

TARTU ÜLIKOOL  
Loodus- ja täppisteaduste valdkond  
Füüsika instituut

Kertu Metsoja

**PLANETAARNE AINE VARAJAST TÜÜPI TÄHTEDE ÜMBER**

Magistritöö (30 EAP)

Füüsika eriala

Juhendaja:  
Mihkel Kama, PhD

Tartu 2021

# Planetaarne aine varajast tüüpi tähtede ümber

Varajast tüüpi ehk noori peajada eelseid tähti ümbritseb tihti protoplanetaarne ketas, kus kohast akreteerub tähe pinnale ainet. Kuna sellist tüüpi tähtedel ei ole pinnakihtidel kiiret aine segunemist, on võimalik tähe atmosfääri uurides määrata akreteerunud aine koostist.

Antud magistritöös uuriti lähemalt tähte KELT-9 ja kaksiktähesüsteemi HD 135344 tähti, millest B komponendil on varasemalt teadaolev protoplanetaarne ketas süvikuga ketta tsentris. Täheatmosfääri mudeldamiseks kasutati Zeeman koodi ja  $\chi^2$  minimiseerimise meetodit.

KELT-9 analüüsil saadi mõõtevea piirides sarnased tulemused varasemate tulemustega. HD 135344 analüüsil leiti, et primaarse tähe temperatuur on kõrgem, kui kirjaduses viidatud, ning tähe ümber võis veel hiljaaegu olla protoplanetaarne ketas. Sekundaarse tähe kettas saadi kinnitust jääpiiri olemasolule.

Märksõnad: noored tähed, protoplanetaarne ketas, täheatmosfäär, HD 135344

CERCS: P520 — Astronoomia, kosmoseuuringud, kosmosekeemia

# Planetary matter around early type stars

Early type, or young, pre-main sequence stars are often surrounded by a protoplanetary disk, where from matter is accreting onto the surface of the star. Since stars of this type do not have rapid mixing of matter in the surface layers, it is possible to determine the composition of the accreted matter by studying the stellar atmosphere.

In this master's thesis, the stars of KELT-9 and binary star system HD 135344, which component B has a previously known protoplanetary disk with a cavity in the center of the disk, were studied in more detail. The Zeeman code and the  $\chi^2$  minimization method were used to model the stellar atmosphere.

The KELT-9 analysis gave results similar to previous results within the measurement error. In the analysis of HD 135344, it was found that the temperature of the primary star is higher than the value indicated in the literature, and there could have been until recently a protoplanetary disk around the star. The presence of an iceline was confirmed in the secondary star disk.

Keywords: young stars, protoplanetary disk, stellar atmosphere, HD 135344

CERCS: P520 — Astronomy, space research, cosmic chemistry

# Sisukord

<b>Sissejuhatus</b>	<b>5</b>
<b>1 Tähe ehitus</b>	<b>6</b>
1.1 Täheatmosfäär . . . . .	7
1.1.1 Kiirguslevi . . . . .	7
1.1.2 Täheatmosfääri mudel . . . . .	9
1.1.3 Ostsillaatori tugevus . . . . .	9
1.2 Tähele akreteerunud aine . . . . .	10
<b>2 Metoodika</b>	<b>11</b>
2.1 Spektri töötlus . . . . .	13
<b>3 KELT-9</b>	<b>15</b>
<b>4 Herbig Ae/Be tähed</b>	<b>16</b>
4.1 HD 135344 . . . . .	17
4.1.1 HD 135344B potentsiaalsed kaaslased . . . . .	19
<b>5 Analüüs ja tulemused</b>	<b>21</b>
5.1 KELT-9 . . . . .	21
5.2 HD 135344 . . . . .	24
5.2.1 HD 135344A . . . . .	26
5.2.2 HD 135344B . . . . .	27
<b>6 Kokkuvõtte</b>	<b>30</b>
<b>Tänuavaldused</b>	<b>31</b>
<b>Kirjandus</b>	<b>32</b>
<b>A Zeemani kirjeldus</b>	<b>37</b>

A.1	Moodul arraySizes . . . . .	37
A.2	Põhiprogramm ZeemanU . . . . .	37
A.3	Alamprogramm ReadVALD3 . . . . .	38
	A.3.1 Alamprogramm parse_quantum3 . . . . .	38
	A.3.2 Alamprogramm correctGF . . . . .	39
A.4	Alamprogramm COMPTON . . . . .	39
A.5	Alamprogramm KAPPAC . . . . .	39
A.6	Alamprogramm LTELC . . . . .	39
A.7	Alamprogramm DSKINT . . . . .	40
A.8	Alamprogramm MAGFLD . . . . .	40
A.9	Alamprogramm ABZSP . . . . .	40
A.10	Alamprogramm VOIGT . . . . .	41
	A.10.1 Alamprogramm HE4471 . . . . .	41
A.11	Alamprogramm LINPRO . . . . .	41
A.12	Alamprogramm VmacCONV . . . . .	41
A.13	Alamprogramm SPPROF . . . . .	42

<b>Lihtlitsents</b>	<b>43</b>
---------------------	-----------

# Sissejuhatus

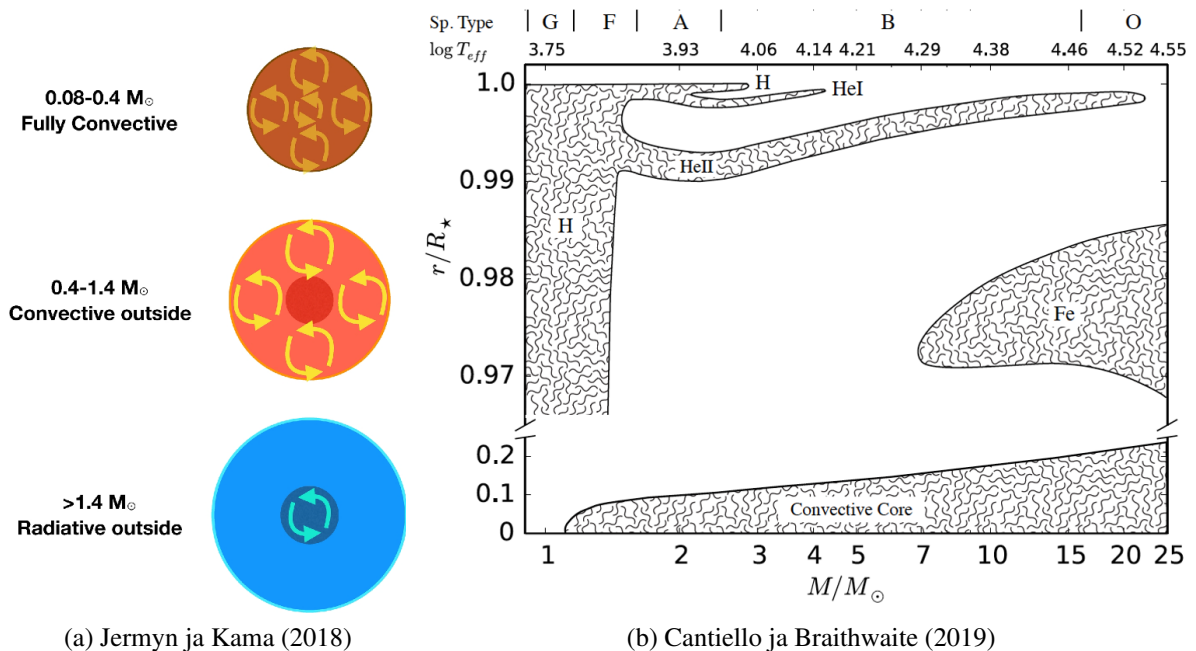
Tähtede ja planeetide teke on tugevalt seotud neid ümbritseva keskkonnaga, olgu selleks siis molekulaarpilv tähetekkeks või protoplanetaarne ketas planeetide tekkeks. Planeedi mass, orbitaalne arhitektuur ja koostis sõltuvad tugevalt protoplanetaarse ketta füüsikaliste ja keemiliste omadustega planeedi tekkepaigas, ketta struktuuri evolutsioonist (lokaalselt ja globaalselt) ning planeedirändest ajendatud dünaamilistest interaktsioonidest ketta ainega (Andrews, 2020).

Antud töös uuritakse keskmise massiga tähti ( $\sim 1,4 M_{\odot}$ ), mis on veel sellises evolutsioonises etapis, kus neid ümbritseb protoplanetaarne ketas. Selliste tähtede pinnakihtidele akreteerunud aine seguneb täheainega aeglaselt ja see avab uue meetodi tähte ümbritseva protoplanetaarse ketta struktuuri ja keemilise koostise uurimiseks. Kui paika on pandud ketta omadused, saab määrata juba olemasolevate või potentsiaalselt tekkivate planeetide parameetreid.

Täpsemalt uuritakse tähte KELT-9 ja kaksitähesüsteemi HD 135344 tähtede parameetreid. Uurimismeetodiks on mudeldada tähe atmosfääri spekter ja selle kaudu määrata tähe parameetrid. Selleks kasutatakse Fortran programmeerimiskeeles kirjutatud programmi Zeeman, mis leiab tähe parameetrid kasutades väiksema  $\chi^2$  meetodit.

# 1. Tähe ehitus

Harilik täht koosneb tuumast, konvektsioonivööndist ja/või kiirgusvööndist. Siseehitusele järgneb täheatmosfäär, mis omakorda jaguneb fotosfääriks, kromosfääriks, ülemineku piirkonnaks ja koroonaks. Vastavalt tähe massile erineb nende siseehitus (joonis 1.1). Tähti saab massi järgi jaotada kolme rühma: väikese massiga ( $M < 0,4 M_{\odot}$ ), keskmise massiga ( $0,4 M_{\odot} < M < 1,4 M_{\odot}$ ) ja suure massiga ( $M > 1,4 M_{\odot}$ ) tähed. Väikese massiga tähed on täielikult konvektiivsed ehk neil on pärast tuuma ainult konvektsioonivöönd. Keskmise massiga tähtedel järgneb tuumale kiirgusvöönd ja konvektsioonivöönd on väliskihtidel. Suure massiga tähtedel tekib konvektsioonivöönd intensiivse termotuumareaktsiooni tõttu juba tuumas ja seega tuumale järgneb ainult kiirgusvöönd.



Joonis 1.1: Konvektsiooni- ja kiirgusvööndi jaotus tähe sisemuses. (a) Tähtede jaotus massi järgi. Konvektsioonivöönd on tähistatud ringnooltega. (b) Vööndite jaotus tähe tuuma ja pinnakihi juures. Konvektsioonivöönd on tähistatud säbruliselt. Alumisel vertikaalteljel tähe mass, ülemisel vertikaaljoonel tähe efektiivne temperatuur logaritmilises skaalas ja spektriklassid.

## 1.1 Täheatmosferaar

Nagu eelnevalt mainitud järgneb pärast tähe siseehitust täheatmosferaar, mille madalamaks ja jahedamaks kihiks on fotosfäär. See on täheatmosferaari n-ö nähtav kiht, millest saame ka tähe spektri. Spekter tekib, kui tuuma poolt tekitatud ja konvektsiooni ja/või kiirguse teel edasi kantud energia interakteerub välistes kihtides oleva ainega, mille tulemusel tekib vaadeldav elektromagnetspekter. Tähe spektri uurimine on hea viis, et määrata täheatmosferaari parameetrid, näiteks efektiivne temperatuur ( $T_{eff}$ ), pinnagravitatsioon ( $\log g$ ), projekteeritud pöörlemiskiirus ( $v \sin i$ ), mikroturbulents ( $\epsilon_t$ ) ja keemiline koostis.

Tüüpiliselt kirjeldatakse tähte massi ( $M$ ), heleduse ( $L$ ), raadiuse ( $R$ ), vanuse ja paljude teiste parameetrite järgi, kuid enamus neist parameetritest ei ole otseselt vaadeldavad (Niemczura *et al.*, 2016). Efektiivset temperatuuri ja pinnagravitatsiooni on hea määrata, sest need on otseselt seotud massi, heleduse ja raadiusega:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{eff}^4, \quad (1.1)$$

$$g = GM/R^2, \quad (1.2)$$

kus  $\sigma$  tähistab Stefan-Boltzmanni konstanti ja  $G$  tähistab gravitatsioonikonstanti.

Keemilisest koostisest ehk metallilisusest saab ka mõelda kui kümnendlogaritmilisest suhtest võrreldes tähe rauasisaldust Päikese rauasisaldusega ning see on leitav järgnevalt:

$$Z = [Fe/H] = \log_{10} \left( \frac{N_{Fe}}{N_H} \right)_* - \log_{10} \left( \frac{N_{Fe}}{N_H} \right)_{\odot}, \quad (1.3)$$

kus  $N_{Fe}$  ja  $N_H$  on vastavalt raua ja vesiniku aatomite arv ruumalaühiku kohta. Kui  $Z = 0$ , siis on tähe elementide sisaldus võrdne Päikesega. Kui  $Z = -1$ , siis on tähe metallilisus 10 korda Päikesest väiksem.

Et aga määrata täheatmosferaari efektiivne temperatuur, keemiline koostis ja teised füüsikalised parameetrid, tuleb lahendada kiirguslevi võrrand.

### 1.1.1 Kiirguslevi

Vaadeldes paralleelsete kiirtekimbu levimist mingis gaasis näeme, et intensiivsuse muutus lainepikkusel  $\lambda$ , teepikkusel  $ds$  ja gaasi tihedusel  $\rho$  on võrdeline indensiivsuse endaga

$$dI_{\lambda} = -\kappa_{\lambda} \rho I_{\lambda} ds, \quad (1.4)$$

kus  $\kappa_\lambda$  on neeldumiskoeffitsent ehk läbipaistmatus, mille dimensiooniks on  $\text{cm}^2\text{g}^{-1}$ . Neeldumiskoeffitsent sõltub täheatmosfääri tihedusest, temperatuurist ja keemilisest koostisest.

Vaadeldes footonite difusiooni läbi atmosfääri ehk kui kiirtekimp lainepikkusega  $\lambda$  liigub läbi gaasi näeme, et intensiivsuse muutus  $dI_\lambda$  on võrdeline kiiresuunalise teepikkusega  $ds$  ja gaasi tihedusega  $\rho$

$$dI_\lambda = j_\lambda \rho ds, \quad (1.5)$$

kus  $j_\lambda$  on kiirguskoeffitsent, mille dimensiooniks on  $\text{s}^{-3}\text{sr}^{-1}$ . Kiirguskoeffitsent sõltub täheatmosfääri kiirguse lainepikkusest.

Kombineerides valemid (1.4) ja (1.5) saame

$$dI_\lambda = -\kappa_\lambda \rho I_\lambda ds + j_\lambda \rho ds. \quad (1.6)$$

Jagame valemi (1.6) avaldisega  $-\kappa_\lambda \rho ds$ :

$$-\frac{1}{\kappa_\lambda \rho} \frac{dI_\lambda}{ds} = I_\lambda + \frac{j_\lambda}{\kappa_\lambda}. \quad (1.7)$$

Kiirguslevi võrrandi lahendamiseks peame teadma allikfunktsiooni  $S_\nu$ , mis on kiirgus- ja neeldumiskoeffitsendi suhe ja mille dimensiooniks on  $\text{erg s}^{-1}\text{cm}^{-3}\text{sr}^{-1}$

$$S_\lambda \equiv \frac{j_\lambda}{\kappa_\lambda}. \quad (1.8)$$

Kasutades valemit (1.8) saame valemi (1.7) viia kujule:

$$-\frac{1}{\kappa_\lambda \rho} \frac{dI_\lambda}{ds} = I_\lambda + S_\lambda. \quad (1.9)$$

Saime kiirguslevi võrrandi, mis kehtib vaid ajas mitte muutuva kiirgusvälja jaoks.

Defineerimine optilise sügavuse

$$d\tau_\lambda = -\kappa_\lambda \rho ds, \quad (1.10)$$

$$\tau_\lambda = \int_0^s \kappa_\lambda \rho ds, \quad (1.11)$$

kus  $s$  on kaugus mööda footoni liikumisteed. Kui  $\tau_\lambda \gg 1$ , öeldakse, et keskkond on optiliselt paks ja kui  $\tau_\lambda \ll 1$ , on tegemist optiliselt õhukese keskkonnaga.

Kirjutame valemi (1.9) teisiti, kasutades optilise sügavuse valemit (1.10):

$$\frac{dI_\lambda}{d\tau_\lambda} = I_\lambda + S_\lambda. \quad (1.12)$$

Kuna optiline sügavus  $\tau_\lambda$  kui ka teepikkus  $s$  on määratud mööda kiirt, mitte  $z$ -koordinaati, vaatleme tähe atmosfääri kui tasaparalleelset kiht. Defineerime vertikaalse optilise sügavuse

$$\tau_v = \int_z^0 \kappa_\lambda \rho dz, \quad (1.13)$$

$$\tau_\lambda = \frac{\tau_v}{\cos \theta}. \quad (1.14)$$

Asendades valemi (1.14) valemisse (1.12) saame kiirguslevi võrrandiks

$$\cos \theta \frac{dI_\lambda}{d\tau_v} = I_\lambda + S_\lambda. \quad (1.15)$$

### 1.1.2 Täheatmosfääri mudel

Et jõuda lähemale täheatmosfääri parameetrite leidmisele, tuleb teha matemaatiline mudel, mis kirjeldaks õigesti tähe atmosfääri füüsikalist ehitust ja elektromagnetspektrit. Selleks on vaja lahendada hüdrostaatilisest tasakaalust võrrand

$$\frac{dP}{dr} = \rho g = \frac{\rho GM_r}{r^2}. \quad (1.16)$$

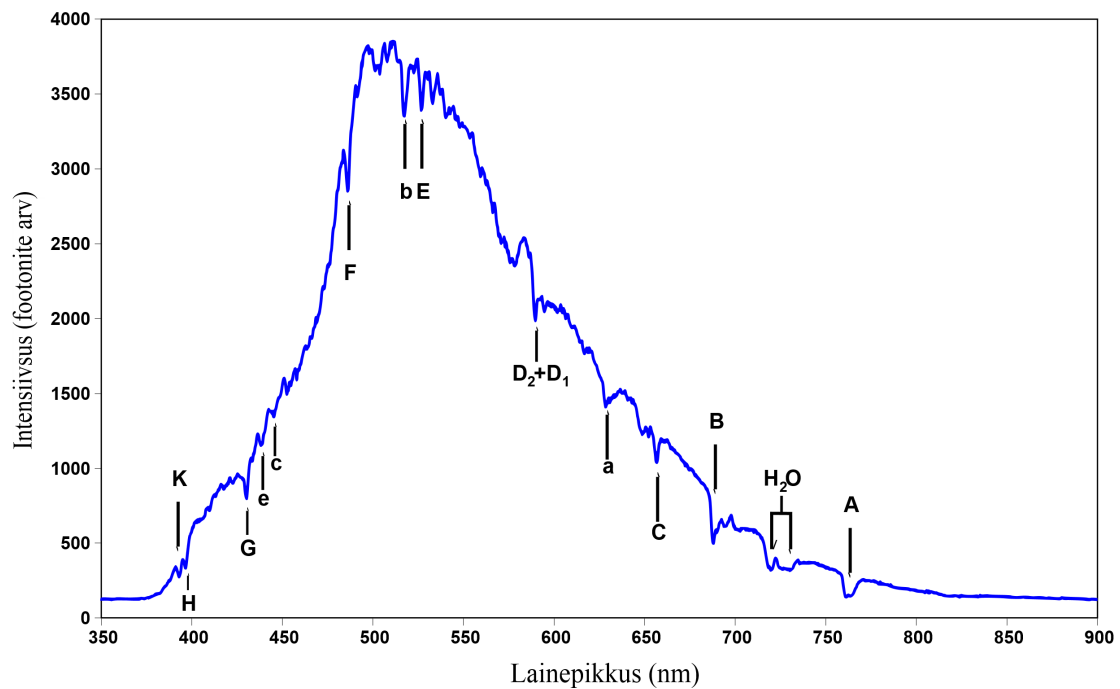
Seejärel lahendatakse kiirguslevi võrrand (1.15) ja statistilise tasakaalu võrrandid samaaegselt.

### 1.1.3 Ostsillaatori tugevus

Suhtelisi tõenäosusi siirdeks mingilt energiatasemelt teisele kirjeldab ostsillaatori tugevus  $f$

$$f = \frac{mc^3}{2\pi e^2 v^2} \frac{g_u}{g_l} A_{ul} l = 1,884 \cdot 10^{-15} \lambda^2 \frac{g_u}{g_l} A_{ul}. \quad (1.17)$$

Ostsillaatori tugevus  $f$  sõltub elektronmassist  $m = 9,1094 \cdot 10^{-28}$  kg, valguskiirusest  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s, elektrilaengust  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  C, laine kiirusest  $v$ , statistilistest kaaludest ülemisel  $g_u$  ja alumisel  $g_l$  energiatasemel ning Einsteini koefitsendist  $A_{ul}$ .



Joonis 1.2: Näide spektrijoone profiilist. Tegemist on taeva neeldumisspektriga (Bajart, 2010). Joonisel on tähistatud erinevad neeldumisjooned. Näeme, et neeldumiskoeffitsient on esitatav lainepikkuse ja intensiivsuse funktsioonina.

## 1.2 Tähele akreterunud aine

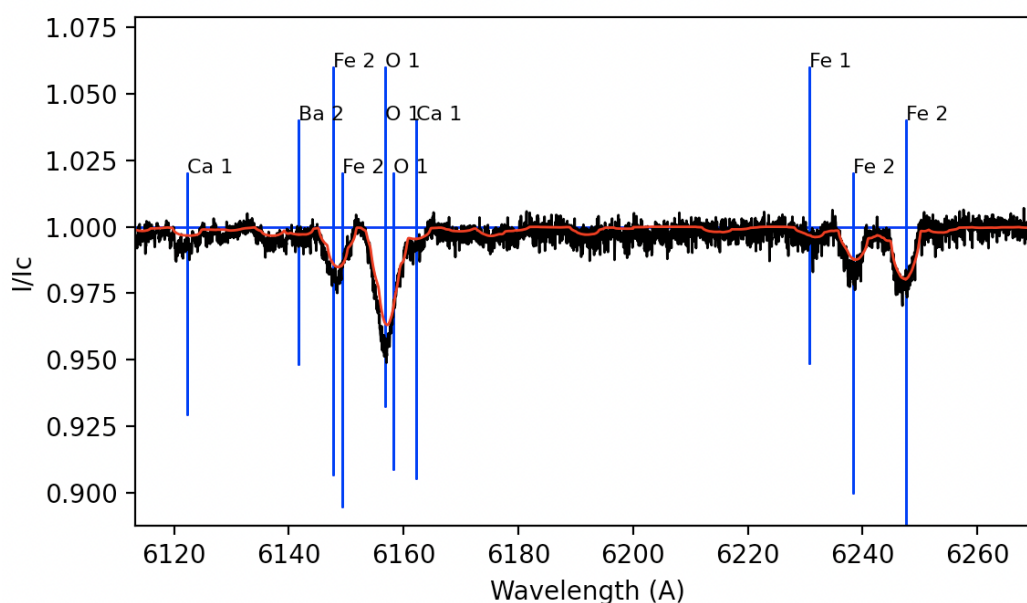
Protoplanetaarsed kettad, jäänu kettad ja häiritud või aurustuvad planeedid võivad kõik mingi määral või täielikult akreteruda tähele. Protoplanetaarne ketas on optiliselt paks pöörlev tähe ümber kogunenud aine, mis koosneb gaasist ja tolmust ning ümbritseb varajases evolutsioonietapis tähti, näiteks Herbig Ae/Be tähed (vt. peatükk 4). Jäänuk ketas on optiliselt õhuke tähe ümber kogunenud aine, mis koosneb peamiselt tolmust. Protoplanetaarse ja jäänu ketta peamisteks erinevusteks ongi tolmu kogus, radiaalne materjali jaotus ja gaasi puudumine jäänu kettast (Wyatt *et al.*, 2015). Häiritud või aurustuv planeet on selline planeet, mis heidab teda ümbritsevasse keskkonda suurel määral ainet, kas siis kokkupõrke tulemusel teise taevakehaga või ematähele liiga lähedal olles kõrge temperatuuri tõttu.

Selliste tähtede fotosfääri keemiline koostis võib avaldada akreterunud aine koostise. Kõige tõenäolisemalt saab seda uurida B kuni kesk-F spektriklassi kuuluvatel tähtedel, millel on konvektsioonivöönd pinnakihtidel ja kiirgusvööndi ümbris. Seega on akreterunud aine segunemine tähe ainega aeglasem (Jermyn ja Kama, 2018).

## 2. Metoodika

Antud töös kasutatakse tähtede füüsikaliste parameetrite ja keemilise koostise määramiseks spektraalvaatlusi, mida sobitatakse sünteetiliste mudelspektritega.

Iga üksiku spektrijoone detailse analüüsi asemel kasutatakse alternatiivselt kas kogu või osa vaadeldavast tähespektrist ja leitakse kõige paremini sobitatud sünteetiline spekter (joonis 2.1). Sünteetiline ehk mudelspekter leitakse Zeeman spektri sünteesikoodiga (Landstreet, 1988; Wade *et al.*, 2001; Folsom *et al.*, 2012).



Joonis 2.1: Näide sünteesitud spektrist. Musta joonega on vaadeldud spekter, punase joonega sünteesitud spekter ning sinisega on välja toodud erinevate elementide neeldumisjoonte intensiivsused. Vertikaalteljel lainepikkused mõõtühikus Å ja horisontaalteljel normaliseeritud intensiivsus.

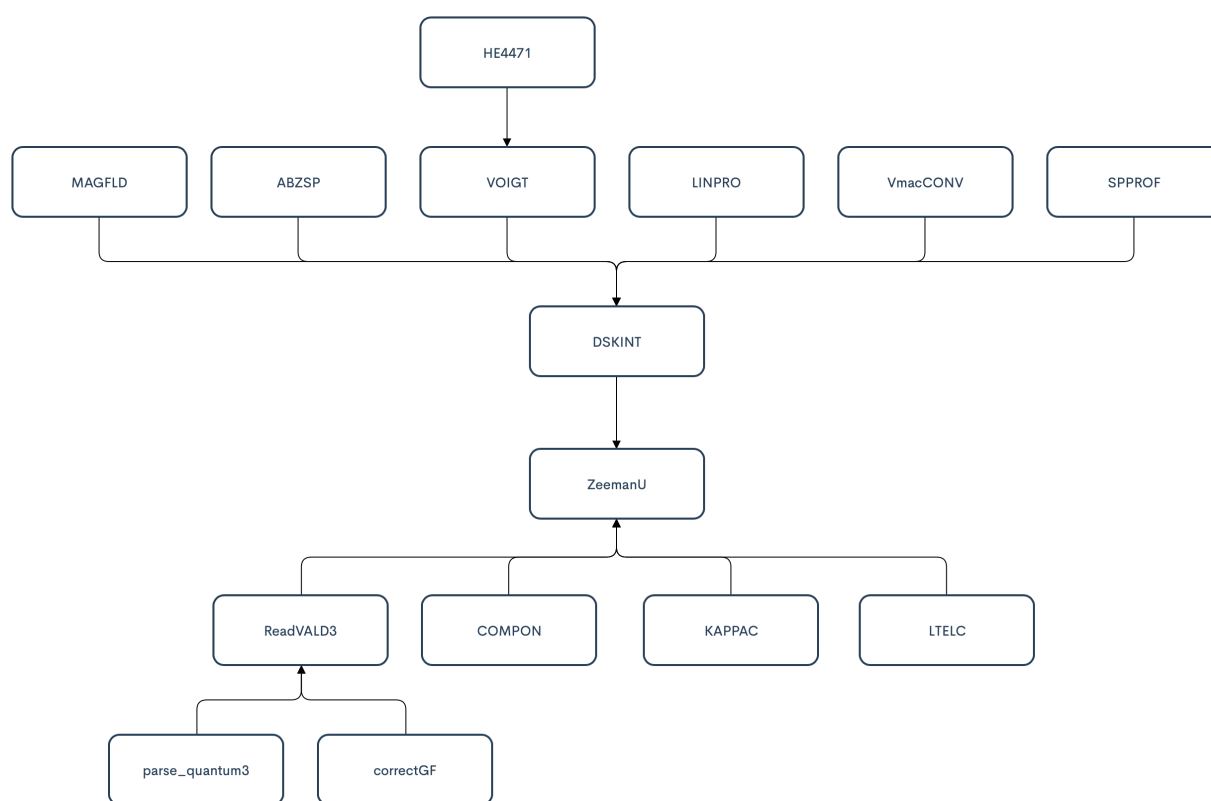
Kood teostab lokaalse termodünaamilise tasakaalu eeldusel polariseeritud kiirgusülekanne. Kõige paremini sobituvate parameetrite leidmiseks kasutatakse Levenberg-Marquardt  $\chi^2$  minimeerimise meetodit (Press *et al.*, 1996), mis seisneb erinevate sisendparameetrite ( $T_{eff}$ ,

log  $g$ , metallilisus  $Z$ , miktoturbulents  $\varepsilon_t$ , projekteeritud pöörlemiskiirus  $v \sin i$  jne) varieerimisel, mille kaudu leitakse kombinatsioon kus  $\chi^2$  väärtus on väiksem.

$\chi^2$  määramisest võib lihtsamal kujul mõelda kui

$$\chi^2 = \sum \frac{(\text{andmepunkt} - \text{mudel})^2}{\text{andmepunkti määramatus}^2}. \quad (2.1)$$

Antud töös kasutati  $\chi^2$  väärtuse määramisel kriteeriumi, et kui  $\chi^2$  suhteline muutus tema kahe väärtuse vahel on väiksem kui 0,002, siis saadud fit sobib. See pidi toimuma vähemalt kahel järjestikusel korral, et  $\chi^2$  lõplik väärtus määrata.



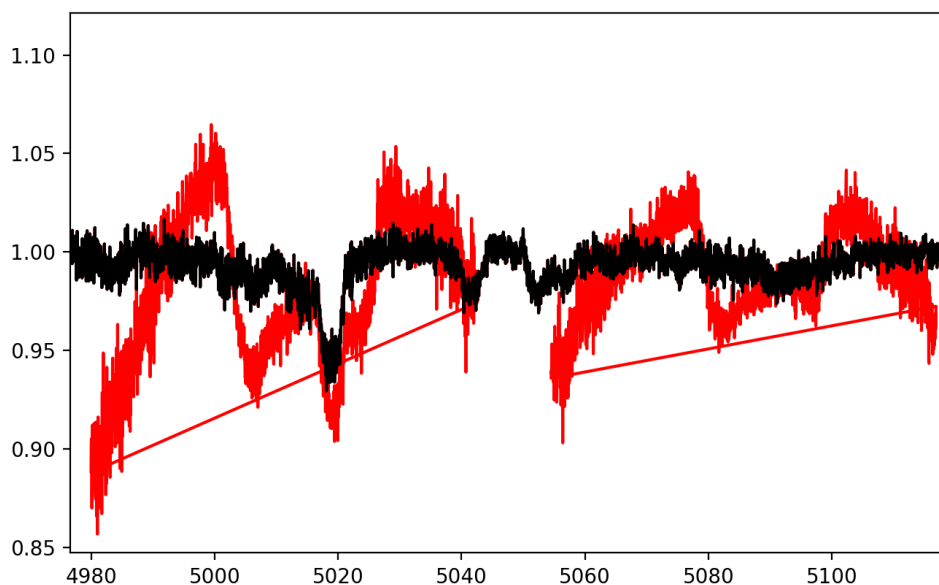
Joonis 2.2: Zeeman koodi ja tema alamprogrammide üldine ülesehitus.

Nähtav ketas on jaotatud mitmeks pinnaelemendiks. Eeldatakse, et lokaalsed esilekerkivad spektrid varieeruvad tähe ketta tsentrist ainult projekteeritud radiaalkaugusega. Seega kiiruslevi toimub ainult selliste pinnaelementidega, millel on erinevad radiaalkaugused. Tulemusi kasutatakse uuesti erinevate nurgaasendite korral, et vähendada kiiruslevi toimumiste arvu. Optimeerimised eeldatakse, et lokaalse joone absorptsioon ehk Voigti ja anomaalse dispersiooni ehk Faraday-Voigti profiilid varieeruvad ainult vertikaalselt läbi atmosfääri, mitte asukohaga kettal, vähendades selle tulemusel oluliselt nende profiilide arvutamiste kordi (Folsom *et al.*, 2012).

Zeeman kood on programmeerimiskeeles Fortran kirjutatud. Kood kasutab aatomilisi andmeid VALD (*Vienna Atomic Line Database*) andmebaasist (Kupka *et al.*, 1999). Atmosfääri mudelid on arvutatud kasutades ATLAS9 koodi (Kurucz, 1993) Päikese keemiliste elementide sisaldusega (Asplund *et al.*, 2009). Jooniselt 2.2 on koodi Zeemani üldine ülesehitus tema alamprogrammidega. Lisaks põhiprogrammile ZeemanU, koosneb kood veel neljateistkümnest alamprogrammist. Detailne koodi kirjeldus on lisas A.

## 2.1 Spektri töötlus

Spektri töötlust alustati normaliseeritud echelle spektri ühtlustamises. Kattuvates spektripiirkondades määrati visuaalselt keskpunkt, kus kaks spektrilõiku ühtisid, seejärel eemaldati ühelt spektrilõigult lõpp ja teiselt algus kuni määratud keskpunktini (joonis 2.3).



Joonis 2.3: Näide echelle spektri kattuvatest piirkondadest ja ühtlustatud spektrist. Punase värviga on välja toodud musta joonega tähistatud ühtlustatud spektrist välja jäetud osad. Vertikaalteljel lainepikkus mõõtühikuga Å ja horisontaalteljel kontiinumile normaliseeritud intentsiivsus.

Ühtlustatud spektreid käidi  $\sim 500$  Å suuruste spektriakende kaupa läbi. Ligikaudsed lainepikkuste piirkonnad olid 4900 – 5400, 5400 – 5800, 5800 – 6200 ja 6300 – 6800 Å. Lainepikkuste täpsed vahemikud varieerusid iga spektri korral vastavalt kiirguste erinevatest piirkondadest ja Balmeri joonte erinevatest laiustest.

Kui spekter oli ühtlustatud ja paika pandud kindlad lainepikkuste piirkonnad prooviti Zeeman koodiga sobitada sünteesspekter vaaltusspektriga, ilma et ükski parameeter oleks vaba. Kui

spektriaknale ei olnud vaja teha korrekture ehk mingeid piirkondi välja jätta või hoopiski juurde võtta, hakati parameetreid ükshaaval vabastama. Kõige paremad  $\chi^2$  tulemused tulid siis, kui mitu parameetrit olid vabad. Näiteks olid vabadeks parameetriteks  $T_{eff}$ ,  $\log g$ ,  $\varepsilon_t$ ,  $v \sin i$  ja  $Z$  või  $T_{eff}$  ja uuritavate keemiliste elementide parameetrid. Iga spektriakna korral uuriti, milliste keemiliste elementide tugevamad jooned seal paiknevad enne, kui neid vabadeks parameetriteks tehti.

Lõppväärtuste leidmiseks võeti igas spektriaknas leitud parameetrite peale keskmine väärtus ja määramatus standardhälbe kaudu. Kui ühes spektriaknas parameetri väärtus erines teistega võrreldes tugevalt, jäeti see keskmise väärtuse arvutamisel välja. Keemiliste elementide puhul, millel oli spektriakende peale ainult üks või kaks väärtust, hinnati määramatust pigem visuaalselt, kui standardhälbe abil.

Enne veel kui lõppväärtuste analüüsi juurde mindi sobitati saadud tulemused Zeeman koodi ja käidi spekter üle. Vajadusel tehti mõni parameeter vabaks, mille tulemusel selle lõpptulemust või määramatust parandati visuaalse hinnangu abil.

### 3. KELT-9

Antud magistritöös tehakse kalibratsioonimõõtmisi HD 195689 ehk KELT-9 spektriga. KELT-9 on Maast 20 pc kaugusel ja asub Luige tähtkujus (joonis 3.1). Eestis on seda tähte kõige paremini võimalik vaadelda suvel ja sügisel, kuid tähtkuju ise püsib aastaringselt taevast. Tähtel on üks teada olevatest kõige kuumematest planeetidest, milleks on kuum Jupiter temperatuuriga  $T_{eq} = 4600$  K ja kannab nime KELT-9b (Gaudi *et al.*, 2017). KELT-9 kuulub A0E spektriklassi ehk tähe efektiivne temperatuur on 9600 K ja tähe spektris leidub kiirgusjooni, mis viitab akretsioonile. KELT-9 massiks on  $M_* = 1,978 \pm 0,023 M_{\odot}$  ja raadiuseks  $R_* = 2,178 \pm 0,011 R_{\odot}$ . KELT-9b massiks on  $M_p = 2,44 \pm 0,70 M_J$  ja raadiuseks  $R_p = 1,783 \pm 0,009 R_J$  (Hoeijmakers *et al.*, 2019).

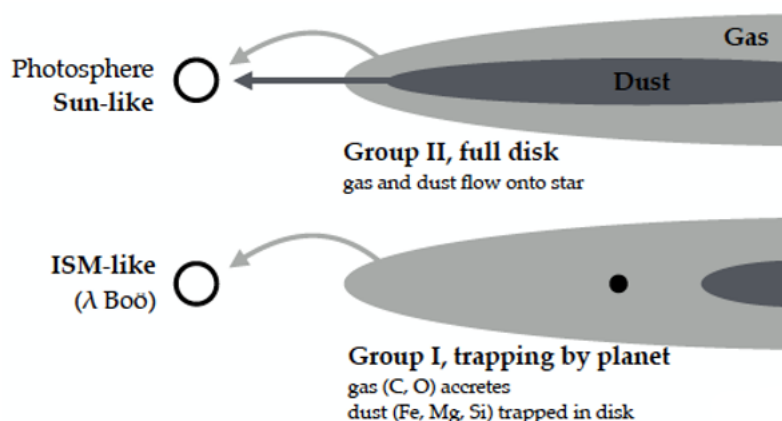
KELT-9b orbitaalperiood on 1,5 päeva (Gaudi *et al.*, 2017). Kuna ta on tähele nii läheda, aurustub KELT-9b kiirusega  $10^{-16} - 10^{-13} M_{\odot}/\text{yr}$  (Gaudi *et al.*, 2017; Fossati *et al.*, 2018; Cauley *et al.*, 2019). Osa või kõik planeedilt eemaldunud aine akreteerub tähele, kus see on potentsiaalselt vaadeldav fotosfäärilise saastumisena (Jura, 2015).



Joonis 3.1: KELT-9 asukoht taevast, tähistatud valge ristiga (Stellarium, 2021)

## 4. Herbig Ae/Be tähed

Herbig Ae/Be (HAeBe) tähed on oma nime saanud Ameerika astronoomi George Herbigi järgi 1960. aastal, kes esimesena sooritas süstemaatilise uuringu nendest tähtedest. HAeBe tähed on noored ( $< 10$  Myr) B, A, ja F spektriklassi tähed, millel on olemas ka protoplanetaarne ketas ning nende spektritest leidub vesiniku ja kaltsiumi kiirgusjooni, mis viitab akretsioonile (Herbig, 1960; Waters ja Waelkens, 1998). HAeBe tähed on massiga  $2 - 4 M_{\odot}$  ja neid peetakse keskmise massiga peajada tähtede evolutsioonilisteks eelkäijateks, kuna HAeBe tähtede pinnagravitatsioon on madalam kui peajada tähtedel (Strom *et al.*, 1972). Siirdekettad suurte tolmusüvikutega HAeBe tähtede ümber on eriti huvipakkuvad, sest neid peetakse olevat viimases protoplanetaarse ketta evolutsiooni- ja võimalike planeetide tekke etapis. Sellises etapis areneb gaasirohke protoplanetaarne ketas gaasivaesesse jäänuks kettasse. Hertzsprung-Russelli diagrammil paiknevad HAeBe tähed peajadast paremal pool.



Joonis 4.1: Gaasi ja tolmu jaotus ketta siseosas grupp I ja II ketta korral (Kama *et al.*, 2015).

Vastavalt spektraalsele energijaotusele saab HAeBe tähti ümbritsevaid protoplanetaarseid kettaid liigitada kas gruppi I (kuumad, paisuvad) või gruppi II (külmad, lamedad) (joonis 1.8). Algselt arvati, et grupp I kettad arenevad edasi grupp II ketasteks (Meeus *et al.*, 2001). Viimastest aruteludest on jäädud arvamusele, et grupp I kettad on siirdekettad ehk neil on näiteks radiaalseid süvikuid või vahemikke, kus puudub suuremal hulgal millimeetri-suurune tolm ja isegi gaas

(Van der Plas *et al.*, 2015), mis võivad tekkida kui tolmu jääb ketta välisalale kinni näiteks planeedi tõttu (Zhu *et al.*, 2012). Ei ole veel leitud tähte grupp II kettaga, mis on siirdeketas, sest kõik seni uuritud siirdekettastega tähed on olnud grupp I ketastega tähed.

Tüüpiline hilis-B kuni varajane-F spektriklassi täht, millel on grupp I protoplanetaarne ketas või siirdeketas, on ammendatud kivi-tekitavatest elementidest (Fe, Mg, Si) 0,5 dex võrreldes Päikese ja grupp II kettaga tähe keemiliste elementide sisaldusega (Kama *et al.*, 2015). Elementide puudus on tõenäoliselt tingitud hiidplaneetidest, mis löksustavad suured tolmuühendid välimise kettasse. Kama *et al.* (2015) pakkusid välja, et  $\sim 30\%$  Herbig Ae/Be tähtedel on hiidplaneet. Lisaks võib kettas leiduda süvikuid või tühimike.

## 4.1 HD 135344

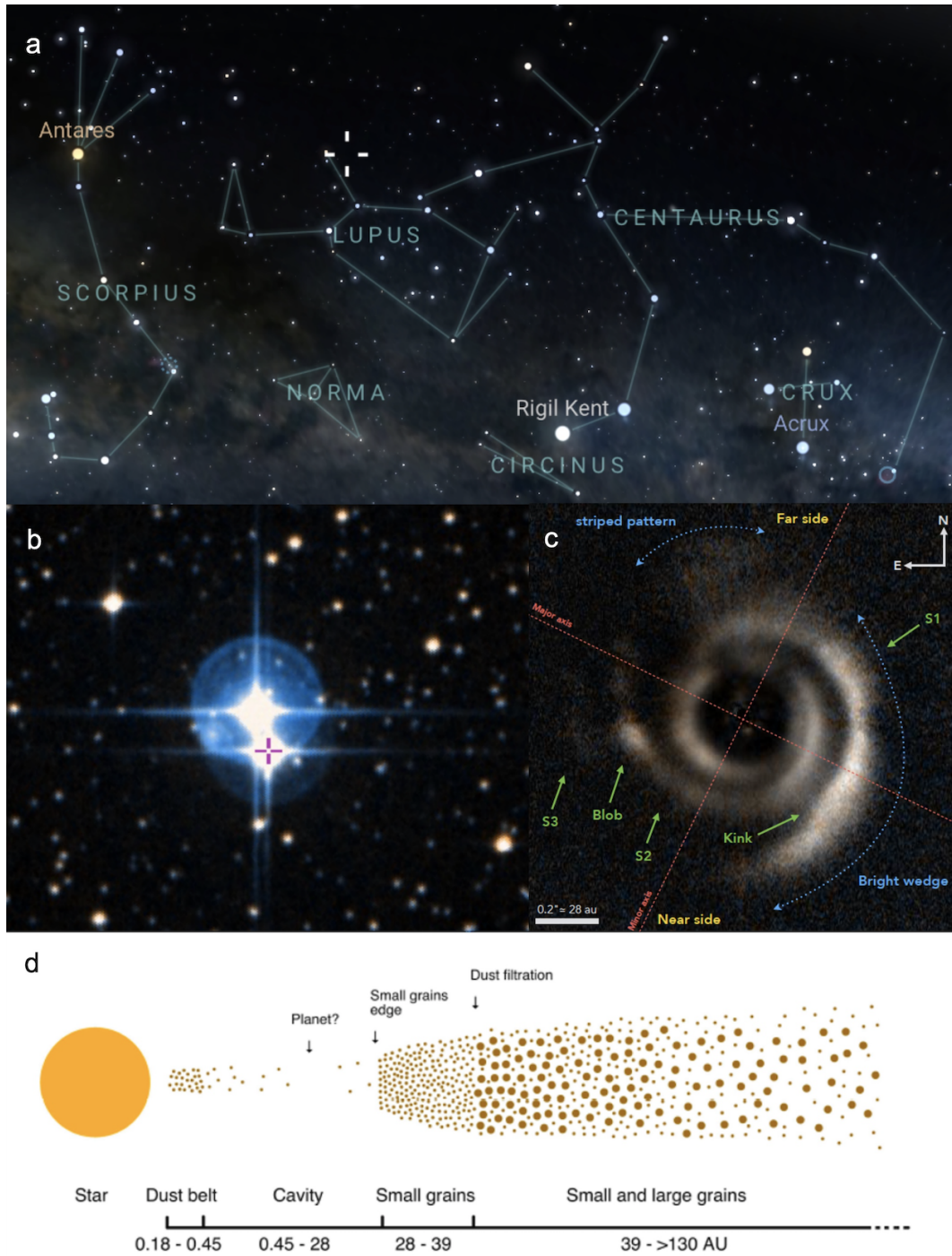
Kaksiktähesüsteem HD 135344 asub Hundi tähtkujus Ülemise Kentauri-Hundi ehk Scorpius OB2-3 tähetekke piirkonnas. Eestis seda tähesüsteemi näha ei ole (joonis 4.2). Primaarset tähte HD 135344A (SAO 206463) on vähem uuritud kui sekundaarset tähte HD 135344B (SAO 206462), sest sekundaarse tähe ümber on siirdeketas. Tähed on üksteisest  $\sim 3300$  au kaugusel (Coulson ja Walther, 1995). Tähtede kirjanduslikud parameetrid (spektriklass, kaugus, efektiivne temperatuur, heledus kümnendlogaritmis, mass, vanus) on leitavad tabelist 4.1.

Tabel 4.1: HD 135344 süsteemi parameetrid kirjandusest

Täht	Spektriklass	Kaugus pc	$T_{eff}$ K	$\log L$ $L_{\odot}$	Mass $M_{\odot}$	Vanus Myr	Allikas
HD 135344A SAO 206463	A0V	$142,1^{+3,1}_{-2,9}$	$6750 \pm 250$	$1,12^{+0,02}_{-0,01}$	$1,736 \pm 0,087$	$5,748^{+0,287}_{-0,667}$ *	1
			$6750 \pm 250$	$1,16^{+0,15}_{-0,18}$	$1,90^{+0,25}_{-0,24}$	$6,6^{+3,4}_{-2,4}$	2
							3
HD 135344B SAO 206462	F8V F4Ve	$135,8^{+2,4}_{-2,3}$	$6375 \pm 125$	$0,78^{+0,03}_{-0,04}$	$1,432 \pm 0,072$	$8,927^{+0,446}_{-0,903}$ *	1
			$6810 \pm 80$	$1,02^{+0,18}_{-0,10}$	$1,7^{+0,2}_{-0,1}$	$9 \pm 2$	4
		$156 \pm 11$					5 6

Allikad: 1. Vioque *et al.* (2018), 2. Houk ja Fuentes-Williams (1982), 3. Alecian *et al.* (2013) 4. Coulson ja Walther (1995), 5. Müller *et al.* (2011), 6. Brown *et al.* (2016),

HD 135344B ketas on üks vähim tuntuid siirdekettaid, millel on näha asümmeetrilisi omadusi hajutatud valguses ja soojuskiirguses. Lähinfrapunase hajutatud valguse fotomeetrilised pildid näitasid kahte heledat spiraalharu ja sisemist tolmuvaest süvikut. Erinevate morfoloogiliste tüüpide segu võib olla tunnuseks, et mitmed mehhanismid tegutsevad samaaegselt, erinevad protsessid ilmutavad ennast selgemalt kas gaasi või tolmu häiritustes (Andrews, 2020). Arvatakse, et ketta morfoloogia on põhjustanud hiidprotoplaneetidid.



Joonis 4.2: a) Kuvatõmmis programmist *Stellarium Web*. Valge ristiga on tähistatud HD 135344 kaksiktähesüsteemi asukoht (Stellarium, 2021). b) Kuvatõmmis programmist *Aladin*. Välja on toodud HD 135344 kaksiktähesüsteem ning ristiga on tähistatud B komponent (Aladin, 2021). c) HD 135344B tähe fotomeetiline pilt. Välja on toodud ka protoplanetaarse ketta iseloomulikumad elemendid (Stolker *et al.*, 2016, joonis 4). d) Illustriativne joonis tolmu radiaalsest jaotusest HD 135344B kettas. (Garufi *et al.*, 2013, joonis 5)

HD 135344B on kiirelt pöörlev  $v \sin i \sim 83 \text{ km s}^{-1}$  Herbig Ae/Be täht (Müller *et al.*, 2011). Suhteliselt kõrge massi akretsioonimäär  $10^{-8,27} M_{\odot}/\text{yr}$  (Lopez *et al.*, 2006) toetab ideed, et tegemist on varajasema evolutsioonietapiga kui gaasivaene jäänuk ketas. Ketas koosneb massiivsest väliskomponendist  $\sim 300 \text{ au}$  (Lyo *et al.*, 2011) tolmu massiga  $M_{\text{dust}} = 1,3 \cdot 10^{-4} M_{\odot}$  ja gaasimassiga  $M_{\text{gas}} = 1,5 \cdot 10^{-2} M_{\odot}$  (van der Marel *et al.*, 2016b) ning suure sisemise tolmusüvikuga  $\sim 50 \text{ au}$  (Andrews *et al.*, 2011). Stolker *et al.* (2016) leidsid ketta laiuseks  $\sim 160 \text{ au}$ .

Kui uurida lähemalt tabelit 4.1, on näha, et Vioque *et al.* (2018) andmete tõepärasuses ei saa HD 135344A korral kindel olla. Esiteks on selle primaarse tähe vanus peaaegu 3 Myr väiksem kui sekundaarsel tähel. Kaksiktähed tekivad tüüpiliselt samal ajal ja seega ka nende vanused peaks olema sarnased. Lisaks ei kattu temperatuurid – spektriklassi A0 kuuluva tähe temperatuur on keskmiselt 9500 K ja HD 135344A efektiivseks temperatuuriks on hinnatud 6750 K.

#### 4.1.1 HD 135344B potentsiaalsed kaaslased

Planeet massiga  $< 0,1 M_J$  ei muuda oluliselt gaasi ja tolmu pindtihedust (Dong *et al.*, 2015). Planeet massivahemikus  $1 M_J < M_{\text{planeet}} < 10 M_J$  vähendab pindtihedust millimeeter-suurusel tolmus ja rohkemgi gaasis (Pinilla *et al.*, 2012, joonis 6). Palju massiivsem planeet  $M_{\text{planeet}} > 10 - 15 M_J$  vähendab oluliselt pindtihedust nii gaasis kui tolmus.

Järgneb loetlelu potentsiaalsetest planeetidest ja nende asukohtadest tähe HD 135344B ümber.

- Kettas paikneb kaks planeeti kaugusel  $\sim 50 \text{ au}$  massiga  $\sim 0,5 M_J$  (Muto *et al.*, 2012).
- Üks planeet paikneb süvikus massiga  $13 - 15 M_J$  kaugusel  $17,5 - 20 \text{ au}$  (Garufi *et al.*, 2013).
- Spiraalide omaduste vastutajaks on üksik 30% täpsusega ennustatav planeet massiga  $\sim 6 M_J$  (Fung ja Dong, 2015).
- Ühte spiraalharu tekitab kettas paiknev keeris, teist spiraalharu tekitab üksik massiivne planeet  $\sim 30 \text{ au}$  kaugusel (van der Marel *et al.*, 2016a).
- Spiraalharudest väljaspool  $\sim 100 \text{ au}$  kaugusel paiknevad kaks protoplaneeti, kumbki  $r_1 \sim 168 \text{ au}$  ja  $r_2 \sim 99 \text{ au}$  kaugusel (Stolker *et al.*, 2016).
- Kaaslased on massiivsemad kui  $\sim 14 - 12 M_J$  piirkonnas  $19 - 31 \text{ au}$ ,  $\sim 8 M_J$  ja  $\sim 4 M_J$  kaugusel  $\sim 90 \text{ au}$ . Ei saa tugevalt välistada Muto *et al.* (2012), Garufi *et al.* (2013) ja van der Marel *et al.* (2016a) ennustusi. Väiksema massiga planeet spiraalharudele lähemal peaks tekitama häiritusi samasuguse amplituudiga nagu massiivsem planeet kaugemal. SPHERE andmed välistavad massiivse hiidplaneedi ( $> 3 M_J$  eeldades "kuuma

tähe" stsenaariumi ja süsteemi vanust 9 Myr) väljaspool spiraalharusid. Ei saa aga välistada madala temperatuuriga hiidplaneete välises kettas ja/või hiidplaneete hajutatud valguse süvikus (Maire *et al.*, 2017).

Lisaks protoplaneetidele on proovitud erinevate mudelite kaudu leida teisi kaaslasi.

- Välistati süvikus tähelise kaaslase CO gaasi uurimisega (Pontoppidan *et al.*, 2008).
- Välistati VLT/NaCo 1,75 ja 2,21  $\mu\text{m}$  piltidelt väiksemassilised tähelised kaaslased, mis paikneksid piirkonna vahemikus  $> 0,22 M_{\odot}$  kaugemal kui 14 au ja pruuni kääbuskaaslase, mis oleks massiivsem kui  $> 19 M_J$  kaugemal kui 70 au (Vicente *et al.*, 2011).

## 5. Analüüs ja tulemused

Antud töös tehti esimesena analüüs tähega KELT-9, et kontrollida mõõtmistulemuste tõepärasuses. Seejärel analüüsiti HD 135344 kaksiktähesüsteemi tähti.

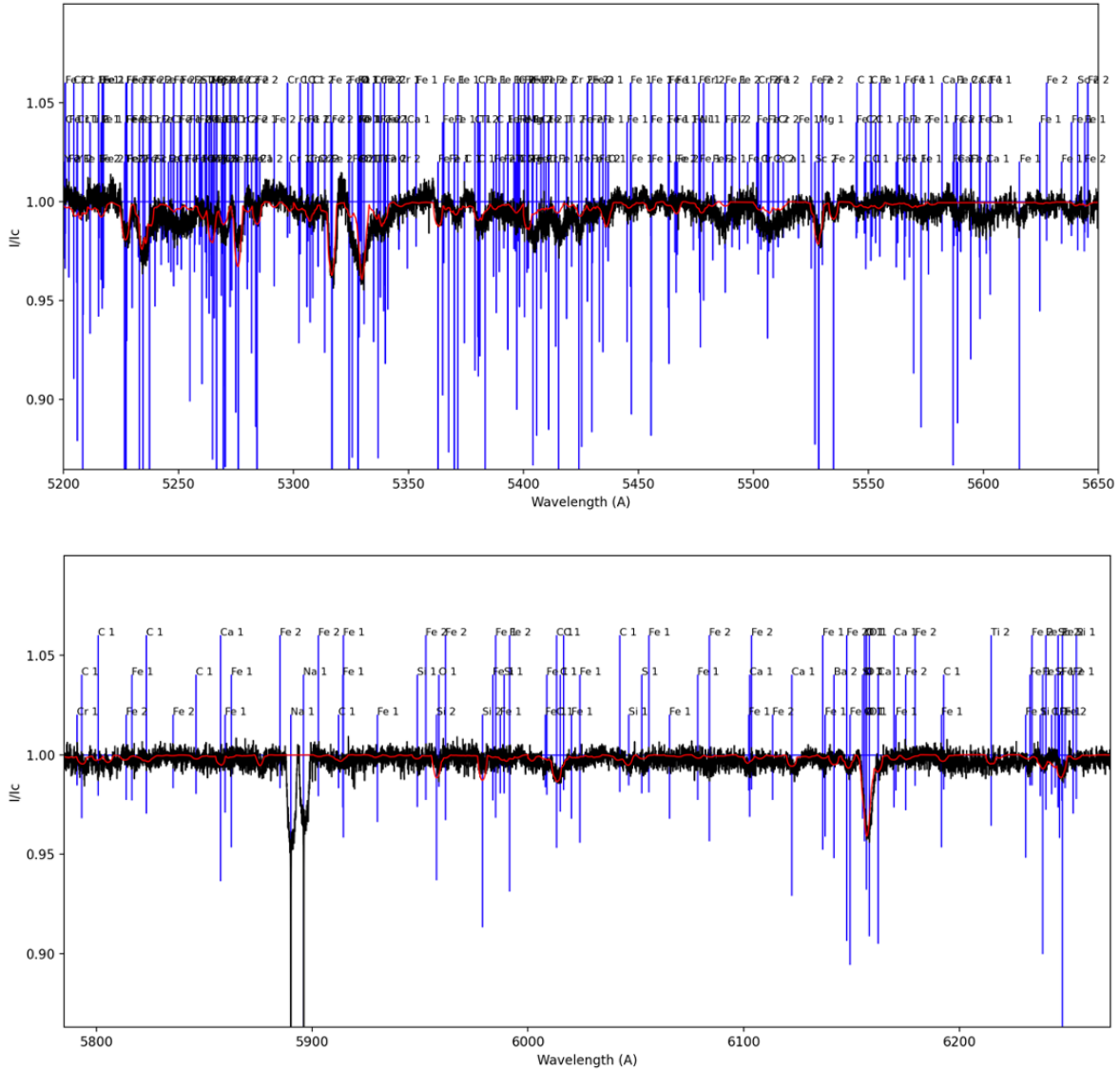
### 5.1 KELT-9

KELT-9 spekter oli tehtud Gemini observatooriumi Havai 8,1-meetrise teleskoobi ja Kanada-Prantsuse-Havai teleskoobi (CFHT) ESPaDOnS (Echelle SpectroPolarimetric Device for the Observation of Stars) spektrograafia. Instrument ja teleskoop on üksteisega ühendatud 270-meetri pikkuste optiliste kiududega, mis kannavad nime GRACES (Gemini Remote Access to CFHT ESPaDOnS Spectrograph). Vaatluse taotlejateks olid Mihkel Kama, Colin P. Folsom ja Johanna K. Teske.

Tabel 5.1: KELT-9 parameetrid võrreldes varasemate andmetega

	Varasemalt määratud	Kalibratsiooni tulemusel
$T_{eff}$ (K)	$9495 \pm 104$	$9480 \pm 480$
$\log g$ (dex)	$4,17 \pm 0,17$	$4,39 \pm 0,59$
$v \sin i$ ( $\text{km s}^{-1}$ )	$114,86 \pm 3,35$	$115,48 \pm 6,09$
$\varepsilon_t$ ( $\text{km s}^{-1}$ )	$2,02 \pm 0,64$	$2,57 \pm 0,43$
[C/H] (dex)	$-3,61 \pm 0,08$	$-3,87 \pm 0,54$
[O/H] (dex)	$-3,19 \pm 0,13$	$-3,28 \pm 0,02$
[Na/H] (dex)	$-5,6 \pm 0,2$	$-4,76 \pm 0,40$
[Mg/H] (dex)	$-4,34 \pm 0,16$	$-4,36 \pm 0,29$
[Si/H] (dex)	$-4,33 \pm 0,16$	$-4,32 \pm 0,11$
[Ca/H] (dex)	$-5,45 \pm 0,13$	$-5,52 \pm 0,21$
[Sc/H] (dex)	$-8,85 \pm 0,15$	$-8,87 \pm 0,27$
[Ti/H] (dex)	$-6,27 \pm 0,13$	$-6,95 \pm 0,11$
[Cr/H] (dex)	$-6,27 \pm 0,13$	$-6,30 \pm 0,11$
[Fe/H] (dex)	$-4,43 \pm 0,14$	$-4,44 \pm 0,14$
[Ni/H] (dex)	$-5,74 \pm 0,14$	$-5,61 \pm 0,45$
[Y/H] (dex)	$-9,36 \pm 0,30$	$-9,49 \pm 0,25$

Kuna tähte KELT-9 kasutati kalibratsioonitähena, et õppida Zeeman koodi tundma ja kontrollida, kas uued tulemused kattuvad varasemalt saadud tulemustega, ei hakatud väga süvenema parameetrite olemusse.



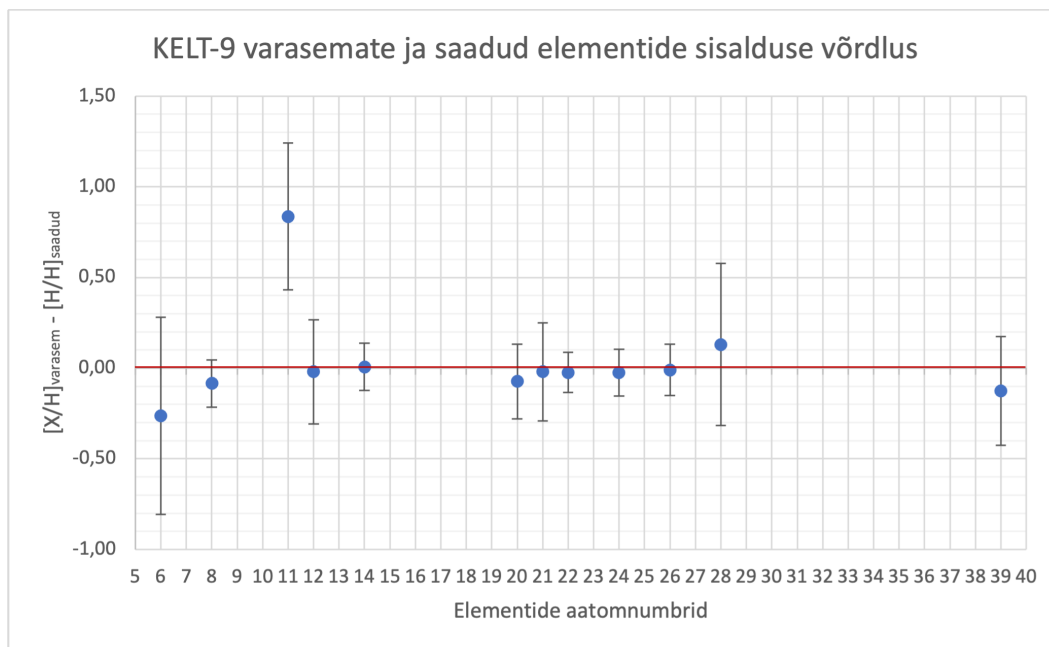
Joonis 5.1: KELT-9 vaadeldud spekter (must joon; GRACES spektrograaf Gemini teleskoobil) ning antud töös saadud parim mudel (punane joon). Vertikaalteljel lainepikkused mõõtühikus Å ja horisontaalteljel normaliseeritud intensiivsus. Siniste vertikaaljoontega on tähistatud erinevate keemiliste elementide neeldumisjoonte intensiivsus.

Spektri töötlemisel keskenduti peamiselt järgmistele parameetritele: efektiivne temperatuur  $T_{eff}$ , pinnagravitatsioon  $\log g$ , projekteeritud pöörlemiskiirus  $v \sin i$  ja miktoturbulents  $\epsilon_t$ . Keemilistest elementidest suudeti sisaldused määrata järgmistel elementidel: süsinik, hapnik, naatium, magneesium, räni, kaltsium, skandium, titaan, kroom, raud, nikkel ja ütrium. Parameetrite väärtused on välja toodud tabelis 5.1. Kõigi nelja põhiparameetri määramisel tuli neljast

spektriaknast välja visata ühe väärtus (vt. spektriakente loetelu peatükis 2.1). Keemiliste elementide määramisel sai nelja spektriakent kasutada süsiniku, kaltsiumi ja raua korral, kolme spektriakent räni korral, kahte spektriakent hapniku, magneesiumi ja nikli korral, ülejäänutel sai ainult ühe spektriakna väärtust kasutada.

Joonisel 3.1 on esitatud kahe erineva spektriaknaga KELT-9 vaadeldud spektri (musta värviga) ja mudelspektri (punase värviga) võrdlus. Keemiliste elementide neeldumisjooni leidus spektri sinises pooles rohkem kui punases pooles. Mudelspekter ühtis punasemas spektripiirkonnas aga paremini vaadeldud spektriga kui sinises piirkonnas. Põhjuseks võib olla väikeste sisaldustega elementide rohkus sinises spektripiirkonnas, mis võivad mudelspektrisse anda kehva panuse.

Joonisel 5.2 on välja toodud varasemate tulemuste ja antud töös saadud keemiliste elementide sisalduse vahe. Tulemused on kümnendlogaritmilises skaalas. Naatriumi tulemust kõrvale jättes on keemilised elemendid mõõtemääramatuse piires kattuvad. Ka tabelis 5.1 nelja põhiparameetri väärtused jäävad määramatuse piiresse. Naatriumi sisalduse erinevus on arvatavasti põhjustatud sellest, et antud töös jäeti välja spektripiirkond 5890 - 5900 Å, kus aga paiknevad tugevad naatriumi neeldumisjooned (vaata joonist 5.1). Piirkond jäeti välja, sest sisse jätmisel ei saadud hapniku joone jaoks head atmosfäärimudelit. Põhjusele, miks antud töös saadi mitmeid kordi suuremad mõõtemääramatused kui varasemalt määratud parameetrite korral, ei osata hetkel vastata.

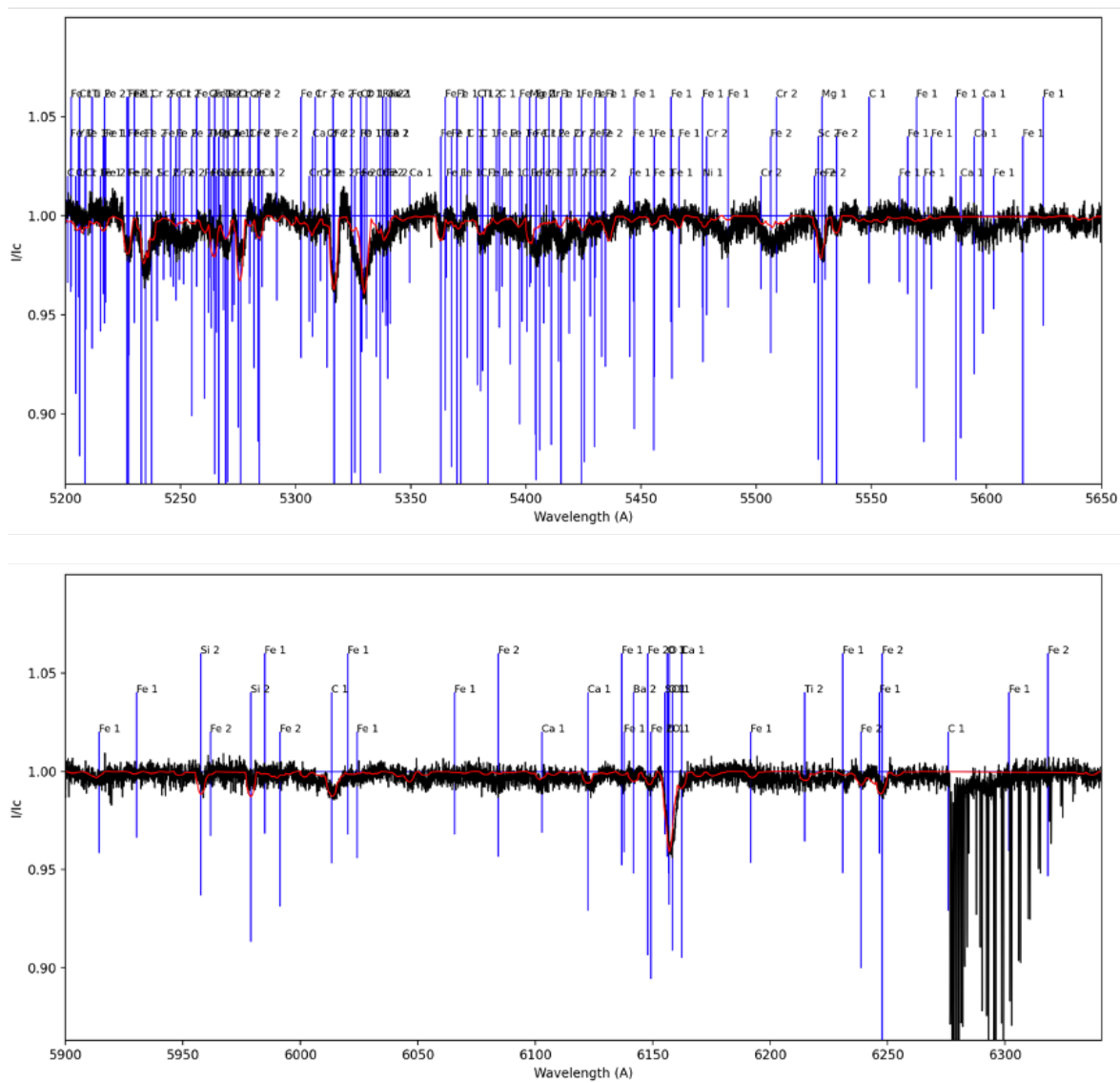


Joonis 5.2: KELT-9 keemiliste elementide võrdlus varasemalt määratud ja antud töös saadud tulemuste vahel.

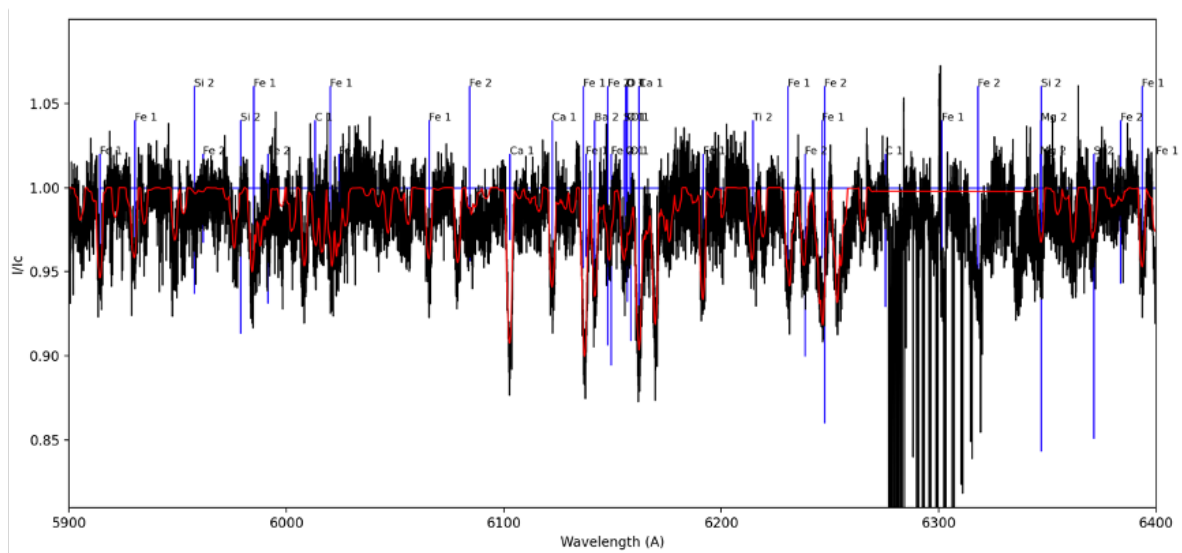
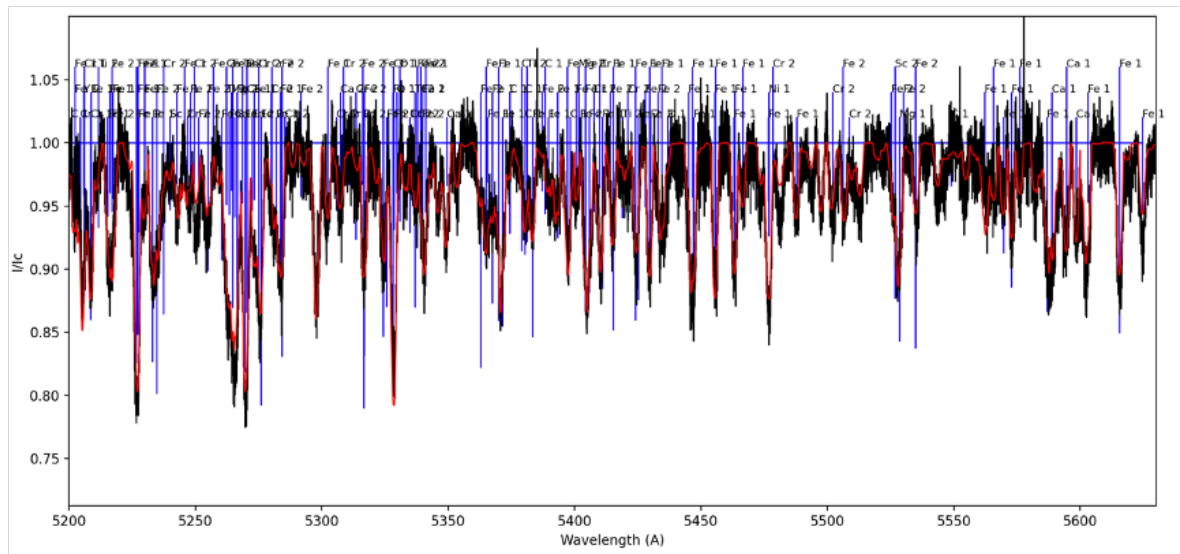
## 5.2 HD 135344

HD 135344A spekter oli tehtud Tšiilis asuva Magellani 6,5-meetrise Clay teleskoobiga, mille instrumendiks on echelle spektrograaf MIKE (Magellan Inamori Kyocera Echelle). Vaatluse taotlejaks Johanna Teske, Colin P. Folsom ja Mihkel Kama.

HD 135344B spekter oli tehtud Kanada-Prantsusmaa-Havai 3,6-meetrise teleskoobiga, mille instrumendiks on echelle spektrograaf ESPaDOnS. Vaatluse taotlejaks G. A. Wade. Spektrit aitas normaliseerida Colin. P. Folsom.



Joonis 5.3: HD 135344A vaadeldud spekter (must joon; MIKE spektrograaf Magellani teleskoobil) ning antud töös saadud parim mudel (punane joon). Vertikaalteljel lainepikkused mõõdetühikus Å ja horisontaalteljel normaliseeritud intensiivsus. Siniste vertikaaljoontega on tähistatud erinevate keemiliste elementide neeldumisjoonte intensiivsus.



Joonis 5.4: HD 135344B vaadeldud spekter (must joon; ESPaDOnS spektrograaf CFHT teleskoobil) ning antud töös saadud parim mudel (punane joon). Vertikaalteljel lainepikkused mõõdetühikus Å ja horisontaalteljel normaliseeritud intensiivsus. Siniste vertikaaljoontega on tähistatud erinevate keemiliste elementide neeldumisjoonte intensiivsus.

Spektri töötlemisel keskenduti peamiselt järgmistele parameetritele: efektiivne temperatuur  $T_{eff}$ , metallilisus  $Z$  ja projekteeritud pöörlemiskiirus  $v \sin i$ . Keemilistest elementidest valiti sisalduste määramiseks süsinik, hapnik, titaan ja raud. Parameetrite väärtused on leitavad tabelist 4.1.

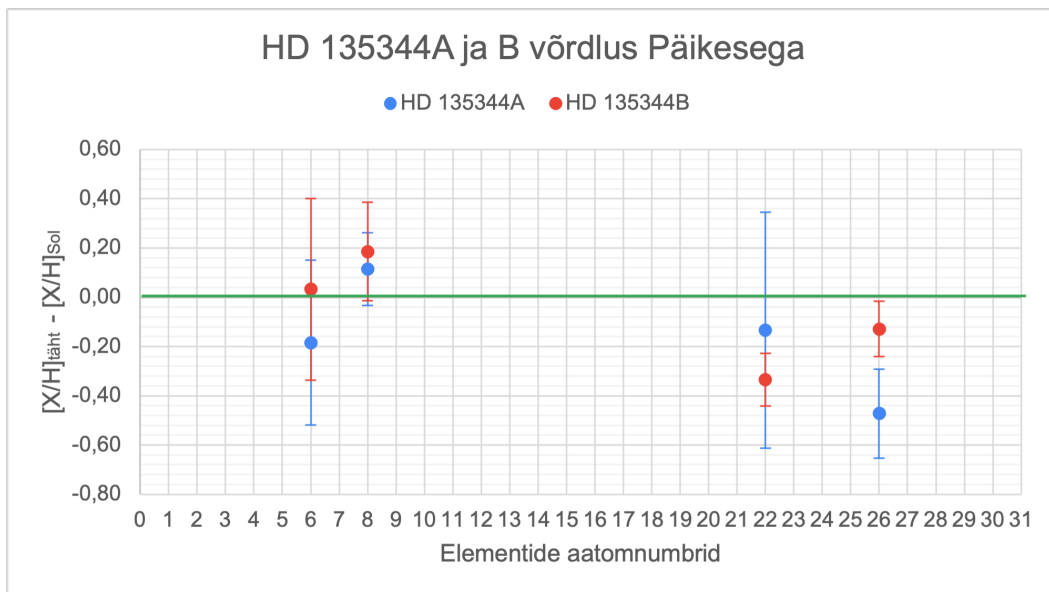
Joonistel 5.3 ja 5.4 on esitatud kahe erineva spektriaknaga vastavalt HD 135344A ja HD 135344B vaadeldud spektri (musta värviga) ja mudelspektri (punase värviga) võrdlus. Nii nagu ka KELT-9 korral, leidub keemiliste elementide neeldumisjooni sinises spektripiirkonnas rohkem kui punases spektripiirkonnas. HD 135344A mudelspektri leidmist oli palju kergem läbi viia, kui HD 135344B tähel, sest viimasel on väga kõrge signaal-müra suhe. Tegemist on ka kahe erineva

spektriklassi tähega, mille tõttu tähtede spektrid erinevad, kuid siin mängib erinevuses suurt rolli ikkagi signaal-müra suhe.

Tabel 5.2: HD 135344 süsteemi parameetrid võrdluses Päikesega

	Päike	HD 135344A	HD 135344B
$T_{eff}$ (K)	5770	$9420 \pm 193$	$6339 \pm 94$
$Z$ (dex)	0,012	$-0,15 \pm 0,20$	$-0,05 \pm 0,05$
$v \sin i$ ( $\text{km s}^{-1}$ )	1,6	$110 \pm 10$	$83 \pm 5$
[C/H] (dex)	-3,57	$-3,75 \pm 0,33$	$-3,54 \pm 0,37$
[O/H] (dex)	-3,31	$-3,20 \pm 0,15$	$-3,12 \pm 0,20$
[Ti/H] (dex)	-7,05	$-7,18 \pm 0,48$	$-7,38 \pm 0,11$
[Fe/H] (dex)	-4,50	$-4,97 \pm 0,18$	$-4,63 \pm 0,11$

Joonisel 5.5 on välja toodud keemiliste elementide sisalduse võrdlus Päikesega. Elementide väärtus on kümnendlogaritmilises skaalas. Volatiilsed elemendid (süsinik ja hapnik) on Päikesega võrreldes veapiirides kattuvad. Refraktoorsed elemendid (titaan ja raud) aga Päikesega ei kattu, kuigi titaanil on suur mõõtemääramatus. Mida nendest täpsemalt järeldada saab tähtede või protoplanetaarse ketta kohta, on välja toodud peatükkides 5.2.1 ja 5.2.2.



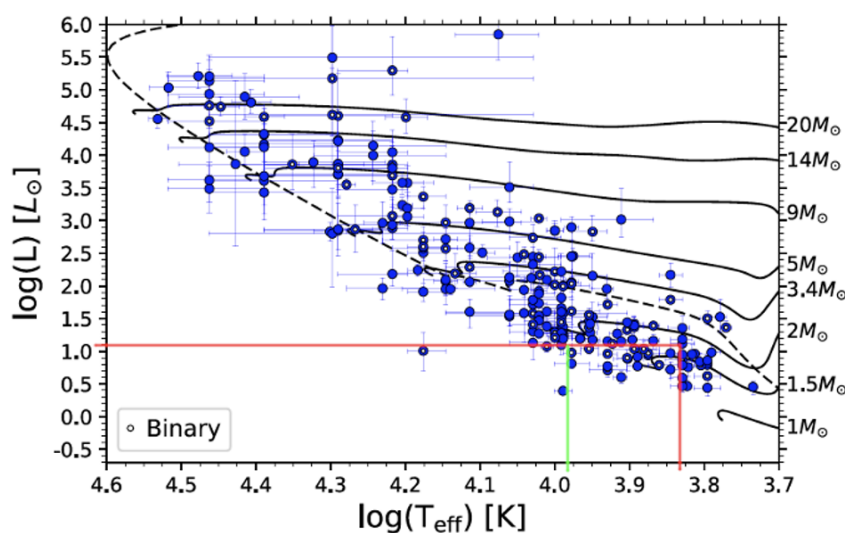
Joonis 5.5: HD 135344A ja B keemiliste elementide vesinikule normeeritud sisalduse võrdlus Päikesega.

### 5.2.1 HD 135344A

Põhiparameetritest sai efektiivse temperatuuri määramiseks kasutada nelja spektriakent (vt. spektriakente loetelu peatükis 2.1). Metallilisus ja projekteeritud pöörlemiskiirus määrati visuaalselt parameetrite väikesel sammul muutmisega, kuni saadi rahuldav mudelspekter.

Keemiliste elementide sisalduse määramiseks sai nelja spektriakent kasutada süsiniku ja raua puhul. Hapniku korral sai kasutada kolme spektriakent ja titaani korral kahte.

Tabeli 4.1 juures oli vastukõlaliseks HD 135344A kirjanduslik efektiivne temperatuur ja spektriklass. Antud töös saadi HD 135344A efektiivseks temperatuuriks  $T_{eff} = 9420 \pm 193$  K. Sellise temperatuuriga täht liigitub spektriklassi A0-A1, mis on kooskõlaline kirjandusega. Kuna tähe temperatuur on  $\sim 3000$  K kõrgem, liigub täht Vioque *et al.* (2018) artiklis Hertzsprung-Russelli diagrammil rohkem vasakule poole ehk peajadale lähemale, mille tulemusel ka tähe vanus kasvab (vt. joonis 5.6).



Joonis 5.6: Herbig Ae/Be tähed Hertzsprung-Russelli diagrammil. Valge täpiga punktid tähistavad sekundaarseid tähti. Musta pidevjoonega on tähistatud peajada eelsete tähtede evolutsioonijooned vastavalt massile, mis on välja toodud paremas horisontaalteljes. Kriipsjoonega on tähistatud 2,5 Myr isokroon. Isokroon on Hertzsprung-Russelli diagrammil joon, mis tähistab sama vanusega tähtede populatsiooni. Vasakul horisontaalteljel on heleduse logaritmiline skaala Päikese heleduse ühikutes ja vertikaalteljel efektiivse temperatuuri logaritmiline skaala kelvinites (Vioque *et al.*, 2018, joonis 1). Punaste joontega on välja toodud Vioque *et al.* (2018) artikli tulemused. Rohelise joonega on lisatud antud töös saadud temperatuuri väärtus.

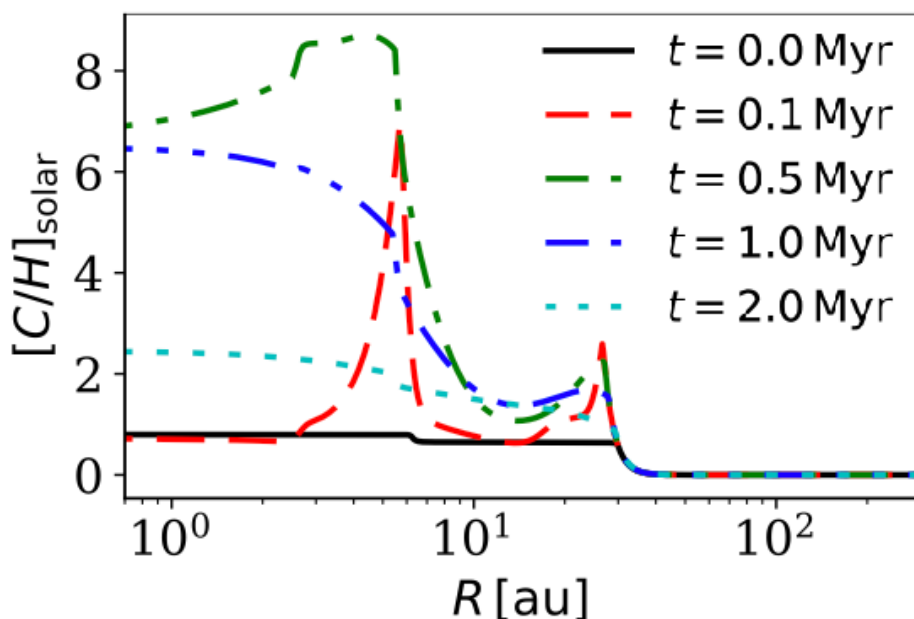
Joonisel 5.5 on näha, et HD 135344A rauasisaldus on palju madalam kui Päikesel. Raua madal sisaldus võib viidata sellele, et primaarse tähe ümber võis ka olla siirdeketas tühimikuga või planeet, mis tekitas tolmulõksu ja viimati akreeterus tähele tolmuvaeset ainet. See aine on üsna hiljaaegu tähele alles akreeterunud ja seetõttu ei ole tähe pinnakihtidel jõudnud aine ära seguneda.

## 5.2.2 HD 135344B

Põhiparameetritest sai efektiivse temperatuuri ja metallilisuse määramiseks kasutada nelja spektriakent. Projekteeritud pöörlemiskiiruseks võeti kirjandusest  $83 \text{ km s}^{-1}$  (Müller *et al.*,

2011), kuid määramatus võeti visuaalselt parameetrite väikesel sammul muutmisega, kuni saadi rahuldav mudelspekter. Keemiliste elementide sisalduse määramiseks sai nelja spektriakent kasutada süsiniku ja raua puhul. Titaani korral sai kasutada kahte spektriakent ja hapniku korral ühte.

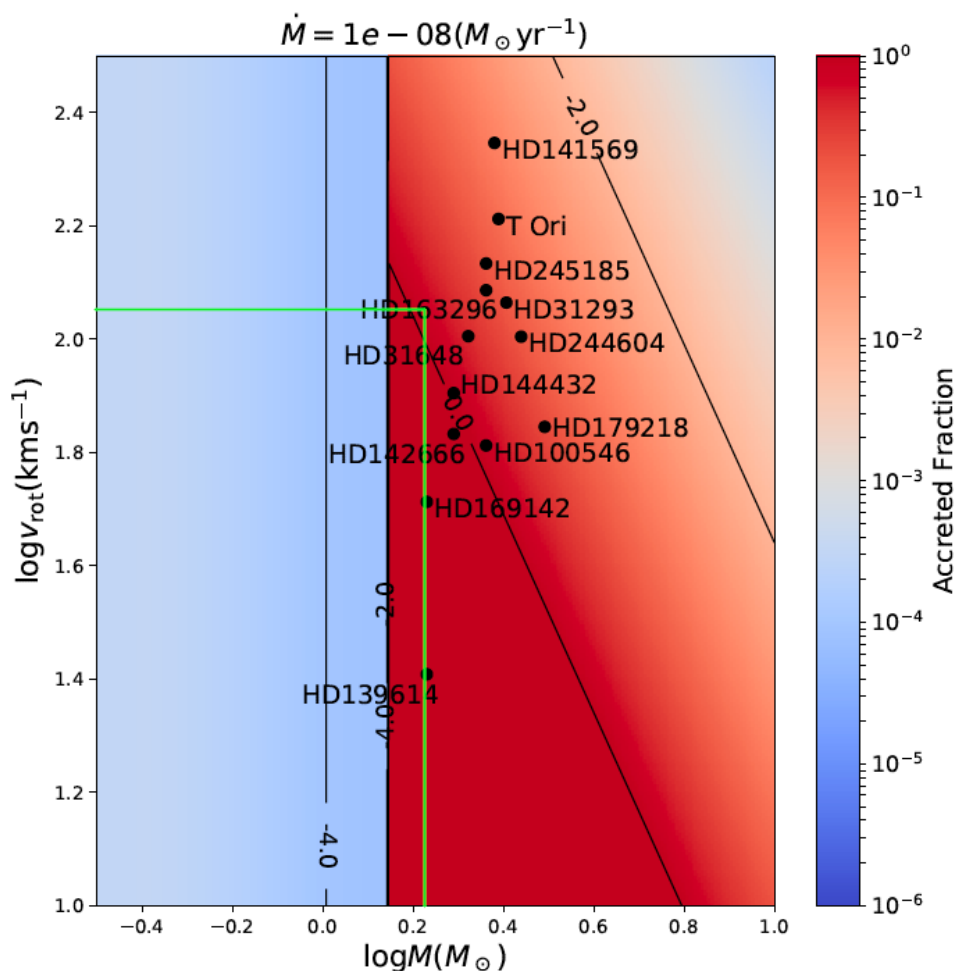
HD 135344B elementide sisaldused on joonise 5.5 kohaselt üsna sarnane Päikesega. See võib viidata sellele, et süvik ketta sisemuses on alles nii-öelda värske, siseketas veel säilib ja ei ole tähele ära akreteerunud. Sellisel juhul võib süvik veel rohkem kasvada. Süviku tekitanud teoreetiline planeet on alles saavutanud sellise massi, et süvikut tekitada ja tolmu blokeerima hakata.



Joonis 5.7: Süsiniku sisalduse profiil kettas läbi aja (Booth ja Clarke, 2018). Erinevat värvi ja tüüpi kriipsjoonega on välja toodud süsiniku sisalduse profiil kindlal aja hetkel. Vertikaalteljel on radiaalne ketta kaugus, horisontaalteljel süsiniku sisaldus kümnendlogaritmina.

Kui vaadata hapniku sisaldust ilma mõõtemääramatusteta, siis see on 2 korda kõrgem kui Päikesel. Seega võib protoplanetaarse ketta aines olla hapniku üleküllus, mida selgitaks kettas jääpiiri olemasolu. Booth ja Clarke (2018) töid oma artiklis välja lumejoonega olevas kettas süsiniku sisalduse profiili läbi aja (joonis 5.7). Kui protoplanetaarse ketta külmast välisosast sissepoole triivivad tolmuterad kannavad kaasas suures koguses  $CH_4$  jääd, siis  $CH_4$  jääpiirist seespool tekib järsku suures koguses süsinikurikas gaasi. Analoogselt, kui tolmuterad kannavad peamiselt  $H_2O$  jääd ning näiteks  $CH_4$  jääd on vähem, siis seespool  $H_2O$  jääpiiri võiks tekkida selle sissetriiviva veejää aurustumisest gaasilise hapniku üleküllus. Selle gaasi akreteerudes võikski tähele saada hapnikurikas gaas.

Jermyn ja Kama (2018) joonis 4 järgi on HD 135344B konvektiivse ja kiirgusliku ümbrise massi-telje piiri peal. Kui täht jääks rohkem konvektiivse ümbrise poolele (veidi vasakule) ei toimuks tähe pinnal akreteerunud aine kadu võrreldes sellega, kui täht jääks kiirgusliku ümbrise poolele (vt joonis 5.8). Et leida kummale poolele täht täpsemalt liigitub, on vaja teha täpsemaid mõõtmisi.



Joonis 5.8: Fotosfääri akreteerunud aine sisaldus, mis on peajadatähtede jaoks värvikoodiga edastatud funktsioon massist (vertikaalteljel) ja pöörlemiskiirusest (horisontaalteljel). Roheliste joontega on tähistatud HD 135344A asukoht.

## 6. Kokkuvõtte

Noorte ja seega varajases evolutsioonietapis tähtede pinnakihtidele akreteerunud aine on pärit näiteks protoplanetaarsetelt ketastelt, jäänuk ketastelt, häiritud või aurustuvatelt planeetidelt. Et seda ainet uurida on hea pöörata pilgud tähe pinnale, kus akreteerunud aine ei ole veel segunenud tähe enda ainega.

Antud magistritöös leiti sünteesitud täheatmosfäär Zeeman koodi abil kasutades  $\chi^2$  minimiseeritud meetodit. Selle abil saadi kätte täheatmosfääri kirjeldavad parameetrid.

Kalibratsioonimõõtmised tehti tähega KELT-9. Mõõtmistulemused antud töös jäid mõõtevea piiridesse varasemate andmetega.

Kaksiktähesüsteemi uurimisel leiti, et primaarse tähe efektiivne temperatuur on kõrgem, kui kirjanduses leitud, mille tulemusel on täht ka vanem. Madala rauasisalduse tõttu võis primaarse tähe ümber varem olla süvikuga protoplanetaarne ketas, mis alles hiljaaegu on akreteerunud tähe pinnale. Lisaks leiti hapniku üleküllus fotosfääris, mis võib tähendada hapniku üleküllust akreteeruvast aines. Seda võiks selgitada kettas sissepoole triivivatelt tolmuteradelt aurustuv veejää. Kui see hüpotees osutub tõeseks, oleks see esimene otsene tõend vee-rikaste tolmuterade massilisest triivist ketta välisosast sissepoole, kus planeediteke peamiselt aset leiab.

Et olla kindlam saadud tulemustes tuleks edaspidiseks uurida teiste, veel määramata volatiilsete ja refraktoorse elementide sisaldust tähtedes. Uurimistulemusi võib parandada ka see, kui tähespektrid saadakse samast teleskoobist samade instrumentidega.

# Tänuavaldused

Olen äärimiselt tänulik oma juhendajale, Mihkel Kamale, väga asjaliku juhendamise eest. Samuti ei oleks saanud töö valmis ilma Colin Folsomita, kes toetas ja abistas tehnilistes küsimustes. Tänan Tartu Observatooriumi tähefüüsika töörühma, kes alati motiveerisid ja olid valmis abistama.

Kertu Metsoja

# Kirjandus

- Aladin (2021). Aladin Lite. <https://aladin.u-strasbg.fr/AladinLite/>. Külastatud 19.05.2021.
- Alecian, E., Wade, G., Catala, C., Grunhut, J., Landstreet, J., Bagnulo, S., Böhm, T., Folsom, C., Marsden, S., ja Waite, I. (2013). A high-resolution spectropolarimetric survey of Herbig Ae/Be stars – I. Observations and measurements. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 429(2):1001–1026.
- Andrews, S. M. (2020). Observations of protoplanetary disk structures. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 58:483–528.
- Andrews, S. M., Wilner, D. J., Espaillat, C., Hughes, A., Dullemond, C., McClure, M., Qi, C., ja Brown, J. (2011). Resolved images of large cavities in protoplanetary transition disks. *The Astrophysical Journal*, 732(1):42.
- Asplund, M., Grevesse, N., Sauval, A. J., ja Scott, P. (2009). The chemical composition of the Sun. *Annual review of astronomy and astrophysics*, 47.
- Bajart, E. (2010). Erakogu.
- Booth, R. A. ja Clarke, C. J. (2018). Chemical enrichment of the planet-forming region as probed by accretion. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 473(1):757–764.
- Brown, A. G., Vallenari, A., Prusti, T., De Bruijne, J., Mignard, F., Drimmel, R., Babusiaux, C., Bailer-Jones, C., Bastian, U., Biermann, M., *et al.* (2016). Gaia Data Release 1 – Summary of the astrometric, photometric, and survey properties. *Astronomy & Astrophysics*, 595:A2.
- Cantiello, M. ja Braithwaite, J. (2019). Envelope convection, surface magnetism, and spots in A and late B-type stars. *The Astrophysical Journal*, 883(1):106.
- Cauley, P. W., Shkolnik, E. L., Ilyin, I., Strassmeier, K. G., Redfield, S., ja Jensen, A. (2019). Atmospheric Dynamics and the Variable Transit of KELT-9b. *The Astronomical Journal*, 157(2):69.

- Coulson, I. ja Walther, D. (1995). SAO 206462 – a solar-type star with a dusty, organically rich environment. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 274(4):977–986.
- Dong, R., Zhu, Z., ja Whitney, B. (2015). Observational signatures of planets in protoplanetary disks. I. Gaps opened by single and multiple young planets in disks. *The Astrophysical Journal*, 809(1):93.
- Folsom, C., Bagnulo, S., Wade, G., Alecian, E., Landstreet, J., Marsden, S., ja Waite, I. (2012). Chemical abundances of magnetic and non-magnetic Herbig Ae/Be stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 422(3):2072–2101.
- Fossati, L., Koskinen, T., Lothringer, J., France, K., Young, M., ja Sreejith, A. (2018). Extreme-ultraviolet Radiation from A-stars: Implications for Ultra-hot Jupiters. *The Astrophysical Journal Letters*, 868(2):L30.
- Fung, J. ja Dong, R. (2015). Inferring planet mass from spiral structures in protoplanetary disks. *The Astrophysical Journal Letters*, 815(2):L21.
- Garufi, A., Quanz, S. P., Avenhaus, H., Buenzli, E., Dominik, C., Meru, F., Meyer, M. R., Pinilla, P., Schmid, H. M., ja Wolf, S. (2013). Small vs. large dust grains in transitional disks: do different cavity sizes indicate a planet? – SAO 206462 (HD 135344B) in polarized light with VLT/NACO. *Astronomy & Astrophysics*, 560:A105.
- Gaudi, B.Š., Stassun, K. G., Collins, K. A., Beatty, T. G., Zhou, G., Latham, D. W., Bieryla, A., Eastman, J. D., Siverd, R. J., Crepp, J. R., *et al.* (2017). A giant planet undergoing extreme-ultraviolet irradiation by its hot massive-star host. *Nature*, 546(7659):514–518.
- Herbig, G. H. (1960). The spectra of Be-and Ae-type stars associated with nebulosity. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 4:337.
- Hoeijmakers, H. J., Ehrenreich, D., Kitzmann, D., Allart, R., Grimm, S., Seidel, J., Wyttenbach, A., Pino, L., Nielsen, L., Fisher, C., *et al.* (2019). A spectral survey of an ultra-hot Jupiter-Detection of metals in the transmission spectrum of KELT-9b. *Astronomy & Astrophysics*, 627:A165.
- Houk, N. ja Fuentes-Williams, T. (1982). Vol. 3 of the Michigan Catalogue of Two-Dimensional Spectral Types ( $-40^\circ$  to  $-26^\circ$ ) and Future Plans. In *Bulletin of the American Astronomical Society*, volume 14, page 615.
- Jermyn, A.Š. ja Kama, M. (2018). Stellar photospheric abundances as a probe of discs and planets. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 476(4):4418–4434.
- Jura, M. (2015). Lambda Boo Abundance Patterns: Accretion from Orbiting Sources. *The Astronomical Journal*, 150(6):166.

- Kama, M., Folsom, C. P., ja Pinilla, P. (2015). Fingerprints of giant planets in the photospheres of Herbig stars. *Astronomy & Astrophysics*, 582:L10.
- Kupka, F., Piskunov, N. a., Ryabchikova, T., Stempels, H., ja Weiss, W. (1999). VALD-2: Progress of the Vienna atomic line data base. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 138(1):119–133.
- Kurucz, R. (1993). CDROM Model Distribution. *Smithsonian Astrophys. Obs.*
- Landstreet, J. (1988). The magnetic field and abundance distribution geometry of the peculiar A star 53 Camelopardalis. *The Astrophysical Journal*, 326:967–987.
- Lopez, R. G., Natta, A., Testi, L., ja Habart, E. (2006). Accretion rates in Herbig Ae stars. *Astronomy & Astrophysics*, 459(3):837–842.
- Lyo, A.-R., Ohashi, N., Qi, C., Wilner, D. J., ja Su, Y.-N. (2011). Millimeter observations of the transition disk around HD 135344B (SAO 206462). *The Astronomical Journal*, 142(5):151.
- Maire, A.-L., Stolker, T., Messina, S., Müller, A., Biller, B. A., Currie, T., Dominik, C., Grady, C. A., Boccaletti, A., Bonnefoy, M., *et al.* (2017). Testing giant planet formation in the transitional disk of SAO 206462 using deep VLT/SPHERE imaging. *Astronomy & Astrophysics*, 601:A134.
- Meeus, G., Waters, L., Bouwman, J., Van Den Ancker, M., Waelkens, C., ja Malfait, K. (2001). ISO spectroscopy of circumstellar dust in 14 Herbig Ae/Be systems: Towards an understanding of dust processing. *Astronomy & Astrophysics*, 365(3):476–490.
- Müller, A., van den Ancker, M., Launhardt, R., Pott, J.-U., Fedele, D., ja Henning, T. (2011). HD 135344B: a young star has reached its rotational limit. *Astronomy & Astrophysics*, 530:A85.
- Muto, T., Grady, C., Hashimoto, J., Fukagawa, M., Hornbeck, J., Sitko, M., Russell, R., Werren, C., Curé, M., Currie, T., *et al.* (2012). Discovery of small-scale spiral structures in the disk of SAO 206462 (HD 135344B): Implications for the physical state of the disk from spiral density wave theory. *The Astrophysical Journal Letters*, 748(2):L22.
- Niemczura, E., Smalley, B., ja Pych, W. (2016). *Determination of Atmospheric Parameters of B-, A-, F-and G-type Stars*. Springer.
- Pinilla, P., Benisty, M., ja Birnstiel, T. (2012). Ring shaped dust accumulation in transition disks. *Astronomy & Astrophysics*, 545:A81.
- Pontoppidan, K. M., Blake, G. A., Van Dishoeck, E. F., Smette, A., Ireland, M. J., ja Brown, J. (2008). Spectroastrometric imaging of molecular gas within protoplanetary disk gaps. *The Astrophysical Journal*, 684(2):1323.

- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., ja Flannery, B. P. (1996). *Numerical Recipes in Fortran 90: Numerical recipes in Fortran 77V. 2. Numerical recipes in Fortran 90*. Cambridge University Press.
- Stellarium (2021). Stellarium web online planetarium. <http://stellarium-web.org/p/observations>. K lstatud 05.05.2021.
- Stolker, T., Dominik, C., Avenhaus, H., Min, M., De Boer, J., Ginski, C., Schmid, H. M., Juhasz, A., Bazzon, A., Waters, L., *et al.* (2016). Shadows cast on the transition disk of HD 135344B – Multiwavelength VLT/SPHERE polarimetric differential imaging. *Astronomy & Astrophysics*, 595:A113.
- Strom, S., Strom, K., Yost, J., Carrasco, L., ja Grasdalen, G. (1972). The nature of the Herbig Ae-and Be-type stars associated with nebulosity. *The Astrophysical Journal*, 173:353.
- van der Marel, N., Cazzoletti, P., Pinilla, P., ja Garufi, A. (2016a). Vortices and Spirals in the HD 135344B Transition Disk. *The Astrophysical Journal*, 832(2):178.
- van der Marel, N., van Dishoeck, E. F., Bruderer, S., Andrews, S. M., Pontoppidan, K. M., Herczeg, G. J., van Kempen, T., ja Miotello, A. (2016b). Resolved gas cavities in transitional disks inferred from CO isotopologs with ALMA. *Astronomy & Astrophysics*, 585:A58.
- Van der Plas, G., van den Ancker, M., Waters, L., ja Dominik, C. (2015). The structure of disks around Herbig Ae/Be stars as traced by CO ro-vibrational emission. *Astronomy & Astrophysics*, 574:A75.
- Vicente, S., Mer n, B., Hartung, M., Bouy, H., Hu lamo, N., Artigau, E., Augereau, J.-C., van Dishoeck, E., Olofsson, J., Oliveira, I., *et al.* (2011). Ruling out unresolved binaries in five transitional disks – VLT/NACO deep 2.12 and 1.75  $\mu\text{m}$  narrow-band imaging. *Astronomy & Astrophysics*, 533:A135.
- Vioque, M., Oudmaijer, R. D., Baines, D., Mendigut a, I., ja P rez-Mart nez, R. (2018). Gaia DR2 study of Herbig Ae/Be stars. *Astronomy & Astrophysics*, 620:A128.
- Wade, G., Bagnulo, S., Kochukhov, O., Landstreet, J., Piskunov, N., ja Stift, M. (2001). LTE spectrum synthesis in magnetic stellar atmospheres – The interagreement of three independent polarised radiative transfer codes. *Astronomy & Astrophysics*, 374(1):265–279.
- Waters, L. ja Waelkens, C. (1998). HERBIG Ae/Be STARS. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 36(1):233–266.
- Wyatt, M. C., Pani , O., Kennedy, G. M., ja Matr , L. (2015). Five steps in the evolution from protoplanetary to debris disk. *Astrophysics and Space Science*, 357(2):1–20.

Zhu, Z., Nelson, R. P., Dong, R., Espaillat, C., ja Hartmann, L. (2012). Dust filtration by planet-induced gap edges: implications for transitional disks. *The Astrophysical Journal*, 755(1):6.

# A. Zeemani kirjeldus

Kood koosneb peamisest programmist ZeemanU, moodulist arraySizes ja neljateistkümnest alamprogrammist: ReadVALD3, parse\_quantum3, correctGF, COMPTON, KAPPAC, LTELIC, DSKINT, MAGFLD, ABZSP, VOIGT, LINPRO, VmacCONV, SPPROF, HE4471.

## A.1 Moodul arraySizes

Erinevate massiivide dimensioonide ja suuruste paika panemine. Kõik programmid, välja arvatud MAGFLD ja parse\_quantum3 kasutasid seda moodulit. Järgneb loetelu sisendparameetritest:

- *nWinM* – spektraalsete akende maksimaalne arv,
- *nAtmoM* – atmosfäärikihtide maksimaalne arv,
- *nLinesM* – aatomilise andmeridade maksimaalne arv,
- *nSpecPts* – spektraalsete punktide maksimaalne arv akna kohta (vahemikuga 0,01 Å),
- *nPhaseM* – pöörlemisfaaside maksimaalne arv,
- *nParamM* – keemiliste elementide ohtruse maksimaalne arv, mis on mudelis täpsustatud,
- *nPartFM* – partitsiooni funktsiooni koefitsentide ridade maksimaalne arv, mis loetakse failist *atom.dat*,
- *nPartF2M* – partitsiooni funktsiooni koefitsentide ridade maksimaalne arv, mis loetakse failist *irwinpf.dat*.

## A.2 Põhiprogramm ZeemanU

Programm ZeemanU loeb sisse aatomiliste andmete kataloogi *atomdt*, mis on vajalik arvutuste tegemiseks. Kataloogis on iga aatomiliigi tuumalaeng (*Z*) ja mass (*A*) järjest, millele järgneb logaritmiline Päikese keemiliste elementide sisaldus, esimesed kolm ionisatsiooni potentsiaali

ja esimese nelja ionisatsiooniseisundi põhiseisundi mitmekordsus (ehk ligikaudne partitsiooni funktsioon). Tegeletakse failidega *newatom.dat*, *zmodel.dat*, *outzfit-u.dat*. ZeemanU loeb sisse polünoomiliste koefitsentide tabeli failist *newatom.dat*, et teha partitsiooni funktsioonide arvutusi. Loeb sisse polünoomiliste koefitsentide Irwini tabeli, et teha partitsiooni funktsioonide arvutusi (juhul kui standartsest tabelist puudu), milleks avab faili *irwinpf.dat*. Programm loeb mudeli parameetrite faili *zmodel.dat* ja sellest faaside arvu ning instrumentaalse profiili. Loeb sisse spektraalsete akende arvu, mida tuleb arvutada. Lisaks alguse ja lõpu lainepikkused iga spektraalse akna kohta. Tähe jaoks on vaja teada pöörlemistelje kallet vaatesihi suhtes ja pöörlemisfaasi, mis on mõõdetud lähimast lähenemisest magnetpoolusele. Magnetvälja jaoks vaja määrata nurk magnetilise telje ja pöörlemistelje vahel, tugevus ja detsentreeriv parameeter detsentreeritud dipooli jaoks, lineaarse kvadropooli tugevus ja tugevus lineaarse oktopooli jaoks, mis on lineaarne teistega. Elementide sisalduse variatsioonide korral eeldada, et variatsioon võtab täpsustatud arvukuse *nring* rõnga kuju, mis on peale pandud taustal olevale erinevale arvukusele. Kõige rohkem on kuute sellist rõngast kasutatud ja on eeldatud, et nad on telgsümmeetrilised tähe magnetteljega. Mudelatmosfäär loetakse sisse failist *atmosphere.krz*. Kutsutakse välja alamprogramm ReadVALD3 aatomiliste joonte andemte sisse lugemiseks. Lisaks kutsutakse välja alamprogrammid COMPTON ja KAPPAC. Käiakse läbi jooned, mis on listi *valdls* kirja pandud. Võrreldakse nende aatomnumbri väärtust nendega, mille sisaldused või muutlikuse parameetrid on pandud listi *param*. Kutsutakse välja alamprogrammid LTELC ja DSKINT.

### A.3 Alamprogramm ReadVALD3

Alamprogramm ReadVALD3 loeb sisse joonte andmed, mis on vajalikud spektripiirkonna sünteesimiseks. Need andmed on failis *vlines.dat*. Jooned on formaadis  $(Z_i, \lambda, \log(gf), E_l, J_l, E_u, J_u, g_1, g_2, g_{avg}, C1, C4, C6)$  - vastavalt joont tekitava elemendi aatomnumber, ionisatsioonitase, lainepikkus Å, ostsillaatori tugevus, madalama taseme energia eV, madalam J, kõrgema taseme energia ja J, Lande faktorid alumise, ülemise ja keskmise väärtuse jaoks, summutuskonstant kiirgusliku summutuse konstant, kvadraatilise Starki laienemise constant, van der Waalsi interaktsiooni constant. Kutsub välja alamprogrammid *parse\_quantum3* ja *correctGF*.

#### A.3.1 Alamprogramm *parse\_quantum3*

Alamprogramm *parse\_quantum3* sõelub läbi spektroskoopiliste viidete teksti read, mida VALD kasutab. Proovib määrata kvantnumbrite L ja S väärtuse alumise või ülemise taseme jaoks.

### A.3.2 Alamprogramm correctGF

Alamprogramm correctGF loeb sisse listi parandatud ostsillaatori tugevustest failist *corrgf.dat* ja uuendab VALD joonte listi nende ostsillaatori tugevustega.

## A.4 Alamprogramm COMPTON

Alamprogramm COMPTON (*Zeeman component splitting calculation*) loeb sisse lainepikkuste vahemikus spektrijoonte listi, mida sünteesida. Alamprogramm seejärel arvutab joone lõhestumine Lorentzi ühikutes, normaliseeritud suhtelise tugevuse.

## A.5 Alamprogramm KAPPAC

Alamprogramm KAPPAC on pideva läbipaistmatuse arvutamiseks kindlal lainepikkusel. Läbipaistmatuse allikateks on seotud-vaba ja vaba-vaba neeldumine neutraalse vesiniku poolt, seotud-vaba ja vaba-vaba neeldumine negatiivse vesiniku ionide poolt, seotud-vaba ja vaba-vaba ülekanded neutraalse ja ioniseeritud heeliumi poolt ning elektronhajumine.

## A.6 Alamprogramm LTEL

Alamprogramm LTEL (*LTE line-to-continuum ratio calculation*) on ZEEMAN programmi jaoks, et arvutada suurused lokaalse termodünaamilise tasakaalulise väärtuse hindamiseks. Alamprogramm vajab joonte andmeid listist *valdls*-st, täpsemalt joone numbri indeksit, joone aatomnumbrit, ionisatsiooni tasemet, joone lainepikkust, joone  $\log(gf)$  väärtust. Alamprogramm kasutab aatomilisi andmeid *atomdt* jadast. Lõpuks, kui uuritava elemendi sisandus on erinev *atomdt* väärtusest, vajab alamprogramm keemilise elemendi indeks numbrit jadast param. Arvutab elemendi sisalduse vesiniku suhtes ja partitsiooni funktsioonid. Kasutatakse koefitsente failist *atom.dat*. Kui seal vajalikke koefitsente ei leidu, kasutatakse koefitsente failist *irwinpf.dat*. Ja kui endiselt ei leidu, võetakse vaikimisi partitsiooni funktsioon madalamate energiatasemete statistilisest kaalust failist *atom.dat*.

Arvutatakse summutuskonstandid erinevate summutusprotsesside jaoks. Summutuskonstandid on antud kui Lorentzi profiili taislaid poolkõrgusena.

- Kiirguslik summutus. Summutuskoefitsendid on võetud VALD andmetest.
- Laienemine neutraalse H kokkupõrkel. Arvutamiseks kasutatakse tavapäraselt van der Waalsi teooriat.

- Kvadraatiline Starki efekt.

## A.7 Alamprogramm DSKINT

Alamprogramm DSKINT (*Disk integration routine*) on välja kutsutud ZEEABUN programmi poolt, mis on ZEEMANI versioon, mis automaatselt määrab kõige paremini sobituvad väärtused elementide sisaluse jaoks 30 kraadise tsooni sees ümber magnetvälja telje. Alamprogram viib läbi ketta integratsiooni, et arvutada joone profiilid igas täpsustatud faasis täpsustatud magneetilise ja elementide sisalduse mudeli kohta. Ketas jaotatakse võrdseteks aladeks, kuigi välimised alad on veidi suuremad kui sisemised. Kutsutakse välja alamprogrammid MAGFLD ja ABZSP. Kui kasutusel oleks homogeenne ja mitte-magneetiline mudel, oleks signaal-müra läbipaistmatused (Voigti profiilid) identsed iga pinnaelemendi ja polariseeritud oleku jaoks ning neid oleks vaja arvutada ainult ühe korra akna (ja faasi) kohta. Kutsutakse välja alamprogrammid VOIGT, LINPRO ja VmacCONV. Lisatakse lokaalsed Stokesi intensiivsuse komponendid. Normaliseeritakse Stokesi polariseeritud komponendid. Kutsutakse välja alamprogramm SPPROF.

## A.8 Alamprogramm MAGFLD

Alamprogramm MAGFLD (*magnetic field component calculation*) arvutab magnetvälja komponendid asukohas  $x,y$  tähe nähtava valguse kettal, mille  $z$ -telg on vaatesuuna sihis. Välja kutsutud program täpsustab lisaks  $x,y$  asukohale magnetvälja geomeetrised parameetrid, magnetvälja jaotuse ja magnetvälja tugevuse. Geomeetrised parameetrid on pöörlemistelje kalle, välja telje kalle pöörlemisteljest ja pöörlemisfaas, mis on mõõdetud lähimast lähenemisest magnetvälja telje ja vaatlussihi suhtes. Alamprogramm lubab väljatugevuse arvutamist mitme lihtsa magnetvälja geomeetria lineaarsetest kombinatsioonidest. Iga magnetvälja geomeetria on normaliseeritud ja selle panus kogu magnetvälja on täpsustatud andes sellele komponendile polaarne (või ekvatoriaalne) magnetvälja tugevus. Magnetvälja geomeetriateks on detsentraliseeritud dipool, kvadrupool ja oktupool.

## A.9 Alamprogramm ABZSP

Alamprogramm ABZSP on suvalises punktis tähe kettal lokaalse keemilise sisalduse faktori arvutamiseks tähe maksimaalse sisalduse piirkonna suhtes, kasutades põhiprogrammis välja toodud mudelit. Seejärel arvutatakse välja Zeemani komponentide asukohad usaldusväärse lainepikkuse ja nende komponentide tugevuste suhtes. Tugevuste arvutamisel kasutatakse väärtusi, mis on eelnevalt leitud alamprogrammis LTELCL.

## A.10 Alamprogramm VOIGT

Alamprogramm VOIGT arvutab Voigti ja Faraday-Voigti profiilid, summeerides üle joonte ja tagastades signaal-müra läbipaistmatused ja anomaalsed dispersioonid. Seda tehakse iga atmosfääri kihi kohta ühe korra, et kasutada neid kiiruslevi arvutustes. Profiil võib olla arvutatud ühe pinnaelemendi või ühe joone komponendi kohta ja vajadusel uuesti kasutusele võetud. Alamprogramm võtab sisendiks joone komponendi lainepikkuse positsioonide jada, mis on arvutatud alamprogrammis ABZSP. Alamprogramm arvutab signaal-müra läbipaistmatuse suhted sügavuse ja lainepikkuse funktsioonina. Kasutades esimese pi komponendi lainepikkust ehk peaaegu tsentraalset komponenti, arvutatakse piirväärtused, tagades järjekindluse arvutatud piirkonna iga komponendi jaoks. Kui joone profiilid tulevad arvutada millegi muuna kui Voigti profiilidena kutsutakse esile alamprogramm HE4471.

### A.10.1 Alamprogramm HE4471

Alamprogramm HE4471 loeb sisse normaliseeritud profiilide tabeli He I 4471 joonte jaoks lainepikkuse, temperatuuri ja tiheduse funktsioonina ja interpoleerib logaritmiliselt. Esimest korda, kui alamprogrammi sisenetakse, loetakse sisse He I 4471 profiili tabelid failist *he\_i\_synspec.asc*, mis on pärit Barnard *et al.* (1974) artiklist. Iga osakeste tiheduse kohta antud tabelitel on  $\Delta\lambda$  veerg joone tsentrist, millele järgneb neli veergu normaliseeritud profiilidest vastavalt temperatuuridele 5000, 10000, 20000, 40000 K.

## A.11 Alamprogramm LINPRO

Alamprogramm LINPRO arvutab polariseeritud Stokesi joone profiilid täieliku integratsioonina ülekande valemist läbi atmosfääri. See alamprogramm teeb poole tõsisest osast üldprogrammis. LINPRO saab kasutada kas täielikku andmehulka mudelatmosfäärast või saab ta lühendada arvutusi kasutades ainult tasemeid kindlate vahemike kaupa. Selle abil saab ka kontrollida tulemuse sidususe rahulolu. Tuleb paika panna eriline lahendus ülekande valemi jaoks, mis kehtib sisemiste äärekihtide kohta. Selleks käiakse läbi erienvate Martin ja Wickramasinghe (1979) lahendused. Arvutatakse esilekerkivad intensiivsused kontiiniumis. Kasutatakse jällegi Martin ja Wickramasinghe (1979) lahendeid.

## A.12 Alamprogramm VmacCONV

Alamprogrammi VmacCONV ehk makroturbulentse kiiruse konvolutsioon sisendparameetrid:

- *vmac* – makroturbulents,

- $SA$  – sisestatud spekter ( $0,01 \text{ \AA}$  sammuga),
- $wl$  – akna tsentraalse lainepikkuste jada,
- $lu$  – lainepikkuste punktide number igas aknas,
- $\cos\theta$  – koosinus tähe fotosfääri lokaalse normaali ja  $z$ -telje vahelisest nurgast (nt. lokaalse pinnanormaali komponent mööda vaatlussihti) – mille arvutab välja alamprogramm DSKINT.

Arvutatakse makroturbuletsi Gaussi profiil kolmes erinevas punktis. Gaussi profiil normaliseeritakse ühele. Lõpetuseks seotakse makroturbuletsi laiendatud profiil joone profiiliga.

### A.13 Alamprogramm SPPROF

Alamprogramm SPPROF (*Spectrograph instrumental profile broadening subroutine*) seob saadud andmete jada (nt joone intensiivsuse profiili lainepikkuse funktsioonina) Gaussi instrumentaalse FWHM (täislaius-poolmaksimumis) profiiliga ja teisendatakse mingiks sammude arvuks (kuni 30-ni, vastavalt FWHM väärtusele). Teisendab täislaiuse lainepikkustesammude ( $0,01 \text{ \AA}$ ) ühikutesse, arvutab ja säilitab (eeldatud Gaussi) instrumentaalse profiili. Profiil normaliseeritakse.

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

Mina, Kertu Metsoja,

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

## **Planetaarne aine varajast tüüpi tähtede ümber,**

mille juhendaja on Mihkel Kama, 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.

Kertu Metsoja,

31. mai 2021. a.