

TARTU ÜLIKOOL  
Loodus- ja täppisteaduste valdkond  
Tartu observatoorium

Anni Kasikov

**UUED TRENDID KOLLASE HÜPERHIIDTÄHE V509  
*Cassiopeiae* MUUTLIKKUSES**

Magistritöö (30 EAP)

Füüsika

Juhendaja:  
Indrek Kolka, PhD

Tartu 2021

## **Uued trendid kollase hüperhiidtähe V509 Cassiopeiae muutlikkuses**

Magistritöös leitakse V509 Cas efektiivse temperatuuri väärtused aastatel 2015 - 2020. Võrreldes neid 2000. aastate algusperioodiga selgus, et heleduste võnkumiste amplituud on kolmandiku võrra vähenenud ja täht on stabiliseerumas. AAVSO heledusmõõtmiste V-heledust ja B-V värvust aastatel 2017 - 2021 võrreldakse Hipparcose 1990. a. algul kogutud andmetega. Heleduse muutlikkus on jäänud sarnaseks. Muutlikkuse perioode kirjeldatakse Lomb-Scargle'i meetodil. Emissioonikomponentidega Sc II neeldumisjoone muutlikkuse seostamine pulsatsioonidega kinnitab tähte ümbritseva ketta või rõnga olemasolu. Tähe pulsatsiooniolekuid kirjeldatakse V-filtri heleduste, pinnatemperatuuri ja radiaalkiiruste põhjal.

Märksõnad: tähed: ülihiid, atmosfäär, evolutsioon, pulsatsioonid

CERCS: P520 — Astronoomia, kosmoseuuringud, kosmosekeemia

## **New trends in the variability of the yellow hypergiant V509 Cassiopeiae**

Effective temperature values for V509 Cas were found in the time period between 2015-2020. These values were compared to the temperature values in the beginning of the 2000-s. The amplitude of short-term temperature fluctuations has decreased by 1/3. We used V-filter and B-V colour data from AAVSO (2017-2021) and photometric data from Hipparcos (1990-1993). It was found that the magnitude variability has remained similar between these two sources. Periodicity in V-filter brightness and Hipparcos luminosity measurements was described with Lomb-Scargle method. Sc II absorption line with variable emission components was studied. Correlation between emission components and the star's radial velocity, affirms the existence of a gas disk or ring around the star. V509 Cas' pulsation states were described based on V-filter luminosity, temperature and radial velocities.

Keywords: stars: supergiants, atmospheres, evolution, pulsations,

CERCS: P520 — Astronomy, space research, cosmic chemistry

# Sisukord

<b>Sissejuhatus</b>	<b>5</b>
<b>1 Kollased hüperhiidtähed</b>	<b>7</b>
1.1 Asukoht Hertzsprung-Russelli diagrammil . . . . .	8
1.1.1 Mis eristab kollast hüperhiidu kollasest ülihiist? . . . . .	8
1.2 Evolutsioon . . . . .	10
1.2.1 Massikaotus . . . . .	11
1.2.2 Pulsatsioonid . . . . .	11
1.2.3 Kollane evolutsiooniline tühimik . . . . .	12
1.2.4 Kollaste hüperhiidude tulevik . . . . .	15
<b>2 V509 Cassiopeiae</b>	<b>16</b>
2.1 Muutlikkus . . . . .	16
2.1.1 Temperatuurimuutused . . . . .	16
2.1.2 Spektraalne muutlikkus . . . . .	19
2.1.3 Fotomeetriline muutlikkus ja heleduskõver . . . . .	23
<b>3 Andmetöötlus</b>	<b>25</b>
3.1 Teleskoobi parameetrid . . . . .	25
3.2 Info andmete kohta . . . . .	25
3.3 Eeltöötlus . . . . .	26
3.3.1 Eelpingekaadri korrektsioon . . . . .	26
3.3.2 Tasaväljakaadri töötlus . . . . .	27
3.3.3 Apertuuride määramine . . . . .	27
3.4 Järeltöötlus . . . . .	28
3.4.1 Lainepikkuste skaalasse viimine . . . . .	28
3.4.2 Kontinumile viimine . . . . .	30
3.5 Spektrijoonte mõõtmine . . . . .	30

<b>4 Tulemused</b>	<b>33</b>
4.1 Uuritavate joonte muutlikkus . . . . .	33
4.2 Efektiivne temperatuur . . . . .	33
4.3 Heleduse muutlikkus . . . . .	38
4.3.1 B-V värvuse ja temperatuuri seos . . . . .	39
4.3.2 Pulsatsioonid . . . . .	40
4.3.3 Sc II joone emissioonikomponendid . . . . .	41
4.3.4 Heledusvõnkumise perioodid . . . . .	42
<b>Kokkuvõte</b>	<b>46</b>
<b>Tänuavaldused</b>	<b>48</b>
<b>Kirjandus</b>	<b>49</b>
<b>A Hipparcose andmed</b>	<b>53</b>
<b>B AAVSO andmed</b>	<b>54</b>
<b>C Andmetabel 1</b>	<b>55</b>
<b>D Andmetabel 2</b>	<b>59</b>
<b>Lihtlitsents</b>	<b>62</b>

# Sissejuhatus

Massiivsed tähed on silmapaistvad ja eksootilised taevakehad ja nad on kriitiliselt tähtsad oma kodugalaktika evolutsiooni suunamisel (Carroll ja Ostlie, 2014). Ühed tähelepanuväärsed massiivsed tähed on kollased hüperhiidtähed, millele on omased suur muutlikkus nii heleduses kui ka temperatuuris ja plahvatuslikud aine väljapurske episoodid. Nendes tähtedes on suuri muutusi võimalik täheldada juba inimese eluea jooksul. Kollased hüperhiidid asuvad oma evolutsioonil piirkonnas Hertzsprung-Russelli diagrammil, mida nimetatakse kollaseks evolutsiooniliseks tühimikuks. Selle piirkonna tähed on väga dünaamiliselt ebastabiilsed - see väljendub nende pulsatsioonides ja tugevates tähetuultes. Kollasele tühimikule lähenevate tähtede uurimine võimaldab mõista massiivsete tähtede ebastabiilsust, nende atmosfääride hüdrodünaamikat ja vastata küsimusele, kas need tähed saavad tühimikku läbida (Israelian *et al.*, 1999).

Käesolevas töös uuritakse ühe kollase hüperhiidtähe V509 *Cassiopeiae* teekonda kollasesse tühimikku. 1970. ja 80. aastatel on vaadeldud tema efektiivse temperatuuri suuri kõikumisi, mis kaasnesid suurte massikaotuse episoodidega (de Jager *et al.*, 2001b). 1985. aastast alates on tähe temperatuur tasapisi tõusnud ja 21. saj algul jäi see püsima 7500 - 8000 K juurde. (Nieuwenhuijzen *et al.*, 2012). Tartu observatooriumis 1,5 m teleskoobiga kogutud spektrite põhjal uuritakse, kuidas temperatuurimuutused on jätkunud. Esimene samm selle suunas astuti kaks aastat tagasi bakalaureusetöös (Kasikov, 2019), kus Fe II ja Ca I neeldumisjoonte sügavuste põhjal kontinuumi suhtes määrati efektiivse temperatuuri väärtused 2017. aasta septembrist 2018. aasta augustini. Käesoleva töö käigus jätkatakse varasemat temperatuuriuuringut ja samal meetodil leitakse temperatuur aastatel 2015 - 2020.

Uurimuse eesmärgiks on võrrelda V509 *Cas* spektraal- ja heledusmuutlikkust aastail 2015 - 2020 varasemate ajaperioodide muutlikkusega. Lähtudes varem avaldatud tulemustest on töö hüpoteesiks temperatuuri- ja heledusvõnkumiste amplituudi kahanemine käsitletaval ajavahemikul.

V509 *Cas* heleduse muutlikkust on kirjeldanud Nieuwenhuijzen ja de Jager (2000) Hipparcose satelliidi kogutud andmete põhjal ja Percy ja Zsoldos (1992) AAVSO (*The American Association of Variable Star Observers*) andmete põhjal. Selles töös uuritakse värsketele AAVSO

andmetele toetudes, kuidas on muutunud heleduse võnkumise amplituud, kas ja milline on seos efektiivse temperatuuri ja tähe V-filtri heleduse või B-V värvuse vahel ning Lomb-Scargle'i periodogrammide põhjal kirjeldatakse tähe heleduse võnkeperioode. Samuti kombineeritakse AAVSO fotomeetirilisi andmeid ja Tartu observatooriumi spektrite põhjal leitud radiaalkiirusi, et kujutada tähe fotosfääris toimuvate pulsatsioonide mõju efektiivsele temperatuurile ja tähe heledusele.

V509 *Cas* neeldumisjoonte tiibades on märgatud muutliku tugevusega kiirguskomponente (Smoliński *et al.*, 1989). Töös uuritakse ka ühte Sc II neeldumisjoont, millel on kiirguskomponendid mõlemas tiivas. Leitakse komponentide tugevuste suhe ja keskmine tugevus ning uuritakse seost radiaalkiirusega.

Töö esimeses peatükis antakse ülevaade kollaste hüperhiidude olemusest ja evolutsioonist. Teine peatükk keskendub V509 *Cas*-le ja annab ülevaate tema muutlikkuse varasematest uuringutest. Kolmas peatükk kirjeldab Tartu observatooriumis kogutud spektritele rakendatud andmetöötlust ning neljandas peatükis esitatakse töö tulemused.

# Peatükk 1

## Kollased hüperhiidtähed

Massiivsed tähed on meie galaktikas väga haruldased. Laias laastus iga saja tuhande päikesesarnase tähe kohta Linnutees eksisteerib üks  $20M_{\odot}$  täht ja iga miljoni päikesesarnase tähe kohta on üks  $100M_{\odot}$  täht (Massey, 2003). Sellegipoolest mängivad massiivsed tähed väga olulist rolli tähtedevahelise keskkonna dünaamikas ja keemilises evolutsioonis. Massiivsete tähtede sünni pörsib täheteket lähiümbruses ja nende kiiratud ultraviolettkiirgus ioniseerib piirkonna gaasipilvi. Ulatuslike tähetuulte kineetiline energia on tähtis tähtedevahelise keskkonna kinemaatika kujundaja. Tähetuuled sisaldavad rikkalikult metalle, mis suurendavad keskkonna metallisisaldust ja võimaldavad sündida uutel metallirikastel tähtedel (Carroll ja Ostlie, 2014). Kollased hüperhiid kuuluvad massiivsete tähtede hulka - algmass peajadal on vahemikus  $20-40 M_{\odot}$ . Kui massiivne täht liigub peajadalt välja - tuumas lõppeb vesiniku põlemine - paisub ta ülihiuks. Selles etapis annab neile suure heleduse tuumas põlev heelium. Edasine tähe evolutsioon toimub kiiresti (kõigest miljonite aastatega) ja osad muutused tähes on näha juba inimese eluea jooksul. Hüperhiide jälgitakse pikaajaliselt, aastakümnete jooksul, et katsetada massiivsete tähtede evolutsioonimudeleid ja uurida tähtede evolutsiooni käigus väljaheidatava aine mõju galaktika keemilisele koostisele. Massiivsete tähtede evolutsiooni lõppjärgude mõistmine on ka oluline selleks, et selgitada supernoovade eellugu (Klochkova, 2019).

Termini „kollased hüperhiid“ võttis kasutusele C. de Jager aastal 1980, et asendada ebamugavam termin „üli-ülihiid“ (ingl. k. *supersupergiants*) (de Jager, 1998). Neid tähti kutsutakse mõnikord ka jahedateks hüperhiidudeks (ingl. k. *cool hypergiants*) (Klochkova, 2019). Kollaseid hüperhiide saab omakorda jagada kaheks: jahedad ja kuumad. Neid eristab üksteisest tähe spektriklass: kuumad kollased hüperhiid kuuluvad massikaotuste vahelisel ajal A spektriklassi, jahedad kuuluvad F spektriklassi (Aret *et al.*, 2017a).

## 1.1 Asukoht Hertzsprung-Russelli diagrammil

Hertzsprung-Russelli diagrammi (edaspidi ka H-R diagramm) (vt joonis 1.1) ülemises osas asuvad massiivsed tähed, mis on oma evolutsiooni hilises etapis: heledad sinised muutlikud tähed (LBV (ingl. k. *luminous blue variables*), Wolf-Rayet tähed, B[e] ülihiid, kollased hüperhiid ja teisedki ebastabiilsed suure heledusega tähed (Klochkova, 2019).

Massiivsed ja suure heledusega tähed asuvad Humphreys-Davidsoni heleduspiiri (ka H-D heleduspiir) lähedal, mis on tähtede bolomeetriliste heleduste maksimum - sellest heledamaid tähti meie galaktikas (ja ka lähemalt uuritud naabergalaktikates) ei eksisteeri. Selle ülemise piiri asukoha määrasid empiiriliselt Humphreys ja Davidson 1979. aastal. H-D heleduspiir on funktsioon tähe spektriklassist, kusjuures siniste ülihiidude heleduse maksimum on suurem ja punaste ülihiidude oma on väiksem (Piters *et al.*, 1988). Massiivsete tähtede evolutsioonirajad näitavad, et kõige massiivsemad ( $M > 40M_{\odot}$ ) tähed ei evolutsioneeru kunagi punase ülihiu staadiumisse H-R diagrammil. Tähtedele, mille algmass on väiksem kui  $40M_{\odot}$  on olemas täielikud punasesuunalised evolutsioonirajad ja selliste tähtede jaoks H-D heleduspiir on konstantne suurus (Carroll ja Ostlie, 2014).

H-R diagrammil on kollaste hüperhiidude heledused vahemikus  $\log\left(\frac{L}{L_{\odot}}\right) = 5 - 6$ , mis vastab Morgan-Keenani heleduste klassifikatsioonis klassile  $Ia^{+}$  (Nieuwenhuijzen *et al.*, 2012).

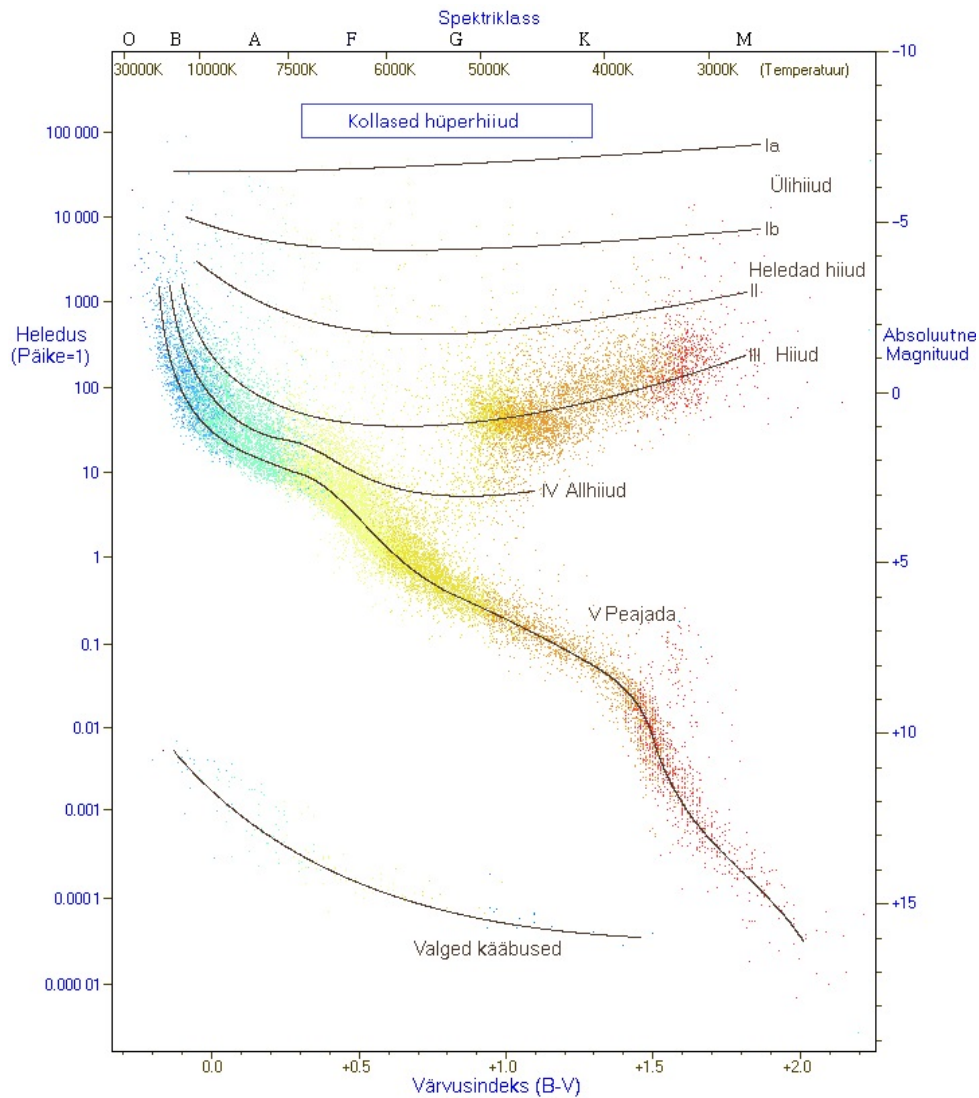
Kollastele hüperhiidudele on omane sisemine dünaamiline ebastabiilsus (de Jager *et al.*, 2001b), mis väljendub pulsatsioonides ja tähetuultes, millega kaasneb suur massikaotus. Samuti toimuvad korduvalt suure massihulga väljapursked, millega kaasneb ajutine tähe heleduse vähenemine ja muutus tähe spektriklassis (Klochkova, 2019). Kõigile meie galaktika kollastele hüperhiidudele on omane spektroskoopiline ja fotomeetiline muutlikkus, suur massikaotus ja mitmeid hüperhiide ümbritseb väljapaisatud ainest tekkinud tolmutpilv (Gordon ja Humphreys, 2019). Tähtede heledus muutub väikese amplituudiga umbes  $0.^m2 - 0.^m5$  ja spektrijoonte profiilid muutuvad, sest need tekivad tähe atmosfääris erinevatel sügavustel (Klochkova, 2019). Tähe ümbrise optilise paksuse varieerumine väljendub H-R diagrammil tähe asukoha sik-saki kujulises muutuses, mida on vaadeldud V509 *Cas* puhul näiteks artiklis Nieuwenhuijzen *et al.* (2012). Sellest pikemalt peatükis 2.

### 1.1.1 Mis eristab kollast hüperhiidu kollasest ülihiust?

Mõnikord nimetatakse lihtsalt väga suure heledusega tähti hüperhiidudeks, kuid on võimalik, et mõni  $Ia$  klassi ülihiid on heledam kui sarnases spektriklassis olev  $Ia^{+}$  tüüpi hüperhiid. Nende üksteisest eristamiseks on mitmeid olulisi tunnuseid.

Kui hüperhiid ja ülihiid on sarnase heleduse ja spektriklassiga, siis neid eristatakse üksteisest





Joonis 1.1: Hertzsprung-Russelli diagramm kirjeldab tähtede heleduse ja temperatuuri vahelist sõltuvust. Umbes 90% kõigist tähtedest paiknevad diagrammil kitsas piirkonnas - peajadas. Peajada tähtede heledused on vahemikus  $10^{-4}L_{\odot}$  kuni  $10^4L_{\odot}$  ja temperatuurid 3000 K - 30 000 K. Peajada heledas ja kõrgetemperatuurilises osas paiknevad sinised hiid, nendest veel heledamad on sinised ülihiid. Diagrammi paremal üleval - madalatemperatuurilises, kuid suure heledusega piirkonnas - paiknevad punased hiid ja ülihiid, selliseid tähti on umbes 1% (Tenjes, 2020). Diagrammile on märgitud ka kollaste hüperhiidude ligikaudne asukoht.

tähtede spektrite põhjal - hüperhiidudele on omased suureskaalalised liikumised fotosfääris ja nende spektris olevad neeldumisjooned on oluliselt laiemad kui ülihiidudel. Samuti on hüperhiidude  $H\alpha$  spektrijoonel üks või mitu laia emissioonikomponent, mis viitavad tähe laiaulatuslikule atmosfäärile ja suhteliselt suurele massikaotuse kiirusele. Seega nimetus „hüperhiid“ ei kirjelda mitte lihtsalt väga heledat tähte, vaid põhineb tähe spektril (de Jager, 1998).

Lisaks on kollaste hüperhiidude spektrites oluliseks erisuseks aatomite ja ionide keelatud emissioonijooned, mis tekivad tähe atmosfääri hõredates välistes kihtides ja tähte ümbritsevas keskkonnas (Klochkova, 2019).

## 1.2 Evolutsioon

Alates 1980. aastatest on erinevad uuringud ja modelleerimised üritanud selgitada H-D heleduspiiri lähedasi tähepopulatsioone ja nendele omaseid ebastabiilsusi. Samuti on palju uuritud tähti ümbritsevat keskkonda, milles püsivad jäljed tähe elust nii peajadal kui ka sealt lahkudes (Gordon ja Humphreys, 2019). Kollaste hüperhiidude evolutsiooniteekonna kohta H-R diagrammil on pakutud mitmeid erinevaid variante. Selliste tähtede evolutsioonijärku määramine on keeruline, sest nad on nii erilised oma spektroskoopiliste ja fotomeetriliste omaduste poolest (Israeli *et al.*, 1999). Massiivsete tähtede - mille mass peajadal on vahemikus  $10M_{\odot} \leq M_{ZAMS} \leq 60M_{\odot}$  - evolutsiooni uurimine vajab detailset pilti pulsatsioonidest atmosfääris ja massikaotuse mehhanismidest (Israeli *et al.*, 1999). Iga tähe jaoks on vajalikud pikaajalised uuringud, enne kui mingigi täpsusega tähe evolutsioonietappi on võimalik määrata (Klochkova, 2019). Suurema tähelepanu all on olnud kaks evolutsiooniteekonna varianti: nad võivad areneda kollasest hüperhiidust punase ülihiid piirkonda või hoopis läbida H-R diagrammil silmusekujulise teekonna ning liikuda tagasi kuumemate temperatuuride suunas (Gordon ja Humphreys, 2019).

Kolme tähe uuringute (V509 Cas,  $\rho$  Cas ja IRC+10420) põhjal selgus, et kollased hüperhiid asetuvad sinise-suunalisse evolutsioonifaasi, olles juba läbinud punase ülihiid staadiumi ja kaotanud selle jooksul olulise osa oma massist. Punase ülihiiduna olev aeg on suhteliselt lühike, aga sõltub tugevalt tähe massikaotuse kiirusest. Tuumas heeliumi põletamise aeg on umbes 0,6 kuni 1 miljon aastat. Aeg, mil täht on punases murdepunktis, on suurusjärgus mõnisada tuhat aastat ja aeg, mil täht on H-R diagrammil teel sinisema poole, on umbes 10 korda lühem (de Jager, 1998). 1998. aastal oli meie galaktikas teadaolevalt vähem kui tosin kollast hüperhiidu. De Jager (1998) põhjendas seda sellega, et massiivse tähe evolutsioonietapp kollase hüperhiiduna on väga lühike, vähem kui  $10^5$  a.

### 1.2.1 Massikaotus

Varajases kollase hüperhiu etapis kaotavad tähed massi rahuliku väljavooluna tähetuule tõttu. Kui tuule kiirus muutub kriitiliseks - ja tähe fotosfääris efektiivse raskuskiirenduse väärtus läheneb nullile - jõuavad tähed väljapurske staadiumisse, mil tähe pinnakihtidest ainet väljutatakse (Klochkova, 2019).

Efektiivne raskuskiirendus, mille peab kollase hüperhiu fotosfääris tasakaalustama gaasirõhu gradient, on erinevate protsesside panuste summa. Gravitatsioonijõule vastanduvad kiirgusrõhk ja turbulentsiliikumiste rõhk, kui vaatlusaluses gaasikihis eksisteerib ka tähetuul, tuleb arvestada sellegi dünaamilist rõhku. Nii on põhimõtteliselt võimalik, et ajutiselt ja lokaalselt muutub efektiivse raskuskiirenduse väärtus isegi negatiivseks (de Jager, 1998).

Kui aine väljapursked on piisavalt suured ja toimuvad tihti, siis hüperhiid liigub oma evolutsioonil H-R diagrammil kõrgemate temperatuuridega osa suunas. Tähe efektiivne temperatuur tõuseb peale iga aine väljapursket (Stothers, 2012). Purske ajal vaadeldakse temperatuuri langust, sest massikaotuse tagajärjel tekib tähe ümber ajutine jahedam pseudo-fotosfäär. Kui pseudo-fotosfäär aegamisi laiali hajub, mõõdetud efektiivne temperatuur taas suureneb kuni saavutab tähe evolutsioonietapile vastava väärtuse. Temperatuur püsib kuni atmosfääris tekib uus ebastabiilsus, mis võib põhjustada järgmise massikaotuse. Selline protsess jätkub kuni tähe atmosfääris saabub stabiilsus, ehk efektiivne raskuskiirendus saavutab positiivse väärtuse (Nieuwenhuijzen *et al.*, 2012).

Kollastele hüperhiidudele on iseloomulik suur massikaotus, suurem kui  $10^{-7} M_{\odot} a^{-1}$  on tavaline (Oudmaijer *et al.*, 1996). Aga näiteks  $\rho$  Cas puhul võib massikaotuse ajal väljapaisatud ainehulk olla kuni  $5 \cdot 10^{-2} M_{\odot} a^{-1}$  (Lobel *et al.*, 2005). On võimalik, et tähe sisemine evolutsioon toimub tavapäraselt ja massikaotused ning temperatuurimuutused mõjutavad ainult tähe atmosfääri ja pursete käigus aeg-ajalt selle asemele tekkivat pseudo-fotosfääri (Nieuwenhuijzen *et al.*, 2012).

### 1.2.2 Pulsatsioonid

Väga väikese või koguni negatiivse efektiivse raskuskiirendusega gaasikiht on vastuvõtlik võimalike pulsatsioonide mõjule. Fadeyev (2011) osutas, et He osalise ioniseerituse tsoonid tähe väliskestas võivad olla vastutavad kollaste hüperhiidude pulsatsioonide eest. Eespool nimetatud vaatluslikud ebastabiilsuse ilmingud viitavadki pulseerimise erinevate moodide ja sageduste toimele.

Van Genderen *et al.* (2019) uurisid 4 meie galaktika kollase hüperhiu (sealhulgas ka V509 Cas) fotomeetrilisi mõõtmisi ja leidsid, et neile on iseloomulikud järjepidevad pulsatsioonid, kuid iga pulsatsioon on unikaalne. Tähe pulsatsioonid on tsüklilised ja toimuvad vahetpidamata, seega

peavad ebastabiilsuse piirkonnad asuma üle kogu tähe pinna - muidu jääks pulsatsioonitsüklisse tühik. Kui tähes toimuvad pulsatsioonid on mitteradiaalsed, siis võngub täht enam-vähem kooskõlalisel igast küljest. Väiksemad muhud ja lohud heleduskõveral võivad olla sellest põhjustatud.

Iga mõnekümne aasta tagant toob pulsatsioon tähe atmosfääris kaasa purske-episoodi, mis kestab 1-2 aastat ja mille alguses tähe efektiivne temperatuur tõuseb (see ei ole evolutsiooniline temperatuurimuutus). Lobel (2001) näitas, et temperatuuril 7000 kuni 9000 K massiivsed tähed muutuvad dünaamiliselt ebastabiilseks, sest vesiniku ionisatsiooni tõttu esimene adiabaatiline indeks  $\langle \Gamma_1 \rangle$  kahaneb suures osas tähe atmosfääris. Esimene adiabaatiline indeks on defineeritud:

$$\Gamma_1 \equiv \left( \frac{d \ln P_t}{d \ln \rho} \right)_{ad} \quad (1.1)$$

ja see on seotud gaasi adiabaatilise kokkusurutavusega - mida suurem on adiabaatilise indeksi väärtus, seda raskem on gaasi kokku suruda. Üheaatomilise gaasi jaoks on  $\Gamma_1$  väärtus  $5/3$ , kuid ionisatsiooni ja kiirguse mõjul võib see langeda alla  $4/3$ , mis tähendab seda, et täheatmosfääri stabiilsuse kriteerium on rikutud. Pulseerimise paisumisfaasis gaas hõreneb ja kõrge temperatuuri juures ( $\sim 8000\text{K}$ ) võib suur osa vesinikust samaaegselt rekombineeruda. Vabaneb tohtu hulk energiat, mis lööb laiali atmosfääri ülemised kihid. Tulemusena kogu tähe atmosfäär paisub ja toimub aine väljapurse, mis toob endaga kaasa tähe jahtumise. Järgnevalt saabub tähe temperatuuri miinimum ( $T \sim 4300\text{K}$ ) (van Genderen *et al.*, 2019). Pulsatsiooni põhjustatud purske käigus välja voolav aine on optiliselt paks, moodustatud pseudo-fotosfäär sarnaneb F spektriklassist jahedama tähega. (Koumpia *et al.*, 2020).

Võib arvata, et suured muutused temperatuuris ( $\Delta T_{eff} \sim 3000 - 4000\text{K}$ ), mis vahel harva tekivad, ei ole põhjustatud ainult pulsatsioonidest vaid peegeldavad tähe keerulisi evolutsioonilisi muutusi, mille käigus muutub tähe sisemus (Israeli *et al.*, 1999).

### 1.2.3 Kollane evolutsiooniline tühik

H-R diagrammi piirkond, kus  $\log(L/L_\odot) > 5,4$  ja efektiivsed temperatuurid on vahemikus 8500 - 12 000 K ( $3,9 < \log T_{eff} < 4$ ) on praktiliselt tähtedest tühi (vt. joonis 1.2) (Stothers, 2012). Selline ala H-R diagrammil nimetati kollaseks evolutsiooniliseks tühikuks (ingl. k. *Yellow Evolutionary Void*). Kollane evolutsiooniline tühik eksisteerib tähtede jaoks, mis evolutsioneeruvad H-R diagrammil kõrgema temperatuuriga osa suunas (de Jager, 1998).

Selles piirkonnas asuvatel tähtedel on neli olulist omadust:

- atmosfääris negatiivne tiheduse gradient (vt valem 1.2);

- kõigi kiirenduste summa, kaasaarvatud tuule, turbulentsi ja pulsatsioonide, on väiksem või võrdne nulliga.
- tähetuulted, mis saavutavad fotosfääris helikiiruse, ehk tähe fotosfääri gaas visatakse tähest välja ülehelikiirusega, mis suureneb väljapoole suunas.
- $\Gamma_1 \leq 4/3$ , mis viitab dünaamilisele ebastabiilsusele fotosfääri osades (vt valem 1.1).

(Nieuwenhuijzen ja de Jager, 2000)

Negatiivne tiheduse gradient esineb enamasti vesiniku konveksioonipiirkondades. Seal kahanevad sügavuse suurenemisel nii tihedus kui ka gaasirõhk, sest lokaalselt  $g_{eff} < 0$ . Väljaspool konveksioonitsooni võib sarnane olukord tekkida, kui keskmine fotosfääri  $g_{eff}$  väärtus on väga väike. Tiheduse gradienti selgitab kvalitatiivselt valem:

$$d \ln \rho / dz = d \ln \mu / dz + d \ln P / dz - d \ln T / dz, \quad (1.2)$$

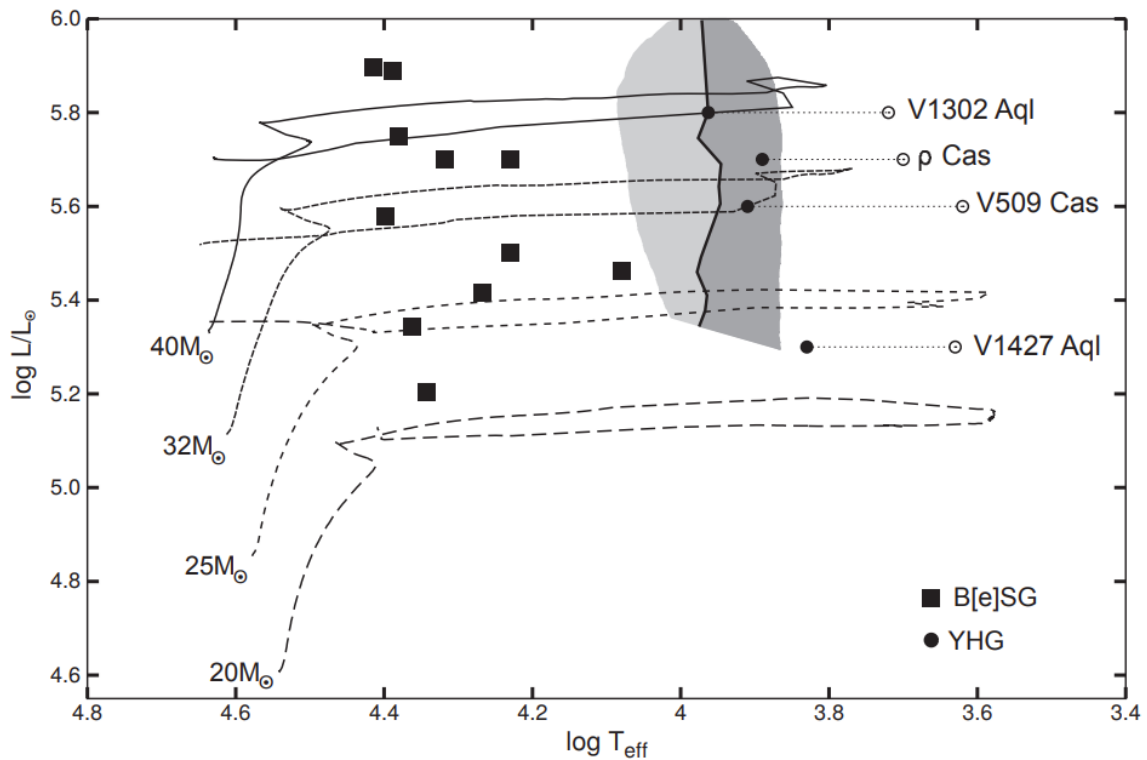
kus  $z$  on sügavus,  $\rho$  ja  $\mu$  on tihedus ja molekulkaal,  $T$  ja  $P$  on temperatuur ja rõhk. Sügavusega suurenevad ionisatsioon ja temperatuur ning esimene liige on negatiivne vahemikus  $7000 \text{ K} < T < 13000 \text{ K}$ . Kolmas liige on samuti negatiivne. Jahedates fotosfäärides ja hüdrosstaatilise tasakaalu korral on keskmine liige positiivne, kuid väike:

$$d \ln P / dz = \mu g_{eff} / \mathcal{R} T \quad (1.3)$$

Kuna kollaste hüperhiidude raadiused on väga suured ja seega keskmine efektiivne raskuskiirendus  $g_{eff}$  on väga väike, võib võrrand 1.2 olla kokkuvõttes negatiivne. (de Jager, 1998)

Kollase evolutsioonilise tühimiku saab jagada kaheks osaks:  $\log T_{eff} \approx 3,8 - 3,95$ , kus atmosfäär on vähestabiilne vesiniku ionisatsiooni tõttu ja  $\log T_{eff} \approx 4,05 - 4,1$ , kus määrab atmosfääri ebastabiilsust heeliumi ionisatsioon (vt. joonis 1.2). Mõlemad piirkonnad asuvad üldises kollase tühimiku alas (Nieuwenhuijzen *et al.*, 2012).

Kui tähe efektiivne temperatuur massikaotuste käigus muutub (u 5000 - 7500 K vahemikus), siis ta joonistab H-R diagrammil sik-saki kujulise teekonna, mida võib kirjeldada kui tähe „põrkamist“ vastu kollase tühimiku madalatemperatuurilist äärt (Nieuwenhuijzen *et al.*, 2012). Ei ole teada, kui suur on massikaotus tähe „põrkamisel“, aga oluline osa sinise suunas liikuvaid tähti on kobaras kollase tühimiku madalatemperatuurilise piiri lähedal, mis viitab ka seletusele, miks need tähed on väga ebastabiilsed (Nieuwenhuijzen ja de Jager, 1995). On hüpotees, et lähenedes kollase tühimiku äärealale, kaotab täht suure hulga massi ja tähe ümber moodustub jahedam ümbris, mida seostatakse tähe efektiivse temperatuuri vähenemisega (Israelian *et al.*,



Joonis 1.2: H-R diagrammi ülemine osa. Ringidega on märgitud kollased hüperhiidtähed (punktiirjoon näitab temperatuuri muutlikkuse ulatust) ja ruutudega B[e] tüüpi sinised ülihiid. Tumedama piirkonnana on märgitud kollane evolutsiooniline tühimik de Jager ja Nieuwenhuijzen (1997) artikli põhjal. Ebastabiilsuse piirkonnad on Nieuwenhuijzen *et al.* (2012) põhjal. Esimene ebastabiilsuse piirkond on tumedam ja selle kõrgetemperatuuriline piir on märgitud pidevjoonega. Samuti on näidatud Ekström *et al.* (2012) evolutsiooniteekonnad erineva algmassiga tähtede kohta (Aret *et al.*, 2017a).

1999). Tähest massi väljaheitmine võib toimuda tavapärase pulsatsioonitsükli osana, aga suured massikaotused toimuvad siis, kui täht „põrkab“ vastu kollast tühimikku (de Jager, 1998).

Kui tähe algmass peajadal on  $25 M_{\odot}$  ja heledus  $\log(L/L_{\odot}) = 5,3$ , siis võib minna sellisel tähel kollase tühimiku läbimiseks aega kõigest veidi rohkem kui 10 000 aastat, selle aja jooksul tähe temperatuur tõuseb umbes 1000 K võrra. Kuna see aeg on väga lühike, siis võib see ka olla ka üheks põhjuseks, miks kollases tühimikus asub nii vähe tähti (Nieuwenhuijzen *et al.*, 2012).

Tähed, mis asuvad kollase tühimiku alas võivad olla ka hoopis H-R diagrammi madalatemperatuurilise osa suunas evolutsioneeruvad tähed (Nieuwenhuijzen ja de Jager, 1995). Need ülihiidtähed on veel suure massiga ja suhteliselt noored, seega neile ei ole kollase tühimiku ala keelatud (Nieuwenhuijzen ja de Jager, 2000). Stothers ja Chin (2001) pakuvad, et kollaste hüperhiidude piirkonnas asuvad mõned harilikud kollased ülihiid on ka tunnustamata hüperhiid või tähed, mis esmakordselt H-R diagrammi läbivad.

#### 1.2.4 Kollaste hüperhiidude tulevik

On teadmata, kas täht läbib tühimikku ühe või mitu korda. Samuti on võimalik, et kollase tühimiku läbimist ei toimugi ja täht plahvatab oma elu lõpul II-tüüpi supernoovana (Israelian *et al.*, 1999).

On võimalik, et kollase hüperhiid staadiumile on järgnev tähe muutumine siniseks ülihiiduks, B[e]-tüüpi ülihiiduks või madalama heledusega LBV täheks (Klochkova, 2019). Stothers ja Chin (2001) selgitavad kollaste hüperhiidude tulevikku nii: massiivsed tähed, mis on oma arengul läbinud punase ülihiid järgu, sooritavad järskude massikaotuse pursete tõttu lühikesi hüppeid H-R diagrammi kõrgematemperatuurilise ala suunas. Oma viimasel liikumisel sinisesse nad läbivad tühimiku ja satuvad selle kuumema poole peale, LBV tähtede sekka (Stothers ja Chin, 2001).

Kollaseid ülihiidtähti ümbritsev keskkond sarnaneb mitmeti ka B[e] tüüpi siniste ülihiidudega. Mõlemat tüüpi tähtedele on iseloomulikud suured massikaotuse perioodid ja välja paisatud materjal koguneb tähe ümber struktuuridesse, mis võivad olla erineva kujuga - mitmes kihis ümber tähe, kahepooluselise udukoguna või kettas (Aret *et al.*, 2017a). Kettaid on leitud kuumemate kollaste hüperhiidude ümber. See võib viidata kollaste hüperhiidude massikaotuse käitumise muutusele kui täht liigub läbi kollase tühimiku (Aret *et al.*, 2017b). Kollaste hüperhiidude massikaotuse peamiseks põhjustajaks peetakse pulsatsioone (de Jager, 1998). Seega peaks tähtede pulsatsioonid muutuma, kui täht läheneb esimese ebastabiilsuse piirkonna sinisele piirile. Tähe teekonna jätkudes läbi tühimiku teise osa on võimalik, et jätkub aine kogunemine tähte ümbritsevasse ekvatoriaalsesse kettasse ja tühimiku läbides võib temast saada B[e] sinine ülihiid (Aret *et al.*, 2017b).

## Peatükk 2

### *V509 Cassiopeiae*

V509 *Cas* on väga huvitav täht spektroskoopiliseks uurimiseks. Ta on hele täht ning põhjapoolkeral on teda võimalik vaadelda aastaringselt, samuti leidub tähe spektris mitmeid iseärasusi. Seetõttu on V509 *Cas* uuritud pikka aega, varaseimad publikatsioonid tähe spektri omaduste kohta pärinevad aastast 1965 (Klochkova *et al.*, 2019).

V509 *Cas* heledus on umbes  $4 \cdot 10^5$  korda suurem Päikese heledusest. Tema väike mass (umbes  $11 M_{\odot}$ ) viitab sellele, et täht on ligi poole oma algmassist oma elu jooksul juba kaotanud ja seega peab olema evolutsiooni lõppjärgus, liikudes H-R diagrammil sinise suunas (de Jager ja Nieuwenhuijzen, 1997).

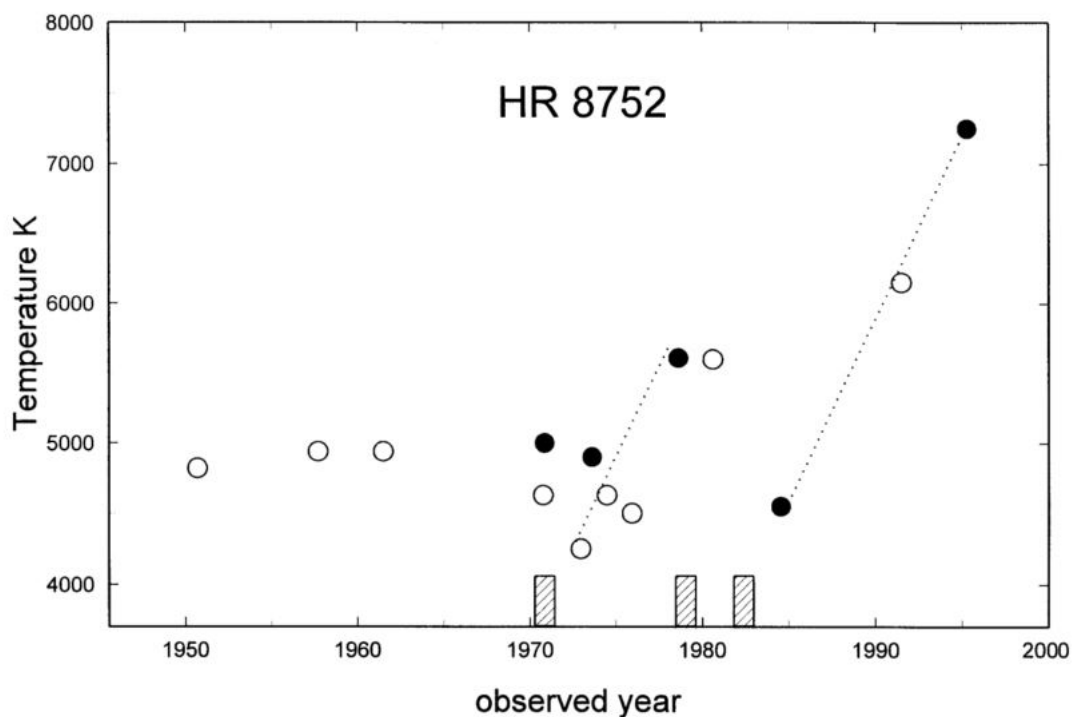
Tähel on ka B1 spektriklassi peajada kaaslastäht (Stickland ja Harmer, 1978).

## 2.1 Muutlikkus

### 2.1.1 Temperatuurimuutused

V509 *Cas* pinnatemperatuur on 20. saj teises pooles mitme tuhande kraadi võrra varieerunud (vt joonis 2.1). Jooniselt on näha kahte suuremat massikaotuse perioodi. Esimene toimus aastal 1970 (de Jager, 1998). Israelian *et al.* (2001) leidsid tähe efektiivse temperatuuri enne massikaotuse toimimist 1969. aasta mõõtmiste põhjal - tasaparalleelse mudeli puhul  $5250 \pm 250$  K ja  $\log g = -0,5 \pm 0,5$ , sfääriliselt sümmeetrilise mudeliga lähendades oli temperatuur  $5630 \pm 200$  K ja  $\log g = -0,7 \pm 0,5$ . Seega esimese massikaotuse käigus võis tähe efektiivne temperatuur joonise 2.1 põhjal langeda ligi 1000 K võrra. Esimese episoodi järel hakkas fotosfääri temperatuur tõusma, kuni tähte tabas uus massikaotus aastatel 1979-1982. Suurem massikaotuse episood võib toimuda mitme aasta jooksul ja sisaldada mitmeid väiksemaid massikaotuse perioode, mis võivad olla seotud pulsatsioonidega tähes. Massikaotuse käigus tähe temperatuur langes,





Joonis 2.1: V509 *Cas* efektiivse temperatuuri väärtused. Mustade täppidega on märgitud temperatuuri väärtused, mis on leitud spektrijoonte ekvivalentlause põhjal. Ringidena on märgitud väärtused, mis on saadud lähtuvalt tähe spektriklassist või vaadeldud B-V heleduste väärtusest, mille jaoks on ülihiidude puhul olemas seos B-V ja efektiivse temperatuuri vahel. Seega on ringiga tähistatud temperatuuri väärtuste määramatus suurem. Suurema massikaotuse perioodid (aastal 1970 ja 1980. aasta paiku) on märgitud viirutatud ristkülikutega horisontaalteljel. Punktiirjooned on joonistatud artikli autorite poolt ja viitavad tähe „põrkamisele“ vastu kollase tühimiku serva, millega seostuvad suuremad massikaotuse episoodid (de Jager ja Nieuwenhuijzen, 1997).

kuid episoodi lõppedes hakkas uuesti kiirelt tõusma. Jooniselt nähtub, et täht „põrkas“ 30 aasta jooksul kaks korda vastu kollase tühimiku ebastabiilsuse piirkonna äärt. 1995. aastal oli tähe efektiivne temperatuur kõrgem kui kunagi varem täheldatud ja oodati peagi algavat suurt massikaotust (de Jager, 1998). Israelian *et al.* (2001) arvutas, et 1998. aastal oli V509 *Cas* temperatuur  $7900 \pm 200$  K ja  $\log g = 1,1 \pm 0,4$ . Selle põhjal hinnati massikaotuse kiirus  $\dot{M}_{max} = 6,7 \cdot 10^{-6} M_{\odot} a^{-1}$ .

Kogu vaatlusperioodi jooksul (vt. joonis 2.2) oli  $\Gamma_1 < 4/3$ , kuid see ei ole tarvilik selleks, et täht oleks stabiilses olekus. Kuid  $g_{eff}$  väärtused fotosfääri välimises osas olid negatiivsed kolmel ajahetkel: aastatel 1969, 1978 ja 1998 (de Jager *et al.*, 2001a). Ka 2-3 aastat pärast massikaotusi, 1973. ja 1984. aastal oli  $g_{eff}$  väga lähedane nullile (väärtused suurusjärgus  $10^{-2}$  kuni  $10^{-6}$ ). See viitab väga ebastabiilsele atmosfääri olukorrale (de Jager, 1998). Võimalik, et ei ole juhus, et massikaotuse episoodid toimusid aastatel 1970 ja 1979-1983. Ei ole selge,

kas negatiivne  $g_{eff}$  väärtus viib massikaotuse toimumiseni. Kuid 1998. aasta tähespektrites ei ole märke peagi algavast massikaotusest. Vahemikus 1984.-1998. a. kahanes ka tähe raadius. Eeldades konstantset bolomeetrilist heledust, vähenes raadius  $900R_{\odot}$  juurest  $335R_{\odot}$ -ni, millest tuleneb keskmine raadiuse vähenemise kiirus  $0,9 \text{ km s}^{-1}$  (de Jager *et al.*, 2001a).

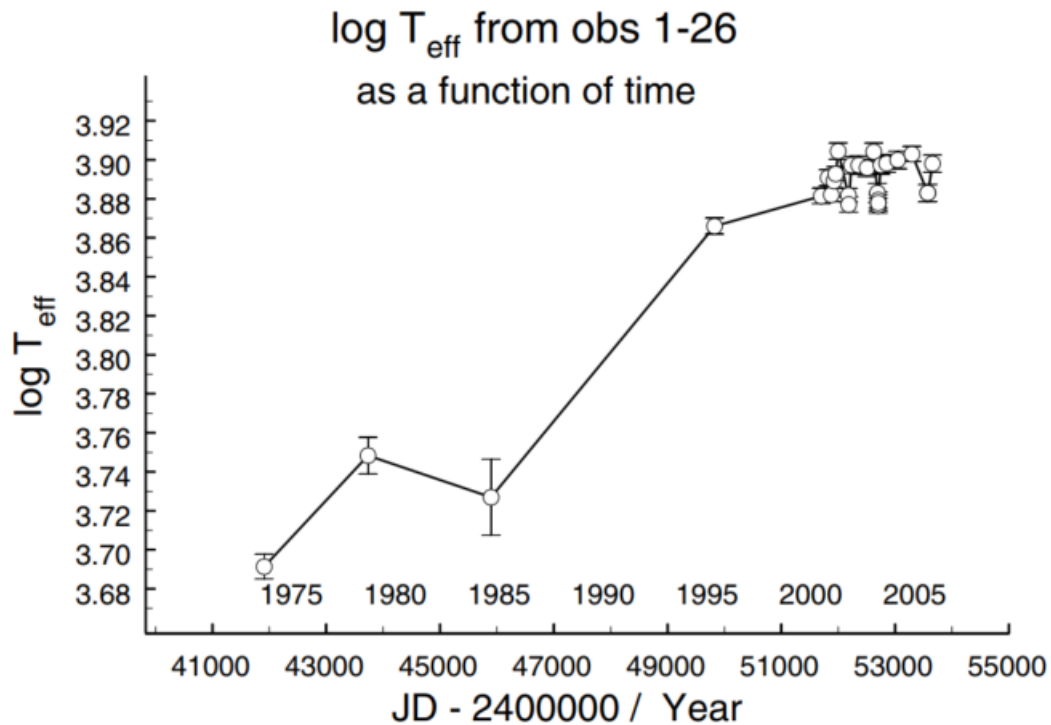
data	$T_{eff}$	$\langle \Gamma_1 \rangle$	$\Delta R/R$	$g_{eff}$ at $\tau_{Ross} =$		
				0.01	0.1	1.5
69/09	5250	1.153	.15	-.25	-.17	1.82
73/08	4930	1.197	.23	.85	.14	1.34
78/08	5540	1.140	.05	-2.63	-2.26	4.21
87/04	4570	1.151	.14	.10	.11	.98
95/04	7170	1.066	.24	.20	.31	5.81
98/08	7895	1.168	.02	-10.4	-7.76	18.46

Joonis 2.2: de Jager *et al.* (2001a) leitud efektiivsed temperatuurid,  $\Gamma_1$  väärtused, mis on saadud integreerides üle tähe raadiuse osa  $\Delta R/R$  ja  $g_{eff}$  väärtused kolmel erineval optilisel sügavusel ( $\tau_{Ross}$ ).

Yamamuro *et al.* (2007) vaatlesid V509 Cas aastatel 2002-2004, kokku 15 kuu jooksul infrapunases piirkonnas. Nad leidsid, et V509 Cas neeldumisspektri tunnused sarnanevad ülihiidudega spektriklasside vahemikus A2 Ia ja F2 I. Tähele vastab temperatuur 8000 K, mis on kooskõlas Israelian *et al.* (1999) leitud temperatuuriväärtusega  $7900 \pm 200$  K 1998. aastal. On ebatõenäoline, et B1 spektriklassi kaaslastäht põhjustab V509 Cas suurt efektiivset temperatuuri, sest tähe spekter on üsna „normaalne“ 8000-Kelvinilise temperatuuriga hüperhiu kohta (Israelian *et al.*, 1999).

Nieuwenhuijzen *et al.* (2012) uurisid V509 Cas temperatuuri aastatel 2000-2005, nende tulemused koos varasemate andmetega on joonisel 2.3. Aja jooksul, mil V509 Cas efektiivset temperatuuri on jälgitud, on temperatuur üljoontes tasapisi tõusnud, kuid samas on toimunud mitmeid lühiajalisi langusi. Temperatuurivaatluste kõrvutamise efektiivse raskuskiirenduse  $g_{eff}$  ja turbulentsse kiirusega  $v_t$  viitab, et tähest on toimunud mitmeid järjestikuseid aine väljapurskeid. Iga purske tulemusena tekkis tähe ümber pseudo-fotosfäär, millel olid väiksemad  $g_{eff}$  ja suuremad  $v_t$  väärtused kui tähe fotosfääris enne purset. Kui välja paisatud aine laiali hajus, tuli nähtavale kuumem ja kompaktsem fotosfääri kiht. Uuritaval perioodil oli temperatuur jäänud püsima u 7900 K juurde.

Van Genderen *et al.* (2019) märkas, et spektroskoopilistest ja fotomeetristest vaatlustest leitud temperatuurid on natuke erinevad. Kõrgete temperatuuride puhul on erinevused suuremad ja madalamate temperatuuride puhul väiksemad (erinevus kuni mõnituhat kelvinit temperatuuri 8000 K puhul ja mõnisada kelvinit 4200 K temperatuuri juures). Spektrite põhjal leitud temperatuur on kõrgem kui fotomeetristelt saadud. Selline erinevus võib



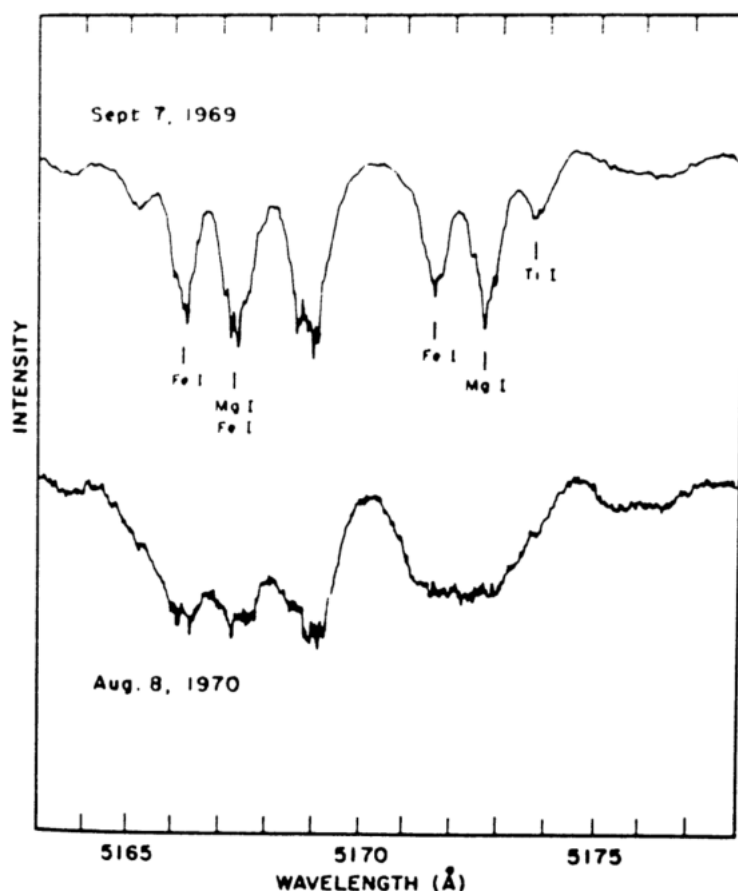
Joonis 2.3: Nieuwenhuijzen *et al.* (2012) leitud efektiivse temperatuuri väärtused aastatel 2000–2005 ja mõned varasemad mõõtmised.

tekkida temperatuuritundlikust kihist tähe atmosfääris, mis põhjustab neeldumist kontiinumil. Spektraalselt leitud temperatuur on vähetundlik sellise neeldumise suhtes, aga fotomeetriat mõjutab see palju - B ja V heledused on ei ole kooskõlas, B heledus on neeldumisest rohkem mõjutatud kui V. Mida kõrgem temperatuur, seda suurem on ka atmosfääri kihi läbipaistmatus.

## 2.1.2 Spektraalne muutlikkus

V509 *Cas* spektriklass muutus aeglaselt G0-st 1950. aastal G5-ni 1970. aastaks (Lambert ja Luck, 1978). Jooniselt 2.4 on näha, et 1970. aasta massikaotuse episoodi ajal, mis kestis vähemalt 8 kuud, olid V509 *Cas* spektris neeldumisjooned umbes 2 korda laiemad kui aasta varem tehtud spektris. Samuti oli 1970. aastal neeldumisjoonte sügavus umbes 25 % suurem kui 1969. aastal. Sellised suured muutused peaks oluliselt mõjutama ka tähe värvust (Smoliński *et al.*, 1989). 1973. aastal määratigi tähe spektriklassiks K (Lambert ja Luck, 1978). Samuti märgati, et 1973. aastal olid tähe spektris neutraalsete metallide Ca I, Fe I ja Ni I neeldumisjooned, mis 1975. aastaks olid muutunud emissioonijoonteks. Seega toimus paari aastaga muutus V509 *Cas* atmosfääri struktuuris (Lambert ja Luck, 1978).

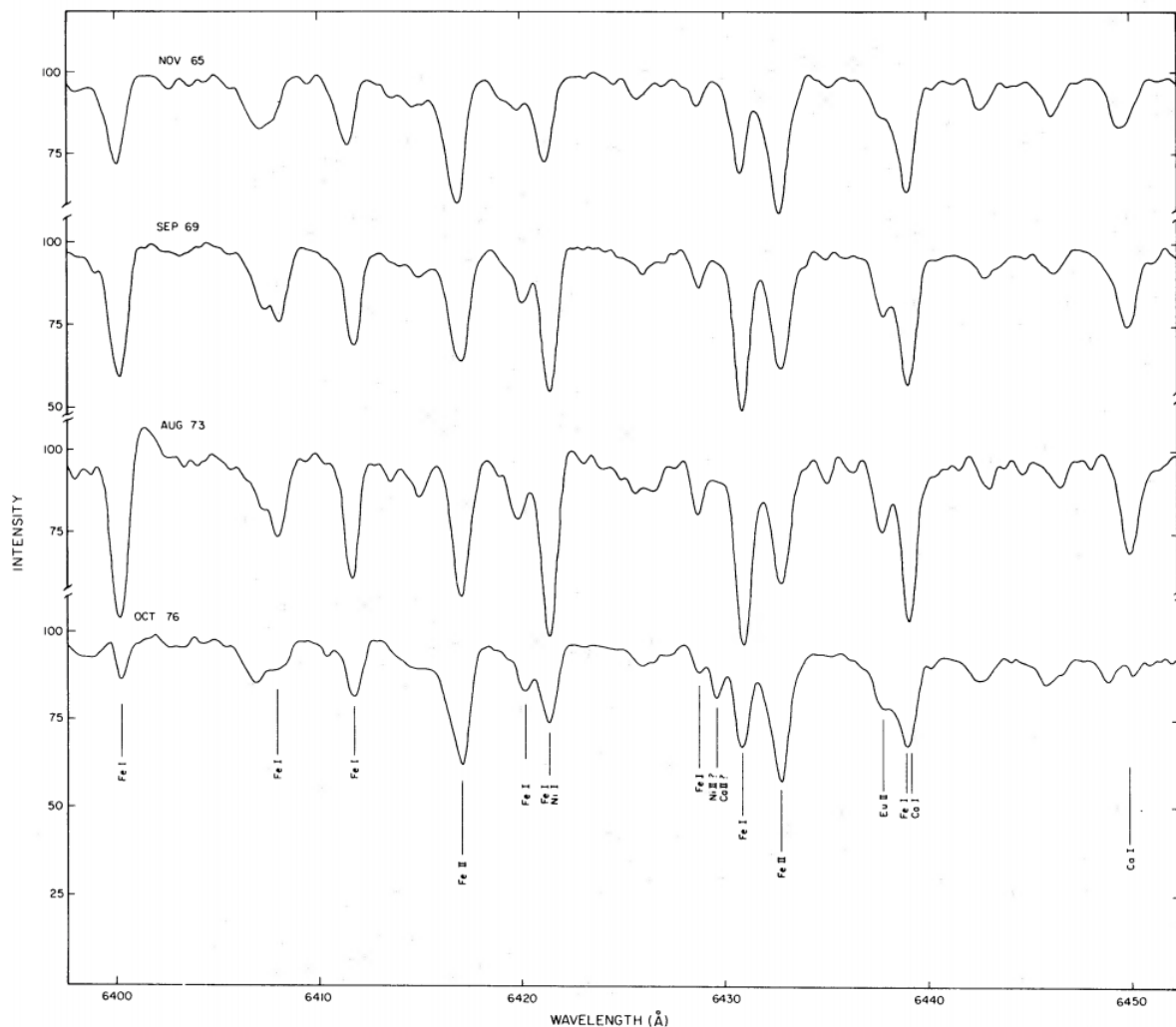
Tähe spektri muutusi 1960.- 70. aastate jooksul on näha neljal vaatlushetkel joonisel 2.5 on näha V509 *Cas* Spektrite keskosas on Fe II joon (6432,7 Å ja Fe I joon (6430,9 Å), mis on



Joonis 2.4: V509 *Cas* spektrite võrdlus (Smoliński *et al.*, 1989). Ülemine on tehtud 7. septembril 1969, enne tähte tabanud massikaotust ja alumine on tehtud 8. augustil 1970, mil täht oli läbimas massikaotuse episoodi. On näha olulist spektrijoonte laienemist massikaotuse toimumise ajal (de Jager, 1998).

mõlemad temperatuuritundlikud jooned ja mille põhjal on hästi näha uuritud ajavahemikul ionisatsiooniastme muutumist. Fe I joone tugevnemine võrreldes Fe II joonega ajavahemikul 1965-1973 klappib spektriklassi muutumisega G3-st K-ks. 1976. aasta ja 1965. aasta spektrid on sarnased ja neil epohhidel on Fe I / Fe II joonte suhe vastupidine vahepealsete ajahetkedega. 1976. aastal pakutakse tähe spektriklassiks G0. Fe I joone panus Ca I (6439,1 Å) joonde on ilmselt ebaoluline (Lambert ja Luck, 1978). V509 *Cas* temperatuuri määramisest temperatuuritundlike neeldumisjoonte põhjal on pikemalt kirjutatud peatükis 4.2.

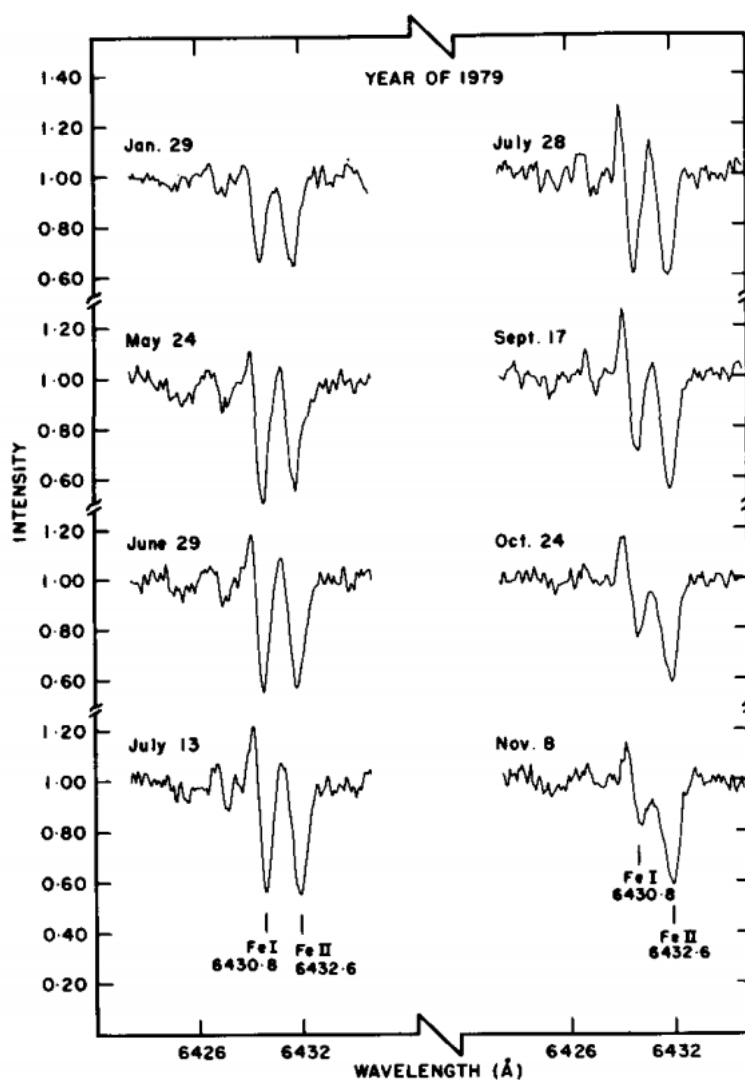
Samuti vaatlesid Smoliński *et al.* (1989) V509 *Cas* spektrit 1979 aasta jooksul. Sel ajal oli näha Fe I joonte sinises tiivas emissioonikomponenti (vt joonis 2.6) vähemalt 7 kuu jooksul ja selle komponendi radiaalkiirus muutus väga vähe. Aga 1982. aastal mõõdetud spektris on näha neutraalsetes metalli neeldumisjoontes (eriti Fe I joone sinises tiivas) emissioonikomponendi asemel neeldumiskomponenti, mille radiaalkiirus on umbes  $-100 \text{ km s}^{-1}$ . Neid muutusi tõlgendati tulemusena massikaotusele ja paisuvale täheümbrisele (Smoliński *et al.*, 1989).



Joonis 2.5: V509 *Cas* spektrid vahemikus 6400-6450 Å ülevalt alla: november 1965, september 1969, august 1973, oktoober 1976 (Lambert ja Luck, 1978). Joonisel on näha ka antud töö puhul vaadeldud jooned Fe II (6432,7 Å) ja Ca I (6439 Å), nendest on pikemalt peatükis 4.

### Ketas tähe ümber

V509 *Cas* pildistati Hubble'i kosmoseteleskoobi kaameraga WFPC2, et uurida tähte ümbritsevat keskkonda. Kunagiste punaste ülihiidude ümber peaksid olema fossiilsed kestad, mis pärinevad tähe suurtest massikaotustest punase ülihiiduna või hiljutistest massikaotuse episoodidest kollase hüperhiid arengujärgus. Tulemustest aga selgus, et tähe läheduses ega ka kaugemal ei ole märke udukogu moodustumisest (Schuster *et al.*, 2003). Ei ole ka tõendeid suurematest massikaotustest rohkem kui 500-1000 aastat tagasi. Kui täht oma evolutsioonil liigub sinise suunas, peab ta olema jõudnud kollasesse tühimikku alles hiljuti. Samuti punase ülihiid staadiumi läbimisest peab olema möödunud piisavalt pikk aeg, et sel ajal välja paisatud aine oleks jõudnud laiali hajuda või võib-olla laiaulatuslikku udukogu tähe ümber ei tekkinudki (Schuster *et al.*, 2006).

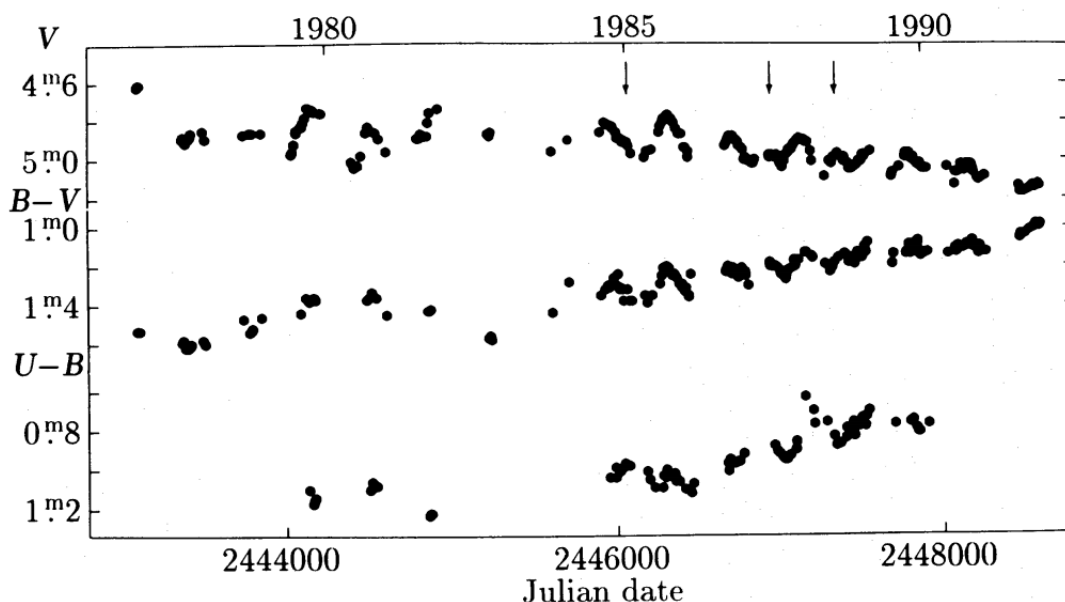


Joonis 2.6: V509 *Cas* spektrid 1979. aastal. Fe I joone sinises tiivas on näha muutliku tugevusega emissioonikomponenti (Smoliński *et al.*, 1989).

Aret *et al.* (2017b) uurisid kollaste hüperhiidude ja B[e] tüüpi siniste ülihiidude spektrites olevaid keelatud emissioonijooni. Uuritud kuumemate kollaste hüperhiidude (V509 *Cas* ja V1302 *Aql*) ning B[e] siniste ülihiidude (3 *Pup* ja V1478 *Cyg*) spektrites tuvastati [Ca II] ja [O I] spektrijooned. Mõlemat uuritud B[e] tüüpi sinist ülihiidu ümbritseb ketas, samuti on kettale iseloomulikke tunnuseid näha kuumema hüperhiidu V1302 *Aql* spektris. V509 *Cas* spektri [Ca II] joon on kahetipuline ning [O I] jooned on laiad sarnaselt V1302 *Aql* spektri joontele. Samuti joone profiili mudeldamisest avaldub oluliselt suur joone laienemine tähe pöörlemise tõttu. Selline kinemaatika on omane ka B[e] tüüpi sinistele ülihiidudele. V509 *Cas* spektrite uurimise tulemusel saab järeldada, et tähte ümbritseb ketas.

### 2.1.3 Fotomeetriline muutlikkus ja heleduskõver

Ajavahemikul 1850-1975 muutus V509 *Cas* V-filtris tasapisi heledamaks  $\Delta V = 1$  mag võrra (de Jager, 1998). Percy ja Zsoldos (1992) uuris heleduste muutust 1975.-1991. aastal AAVSO andmete põhjal ja leidis, et selle aja jooksul keskmine heledus V-filtris vähenes ja tähe värvus muutus sinisemaks (vt joonis 2.7). Heleduskõveras ajavahemik 1976-79 näeb ülejäänust üsna erinev välja: tähe heledus oli kõige suurem 1976. aastal, näitas väikest varieeruvust 1977. aastal ja oli enam-vähem konstantne 1978. aastal. Selgeid tsüklilisi muutusi on võimalik näha alates aastast 1979. 1985. aastal tekkis heleduskõverasse võnge (joonisel noolega märgitud), millest arenes uus muutlikkuse tsükel. De Jager (1998) mainis, et V509 *Cas* fotomeetriliste andmete võrdlus „vaiksel“ perioodil ja suure massikaotuse perioodil näitab, et massikaotuse perioodil muutub heledus suurema amplituudiga.



Joonis 2.7: V509 *Cas* heledus- ja värvuskõver AAVSO andmete põhjal aastatel 1976-91 (Percy ja Zsoldos, 1992)

V509 *Cas* värvusindeks B-V kahanes ajavahemikul 1976-91. Kuna ajavahemik oli lühike, siis ilmselt ei ole tegemist olulise evolutsioonilise muutusega tähes. Värvusindeksi kahanemine võib olla seotud tähe ümbrise välja viskamisega 1970. aastate algul. 1973. aastaks oli tähe ümber moodustunud pseudo-fotosfäär, mille temperatuur oli jahedam. 70-ndate lõpul/80-ndate algul massikaotus aeglustus ja tekkinud pseudo-fotosfäär hakkas laiali hajuma, selle järel tähe värvus muutus tagasi normaalseks. Selline interpretatsioon on spekulatiivne, kuna andmeid enne 1976. aastat on suhteliselt vähe. Samuti ei ole teada, kui mitu tähe ümbrise väljaheitmist võis toimuda (Percy ja Zsoldos, 1992).

## **Perioodilisus heledusmuutlikkuses**

Stothers (2012) leidis, et V509 *Cas*-le on pikaajalised kvaasiperioodilised muutused nii heleduses kui radiaalkiiruses. Selliste poolregulaarsete perioodide pikkus on u 1100 päeva. Neid perioode saab selgitada hiiglaslike konvektsioonipiirkondade (ingl k. *convection cell*) ringlemisega tähe ümbruses. Teoriast tuletatud periood selliseks konvektsiooniliseks liikumiseks on 1100 päeva, mis kattub hästi vaadeldud perioodiga. Samuti selgitab hiiglaslike konvektsioonipiirkondade teooria väga hästi pikki sekundaarperioode punastes hiid- ja ülihiidtähtedes. Kuid erinevalt punastest hiidudest ei ole sekundaarsed perioodid hüperhiidudes alati lihtsalt eristatavad, sest konvektsioon tähe ümbrises on tugevam madalamatel temperatuuridel.

V509 *Cas* heleduskõverast pärast 1973. a. massikaotust nähtub, et kui täht on kuumem siis heleduskõvera võnkumise amplituud on väiksem (0.1 - 0.2 mag) ja ka kvaasiperioodid on lühemad (100-200 päeva) kui tähe jahedamas staadiumis. Leiti, et see kehtib ka teiste kollaste hüperhiidude puhul - heleduskõvera amplituudid ja kvaasiperioodid sõltuvad tähe temperatuurist: väikesed amplituudid ja lühikesed perioodid, kui täht on kuum ning suuremad amplituudid ja pikemad perioodid, kui täht on jahe (van Genderen *et al.*, 2019).



# Peatükk 3

## Andmetöötlus

### 3.1 Teleskoobi parameetrid

Spektroskoopilised vaatlusandmed on kogutud Tartu observatooriumi 1,5-meetrise peegelteleskoobiga. Teleskoobi spektrograaf asub Cassegraini fookuses, kus koondub umbes 90 % valgusest 1-kaaresekundilisesse kujutisse. Spektrograafi näol on tegemist pikapilu-spektrograafiga, mille suhteline ava on 1:1,8. Kasutades erinevaid difraktsioonivõresid on võimalik saavutada spektraallahutusi mõnesajast kuni 12 000ni. V509 *Cas* vaatluste jaoks kasutati 1800 joont/mm difraktsioonvõret, mille efektiivseim lainepikkus on 518 nm. Teleskoobi CCD kaamera suurus on 1600x200 pikslit. Kaamera sensorit jahutatakse suvel -80 °C ja talvel -90 °C. Hea jahutuse tõttu ei ole vaja kasutada andmetöötlusel pimekaadreid (ingl. k. *dark frame*). Võrdlusspektrite kaadrid tehti nii andmekaadrite mõõtmise eel kui ka järel. Andmekaadrite mõõtmise ajal gideeriti teleskoopi käsitsi. Ühe andmekaadri säriaja pikkuseks oli 300-350 sekundit.

### 3.2 Info andmete kohta

Andmed on kogutud erinevate vaatlejate poolt: Anna Aret, Tõnis Eenmäe, Vitalii Checha, Üllar Kivila, Tarvi Verro jt. Autor osales 14 vaatlusel, mille andmeid antud töös kasutatakse.

Töös käsitlevate spektrijoonte uurimiseks oli vaja töödelda V509 *Cas* spektreid, mis on pildistatud mitme erineva difraktsioonivõre nurgaga. Need võrenurgad olid: 46°0', 46°10', 46°20' - edaspidi kokkuvõtvalt nurga 46° kaadrid - ja 47°6', 47°10', 47°23', 47°28', mis on edaspidi lühidalt nurga 47° kaadrid. Andmekaadrid võrenurgaga 46° ajavahemikul 22.09.2017 kuni 13.08.2018 olid töödeldud bakalaureusetöö (Kasikov, 2019) raames. Enamikele kaadritele ajavahemikul 08.05.2015 kuni 11.12.2019 oli eeltöötluse ning apertuuride määramise teinud

Tartu observatooriumi tähefüüsika osakonna doktorant Vitalii Checha. Mõned kaadrid sellest ajavahemikust töödeldi siiski täielikult töö autori poolt. Need kuupäevad on järgnevad:

- nurga 46° andmekaadrid: 11.06.2015, 02.07.2015, 17.07.2015, 29.11.2016, 06.12.2016, 04.01.2017, 29.08.2017, 26.03.2019
- nurga 47° andmekaadrid: 02.07.2015, 17.07.2015, 29.11.2016, 06.12.2016, 09.02.2017, 29.08.2017

Kõik andmekaadrid aastast 2020 on täielikult töödeldud töö autori poolt.

Vaatlusöid oli uuritaval ajavahemikul kokku 91. Vaatlusepohhe nurgaga 46° oli 83 ja nurgaga 47° oli 80. Nurgaga 46° on töö autori poolt algusest lõpuni täielikult töödeldud spektreid 46 (nendest 19 bakalaureusetöö raames) ja nurgaga 47° on neid 26.

Siin töös kasutatud andmekaadritele on töötlus alates lainepikkuste külge panemisest tehtud töö autori poolt.

Spektroskoopiliste andmete töötluseks kasutati programmi IRAF (*Image Reduction and Analysis Facility*). Selles kasutati paketti *noao* ja selle alamosasid *imred*, *ccdred* ja *ctioslit*.

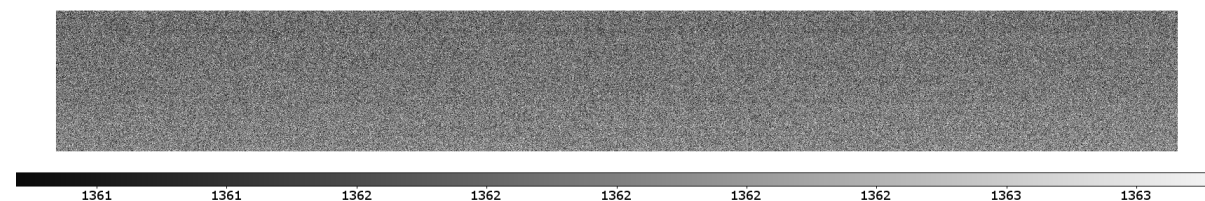
### 3.3 Eeltöötlus

Spektrite töötlus tehti vastavalt standardsele protsessile, mida on kirjeldatud põhjalikult bakalaureusetöös (Kasikov, 2019).

#### 3.3.1 Eelpingekaadri korrektsioon

Eelpingekaader (ingl. k. *zero frame* või *bias frame*) on kaader, mille säriaeg on 0 sekundit. See kirjeldab CCD kaamera üksikute pikslite sisemist laengut (Zwitter ja Munari, 2000).

Vaatlusööl tehtud eelpingekaadrid kombineeriti käsuga *zerocombine*. Selle abil saadi andmekaaader, mis kirjeldab kõigi eelpingekaadrite mediaanväärtust (vt joonis 3.1). Viimane lahutati kõigist andmekaadritest.



Joonis 3.1: Kombineeritud eelpingekaader.

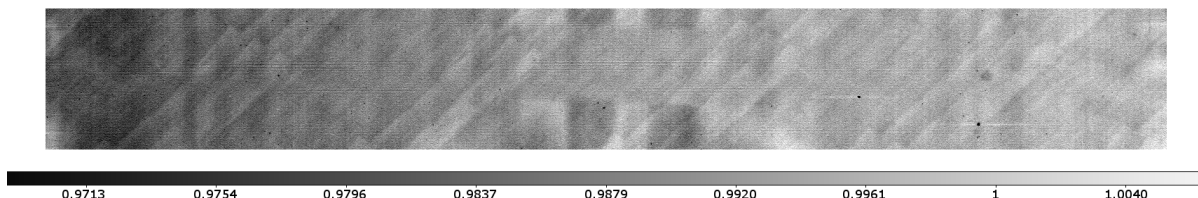
### 3.3.2 Tasaväljakaadri töötlus

Tasaväljakaadri korrektsiooni eesmärk on arvesse võtta CCD pikslite tundlikkuse erinevused. Töötlusprotsessi tulemuseks on tasaväljakaader, mille keskmine väärtus üle kogu kaadri on 1, ehk iga piksli väärtus kirjeldab selle tundlikkust võrreldes kõrval olevate pikslitega. Tasaväljakaadri säritamisel on CCD võimalikult ühtlaselt lambiga valgustatud (Massey, 1997).

Vaatlusööl tehtud sama võrenurgaga tasaväljakaadritest tehti kombineeritud kaader käsuga *flatcombine*. Edasised sammud on järgnevad (Zwitter ja Munari, 2000):

- kombineeritud kaadrit keskmistati üle ridade käsuga *blkavg*, mille tulemuseks on 1-dimensionaalne kaader
- keskmistatud kaadrit töödeldi mediaanfiltriga kasutades käsku *median*
- rakendati käsk *blkrep*, mis laiendas 1-dimensionaalse kaadri taas CCD suuruseks mediaankaadriks, pannes vajaliku arvu kaadreid üksteisega kõrvuti
- kombineeritud kaader jagati eelnevas punktis saadud mediaankaadriga
- tehti valgustatuse korrektsioon käsuga *illumination*. See on vajalik, sest andmekaadrite tegemisel on CCD valgustatus ühtlane, aga tasaväljakaadrite puhul nii ei ole
- üle-eelnevas punktis saadud kaader jagati läbi valgustatuse suhtes korrigeeritud kaadriga.

Tulemuseks on tasaväljakaader, mis on joonisel 3.2.



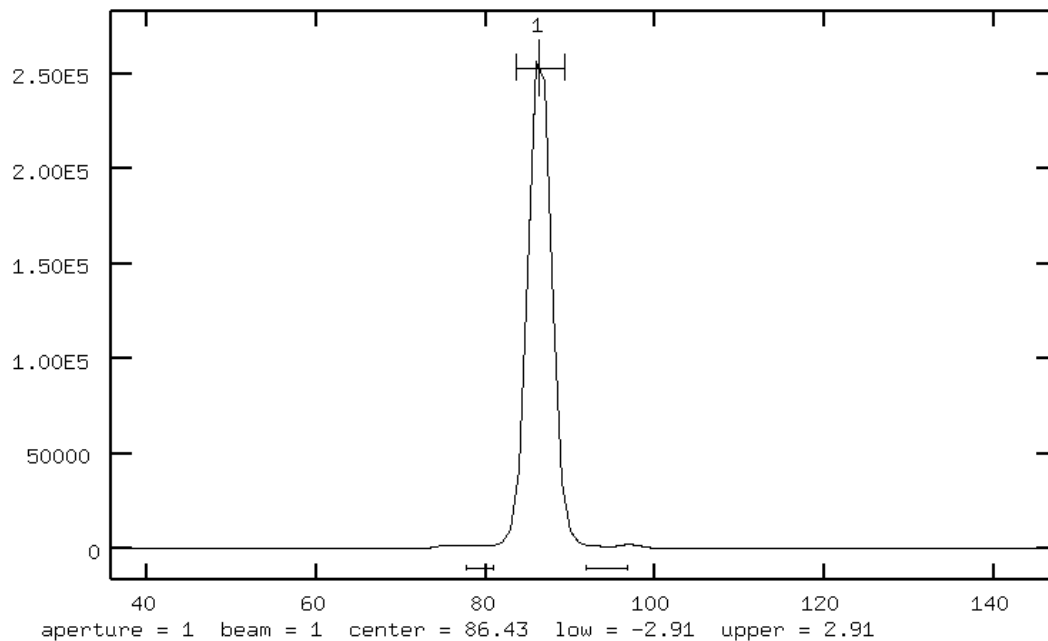
Joonis 3.2: Töödeldud tasaväljakaader

Viimaks jagati andmekaadrid töödeldud tasaväljakaadriga.

### 3.3.3 Apertuuride määramine

Andmekaadri apertuuride määramiseks kasutati käsku *apall*. Selle abil määrati andmekaadris tähespektri laius ning taevafooni piirkonnad. Need on toodud joonisel 3.3.

Igale andmekaadri vastab 1-2 ThAr lambi spektrit - need on võrdlusspektrid andmekaadritele lainepikkuste skaala seadistamiseks. Võrdlusspektritele rakendati samu apertuure, mis andmekaadritele.



Joonis 3.3: Apertuuride määramine IRAFis. Joonise keskel piik on tähe spekter ja horisontaaljoonega on märgitud selle laius. Tähe spektrist vasakul ja paremal on märgitud taevafooni piirkonnad.

## 3.4 Järeldöötlus

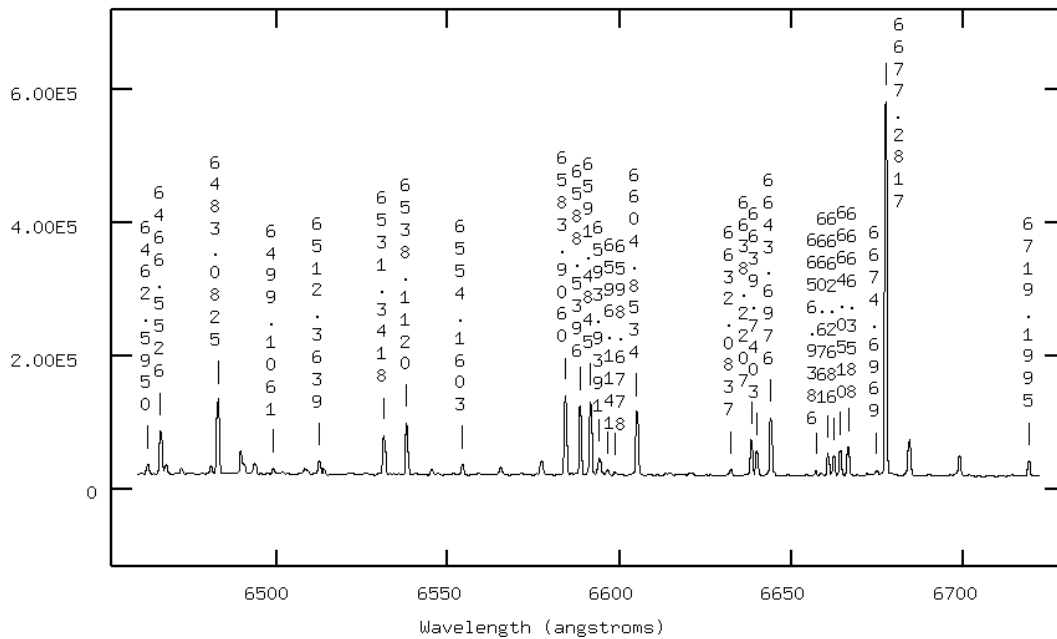
Järeldöötamise etappide juures toodud näitejoonised on  $47^\circ$  nurga kaadrite töötlemisest. Analoogsed joonised  $46^\circ$  nurga kaadrite töötlemise kohta võib leida Kasikovi (2019) bakalaureusetöös.

### 3.4.1 Lainepikkuste skaalasse viimine

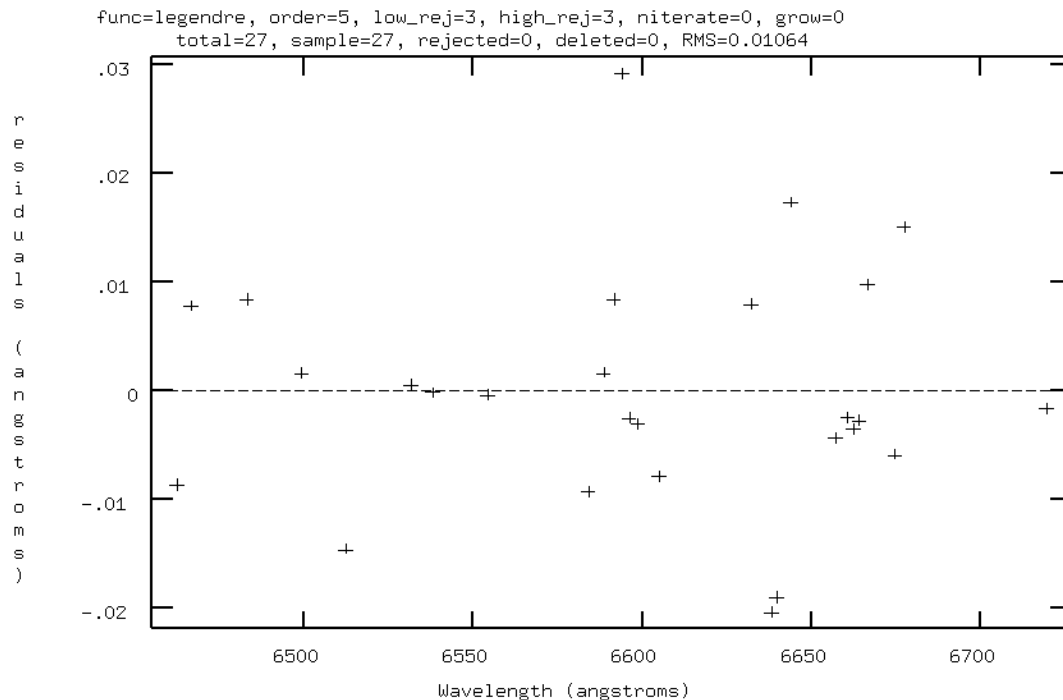
Lainepikkuste skaala määrati kasutades teadaolevaid ThAr lambi jooni. Igas võrdlusspektri kaadris määrati teadaolevatele joontele täpsed lainepikkuse väärtused kasutades käsku *identify*. Nurga  $47^\circ$  spektrite identifitseerimisel kasutatud spektrijooni ja nendele vastavaid lainepikkusi võib näha joonisel 3.4.

Lainepikkuste skaala sobitamiseks kasutati 5. astme Legendre'i polünoomi, mis on tavapärase 1,5 m teleskoobi andmete puhul. Identifitseerimise ja lähendusfunktsiooni täpsuse hindamiseks on hea vaadata jääkide graafikut (joonis 3.5). Jääkide joonisel ei tohi olla süstemaatilisust - see viitab liiga madalale sobitusfunktsiooni järgule. Samuti on eelistatud väike ruutkeskmise väärtus (RMS), antud joonisel on see 0,01. Nulltasemest liialt hälbivad spektrijooned tuleb eemaldada, kuid andmekaadrite lainepikkuste skaala parimaks täpsuseks tuleb kasutada võimalikult paljusid jooni (Massey *et al.*, 1992).

Võrdlusspektrid seoti andmekaadritega kasutades käsku *refspec*. Seejärel, kasutades käsku *dispcor*, toimus spektrile lainepikkuste skaala rakendamine eelmises punktis määratud

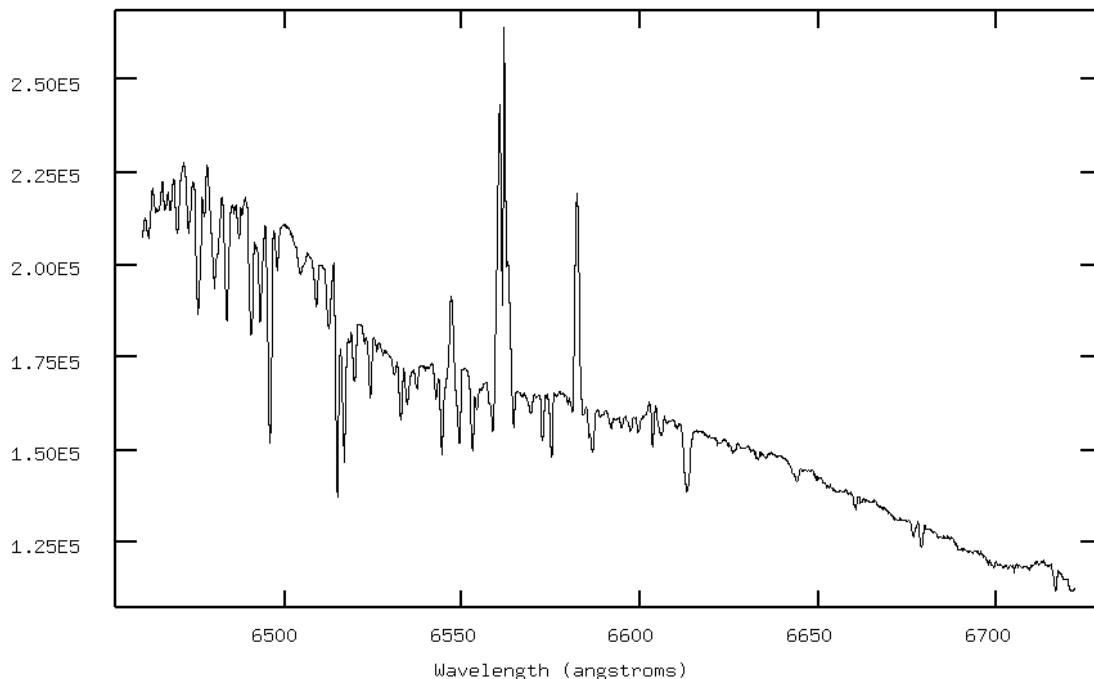


Joonis 3.4: ThAr lambi spekter, mis on mõõdetud  $47^\circ$  difraktsioonivõre nurgaga. Andmekaadritele lainepikkuste skaala määramiseks kasutatud spektrijooned on märgitud. (joonis IRAF-ist)



Joonis 3.5: Jäägid lainepikkuste identifitseerimisel võrdlusspektris. Graafikul on igale spektrijoonele (horisontaaltelg) vastav jääk, mille suurust näitab vertikaaltelg.

funktsiooni põhjal. Parameeter *linearize=yes* tagas, et tulemuseks saadud spektri lainepikkuste skaala oleks lineaarne (Massey *et al.*, 1992).



Joonis 3.6: Järeltöötuse tulemusel saadud V509 *Cas* spekter.

Samuti viidi spektrid heliotsentriliseks kasutades käsku *dopcor*, mis eemaldab Maa liikumisest ümber Päikese tuleneva Doppleri nihke (Zwitter ja Munari, 2000). Saadud spekter on näha joonisel 3.6.

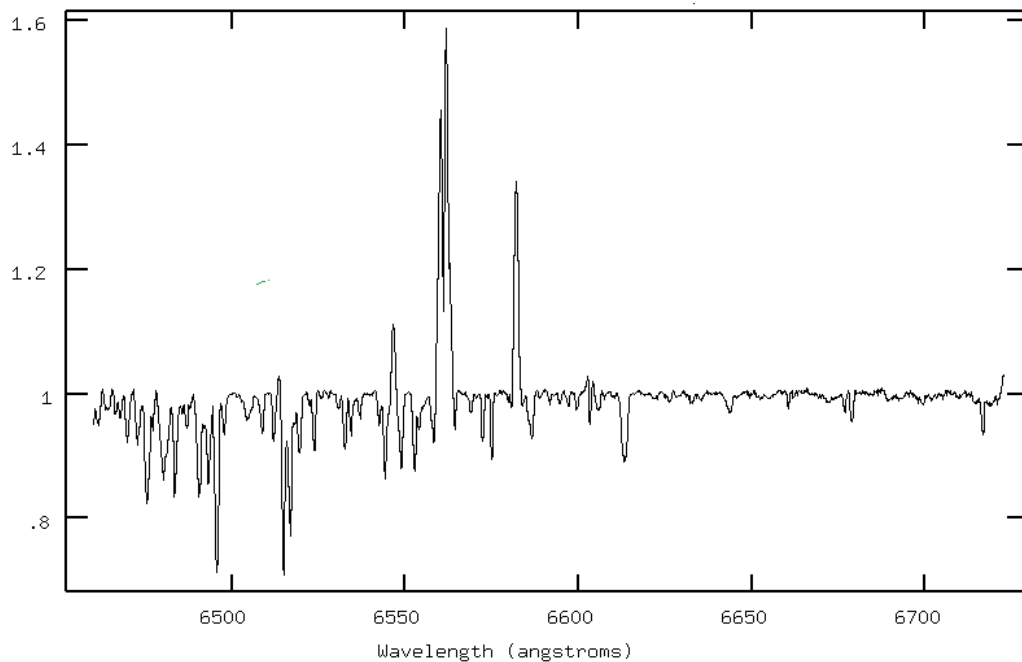
Spektrite signaal-müra suhte väärtus kontiinumil on umbes 300 nendel öödel, mil on tehtud 2 spektrit ja 200 kui on mõõdetud 1 spekter.

### 3.4.2 Kontiinumile viimine

Spektrijoonte intensiivsuste mõõtmiseks kontiinumi suhtes on vaja kogu spekter viia kontiinumi tasemele. See tähendab, et väärtus 1 vastab pidevspektri tasemele ja neeldumis- ning emissioonijoonte tugevus on määratud selle suhtes. Selleks kasutati käsku *continuum*, milles lähendati pidevspektri tasemele 20. või 21. järku *spline* funktsioon. Selle funktsiooniga kirjeldati võimalikult hästi kontiinumi kuju. Tulemust on näha joonisel 3.7.

## 3.5 Spektrijoonte mõõtmine

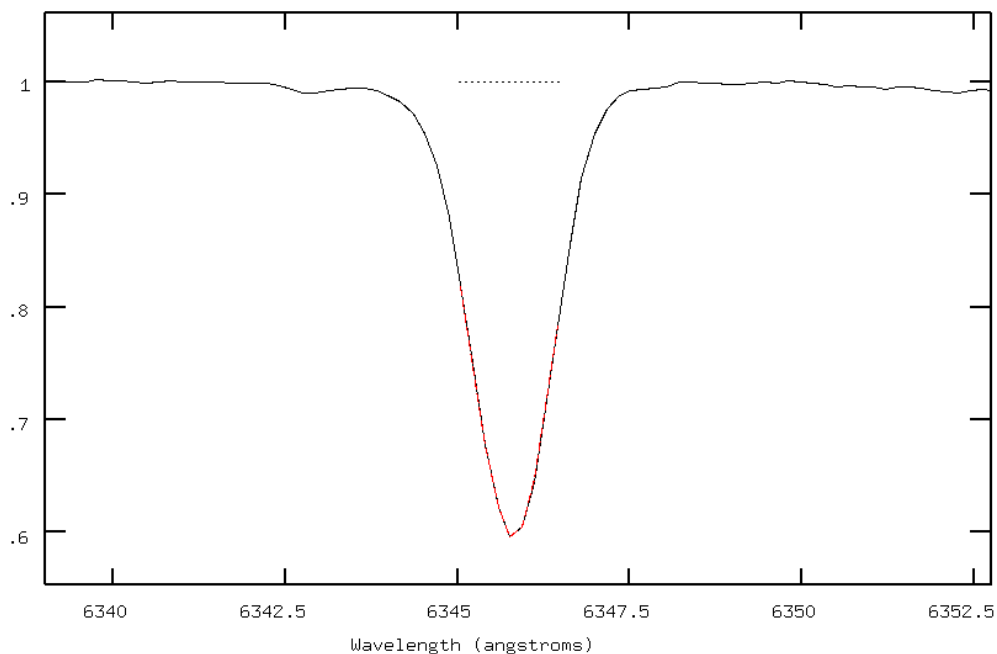
Uuritavaid spektrijoone oli kokku 6: temperatuuri määramiseks vajalikud Ca I (6439 Å) ja Fe II (6445 Å), emissioonikomponentidega Fe II (6432 Å) ja Sc II (6604 Å) ning tähe radiaalkiiruse määramiseks kasutatavad ioniseeritud räni neeldumisjooned Si II (6347 Å) ja Si II (6371 Å). Fe II, Ca I ja Si II jooned on nurga 46° kaadritel, Sc II joon on nurga 47° kaadritel.



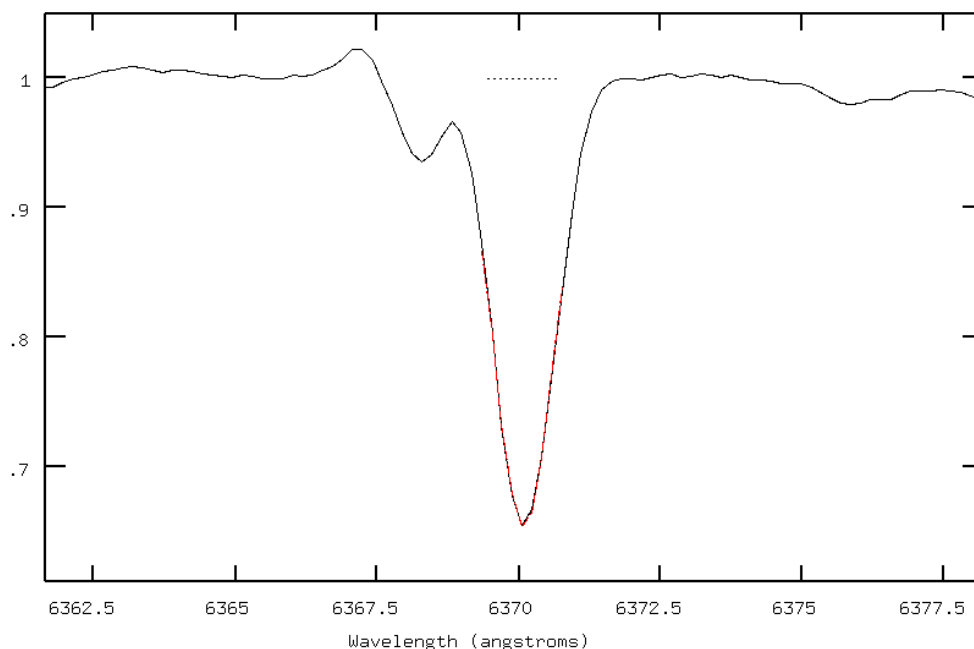
Joonis 3.7: V509 *Cas* spekter kontinumile viiduna.

Kontinumi suhtes mõõdeti uuritavate spektrijoonte väärtused - neeldumiste puhul spektrijoone miinimumi väärtus ja emissiooni puhul maksimumi väärtus. Sel viisil saadi sügavused joontele Ca I (6439 Å) ja Fe II (6445 Å). Joontel, millel on ka emissioonikomponendid (Fe II ja Sc II), mõõdeti nii joone neeldumise sügavus kui ka mõlema tiiva emissioonide tugevused. Kõik spektrijoonte mõõtmisandmed on antud tabelitena lisades C ja D.

Ioniseeritud räni joonte keskkohdade määramiseks lähendati joontele Gaussi profiil. Kontinumil määrati lainepikkuste vahemik, mille laiuselt lähendus toimus - Gaussi funktsiooni ei rakendatud terve spektrijoone ulatuses vaid ainult spektrijoone miinimumi ümbruses. Seda oli oluline teha, sest Si II (6371 Å) vahetus läheduses asub teine neeldumisjoon. Joontele rakendatud Gaussi lähendusi võib näha joonistel 3.8 ja 3.9.



Joonis 3.8: Si II (6347 Å) neeldumisjoon ja punasega on märgitud sellele vastav Gaussi funktsioon. Horisontaalne joon kontinuumi tasandil näitab Gaussi lähenduse laiust.



Joonis 3.9: Si II (6371 Å) neeldumisjoon ja punasega on märgitud sellele vastav Gaussi funktsioon. Horisontaalne joon kontinuumi tasandil näitab Gaussi lähenduse laiust.



# Peatükk 4

## Tulemused

### 4.1 Uuritavate joonte muutlikkus.

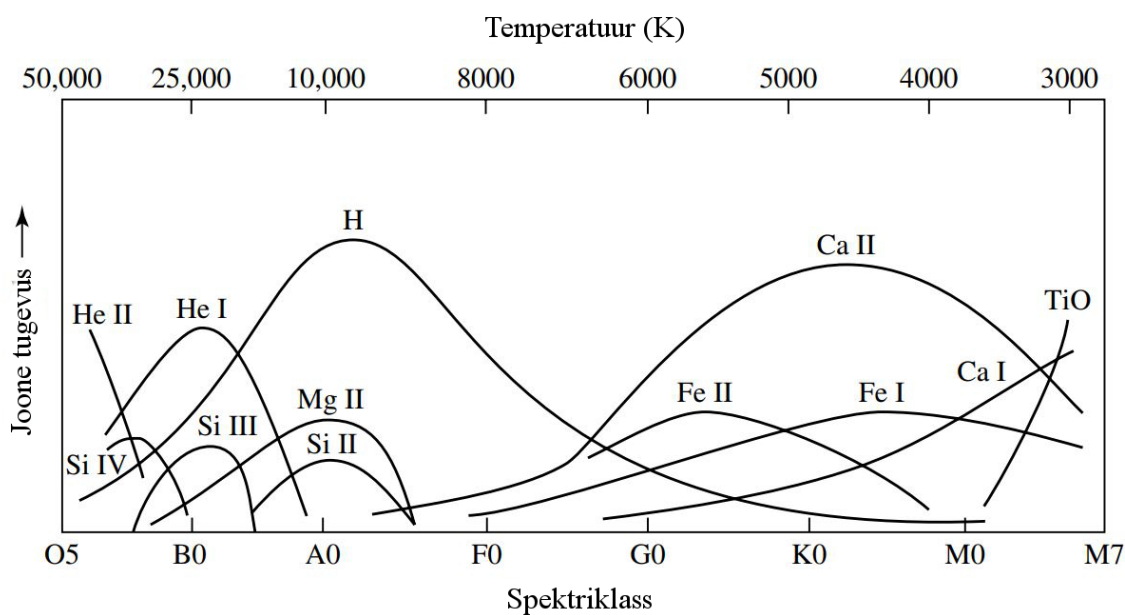
Temperatuuride leidmiseks kasutati kahte neeldumisjoont: Fe II ( $\lambda = 6446 \text{ \AA}$ ) ja Ca I ( $\lambda = 6439 \text{ \AA}$ ). Fe II joon on tugevam kõrgematel temperatuuridel ja Ca I joon on tugevam madalatel temperatuuridel (vt joonis 4.1). Nende joonte muutlikkust 2020. aasta jooksul on näha joonisel 4.2a. Temperatuuri määramist nende spektrijoonte põhjal kirjeldab peatükk 4.2.

Radiaalkiiruste leidmiseks kasutati kahte Si II neeldumisjoont, mis on spektris tugevad. Kasutatud räni joonte muutlikkust 2020. aasta jooksul on näha joonistel 4.2c ja 4.2d. Joonistel tasub tähelepanu pöörata lainepikkuse suunalisele muutlikkusele. Joonte lainepikkuste leidmise meetodit kirjeldab peatükk 3.5 ja täpsemalt on radiaalkiiruste tulemustest juttu peatükis 4.3.2.

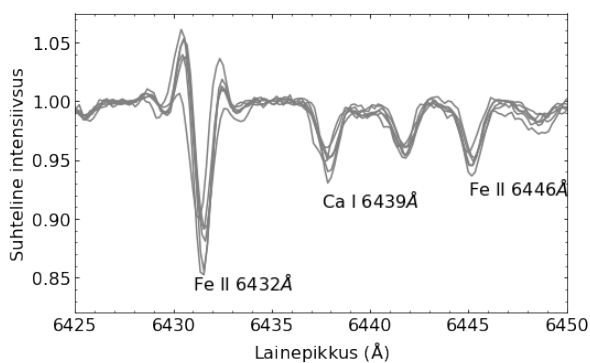
Samuti on tähe spektris mitmeid emissioonikomponentidega neeldumisjooni. Üks neist on Fe II ( $\lambda = 6432 \text{ \AA}$ ), mille muutlikkust ühe aasta jooksul on näha joonisel 4.2a ja teine on Sc II ( $\lambda = 6605 \text{ \AA}$ ), mida on kujutatud joonisel 4.2b. Sc II emissioonikomponentidest räägib pikemalt peatükk 4.3.3.

### 4.2 Efektiivne temperatuur

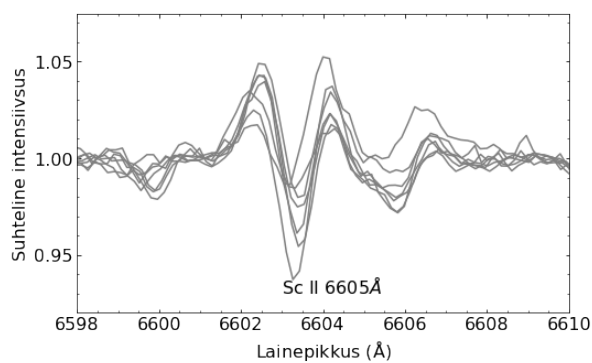
Massiivsete tähtede temperatuuri mõõtmiseks on mitmeid erinevaid viise. Nieuwenhuijzen *et al.* (2012) leidsid V509 *Cas* temperatuuri, sobitades täheatmosfääri mudelite põhjal arvutatud mudelspektreid vaadeldud spektritele. Kuid massiivsete tähtede mudelid ei arvesta hästi kollaste hüperhiidude ulatusliku atmosfääriga. Seetõttu kasutati temperatuuride leidmiseks lihtsamat empiirilist meetodit, mis põhineb temperatuuritundlike spektrijoonte sügavuste suhte mõõtmisel. Sel viisil temperatuuri leidmise usaldusväärsus on näidanud Kovtyukh (2007). Teadaoleva



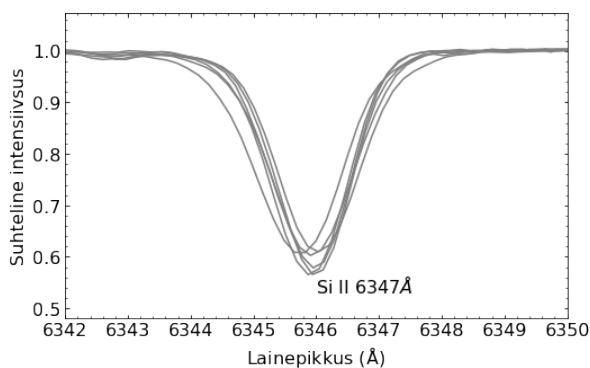
Joonis 4.1: Erinevate spektrijoonte tugevuste sõltuvus temperatuurist ja spektriklassist (Carroll ja Ostlie, 2014). On näha, et Ca I joon on tugevam madalamatel temperatuuridel ja Fe II joon kõrgematel.



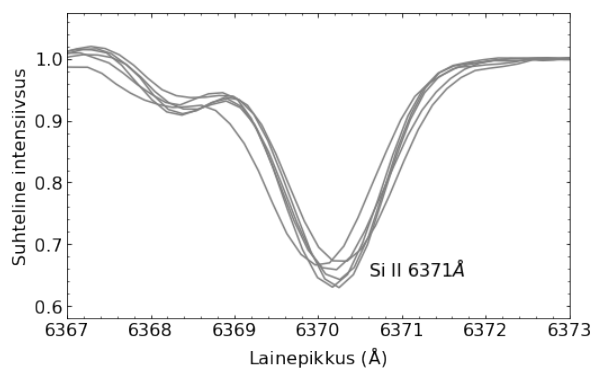
(a) Mõlemad Fe II spektrijooned ja Ca I joon.



(b) Sc II neeldumisjoon ja emissioonikomponendid.

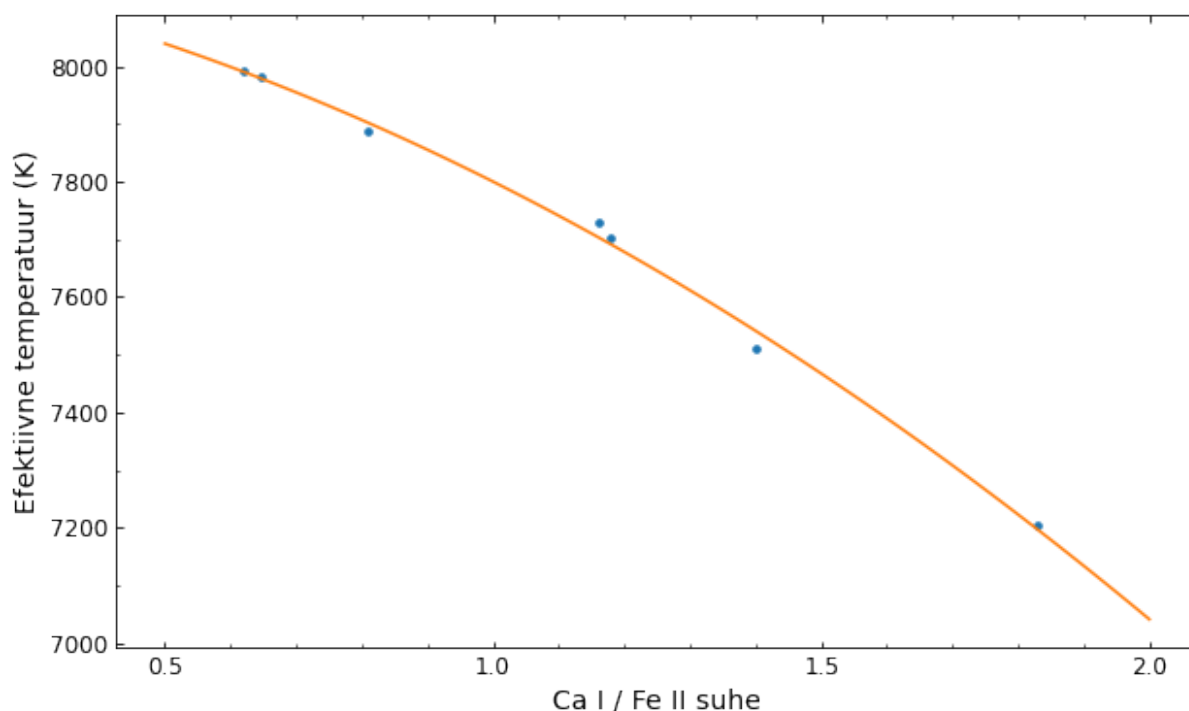


(c) Si II (6347 Å) neeldumisjoon.



(d) Si II (6371 Å) neeldumisjoon.

Joonis 4.2: Uuritavate spektrijoonte muutlikkus 2020. aasta jooksul.



Joonis 4.3: Ca I ja Fe II joonte sügavuste suhe ja sellele vastav efektiivse temperatuuri väärtus. Ringid on andmepunktid temperatuuri ja joonte sügavuste suhte kalibratsioonist ning tärnid näitavad nende punktide lähendusfunktsiooni (I. Kolka).

temperatuuriga ülihiidude põhjal kalibreeriti Fe I ja Fe II spektrijoonte sügavuste suhte sõltuvus temperatuurist. Kuid V509 *Cas* mõõdetud spektripiirkonnas ei ole häid Fe I jooni. Siiski on märgatud Ca I ( $\lambda = 6439 \text{ \AA}$ ) ja Fe II ( $\lambda = 6446 \text{ \AA}$ ) erinevat käitumist temperatuuri suhtes. Kuid Ca I temperatuurisõltuvust ei saa määrata teadaoleva ülihiu põhjal, sest teise tähe keemiline koostis võib olla erinev.

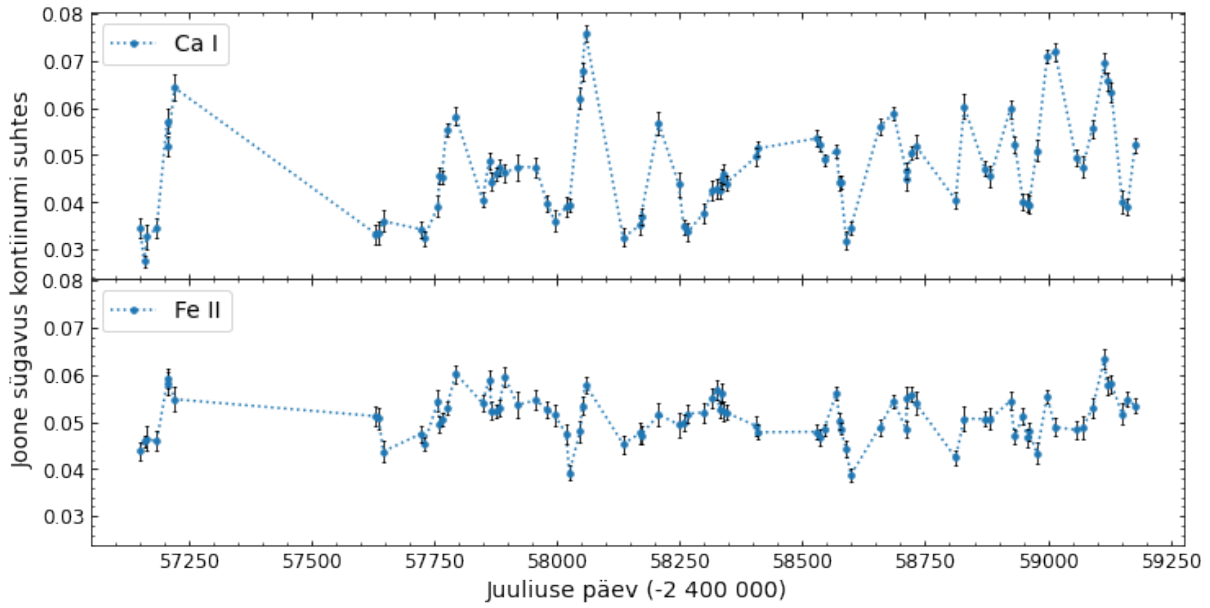
V509 *Cas* temperatuurisõltuvuse kalibreerimine toimus kaheetapiliselt. On olemas kõrgedispersioonilised spektrid piirkonnas 5300-5400  $\text{\AA}$ , kus on lähestikku Fe I ( $\lambda = 5367 \text{ \AA}$ ) ja Fe II ( $\lambda = 5387 \text{ \AA}$ ) jooned. Nende sügavuse suhte põhjal on leitud efektiivne temperatuur. Seejärel, samuti kõrge lahutusega spektrite põhjal, kalibreeriti antud töös temperatuuri leidmiseks kasutatud Ca I ja Fe II suhe. Selle suhte seos temperatuuriga on toodud joonisel 4.3.

Joonisel 4.3 toodud lähendusfunktsiooni kirjeldab valem:

$$T_{eff} = 8185 - 198x - 187x^2, \quad (4.1)$$

kus  $x$  on Ca I ja Fe II joonte sügavuste suhe:

$$x = \frac{h(\text{CaI})}{h(\text{FeII})} \quad (4.2)$$



Joonis 4.4: Ca I ( $\lambda = 6439 \text{ \AA}$ ) ja Fe II ( $\lambda = 6446 \text{ \AA}$ ) mõõdetud sügavused kontiinumi suhtes. Määramatusena on toodud ruutkeskmine hälve kontiinumil.

Valemiga 4.1 arvatatud temperatuuride määramatus avaldub kujul:

$$dT_{eff} = \sqrt{((-198 - 2 \cdot 187x) \cdot dx)^2}, \quad (4.3)$$

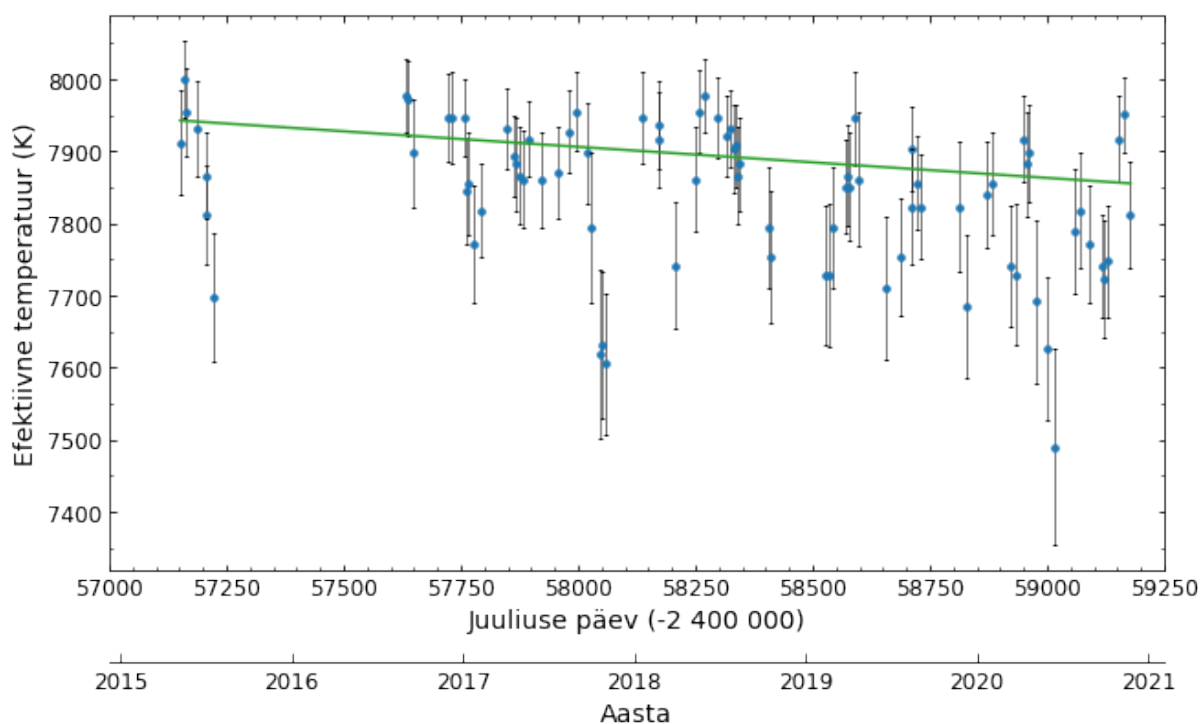
kus  $dx$  on Ca I ja Fe II sügavuste suhte määramatus, mis avaldub valemiga:

$$dx = \sqrt{\left(\frac{1}{h(\text{FeII})} \cdot dh(\text{CaI})\right)^2 + \left(-\frac{h(\text{CaI})}{h(\text{FeII})^2} \cdot dh(\text{FeII})\right)^2} \quad (4.4)$$

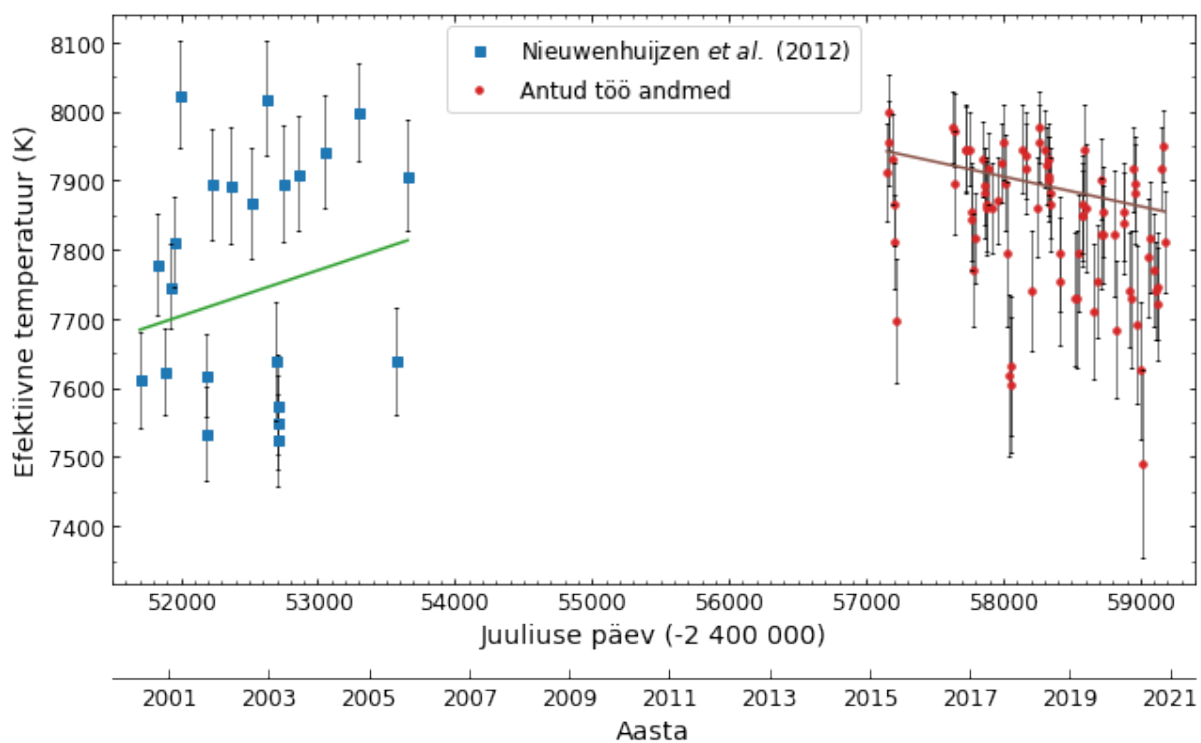
Ca I ja Fe II joonte sügavuste leidmisel tuleb kõige olulisem viga kontiinumi määramise täpsusest (ca 0,003) ja kontiinumi standardhälbest (ca 0,002). Mõlema leidmist on pikemalt kirjeldatud bakalaureusetöös (Kasikov, 2019) ja sügavuste mõõtmise määramatuseks võib hinnata eelnimetatud määramatuste summat  $dh(\text{CaI}) = dh(\text{FeII}) = 0,005$ . Spektrijoonte sügavuste põhjal määratud temperatuurid on võimaliku süstemaatilise veaga, sest ülalmainitud kaheetapiline kalibreerimine toetub normaalsetele ülihiidudele määratud temperatuuridele. Selle töö puhul on aga oluline temperatuuri aegrea suhteline täpsus, ja valemi 4.4 järgi on joonte suhte keskmine määramatus 0,13.

Tulemuseks saadi tähele efektiivsed temperatuurid 5 aasta jooksul 83 ööl (vt joonis 4.5).

Leitud temperatuuride regressioonisirge põhjal (joonis 4.5) on temperatuur ühe aasta jooksul keskmiselt langenud umbes  $16 \pm 5 \text{ K}$  võrra. Temperatuuri lühiajaliste fluktuatsioonide amplituud, ehk ruutkeskmine hälve regressioonisirge suhtes on 108 K. Nieuwenhuijzen *et al.* (2012) artikli



Joonis 4.5: Efektiivsed temperatuurid koos määramatuse ja lineaarse trendijoonega.

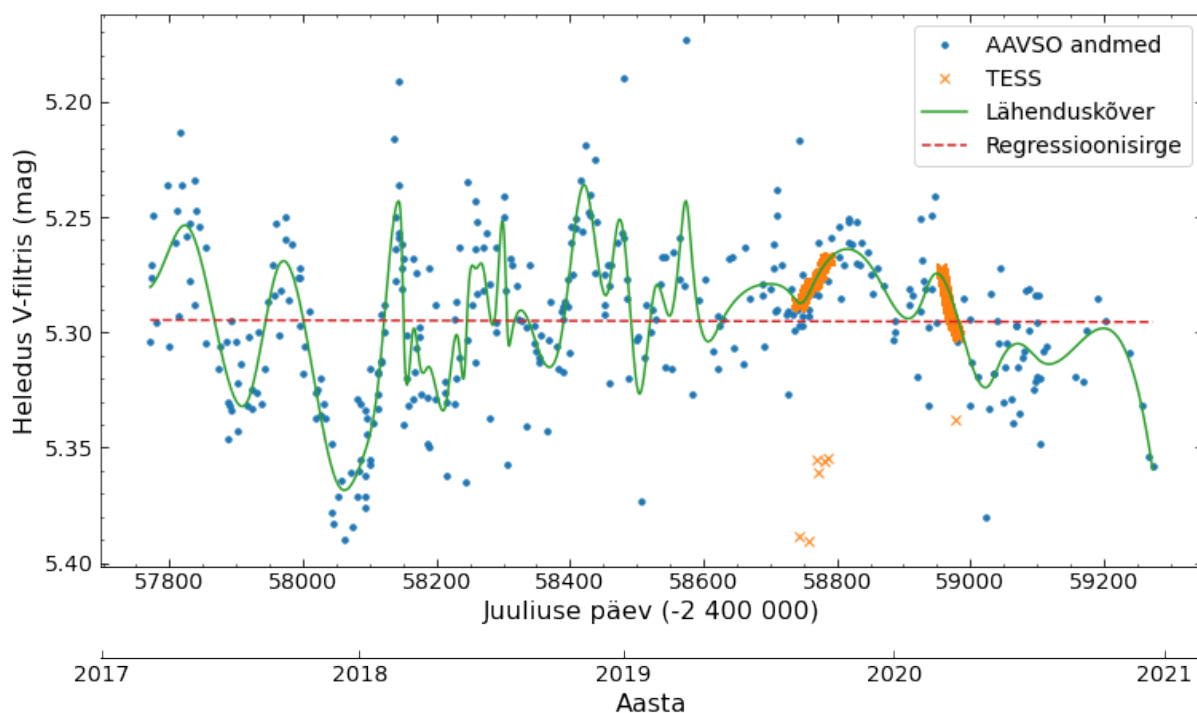


Joonis 4.6: Nieuwenhuijzen *et al.* (2012) artiklis leitud efektiivsed temperatuurid (sinised ruudud) ja selle töö andmed (punased ringid) koos regressioonisirgetega.

andmetel oli temperatuuri tõus 2000. aastate alguseks aeglustanud, jõudes 8000 K lähedusse. Lühiajaliste võnkumiste amplituud oli 167 K. Seega rohkem kui kolmandiku võrra vähenenud lühiajaliste võnkumiste amplituud võrreldes 2000. - 2005. a. andmetega. Tol ajal temperatuur natuke tõusis ( $24 \pm 24$  K aastas) ja samasugune trend tundus jätkuvat ka Kasikovi (2019) bakalaureusetöö põhjal. Võttes nüüd uurimise alla pikema ajavahemiku, paistab, et temperatuur liigub aeglaselt langevas trendis või võngub pikaperioodilise mitmeaastase lainena.

### 4.3 Heleduse muutlikkus

Hipparcose satelliit mõõtis V509 Cas heledust aastatel 1989 - 1993. Mõõdetud heleduskõver ja Tycho BT ja VT filtrite andmed on toodud lisas A. Hipparcose vaatlusperioodil kahanes heledus keskmiselt 0,1 mag võrra. Heleduse muutlikkuse amplituud oli 0,03 mag. Samas B-V värvus suurenes u 0,15 mag võrra - täht muutus punasemaks - ja värvuse muutlikkuse amplituud oli 0,04 mag.



Joonis 4.7: AAVSO heledused V-filtris ja silutud heleduskõver. TESS-i andmed klapivad hästi silutud kõveraga. Toodud on ka regressioonisirge, et näidata heleduse muutlikkuse üldist trendi.

AAVSO vaatlusandmed on kogutud kahe vaatleja poolt: W. Vollmann (V-filtri vaatlused) ja M. Sblewski (vaatlused 5 filtris). Andmed on kogutud ajavahemikul 17.01.2017 - 27.02.2021. Heledusi V-, U-, ja B-filtrites võib näha joonisel lisas B. Kuna AAVSO andmed on suhteliselt suure määramatusega - kuni 0,05 mag, lähendati mõõdetud heledustele kuupsplainiga silutud

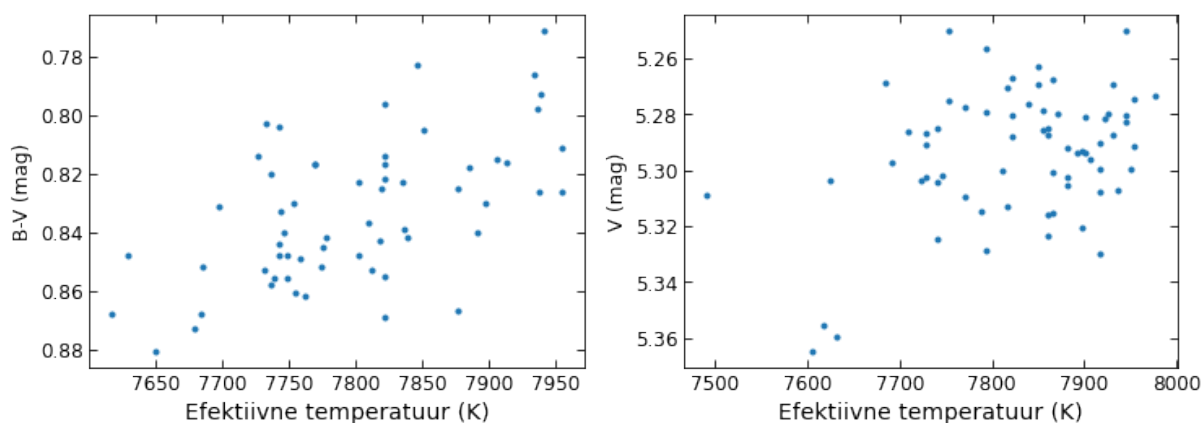
keskmise, mille silumise aken on 26 päeva (vt joonis 4.7). V509 *Cas* heleduse sujuvamale muutumisele annavad kinnitust ka kosmoseteleskoobiga TESS mõõdetud heledused (STScI, 2020) ajavahemikel 11.09.2019 - 02.11.2019 ja 16.04.2020 - 13.05.2020. Nii AAVSO silutud kui ka silumata andmete põhjal jäi V heledus samale tasemele, ruutkeskmise hälve oli 0,03 mag. B-V värvus vähenes 0,03 mag võrra ja ruutkeskmise hälve oli 0,02 mag.

Kui võrrelda AAVSO ja Hipparcose V-heleduse mõõtmisi, siis on muutlikkuse amplituud jäänud sarnaseks. Siiski Hipparcose mõõtmiste ajal heledus keskmiselt natuke kahanes, AAVSO vaatlustes jäi samale tasemele.

Hipparcose uuringutel B-V värvus suurenes, aga nüüd AAVSO põhjal on pigem samal tasemel/natuke väheneb. Muutlikkuse amplituud oli Hipparcose mõõtmiste põhjal suurem - 0,04 mag, nüüd on 0,02 mag.

### 4.3.1 B-V värvuse ja temperatuuri seos

Uurides temperatuuri ja heleduste (V, B-V ja U-B) korrelatsioone ilmnes, et kõige tugevam on seos temperatuuri ja B-V värvuse vahel (vt joonis 4.8). Väiksem B-V väärtus (ehk sinisem värvus) vastab kõrgemale temperatuurile. Seose hajuvus võib olla tingitud sellest, et heledust mõjutavad lisaks temperatuurile ka tähe mõõtmed, mis muutuvad tähe väliskihi pulsatsioonide tõttu.



Joonis 4.8: Efektivse temperatuuri ja B-V värvuse ning V-filtri heleduse sõltuvus.

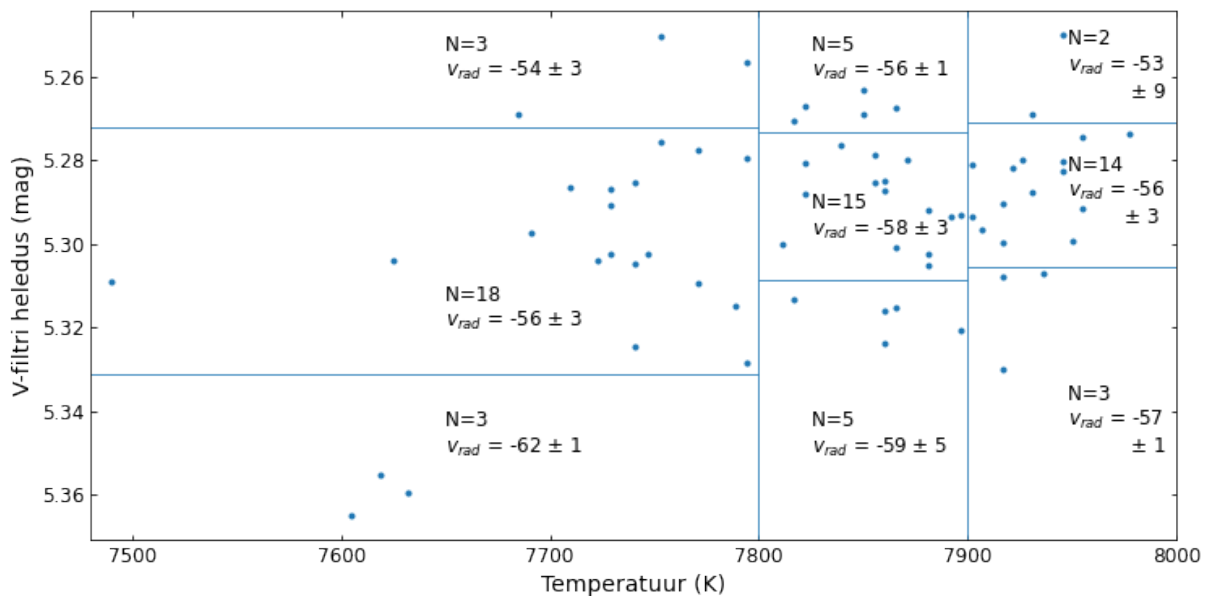
Joonisel 4.8 on vasakpoolsel joonisel toodud AAVSO vaatluste põhjal arvatud B-V värvus. Kuna B-V vaatlusepohhid ei kattu temperatuurivaatlustega, siis on efektiivsete temperatuuride väärtusi interpoleeritud. Parempoolsel joonisel olevad V-filtri väärtused on leitud silutud kõvera põhjal.

### 4.3.2 Pulsatsioonid

Pulsatsioonide ja heleduste omavahelise seose uurimiseks piiritleti kitsamad temperatuurivahemikud, mille mõju heledusele on seetõttu ligikaudu ühesugune. Oletus oli, et niisugustes temperatuurivahemikes võib heleduse taset määrata pulsatsioonide olek. AAVSO V-heledustega samal ajavahemikul on Tõraveres mõõdetud 68 efektiivse temperatuuri väärtust. Temperatuurid jagati 3 gruppi: alla 7800 K, vahemikus 7800-7900 K, üle 7900 K. Iga grupi siseselt jagati 3 gruppi ka V-filtri heledused: keskmine grupp hõlmab heleduse keskväärtusest ruutkeskmise hälbe võrra erinevaid heledusi ja sellest grupist kahele poole jäävad enimhälliva heleduse grupid. Kokku moodustati seega 9 gruppi (vt joonis 4.9).

Iga grupi pulsatsioonioleku iseloomustamiseks kasutati tugevate Si II neeldumisjoonte Doppleri nihke suurust. Mõõdeti kahe Si II neeldumisjoone ( $\lambda = 6347 \text{ \AA}$ ) ja ( $\lambda = 6371 \text{ \AA}$ ) tsentri radiaalkiirusi (vt ptk 3.5) Doppleri nihke arvutamiseks kasutati laboris mõõdetud lainepikkusi:  $6347,11 \text{ \AA}$  ja  $6371,37 \text{ \AA}$  (Shenstone, 1961). Iga grupi siseselt arvutati selle grupi keskmine radiaalkiirus (vt. joonis 4.9  $V_{rad}$  väärtused). Uuritaval perioodil on joonte sininihe muutunud vahemikus  $-45 \text{ km s}^{-1}$  kuni  $-66 \text{ km s}^{-1}$ , üldine keskmine väärtus on  $-56,3 \text{ km s}^{-1}$ .

Varem on Si II joonte radiaalkiirusi mõõtnud ka Klochkova *et al.* (2019). Ioniseeritud räni neeldumisjoone heliotsentrilisteks radiaalkiirusteks mõõdeti nii Si II ( $\lambda = 6347,10 \text{ \AA}$ ) kui Si II ( $\lambda = 6371,36 \text{ \AA}$ ) puhul  $-59 \text{ km s}^{-1}$ .



Joonis 4.9: Temperatuuri ja V-filtri heleduse vaheline sõltuvus nagu joonisel 4.8 (parempoolne). Heledused ja temperatuurid on jaotatud kolmeks grupiks, need on joonisel eraldatud horisontaal- ja vertikaaljoontega. Iga grupi kasti sees on selle grupi liikmete arv N ja keskmine radiaalkiirus  $v_{rad}$  (ühik  $\text{km s}^{-1}$ ) koos grupisisesese hajumisega.

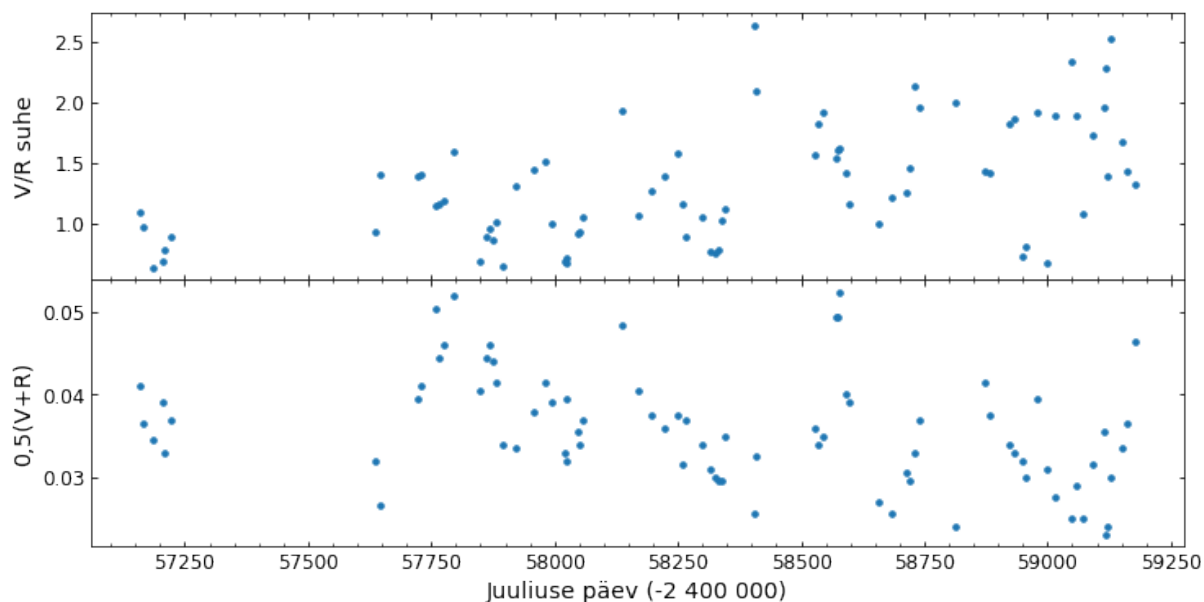


Oletades, et täht pulseerib, osutavad suuremad sininihke väärtused tähe väliskihi paisumisele ja väiksemad kokkutõmbumisele. Ilmneb trend, et kõigis temperatuurivahemikes vastab suurem sininihe tähe madalamatele heledustele.

Kui pulseerimine mõjutab tähe mõõtmeid/suurust, siis madalam heledus vastab väiksemale tähe raadiusele. Selline olek on tähel kas kokkutõmbumise lõpul või paisumise algul. Need olekud moodustavad kolm väiksema heleduse gruppi (joonis 4.9). Jooniselt selgub, et keskmiselt vastab madalamale heledusele suurem sininihe. See on võimalik siis, kui paisumise algul on paisumiskiirus kõige suurem - sellised olekud on vaatluste seas esindatud ja põhjustavad sininihke suurt keskmist väärtust. Analoogiliselt vastavad suuremad tähe mõõtmed paisumise lõpule või kokkutõmbe algusele. Kui vaatlustes on esindatud ka suurima kiirusega kokkutõmbeolekud, tuleneb sellest kolmes suurema heleduse grupis keskmisest väiksema sininihke väärtus.

### 4.3.3 Sc II joone emissioonikomponendid

Üheks muutlikuks detailiks V509 *Cas* spektris on mõnede neeldumisjoonte mõlemas tiivas esinev mõõduka intensiivsusega kiirguskomponent (vt. Fe II ( $\lambda = 6432 \text{ \AA}$ ) joonisel 4.2a). Nende kiirguskomponentide tugevus on erinev ja muutub aja jooksul pulsatsioonidest tingitud lööklainete mõju tõttu (Lobel *et al.*, 2005). Alternatiivselt võib muutlikkust põhjustada tähe lähedal paiknev gaasiketas või -rõngas, milles ainetihedus pole ühtlane ebasümmeetriliste tihedushäirituste tõttu (analoogiline mõnede Be tähtede ketastega).



Joonis 4.10: Sc II kiirguskomponentide suhe (ülemine joonis) ja keskmine tugevus kontinuumi suhtes (alumine joonis).

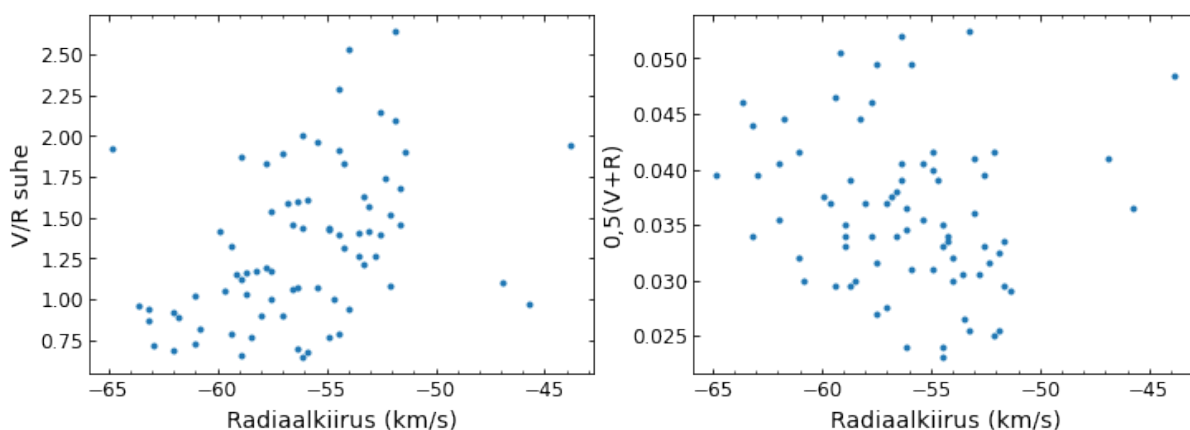
V509 *Cas* puhul valiti uuritavaks spektrijooneks Sc II ( $\lambda = 6605 \text{ \AA}$ ), mille muutlikkust 2020.

aasta jooksul on näha joonisel 4.2b. Joone muutlikkuse aegreas (vt joonis 4.10) on toodud tema emissioonikomponentide intensiivsuste V/R (sinine/punane, ingl. k. *violet/red*) suhe kontinuumi suhtes. Suhe on leitud analoogiliselt peatükis 4.2 valemiga 4.2 arvutatud Ca I ja Fe II joonte suhtega:

$$x = \frac{h(\text{Sc II sinine kiirguskomponent})}{h(\text{Sc II punane kiirguskomponent})} \quad (4.5)$$

Lisaks V/R suhtele leiti ka nende keskmist tugevust iseloomustav aegrida  $0,5 \cdot (V + R)$ . Mõlemad aegread on näha joonisel 4.10.

Kiirguskomponentide tekke seost pulsatsioonidega saab hinnata, kui korreleerida nii V/R kui ka  $0,5 \cdot (V + R)$  varem leitud Si II joonte sininihkega (joonis 4.11).

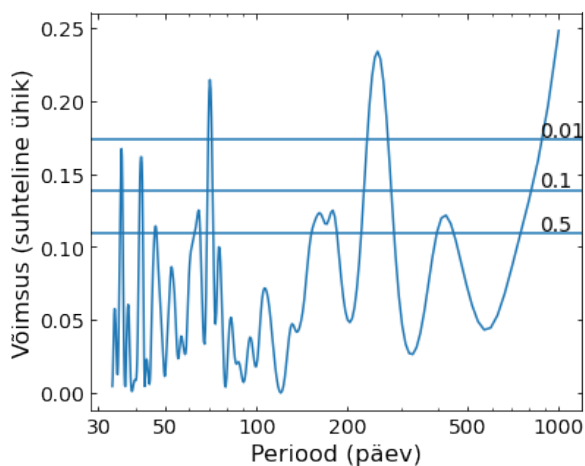


Joonis 4.11: Sc II kiirguskomponentide suhte (vasak) ja keskmise tugevuse (parem) seos Si II joonte põhjal mõõdetud radiaalkiirusega.

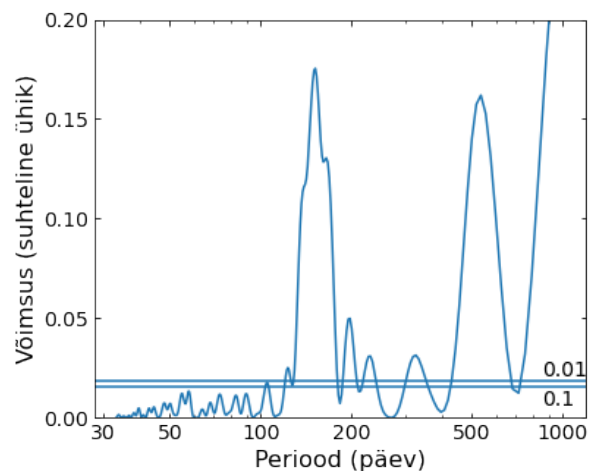
V/R suhte korrelatsioon radiaalkiiruse suurusega osutab, et keskmisest sininihkest ( $-56,3 \text{ km s}^{-1}$ ) suuremate väärtuste puhul on V/R reeglina madalam ja väiksemate sininihete korral on V/R reeglina kõrgem. Sellist seost võib põhjustada olukord, kus kiirguskomponendid V ja R tekivad suhteliselt stabiilses gaasikettas tähe lähedal. Sel juhul nende suhte arväärtuse spektris määrab pulseerimise mõjul muutuv täheatmosfääris tekkiva neeldumiskomponendi sininihe. Kui neeldumise sininihe on suurem, kahaneb V-komponendi intensiivsus ja vastupidi - kui neeldumise sininihe on väiksem, kahaneb R-komponendi intensiivsus. Niisugune seletus on uus argument, põhjendamaks kahetipulise kiirguskomponendi tekkimist tähte ümbritsevas kettas.

#### 4.3.4 Heledusvõnkumise perioodid

Lomb-Scargle'i periodogramm on algoritm ebahütlase sammuga andmetes perioodide leidmiseks ja karakteriseerimiseks. Sel meetodil arvutatakse Fourier-sarnane võimsusspekter, mille põhjal on



(a) Hipparcose heledusmõõtmised.



(b) AAVSO V-filtri silutud heleduskõver.

Joonis 4.12: Lomb-Scargle'i periodogrammid Hipparcose ja AAVSO andmete põhjal leitud perioodide kohta koos valehäire tõenäosuse nivoodega, mille juurde paremal servas on toodud tõenäosusnivoo väärtus.

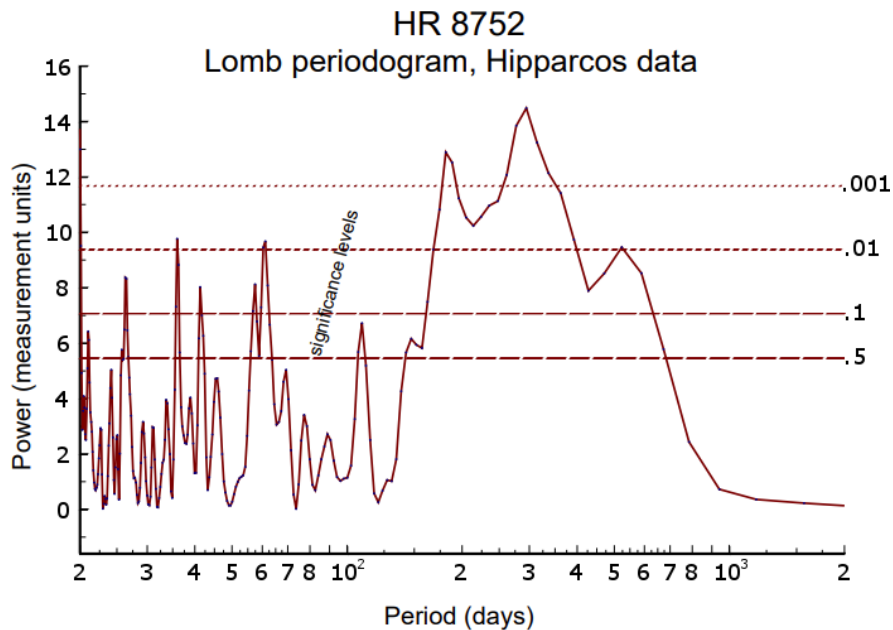
võimalik määrata võnkumise perioodi (van der Plas, 2018). Antud töös kasutati periodogrammi arvutamiseks Lomb-Scargle'i meetodit *Pythoni* paketi *astropy*. Otsiti V509 Cas pikaajalisi (30-1000 päeva) muutlikkuse perioode sarnaselt Nieuwenhuijzen ja de Jager (2000) artiklile. Muutlikkuse perioodid leiti nii Hipparcose heleduste kui ka AAVSO V-filtri heleduste mõõtmiste põhjal. Mõlemad periodogrammid on näha joonisel 4.12.

Horisontaaljooned joonistel 4.12b ja 4.12a on valehäire tõenäosused. Valehäire tõenäosus (ingl. k. *false-alarm probability*) näitab, mis on tõenäosus, et signaal, kus ei ole perioodilist komponenti, viiks sellise tugevusega piigi tekkimiseni. See ei ütle midagi valenegatiivsete tulemuste määra kohta, ehk mil määral on andmetes perioodilisi signaale, mis tulemustes ei kajastu (van der Plas, 2018).

Hipparcose andmete põhjal leitud perioodid (vt. joonis 4.12a) koos valehäire tõenäosustega on toodud Tabeli 4.1 2. veerus.

Hipparcose perioode on Lomb'i periodogrammiga uurinud varasemalt Nieuwenhuijzen ja de Jager (2000) (vt joonis 4.13).

Nieuwenhuijzen ja de Jager (2000) leidsid V509 Cas jaoks perioodid, mis on esitatud tabeli 4.1 1. veerus. Nad nentisid, et komponentide arv oli väga suur ja see võis olla seotud tähe ebastabiilsusega. Samuti oli artiklis välja toodud veel kaks muutlikkuse perioodi: 250 ja 190 päeva, millest andis artikli autoritele teada A. M. van Genderen V509 Cas pikaajalise fotomeetria põhjal. Nende juurde on tabelis sulgudesse lisatud kiri „pikaajaline“. Varasemalt uurisid ka Percy ja Zsoldos (1992) AAVSO andmete põhjal (vt joonis 2.7) muutlikkuse perioode ja said



Joonis 4.13: Logaritmiline Lomb'i periodogramm. *Significance levels* näitab valehäire tõenäosust, madalam väärtus tähendab suuremat usaldusväärsust (Nieuwenhuijzen ja de Jager, 2000).

tulemusteks: 203, 299 ja 385 päeva. Antud töö raames ja Nieuwenhuijzen ja de Jager (2000) leitud lühemad perioodid klappivad üsna hästi. Pikematel perioodidel on rohkem ebakõla: 510- ja 300-päevaseid perioode autori poolt ei leitud, aga tuli välja (tõsi küll, üsna olulise valehäire tõenäosusega) 424-päeva pikkune periood.

AAVSO silutud kõvera andmete põhjal on muutlikkuse perioodid (vt joonis 4.12b), mille valehäire tõenäosus oli väiksem kui 0,1 toodud tabeli 4.1 3. veerus. Valehäire tõenäosuse laiendamisega 0,5 piirini rohkem perioode ei lisandunud. Andmetest ei leitud perioode, mille pikkus on vähem kui 105 päeva, kuid pikemaajalised perioodid on üllatavalt sarnased Nieuwenhuijzen ja de Jager (2000) artiklis esitatutele. Kõik leitud perioodid on esitatud tabelis 4.1.

<b>Artikkel</b>	<b>Hipparcos</b>	<b>AAVSO</b>
510		536
	424, p<0,5	
300		326
250 (pikaajaline)	252	231
190 (pikaajaline)		198
180	179, p<0,5	
	162, p<0,5	165
		152
		123
		105, p<0,1
	70	
62	64, p<0,5	
58, p<0,1		
	46, p<0,5	
42, p<0,1	42, p<0,1	
37	36, p<0,1	

Tabel 4.1: Nieuwenhuijzen ja de Jager (2000) artiklis leitud perioodid (1. veerg), käesolevas töös Hipparcose andmete põhjal leitud perioodid (2. veerg) ja AAVSO andmete põhjal leitud perioodid (3. veerg). Perioodid on päevades. Kui valehäire tõenäosus  $p > 0,01$ , on see kirjutatud tabelis vastava perioodi kõrvale. Perioodid, mille taga on sulgudes „pikaajaline“ ei ole artiklis Lomb'i meetodil leitud, kuid on seal esitatud pikaajalise fotomeetria põhjal teadaolevate muutlikkuse perioodidena. Perioodid on esitatud pikkuse järjekorras ja nii, ühel real oleksid sarnased väärtused ja visuaalselt oleks lihtne näha, millised eri andmete põhjal saadud tulemused on sarnased

# Kokkuvõte

Magistritöös uuriti kollast hüperhiidtähte V509 *Cassiopeiae*. See täht on oma evolutsioonis väga ebastabiilses arengujärgus ja asub kollase evolutsioonilise tühimiku madalama temperatuuriga piirkonnas. Tähe puhul on varasemalt registreeritud kaks suuremat massikaotuse episoodi, mille käigus täht paiskas välja suure hulga ainet, tekitas enda ümber jahedama pseudo-fotosfääri ja mõõdeti tähe efektiivse temperatuuri järsku langust kuni 1000 K võrra (de Jager, 1998).

Töö eesmärgiks oli võrrelda V509 *Cas* spektraal- ja heledusmuutlikkust aastail 2015 - 2020 varasemate ajaperioodide muutlikkusega. Tartu observatooriumi 1,5 m teleskoobiga tehtud spektraalmõõtmiste põhjal hinnati tähe temperatuuri ja kinnitati hüpotees, et võrreldes 2000. aastate algusega (Nieuwenhuijzen *et al.*, 2012) on temperatuuri lühiajaliste võnkumiste amplituud kahanenud. Samuti leiti, et erinevalt 2000. aastate algusest, mil temperatuur oli tõusutrendis, on nüüd on märgata pigem temperatuuri väikest kahanemist  $16 \pm 5$  K võrra aastas. On ka võimalik, et temperatuur muutub pikaperioodilise lainena.

Uuriti heledusvõnkumise amplituude AAVSO V-filtri andmete põhjal ja selgus, et keskmine muutlikkus on 0,03 mag, mis on sarnane 1990. aastate algul Hipparcose mõõdetud heledusmuutlikkusega. Seega ei saanud kinnitust hüpoteesis esitatud heledusvõnkumise amplituudi kahanemine. Samuti hinnati heledusvõnkumiste perioode Lomb-Scargle'i meetodil. V509 *Cas*'le on omane kvaasi-perioodiline heledusmuutlikkus, seda kirjeldasid Nieuwenhuijzen ja de Jager (2000) Hipparcose andmete põhjal. Töös saadud pikemaajalised (> 100 päeva pikkused) perioodid olid üsna sarnased artikli tulemustele (kuigi kvaasi-perioodilisuse puhul seda ei oodatud), kuid AAVSO andmete põhjal ei leitud ühtegi lühiajalist (< 100 päeva) perioodi.

Kirjeldati tähe pulsatsiooniolekuid AAVSO heledusmõõtmiste ja Tartu observatooriumi spektrite põhjal leitud temperatuuri ning radiaalkiiruste abil. Leiti, et andmetes leiduvad ajahetked, mil tähe kokku tõmbumine või paisumine on algamas ja neid ajahetki kirjeldavad vastavalt keskmisest väiksemad ja suuremad sininihke väärtused.

Lisaks uuriti Sc II neeldumisjoont, mille mõlemas tiivas on kiirguskomponendid. Kiirguskomponentide suhte põhjal peetakse tõenäoliseks, et nad tekivad tähte ümbritsevas kettas ja nende tugevust mõjutab täheatmosfääris tekkiv Sc II neeldumiskomponent.

Neeldumiskomponendi sininihe sõltub pulsatsioonide olekust ja seega nõrgendab vastavalt kas punast või sinist kiirguskomponenti.

V509 *Cassiopeiae* teekond kollasesse tühimikku pakub kindlasti edasist uurimishuvi nii rahvusvaheliselt kui ka Tartu observatooriumis.

# Tänuavaldused

Suur tänu minu juhendajale Indrek Kolkale igakülge toetuse, heade soovitude ja mõnusate vestluste eest. Tänan Anna Aretit ja Tõnis Eenmäed toetuse ja nõuannete eest vaatlustel ja andmetöötusel. Tänusõnad kõigile, kes on V509 *Cas* vaadelnud ja kelle andmeid siin töös olen kasutanud. Tänan oma sõpru ja peret, kes on mind alati innustanud ja hoidnud.

Anni Kasikov



# Kirjandus

- Aret, A., Kolka, I., Kraus, M., ja Maravelias, G. (2017a). Similarities in the Structure of the Circumstellar Environments of B[e] Supergiants and Yellow Hypergiants. Kogumikus *The B[e] Phenomenon: Forty Years of Studies*, Miroshnichenko, A., Zharikov, S., Korčáková, D., ja Wolf, M. (toim), köide 508 sarjas *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, lk 239.
- Aret, A., Kraus, M., Kolka, I., ja Maravelias, G. (2017b). The Yellow Hypergiant - B[e] Supergiant Connection. Kogumikus *Stars: From Collapse to Collapse*, Balega, Y. Y., Kudryavtsev, D. O., Romanyuk, I. I., ja Yakunin, I. A. (toim), köide 510 sarjas *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, lk 162.
- Carroll, B. W. ja Ostlie, D. A. (2014). *An Introduction to Modern Astrophysics*, ptk 15, lk 581–582. Pearson Education Limited, second edition.
- de Jager, C. (1998). The yellow hypergiants. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 8(3):145–180.
- de Jager, C., Lobel, A., Israelian, G., ja Nieuwenhuijzen, H. (2001a). Will HR 8752 become a P Cygni type star? Kogumikus *P Cygni 2000: 400 Years of Progress*, de Groot, M. ja Sterken, C. (toim), köide 233 sarjas *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, lk 191.
- de Jager, C., Lobel, A., Nieuwenhuijzen, H., ja Stothers, R. (2001b). Instability regions in the upper HR diagram. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 327(2):452–458.
- de Jager, C. ja Nieuwenhuijzen, H. (1997). An obstacle to the late evolution of massive stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 290(3):L50–L54.
- Ekström, S., Georgy, C., Eggenberger, P., Meynet, G., Mowlavi, N., Wyttenbach, A., Granada, A., Decressin, T., Hirschi, R., Frischknecht, U., Charbonnel, C., ja Maeder, A. (2012). Grids of stellar models with rotation. I. Models from 0.8 to 120  $M_{\odot}$  at solar metallicity ( $Z = 0.014$ ). *Astronomy and Astrophysics*, 537:A146.
- ESA (1997). The Hipparcos and Tycho catalogues. ESA SP-1200.

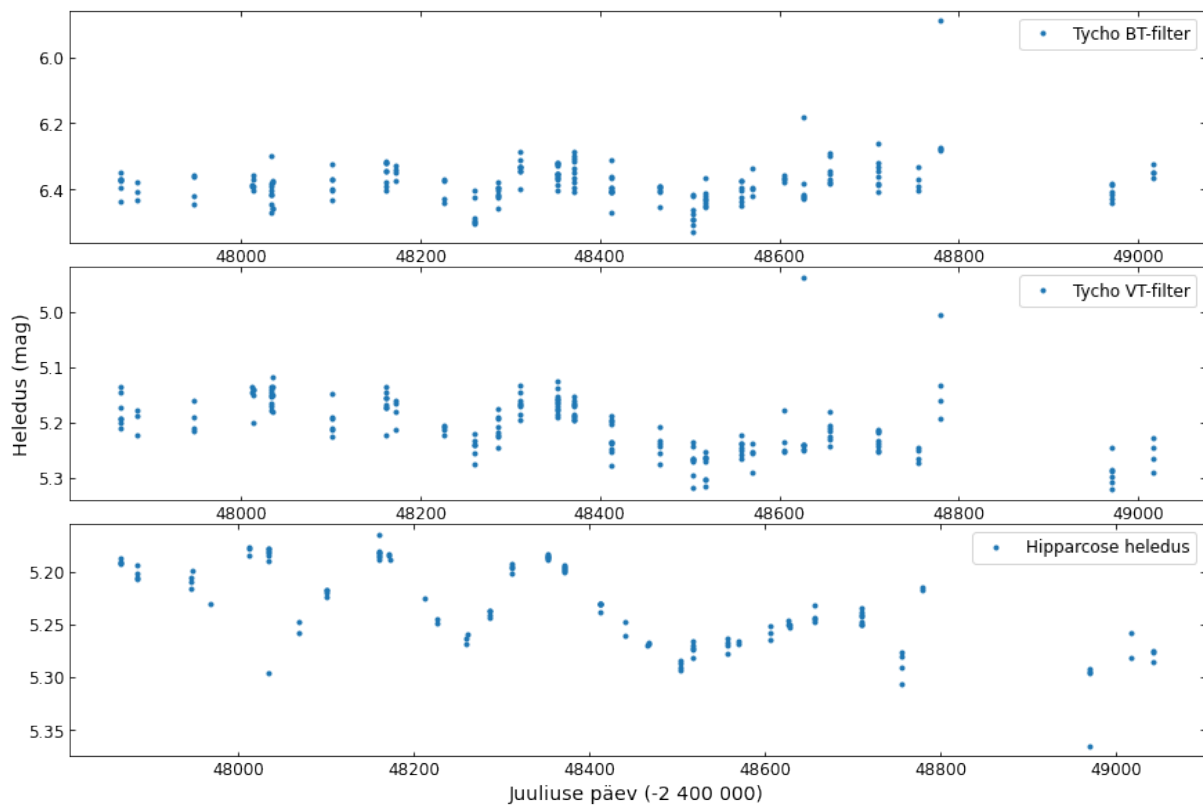
- Fadeyev, Y. A. (2011). Pulsational instability of yellow hypergiants. *Astronomy Letters*, 37(6):403–413.
- Gordon, M. S. ja Humphreys, R. M. (2019). Red Supergiants, Yellow Hypergiants, and Post-RSG Evolution. *Galaxies*, 7(4):92.
- Israelian, G., Lobel, A., ja Schmidt, M. (2001). Stellar evolution of the hypergiants HR 8752 and  $\rho$  Cassiopeiae on human timescales. Kogumikus *11th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems and the Sun*, Garcia Lopez, R. J., Rebolo, R., ja Zapaterio Osorio, M. R. (toim), köide 223 sarjas *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, lk 1609.
- Israelian, G., Lobel, A., ja Schmidt, M. R. (1999). The yellow hypergiants HR 8752 and  $\rho$  cassiopeiae near the evolutionary border of instability. *The Astrophysical Journal*, 523(2):L145–L149.
- Kasikov, A. (2019). Kollase hüperhiidtähe V509 *Cassiopeiae* temperatuurimuutuste uurimine. Bakalaureusetöö, Tartu Ülikool, füüsika instituut.
- Klochkova, V. G. (2019). Unity and diversity of yellow hypergiants family. *Astrophysical Bulletin*, 74(4):475–489.
- Klochkova, V. G., Chentsov, E. L., ja Panchuk, V. E. (2019). On Extended Atmosphere of V509 Cas Hypergiant in 1996-2018. *Astrophysical Bulletin*, 74(1):41–54.
- Koumpia, E., Oudmaijer, R. D., Graham, V., Banyard, G., Black, J. H., Wichittanakom, C., Ababakr, K. M., de Wit, W.-J., Millour, F., Lagadec, E., Muller, S., Cox, N. L. J., Zijlstra, A., van Winckel, H., Hillen, M., Szczerba, R., Vink, J. S., ja Wallstrom, S. H. J. (2020). Optical and near-infrared observations of the Fried Egg Nebula. *Astronomy and Astrophysics*, 635:A183.
- Kovtyukh, V. V. (2007). High-precision effective temperatures of 161 FGK supergiants from line-depth ratios. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 378:617–624.
- Lambert, D. ja Luck, R. (1978). Spectrum variations of the superluminous star HR 8752. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 184:405–422.
- Lobel, A. (2001). On the dynamic stability of cool supergiant atmospheres. *The Astrophysical Journal*, 558(2):780–801.
- Lobel, A., Aufdenberg, J. P., Ilyin, I., ja Rosenbush, A. E. (2005). Mass-loss and recent spectral changes in the yellow hypergiant  $\rho$  Cassiopeiae. Kogumikus *13th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems and the Sun*, Favata, F., Hussain, G. A. J., ja Battrick, B. (toim), köide 560 sarjas *ESA Special Publication*, lk 771.

- Massey, P. (1997). A user's guide to CCD reductions with IRAF. [http://ircamera.as.arizona.edu/Astr\\_518/irafguid.pdf](http://ircamera.as.arizona.edu/Astr_518/irafguid.pdf). Viimati vaadatud: 11.05.2021.
- Massey, P. (2003). Massive stars in the local group: Implications for stellar evolution and star formation. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 41(1):15–56.
- Massey, P., Valdes, F., ja Barnes, J. (1992). A user's guide to reducing slit spectra with IRAF. <https://www.mn.uio.no/astro/english/services/it/help/visualization/iraf/spect.pdf>. Viimati vaadatud: 11.05.2021.
- Nieuwenhuijzen, H. ja de Jager, C. (1995). Atmospheric accelerations and the stability of dynamic supergiant atmospheres. *Astronomy and Astrophysics*, 302:811.
- Nieuwenhuijzen, H. ja de Jager, C. (2000). Checking the yellow evolutionary void. Three evolutionary critical Hypergiants: HD 33579, HR 8752 & IRC +10420. *Astronomy and Astrophysics*, 353:163–176.
- Nieuwenhuijzen, H., De Jager, C., Kolka, I., Israelian, G., Lobel, A., Zsoldos, E., Maeder, A., ja Meynet, G. (2012). The hypergiant HR 8752 evolving through the yellow evolutionary void. *Astronomy and Astrophysics*, 546:A105.
- Oudmaijer, R. D., Groenewegen, M. A. T., Matthews, H. E., Blommaert, J. A. D. L., ja Sahu, K. C. (1996). The spectral energy distribution and mass-loss history of IRC + 10420. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 280(4):1062–1070.
- Percy, J. ja Zsoldos, E. (1992). Photometry of yellow semiregular variables - HR 8752 (= V509 Cassiopeiae). *Astronomy and Astrophysics*, 263:123–128.
- Piters, A., de Jager, C., ja Nieuwenhuijzen, H. (1988). The atmospheric structure, stellar wind and binary characteristics of the hypergiant HR 8752 (G0-5Ia+). *Astronomy and Astrophysics*, 196:115–127.
- Schuster, M. T., Humphreys, R. M., ja Marengo, M. (2006). The circumstellar environments of nml cygni and the cool hypergiants. *The Astronomical Journal*, 131(1):603–611.
- Schuster, M. T., Humphreys, R. M., Smith, N., Davidson, K., ja Gehrz, R. D. (2003). A gallery of cool hypergiants — imaging their circumstellar environments. *Kogumikus A Massive Star Odyssey: From Main Sequence to Supernova*, van der Hucht, K., Herrero, A., ja Esteban, C. (toim), köide 212, lk 228.
- Shenstone, A. G. (1961). The second spectrum of silicon. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 261:153–174.

- Smoliński, J., Climenhaga, J. L., ja Fletcher, J. M. (1989). Mass ejections from the G-type hypergiant HR 8752. *International Astronomical Union Colloquium*, 113:131–134.
- Stickland, D. J. ja Harmer, D. L. (1978). The discovery of a hot companion to HR 8752. *Astronomy and Astrophysics*, 70:L53–L56.
- Stothers, R. B. (2012). Yellow Hypergiants Show Long Secondary Periods? *The Astrophysical Journal*, 751(2):151.
- Stothers, R. B. ja Chin, C.-W. (2001). Yellow hypergiants as dynamically unstable post-red supergiant stars. *Astrophys. J.*, 560:934–936.
- STScI (2020). Tess missiooni andmed Space Telescope Science Institute (STScI) MAST arhiivist. <https://mast.stsci.edu/portal/Mashup/Clients/Mast/Portal.html>.
- Tenjes, P. (2020). Astronoomia: õpik füüsikahuvilisele. <https://opik.fyysika.ee/index.php/book/view/71/vertical#/section/14141>. Viimati vaadatud: 15.04.2021.
- van der Plas, J. T. (2018). Understanding the lomb-scargle periodogram. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 236(1):16.
- van Genderen, A. M., Lobel, A., Nieuwenhuijzen, H., Henry, G. W., de Jager, C., Blown, E., Di Scala, G., ja van Ballegoij, E. J. (2019). Pulsations, eruptions, and evolution of four yellow hypergiants. *Astronomy and Astrophysics*, 631:A48.
- Yamamuro, T., Nishimaki, Y., Motohara, K., Miyata, T., ja Tanaka, M. (2007). Near-infrared spectroscopic monitoring observations of three yellow hypergiants and time variation of 2.3  $\mu\text{m}$  CO features of  $\rho$  Cassiopeia. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 59:973.
- Zwitter, T. ja Munari, U. (2000). An introduction to analysis of single-dispersion spectra with IRAF. [https://ulisse.oapd.inaf.it/Astro/AsMon/Vol\\_1/as\\_mon\\_1.pdf](https://ulisse.oapd.inaf.it/Astro/AsMon/Vol_1/as_mon_1.pdf). Viimati vaadatud: 11.05.2021.

# Lisa A

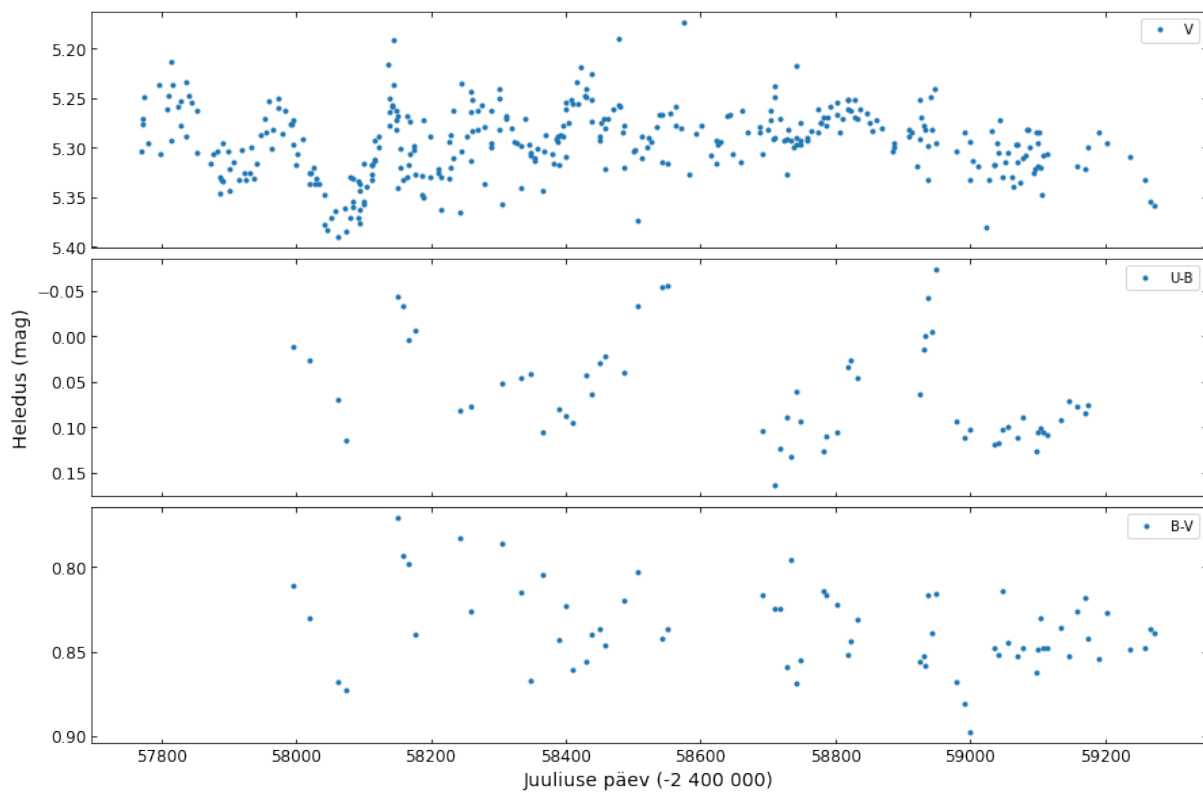
## Hipparcose andmed



Joonis A.1: Hipparcos/Tycho kataloogide andmed V509 *Cas* kohta (ESA, 1997).

# Lisa B

## AAVSO andmed



Joonis B.1: AAVSO kataloogi andmed. U-, B- ja osad V-filtri heledused on mõõtnud M. Sblewski ja enamik V-filtri heledustest on vaadeldud W. Vollmann poolt.

**Lisa C**

**Andmetabel 1**

HJD	$CaI_{\lambda}$	CaI y	FeII $_{\lambda}$	FeII y	CaI/FeII suhe	suhe err	$T_{eff}$	$T_{eff}$ err	SiII47 $_{\lambda}$	SiII47 $v_{Dop}$	SiII71 $_{\lambda}$	SiII71 $v_{Dop}$
2457151.544	6438.12	0.9655	6455.32	0.9562	0.79	0.15	7912	72	6346.12	-46.76	6370.35	-47.99
2457159.5014	6438.24	0.9725	6445.28	0.954	0.6	0.13	7999	53	6346.12	-46.76	6370.37	-47.05
2457165.4636	6438.06	0.9673	6445.42	0.9536	0.7	0.13	7955	61	6346.15	-45.34	6370.39	-46.11
2457185.4073	6437.46	0.9655	6445.11	0.9541	0.75	0.14	7931	65	6345.92	-56.21	6370.18	-55.99
2457206.4093	6437.89	0.9428	6445.37	0.9418	0.98	0.12	7811	68	6345.9	-57.15	6370.19	-55.52
2457208.4103	6437.88	0.948	6445.31	0.9407	0.88	0.11	7866	59	6345.95	-54.79	6370.22	-54.11
2457221.3988	6437.92	0.9357	6445.06	0.9452	1.17	0.14	7697	89	6345.89	-57.62	6370.17	-56.46
2457631.5329	6437.82	0.9667	6445.15	0.9488	0.65	0.12	7977	51	6345.91	-56.68	6370.18	-55.99
2457637.5149	6437.86	0.9665	6445.22	0.9492	0.66	0.12	7973	52	6345.96	-54.32	6370.23	-53.64
2457646.3545	6437.84	0.964	6445.36	0.9563	0.82	0.15	7897	75	6345.98	-53.37	6370.23	-53.64
2457722.2518	6438.0	0.9657	6445.14	0.9526	0.72	0.13	7945	61	6346.0	-52.43	6370.25	-52.7
2457729.507	6437.59	0.9676	6445.07	0.9547	0.72	0.14	7945	63	6346.0	-52.43	6370.23	-53.64
2457758.4233	6437.88	0.9608	6445.19	0.9456	0.72	0.11	7945	53	6345.9	-57.15	6370.16	-56.93
2457760.3502	6437.61	0.9543	6444.96	0.9505	0.92	0.14	7845	75	6345.85	-59.51	6370.12	-58.82
2457765.3558	6437.72	0.9547	6445.08	0.9496	0.9	0.13	7855	71	6345.88	-58.1	6370.13	-58.35
2457775.3642	6437.79	0.9446	6445.14	0.9471	1.05	0.14	7771	81	6345.9	-57.15	6370.13	-58.35
2457794.3068	6437.86	0.9418	6445.21	0.9398	0.97	0.12	7817	65	6345.91	-56.68	6370.18	-55.99
2457848.4466	6437.63	0.9595	6445.02	0.946	0.75	0.12	7931	55	6345.79	-62.35	6370.06	-61.64
2457862.453	6437.72	0.9512	6445.03	0.941	0.83	0.11	7892	56	6345.79	-62.35	6370.07	-61.17
2457867.4351	6437.73	0.9557	6445.01	0.9477	0.85	0.13	7882	65	6345.75	-64.24	6370.03	-63.05
2457875.4467	6437.85	0.9539	6445.07	0.9478	0.88	0.13	7866	67	6345.77	-63.29	6370.03	-63.05
2457882.4119	6437.82	0.9527	6445.05	0.9471	0.89	0.13	7861	67	6345.8	-61.88	6370.09	-60.23
2457893.4153	6437.81	0.9538	6445.04	0.9404	0.78	0.11	7917	52	6345.85	-59.51	6370.13	-58.35
2457920.4449	6438.01	0.9525	6445.24	0.9464	0.89	0.12	7861	66	6345.96	-54.32	6370.22	-54.11
2457957.5081	6437.73	0.9526	6445.13	0.9454	0.87	0.12	7871	63	6345.91	-56.68	6370.17	-56.46
2457980.5272	6437.9	0.9602	6445.26	0.9474	0.76	0.12	7927	57	6345.99	-52.9	6370.28	-51.29
2457995.2944	6437.86	0.9639	6445.17	0.9486	0.7	0.12	7955	55	6345.94	-55.26	6370.22	-54.11
2458019.4517	6438.0	0.9609	6445.09	0.9526	0.82	0.14	7897	69	6345.73	-65.18	6370.04	-62.58
2458025.2558	6437.6	0.9606	6445.13	0.9608	1.01	0.18	7794	104	6345.76	-63.76	6370.05	-62.11
2458047.5083	6437.61	0.9379	6445.2	0.952	1.29	0.17	7618	116	6345.78	-62.82	6370.07	-61.17



HJD	$CaI_{\lambda}$	Cal y	FeII $_{\lambda}$	FeII y	CaI/FeII suhe	suhe err	$T_{eff}$	$T_{eff}$ err	SiII47 $_{\lambda}$	SiII47 $v_{Dop}$	SiII71 $_{\lambda}$	SiII71 $v_{Dop}$
2458051.4386	6437.7	0.9323	6445.0	0.9466	1.27	0.15	7632	102	6345.76	-63.76	6370.04	-62.58
2458058.3444	6437.7	0.9241	6445.1	0.9421	1.31	0.14	7605	98	6345.84	-59.99	6370.11	-59.29
2458135.1893	6438.1	0.9675	6445.3	0.9547	0.72	0.14	7945	63	6346.18	-43.93	6370.44	-43.76
2458170.2553	6437.7	0.9648	6445.21	0.9524	0.74	0.13	7936	62	6345.94	-55.26	6370.15	-57.4
2458171.1285	6437.73	0.9631	6445.21	0.9528	0.78	0.13	7917	66	6345.94	-55.26	6370.19	-55.52
2458207.607	6437.78	0.9433	6445.1	0.9485	1.1	0.14	7741	88	6345.85	-59.51	6370.16	-56.93
2458248.4959	6437.72	0.9562	6445.04	0.9506	0.89	0.14	7861	72	6345.89	-57.62	6370.18	-55.99
2458258.44	6437.94	0.9652	6445.26	0.9502	0.7	0.12	7955	56	6345.87	-58.57	6370.17	-56.46
2458267.4477	6437.84	0.9662	6445.15	0.9483	0.65	0.12	7977	51	6345.86	-59.04	6370.16	-56.93
2458298.426	6437.78	0.9624	6445.24	0.948	0.72	0.12	7945	55	6345.89	-57.62	6370.19	-55.52
2458316.4439	6437.79	0.9575	6445.27	0.9449	0.77	0.11	7922	56	6345.97	-53.85	6370.18	-55.99
2458324.5043	6437.78	0.9572	6445.09	0.9431	0.75	0.11	7931	53	6345.85	-59.51	6370.15	-57.4
2458331.3763	6437.74	0.9575	6445.12	0.9473	0.81	0.12	7902	61	6345.85	-59.51	6370.11	-59.29
2458334.366	6437.8	0.955	6444.95	0.9439	0.8	0.11	7907	57	6345.87	-58.57	6370.12	-58.82
2458339.4001	6437.79	0.954	6445.1	0.9477	0.88	0.13	7866	67	6345.85	-59.51	6370.14	-57.88
2458344.3549	6437.78	0.956	6445.09	0.948	0.85	0.13	7882	65	6345.86	-59.04	6370.12	-58.82
2458406.3788	6438.03	0.9503	6445.35	0.9509	1.01	0.14	7794	83	6346.01	-51.96	6370.27	-51.76
2458409.3642	6438.04	0.9486	6445.26	0.9522	1.08	0.15	7753	92	6346.01	-51.96	6370.27	-51.76
2458527.2791	6437.86	0.9465	6445.2	0.9521	1.12	0.16	7729	97	6345.99	-52.9	6370.24	-53.17
2458536.2102	6437.88	0.9476	6445.28	0.9532	1.12	0.16	7729	99	6345.96	-54.32	6370.22	-54.11
2458544.2228	6437.83	0.951	6445.22	0.9516	1.01	0.15	7794	85	6345.96	-54.32	6370.21	-54.58
2458569.5964	6438.05	0.949	6445.19	0.9438	0.91	0.12	7850	65	6345.89	-57.62	6370.15	-57.4
2458575.5578	6437.98	0.9559	6445.32	0.9498	0.88	0.13	7866	70	6345.93	-55.73	6370.18	-55.99
2458577.5427	6437.94	0.9557	6445.26	0.9514	0.91	0.14	7850	75	6345.98	-53.37	6370.24	-53.17
2458589.4569	6438.28	0.9681	6445.1	0.9558	0.72	0.14	7945	65	6345.95	-54.79	6370.2	-55.05
2458598.4568	6437.7	0.9654	6441.72	0.9613	0.89	0.17	7861	92	6345.87	-58.57	6370.12	-58.82
2458657.4303	6437.9	0.944	6445.15	0.9512	1.15	0.16	7710	98	6345.89	-57.62	6370.15	-57.4
2458685.4716	6438.0	0.9412	6445.18	0.9456	1.08	0.14	7753	81	6345.98	-53.37	6370.24	-53.17
2458711.5172	6437.91	0.9533	6445.25	0.9516	0.96	0.14	7823	80	6345.97	-53.85	6370.24	-53.17
2458712.4627	6437.91	0.9551	6445.25	0.9448	0.81	0.12	7902	58	6345.99	-52.9	6370.25	-52.7

HJD	$Ca\lambda$	Ca $\lambda$	FeII $\lambda$	FeII $\lambda$	CaI/FeII suhe	suhe err	$T_{eff}$	$T_{eff}$ err	SiII47 $\lambda$	SiII47 $v_{Dop}$	SiII71 $\lambda$	SiII71 $v_{Dop}$
2458721.3682	6437.88	0.9495	6445.23	0.9441	0.9	0.12	7855	64	6346.04	-50.54	6370.25	-52.7
2458731.3493	6437.92	0.9481	6445.27	0.9461	0.96	0.13	7823	72	6346.01	-51.96	6370.24	-53.17
2458812.2451	6437.77	0.9595	6445.09	0.9576	0.96	0.16	7823	91	6345.94	-55.26	6370.16	-56.93
2458829.583	6437.77	0.9397	6445.09	0.9493	1.19	0.15	7685	99	6345.87	-58.57	6370.11	-59.29
2458871.315	6437.92	0.9528	6445.23	0.9494	0.93	0.14	7839	74	6345.96	-54.32	6370.19	-55.52
2458883.1995	6437.92	0.9545	6445.23	0.9493	0.9	0.13	7855	71	6345.8	-61.88	6370.14	-57.88
2458923.297	6437.85	0.9403	6445.05	0.9456	1.1	0.14	7741	83	6345.88	-58.1	6370.15	-57.4
2458932.5527	6438.0	0.9477	6445.14	0.9531	1.12	0.16	7729	99	6345.86	-59.04	6370.12	-58.82
2458949.5109	6438.1	0.9598	6445.07	0.9487	0.78	0.12	7917	61	6345.81	-61.4	6370.08	-60.7
2458956.5338	6437.82	0.9602	6445.13	0.9533	0.85	0.14	7882	73	6345.81	-61.4	6370.09	-60.23
2458961.4664	6437.67	0.9605	6445.14	0.952	0.82	0.13	7897	68	6345.82	-60.93	6370.08	-60.7
2458977.4524	6437.63	0.949	6444.94	0.9566	1.18	0.18	7691	114	6345.72	-65.65	6370.01	-63.99
2458998.4764	6437.92	0.9291	6445.23	0.9446	1.28	0.15	7625	99	6345.92	-56.21	6370.19	-55.52
2459014.4338	6437.98	0.9281	6444.95	0.9511	1.47	0.18	7490	136	6345.9	-57.15	6370.16	-56.93
2459057.3907	6437.84	0.9506	6445.32	0.9517	1.02	0.15	7788	86	6346.03	-51.01	6370.27	-51.76
2459071.4249	6437.83	0.9525	6445.31	0.9512	0.97	0.14	7817	80	6346.01	-51.96	6370.26	-52.23
2459090.4101	6437.91	0.9444	6445.22	0.9471	1.05	0.14	7771	81	6346.01	-51.96	6370.25	-52.7
2459115.299	6437.85	0.9305	6445.16	0.9366	1.1	0.12	7741	71	6345.94	-55.26	6370.19	-55.52
2459119.6183	6437.97	0.9344	6445.11	0.9422	1.13	0.13	7722	81	6345.96	-54.32	6370.21	-54.58
2459129.375	6438.08	0.9366	6445.22	0.942	1.09	0.13	7747	77	6345.97	-53.85	6370.22	-54.11
2459151.2657	6437.94	0.9599	6445.25	0.9483	0.78	0.12	7917	60	6346.02	-51.48	6370.27	-51.76
2459162.3532	6437.72	0.9609	6445.19	0.9452	0.71	0.11	7950	52	6345.93	-55.73	6370.17	-56.46
2459177.2551	6437.8	0.9479	6445.11	0.9466	0.98	0.13	7811	74	6345.85	-59.51	6370.11	-59.29

Tabel C.1: Nurga 47° spektrite andmed.  $\lambda$ -alaindeksiga on spektrijoone mõõdetud lainepikkus,  $\gamma$ -alaindeks on spektrijoone tugeus kontinuumi suhtes. Si II jooned ( $\lambda = 6347 \text{ \AA}$ ) ja ( $\lambda = 6371 \text{ \AA}$ ) on vastavalt tabeli veergudes „SiII47“ ja „SiII71“

# Lisa D

## Andmetabel 2

HJD	ScIIb $_{\lambda}$	ScIIb $_{\gamma}$	ScIIa $_{\lambda}$	ScIIa $_{\gamma}$	ScIIr $_{\lambda}$	ScIIr $_{\gamma}$
2457159.4862	6602.58	1.043	6603.58	0.998	6604.33	1.039
2457165.4449	6602.59	1.036	6603.58	1.004	6604.25	1.037
2457185.4349	6602.21	1.027	6603.01	1.006	6604.03	1.042
2457206.4243	6602.46	1.032	6603.36	0.9742	6604.33	1.046
2457208.3932	6602.49	1.029	6603.33	0.9704	6604.33	1.037
2457221.3813	6602.31	1.035	6603.33	0.9572	6604.35	1.039
2457637.4987	6602.43	1.031	6603.4	0.9854	6604.24	1.033
2457646.4172	6602.39	1.031	6603.31	0.9817	6604.35	1.022
2457722.1288	6602.29	1.046	6603.41	1.0	6604.36	1.033
2457729.4891	6602.53	1.048	6603.33	1.008	6604.13	1.034
2457760.416	6602.33	1.054	6603.23	0.9895	6604.04	1.047
2457765.4357	6602.34	1.048	6603.18	0.9878	6604.16	1.041
2457775.2401	6602.34	1.05	6603.31	0.9747	6604.13	1.042
2457794.2584	6602.46	1.064	6603.31	0.9731	6604.16	1.04
2457848.4246	6602.31	1.033	6602.97	0.9997	6604.11	1.048
2457862.4372	6602.3	1.042	6603.12	0.9758	6604.1	1.047
2457867.4135	6602.26	1.045	6603.24	0.979	6604.07	1.047
2457875.5516	6602.35	1.041	6603.28	0.9714	6604.1	1.047
2457882.3893	6602.32	1.042	6603.24	0.9722	6604.23	1.041
2457893.3965	6602.19	1.027	6603.17	0.9728	6604.15	1.041
2457920.449	6602.44	1.038	6603.27	0.9756	6604.25	1.029
2457957.4906	6602.33	1.045	6603.16	0.9831	6604.13	1.031
2457980.3963	6602.48	1.05	6603.46	0.9777	6604.12	1.033
2457995.3163	6602.56	1.039	6603.5	0.99	6604.18	1.039
2458021.3124	6602.75	1.027	6603.57	0.998	6604.38	1.039
2458023.3322	6602.46	1.026	6603.42	1.002	6604.24	1.038
2458025.3334	6602.45	1.033	6603.28	1.004	6604.26	1.046
2458047.4874	6602.25	1.034	6603.07	0.9661	6604.05	1.037
2458051.4573	6602.24	1.033	6603.07	0.9548	6604.05	1.035

HJD	ScIIb $_{\lambda}$	ScIIb $_{y}$	ScIIa $_{\lambda}$	ScIIa $_{y}$	ScIIr $_{\lambda}$	ScIIr $_{y}$
2458058.3628	6602.33	1.038	6603.14	0.9425	6604.12	1.036
2458135.3629	6602.4	1.064	6603.37	1.003	6604.19	1.033
2458171.2382	6602.43	1.042	6603.24	1.001	6604.1	1.039
2458195.4601	6602.35	1.042	6603.16	0.9734	6604.14	1.033
2458221.4884	6602.43	1.042	6603.41	0.9634	6604.23	1.03
2458248.5059	6602.29	1.046	6603.41	0.9839	6604.25	1.029
2458258.4059	6602.36	1.034	6603.27	0.9838	6604.09	1.029
2458267.4952	6602.37	1.035	6603.36	0.9872	6604.18	1.039
2458298.4691	6602.35	1.035	6603.33	0.9902	6604.3	1.033
2458316.4874	6602.15	1.027	6603.3	0.9852	6604.12	1.035
2458325.3523	6602.2	1.026	6603.35	0.9829	6604.17	1.034
2458331.4685	6602.2	1.026	6603.17	0.9812	6604.01	1.033
2458339.4421	6602.29	1.03	6603.28	0.9784	6604.13	1.029
2458344.3355	6602.27	1.037	6603.25	0.982	6604.16	1.033
2458406.4367	6602.6	1.037	6603.59	0.9707	6604.4	1.014
2458409.3831	6602.62	1.044	6603.6	0.98	6604.41	1.021
2458527.2528	6602.38	1.044	6603.37	0.9747	6604.35	1.028
2458536.1825	6602.38	1.044	6603.36	0.9783	6604.19	1.024
2458544.2006	6602.37	1.046	6603.19	0.982	6604.34	1.024
2458569.5686	6602.51	1.06	6603.33	0.9782	6604.15	1.039
2458575.5407	6602.48	1.061	6603.46	0.9862	6604.15	1.038
2458577.5266	6602.55	1.065	6603.53	0.9877	6604.18	1.04
2458589.4411	6602.65	1.047	6603.47	0.9989	6604.3	1.033
2458598.4352	6602.45	1.042	6603.41	1.011	6604.25	1.036
2458657.4524	6602.28	1.027	6603.47	0.9748	6604.29	1.027
2458685.4868	6602.38	1.028	6603.37	0.9639	6604.18	1.023
2458712.4814	6602.51	1.034	6603.35	0.9739	6604.17	1.027
2458721.3859	6602.47	1.035	6603.45	0.9708	6604.28	1.024
2458731.376	6602.36	1.045	6603.34	0.9756	6604.16	1.021
2458741.4576	6602.46	1.049	6603.36	0.9742	6604.18	1.025
2458812.2228	6602.41	1.032	6603.51	0.9991	6604.17	1.016
2458871.3452	6602.44	1.049	6603.39	0.9797	6604.19	1.034
2458883.1833	6602.28	1.044	6603.25	0.9873	6604.22	1.031
2458923.2728	6602.5	1.044	6603.31	0.9553	6604.11	1.024
2458932.535	6602.56	1.043	6603.36	0.9612	6604.16	1.023
2458949.4963	6602.47	1.027	6603.27	0.9861	6604.07	1.037
2458956.5208	6602.35	1.027	6603.16	0.9924	6604.11	1.033
2458977.4399	6604.0	1.052	6605.44	0.9997	6606.24	1.027
2458998.4605	6602.31	1.025	6603.27	0.9373	6604.23	1.037
2459014.4206	6602.32	1.036	6603.28	0.939	6604.24	1.019

HJD	ScIIb <sub>λ</sub>	ScIIb <sub>y</sub>	ScIIa <sub>λ</sub>	ScIIa <sub>y</sub>	ScIIr <sub>λ</sub>	ScIIr <sub>y</sub>
2459048.4564	6602.21	1.035	6603.33	0.9845	6604.29	1.015
2459057.4126	6602.51	1.038	6603.48	0.9832	6604.12	1.02
2459071.4402	6602.33	1.026	6603.45	0.9789	6604.09	1.024
2459090.3926	6602.58	1.04	6603.38	0.9748	6604.18	1.023
2459115.3154	6602.49	1.047	6603.29	0.9538	6604.09	1.024
2459119.4167	6602.5	1.032	6603.46	0.9522	6604.1	1.014
2459120.6146	6602.55	1.028	6603.45	0.9528	6604.25	1.02
2459129.3916	6602.44	1.043	6603.4	0.9544	6604.2	1.017
2459151.2855	6602.46	1.042	6603.42	0.9871	6604.22	1.025
2459162.3146	6602.39	1.043	6603.19	0.9849	6604.15	1.03
2459177.2394	6602.31	1.053	6603.11	0.9658	6604.07	1.04

Tabel D.1: Nurga 47° spektrite andmed.  $\lambda$ -alaindeksiga on spektrijoone mõõdetud lainepikkus,  $y$ -alaindeks on spektrijoone tugeus kontinuumi suhtes. Sc II lühemalainepikkuseline emissioonikomponent on märgitud tähega „b“, neeldumiskomponent „a“ ja pikemalainepikkuseline emissioonikomponent „r“.

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

Mina, Anni Kasikov,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

**Uued trendid kollase hüperhiidtähe V509 *Cassiopeiae* muutlikkuses,**

mille juhendaja on Indrek Kolka, PhD, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. olen teadlik, et punktis 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Anni Kasikov,

Tartu, 31. mai 2021. a.