

TARTU ÜLIKOOL
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Tartu observatoorium

Anni Kasikov

**KOLLASE HÜPERHIIDTÄHE V509 *Cassiopeiae*
TEMPERATUURIMUUTUSTE UURIMINE**

Bakalaureusetöö (6 EAP)

Füüsika eriala

Juhendaja:
Indrek Kolka, PhD

Tartu 2019

Kollase hüperhiidtähe V509 *Cassiopeiae* temperatuurimuutuste uurimine

V509 *Cas* on kollane hüperhiidtäht. See tähendab, et tähe fotosfäär on väga muutlik ja talle on omased suured massikaotuse episoodid, mis toovad endaga kaasa tähe efektiivse temperatuuri kõikumise. 2000. aastate alguses täheldati, et tähe temperatuuri varasem kiire tõus on aeglustunud, olles jõudnud umbes 8000 kelvinini. Antud töös töödeldi Tartu observatooriumis mõõdetud 19 vaatlusöö tähespektrid ajavahemikus septembrist 2017 kuni augustini 2018. Andmetöötlus viidi läbi programmis IRAF ning igalt spektrilt leiti kontinuumi suhtes Ca I (6439 Å) ja Fe II (6446 Å) spektrijoonte sügavused. Tegemist on temperatuuritundlike joontega. Järgnevalt leiti joonte sügavuste suhte ja temperatuuri seose põhjal tähe efektiivse temperatuuri väärtused. Selgus, et temperatuur on jäänud püsima 8000 K juurde ning võrreldes varasemate tulemustega on vähenenud temperatuuri kõikumine, mis vihjab stabiliseerumisele tähe fotosfääris.

Märksõnad: tähed, temperatuur, muutlikkus, ülihiid, meetod: spektroskoopia
CERCS: P520 — Astronoomia, kosmoseuuringud, kosmosekeemia

Investigation of Temperature Variability in the Yellow Hypergiant V509 *Cassiopeiae*

V509 *Cas* is a yellow hypergiant star. Its photosphere is unstable and the star is subject to large episodes of mass-loss, which result in variability of the star's effective temperature. In the beginning of 2000s, it was observed that star's former rapid rise in effective temperature had slowed when temperature reached about 8000 K. In the given study spectra from 19 observations, that were made in Tartu observatory between September 2017 and August 2018, were analyzed. Data processing was done with IRAF and from each spectra Ca I (6439 Å) and Fe II (6446 Å) spectral line depths were measured in relation to continuum. Both spectral lines are highly temperature sensitive. Using the relation between line depth ratio and star's effective temperature, temperature values were calculated. As a result it was found that the star's temperature has remained steady at 8000 K and in comparison to former results, fluctuations in effective temperature have decreased. The latter can be a hint of stabilization in the star's photosphere.

Keywords: stars, temperature, variability, supergiants, method: spectroscopy
CERCS: P520 — Astronomy, space research, cosmic chemistry

Sisukord

Sissejuhatus	5
1 Kollased hüperhiid	7
1.1 Kollaste hüperhiidude omadused	7
1.2 Kollaste hüperhiidude evolutsioon	9
1.2.1 Kollane evolutsiooniline tühimik	9
2 Kollane hüperhiid V509 Cassiopeiae (HR 8752)	12
2.1 Massikaotuse perioodid ja temperatuurimuutused	12
2.1.1 Temperatuurimuutused aastatel 1970-1983	13
2.1.2 Temperatuurimuutused peale 1983. aastat	13
2.2 Keelatud lämmastiku [N II] jooned V509 Cas spektris	14
3 Vaatlused ja andmetöötlus	16
3.1 Vaatlused	16
3.2 Andmetöötlus	17
3.2.1 Eelpingekaadrid	17
3.2.2 Tasaväljakaadrid	17
3.2.3 Lainepikkuste skaalasse viimine	19
3.2.4 Kontiinumile taandamine	21
3.3 Spektrijoonte temperatuuritundlikkus	22
4 Tulemused ja arutelu	25
4.1 Määramatused	25
4.1.1 Kontiinumile tase	25
4.1.2 Kontiinumile viimise subjektiivsus	26
4.1.3 Efektiivne temperatuur	27
4.2 Tulemused ja võrdlus varasema epohhiga	27
Kokkuvõte	29

Tänuavaldused	30
Kirjandus	31
A Andmetabel	33
Lihtlitsents	34

Sissejuhatus

Tähtede evolutsiooni uurimine on tähefüüsika üks peamisi eesmärke. Otseselt evolutsiooni jälgida on pea võimatu, kuna muutused tähtedes toimuvad inimese ajaarvestuse järgi kohtutavalt aeglaselt. Meil on võimalik ainult jälgida tähti nende erinevates elufaasides ja võrrelda ühe tähe vaatlusi teiste sarnastega tehes järeldusi, milline võis olla selle tähe minevik ja milline võiks olla tulevik. On olemas ka tähti, mille muutusi on näha juba inimese eluea jooksul. Üheks selliseks tähtede rühmaks on kollased hüperhiid.

Kollased hüperhiid on suure kiirgusvõimsusega tähed, mis oma evolutsiooni käigus on jõudnud suure ebastabiilsusega olekusse. Tähtede arengu seisukohast on selline eluperiood lühiajaline kestusega umbes 10 000 aastat. See on ka üheks põhjuseks, et meie galaktikas on teada kõigest kümnekond kollast hüperhiidu (Israeli *et al.*, 1999). Neid haruldasi tähti iseloomustavad suured muutused tähtede näivas heleduses ja pinnatemperatuuris ning intensiivse massikaotuse episoodid (Nieuwenhuijzen *et al.*, 2012). Kollaste hüperhiidude detailsem kirjeldus on esitatud käesoleva töö 1. peatükis.

Tartu observatooriumis on käimas uurimus, et kindlaks teha kollase hüperhiiditähe V509 *Cassiopeiae* temperatuurimuutused aastatel 2000-2019. Kaudne vihje temperatuuri kasvule sel perioodil tuli ilmsiks Mari-Liis Aru bakalaureusetöös (2017), kus järeldus tähe heleduse kahanemise kohta optilise spektri punases piirkonnas seoti tema kuumenemise ja kokkutõmbumisega. Käesolevas töös on vaatluse all kitsam ajavahemik septembrist 2017 kuni augustini 2018, mil tähe pinnatemperatuuri muutumist hinnati spektraalanalüüsi abil. Selleks mõõdeti V509 *Cas* spektris neutraalse kaltsiumi (Ca I) ja ühekordselt ioniseeritud raua (Fe II) neeldumisjoonte sügavusi. Sõltuvalt nende ioonide eksisteerimiseks vajalikust energiatasemest on kaltsiumi joon suhteliselt tugevam madalamatel temperatuuridel ja raua joon tugevam kõrgematel. Joonesügavuste suhte arväärtused on töö juhendaja poolt määratud empiirilise kõvera kaudu seotud tähe temperatuuriga (üksikasjad esitatud ptk 3.3). Toetudes sel viisil leitud temperatuurihinnangutele on antud töö eesmärk kinnitada või seada kahtluse alla hüpotees kollase hüperhiiditähe V509 *Cas* tõusvast temperatuurist viimastel aastatel.

Antud töö esimeses peatükis antakse ülevaade kollastest hüperhiidtähtedest, nende omadustest

ja evolutsiooni käiku määravatest teguritest. Teises peatükis keskendutakse spetsiifilisemalt antud töö raames uuritavale kollasele hüperhiule V509 *Cassiopeiae*, antakse ülevaade tähte puudutavatest fenomenidest ja varasemalt registreeritud efektiivse temperatuuri muutustest. Kolmanda peatüki teemaks on vaatluste ning andmetöötluse täpsem kirjeldamine ning neljandas peatükis käsitletakse saadud tulemusi varasemate uurimuste kontekstis ning antakse vastus töö hüpoteesile.

Peatükk 1

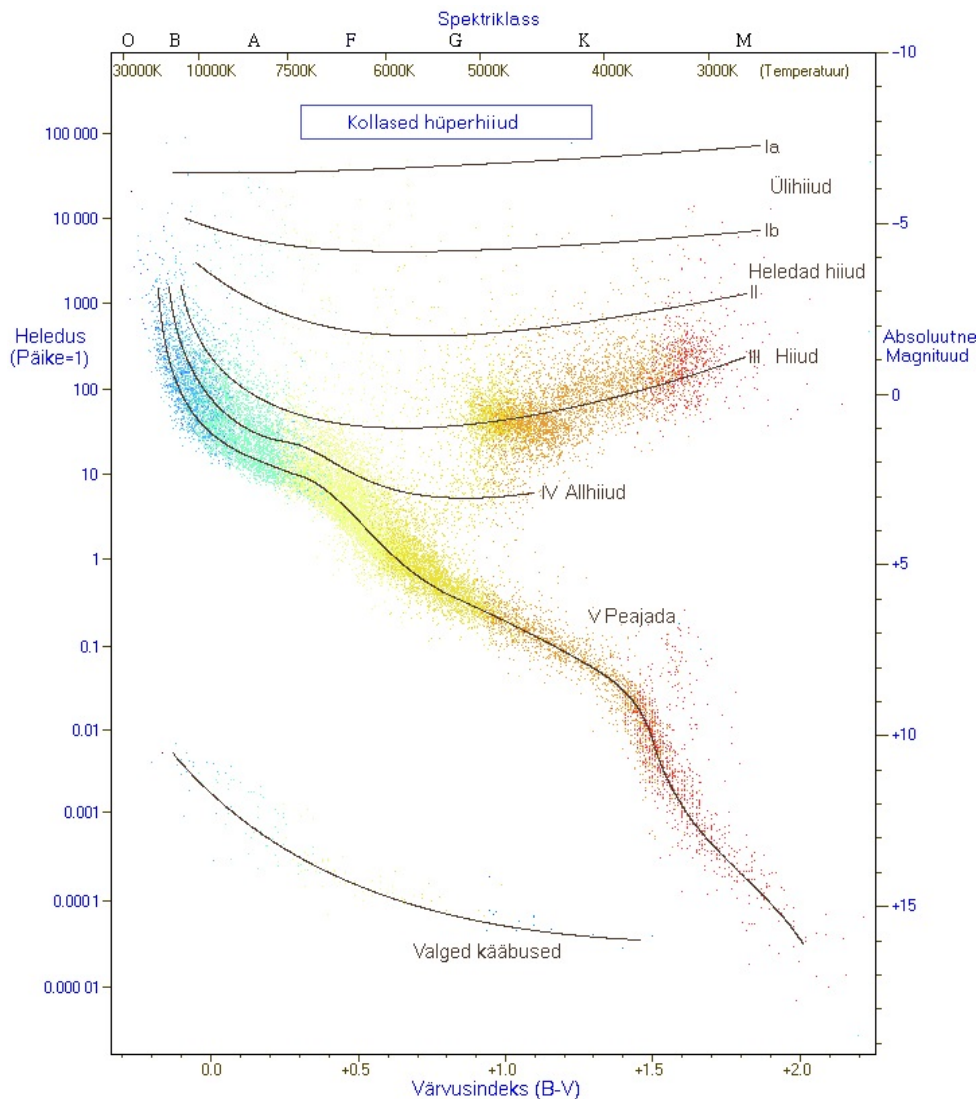
Kollased hüperhiid

Hertzsprung-Russelli diagrammi ülemine osa on koduks paljudele erilistele tähtedele. Kuumemas diagrammi piirkonnas asuvad LBV (ingl. k. *luminous blue variable*) ja *Wolf-Rayet* tähed ning diagrammi madalama temperatuuriga osa valitsevad punased ülihiid (joonis 1.1). Kõigi selliste massiivsete tähtede puhul on evolutsiooni käiku määravaks teguriks massikaotuse episoodid (Kurniotis *et al.*, 2017).

Termin „hüperhiid“ tuli kasutusele alles 1970. aastatel ja seda kasutati kõige heledamate $1a^+$ klassi ülihiidude tähistamiseks. Esimesed seda tüüpi tähed avastati Magalhãesi pilvedest, kuid 1980. aastaks oli teada ka vähemalt 7 Linnutees asuvat hüperhiidu (kaasaarvatud V509 *Cas*). Kõikide tähtede spektrites oli märke tähe ebastabiilsusest - muutlikud olid nii tähtede näiv heledus kui ka spektriklass (de Jager, 1980).

1.1 Kollaste hüperhiidude omadused

Kollased hüperhiid on meie galaktika ühed heledaimad tähed. Nad kuuluvad F, G või K klassidesse (Humphreys, 1978). Nende heledused on vahemikus kui $\log \frac{L}{L_{\odot}} = 5,4$ kuni 5.8 (Kurniotis *et al.*, 2017). Absoluutsed tähesuurused on suurusjärgus -8 magnituudi (tähe näiv heledus, kui ta asuks 10 parseki kaugusel) (Nieuwenhuijzen *et al.*, 2012). Kollaste hüperhiidude ebastabiilsusest annab märku nende heleduse varieeruvus amplituudiga 0,2 kuni 0,4 magnituudi (Klochkova *et al.*, 2019).



Joonis 1.1: Hertzsprung-Russelli diagramm (Powell, 2002). Absissteljel on tähe spektriklass (Harvardi klassifikatsiooni järgi), olles otseselt seotud efektiivse temperatuuriga, või tähe värvusindeks (B-V). Iga spektriklass jaguneb omakorda kümneks alamklassiks, kus indeks 0 tähendab kõige kuumemat ja 9 kõige jahedamat. Ordinaatteljel on tähe heledus. Tähe heledust esitatakse kahel viisil: võrdluses Päikese heledusega või absoluutse tähesuuruse skaalas. Viimane esitamine võimaldab tähtede heledusi võrrelda nende tegeliku kiirguse järgi. Kõige heledamate tähtede (nt. ζ Skorpionis) absoluutne tähesuurus on suurusjärgus -9 magnituudi. Enamik tähti asub peajadal, kus tähed on tasakaalus nii energeetiliselt - tähelt kiirgub kosmosesse sama palju energiat kui tähe sees vabaneb - kui mehaaniliselt - gaasi- ja kiirgusrõhk tähe sees tasakaalustab tähe väliskihide kaalu. Hiidusid ja ülihiidusid on vähe, mis tähendab, et täht ei püsi sellisena evolutsiooni jooksul pikka aega. Hiid on suure massiga tähed, mille väliskihid on evolutsiooni käigus paisunud ja jahtunud. Seega on nad peajadast paremal, madalama temperatuuriga ehk „punasemas“ HR-diagrammi osas (Kalv, 1993).

Kollaste hüperhiidude massid jäävad 20-40 Päikese massi vahemikku, aga eksisteerib ka massiivsemaid tähti. Nende efektiivse temperatuuri väärtused varieeruvad 4000 K-st 8000 K-ni. Hertzsprung-Russelli diagrammil asuvad kollased hüperhiidtähed madala temperatuuriga osas, kus leidub väga vähe suure kiirgusvõimega tähti (joonis 1.1) (Nieuwenhuijzen *et al.*, 2012).

Lisaks tähtede suurele heledusele erinevad kollased hüperhiid tavalistest ülihiidudest suurte massikaotuste tõttu tähetuulte mõjul ning tähte ümbritseva gaasi ja tolmu ümbrise tõttu (Humphreys, 1978). Kollased hüperhiid läbivad juhuslikke pulsatsioonide episoode, mille käigus täht kaotab väga intensiivselt oma massi ja tähe ümber formeerub väljapaisatud jahedast ainest pseudofotosfäär (Klochkova *et al.*, 2019).

Kollaseid hüperhiide saab liigitada kuumemateks ja külmemateks. Kuumemad on sellised tähed, mis on väljaspool massikaotuse perioode A spektriklassiga ja külmemad on F spektriklassiga. Kuumemad kollased hüperhiid on näiteks V1302 *Aql* ja V509 *Cas* ning külmemad on ρ *Cas* ja V1427 *Aql* (Aret *et al.*, 2017).

1.2 Kollaste hüperhiidude evolutsioon

Kollaste hüperhiidude evolutsiooni käigu määramine on keeruline ülesanne, kuna nad asuvad HR-diagrammi osas, kus tavaliselt toimub täheevolutsioon diagrammi „punasema“ ehk madalama temperatuuriga osa suunas (Kurniotis *et al.*, 2017). Kollased hüperhiid ei ole oma evolutsiooni rahulikus faasis. Nende puhul on täheldatud järske ja plahvatuslikke muutusi, mille tagajärjel tähtede asukoht HR-diagrammil on liikunud „sinisest“ „punasemaks“ ja vastupidi (Oudmaijer *et al.*, 2009). Kõigest aastate või aastakümnete jooksul toimub kollastes hüperhiidudes märgatav muutus tähe värvuses, mille põhjuseks arvatakse olevat muutused tähe atmosfääris. Sellised kiired muutused toimuvad ainult tähe välimistes kihtides. Tähe sisemuses toimuvad evolutsioonilised muutused hulga pikema aja vältel (Nieuwenhuijzen *et al.*, 2012).

1.2.1 Kollane evolutsiooniline tühimik

Kollaste hüperhiidude evolutsioonis esineb periood, mil nad asuvad HR-diagrammil piirkonnas, mida nimetatakse kollaseks evolutsiooniliseks tühimikuks (ingl. k. *yellow evolutionary void*) (Nieuwenhuijzen *et al.*, 2012). Selles piirkonnas asuvad peamiselt noored hüperhiid, mis oma evolutsiooni käigus jahtuvad ja seega on „teel“ HR-diagrammi madalama temperatuuriga osa suunas. Leidub ka üksikuid vanu tähti, mis evolutsiooneeruvad diarammi kõrgema temperatuuriga osa suunas (Nieuwenhuijzen ja de Jager, 2000). Viimasel juhul tähe efektiivne temperatuur tõuseb väga kiiresti ja samuti suureneb tähe näiv heledus (Nieuwenhuijzen *et al.*, 2012).

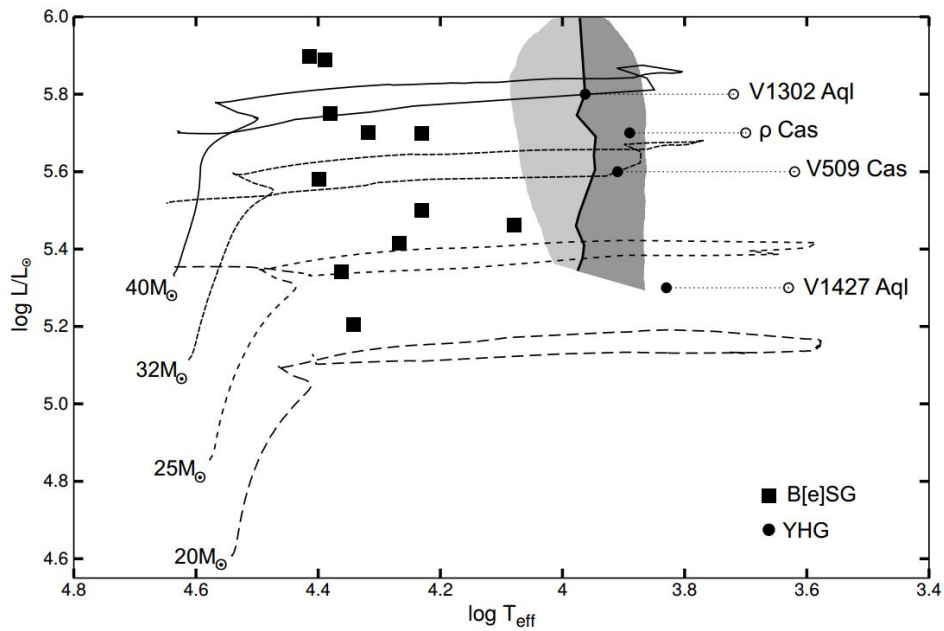
Kollane evolutsiooniline tühimik - kui ala HR-diagrammil - pakuti välja Nieuwenhuijzeni ja de Jageri poolt 1995. aastal (joonis 1.2) (Nieuwenhuijzen ja de Jager, 2000). Kollase evolutsioonilise tühimiku asukoht ei ole täpselt kindlaks määratud, kuid erinevate allikate põhjal on see efektiivse temperatuuri vahemikus ligikaudu 6000 K ja 10 000 K (Kurniotis *et al.*, 2017). See on ala, kus diagrammi kõrgema temperatuuriga osa suunas arenevatele tähtedele on omane (de Jager *et al.*, 2001):

1. negatiivne tiheduse gradient tähe väliskihi spetsiifilises piirkonnas;
2. efektiivse raskuskiirenduse (ingl. k. *effective gravity*) muutumine nulliks või negatiivseks tähetuule, turbulentsliikumiste ja pulsatsioonide summaarse mõju tõttu;
3. tähetuule kiirus saavutab ülehelikiiruse juba fotosfääris või sellest madalamal;
4. $\Gamma_1 \leq \frac{4}{3}$, mis viitab dünaamilisele ebastabiilsusele tähe atmosfääris (Nieuwenhuijzen ja de Jager, 2000). Γ_1 on adiabaatiline eksponent, mis on seotud tähe atmosfääri rõhu ja tihedusega ning on oluline näitaja nt. pulsatsioonide kirjeldamisel. Atmosfääri stabiilsuseks peaks kehtima $\langle \Gamma_1 \rangle > \frac{4}{3}$.

Kõik need tunnused viitavad ebastabiilsele olekule tähe väliskihitides. Siiski kaasneb ülalmainitud temperatuuri tõusuga kaks protsessi, mis toetavad stabiliseerumist – vesiniku suurenev ionisatsiooniate kui $\log T_{eff} \approx 3.8 - 3.95$ ja heeliumi ioniseerimine kui $\log T_{eff} \approx 4.05 - 4.1$ (Nieuwenhuijzen *et al.*, 2012). Sellest tulenevalt võib „tühimiku“ jagada kaheks piirkonnaks (joonis 1.2).

Niisuguse ebastabiilsuse perioodi peab täht läbima väga ruttu, sest selles arengujärgus on väga vähe tähti, erinevalt eelnevatest või järgnevatest evolutsioonietappidest, mis on suhteliselt rohkem asustatud. Nii on loomulik nimetada käesolevat ala HR-diagrammil kollaseks evolutsiooniliseks tühimikuks (Nieuwenhuijzen *et al.*, 2012). Tühimiku läbimise järel jõuab täht stabiilsemasse „sinisesse“ piirkonda, kus temast võib saada B[e] tüüpi ülihiid (B- spektriklassi täht, mille spektris on nn keelatud emissioonijooned) (Aret *et al.*, 2017) või ka madalama heledusega LBV- tüüpi või hoopis *Wolf-Rayet* tüüpi täht (Kurniotis *et al.*, 2017).

Kui suure massiga täht oma arengus punasest ülihiist kuumemate objektide suunas siseneb kollase tühimiku piirkonda, siis ülalkirjeldatud ebastabiilsus toob efektiivse temperatuuri tõusmisel u 7000 K juurde suure tõenäosusega kaasa intensiivse aine väljavoolu, st massikaotuse (Oudmaijer *et al.*, 2009). Selline paisuv gaasikiht moodustab pseudo-fotosfääri, mille temperatuur langeb ja täht hakkab näiliselt liikuma HR- diagrammil punaste ülihiidude suunas, seega muutub ka tema spektriklass (Oudmaijer *et al.*, 2009), (Nieuwenhuijzen *et al.*, 2012). Osutatud muutlikkus toimub näiliselt „põrkumisena” vastu tühimikku. Paisuva ainekihi hajudes liigub täht tagasi kõrgema temperatuuri suunas ja „põrge” võib uuesti toimuda, kuni



Joonis 1.2: HR-diagrammi ülemine osa (Aret *et al.*, 2017). Joonisel on toodud B[e] ülihiid (ruudud) ja kollased hüperhiid (ringid). Kollaste hüperhiidude jaoks on näidatud joontega efektiivse temperatuuri muutused. Kollane evolutsiooniline tühimik on märgitud tumedamalt vastavalt de Jager & Nieuwenhuijzen (1997) artiklile. „Esimene“ ebastabiilsuse piirkond on tumedam ja selle kõrge temperatuuri poolne piir on märgitud musta joonega (Nieuwenhuijzen *et al.*, 2012).

stabiliseerivad mehhanismid ta maha rahustavad. Niisugust käitumist on vaadeldud mitmete kollaste hüperhiidude puhul (vt punktiiriga seotud olekuid joonisel 1.2). V509 *Cas* puhul näiteks kirjeldasid seda protsessi de Jager ja Nieuwenhuijzen (1997).

Mainitud pörkumiste jooksul võib täht kaotada tuntava osa oma massist, isegi kuni Päikese massiga võrdse hulga (Nieuwenhuijzen *et al.*, 2012). Kas see aine moodustab tähe ümber vaadeldavaid struktuure ja kui kontrastsed need on, sõltub pörgete tihedusest ajaskaalal ning ühe korraga väljastatud massikogusest. Näiteks on põhjust oletada, et kuumematel hüperhiidudel (V1302 *Aql* ja V509 *Cas*) toimub massikaotus asümmeetriliselt ja aine koguneb ekvatoriaalsesse kettasse. Jahedamate kollaste hüperhiidude vaatluste põhjal pole ketaste moodustumist täheldatud (Aret *et al.*, 2017).

Peatükk 2

Kollane hüperhiid V509 *Cassiopeiae* (HR 8752)

V509 *Cas* (muutlike tähtede kataloogi järgi või HR 8752 *Harvard Revised Photometry Catalogue* järgi) on muutlik täht heleduse amplituudiga umbes 0.2 tähesuurust. Tähe heledus muutub ca. aastase perioodiga. Tähe kiirgusvõimsus ületab Päikese oma 4×10^5 kordselt (Nieuwenhuijzen *et al.*, 2012). 1977. aastal klassifitseeriti V509 *Cas* F8 spektriklassiga täheks. 1996.-2018. aastal tehtud vaatluste jooksul tähe spekter eriti ei varieerunud ning see klassifitseeriti nimetatud vaatlusepohhidel F2 spektriklassi täheks (Klochkova *et al.*, 2019). Kuna V509 kuulub kuumade kollaste hüperhiidude hulka, siis on tähte vaadeldud väljaspool massikaotuse perioodi ka A-spektriklassi kuuluvana (Aret *et al.*, 2017).

V509 *Cas*-i mass on umbes 11 Päikese massi. Tähe väike mass viitab sellele, et ta on oma evolutsiooni lõppjärgus, olles ilmselt juba poole oma esialgsest massist kaotanud (Nieuwenhuijzen *et al.*, 2012). HR-diagrammil asub V509 *Cas* kollase tühimiku madalama temperatuuriga „esimeses“ piirkonnas (Nieuwenhuijzen ja de Jager, 2000).

Tähel on ka B1 spektriklassiga peajada kaaslane, mis asub temast 200 AÜ kaugusel orbitaalperioodiga u 500 aastat (Israelian *et al.*, 1999).

2.1 Massikaotuse perioodid ja temperatuurimuutused

Nieuwenhuijzen *et al.* (2012) on oma artiklis kirjeldanud tähe V509 *Cas* käitumist, kui see läbib evolutsioonilist tühimikku, toetudes suuresti Tartu Observatooriumis aastatel 2000-2005 kogutud V509 kõrglahutuslikele spektritele. Artiklis on leitud, et mudelarvutuste põhjal võib tähe efektiivse temperatuuri suurenemiseks 5000 K-lt 8000 K-ni kuluda kõigest 10 000 aastat.

Seejuures on võimalik, et tähe sisekihid evolutsioneeruvad sujuvalt, kuid tähe atmosfäär läbib regulaarset massikaotuse episoode, mida on kirjeldatud 1.2.1. peatükis. Sellised episoodid jätkuvad, kuni tähe atmosfääris tekib tasakaal ehk efektiivne raskuskiirendus g_{eff} omandab positiivse väärtuse.

V509-1 ei ole leitud märke suuremastaabilisest tähte ümbitsevast kihist, mis viitab sellele et viimase 500-1000 aasta jooksul ei ole väljaheidatud ainehulgad olnud piisavalt massiivsed (Aret *et al.*, 2017). Seega pole välistatud, et V509 *Cas* võib olla alles hiljuti jõudnud kollasesse tühimikku, olles evolutsioonil teel sinisema suunas (Humphreys, 2003).

V509-1 on varasemalt vaadeldud kahte suuremat massikaotuse perioodi - 1970. aastal ja 1979-1982. Nende aastate vahemikus kogutud andmete põhjal võib järeldada „põrkumise“ efekti (Nieuwenhuijzen ja de Jager, 2000).

2.1.1 Temperatuurimuutused aastatel 1970-1983

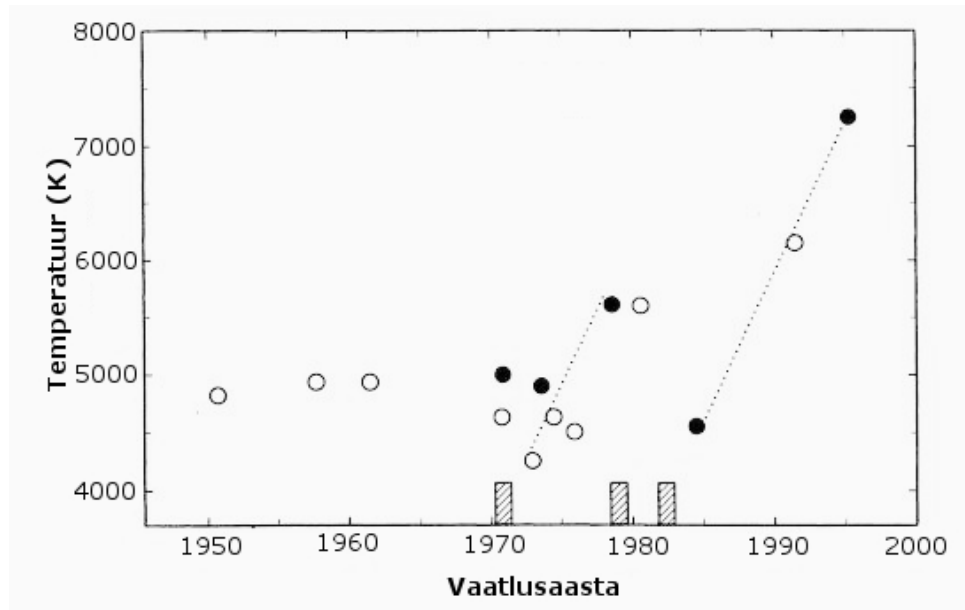
Intensiivse massikaotuse perioodi jooksul 1970. aastal tähe efektiivne temperatuur langes, pärast mida hakkas see tasapisi jälle tõusma kuni tähte tabas uus massikaotus aastatel 1979-1982 (joonis 2.1). See põhjustas järjekordse efektiivse temperatuuri languse, kuid sellele järgnes taaskord temperatuuri tõus. Näib, et täht „põrkas“ 30 aasta jooksul kaks korda vastu kollase tühimiku ebastabiilsuse piirkonna äärt (de Jager ja Nieuwenhuijzen, 1997).

Mõlemale massikaotusele järgnenud lähiaastate jooksul tehtud vaatluste tulemustena leiti, et tähe efektiivne raskuskiirendus $\log g_{eff}$ oli omandanud negatiivse väärtuse. Seda peetakse järsu massikaotuse peamiseks karakteristikuks (de Jager ja Nieuwenhuijzen, 1997). Efektiivse raskuskiirenduse alanemine tekitab atmosfääris dünaamilise ebastabiilsuse. See oli negatiivne ka aastal 1978 ning sellele järgnes aastatel 1980-1982 massikaotuse periood (de Jager *et al.*, 2001).

2.1.2 Temperatuurimuutused peale 1983. aastat

Alates 1985. aastast hakkas V509 *Cas* temperatuur järsult tõusma (de Jager *et al.*, 2001). 2000. aastaks oli võrreldes 1985. aastaga tähe temperatuur tõusnud ligi 3000 K võrra (joonis 2.2) (Nieuwenhuijzen ja de Jager, 2000).

Selline efektiivse temperatuuri tõus on nüüdseks aeglustunud või peatunud. Võrreldes 2001. ja 2015. aastat, on temperatuur jäänud peaaegu samale tasemele. See viitab sellele, et täht on jõudmas kollase tühimiku ebastabiilse ala kõrgetemperatuurilisele piirile ja tõenäoliselt on alanud stabiliseerumisprotsess (Aret *et al.*, 2017).

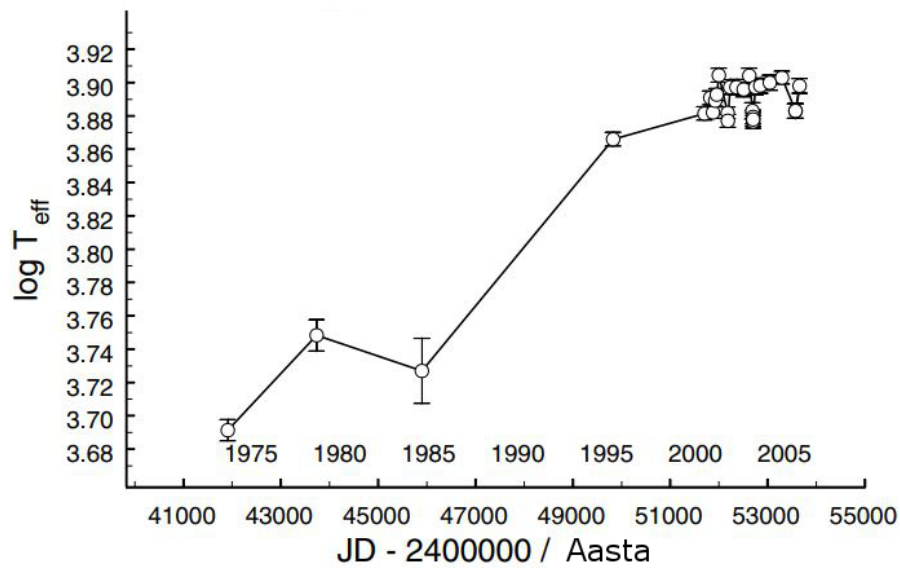


Joonis 2.1: V509 *Cas* temperatuurimuutused aastatel 1950-1995. Mustad ringid on efektiivse temperatuuri väärtused vastavalt spektrijoonte ekvivalentlausele, tühjad ringid on leitud ülihiidude jaoks väljatöötatud (B-V) ja efektiivse temperatuuri suhtest. Kuna viimast suhet hüperhiidude jaoks loodud ei ole, on need ebatäpsemad. Intensiivse massikaotuse perioodid on graafikul märgitud viirutatud piirkondadega mööda abtsissstelge (1970. aastal ja 1980. aasta paiku). Punktirjooned viitavad tähe „põrkumisele“ vastu ebastabiilse piirkonna äärt, mis toob esile suured massikaotused (de Jager ja Nieuwenhuijzen, 1997).

On ebatõenäoline, et V509 *Cas* efektiivse temperatuuri suurenemist põhjustab tema peajada kaaslane. Sellisel juhul oleks V509 spektris näha kombinatsiooni kuumades kõrgetes atmosfäärikihtides - mida kuumutab kaaslane - ja jahedates sisemistes kihtides olevate ainete spektrijoontest. Sellist nähtust vaadeldud ei ole ja tähe spekter on suhteliselt „normaalne“ 8000 K temperatuuriga kollase hüperhiu kohta (Israelian *et al.*, 1999).

2.2 Keelatud lämmastiku [N II] jooned V509 *Cas* spektris

V509 *Cas* asukoha muutusi HR-diagrammil võib tema vaadeldud evolutsiooni jooksul kirjeldada keerulise sikk-sakina (joonis 1.2). Nähtava valguse spektripiirkonnas on tähe spektriklass varieerunud erinevatel vaatlushetkedel F-st K-ni, säilitades Ia heledusklassi. Samas spektripiirkonnas on V509 *Cas*-i spektris mitmeid emissioonijooni, näiteks ka suhteliselt haruldased ergastatud ioniseeritud lämmastiku [N II] 6548 Å ja 6584 Å keelatud emissioonijooned. Keelatud emissioonijoonete olemasolu tähe spektris on oodatav B[e] tüüpi tähtedest. Näiteks tuntud B[e] tüüpi tähtedel Cl *Cam* ja 3 *Pup* on spektris palju keelatud emissioonijooni, kuid [N II] omad puuduvad. Kuna keelatud emissioonijooned leiduvad enamasti



Joonis 2.2: V509 *Cas* efektiivse temperatuuri muutused aastatel 1975-2005. Abtsissteljel on ajaskaala Juuliuse päeva ja aastaarvude näol ning ordinaatteljel on efektiivse temperatuuri logartim (mis ümber arvutades vastab temperatuuri väärtustele vahemikus u 4700 kuni 8300 K). (Nieuwenhuijzen *et al.*, 2012)

kuumades ja kaugete arenenud tähtedes, siis on suhteliselt ootamatu, et need leiduvad jahedama tähe V509 *Cas* spektris (Klochkova *et al.*, 2019). On võimalus, et kuum kaaslane ergastab peatähte ümbritsevat gaasipilve.

Aru (2017) uuris oma bakalaureusetöös V509 *Cas* [N II] 6583 Å emissioonijooone ekvivalentlause muutumist. Selgus, et võrreldes ajavahemikke 1976-1992 ja 2000-2017, on joone ekvivalentlause küll suurenenud, kuid võrreldes varasema epohhiga on kasv aeglustunud. Joone ekvivalentlause kasv kontinuumi suhtes toimub, kui tähe heledus samas spektripiirkonnas kahaneb. Uuritud [N II] spektrijoon asub punases spektriosas. Tähe heleduse kahanemine punases spektripiirkonnas viitab tähe efektiivse temperatuuri kasvule, sest kiirgus jaotub ümber spektri sinisemasse piirkonda. Ekvivalentlause aeglustunud kasv on seetõttu seostatav temperatuuri kasvu aeglustumisega.

Peatükk 3

Vaatlused ja andmetöötlus

3.1 Vaatlused

Antud töös kasutatud andmed on kogutud vaatluste käigus Tartu observatooriumi 1,5 m peegelteleskoobiga ajavahemikus 22. septembrist 2017 kuni 13. augustini 2018. Kokku on kasutatud vaatlusi 19 vaatlusööst, millest kolmel osales ka töö autor. Teleskoop on konstrueeritud töötama kolmes erinevas fookuses - peafookuses (suhteline ava 1:3.5), Cassegraini fookuses (1:16) ja kudee fookuses (1:35). Teleskoobi optika kvaliteet on käikulaskmise-aegsete katsetuste põhjal väga hea, koondades näiteks Cassegraini fookuses umbes 90% valgusest 1-kaaresekundilisse kujutisse. Praegused spektraalvaatlused toimuvad Cassegraini fookusesse ühendatud nn pikapilu-spektrograafi ASP-32 abil, mille kaamera valgusjõud on 1:1.8. Tänu vahetatavatele difraktsioonvõredele on võimalik saavutada väga erinevaid spektraal-lahutusi alates paarisajast kuni umbes 10000-12000 -ni. Antud vaatluste käigus kasutati võret 1800-518 (1800 joont/mm ja 518 nm on efektiivseim lainepikkus). Vaatlused on tehtud võrenurgaga $46^{\circ}10'$.

Sensoriks on CCD kaamera Andor Newton DU970N, mille suurus on 1600x200 pikslit. CCD pimemüra vähendamiseks jahutatakse sensorit talvel -90°C ja suvel -80°C . Selliste temperatuuride juures on pimevoolud piisavalt väikesed, et ei peaks tegema eraldi pimekaadreid (ingl. k. *dark frame*). V509 *Cas* andmekaadrid tehti säriajaga 300 sekundit. Nii enne kui ka pärast andmekaadreid tehti ka üks võrdlusspekter. Kuna spektrograaf asub Cassegraini fookuses ja liigub teleskoobiga kaasa, siis mõõdetav spekter ei pruugi sattuda CCD-l alati täpselt samale asukohale ja võrdlusspektreid tuleb teha andmekaadritest võimalikult lühikese ajalise vahega. Andmekaadrite säri käigus tuli teleskoopi gideerida, kuna teleskoop ei jälgi tähte piisavalt täpselt, et see püsiks spektrograafi pilu peal. Kõik kaadrid salvestati FITS (*Flexible Image Transport System*) failidena.

3.2 Andmetöötlus

Spektrite töötlemiseks kasutati programmi IRAF (*Image Reduction and Analysis Facility*). Andmekaadrite töötlemisel kasutati järgmisi samme:

1. eelpingekaadrite lahutamine andme- ja tasaväljakaadritest;
2. tasaväljakaadrite töötlus ja andmekaadrite jagamine tasaväljakaadriga;
3. andmekaadrite lainepikkuste skaala vastavusse seadmine;
4. spektri viimine kontiinumile.

Programmis kasutati paketti *noao* ja selle alt pakette *imred* ja *ccdred*. Esmalt seati paika vaatlusinstrumendi vaikesätted käsuga *setinstrument*, milles valiti instrumendiks *specphot*. Samuti vastava instrumendi seadetest lülitati välja *overscan* ja *trim* valikud.

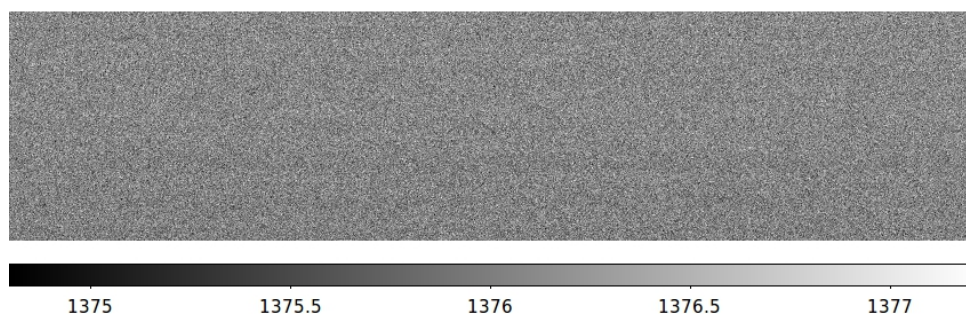
3.2.1 Eelpingekaadrid

CCD tühja või valgustamata piksli väärtuse hindamiseks tehakse igal vaatlusööl CCD null-taseme kalibratsioonimõõtmised. Sellised eelpingekaadrid ehk null-sekundilise säriaajaga kaadrid (ingl. k. *bias frame* või *zero frame*) võimaldavad määrata CCD nullmüra taseme (Howell, 2000). Antud töös kasutatud andmete puhul on nulltaseme väärtus umbes 1370 digiühikut (ingl. k. *analog digital unit* ehk ADU) ja võimendustegur (ingl. k. *gain*) on 1,46, ehk kogutud signaali igale digiühikule vastab 1,46 elektroni.

Vaatlusööl tehtud eelpingekaadrid salvestatakse kolmedimensionaalsete andmekuupidena. Kaadrite töötlemiseks vaja kõigepealt andmekuubid lahti tükeldada, selleks kasutati IRAFis käsku *imslice*, mille parameetrites valiti dimensiooniks arv 3. Kõik saadud eelpingekaadrid kombineeriti käsu *zerocombine* abil, mille parameetrites seati *process* väärtuseks *no*. Joonisel 3.1 on näha saadud eelpingekaaader. Seejärel teostati nii tasaväljakaadrite kui ka andmekaadritega eelpingekorrektsioon käsu *ccdproc* abil.

3.2.2 Tasaväljakaadrid

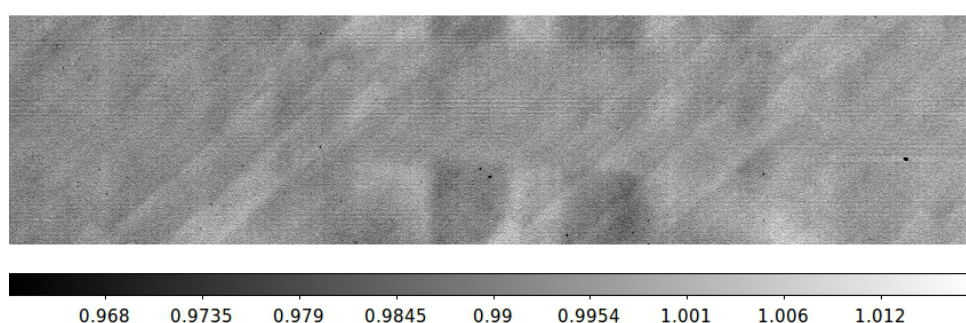
CCD sensoris on igal piksil natuke erinev tundlikkus. Pikslite erineva valgustundlikkuse kalibreerimiseks kasutatakse tasaväljakaadreid (ingl. k. *flat field*). Tasaväljakaadri tegemiseks valgustatakse CCD-d lambiga ning ideaaljuhul on kõik pikslid võrdselt valgustatud valgusallikaga, mille spekter sarnaneb uuritavale objektile. Seega valgustus peaks olema



Joonis 3.1: Kombineeritud eelpingekaader. Teljel on näha piksli väärtus 0-sekundilise säriaaja puhul.

ruumiliselt ja spektraalselt samasugune. Kuna selline ühetaoline valgustatus praktiliselt võimalik ei ole, tuleb tehtud tasaväljakaadrit töödelda (Howell, 2000).

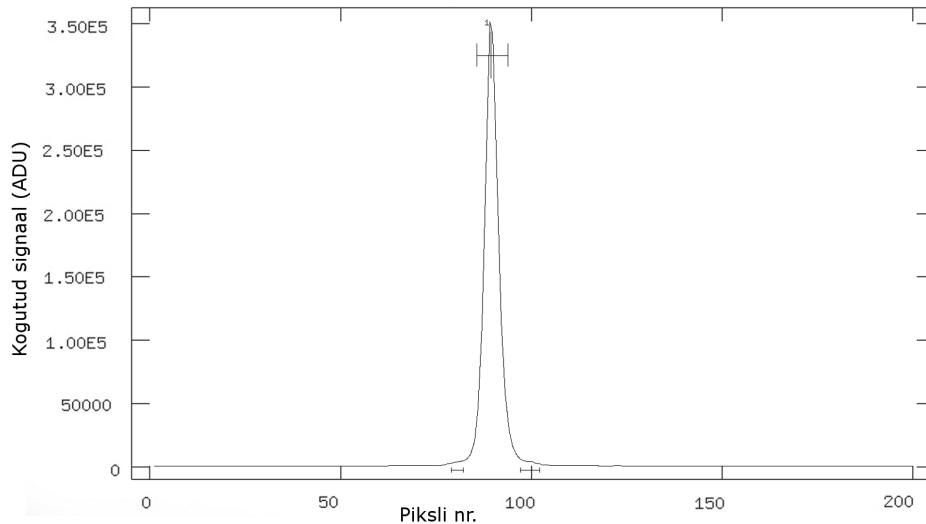
Tasaväljakaadrite töötlus teostati järgnevalt. Käsu *flatcombine* abil kombineeriti tasaväljakaadrid vastavalt võrenurgale kokku. Saadud tasaväljakaadrit keskmistati ridadel 80-100, kus asub tähe spekter, käsuga *blkavg*, luues üherealise kaadri. Seejärel, kasutades käsku *median* loodi keskmistatud kaadri põhjal mediaankaader. Käsu *blkrep* pandi üherealised mediaankaadrid külg-külje kõrvale, laiendades seega kaadri tagasi kogu CCD suuruseks. Seejärel jagati algne kombineeritud tasaväljakaader mediaantasaväljakaadriga kasutades käsku *imarith*. Tasaväljakaadrite korrigeerimine lõpetati käsuga *illumination*, mis tegi kaadri valgustatuse kalibratsiooni. Käsu parameetrites seati *nbins* väärtuseks 16, mis tähendab, et kaadri x-telg jagati 16 intervalliks, igaüks 100 piksli lai. Taaskord kasutades käsku *imarith*, jagati eelnevalt saadud tasaväljakaader kalibreeritud valgustusega tasaväljakaadriga (joonis 3.2).



Joonis 3.2: Korrigeeritud tasaväljakaader.

Andmekaadritele tehti tasaväljakaadri korrektsioon käsuga *ccdproc*, mille valikutes oli sisse lülitatud *flatcor*. Edaspidi kasutatava *apall* käsu muudetud parameetrid olid järgnevad: *nsum=20; b_func=legendre; b_order=2; nfind=1; t_nsum=20; t_func=spline3; t_order=10;*

backgro=fit; saturat=60000; clean=no, readnoi=rdnoise, gain=gain. Seejärel määrati käsuga *apall* andmekaadrites apertuurid - ehk milline osa kaadrist vastab tähe spektri informatsioonile ja milline osa on taevafoon (joonis 3.3).

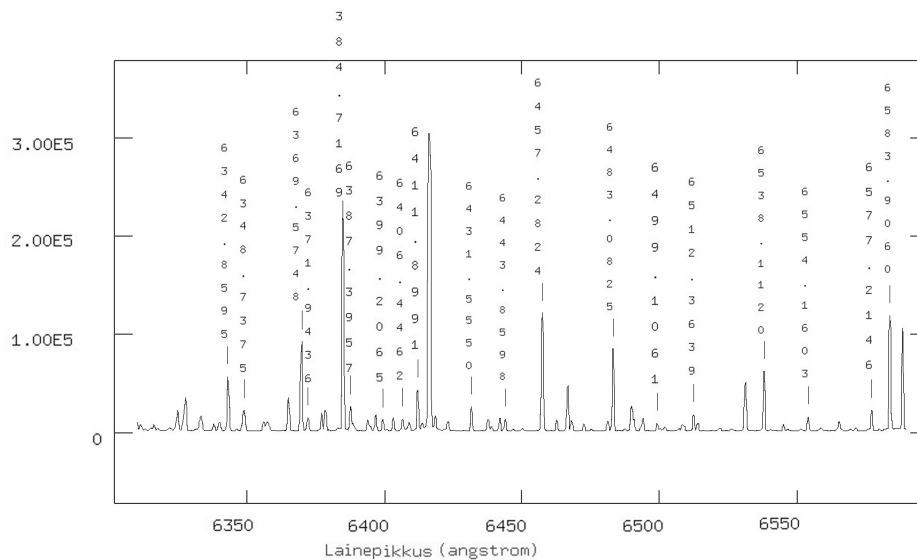


Joonis 3.3: Apertuuride määramine IRAFis. Keskkel on näha tähespektri asukoht, selle kõrval mõlemal pool on vahemikes määratud taevafoon. x-teljel on CCD pikslirea number ja y-teljel kogutud signaali hulk.

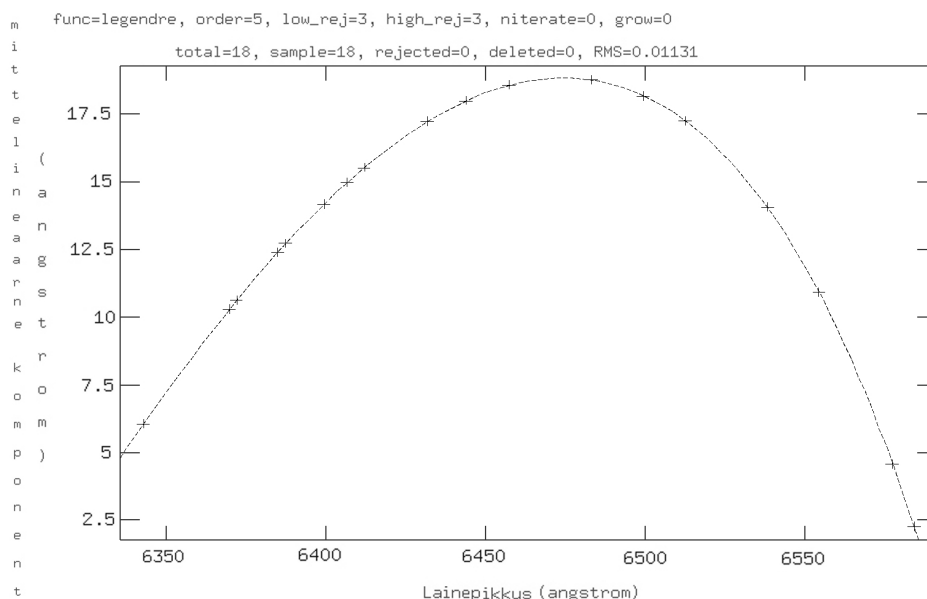
3.2.3 Lainepikkuste skaalasse viimine

Andmekaadrite viimiseks lainepikkuste skaalasse kasutatakse võrdlusspektreid. Tartu Observatooriumis on võrdlusspektrid tehtud ThAr lambiga, millel on teada paljude spektrijoonte lainepikkused. Tartu observatooriumis tehtud kaadrid viidi vastavusse Las Campanase Observatooriumi ThAr lambi spektrijoonte andmebaasiga (Bernstein, 2005), mille põhjal identifitseeriti, lisaks eelnevalt teatud spektrijoonte lainepikkuste väärtustele, veel spektrijooni juurde. Antud töös kasutatud $46^{\circ}10'$ nurga puhul kasutati võrdlusspektritel vähemalt 19 erineva spektrijoone lainepikkuste väärtusi (joonis 3.4).

Võrdlusspektrid viidi lainepikkustele vastavaks käsuga *identify*, milles muudeti järgnevaid parameetrid: *coordli=linelists\$thar.dat; functio=legendre; order=3* (joonis 3.5). Vastavalt lainepikkustega kooskõlla viidud võrdlusspekter seati külge andmekaadrile, lisades see FITS faili päisesse vastava rea *refspec* võtme alla. Selleks kasutati käsku *hedit* valikutega *add=yes* ja *ver=no*.

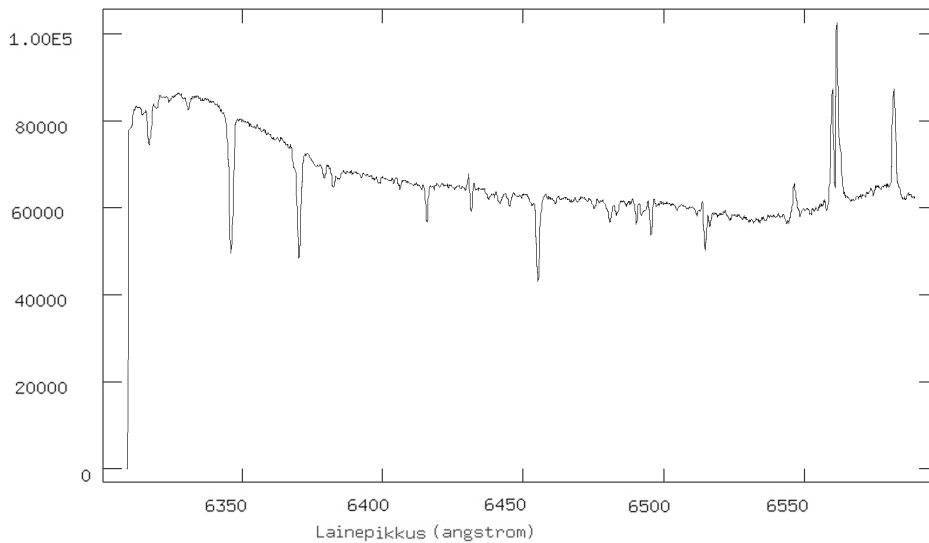


Joonis 3.4: Võrdlusspektrile vastavusse pandud lainepikkuste väärtused.



Joonis 3.5: Lainepikkuste määramisel kasutatud 5. järku Legendre funktsiooni. Lainepikkuste skaala määramise täpsus ehk RMS väärtus on 11 mÅ.

Andmekaadrile vastavusse seatud lainepikkuste funktsiooni dispersiooni korrigeeriti käsuga *dispcor*, milles tehti lisavalik *linearize=yes*. Lainepikkusi muudeti nii, et skaala alguseks valiti lähim täisarv lainepikkusi ja intervalliks valiti 0,17, muud valikud jäeti vaikimisi muutmata. Radiaalkiiruse korrektsioonid teostati käsuga *rvcorrect*, mille parameetrites seati *imupdate=yes*; *observa=to*. Lõpuks viidi läbi ka heliotsentriline korrektsioon käsuga *dopcor*, lisades võtmesõna *-vhelio* ja parameetrites seati *isvelocity=yes* (joonis 3.6).

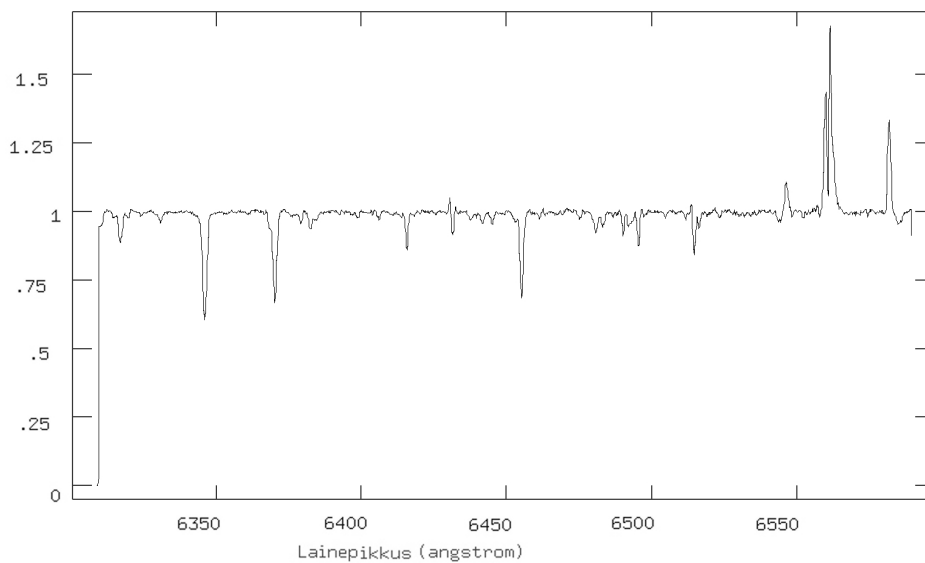


Joonis 3.6: Eeltöötuse läbinud tähe spekter.

3.2.4 Kontiinumile taandamine

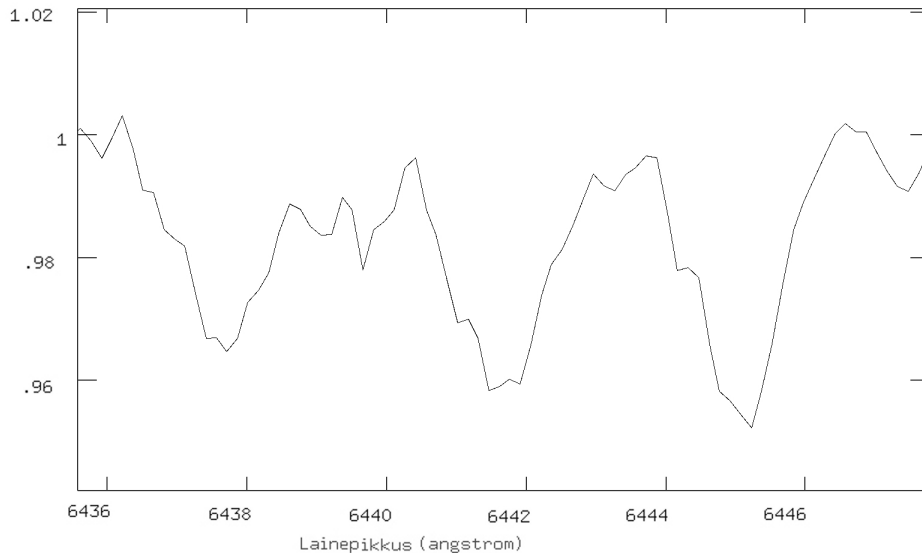
Joonepõhjade suhteliste väärtuste leidmiseks tuleb viia tähe spekter kontiinumile, kus pidevspektri tase on lineaarne ning seega on võimalik määrata erinevusi spektrijoonte sügavustes. Selleks kasutati käsku *continuum*. Lähendusfunktsioonina kasutati 20. või 21. järku *spline* funktsiooni.

Kontiinumile viimise tulemusena saadakse spekter, mille pidevspektri osa on x-teljega paralleelne ning y-telg iseloomustab kõrvalekallet pidevspektri 1-tasemelt (joonis 3.7).



Joonis 3.7: Joonisel 3.6 olev spekter viiduna kontiinumile.

Nüüd on võimalik määrata joonepõhjade sügavusi. Uuritavate spektrijoonte paremaks kujutamiseks on vastav spektriosa suurendatud joonisel 3.8. Joone põhja väärtusena on mõõdetud vastava spektrijoone kõige madalama punkti väärtus. Kuna kontiinumi tase on võrdne 1-ga, siis joone sügavus avaldub: sügavus = 1 - põhja väärtus.



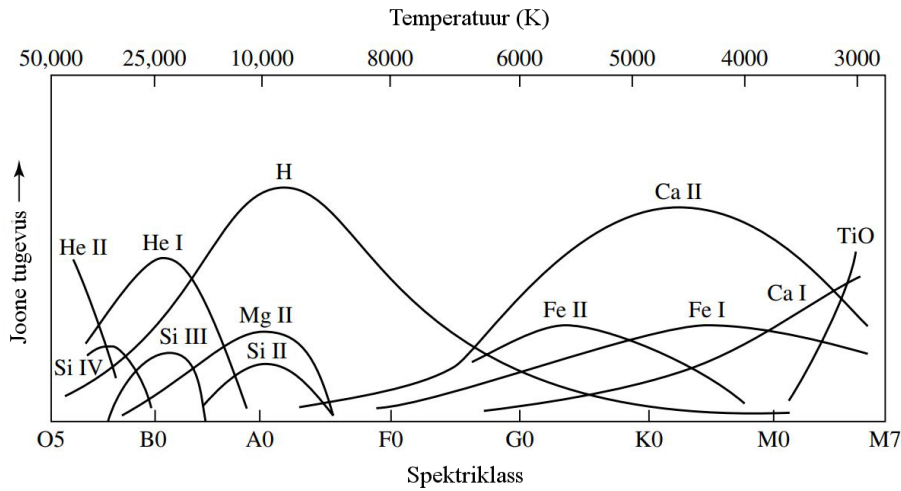
Joonis 3.8: Uuritavad spektrijooned on suurendatud. Ca I joont on näha joonisel vasakul, lainepikkuse 6438 Å juures ning Fe II spektrijoon asub 6445 Å juures.

3.3 Spektrijoonte temperatuuritundlikkus

Temperatuuri määramiseks on hea võrrelda omavahel ühte spektrijoont, mis on väga temperatuuritundlik, teise joonega, mille sõltuvus temperatuurist on pöördvõrdeline (joonis 3.9). Siiski tuleb ettevaatlik olla, sest erinevused tähtede gravitatsioonis ja metallilisuses võivad samuti mõjutada joonte tugevusi. Seetõttu võrreldakse jooni omavahel, et ei tekiks sõltuvust absoluutsest spektrijoone tugevusest. Väikesed erinevused kontiinumi määramisel põhjustavad väiksemaid kõrvalekaldeid joone sügavuste määramisel kui näiteks joonte ekvivalentlaiuste määramisel (Gray, 1996).

V509 *Cas* vaatlustes võrenurgaga $46^{\circ}10'$ on tehtud kaadrid lainepikkuste vahemikus 6300-6600 Å. Selles spektriirkonnas on lähestikku temperatuuritundlikud ühekordselt ioniseeritud raua (Fe II $\lambda = 6446,43$ Å (Zaidel, 1970)) ja neutraalse kaltsiumi (Ca I $\lambda = 6439,07$ Å (Zaidel, 1970)) spektrijooned. Joonte lähestikku asetsemine võimaldab vähendada viga kontiinumi määramisel.

Temperatuuri väärtuse leidmiseks kasutatav empiiriline seos on leitud antud töö juhendaja poolt järgnevalt: varasemalt on olemas kõrgekvliitedilised V509 *Cas* ešellspektrid, kus on



Joonis 3.9: Spektrijoone tugevuse sõltuvus temperatuurist ja spektriklassist. Joonisel on näidatud mitmete erinevate spektrijoonte temperatuurisõltuvused. Temperatuuri muutudes toimub sujuv üleminek ühelt spektriklassilt teisele, mis viitab, et tähtede keemilises koostises on ainult väikesed erinevused (Carroll ja Ostlie, 2014). On teada, et Fe II joon on tugevam kõrgematel temperatuuridel (Gray, 1996). Ning jooniselt on ka näha, et temperatuuri kasvades väheneb Ca I joone tugevus.

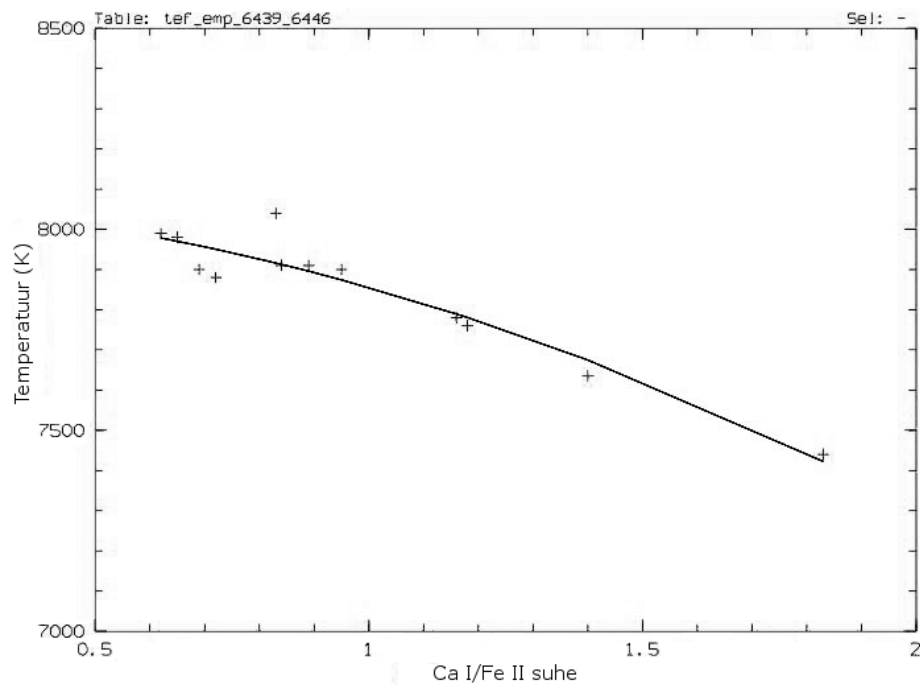
üksteisega lähestikku jooned Fe I 5367 Å ja Fe II 5387 Å ning Ca I 6439 Å ja Fe II 6446 Å. Standardtähtede põhjal loodi empiiriline kõver Fe I/Fe II suhte kohta. Selle suhte põhjal leiti V509 Cas temperatuur Nieuwenhuijzen *et al.* poolt 2012. aasta artiklis (joonis 2.2). Saadud temperatuuride ja V509 Cas enda spektrite põhjal loodi uus empiiriline seos Ca I/Fe II suhte jaoks (joonis 3.10).

$$T_{ef} = 8078 - 59x - 163x^2, \quad (3.1)$$

kus

$$x = \frac{R(\lambda = 6439 \text{ \AA})}{R(\lambda = 6446 \text{ \AA})} \quad (3.2)$$

ja $R(\lambda)$ tähistab vastava joone sügavust. Leitud seose 3.1 määramatus on ± 50 K.

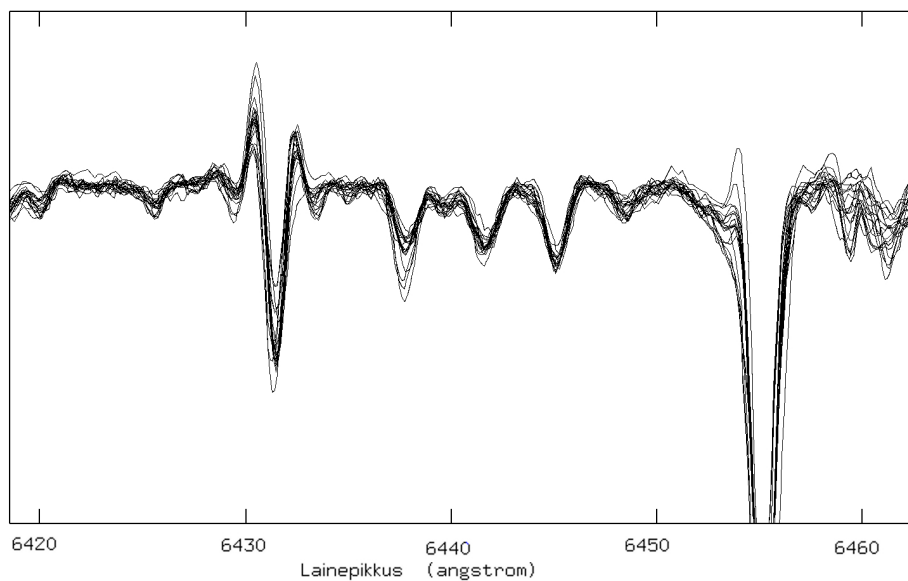


Joonis 3.10: Empiirilisel leitud Ca I/Fe II joonte sügavuste suhte ja temperatuuri vaheline seos.

Peatükk 4

Tulemused ja arutelu

Tulemused on esitatud tabelina lisas A. Kokku leiti Ca I ja Fe II spektrijoonte sügavused 19 tähespektrilt. Kõik spektrid on kuvatud joonisel 4.1.



Joonis 4.1: Graafikul on kuvatud kõik kontiinumile viidud spektrid vahemikus 6420 - 6460 Å.

4.1 Määramatused

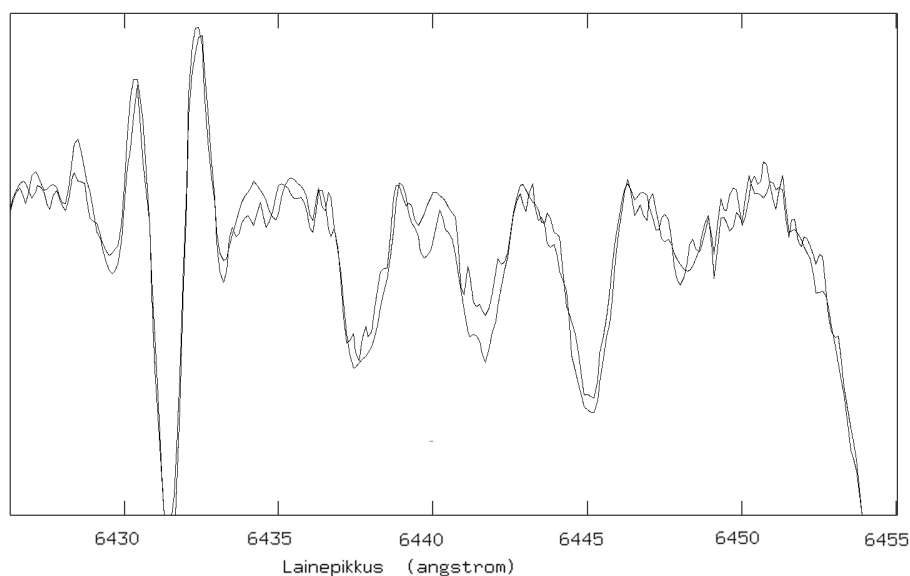
4.1.1 Kontiinumi tase

Uuritavad jooned ei ole kontiinumi suhtes sügavad, seega kontiinumi taseme juhuslike muutuste standardhälve iseloomustab ka joonesügavuse juhuslikku viga.

Kontiinumi standardhälbe leidmiseks valiti spektris lõik, mis on uuritavatele joontele lähedal, kuid kus ei asu ühtegi tähe spektrijoont ega Maa atmosfääri neeldumisjoont. Selline spektriirakond on 6421 - 6425 Å. Igalt spektrilt salvestati see lõik eraldi faili ja käsuga *imstat* kuvati sellel lõigul kontiinumi keskmine väärtus, mille põhjal leiti standardhälve. Standardhälbe väärtuseks saadi 0,002.

4.1.2 Kontiinumile viimise subjektiivsus

Kuna kontiinumile viimine on subjektiivne - andmete töötleja määrab spektris punktid, läbi mille kontiinumi tase peab minema - siis on vajalik selle täpsust hinnata. Enamikul öödel tehti tähest kaks spektrit lühiajalise vahega - nendelt spektritelt mõõdetud joonepõhjade väärtused peaksid olema võrdsed. Seega on mõlema spektri eraldi kontiinumile taandamise põhjal võimalik hinnata subjektiivsust, võrreldes kui palju erinevad kahe spektril mõõdetud joonepõhjade väärtused. Joonisel 4.2 on näha sama öö kahe kontiinumile viidud spektri erinevused. Samal ööl mõõdetud spektrijoonte sügavused ei erinenud rohkem kui 0,003 suhtelise ühiku võrra. Samuti ei täheldatud, et üks joon oleks teisest rohkem varieerunud, seega koondmääramatuse arvutamisel arvestati mõlema joone täpsuseks 0.003 suhtelist ühikut.



Joonis 4.2: 2017. aasta 28. septembri ööl tehtud kahe vaatluse kontiinumile viidud spektrid. Erinevus kahe spektri Ca I joone sügavuste vahel on 0.0014 ja Fe II joone sügavuste vahel 0.0028.

Joone sügavuse määramatus ja kontiinumi standardhälve liituvad kahe joone suhte määramatuse leidmisel. Spektijoonte sügavuste suhte määramatus avaldub valemiga 4.1 kus summaarne joone

sügavuse määramatus on $\delta R(\lambda = 6439 \text{ \AA}) = \delta R(\lambda = 6446 \text{ \AA}) = 0.005$.

$$\delta x = \sqrt{\left(\frac{1}{R(\lambda = 6446 \text{ \AA})} \delta R(\lambda = 6439 \text{ \AA})\right)^2 + \left(\frac{R(\lambda = 6439 \text{ \AA})}{R(\lambda = 6446 \text{ \AA})^2} \delta R(\lambda = 6446 \text{ \AA})\right)^2} \quad (4.1)$$

4.1.3 Efektiivne temperatuur

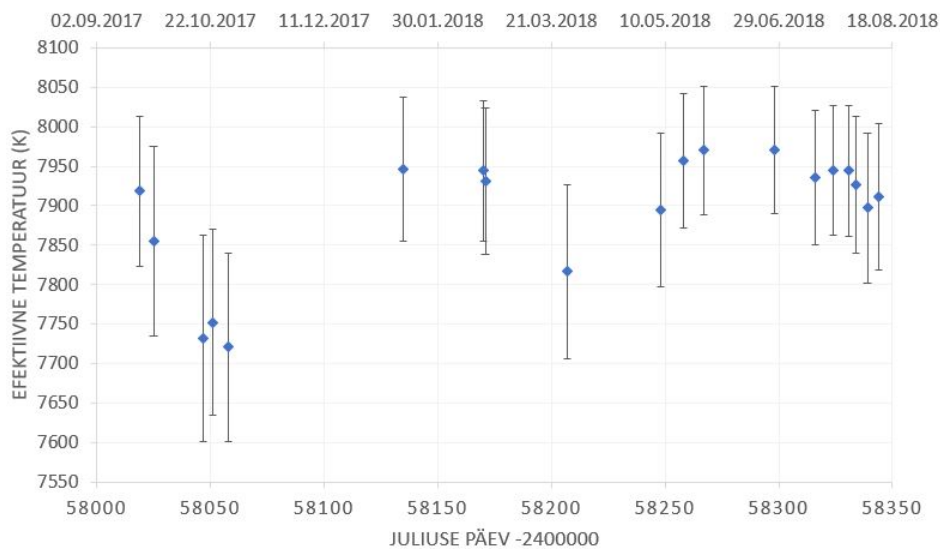
Efektiivse temperatuuri määramatus avaldub algse võrrandi 3.1 põhjal järgnevalt:

$$\delta T_{ef} = \sqrt{((-59 - 2 \cdot 160x) \delta x)^2} \quad (4.2)$$

Tegemist on temperatuuri määramatusega, mis tuleneb joonepõhjade väärtuste leidmise täpsusest. Sellele liitub empiirilise seose enda määramatus, mis on $\pm 50 \text{ K}$.

4.2 Tulemused ja võrdlus varasema epohhiga

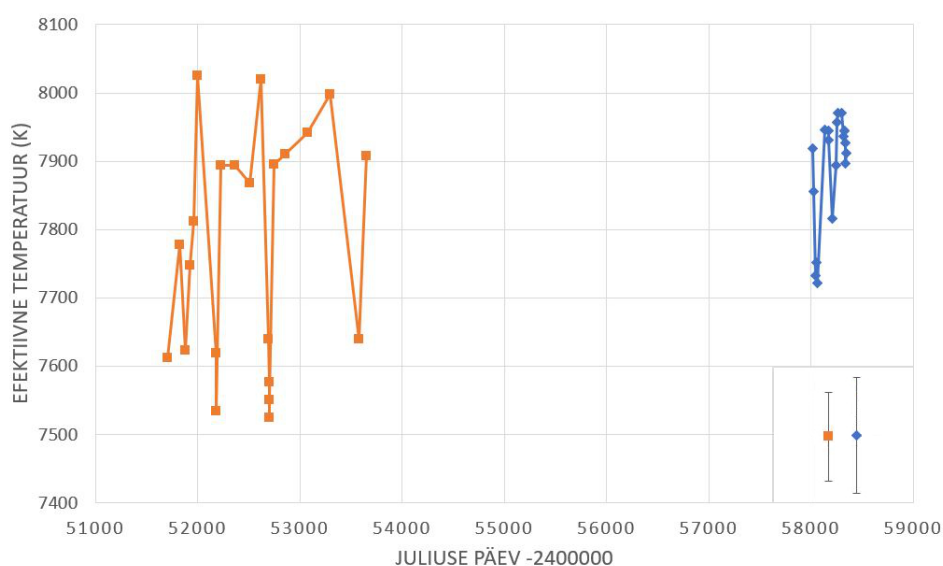
V509 *Cas* temperatuurimuutused 2017. aasta septembrist kuni 2018. aasta augustini on toodud koos määramatustega joonisel 4.3. Võib näha, et aasta jooksul on temperatuur jäänud suhteliselt konstantseks 7800-8000 K juures ja tähelepanuväärseid temperatuurikõikumisi toimunud ei ole.



Joonis 4.3: Leitud efektiivse temperatuuri väärtused koos määramatustega.

Kui võrrelda 2017.-2018. aasta andmeid 2000.-2005. aasta andmetega (Nieuwenhuijzen *et al.*, 2012), siis on näha, et efektiivne temperatuur on ka pikema aja jooksul jäänud peaaegu samale tasemele (joonis 4.4). Kuvatud perioodide keskmine temperatuur vihjab väga väiksele kasvule. Seega V509 Cas asub endiselt kollase evolutsioonilise tühimiku „esimeses“ ebastabiilsuse piirkonnas.

Jooniselt 4.4 ilmneb siiski olulise muutusena, et temperatuuri lühiajaliste võnkumiste amplituud on kahanenud. See on täiendav vihje, et V509 Cas väliskihitide olek on stabiliseerumas ja tähe arengu seisukohast on nüüd oodata nihet tühimiku „teise“ ebastabiilsuse piirkonda. Sellisel juhul ei saa kinnitada peatükis 2.1 viidatud oletust, et V509 Cas on alles „värskelt“ jõudnud kollasesse tühimikku.



Joonis 4.4: Antud töö käigus leitud efektiivse temperatuuri väärtused (sinised rombid) ja Nieuwenhuijzeni *et al.* poolt 2012. aastal avaldatud efektiivse temperatuuri väärtused (oranžid ruudud) aastatel 2000-2005.

Saadud tulemused kinnitavad ühekordselt ioniseeritud lämmastiku [N II] spektrijoone põhjal tehtud uurimust (Aru, 2017). Niisamuti nagu on aeglustunud joone ekvivalentlaiuse kasv, on aeglustunud ka efektiivse temperatuuri tõus.

Alates augustist 2018 kuni veebruarini 2019 teostasid V509 Cas fotomeetrilisi vaatlusi BRITE (ingl. k. *BR*ight *T*arget *E*xplorer) konsortiumi satelliidid. Vaatlusi tehti nii sinises kui punases spektripiirkonnas satelliitide BRITE-Austria ja UniBRITE abil (BRITE, 2019). Satelliitidelt kogutud andmete põhjal oleks võimalik uurida tähe võimaliku fotomeetrilist muutlikkust. Samuti oleks satelliidiandmete võrdlemine Tartu observatooriumis mõõdetud spektraalandmetega lähitulevikus üks järgmisi uuringusamme.

Kokkuvõte

Kollased hüperhiidtähed on massiivsed ja heledad tähed, mis oma arengul on jõudnud ebastabiilsesse staadiumisse. Nende tähtede fotosfäär on väga muutlik ja neile on omased suured massikaotuse episoodid, mis toovad endaga kaasa tähe efektiivse temperatuuri kõikumise.

Antud töös töödeldi kollase hüperhiidtähe V509 *Cassiopeiae* 19 spektrit, mis olid vaadeldud ajavahemikus septembrist 2017 kuni augustini 2018. Töödeldud spektritelt mõõdeti kontiinumi suhtes neutraalse kaltsiumi Ca I ja ühekordselt ioniseeritud raua Fe II spektrijoonte sügavusi. Kuna tegemist on temperatuuritundlike joontega (Carroll ja Ostlie, 2014), siis kasutades juhendaja poolt leitud empiirilist seost Ca I ja Fe II joonte sügavuste suhte ja tähe efektiivse temperatuuri vahel, leiti antud ajavahemikus V509 *Cas* pinnatemperatuur.

Leitud temperatuur oli vahemikus 7800 - 8000 K ja uuritava ajavahemikul tähelepanuväärseid temperatuurikõikumisi ei toimunud. Saadud tulemused koos määramatustega kuvati joonisel 4.3 ja lisas A.

Tulemusi võrreldi Nieuwenhuijzen *et al.* (2012) artiklis avaldatud 2000.-2005. aasta efektiivse temperatuuri väärtustega. Selgus, et viimase 20 aasta jooksul on tähe temperatuur väga aeglaselt tõusnud. See kinnitab Aru (2017) poolt leitud järeldust, et [N II] spektrijoone ekvivalentlause aeglane suurenemine on seotud tähe efektiivse temperatuuri tagasihoidliku tõusuga. Samuti selgus, et temperatuuri lühiajaliste võnkumiste amplituud on kahanenud. See võib vihjata stabiliseerumisele V509 *Cas* väliskihtides.

Tänuavaldused

Täna Tõnis Eenmäed andmetöötuse õpetamise eest ja Anna Aretit 1,5 m teleskoobiga vaatlemise juhendamise eest. Palju tänu veel V509 *Cas* spektraalvaatluste eest Anna Aretile, Üllar Kivilale, Tõnis Eenmäele ja Kertu Metsojale.

Eriline tänu minu juhendajale Indrek Kolkale kasulike soovitude ja juhtnööride eest.

Anni Kasikov

Kirjandus

- Aret, A., Kolka, I., Kraus, M., ja Maravelias, G. (2017). Similarities in the Structure of the Circumstellar Environments of B[e] Supergiants and Yellow Hypergiants. *ASP Conference Series*, 508:241–243.
- Aru, M.-L. (2017). Kollase hüperhiiu HR 8752 emissioonijoone [N II] 6583 Å muutlikkuse uurimine. Bakalaureusetöö, Tartu Ülikool, lk. 11, 24, 31–32.
- Bernstein, R. (2005). ThAr Atlas. <http://www.lco.cl/telescopes-information/magellan/instruments/mike/thar-atlas/red-camera>. Kasutatud: 06.03.2019.
- BRITE (2019). BRITE-Constellation website. <https://brite-constellation.at/>. Kasutatud: 26.05.2019.
- Carroll, B. W. ja Ostlie, D. A. (2014). *An Introduction to Modern Astrophysics*, lk. 248. Pearson Education Limited, Edinburgh Gate, UK, 2 edition.
- de Jager, C. (1980). *The Brightest Stars*, lk. 18. Springer Netherlands, Dordrecht, Holland.
- de Jager, C., Lobel, A., Nieuwenhuijzen, H., ja Stothers, R. (2001). Instability regions in the upper HR diagram. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 327(2):453.
- 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.
- Gray, D. F. (1996). The determination of temperature from spectral lines. Kogumikus Strassmeier, K. G. ja Linsky, J. L., ed., *Stellar surface structure: proceedings of the 176th Symposium of the International Astronomical Union*, volume 176, lk. 227, Vienna, Austria. International Astronomical Union, Kluwer Academic Publishers.
- Howell, S. B. (2000). *Handbook of CCD Astronomy*, lk. 37–38, 48–49. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Humphreys, R. M. (1978). Studies of Luminous Stars in Nearby Galaxies. I. Supergiants and O Stars in the Milky Way. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 38:315.

- Humphreys, R. M. (2003). Luminous Blue Variables, cool hypergiants and some impostors in the H-R diagram. *A Massive Star Odyssey: From Main Sequence to Supernova, Proceedings of IAU Symposium 212*, lk. 43.
- Israelian, G., Lobel, A., ja Schmidt, M. R. (1999). The Yellow Hypergiants HR 8752 and ρ Cassiopeiae near the Evolutionary Border of Instability. *The Astrophysical Journal*, 523(2):L145–L149.
- Kalv, P. (1993). Mõistmise alguses. *Horisont*, 3:7–9.
- Klochkova, V. G., Chentsov, E. L., ja Panchuk, V. E. (2019). Extended atmosphere of the yellow hypergiant V509 Cas in 1996–2018. *Astrophysical Bulletin*, 74(1):1–2, 6–7.
- Kurniotis, M., Bonanos, A.Ž., Yuan, W., Macri, L. M. Garcia-Alvarez, D., ja Lee, C.-H. (2017). Monitoring luminous yellow massive stars in M 33: new yellow hypergiant candidates. *Astronomy and Astrophysics*, 601:1–2, 16.
- 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*, 353:166–167, 169.
- 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):1–3, 5–6, 21.
- Oudmaijer, R. D., Davies, B., de Wit, W.-J., ja Patel, M. (2009). Post-Red Supergiants. *ASP Conference Series*, 412(2):19–22.
- Powell, R. (2002). The Hertzsprung Russell Diagram. <http://www.atlasoftheuniverse.com/hr.html>. Kasutatud: 26.04.2019.
- Zaidel, A. (1970). *Tables of Spectral Lines*, lk. 390. Springer Science+Business Media, New York, USA.

Lisa A

Andmetabel

JD -2400000	Ca I	Fe II	suhe	T_{ef} (K)
58019	0.961	0.953	0.825	7918 ± 95
58025	0.961	0.961	1.003	7855 ± 120
58047	0.938	0.952	1.286	7732 ± 131
58051	0.932	0.946	1.244	7752 ± 118
58058	0.924	0.942	1.310	7721 ± 119
58135	0.967	0.955	0.737	7946 ± 91
58170	0.964	0.952	0.742	7944 ± 89
58171	0.963	0.953	0.785	7931 ± 92
58207	0.943	0.948	1.099	7816 ± 110
58248	0.956	0.951	0.895	7895 ± 98
58258	0.965	0.950	0.701	7957 ± 85
58267	0.966	0.948	0.653	7970 ± 81
58298	0.966	0.948	0.649	7971 ± 81
58316	0.957	0.945	0.770	7936 ± 85
58324	0.957	0.942	0.740	7945 ± 82
58331	0.957	0.943	0.743	7944 ± 83
58334	0.955	0.944	0.799	7927 ± 86
58339	0.954	0.948	0.888	7897 ± 95
58344	0.956	0.948	0.846	7911 ± 92

Tabel A.1: Tabeli esimeses veerus on Juliuse päev, teises ja kolmandas veerus on vastavalt Ca I ja Fe II spektrijoonte põhja mõõdetud väärtused, sellele järgneb spektrijoonte sügavuste suhe ning viimases veerus on leitud efektiivne temperatuur koos määramatusega.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Anni Kasikov,

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

Kollase hüperhiidtähe V509 *Cassiopeiae* temperatuurimuutuste uurimine,

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, 29. mai 2019. a.