CCD (*Charge Couple Device*)⁶ kamerát 1969-ben W. S. Boyle és G.E. Smith találta fel (Bell Laboratórium). Eredetileg memória áramkört akartak előállítani, MOS (fémoxid félvezető) technikával. Kiderült, hogy amit létrehoztak, egy nagyon fényérzékeny eszköz, ezért tökéletes optikai detektornak. A CCD érzékelők sokkal szélesebb színtartományban (200 nm (UV) – 1000 nm (közeli infravörös)) érzékenyebbek, mint a hagyományos fotoemulziók (filmek).

A CCD kamerának működése a fényelektromos jelenségen⁷ alapul. Az érzékelő egy szilíciumlapka (hordozóréteg), amelynek egyik oldalát szilícium-dioxid réteggel vonjuk be. Ennek az a feladata, hogy a hordozóréteget elektromosan elszigetelje a fölötte lévő vékony elektródától. A lapka felületét pixelekre⁸ osztva mindegyikhez egy elektróda csatlakozik. Az elektródasor végén egy kiolvasó áramkör található. Fény hatására a szilícium réteg kristályrácsaiból elektronok lépnek ki. Ha az elektródákat pozitív feszültséggel töltik fel, akkor a kilépő elektronok felgyülemlekednek a szigetelőrétegen az elektródával ellentétes oldalán. A megvilágítás ideje alatt (*integrációs* vagy *expozíciós időnek* is nevezzük), a beérkező fotonok számával egyenesen arányos mennyiségű elektron lép ki a hordozórétegből. Nem csak a megvilágító fény hatására jelennek meg az elektronok, hanem kristálybeli hőmozgás eredményeként is, amelyet sötétáramnak szokás nevezni. Hogy ezt elkerüljék, a CCD kamerákat különböző technikákkal (Peltier-elem, folyékony nitrogén) hűteni szokták [5, 6]. Emellett azt is figyelembe kell venni, hogy a pixelek nem képesek korlátlan mennyiségű elektront magukban tartani, egy határérték felett ezek a szomszédos pixelekbe „átfolynak” (blooming effektus).



12. ábra. Egy CCD keresztmetszete és a töltések tárolása potenciálgödörben. Forrás: www.ccd.mcse.hu.

A megvilágítás megszűntével, az áramkör oszloponként kilépteti az információkat (soronként átcsatolja - nevét is erről kapta) a mátrixból⁹ és egy ADC (analóg digitális konverter) átalakító minden egyes pixelre magadja az ADU¹⁰ (analóg digitális egység) értékét.

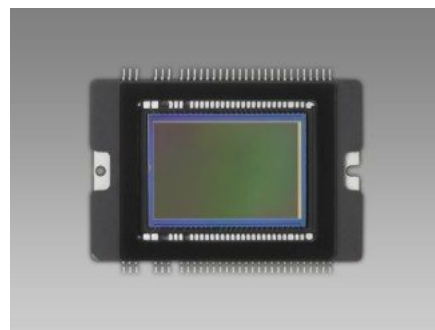
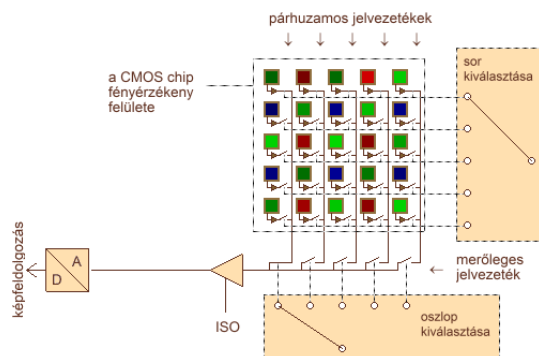
⁶Töltéscsatolt eszköz.

⁷Egy küszöbszintnél nagyobb frekvenciájú elektromágneses sugárzás által egy anyag felszínén elektronok lépnek ki.

⁸Pixel: picture element - képelem.

⁹A pixelek elhelyezkedését egy kétdimenziós négyzetrácsnak, vagyis egy mátrixnak lehet elképzelni.

¹⁰Ez egy olyan érték, amivel át lehet számolni a beérkezett elektron számát digitális értéké (feszültségjellé).



13. ábra. (a) CCD képtartalom kiolvasása (b) CMOS érzékelő. Forrás: www.oktel.hu

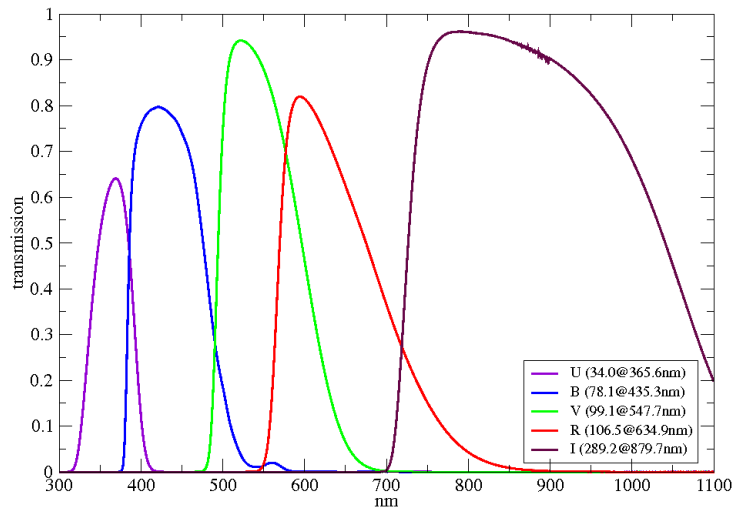
Egészen 1976-ig csak fekete-fehér képeket tudtak előállítani. Később úgynevezett RGB (Red (piros), Green (zöld), Blue (kék)) színszűrőkkel lehetett a fehér fényt színeire felbontani.

4.3. Szűrő típusok

A szakmai gyakorlatom során használt távcsövekhez különböző típusú szűrők tartoztak, ezeket a későbbiekben fogom ismertetni. Ahhoz, hogy pontos fotometriai méréseket készítsünk, elengedhetetlen, hogy a megfelelő szűrőben végezzük el azt. Ez függ a megfigyelt objektumtól (csillag, galaxis stb.), például attól, hogy milyen hullámhossz tartományban sugároz a legerőteljesebben, így meghatározhatjuk a fényességét. Jelenleg több mint kétszáz szűrő fajta van, ebből a legismertebb a Johnson-Morgan (UBV) rendszer, amelyet 1953-ban szabadalmaztattak. A szűrőnek – nevéből kiindulva – a lényege az, hogy bizonyos régiókat kiszűr/elkülönít az egész elektromágneses spektrumból (UV, látható tartomány, infravörös). Ezeknek a tartományoknak a tulajdonságai (tartomány szélessége, áteresztő képessége), szűrő típusonként eltérőek [9,10].

4.3.1. Johnson-Cousins szűrő

Az előbb említett Johnson-Morgan (UBV) típus kiterjesztése. A standard UBV rendszer kiváló a csillagok színekük szerinti osztályozására. Az U az ultraibolyát, a B a Blue (kéket), valamint a V (visible) a láthatót jelenti és ezek mellé kerül még az R_c a Red (piros), illetve az I_c ¹¹ infravörös tartomány [11, 12].



14. ábra. A szűrősávok átviteli függvényei. Forrás: www.aip.de.

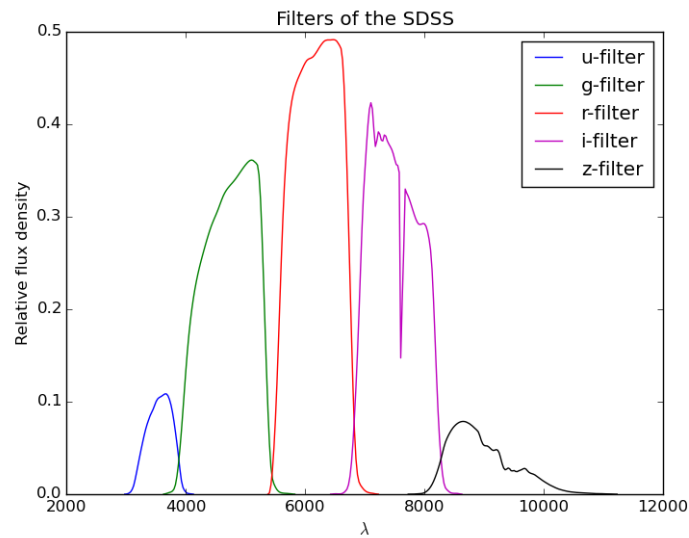
Szűrő	Központi hullámhossz [Å]
U	3656
B	4353
V	5477
R	6349
I	8797

15. ábra. A szűrősávokhoz tartozó csúcs hullámhossz értékek. Forrás: www.aip.de.

¹¹A C betű jelenti a Cousins rendszert.

4.3.2. Sloan Digital Sky Survey (SDSS)

A szűrőrendszer öt színsávból áll (u',g',r',i' és z'), amelyek 3000 Å-től (kemény ultraibolya sugárzás) egészen a CCD-chip szilícium lapjának érzékenységi határáig terjednek, körülbelül 11 000 Å-ig (infravörös¹²) és öt, nem átfedő részeket határolnak. Az SDSS rendszer egyik kiemelkedő tulajdonsága az, hogy a Johnson-Morgan-Cousins szűrővel ellentétben, a különböző színsávok nagyobb tartományt határolnak, így az egész elektromágneses spektrumot lefedik [7,8].



16. ábra. A szűrősávok átviteli függvényei. Forrás: www.sdss.org.

Szűrő	Központi hullámhossz [Å]
u	3551
g	4686
r	6166
i	7480
z	8932

17. ábra. A szűrősávokhoz tartozó csúcs hullámhossz értékek. Forrás: www.sdss.org.

¹²A z' szűrő tartományát nagyban a CCD kamera érzékenysége határozza meg.

5. A mérési eredmények feldolgoása

A méréseknél kapott képek kiértékelésére az *IRAF* (Image Reduction and Analysis Facility) képfeldolgozó programot használtam, amelyet a National Optical Astronomy Observatory (NOAO) kutatócsoport fejlesztett ki. A program UNIX operációs rendszereken működik (pl. Linux), de a Windows is lehetővé tette már a használatát.

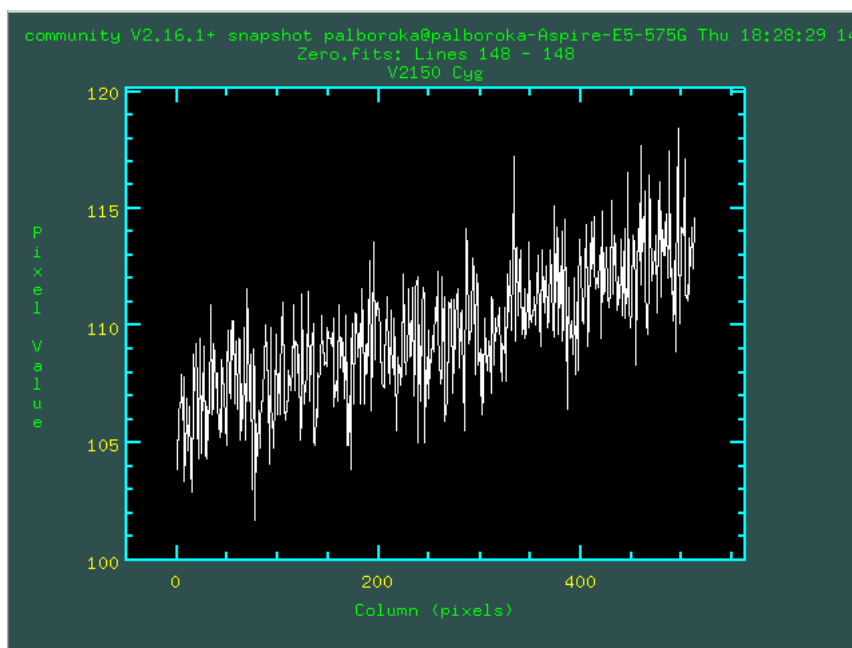
Az IRAF parancsokat tartalmaz, amit angolul *task*-oknak hívnak, és ezeket különböző csomagokba (*packages*) csoportosítunk. A „cl” vagy „ecl” utasítást begépelve a *terminálban* már elindított *xgterm*-be, megnyílik az IRAF kezdőfelülete (eközben már bizonyos alapsomagok pl. *dataio*, már aktivizálódnak). A képek elemzéséhez elengedhetetlen a DS9 nevű képkezelő program, ami a *.fits*¹³ kiterjesztésű fájlokat kezeli.

5.1. Korrekciós képek készítése

Ahhoz, hogy pontos eredményekhez juthassunk, a kapott nyers képeken három különböző korrekciót kell végrehajtanunk.

5.1.1. Bias-korrekció

A *bias* képeket nulla expozíciós idővel, illetve csukott shutterrel készítettem el, így láthatóvá vált a CCD chip „kiolvasási zaja”, az úgynevezett alap jelszint, amely minden egyes képhez hozzáadódik. A *noao.imred.ccdred.zerocombine* taszkkal átlagoltam a bias képeket, majd az összes többi képből levontam a *noao.imred.ccdred.ccdproc* taszk használatával (dark, flat, objektum).

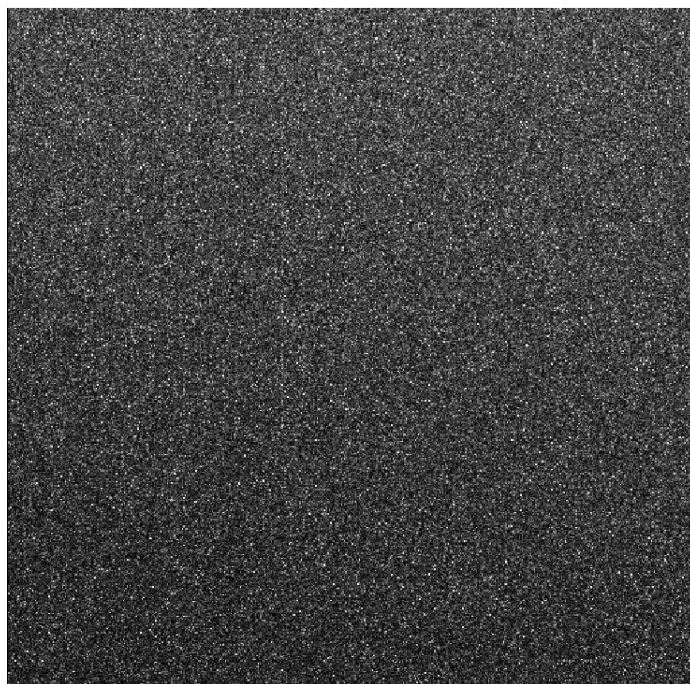


18. ábra. Egy általam készített átlagolt bias kép sormetszete. Jól látható, hogy a pixelek intenzitása balról jobbra nő (előfeszítés miatt).

¹³Flexible Image Transport System, 2D vagy 3D-s „adattömbök”, amelyekbe szervezik a csillagászati adatok tárolását.

5.1.2. Dark-korrekción

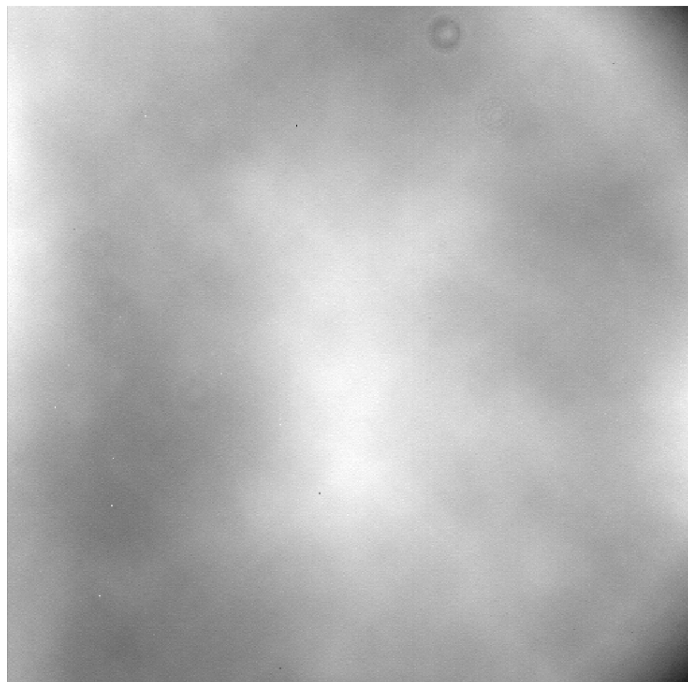
A CCD chip hőmérséklete az abszolút 0 K-tól eltér, így számolni kell a hőmozgásból adódó többletelektronokkal (sötétárammal), amely az alapszinthez hasonló additív hiba. Ezt a hatást úgy csökkentettem, hogy a képek készítésekor a kamerát hűtöttem, amelyet a Szegedi Csillagvizsgáló távcsöve esetén egy egyszerű Peltier-elemmel hajtottam végre. Nagyobb obszervatóriumok esetében szárazjéggel, vagy folyékony nitrogénnel csökkentik a hőmérsékletet, akár -100°C alá is képesek hűteni a kamerákat, ebben az esetben a dark kép készítése elhanyagolható (minimális a hőmozgásból eredő többletelektron). A *dark* képek készítésekor nagyon fontos, hogy az expozíciós ideje megegyezzen a mérendő objektumunk expozíciós idejével, valamint, hogy a shutter csukva legyen. A *noao.imred.ccdred.darkcombine* taszk segítségével átlagoltam dark képeket és kivontam a már bias korrigált képekből (*noao.imred.ccdred.ccdproc taszk*).



19. ábra. Egy általam készített átlagolt dark kép.

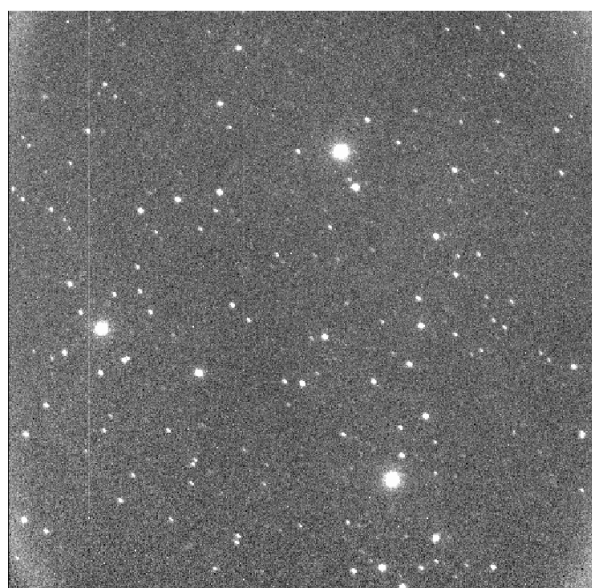
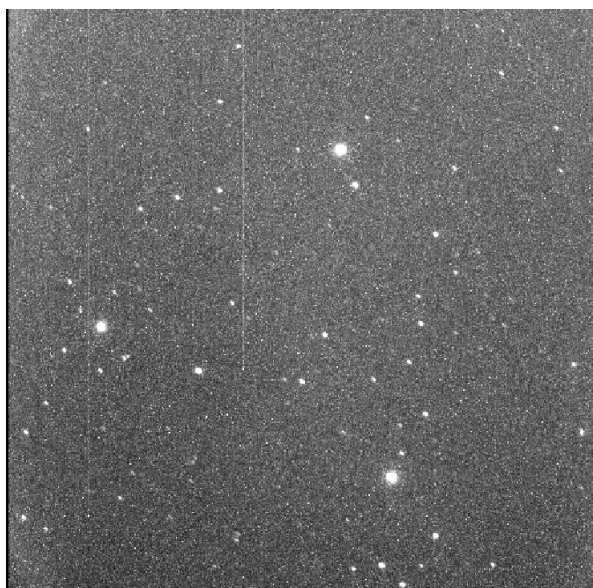
5.1.3. Flat-korrekción

A *flat* képeket célszerű napnyugta után, illetve napkelte előtt (itt figyelni kell, hogy a kamera nem párasodott-e be), készíteni, mert ilyenkor az égbolt nagyjából egyenletes fényességű és még csillagoktól mentes. A flat képeken előtűnnek az optikai elemeken lévő szennyeződések, emellett a CCD kamera pixelei más kvantumhatásfokkal működnek, így azok hibáival is számolni kell. A bias és dark korrigált flat képeket a *noao.imred.ccdred.flatcombine* taszkkal átlagoltam, majd a *noao.imred.ccdred.ccdproc* taszk segítségével levontam az objektum képeiből.



20. ábra. Egy általam készített átlagolt flat kép.

Összehasonlításképpen a nyers, illetve a hibáktól mentes (processzált) képeket:



21. ábra. Egy általam készített nyers és a processzált kép.

5.2. A képek összetolása és HJD beillesztése

Ahhoz, hogy a fotometrálast elkezdhessük, a már processzált képeken lévő csillagok pozícióinak célszerű megegyeznie. Ezt azért kell végrehajtani, mert a távcső nem tökéletesen követi a csillagokat az égbolton, így az objektumunk helyzete a képeken kis mértékben változik. Az egyik módszer a *noao.immatch.imalign* taszk, de ez nem vezetett célra a munkában, ezért a *noao.immatch.xregister* taszkot használtam, ahol egy referencia képhez viszonyítva a program összetolja a képeket. Ez nem minden esetben volt ilyen egyszerű, mert nem mindig helyesen tolta össze, emiatt egy képsorozatot több részre kellett bontanom.

Utolsó lépésként a fotometrálás előtt még be kell illeszteni a heliocentrikus Julián-dátumot¹⁴ (HJD) a képek header részébe. Ez azért fontos, hogy később ábrázolni tudjuk a fénygörbét. Ezt a *noao.astutil.setjd* taszkkal tudjuk megtenni.

5.3. A differenciális apertúra fotometria

Apertúra fotometria alkalmazásánál a program az objektum körül egy képzeletbeli kör alakú nyílást (apertúrát) helyez el, amelyet érdemes a csillag profilja alapján megválasztani (félértékszélesség) azért, hogy a háttérből minél kevesebb rész kerüljön bele, mert az többlet intenzitást eredményezhet. Így megkapjuk a körgyűrű által bezárt pixelek intenzitás összegét:

$$I_{teljes} = \sum_i I_i \quad (4)$$

Ez az összefüggés még tartalmazza a háttér fluxus értékét is, ezért még egy gyűrű alakú nyílást kell felvennünk, hogy a benne lévő háttér pixelek átlagintenzitását (I_h) a pixelek számával (N) felszorozva, kivonjuk a teljes intenzitásból:

$$I_{csillag} = \sum I_i - N \cdot I_h \quad (5)$$

A következő képlettel pedig könnyedén megkaphatjuk az instrumentális magnitúdó értékét az intenzitásból:

$$m = -2,5 \cdot \lg \left(\sum I_i - N \cdot I_h \right) \quad (6)$$

A differenciális fotometria esetén minden képen kimértem a megfigyelt objektum fényességét, illetve még kettő állandó fényességű összehasonlító és ellenőrző csillag fényességét. A változócsillag fényességéből kivontam az összehasonlító csillagét, az ellenőrző pedig azért kell, ha véletlenül az utóbbinak is változik a fényessége időben [20].

5.4. A fotometria menete

Miután a képek teljesen mentesek a hibáktól, azonos pozícióban találhatóak a megfelelő csillagok és a képek header-jei tartalmazzák a HJD-t, az *imexamine* paranccsal egy fájlba gyűjtöttem a változó, az összehasonlító és az ellenőrző csillagok koordinátáit (SAO DS9 program segítségével). Ezután a *noao.digiphot.apphot.phot* taszkot alkalmaztam, ahol megadtam a kifotometrálandó képsorozat listáját, illetve az előbb kigyűjtött koordináta fájlt. Ennek eredményeként megjelennek a **.mag.1* kiterjesztésű fájlok, amelyekből a *txdump* paranccsal a számomra szükséges adatokat (HJD, magnitúdó, magnitúdó hiba) egy fájlba mentett. Ez az adatfájl még nem megfelelő a fénygörbe előállításához, így egy *awk script* segítségével átalakítottam úgy, hogy egy időponthoz tartozzon két fényesség érték, a változó és az összehasonlító különbsége, valamint az összehasonlító és az ellenőrző csillag különbsége.

¹⁴A Julián-dátum a Kr.e. 4713 január 1. greenwichi delétől eltelt napok számát jelöli.

Az awk script:

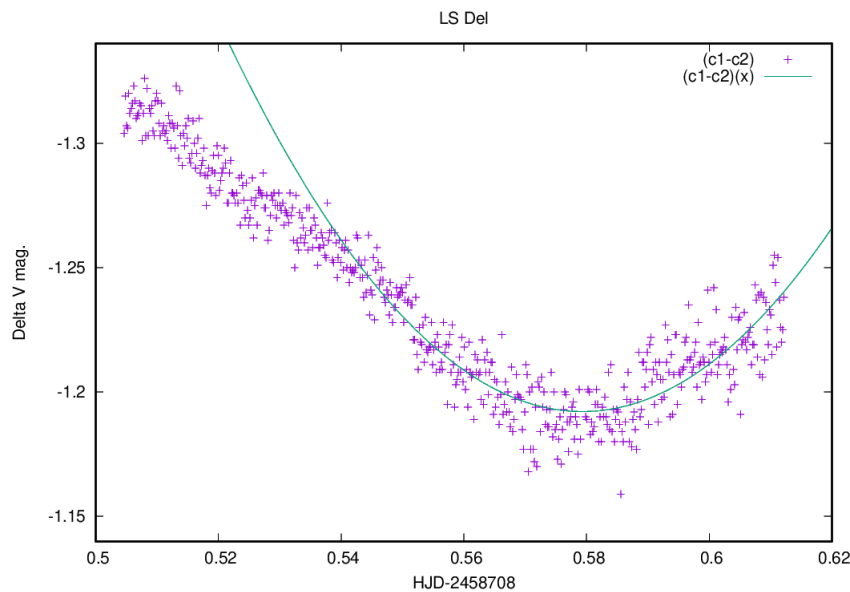
```
awk '{hjd=$1; v=$2; getline; hjd=$1; oh=$2; getline; hjd=$1; chk=$2; print hjd,v-oh,oh-chk;}' magni-  
tudo.dat > diffmag.dat
```

6. A mérésekből kapott fénygörbék

Ebben a fejezetben bemutatom a szakmai gyakorlatom által megfigyelt objektumokat. A kiértékelt képekből kapott instrumentális magnitúdó értékeket a Gnuplot függvényrajzoló program segítségével ábrázolni tudtam, és ezt követően a fénygörbékre másodfokú polinomokat illesztettem, így a minimumok időpontjait is meg tudtam határozni. Az illesztett másodfokú függvény általános alakja a következő: $f(x) = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$. Ennek deriválásával kapjuk, hogy: $2 \cdot a \cdot x + b$. Ezt nullával egyenlővé téve (a és b ismeretében) x meghatározható: $x = \frac{-b}{2a}$, amely a görbe lokális minimumát adja. Az ismertetett fénygörbéken a függőleges tengely reprezentálja a fényességkülönbséget (feltüntettem milyen szűrőben készült), a vízszintes tengelyen pedig az idő szerepel heliocentrikus Julián-dátumban. Az illesztésből kapott paramétereket, azok hibáit, illetve a kiszámolt minimumhelyek értékeit táblázatok formájában adom meg. Az illesztett görbéket nem minden esetben ábrázoltam a grafikonokon.

6.1. Az LS Del fénygörbéje

Az LS Del változócsillag megfigyelését 2019.08.12-én végeztem, Szegeden. A mérést V szűrőben, 6 mp-es expozíciós idővel készítettem.



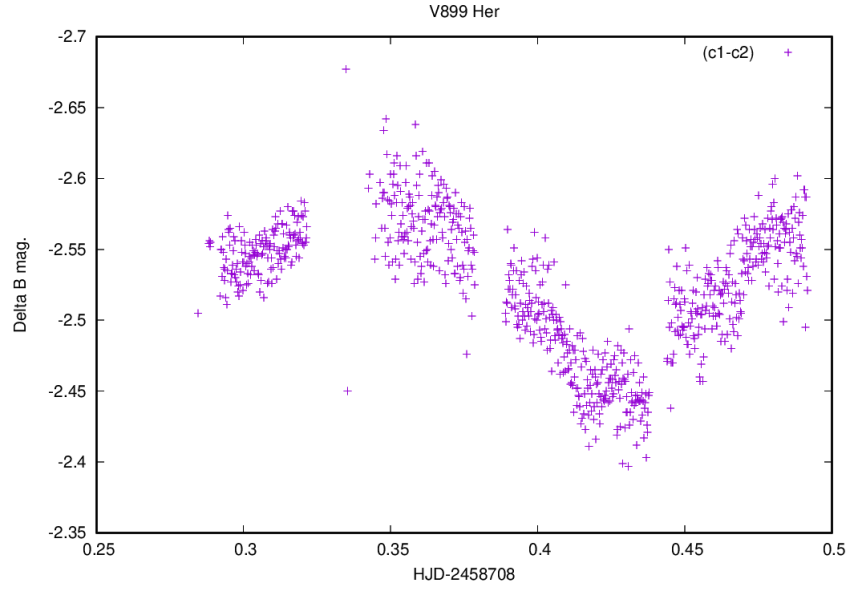
22. ábra. 2019.08.12. Szeged.

Időpont	a	Δa	b	Δb	x	Δx
2019.08.12.	-22,4055	0,6482	26,0742	0,7241	0,5818	0,023334

5. táblázat. A számolt minimumidőpontok.

6.2. A V899 Her fénygörbéje

A V899 Her változócsillag megfigyelését szintén aznap végeztem. Ezt viszont B szűrőben 6 mp-es expozíciós idővel mértem.



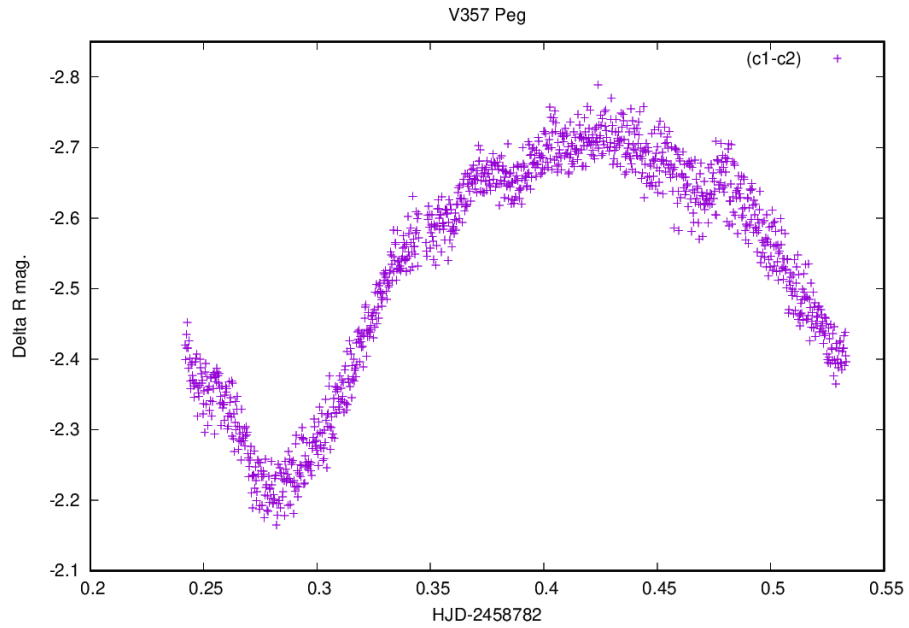
23. ábra. 2019.08.12. Szeged.

Időpont	a	Δa	b	Δb	x	Δx
2019.08.12.	-68,1337	3,278	58,1496	2,789	0,4267	0,028989

6. táblázat. A számolt minimumidőpontok.

6.3. A V357 Peg fénygörbéje

A V357 Peg változócsillagot 2019.10.25-én végeztem, R szűrőben, 10 mp-es expozíciós idővel.



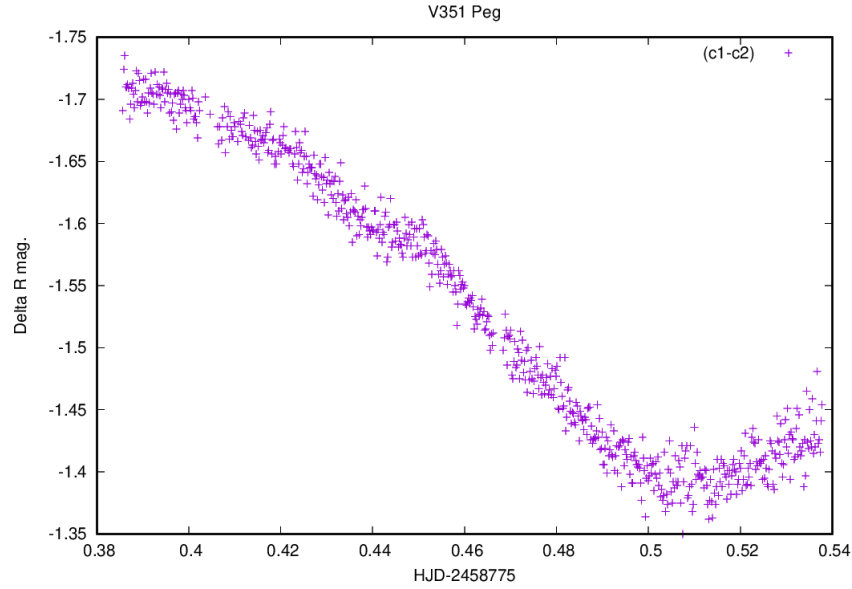
24. ábra. 2019.10.25. Szeged.

Időpont	a	Δa	b	Δb	x	Δx
2019.10.25.	-125,349	2,769	70,7382	1,584	0,2821	0,00887

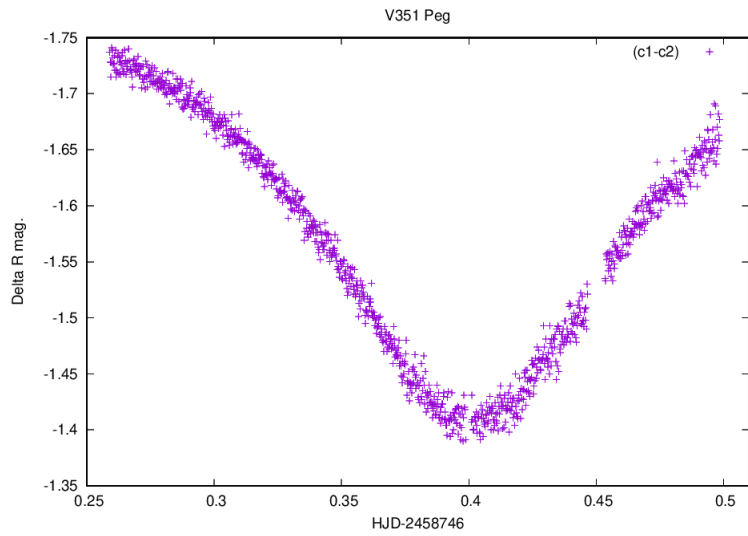
7. táblázat. A számolt minimumidőpontok.

6.4. A V351 Peg fénygörbéi

A V351Peg változócsillagot 2019.10.18-án és 19-én is megfigyeltem. Mindkettőt R szűrőben, 7 mp-es expozíciós idővel.



25. ábra. 2019.10.18. Szeged.



26. ábra. 2019.10.19. Szeged.

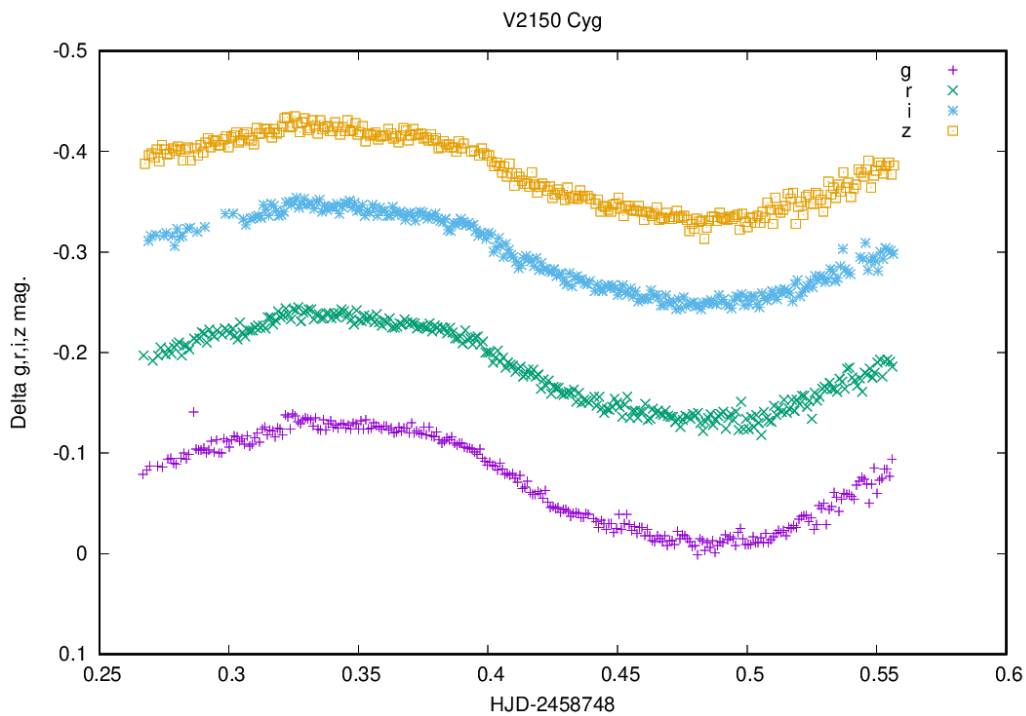
Időpont	a	Δa	b	Δb	x	Δx
2019.10.18.	-71,0479	4,546	72,6389	4,65	0,5111	0,04626
2019.10.19.	-18,8685	0,2782	14,9977	0,2115	0,3974	0,008108

8. táblázat. A számolt minimumidőpontok.

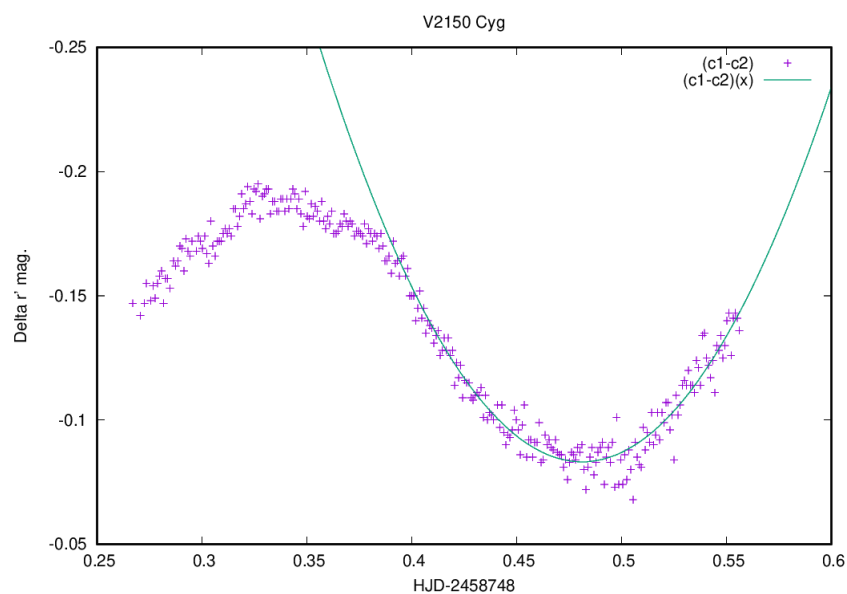
6.5. A V2150 Cyg fénygörbéi

A V2150 Cyg változót először 2019.09.12-én figyeltem meg Szegeden. A fénygörbén látszik, hogy pont a maximum szakaszban „kaptam el”, sajnos másodfokú függvényt nem tudtam rá illeszteni, de jól látszik a W UMa típusú változókra jellemző fénygörbe alakja. A mérést B szűrőben, 10 mp-es expozíciós idővel készítettem.

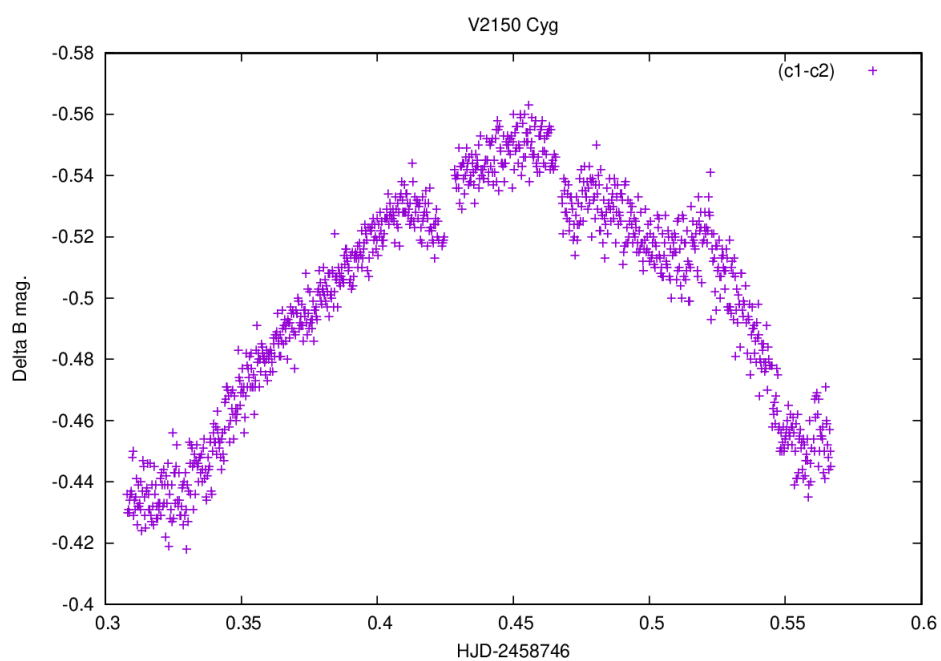
A második mérést Baján végeztem, 2019.09.21-én. Itt az SDSS g' , r' , i' , z' szűrőit használtam, az expozíciós idők 10 mp-ek voltak a z' szűrőt leszámítva, ahol 12 mp volt. A 27. ábrán látható fénygörbéket egymáshoz képest, a függőleges tengely mentén elcsúsztattam, így jobban látszódnak az egyes szűrőkhöz tartozó fénygörbék karakterisztikái. Ez nem befolyásolta a mért eredményeimet. A 28. ábra reprezentálja az r' szűrőben készített fénygörbét, illetve az arra illesztett másodfokú függvényt. Az illesztést a többi szűrő esetén is végrehajtottam és összefoglaltam a 9. táblázatban.



27. ábra. 2019.09.21. Baja.



28. ábra. 2019.09.21. Baja.



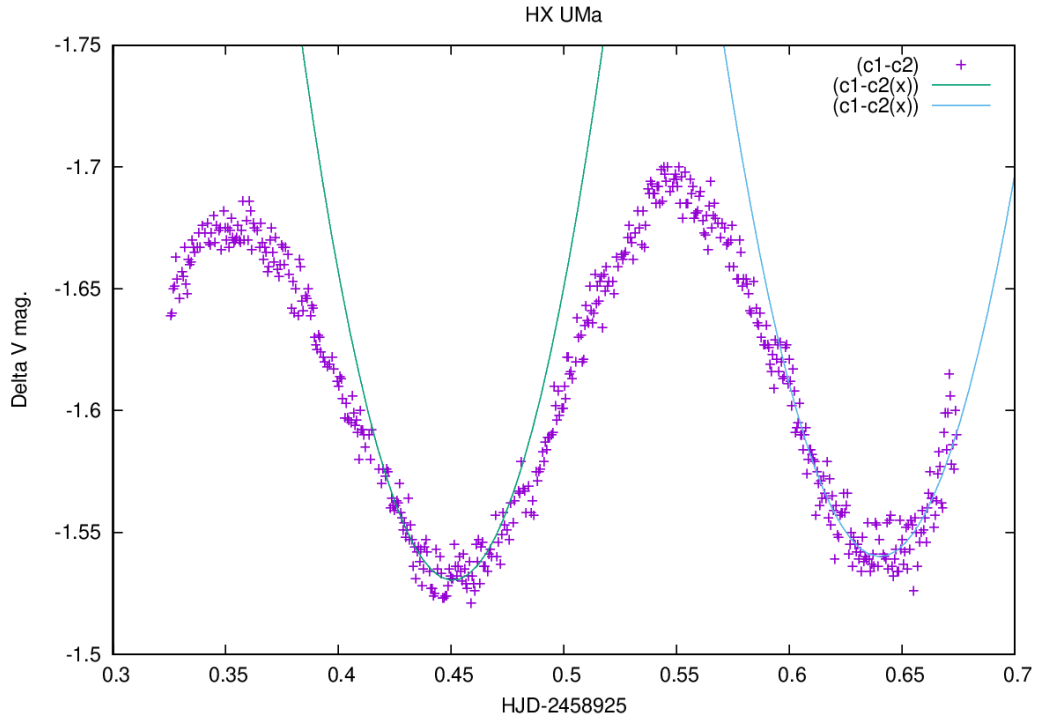
29. ábra. 2019.09.12. Szeged.

Időpont	a	Δa	b	Δb	x	Δx	Szűrő típus
2019.09.21.	-12,5802	0,2244	12,0876	0,2127	0,4804	0,01203	g
	-10,6836	0,3692	10,2824	0,3547	0,4812	0,02349	r
	-9,54125	0,2725	9,18204	0,2635	0,4811	0,01948	i
	-9,41574	0,2775	9,03702	0,2659	0,4798	0,01998	z

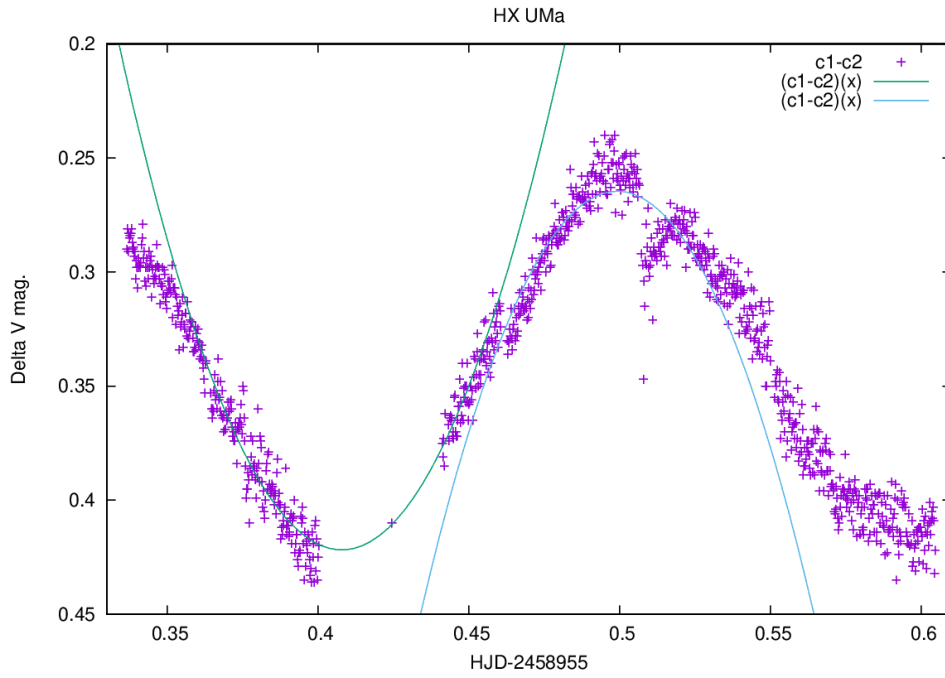
9. táblázat. A számolt minimumidőpontok.

6.6. A HX UMa fénygörbéi

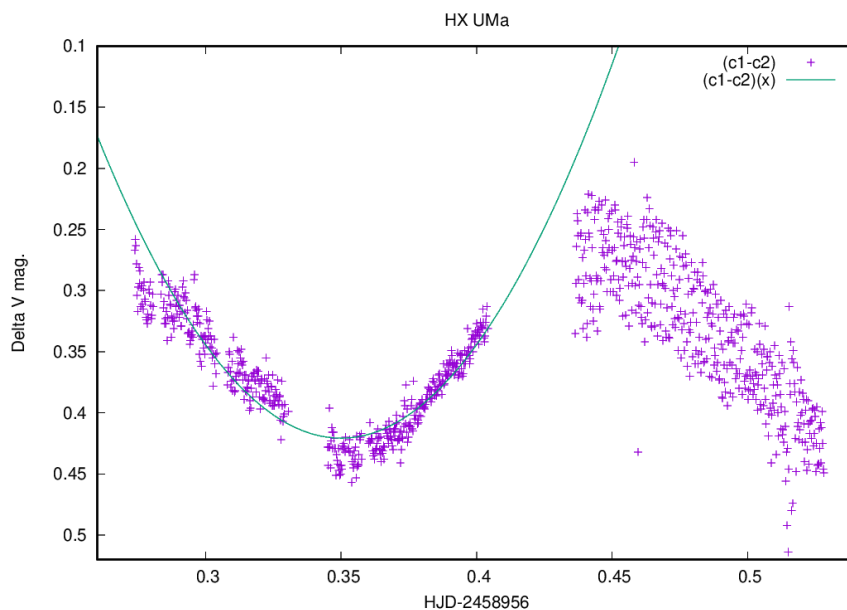
A HX UMa változócsillag megfigyelését először 2020.03.17-én Baján végeztem. Itt volt szerencsém egy fő- és mellékminimumot kimérni.



30. ábra. 2020.03.17. Baja.



31. ábra. 2020.04.15. Szeged.



32. ábra. 2020.04.16. Szeged.

A bajai mérést R szűrőben 10 és 7 mp-es expozíciós idővel végeztem. Ezt figyelembe vettem a korrekciós képek készítése során.

Időpont	a	Δa	b	Δb	x	Δx	Név
2019.03.17.	-49,3177	4,166	44,4418	3,706	0,4506	0,0535	1. minimum
	-43,7903	3,144	56,0659	4,024	0,6402	0,0650	2. minimum
2020.04.15.	-40,5672	1,021	33,0946	0,833	0,40790	0,00918	1. minimum
	43,5498	2,866	-43,4813	2,867	0,49921	0,04651	1. maximum
2020.04.16.	-30,5831	0,6339	21,407	0,4354	0,3499	0,01016	1. minimum

10. táblázat. A számolt minimumidőpontok.

A 2020.03.17-ei mérés alapján két minimumnak a helyét meg tudtam határozni, így a következő képlet segítségével kiszámoltam a periódusidőt:

$$T_{csillag} = 2 \cdot (x_2 - x_1) \quad (7)$$

A periódusidő hibájának kiszámításához pedig a következő egyenletet alkalmaztam:

$$\Delta T_{csillag} = \sqrt{((-2) \cdot |\Delta x_1|)^2 + (2 \cdot |\Delta x_2|)^2} \quad (8)$$

Az O-C gateway nevű adatbázisból (*Forrás: www.var2.astro.cz*) kikerestem a HX UMa változócsillag periódusidejét (irodalmi értékét), majd összehasonlítottam a mért eredményemmel. Az így kapott periódusidő értékeit a következő táblázatban foglaltam össze:

HX UMa periódusideje	
x_1 [nap]	0,4506
x_2 [nap]	0,6402
P_{kapott} [nap]	0,379194
ΔP_{kapott} [nap]	0,1683
$P_{irodalmi}$ [nap]	0,379156
δP [%]	0,01

11. táblázat. A HX UMa periódusidejének adatai. 2020.03.07.

A 2020.04.15-ei és 16-ai méréseket már Szegeden végeztem, szintén R szűrőben és 7 mp-es expozíciós idővel. A 15-ei mérés során egy minimum- és maximumhelyet figyeltem meg, amelyből meghatároztam a csillag periódusidejét. Itt a következő képletet alkalmaztam:

$$P_{csillag} = 4 \cdot (x_2 + x_1) \quad (9)$$

Az innen kiszámolt periódusidő értéket a következő táblázatba foglaltam össze:

HX UMa periódusideje	
x_1 [nap]	0,4079
x_2 [nap]	0,4992
P_{kapott} [nap]	0,365260
ΔP_{kapott} [nap]	0,0793
$P_{irodalmi}$ [nap]	0,379156
δP [%]	-3,664

12. táblázat. A HX UMa periódusidejének adatai. 2020.04.15.

7. Összefoglalás

A szakdolgozatomban összefoglaltam a változócsillagok főbb típusait, a mérések során használt műszereket, és a differenciális apertúra fotometria alapjait. A mért eredményeket a Gnuplot segítségével ábrázoltam, valamint a görbékre illesztett függvényekkel meghatároztam a minimumhelyeket. A szakmai gyakorlatom során kisebb betekintést nyertem az obszervációs csillagászatba, valamint megismertem a Szegedi Csillagvizsgáló és a Bajai Obszervatórium műszereit.

8. Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. Székely Péternek, hogy megtanította a távcső kezelését, az IRAF program használatát és hasznos tanácsokkal látott el. Köszönöm Mitnyan Tibornak, hogy elküldte a mért objektumok adatait. Köszönöm Dr. Szatmáry Károlynak, hogy engedélyt adott a Szegedi Csillagvizsgáló 40 cm-es távcsövének használatára. Szeretném megköszönni Dr. Hegedüs Tibornak, hogy lehetőséget adott a Bajai Obszervatórium 51 cm-es távcsövének használatára, valamint Beringer Pálnak, hogy engedélyt adott a 35 cm-es BAT távcsővel való méréseimhez. Továbbá köszönet illeti még Csányi Istvánt és Bánhidi Dominikot, akik mindig segítségemre voltak a munkában.

Hivatkozások

- [1] Kulin György: *Távcső világa*, Királyi Magyar Természettudományi Társulat (1941).
- [2] Donald H. Menzel: *Csillagászat*, Gondolat Könyvkiadó (1980).
- [3] Bécsy Bence, Dálya Gergely: *Csillagrendszerek* (IOAA felkészülési anyag)
- [4] Szatmáry Károly: *Változócsillagok*
<http://astro.u-szeged.hu/oktatas/asztrofizika/3valtozocsillagok.pdf>
- [5] Fűrész Gábor: *CCD-kamerák a csillagászatban*, Meteor Csillagászati Évkönyv, 2002
<https://konkoly.hu/evkonyv/ccd/furesz.html>
- [6] <http://oktel.hu/szolgaltatas/kamerarendszer/kamerak/ccd-es-cmos-erzekelok/>
- [7] <http://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1996AJ...111.1748F>
- [8] <https://www.sdss.org/instruments/camera/>
- [9] Sterken C., Manfroid J. (1992) Photometric filters. In: Astronomical Photometry. Astrophysics and Space Science Library, vol 175. Springer, Dordrecht
https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-94-011-2476-8_5
- [10] https://en.wikipedia.org/wiki/Photometric_system
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/UBV_photometric_system
- [12] <https://www.aip.de/en/research/facilities/stella/instruments/data/johnson-ubvri-filter-curves>
- [13] Bécsy Bence, Dálya Gergely: *Műszertechnika* (IOAA felkészülési anyag)
- [14] http://astro.u-szeged.hu/oktatas/csillagaszat/4_Muszertechnika/muszertechnika.htm
- [15] <http://astro.u-szeged.hu/index2.html>
- [16] <http://asterope.bajaobs.hu/bajaobs/index.php?cid=27&uid=55403&sel=1>
- [17] <http://bat.bajaobs.hu/BAT/equip.php>
- [18] <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Schmidt-Cassegrain-Telescope.png>
- [19] <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ritchey-Chretien-Cassegrain-Teleskop.svg>
- [20] <http://adsabs.harvard.edu/full/1999ASPC..189...50M>

9. Nyilatkozat

Alulírott Pál Boróka Hanga Fizika BSc szakos hallgató (ETR azonosító: D1E252) a Fedési kettőscsillagok fotometriai vizsgálata című szakdolgozat szerzője fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy dolgozatom önálló munkám eredménye, saját szellemi termékem, abban a hivatkozások és idézések általános szabályait következetesen alkalmaztam, mások által írt részeket a megfelelő idézés nélkül nem használtam fel.

Szeged, 2020.05.16.

.....

Pál Boróka Hanga