

TARTU ÜLIKOOL  
LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND  
Füüsika instituut

Üllar Kivila

**VARJUTUSMUUTLIKU KAKSIKTÄHE BD+48 1098  
FÜÜSIKALISTE PARAMEETRITE MÄÄRAMINE**

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendajad: PhD Indrek Kolka  
MSc Tõnis Eenmäe

Kaitsmisele lubatud: .....

Juhendaja: .....

Juhendaja: .....

*kuupäev, allkirjad*

Tartu 2014

# Sisukord

<b>Sisukord</b>	<b>2</b>
<b>Sissejuhatus</b>	<b>3</b>
<b>1 Ülevaade kaksiktähtedest</b>	<b>4</b>
1.1 Klassifikatsioon vaatluste põhjal . . . . .	4
1.2 Klassifikatsioon tähtede eraldatuse põhjal . . . . .	7
1.3 Kaksikluse mõju täheevolutsioonile . . . . .	8
<b>2 Vaatlusmetoodika</b>	<b>10</b>
2.1 Spekitröötlus . . . . .	11
<b>3 BD+48 1098 vaatlused</b>	<b>15</b>
3.1 Spektrijoonte mõõtmine . . . . .	16
<b>4 Vaatlusandmete analüüs</b>	<b>19</b>
4.1 Radiaalkiiruste kõver . . . . .	19
4.2 Füüsilised parameetrid . . . . .	21
<b>5 Kokkuvõte</b>	<b>23</b>
<b>6 Summary</b>	<b>24</b>
<b>Kirjandus</b>	<b>25</b>

## Sissejuhatus

Käesoleva töö eesmärk on varjutusmuutliku spektroskoopilise kaksiktähe katalooginimega BD+48 1098 vaatlemine Tartu Observatooriumi teleskoopidel aastatel 2013–2014. Uuritava tähe kohta on varasemast teada vaid hinnangud orbitaalperioodi ning OB-spektriklassi kohta fotomeetriliste vaatluste põhjal (Reed, 2003). Orbitaalperioodi on hinnatud kahel korral (Cook, 2008; Hoffman et al., 2008) ning saadud vastakaid tulemusi: vastavalt 21,65 ning 1,91 päeva. Mõlemal juhul hinnati BD+48 1098 ka võimalikuks  $\beta$ -Lyrae-tüüpi kaksiktähe kandidaadiks, kuid põhjalikumaid spektroskoopilisi uuringuid pole selle tähe kohta seni avaldatud. Kõnealust tähte on perioodi määramiseks vaadeldud Tõraveres ka fotomeetriliselt, kuid käesolevas töös neid vaatlusi lähemalt ei käsitleta. Antud töös otsitakse vastuseid järgmistele küsimustele:

- kas tähe muutlikkuse periood on 1,91 või 21,65 päeva;
- millised on süsteemi ja selle komponentide füüsikalised parameetrid;
- kas kaksiktähe komponentide vahel toimub aine ülevool ning millises arenguetapis on sel juhul doonortäht.

Neile küsimustele vastamiseks on tarvis lõputöö tegemise jooksul omandada spektroskoopiliste vaatluste ja vaatlustulemuste analüüsi meetoodika, samuti ka kaksiktähtede füüsikaliste parameetrite määramise meetoodika. Töö kaugem eesmärk on aidata täiustada lähiskaksiktähtede evolutsiooniprotsesside mudelid, kuna üks selliste mudelite probleeme on komponentide vahel toimuva aine ülevoolu õige kirjeldamine ja selle mõju hindamine tähtede arengule (Kondo et al., 2002). BD+48 1098 taoliste objektide vaatluslik uurimine pakub täiendavaid empiirilisi piiranguid, mis on otsustavad mudelite valikul.

# 1 Ülevaade kaksiktähtedest

Kaksiktähtede olulisust tähefüüsikas on raske alahinnata: ulatuslike vaatlusprogrammide tulemusel on selgunud, et ligi pooled kõigist Linnutee tähesüsteemidest koosnevad rohkem kui ühest komponendist (Abt, 1983). Lähiskaksiktähed mõjutavad vastastikuse gravitatsiooniga teineteise arengut sedavõrd, et komponendid läbivad arenguetappe, mida üksikute tähtede puhul kunagi ei esine. Selliste tähtede uurimine annab võimaluse kontrollida teoreetiliste täheevolutsiooni mudelite paikapidavust olukorras, kus täht ei ole väliskeskonnast isoleeritud. Lisaks annab kaksiktähtede orbiitide uurimine võimaluse hinnata nende komponentide füüsikalisi omadusi, mida üksikute tähtede puhul on raske teha, teadmata nende kaugusi. Kaksiktähti saab seetõttu kasutada vastupidises mõõtmises: uurides kaksiku omaduste põhjal välja süsteemi parameetrid, on võimalik hinnata selle kaugust Maast. Selle põhjal saab omakorda hinnata kaugete kerasparvede või isegi galaktikate kaugusi, millesse uuritavad tähed kuuluvad.

## 1.1 Klassifikatsioon vaatluste põhjal

Kui mingi tähesüsteemi kaksiklus on avastatav otsese teleskoobivaatlusega, loetakse selline tähesüsteem visuaalseks kaksikuks. Tänapäevaste suurimate teleskoopide puhul peab tähtedevaheline eraldatus selleks olema minimaalselt suurusjärgus 0,1 kaaresekundit, interferomeetria puhul kuni kaks suurusjärku väiksem.<sup>1</sup> Optiliselt eristatavad kaksiktähed on astronoomias olulised, kuna nende piisavalt pikaajase jälgimise korral on nähtav komponentide liikumine orbiidil. Selle põhjal on Kepleri seadustest võimalik määrata nende orbitaalelemendid ning arvutada tähtede masside summa valemist

$$m_1 + m_2 = \frac{4\pi^2 (a_1 + a_2)^3}{G P^2}, \quad (1)$$

kus  $a_1$  ja  $a_2$  on kummagi tähe orbiidi suured poolteljed. Nende summa  $a = a_1 + a_2$  on tähtedevaheline kaugus.  $P$  on süsteemi orbitaalperiood ning  $G$  gravitatsioonikonstant. Komponentide masside leidmiseks tuleb lisaks leida ka suhe  $m_1/m_2$ ,

---

<sup>1</sup>Center for High Angular Resolution Astronomy (CHARA), <http://www.chara.gsu.edu/CHARA/array.php>

mida on võimalik arvutada, määrates kummagi komponendi orbiidi süsteemi massikeskme ümber. Vastavalt massikeskme definitsioonile kehtib alati

$$m_1 a_1 = m_2 a_2. \quad (2)$$

Seega, kui tähte on jälgitud piisavalt kaua, et määrata nende massikeskme asukoht, saab masside suhte leida järgnevalt:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}. \quad (3)$$

Valemite 1-3 põhjal avalduvad tähtede massid seega:

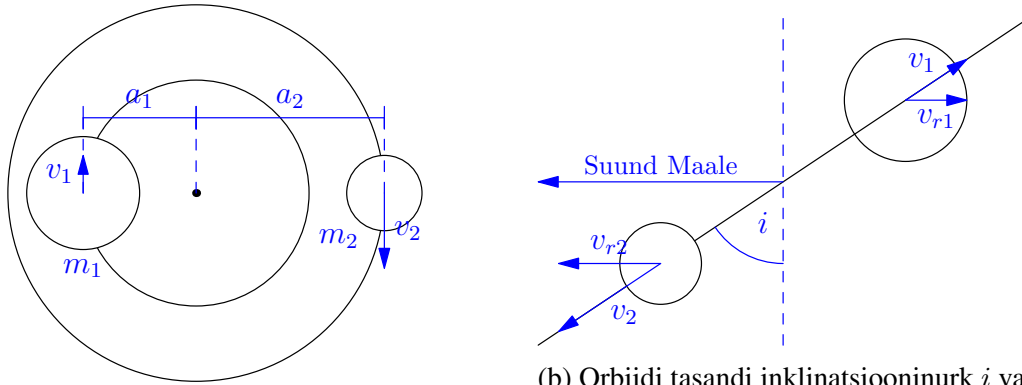
$$\begin{aligned} m_1 &= \frac{4\pi^2}{G} \frac{(a_1 + a_2)^2}{P^2} a_2, \\ m_2 &= \frac{4\pi^2}{G} \frac{(a_1 + a_2)^2}{P^2} a_1. \end{aligned} \quad (4)$$

Teades korraga nii tähe näivat heledust kui ka massi, saab hinnata tähe kaugust, mistõttu saab kaksiktähti kasutada kauguste määramisel standardküünaldena.

Spektroskoopiliste kaksikute puhul ei pruugi komponendid olla otsese vaatlusega eristatavad, kuid kaksiktähte saab siiski uurida selle spektrijoonte põhjal. Nimelt liiguvad komponendid oma orbiitidel mingil hetkel Maa suunas või sellest eemale (välja arvatud juhul, kui vaatesuund on täpselt orbiidi tasandi normaaliks). Vaatlejasuunalise liikumise tõttu esineb spektrijoonte sini- või punanihe, mis võimaldab hinnata tähtede vaatesuunalist nn radiaalkiirust valemist

$$v_r = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} c \quad (5)$$

(eeldusel, et  $c \gg v_r$ ), kus  $\lambda$  on spektrijoone vaadeldud lainepikkus,  $\lambda_0$  selle laboratoorne lainepikkus ning  $c$  valguse kiirus. Ühtlasi saab joonte perioodilise nihkumise abil mõõta ka tähe orbitaalperioodi. Ainult selle info põhjal ei saa aga komponentide orbiite üheselt määrata, kuna mõõdetud radiaalkiirus pole tähe tegelik orbitaalkiirus, vaid sõltub veel teadmata kaldenurgast (nn inklinatsiooninurk,  $i$ ) orbiidi tasandi ja vaatleja suuna vahel (joonis 1).



(a) Kaksiktähesüsteemi kirjeldavad suurused.

(b) Orbiidi tasandi inklinatsiooninurk  $i$  vaatleja suhtes.  $v$  on tähe orbitaalkiirus,  $v_r = v \sin(i)$  mõõdetav radiaalkiirus.

Joonis 1: kaksiktähesüsteemi skeem (a) polaar- ja (b) külgvaates. Lähiskaksikud on loodejõudude mõjul tüüpiliselt ringorbiitidel ning väikese eraldatuse tõttu pole poolteljed  $a_1$  ja  $a_2$  otseselt mõõdetavad.

Suurus  $v \sin(i)$  on mõõdetav hetkel, mil kaksiktäht on Maalt vaadates maksimaalses eralduses ning spektrijoone kaks komponenti teineteisest suurimal kaugusel. Rangelt võttes kehtib see vaid olukorras, kus tähed on teineteise ümber konstantse kiirusega ringorbiitidel. Lähiskaksiktähtede puhul võib seda eeldada, kuna loodejõudude mõjul sünkroniseerub tähtede tiirlemine pöörlemisega telje ümber. Eeldame seda ka käesolevas töös uuritava BD+48 1098 puhul. Sel juhul võib valemite 4 avaldada kaugused  $a$  radiaalkiiruse  $v_r$  ja perioodi  $P$  kaudu:

$$a = \frac{Pv}{2\pi} = \frac{Pv_r}{2\pi \sin(i)}. \quad (6)$$

Tähtede massid saab nüüd leida:

$$\begin{aligned} m_1 &= \frac{P}{2\pi G} \frac{(v_{r1} + v_{r2})^2}{\sin^3(i)} v_{r2}, \\ m_2 &= \frac{P}{2\pi G} \frac{(v_{r1} + v_{r2})^2}{\sin^3(i)} v_{r1}. \end{aligned} \quad (7)$$

Masside summa avaldub:

$$m_1 + m_2 = \frac{P}{2\pi G} \left( \frac{v_{r1} + v_{r2}}{\sin(i)} \right)^3. \quad (8)$$

Ühtlasi näeme valemite 7 põhjal, et sõltumata orbiidi kaldenurgast määrab radiaal-kiiruste suhe masside suhte analoogselt orbiidi pooltelgede suhtele (3):

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{v_{r2}}{v_{r1}}. \quad (9)$$

Nurga  $i$  määramine on lähiskaksiktähtede puhul võimalik juhul, kui orbiidi tasand on vaatesuuna suhtes piisavalt väikese nurga all, et kaks tähte teineteist perioodiliselt varjutaks. Sel juhul on teada, et  $i \approx 90^\circ$  ning  $v_r \approx v$ . Nii on olukord ka BD+48 1098 puhul. Mõõtes varjutusmuutliku tähe heleduse muutumist ajas, tekib perioodiliselt varieeruv nn heleduskõver, mille miinimumid vastavad varjutusele ühe või teise komponendi poolt. Kummagi tähe tekitatud heleduse miinimumi sügavuse ja kuju põhjal on võimalik hinnata nende suhtelist suurust teineteise ja orbiidi raadiuse suhtes. Koos spektroskoopiliselt kogutud infoga on võimalik täpselt määrata  $i$  ning ülejäänud süsteemi orbitaalelemendid.

## 1.2 Klassifikatsioon tähtede eraldatuse põhjal

Kaksiktähti saab klassifitseerida ka selle järgi, kuidas selle komponendid teineteist mõjutavad, sõltumata sellest, millisena paistab täht maisele vaatlejale. Valdav enamus kaksiktähtedest on lahuskaksikud, mille komponentide vaheline kaugus on tähtede mõõtmetega võrreldes sedavõrd suur, et arvestatavad vastasmõjud tähtede vahel puuduvad. Selliste tähtede areng kulgeb praktiliselt iseseisvalt, analoogselt üksikute tähtedega. Laiemalt tuntud lahuskaksikute hulka kuulub näiteks  $\alpha$  *Centauri*, Päikesele lähim tähesüsteem. Varjutuste esinemine seda tüüpi süsteemides on väikese tõenäosusega; mida suurem on tähtedevaheline kaugus, seda täpselt peab orbitaaltasand olema vaatesuunaga paralleelne, et varjutus toimuks. Juhul, kui varjutused siiski toimuvad, paistavad need muidu konstantsel heleduskõveral järskude selgesti eristatavate miinimumidena. Üks tuntumaid seda tüüpi tähti on Algol, mis on ühtlasi esimene avastatud varjutusmuutlik kaksiktäht.

Mida lähemal kaksiktähe komponendid teineteisele asuvad, seda enam need teineteist mõjutavad. Pooleraldatud kaksikute alla kuuluvad tähed, mis pole otsest kontaktis, kuid mille vahel toimub täheaine ülevool ühelt komponendilt teisele. Tüüpiliselt on sellisel juhul süsteemi suurema massiga ja kiiremini arenenud

liige jõudnud oma arengu lõppfaasi ning paisunud hiiuks, täites selle käigus oma nn Roche'i pinna.

Tähe välispinna kuju määrab potentsiaal, milles täht paikneb: üksiku tähe korral koosneb see tähe enese raskusväljast ja pöörlemisest tingitud potentsiaalidest ning tähe kuju on ellipsoidaalne, pöörlemise tõttu on ekvatoriaalne läbimõõt polaarset läbimõõdust suurem. Kaksiktähtede korral lisandub aga ka teise tähe gravitatsiooniväli; kuna lähedaste kaksiktähtede pöörlemine on loodejõudude tõttu üldiselt tiirlemisega sünkroniseeritud, on mõjuvat potentsiaali mõistlik vaadelda kaasapöörlevas taustsüsteemis. Sellisel juhul koosneb potentsiaal kolmest komponendist: kahe tähe gravitatsiooniväljast ning orbitaalliikumise tsentrifugaalpotentsiaalidest. Roche'i pinna määrab ekvipotentsiaalipind, mis vastab kahe tähe vahel oleva Lagrange'i punkti (L1) potentsiaalile. Kui hiidtähe pind paisub selle pinnani, hakkab selle väliskihtide aine L1 kaudu kaaslasele voolama. Sellise massiülekandega süsteemide tuntud näideteks on  $\beta$  *Lyrae* (Zhao et al., 2008) ning Cook (2008) ja Hoffman et al. (2008) põhjal ka käesolevas töös uuritav BD+48 1098.

Varjutuste korral on selliste süsteemide puhul üleminekud oluliselt sujuvamad ning varjutuste täpset algust ja lõppu on raske määrata; seda põhjustavad tähtede vastastikuse gravitatsiooni toimel väljavenitatud kujud ning valgustkiirgava akretsiooniketta olemasolu.

Olukorras, kus mõlemad komponendid on täitnud oma Roche'i pinna, võib täheaine vabalt voolata ühelt tähelt teisele, mistõttu tekib komponentide ümber ühine täheaine pilv. Selliste nn kontaktkaksikute korral võib rääkida pigem ühise ümbrise sees olevast kahest tähetuumast. Kui kumbki komponentidest eelnevalt oma arengus kõdutähe staadiumisse ei jõua, võivad sellised tähed aja jooksul hõõrdumise tõttu ühineda. Selliste süsteemide heleduskõveratel puudub konstantne niivo varjutuste vahel ning esineb vaid sujuv üleminek miinimumist maksimumi. Üks tuntumaid seda tüüpi tähti on Suures Vankris asuv *W Ursae Majoris*.

### 1.3 Kaksikluse mõju täheevolutsioonile

Tähe areng kaksiksüsteemis ei erine kuigivõrd üksiku tähe arengust seni, kuni üks tähtedest pole paisunud sedavõrd suureks, et täidab oma Roche'i pinna ning algab aine ülevool kaaslasele. Et Roche'i pind on seda väiksem, mida lähemal on



kaaslane ning mida väikesem on tähe mass, tõmbub massi kaotades kokku ka tähe Roche'i pind. Tekib positiivse tagasisidega ahel, mille tulemusel võib hiid kaotada suurema osa oma massist ning selle edasine areng peatuda. Selliseid ulatuslikke aine ülevoolu on vaadeldud näiteks  $\beta$  *Lyrae* puhul, kus see toimub kiirusega ligikaudu üks Päikese mass 50 000 aasta jooksul (Zhao et al., 2008).

Huvipakkuvaid nähtusi esineb ka kaksiktähtede puhul, kus üks komponentidest on arengu lõppfaasi jõudnud kõdutäht: valge kääbus, neutrontäht või must auk. Kui sellises süsteemis teine täht hiiuks paisub, hakkab selle väliskihtide aine langema kompaktse kaaslane peale ning tekkiva akretsiooniketta siseosa hakkab hõõrdumise mõjul tugevalt kiirgama. Neutrontähtede ja mustade aukude puhul kuumeneb aine sedavõrd, et hakkab kiirgama röntgenkiirgust. Luige tähtkujus asuv *Cygnus X-1* on tuntuim seda tüüpi objekt ning ühtlasi esimene vaatluslikult leitud musta augu kandidaat (Gou et al., 2011). Valgete kääbuste puhul võib kaaslaselt ülevoolanud aine piisava koguse saavutamisel taaskäivitada termotuumareaktsioonid, tekitades lühiajalisi noovasid. Selliseid aeg-ajalt plahvatavaid süsteeme nimetatakse kokkuvõtvalt kataklüsmilisteks kaksiktähtedeks.

## 2 Vaatlusmetoodika

Tänapäevased astrofüüsikalised vaatlused jagunevad põhiliselt kahe suurema meetodi vahel: fotomeetrilised ja spektroskoopilised mõõtmised. Fotomeetria tähendab tähekujutise kogu valgusvoo mõõtmist, avastamaks heledusmuutlikkust, mida võib tekitada kas tähe enda ebastabiilsus või varjutav kaaslane. Spektroskoopia puhul eraldatakse tähekujutis spektriks ning uuritakse selles esinevad kiirgus- ja neeldumisjooni, tuvastamaks tähe omadusi ning spektroskoopiliste kaksikute puhul nende liikumist. Tähtede suure kauguse ja sellest tuleneva väikese heleduse tõttu eeldab eelkõige spektroskoopia kvaliteetsete andmete saamiseks suure valgustkoguva pinnaga teleskoopide kasutamist. Seoses elektroonika arenguga ei mõõdetata teleskoobist saadud tähe- või spektrikujutisi enam visuaalselt, vaid need salvestatakse digitaalselt. Kord salvestatud kujutis tuleb puhastada aparatuuri ja Maa atmosfääri tekitatud moonutustest. Vaatlus- ja salvestustehnika tekitab kolme liiki pildimoonutusi (Tuvikene, 2012):

- Pimevool – sensoris tekkiv elektronide soojusliikumisest põhjustatud müra-signaali, mis kasvab enam-vähem lineaarselt, sõltuvalt säriajast. Alajahutatud (Tõravere puhul  $-90^{\circ}\text{C}$ ) sensorite korral on pimevool eelpeingega võrreldes väga marginaalne suurus, mistõttu seda selle töö juures ei arvestata.
- Eelpeinge – igale pikslile lisanduv konstantne signaalinivoo, mille tekitab sensori tööhoidmiseks kasutatav pinge. Hea kvaliteediga sensorite puhul on see enam-vähem konstantne terve kaadri ulatuses.
- Erinev tundlikkus kaadri eri piirkondades, mille põhjuseks võib olla valguse blokeerimine mõne instrumendi osa poolt, tolm sensoril, interferents mõnes õhukeses klaasdetailis või suure vaateväljaga teleskoopide puhul kaadri servade tumenemine.

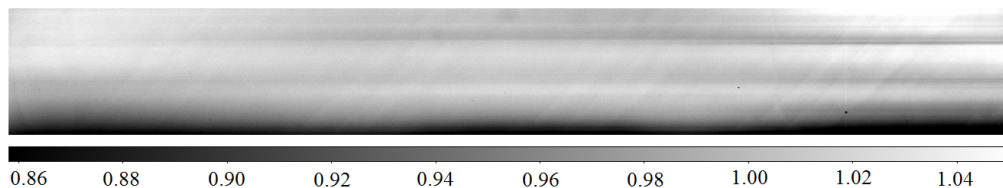
Eelpeinge ja pimevool lisavad kogu kaadrile mingi konstantse nivoo, mis tuleb kaadrist lahutada. Nende nivoo määramiseks mõõdetakse mõlemad kinnise kaadriga särituselt; eelpeinge määrab 0-sekundilise säriajaga kaader ning pimevoolu kogunemise kiirust hinnatakse vaatluskaadritele sarnase säriajaga kaardilt. Kaadri tundlikkuse korrigeerimiseks pildistatakse ühtlaselt valgustatud objekti (nt teleskoobi kupli sein või loojangutaevas) ning saadud nn tasaväljakaader iseloomustab

sensori eri osade tundlikkust: ideaalsel juhul peaks tulemuseks olema ühtlane niivoo kogu kaadril. Juhusliku müra mõju (nt kosmilised kiired) kõrvaldamiseks tehakse nii eelpinge-, pime- kui ka tasaväljakaadreid korraga mitu(kümmend) ning tähekaadrite korrigeerimisel kasutatakse nende mediaanväärtuseid.

Enne tähekaadrit või spektrilt kasuliku info väljalugemist korrigeeritakse ülaltoodud moonutused järgneva algoritmi alusel:

$$\text{korrigeeritud kaader} = \frac{\text{toorkaader} - (\text{eelpinge} + \text{pimevool}(t))}{\text{norm}(\text{tasaväli} - (\text{eelpinge} + \text{pimevool}(t)))}$$

Nii toorkaadrist kui tasaväljakaadrist tuleb maha lahutada eelpinge ja pimevoolu lisatud konstantne nivoo, kusjuures pimevool sõltub konkreetse särituse pikkusest. Tasaväljakaadri normeerimine tähendab selle läbijagamist kaadri signaali kesk- väärtusega, et saadav tulemus oleks enam-vähem 1. Sedasi muudab toorkaadri normeeritud tasaväljaga läbijagamine signaali väärtust võimalikult vähe.



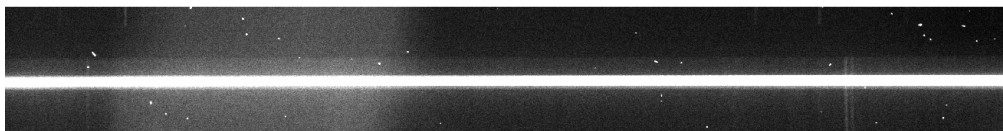
Joonis 2: näide Tõravere 1,5 m teleskoobi normeeritud tasaväljakaadrist.

## 2.1 Spektritöötlus

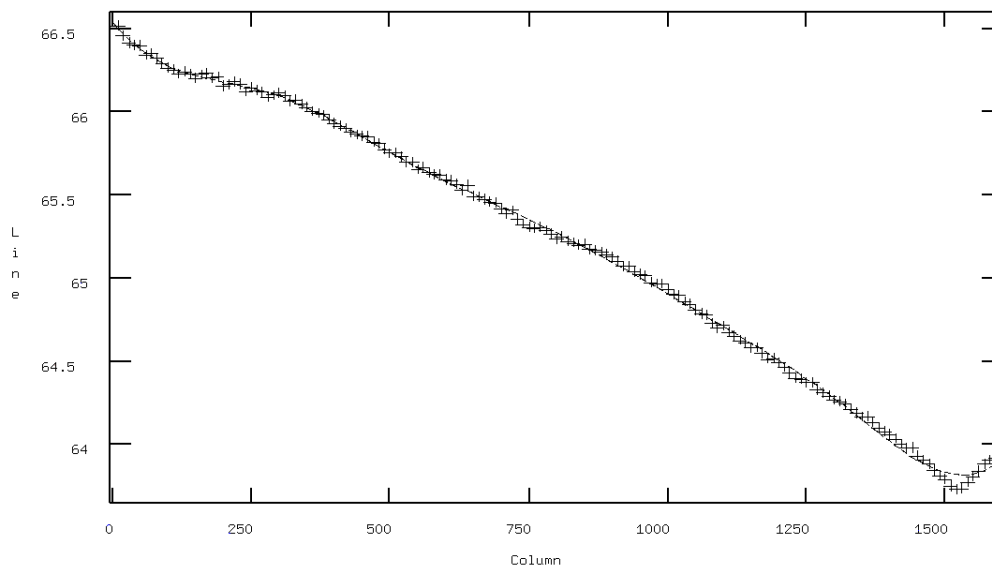
Spektroskoopia puhul eraldatakse teleskoobiga kogutud tähevalgus spektriks, mille kujutis salvestatakse. Suuremas osas tänapäevastest observatooriumitest kasutatakse spektri tekitamiseks difraktsioonivõret. Tõravere 1,5-meetrisel teleskoobil salvestatakse spekter  $1600 \times 200$  pikslisele CCD-sensorile, kusjuures dispersioonitelg on paralleelne sensori pikiteljega. Erineva võrekonstandiga võrede abil on võimalik saavutada erinev lahutusvõime ning võre kaldenurga muutmisel uurida erinevaid spektri piirkondi.

Spektroskoopiliste andmete töötlemise lõppesmärk on saada spektri kujutisest võimalikult kvaliteetne tähespekter, mis oleks vaba Maa atmosfääri spektrijoonte ja aparatuuri moonutustest. Toorkaadri töötlemisel lahutatakse maha eelpinge ja

pimevoolukaadrid, kuid tasaväljakaadri normeerimine erineb fotomeetrias kasutatavast loogikast. Kuna kaamera sensori pikisuund märgib dispersioonitelge, satub igale pikslile erineva lainepikkusega kiirgus, mistõttu lisandub muudele sensori tundlikkust mõjutavatele teguritele ka selle tundlikkus eri lainepikkuste suhtes. Kuna seda pole võimalik korrigeerida ühtlaselt valgustatud objekti pildistamisega, normeeritakse tasaväljakaader vaid dispersiooniteljega ristivas suunas, st iga piksliveerg jagatakse läbi vaid selle veeru pikslite keskvärtusega (eeldusel, et dispersioonitelg on piki kaadri ridu). Sensori spektraalse tundlikkuse põhjustatud erinevused korrigeeritakse hiljem mõne pidevspektri abil, mille tekitajaks võib olla kas lamp või kiiresti pöörlev kuum täht, mille spektrijooned on laiali määratud (tuntuim selline on Lõvi tähtkujus asuv Reegulus).



(a) töötlemata spektri kaadri näide. Tähespektri külgedel on heledama alana näha taevafoon, üksikud heledad täpid tekivad kosmiliste kiirte tabamustest sensorile. Tähe spekter on keskne horisontaalne joon.



(b) spektri jälg kaadril piki dispersioonitelge. Kujutise tsentri asukoht varieerub kogu kaadri ulatuses vaid mõne piksli jagu.

Joonis 3: tähespekter ja selle tsentri asukoht kaadris.

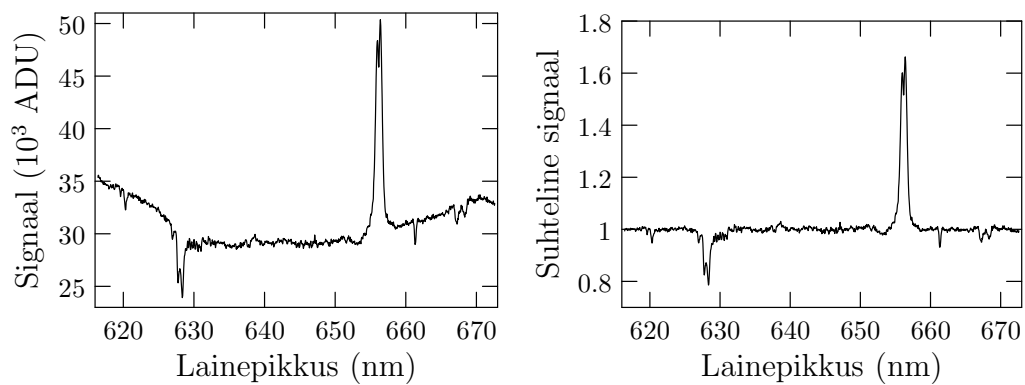
Eeltötlusele järgneb kõige olulisem osa: spektri eraldamine kaadrist. Selleks tuleb määrata spektri kujutise tsentri täpne trajektoor üle kaadri; kuigi idee poolest peaks dispersioonitelg olema paralleelne kas pikslite ridade või veergudega, siis reaalsuses joonistab spekter kaadris kergelt lookleva joone (vt joonis 3b). Spektri tsentri asukoht määratakse mingi kõverjoone – tüüpiliselt kuupsplaini – abil dispersioonitelje funktsioonina (Massey et al., 1992).

Spektri keskjoone määramise järel tuleb kokku liita kõik selle ümbruses asuvad read, kus leidub tähelt tulnud signaali. Ühtlasi lahutatakse maha taevafoon, mis jäädvustub tähespektri kõrvale (vt joonis 3a). See rehkendus annab tulemuseks tähespektri, kuid dispersioonitelje ühikuteks on endiselt pikslid. Saamaks tähespektrit lainepikkuste skaalal, tuleb leida seos pikslite ja neile langenud kiirguse täpse lainepikkuse vahel. Selleks tehakse nii enne kui ka pärast tähekaadri säritamist võrdluskaadrid spektraallambist (Tõravere puhul Th-Ar lamp), mille spektrijoonte lainepikkuste väärtused on teada. Kahe võrdluskaadri eesmärk on minimeerida tähekaadri säritamise ajal tekkida võivaid vigu; pika (30 min kuni tund) säriaaja jooksul pöörab teleskoop end tähte jälgides vastu Maa pöörlemist ning kogu spektroskoop liigub sellega ühes, mistõttu tekivad selles paratamatult väikesed mehaanilised nihked.

Lainepikkuste skaala üle kandmiseks tähespektrile tuleb mõlemas võrdluskaadris identifitseerida seal olevad jooned ning sobitada nende lainepikkusi ja asukohta kaadris kirjeldav funktsioon. Seos on üldjoontes lineaarne, kuid mitte täpselt; käesolevas töös kasutati kõrvalekallete (mittelineaarne komponent u 1,5-2 nm) sobitamiseks Legendre'i 5. või 6. järku polünoome. Järgmiseks sammuks tähespektri ettevalmistamisel viiakse see üle heliotsentrilisse taustsüsteemi, mis tähendab Maa tiirlemise ja pöörlemise tekitatud Doppleri nihke kõrvaldamist. Selleks on tarvilik teada vaatluse aega ja observatooriumi geograafilist asukohta, mis määravad vaatleja kiiruse Päikese suhtes. Saadud kiiruse tekitatud sini- või punanihe lahutatakse spektrist, et oleks võimalik eri aegadel tehtud vaatlusi võrrelda.

Võrdluskaadris olevaid lambi spektrijooni kasutatakse ka spektri lahutusvõime hindamiseks valemi  $R = \lambda/\Delta\lambda$  põhjal, kus  $\Delta\lambda$  on spektrijoone laius. Samal eesmärgil võib kasutada ka tähespektris esinevaid kitsaid interstellaarseid neeldumisjooni.

Viimase sammuna normeeritakse kogu saadud spekter seda läbivale pidev-  
spektri (kontiinumi) tasemele, mille tulemusena on võimalik mõõta kiirus- ja  
neeldumisjoonte suhtelist intensiivsust (vt joonis 4).



Joonis 4: normeerimata (vasakul) ja normeeritud (paremal) spektrite näide

### 3 BD+48 1098 vaatlused

Uurimisalust tähte on vaadeldud Tartu Observatooriumis Tõraveres spektroskoopiliselt 2013. aasta aprillist kuni 2014. aasta märtsini. Kokku on tehtud 31 spektrit, mille võtab kokku tabel 1.

BD+48 1098 vaadeldi neljas spektripiirkonnas, mida kirjeldab tabel 2. Erinevate piirkondade spektrite näited on joonisel 5. Kuna tegu on spektroskoopilise kaksiktähega, esinevad kahe tipuga kiirgus- või neeldumisjooned, mis on sini- või punanihkes vastavalt sellele, kumb täht parasjagu vaatleja suhtes läheneb või eemaldub.

Tabel 1: BD+48 1098 spektroskoopiliste vaatluste kokkuvõte. Spektrograafi konfiguratsioonide (K) kirjeldus on tabelis 2, SNR on hinnanguline signaal-müra suhe, säriajad on antud minutites.

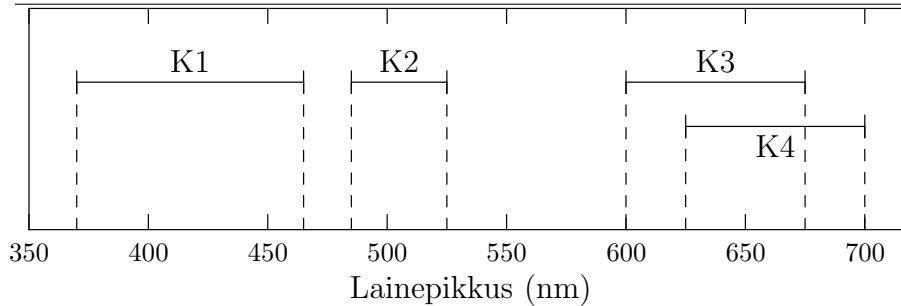
Vaatlusöö	K	SNR	Säri	Vaatleja(d)	Vaatlusöö	K	SNR	Säri	Vaatleja(d)
2.04.13	3	230	30	Voog, Matjus	21.10.13	3	170	30	Kolka
8.04.13	3	200	30	Voog, Matjus	8.11.13	4	240	60	Kolka
9.04.13	1	90	30	Annuk	10.11.13	4	250	30	Kolka
19.04.13	1	100	30	Kolka	10.11.13	4	260	30	Kolka
20.04.13	3	200	30	Eenmäe	28.01.14	1	90	30	Voog, Matjus
23.08.13	3	160	30	Matjus	28.01.14	3	180	23	Voog, Matjus
25.09.13	4	220	60	Kolka	28.01.14	3	230	25	Voog, Matjus
11.10.13	4	190	60	Kolka	28.01.14	1	100	37	Voog, Matjus
20.10.13	1	140	60	Kolka, Kivila	29.01.14	1	140	60	Voog, Matjus
20.10.13	1	130	60	Kolka, Kivila	29.01.14	1	140	60	Voog, Matjus
20.10.13	1	130	60	Kolka, Kivila	5.02.14	1	120	60	Voog, Matjus
20.10.13	1	120	60	Kolka, Kivila	18.02.14	2	220	60	Eenmäe
20.10.13	3	270	30	Kolka, Kivila	25.02.14	2	240	60	Matjus
21.10.13	1	140	50	Kolka	4.03.14	2	200	60	Matjus
21.10.13	1	100	50	Kolka	27.03.14	2	220	60	Eenmäe
21.10.13	3	260	30	Kolka					

K	Spektreid	Säriaeg kokku
1	13	647
2	4	180
3	9	258
4	5	240
<b>Kokku</b>	<b>31</b>	<b>1325</b>

Tabel 2: vaatlustel kasutatud spektrograafi konfiguratsioonid (K) ja neile vastavate spektripiirkondade joonis. K3 ja K4 puhul mõõdeti samu jooni. Igale piirkonnale vastava spektri näide on joonisel 5. Lahutusvõime on hinnatud uuritava piirkonna keskel, dispersioon kogu piirkonna keskmisena.

K	Võre- nurk (°)	Võrekonstant (joont/mm)	Lahutusvõime ( $\lambda/\Delta\lambda$ )	Dispersioon (piksleid/nm)	Lainepik- kused (nm)
1	20,5	1200	2400	17	370-465
2	35,0	1800	5600	36	485-525
3	30,0	1200	4300	21	600-675
4	31,0	1200	4300	21	625-700



### 3.1 Spektrijoonte mõõtmine

Kõigil spektritel mõõdeti joonisel 5 näidatud joonte kummagi tipu täpne lainepikkus ning Doppleri nihke valemi (5) põhjal selle allika kiirus. Mõõtmiste tulemused on toodud tabelis 3. Kuna spektrid on eelnevalt taandatud heliotsentrilisse taustsüsteemi, siis saadud kiirus näitab vastava komponendi liikumist Päikese suhtes. Ühtlasi on teada iga vaatluse HJD (heliotsentrilise Juuliuse päeva) ajatempel, mis arvestab maha valguse Päikese ja Maa vahel levimise aja. Ilma selleta oleks aasta jooksul mõõdetavate vaatluste erinevus kuni 16 minutit (Maa orbiidi raadius on 8 valgusminutit).

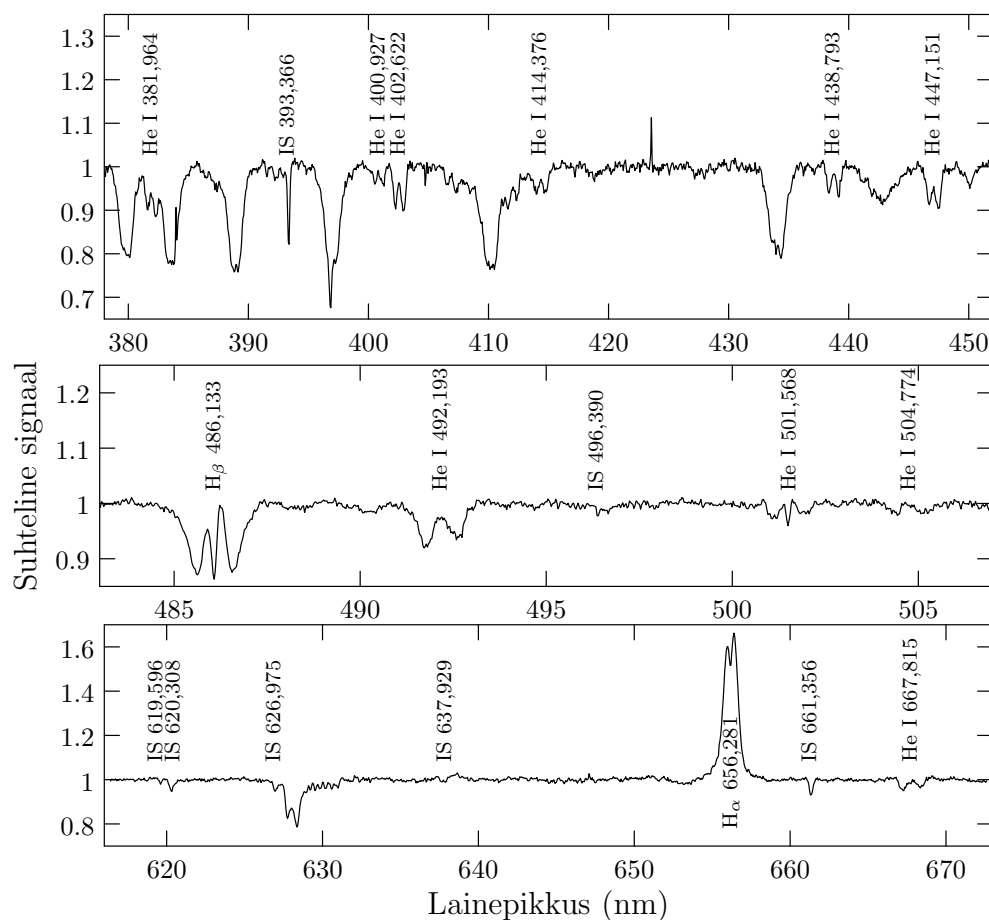
Joonte mõõtmiseks kasutati tarkvarapaketti IRAF. Tähtede maksimaalse eralduse korral selgelt eristuvate tippude keskkoha leidmiseks lähendati neid Gaussi profiiliga. Varjutuselähedases olukorras, kus tähed liiguvad vaatleja suunas risti, sulavad tipud kokku ning nende eristamiseks kasutati *deblend*-funktsiooni, eeldades et mõõdetav joon on kahe Gaussi profiili summa.

Spektritest mõõdetud kiiruste määramatuse hinnanguna on kasutatud ühest spektrist mõõdetud mitme joone kiiruste standardhälvet, kus võimalik. K3 ja K4



piirkonnas või olukorras, kus müra tõttu oli mõõdetav vaid üks He I joon, hinnati määramatust joonte põhjal, millel faasisõltuvust polnud – mõõtmiste käigus ilmnes, et sellised on  $H_\alpha$  ja  $H_\beta$  jooned.

Spektrites esinevad tähtedevahelise keskkonna neeldumisjooned võimaldasid korrigeerida võrdluslambi abil paika pandud lainepikkuste skaalat, kuna nende lainepikkus ajas ei muutu. Erinevatel spektritel jäi nende lainepikkuse muutlikkus 0,1 nm piiresse ning vastav parand liideti enne kiiruse arvutamist spektrile.



Joonis 5: erinevate spektripiirkondade näited ja mõõdetud jooned. Ülevalt alla: K1, K2 ning K3 ja K4 ühisosa. K1 spektris on üksiku piigina nähtav kosmilise kiire tabamus spektril. IS - interstellaarne neeldumisjoon.

Tabel 3: spektraalvaatluste tulemused. Taandatud HJD kuupäev on antud kujul HJD – 2456000,  $\Delta$  on interstellaarne parand. Kiiruste ( $v$ ) standardhälve ( $\sigma$ ) on arvutatud kõigi samast spektrist mõõdetud joonte keskmisena, n on seejuures kasutatud joonte arv (liigse müra tõttu tuli osa jooni mõõtmata jätta).

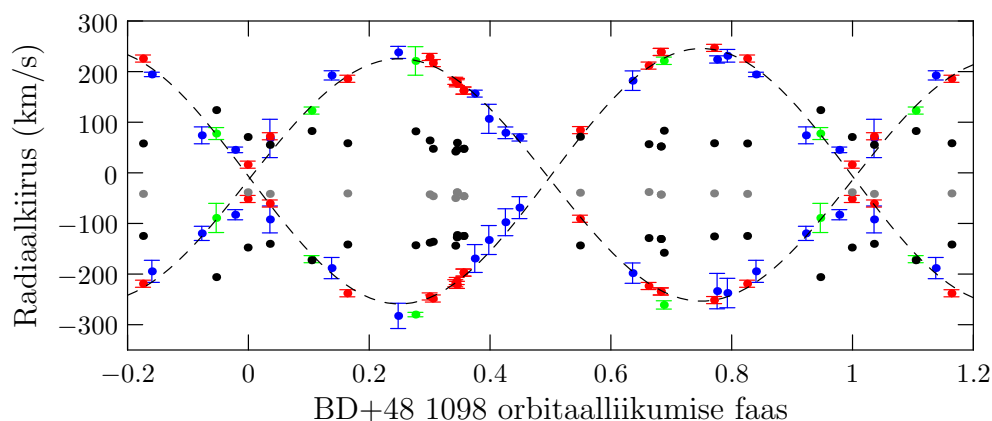
Vaatlusöö	HJD	Faas	K	$\Delta$ (Å)	A-komponent			B-komponent		
					n	$v$ (km/s)	$\sigma$	n	$v$ (km/s)	$\sigma$
9.04.2013	392.30	0.776	1	-0.1	4/6	224.0	35.0	6/6	-233.6	7.1
19.04.2013	402.35	0.036	1	-0.09	5/6	-92.1	37.9	5/6	67.9	26.6
20.10.2013	586.38	0.356	1	-0.61	6/6	-169.3	6.9	6/6	156.5	27.5
20.10.2013	586.41	0.375	1	-0.36	2/6	-132.7	28.7	5/6	106.7	28.6
20.10.2013	586.46	0.398	1	-0.33	4/6	-97.6	11.5	6/6	79.1	26.6
20.10.2013	586.51	0.425	1	-0.34	4/6	-68.8	7.1	5/6	69.9	21.7
21.10.2013	587.27	0.826	1	-0.57	4/6	194.4	21.8	4/6	-194.6	4.4
21.10.2013	587.30	0.840	1	0.04	5/6	45.4	10.0	5/6	-82.8	5.5
28.01.2014	686.26	0.636	1	0.04	4/6	182.1	20.1	5/6	-198.1	19.3
28.01.2014	686.52	0.771	1	-0.03	4/6	231.3	29.1	4/6	-237.5	12.5
29.01.2014	687.22	0.138	1	0.02	4/6	-188.1	9.1	4/6	192.5	20.9
29.01.2014	687.43	0.248	1	-0.08	6/6	-282.6	11.9	5/6	237.9	25.0
5.02.2014	694.45	0.923	1	-0.21	4/6	74.1	14.0	5/6	-119.6	16.7
18.02.2014	707.37	0.688	2	0.04	2/3	221.4	8.2	2/3	-260.9	7.3
25.02.2014	714.23	0.276	2	-0.15	2/3	-280.0	28.2	2/3	221.1	4.4
4.03.2014	721.24	0.947	2	-0.06	2/3	77.6	28.8	2/3	-89.1	11.8
27.03.2014	744.47	0.105	2	0.05	1/3	-170.5	7.0	1/3	123.0	7.0
2.04.2013	385.40	0.164	3	0.43	1/1	-237.9	7.0	1/1	185.9	7.0
8.04.2013	391.39	0.300	3	0.29	1/1	-244.2	7.0	1/1	228.9	7.0
20.04.2013	403.33	0.549	3	0.06	1/1	84.4	7.0	1/1	-90.7	7.0
23.08.2013	528.45	0.035	3	-0.22	1/1	-60.6	7.0	1/1	72.3	7.0
25.09.2013	561.52	0.345	4	-0.4	1/1	-221.3	7.0	1/1	179.6	7.0
11.10.2013	577.45	0.683	4	-0.43	1/1	238.8	7.0	1/1	-234.3	7.0
20.10.2013	586.55	0.449	3	-0.37	1/1	-197.1	7.0	1/1	162.5	7.0
21.10.2013	587.56	0.978	3	-0.5	1/1	225.8	7.0	1/1	-219.1	7.0
21.10.2013	587.60	0.999	3	-0.43	1/1	16.2	7.0	1/1	-51.6	7.0
8.11.2013	605.46	0.342	4	-0.41	1/1	-218.2	7.0	1/1	181.8	7.0
10.11.2013	607.30	0.305	4	-0.4	1/1	-248.2	7.0	1/1	216.8	7.0
10.11.2013	607.37	0.345	4	-0.25	1/1	-213.7	7.0	1/1	176.9	7.0
28.01.2014	686.31	0.662	3	-0.01	1/1	211.9	7.0	1/1	-223.6	7.0
28.01.2014	686.56	0.793	3	-0.11	1/1	246.9	7.0	1/1	-251.4	7.0

## 4 Vaatlusandmete analüüs

Fotomeetrilised vaatlused Tõraveres on läbi viinud Tõnis Eenmäe, kes mõõtis saadud andmetest tähe tiirlemisperioodiks 1,91055 (25) päeva ning epohhiks (peamiinimumi ajaks) HJD 2456528,3796. Saadud tulemus osutus väga lähedaseks Hoffman et al. (2008) mõõdetud perioodiga 1.91024 päeva. Tõraverre fotomeetriste andmete põhjal on arvutatud ka tabelis 3 esitatud faasid, mis kirjeldavad kaksiktähe orbitaalset asendit vaatluse ajal. Faasi määratakse vahemikus 0-1, kus 0 tähistab heleduskõvera peamiinimumi ning 0,5 sekundaarmiinimumi. Faasid 0,25 ja 0,75 vastavad kaksiku maksimaalsele eraldusele.

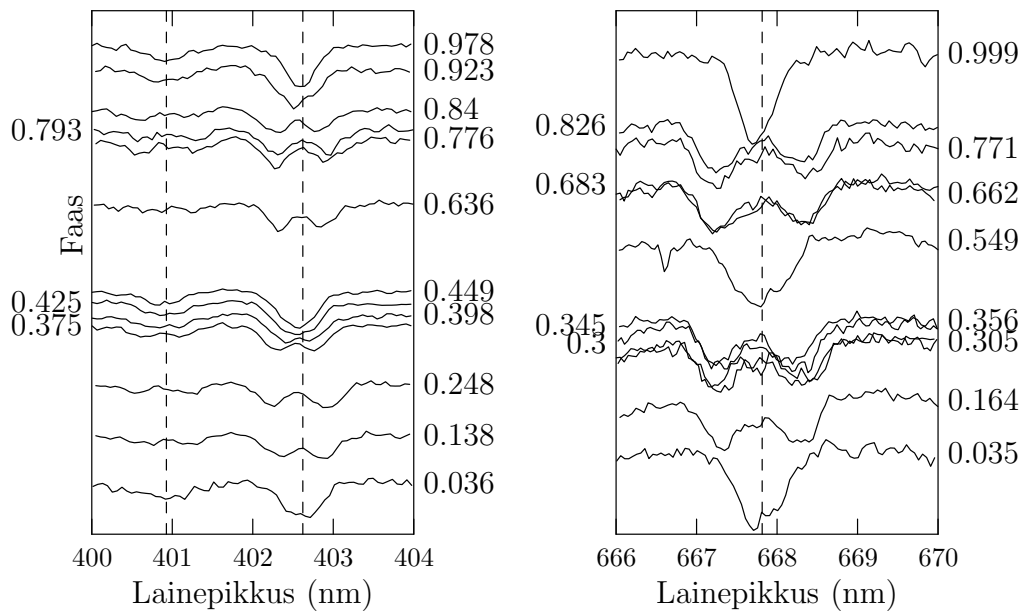
### 4.1 Radiaalkiiruste kõver

Fotomeetristest vaatlustest määratud faaside ning spektritest mõõdetud kiiruste põhjal moodustub komponentide radiaalkiiruste kõver (joonis 6). BD+48 1098 puhul võib eeldada, et komponendid on ringorbiitidel. Sellisel juhul on radiaalkiiruste kõverateks siinusfunktsioonid kujul  $v(\phi) = v \sin(2\pi\phi) + v_0$ , kus  $\phi$  on faas,  $v$  tähe orbitaalkiirus ning  $v_0$  süsteemi massikeskme kiirus Päikese suhtes. Joonte mõõtmise käigus ilmnis, et tähtede liikumine avaldub vaid He I neeldumisjoontes.  $H_\alpha$  ja  $H_\beta$  kiirgusjoontel faasisõltuvust ei ilmnenu.



Joonis 6: BD+48 1098 radiaalkiiruste kõver He I neeldumisjoonte põhjal ning  $H_\alpha$  kiirgusjoonte mõõtmised. Eri värvidega on tähistatud erinevates spektri piirkondades tehtud vaatlused: K1 – sinine, K2 – roheline, K3 ja K4 – punane.  $H_\alpha$  ja  $H_\beta$  joonte kiirused on musta ning joontevaheline lohu kiirus halli värviga.

Vähimruutude põhjal sobitatud sinusoidid annavad primaartähe parameetriteks  $v_{ra} = 239$  km/s ja  $v_{a0} = -14$  km/s standardhälbega 17 km/s ning sekundaartähe jaoks  $v_{rb} = 252$  km/s ja  $v_{b0} = -7$  km/s standardhälbega 16 km/s. Kahe komponendi  $v_0$  põhjal saame kaalutud keskmisena süsteemi massikeskme radiaalkiiruse Päikese suhtes  $-10$  (11) km/s.  $H_\alpha$  ja  $H_\beta$  joonte mõõtmise andis tulemuseks spektrijoonte tippude keskmise kiiruse  $-134,0$  (8,5) km/s ning  $56,2$  (8,8) km/s. Kahe tipu vahetuse keskväärtuseks on  $-41,8$  (3,5) km/s.



Joonis 7: spektrijoonte kaju sõltuvus faasist. Vasakul K1 piirkonna He I 400,927 nm ja He I 402,622 nm jooned. Esimene neist on kehvasti nähtav, kuna on suhteliselt nõrk. Paremalt on punase piirkonna He I 667,815 nm joon. Üksikute spektrite suhteliste intensiivsuste skaala on ühesugune, eri faaside spektrid on nihutatud vastavalt nende faasile. Kriipsjooned märgivad joonte laboratoorset lainepikkust.

$H_\alpha$  ja  $H_\beta$  joonte sõltumatus kaksiku faasist on tähelepanuväärne – see viitab nende pärinemisele mujalt kui tähtedelt. Ka nende mõõdetud kiirus joontevahelise tsentri suhtes,  $u$  95 km/s on tunduvalt vähem tähtede endi kiirustest. Selle info põhjal võib oletada laiendatud gaasiümbrise olemasolu kaksiktähe ümber. Märkimist väärib ka  $H_\alpha$  tippudevahelise lohu radiaalkiiruse erinevus He I joonte põhjal mõõdetud kaksiktähe massikeskme radiaalkiirusest, mis viitab gaasiümbrise paisumisele kiirusega  $u$  30 km/s. Oletatavasti on selle ümbrise gaas pärit tähtedelt

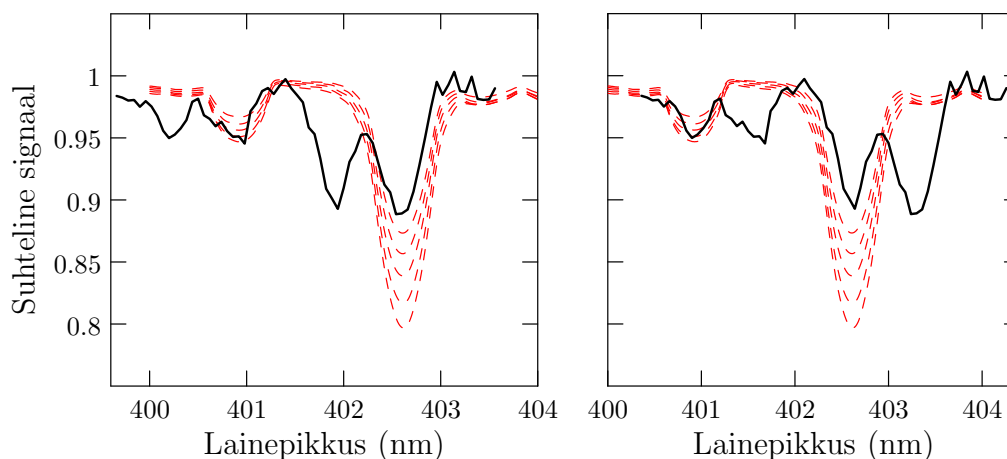
endilt, kust seda tõukab eemale kuumade siniste tähtede tugev tähetuul. Valemi

$$r(v) = \frac{G(m_1 + m_2)}{v^2}, \quad (10)$$

põhjal saame hinnata umbkaudset  $H_\alpha$  ja  $H_\beta$  joonte tekkimise kaugust tähtedest: jooned pärinevad 2,31 (0,38) aü kauguselt.

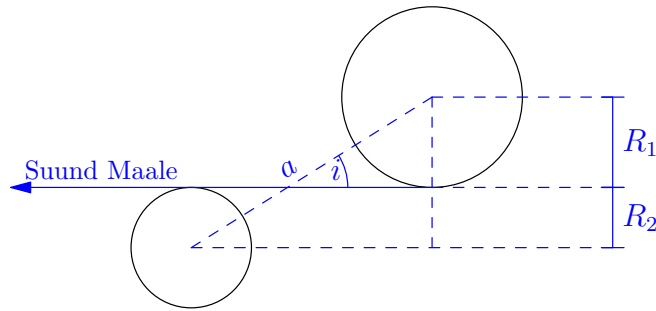
## 4.2 Füüsikalised parameetrid

Kiiruste suhte järgi saame leida komponentide massisuhte  $q = m_1/m_2$  ning suurema määramatusega ka mõlema komponendi massifunktsiooni sõltuvana orbiidi kaldenurgast. Sarnaselt saame valemist 6 leida samad suurused ka orbiitide raadiuste kohta. Spektrite põhjal saame ka mudelspektritega võrdlemise teel määrata komponentide spektriklassid. Olemasoleva info põhjal võime eeldada, et mõlemad tähed on sama spektriklassiga, arvestades seni leitud kiiruste sarnasust ja ühesuguseid spektrijooni. Võrdluseks kasutame Munari (2005) kataloogist pärist tehisspektreid.



Joonis 8: BD+48 1098 spektri (faas 0,248, must joon) sobitus Munari (2005) spektritega He I 400,9 nm ja He I 402,6 nm joonte juures (punased jooned). Võrdluses eeldame Päikese metallilisust ning pöörlemiskiirust 250 km/s. Tehisspektrite temperatuurid intensiivsuse kahanemise suunas on 21 000, 23 000, ... 29 000 K. Maksimaalse eralduse lähedane faas võimaldab võrrelda mõlema komponendi spektreid eraldi.

Munari (2005) tehisspektrite põhjal võib BD+48 1098 mõlema komponendi temperatuuri hinnata u 30 000 K juurde. Carroll'i ja Ostley (2007) spektriklasside kataloogi andmeil sobivad sellise temperatuuri ja käesolevas töös mõõdetud massiga B0- ja B1-spektriklassi peajada (V) tähed. Spektriklassi põhjal võib suurusjärguliselt hinnata ka tähtede muid parameetreid, kuid ilma kindla hinnanguta orbiidi kaldenurga suurusele saab vaid anda ülemised ja alumised võimalikud äärmused. Kaldenurga ülemine piir on  $i = 90^\circ$  ning alumine on avaldatav piirtingimusena, et veel toimuksid varjutused.



Joonis 9: varjutuste toimumise piirtingimus. Minimaalse inklinatsiooninurga korral, mil veel toimuvad varjutused, kehtib  $a \cos(i_{min}) = R_1 + R_2$ .

Joonisel 9 määratud tingimuse ning valemi 6 kombineerimisel saame

$$i_{min} = \arctan \left( \frac{P(v_{r1} + v_{r2})}{2\pi(R_1 + R_2)} \right), \quad (11)$$

kus  $R_1$  ja  $R_2$  on tähtede raadiused. Võttes aluseks Carroll'i ja Ostley (2007) spektraalatlase, on BD+48 1098 mõlemad komponendid umbes 6 Päikese raadiusega. Sel juhul on  $i_{min} = 72^\circ$ . Valemite 6 ja 7 põhjal võib seega arvutada komponentidevahelise kauguse ning summaarse massi mõlema piirnurga jaoks.

Tabel 4: BD+48 1098 spektroskoopiliste mõõtmiste tulemused.

Period (d)	1,91055 (25)	
$m_1/m_2$	1,05 (10)	
Spektriklass	B0 V – B1 V	
	$i = 72^\circ$	$i = 90^\circ$
$M = m_1 + m_2 (M_\odot)$	23,5	27,4
$a = a_1 + a_2$ (aü)	0,84	0,88

## 5 Kokkuvõte

Käesolevas töös uuriti spektroskoopiliselt varjutusmuutlikku kaksiktähte BD+48 1098. Tulemuste põhjal määrati komponentide orbitaalkiirused, masside suhe ning hinnanguline spektriklass.

Töö alguses esitatud uurimisküsimused said vastatud: ilmnes, et Cooki (2008) mõõdetud 22-päevane periood on ekslik ning Hoffmani (2008) mõõdetud 1,91-päevane periood korrektne. Mõlema nimetatud hinnang BD+48 1098 kuulumisele  *$\beta$ -Lyrae*-tüüpi lähiskaksikute alla aga kinnitust ei leidnud. Spektraalse klassifikatsiooni järgi on tegemist peajada tähtedega ning ei spektraal- ega fotomeetrilistes andmete põhjal ei paista toimuvat aine ülevoolu komponentide vahel; BD+48 1098 muutlikkus sarnaneb pigem Algoli-tüüpi tähele. Küll aga ümbritseb süsteemi laiendatud gaasiümbris, mis tõenäoliselt tähetuule mõjul paisub. Süsteemi füüsikalised parameetrid said määratud orbiidi kaldenurga täpsusega, mille alampiiriks määrati  $72^\circ$ . Radiaalkiiruste põhjal on komponentide massisuhe 1,05 (10) ning orbiidi kaldenurga alampiiri arvestades süsteemi kogumass 24-27  $M_\odot$ . Mõlemad tähed on

Tulevikus oleks kindlasti vaja lisada analüüsi ka fotomeetrilised andmed, mis võimaldaksid koos spektroskoopiliselt kogutuga täieliku orbitaallahendi määramist. Ühtlasi saaks empiirilisel määratud tähtede mõõtmete põhjal täpse spektriklassi suurema kindlusega määrata.

Töö autor soovib tänada juhendajaid Indrek Kolkat ja Tõnis Eenmäed, kellela töö kahtlemata valminud poleks ning kes on autorile igas olukorras abiks olnud, sõltumata kellaajast ja muudest segavatest faktoritest. Lisaks on autor tänuvõlglane kõigi tabelis 1 nimetatud vaatlejate ees. Eraldi tänusõnad on ära teeninud kaastudengid Robert Matjus ja Rene Voog, kes on kogunud märkimisväärse osa siin töös kasutatud andmetest.

## 6 Summary

### Determining the physical parameters of eclipsing binary BD+48 1098

Üllar Kivila

BD+48 1098 is an eclipsing spectroscopic binary that has been studied only briefly by photometric observations. There have been two catalogue studies in which the star's orbital period has been determined (Cook, 2008; Hoffman et al., 2008) with results disagreeing by an order of magnitude: 21,65 and 1,91 days respectively. Also, in both cases, the star was preliminarily classified as a  $\beta$  Lyrae candidate. In this thesis, BD+48 1098 will be studied by both photometric and spectroscopic means using the facilities of Tartu Observatory. The orbital period determined by Hoffman et al. (2008) is verified to be correct, however no evidence is found to support the classification of BD+48 1098 as a  $\beta$  Lyrae binary. The nature of variability is found to be more similar to Algol variables. An expanding gas envelope is found that is probably caused by the stellar wind of the hot B0 stars. Physical parameters of the system are determined to the accuracy of orbital inclination, to which a lower estimate of  $72^\circ$  is determined.



## Kirjandus

- H. A. Abt. Normal and Abnormal Binary Frequencies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 21(1):343–372, 1983.
- B. W. Carroll and D. A. Ostley. *An Introduction to Modern Astrophysics, II väljanne*, Lisa G. Pearson Education, inc, 2007.
- S. P. Cook. Reports on New Discoveries. *Information Bulletin on Variable Stars*, 5900, 2008. URL <http://www.konkoly.hu/cgi-bin/IBVS?5900>.
- L. Gou, J. E. McClintock, M. J. Reid, J. A. Orosz, J. F. Steiner, R. Narayan, J. Xiang, R. A. Remillard, K. A. Arnaud, and S. W. Davis. The Extreme Spin of the Black Hole in Cygnus X-1. *The Astrophysical Journal*, 742(2):85, 2011.
- D. I. Hoffman, T. E. Harrison, J. L. Coughlin, B. J. McNamara, J. A. Holtzman, G. E. Taylor, and W. T. Vestrand. New  $\beta$  Lyrae and Algol Candidates from the Northern Sky Variability Survey. *The Astronomical Journal*, 136(3):1067, 2008.
- Y. Kondo, G. E. McCluskey Jr., and E. F. Guinan. Problems in modeling evolutionary processes in close binaries. *New Astronomy Reviews*, 46(1):1 – 12, 2002.
- P. Massey, F. Valdes, and J. Barnes. *A User's Guide to Reducing Slit Spectra with IRAF*. National Optical Astronomy Observatories, 1992.
- B. C. Reed. Catalog of Galactic OB Stars. *The Astronomical Journal*, 125(5): 2531, 2003.
- T. Tuvikene. *CCD photometry of variable stellar sources: Data reduction workflow, assessment of accuracy, case studies*. PhD thesis, Vrije Universiteit Brussel, 2012.
- U. Munari, R. Sordo, F. Castelli, and T. Zwitter. An extensive library of 2500–10 500 Å synthetic spectra. *Astronomy and Astrophysics*, 442(3):1127–1134, 2005.

M. Zhao, D. Gies, J. D. Monnier, N. Thureau, E. Pedretti, F. Baron, A. Merand, T. ten Brummelaar, H. McAlister, S. T. Ridgway, N. Turner, J. Šturmann, L. Šturmann, C. Farrington, and P. J. Goldfinger. First Resolved Images of the Eclipsing and Interacting Binary  $\beta$  Lyrae. *The Astrophysical Journal Letters*, 684(2):L95, 2008.

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Üllar Kivila,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose "Varjutusmuutliku kaksiktähe BD+48 1098 füüsikaliste parameetrite määramine", mille juhendajad on PhD Indrek Kolka ja MSc Tõnis Eenmäe,
  - 1.1 reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
  - 1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, **27.05.2014**