



LATVIJAS UNIVERSITĀTE

FIZIKAS, MATEMĀTIKAS UN OPTOMETRIJAS FAKULTĀTE

Kārlis Puķītis

EVOLŪCIJAS UN DINAMISKO PROCESU MONITORINGS AGRĪNĀ PĒCASIMPTOTISKĀ MILŽU ZARA ZVAIGŽŅU AUGSTAS IZŠĶIRTSPĒJAS SPEKTROS

PROMOCIJAS DARBA KOPSAVILKUMS

Doktora grāda iegūšanai fizikas un astronomijas nozarē
Apakšnozare: astrofizika un fundamentālā astronomija

Rīga, 2023

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Universitātes Fizikas, matemātikas un optometrijas fakultātē, Lāzeru centrā laika posmā no 2019. gada līdz 2023. gadam.

NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA

Eiropas Sociālais
fonds

I E G U L D Ī J U M S T A V Ā N Ā K O T N Ē

Eiropas Sociālā fonda projekts “LU doktorantūras kapacitātes stiprināšana jaunā doktorantūras modeļa ietvarā” tiek īstenots darbības programmas “Izaugsme un nodarbinātība” 8.2.2. specifiskā atbalsta mērķa “Stiprināt augstākās izglītības institūciju akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās” trešās kārtas ietvaros (projekts Nr. 8.2.2.0/20/1/006)

Darbs sastāv no ievada, 3 nodaļām, pateicībām un literatūras saraksta.

Darba forma: publikāciju kopa fizikas un astronomijas nozarē, astrofizikas un fundamentālās astronomijas apakšnozarē.

Darba zinātniskais vadītājs: *Dr. phys.* **Laimons Začs**

Darba recenzenti:

- 1) *Dr. phys.* **Juris Kalvāns**, Ventspils Augstskola
- 2) Prof. *Dr.* **Bruce Hrivnak**, Valparaiso Universitāte, ASV
- 3) Prof. *Dr.* **Arūnas Kučinskas**, Viļņas Universitāte, Lietuva

Promocijas darba aizstāvēšana notiks Latvijas Universitātes Fizikas un astronomijas zinātņu nozares promocijas padomes atklātajā sēdē 2023. gada 24. novembrī plkst. 15.00.

Ar promocijas darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Universitātes Bibliotēkā Rīgā, Raiņa bulvārī 19.

LU Fizikas un astronomijas zinātņu nozares
promocijas padomes priekšsēdētājs: Prof. *Dr. habil. phys.* **Jānis Spīgulis**

promocijas padomes sekretāre: **Sintija Siliņa**

© Kārlis Puķītis, 2023
© Latvijas Universitāte, 2023

ISBN 978-9934-36-089-3

ISBN 978-9934-36-090-9 (PDF)

Anotācija

Pēcasimptomiskā milžu zara stadija ir viens no vissliktāk izprastajiem masas un vidējas masas zvaigžņu evolūcijas posmiem. Lai gan dinamiskie procesi atmosfērā šīs fāzes agrīnajā daļā būtiski ietekmē zvaigznes evolūciju, tie tikpat kā nav pētīti.

Šajā darbā veikta agrīnā pēcasimptomiskā milžu zara zvaigžņu spektroskopija ar mērķi novērot evolūcijas un dinamisko procesu norises liecības, pētot gan īlga, gan īsa laika posma izmaiņas to augstas izšķirtspējas optiskajos spektros. Spektroskopija daudzās epohās paver iespēju precizēt zvaigznes HD 161 796 evolūcijas ātrumu un apstiprina, ka, zvaigznei pulsējot, tās izmērs ir vismazākais, kad fotosfēra ir viskarstākā. Novērtēts, ka zvaigznes sākotnējā masa ir aptuveni $2 M_{\odot}$ vai mazāka. Atrastas liecības pašreizējai, mainīgai vielas aizplūšanai no zvaigznes, triecienviļņiem atmosfērā un senāk notikušai akrēcijai. Par ievērojamām izmaiņām spektrā dažu dienu laikā liecina zvaigznes IRAS 22272+5435 monitorings. Spektrālīniju mainīgums skaidrojams ar dinamiskajiem procesiem fotosfēras tuvumā, kā piemēram, triecienviļņiem un lielmēroga konvekciju. Norādes uz tādu pašu dinamisko procesu klātbūtni redzamas arī novērotajos zvaigznes IRAS Z02229+6208 spektros.

Saturs

Ievads	6
Motivācija	6
Mērķis un uzdevumi	7
Tēzes	7
Zinātniskā novitāte	7
Zinātniskās publikācijas un ziņojumi konferencēs	8
Promocijas darbā iekļautās publikācijas	8
Citas publikācijas	9
Ziņojumi konferencēs	9
1 Literatūras apskats	11
1.1 Asimptotiskā milžu zara stadijas pārskats	11
1.1.1 Evolūcija un kodolsintēzes procesi zvaigznē	11
1.1.2 Dinamiskie procesi atmosfērā	14
1.1.3 Apzvaigznes apvalks	15
1.2 Pēcasimptotiskā milžu zara objekti	16
1.2.1 Zvaigznes evolūcija	16
1.2.2 Ķīmisko elementu koncentrācijas fotosfērā	18
1.2.3 Apzvaigznes apvalka formas veidošanās	19
1.2.4 Pulsāciju īpašības	21
1.2.5 Dinamisko procesu izpausmes optiskajos spektros	22
2 Izmantotie spektri un to analīzes metodika	24
2.1 Augstas izšķirtspējas spektri	24
2.1.1 Ešeltipa spektrogrāfi	24
2.1.2 Izmantotie spektri un spektrogrāfi	24
2.2 Spektru analīzes pamata procedūra	26
2.2.1 Spektra normēšana	26
2.2.2 Spektrālīniju identifikācija	26
2.2.3 Radiālais ātrums un citi spektrālīniju parametri	28
2.3 Spektru analīze izmantojot atmosfēras modeļus	29
2.3.1 Atmosfēras modeļi	29
2.3.2 Programma SPECTRUM un koncentrācijas	30
2.3.3 Fotosfēras parametru noteikšana	31

3	Rezultāti un diskusija	33
3.1	HD 161796: daudzepohu spektroskopija	33
3.1.1	Būtiskākie zvaigznes iepriekšējo pētījumu rezultāti	33
3.1.2	Evolūcijas ātrums un starжда	34
3.1.3	Ķīmiskā sastāva analīze	35
3.1.4	Pulsāciju īpašības	37
3.1.5	Triecienviļņu un uz ārpusi vērstas plūsmas pazīmes	38
3.2	IRAS 22272+5435: izmaiņas spektrā īsā laika posmā	40
3.2.1	Būtiskākie zvaigznes iepriekšējo pētījumu rezultāti	40
3.2.2	Vielas krišana uz zvaigzni	41
3.2.3	Epizodiska molekulu līniju emisija	43
3.3	IRAS Z02229+6208: tuvā IS spektra monitorings	46
3.3.1	Būtiskākie zvaigznes iepriekšējo pētījumu rezultāti	46
3.3.2	Mainīgās molekulu līnijas	46
3.3.3	Stacionārās molekulu līnijas	48
3.4	Secinājumi un rezultātu kopsavilkums	49

Pateicības	51
-------------------	-----------

Literatūras saraksts	52
-----------------------------	-----------

Ievads

Motivācija

Pēcasimptotiskā milžu zara (PAMZ) stadija ir īslaicīga zvaigžņu evolūcijas fāze, kas noved pie tā, ka šāda tipa zvaigznes ir retas un, līdz ar to, slikti izprastas. Tomēr PAMZ zvaigznes ir būtiska sastāvdaļa to priekšteču un pēcteču pētījumos.

Iepriekšējā, asimptotiskā milžu zara (AMZ), evolūcijas stadijā zvaigznes dzīlēs noris kodolsintēzes procesi, kuros rodas litijs, ogleklis, slāpekļis un smagie ķīmiskie elementi. No zvaigznes dzīlēm šīs svaigi radītās vielas tiek uznestas virspusē, bagātinot atmosfēras un pēc tam arī starpzvaigžņu vides ķīmisko sastāvu. Kodolsintēzes produktu klātbūtne novērojama arī PAMZ zvaigžņu atmosfērās, kas tiek izmantota, lai pētītu ķīmisko elementu rašanās un vielas sajaukšanās procesus AMZ zvaigznēs. Negaidīti novērotais PAMZ zvaigžņu atmosfēru duālais sastāvs - vai nu tās ir ļoti bagātinātas ar AMZ kodolsintēzes produktiem vai arī bez jebkāda šo ķīmisko elementu koncentrācijas palielinājuma - ir ilglaicīga problēma, ko AMZ ķīmiskās evolūcijas modeļi nespēj izskaidrot. Ir nepieciešami detalizēti individuālu PAMZ zvaigžņu pētījumi, lai saprastu, kas nosaka galējo virsmas ķīmisko sastāvu.

Bez kodolsintēzes procesiem straujo PAMZ zvaigznes evolūciju nosaka arī vielas zaudēšana ar zvaigznes vēju, it īpaši uzreiz pēc AMZ fāzes beigām, tā saucamajā agrīnajā PAMZ stadijā. Izpratne par evolūciju PAMZ stadijas sākumā ir pieņemumu līmenī, un tikpat kā nekas nav zināms par zvaigznes vēju šajā fāzē, lai gan tas arī ietekmē sekojošā planetārā miglāja (PM) apveidu. Noskaidrots, ka sarežģītās PM formas iedīgli sāk parādīties agrīnajā PAMZ stadijā vai tās tuvumā, bet konkrētie mehānismi, kas to izraisa, ir neskaidri. Zvaigznes vējš ir sekas dinamiskajiem procesiem zvaigznes atmosfērā, kas detalizēti pētīti vien dažiem PAMZ objektiem.

Augstas izšķirtspējas spektroskopija ir viena no pētījumu metodēm, kas paver iespēju izprast neskaidros PAMZ zvaigžņu jautājumus. Ir nepieciešams novērot un analizēt spektrus gan nepētītām zvaigznēm, gan tādām, kuras jau ir pētītas. Jaunu zvaigžņu novērojumi palielinās to PAMZ objektu klāstu, kuriem ir zināms ķīmiskais sastāvs. Papildus novērojumi jau pētītām zvaigznēm padarīs iespējamu evolūcijas ātrumu noteikšanu. Bieža un regulāra spektru uzņemšana ir izcili piemērota, lai izsekotu PAMZ zvaigžņu dinamisko procesu norisei.

Mērķis un uzdevumi

Šī darba mērķis ir novērot agrīnā PAMZ zvaigžņu evolūcijas un dinamisko procesu norises liecības, pētot gan ilga, gan īsa laika posma izmaiņas to augstas izšķirtspējas optiskajos spektros. Mērķa sasniegšanai nosprausti sekojoši galvenie uzdevumi:

- no arhīviem iegūt zvaigžņu HD 161796 un IRAS 22272+5435 spektus, lai papildinātu darbam nepieciešamo pieejamo spektru klāstu;
- novērot vairākus spektus citām agrīnā PAMZ zvaigznēm;
- katrai zvaigznei analizēt un salīdzināt spektus, kas uzņemti dažādos laika momentos;
- noteikt zvaigznes HD 161796 fotosfēras parametrus, izmantojot visus tās pieejamos spektus.

Tēzes

Darba uzdevumu izpilde paver iespēju pārbaudīt dažas par PAMZ stadijas zvaigznēm formulētas atziņas:

- esot PAMZ stadijā, evolūcijas ietekmē zvaigznes efektīvā temperatūra strauji mainās;
- tām PAMZ zvaigznēm, kas atrodas protoplanetāro miglāju centrā, virsma ir karstāka, kad zvaigzne pulsāciju ietekmē ir saspiedusies, un pretēji;
- PAMZ zvaigžņu spektros novērotās platās un izteikti mainīgās C_2 un CN molekulu spektrālīnijas formējas virs fotosfēras.

Zinātniskā novitāte

Šajā darbā prezentētie pētījumi iezīmē progresu PAMZ zvaigžņu izpētē kopumā:

- pirmo reizi veikta ilgā laika posmā iegūtu spektru homogēna analīze ar mērķi noteikt agrīnās PAMZ zvaigznes fotosfēras temperatūras izmaiņas evolūcijas ietekmē (zvaigznei HD 161796);
- spektroskopiski apstiprinātas protoplanetāro miglāju centrālo zvaigžņu pulsāciju īpašības (zvaigznei HD 161796);
- pirmo reizi PAMZ zvaigznē novērots molekulu spektrālīniju īsa laika posma mainīgums un izsekota molekulu emisijas līniju attīstība (zvaigznei IRAS 22272+5435).

Iegūti arī vairāki jauni rezultāti, kas ir būtiski atsevišķo zvaigžņu gadījumā, piemēram:

- zvaigznes HD 161796 spektrā novērots savdabīgs mainīgums mazas un vidējas intensitātes fotosfēras absorbcijas līniju profilos;
- zvaigznes IRAS 22272+5435 spektrā konstatētas molekulu spektrālīnijas, kas pieder tādām svārstību joslām, par kuru klātbūtni iepriekš nebija ziņāms;
- zvaigznes IRAS Z02229+6208 spektrā novērotas ievērojamas izmaiņas CN molekulas spektrālīnijās.

Zinātniskās publikācijas un ziņojumi konferencēs

Promocijas darbā iekļautās publikācijas

- K. Puķītis, L. Začs un A. Grankina, “Multiepoch Optical Spectroscopy of the Post-AGB Star HD 161796”, [The Astrophysical Journal](#), **928**, 29 (2022).

Es lejupielādēju vairākus zvaigznes HD 161796 spektrus no arhīviem, analizēju visus pieejamos šīs zvaigznes spektrus, un sagatavoju publikāciju. Bez dažu vērtīgu komentāru sniegšanas kolēģi sagādāja un reducēja daļu no publikācijā izmantotajiem spektriem.

- L. Začs un K. Puķītis, “Short-term Spectroscopic Variability of the Early Post-AGB Stage Star IRAS 22272+5435”, [The Astrophysical Journal](#), **920**, 17 (2021).

Es sarēķināju sintētisko spektru un sagatavoju publikācijai nepieciešamos attēlus. L. Začs sagādāja zvaigznes IRAS 22272+5435 spektrus un atmosfēras modeli. L. Začs arī veica spektru analīzi un sagatavoja publikāciju.

- K. Puķītis, L. Začs un J. Sperauskas, “Episodes of molecular emission in the optical spectrum of IRAS 22272+5435”, [The Astrophysical Journal](#), **948**, 70 (2023).

J. Sperauskas uzņēma un reducēja visus zvaigznes IRAS 22272+5435 izņemot vienu, ko es lejupielādēju no arhīva. Es analizēju visus pieejamos spektrus un sagatavoju publikāciju. Abi kolēģi sniedza dažus vērtīgus padomus publikācijas tapšanas procesā.

- L. Začs un K. Puķītis, “Pulsation-induced Spectroscopic Variability of IRAS Z02229+6208”, [The Astrophysical Journal](#), 952, 49 (2023).

Es sagatavoju novērojumu laika pieteikumu, kura rezultātā tika novēroti zvaigznes IRAS Z02229+6208 spektri. Es palīdzēju sagatavot spektrus analīzei, ko veica L. Začs. Es sagatavoju nepieciešamos attēlus publikācijai, kuru izstrādāja L. Začs.

Citas publikācijas

Esmu līdzautors arī divām citām ar zvaigžņu spektroskopiju saistītām zinātniskajām publikācijām, kuras palikušas ārpus šī darba.

- L. Začs, K. Puķītis, J. Sperauskas u. c., “HD 54361: evidence for the status of a low mass TP-AGB star”, [Astrophysics and Space Science](#), 365, 27 (2020).
- L. Začs un K. Puķītis, “Evidence of Increased Macroturbulence for Betelgeuse during Great Dimming”, [Research Notes of the American Astronomical Society](#), 5, 8 (2021).

Ziņojumi konferencēs

Šī darba rezultāti ir prezentēti mutiski 79. un 81. Latvijas Universitātes starptautiskajā zinātniskajā konferencē (LU konference) un stenda referāta formā citās konferencēs.

- K. Puķītis, L. Začs un A. Grankina, “Zvaigznes HD 161796 atmosfēras parametri un ķīmisko elementu koncentrācijas”, LU konference, attālināti, 2021. gada 2. februāris.
- K. Puķītis, L. Začs un A. Grankina, “Signatures of outflow from stellar surface in HD 161796”, Asymmetrical Post-main-sequence Nebulae 8, attālināti, 2021. gada 4.-8. oktobris.
- K. Puķītis, L. Začs un A. Grankina, “Probing variable outflow in HD 161796 via multi-epoch spectroscopy”, IAU Symposium 366: The Origin of Outflows in Evolved Stars, attālināti, 2021. gada 1.-5. novembris.
- L. Začs un K. Puķītis, “Evidence of large-scale flow in the outer atmosphere of the early post-AGB stage star IRAS22272+5435”, IAU Symposium 366: The Origin of Outflows in Evolved Stars, attālināti, 2021. gada 1.-5. novembris.
- K. Puķītis un L. Začs, “Spectroscopic monitoring of early stage post-AGB stars”, NOT - a telescope for the future, Palmas sala, Spānija, 2022. gada 7.-10. jūnijs.

- K. Puķītis un L. Začs, “Signatures of wind formation in optical spectra of precursors of planetary nebulae”, XXXIst General Assembly of the International Astronomical Union, attālināti, 2022. gada 2.-11. augusts.

Balstoties uz šo ziņojumu ir sagatavota publikācija, kas apstiprināta publicēšanai konferenču izdevumā ”Proceedings of the International Astronomical Union”.

- K. Puķītis, L. Začs un J. Sperauskas, “Astrospektroskopijas laboratorijas jaunākie zvaigžņu novērojumi”, LU konference, attālināti, 2023. gada 31. janvāris.

1. Literatūras apskats

1.1. Asimptotiskā milžu zara stadijas pārskats

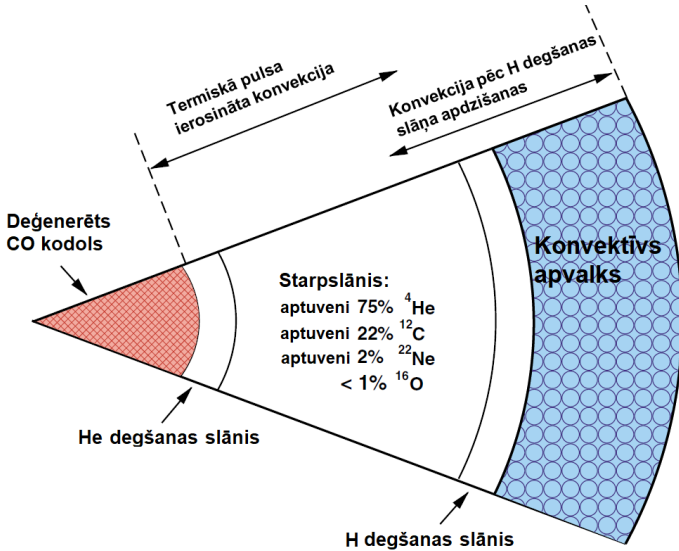
Daudzas PAMZ zvaigžņu īpatnības ir saistītas ar iepriekšējo AMZ evolūcijas fāzi. Tādēļ pirms PAMZ stadijas apraksta nepieciešams apskatīt AMZ objektu uzbūvi un būtiskākos tajos notiekošos procesus.

1.1.1. Evolūcija un kodolsintēzes procesi zvaigznē

AMZ zvaigznes ir mazas un vidējas masas zvaigžņu (sākotnējā masa aptuveni 1 līdz $8 M_{\odot}$) pēcteči, kas meklējamas Hercšprunga-Rasela diagrammas vēsajā (virsmas temperatūras ap 3000 K) un spožajā (daži 10^2 līdz daži $10^4 L_{\odot}$ lielas starjaudas) daļā. Šajā evolūcijas stadijā zvaigznes nonāk pēc tam, kad pārdzīvojušas sarkanā milža zara stadiju un tai sekojošo hēlija (He) degšanu¹, kas noved pie no oglekļa un skābekļa sastāvoša zvaigznes kodola. Pēc tam, kad pašā zvaigznes centrā He degšana ir apstājusī, kodolreakcijas pārmetas uz slāni, kas ieskauj kodolu, iezīmējot sākumu AMZ stadijai. Sākotnēji šajā evolūcijas fāzē paralēli He degšanai noris arī ūdeņraža (H) degšana slānī, kas atrodas virs starpslāņa un zem zvaigznes ārējā konvektīvā apvalka, kas sastāv pamatā no H. AMZ zvaigznes struktūra un starpslāņa sastāvs redzams Attēlā 1.1. Zvaigznei evolucionējot, pastāvīgās He kodolreakcijas laika gaitā nomaina strauji uzliesmojumi He degšanas slānī. Šādi uzliesmojumi jeb termiskie pulsi ir apmēram simts gadus ilgi, un tie ierosina konvekciju starpslānī, kas parasti ir inerts. Konvektīvās plūsmas starpslānī iemaisa ^{12}C , kā arī citus He degšanas produktus. Termiskais pulss arī liek zvaigznei izplesties, kas noved pie tā, ka norimst kodolreakcijas H degšanas slānī. Tas, savukārt, dod iespēju starpslānī iespieties ārēja apvalka konvektīvajām plūsmām, ar kurām ^{12}C visbeidzot nokļūst līdz zvaigznes virsmai. Uzskaitīto procesu kopu, kas sākas ar termisko pulsu, dēvē par trešo uznešanu. Kad tā ir beigusies, zvaigznei lēnām saspiežoties, atkal sākas kodolreakcijas H degšanas slānī. Pēc aptuveni desmit tūkstošiem gadu notiek nākamais termiskais pulss. Šis cikls var atkārtoties daudzas reizes un novest pie tā, ka zvaigznes atmosfērā oglekļa daudzums kļūst lielāks par skābekļa daudzumu, radot oglekļa zvaigzni. Tomēr ne vienmēr var izveidoties oglekļa zvaigzne. Piemēram, ja zvaigznes sākotnējā masa ir lielāka par aptuveni $4 M_{\odot}$, tad noris process, ko sauc par karsto degšanu. Šajā gadījumā ārējā apvalka konvekcija iesniedzas tādā H degšanas slāņa tuvumā, kur lielā temperatūra izsauc kodolreakcijas, kas patērē ^{12}C . Līdz šim apskatītie kodolsintēzes un sajaukšanās procesi uzskatāmi izpaužas divās galvenajās AMZ zvaigžņu spektra klasēs. M klases spektrus pārklāj TiO molekulas absorbcijas līnijas, un attiecīgajām zvaigznēm atmosfērā skābekļa atomu ir skaitliski vairāk kā

¹Ar šo vārdu domātas kodolreakcijas, nevis ķīmiskās reakcijas.

oglekļa atomu. Zvaigznes ar C klases spektriem atbilst pretējai situācijai - to atmosfērās ir vairāk oglekļa kā skābekļa. Kaut arī attiecīgajām zvaigznēm virsmas temperatūras ir līdzīgas, C klases spektri ir pilnīgi citādāki kā M klases gadījumā. Intensīvās un daudzskaitlīgās TiO molekulas līnijas aizvieto oglekli saturošu molekulu, piemēram, C_2 un CN, absorbcijas līnijas [1, 2].



Attēls 1.1: Shematiska AMZ zvaigznes uzbūve [3]. Degenerēto kodolu, kas sastāv no oglekļa un skābekļa, aptver He degšanas slānis. Tālāk seko starpslānis, virs kura atrodas H degšanas slānis. Visbeidzot, no ārpusē zvaigzni ieskauj konvektīvs apvalks, kas pamatā sastāv no H. Attēlam nav pareizs mērogs, jo konvektīvais ārējais apvalks ir aptuveni 10^5 reizes lielāks nekā zem tā esošie slāņi.

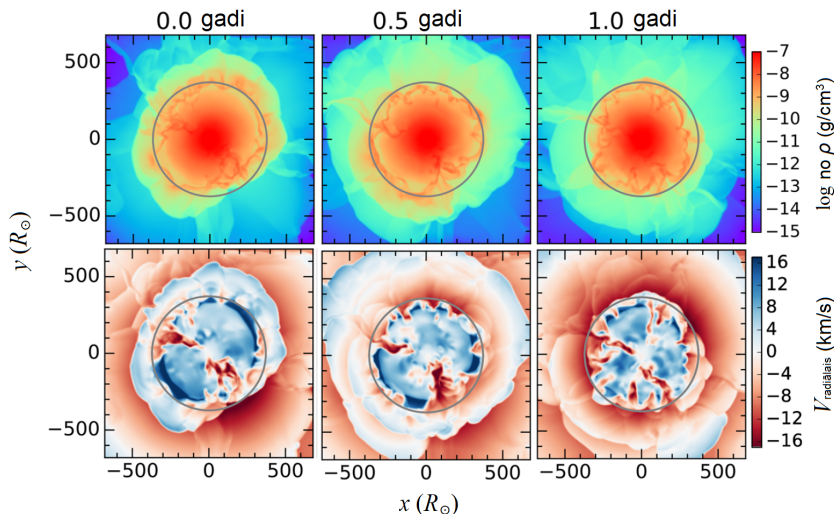
Zvaigznes masa nosaka ne tikai vielas samaisīšanās un kodolsintēzes procesus, bet arī AMZ evolūcijas fāzes ilgumu un starjaudu tās laikā - lielākas masas zvaigznēm arī šie parametri ir lielāki. AMZ zvaigznes evolūcija izpaužas kā virsmas temperatūras samazināšanās un starjaudas pieaugums laika gaitā. Piemēram, ja zvaigznes sākotnējā masa ir $1 M_{\odot}$, tad AMZ stadija ilgst apmēram 11 miljonus gadu. Savukārt, ja sākotnējā masa ir $3 M_{\odot}$, tad AMZ fāze ir tikai aptuveni 3 miljonus gadu ilga. Termiskie pulsi sākas tikai tad, kad zvaigzne AMZ fāzē pavadījusi ap 90 % no visas šīs stadijas laika. Visi iepriekš minētie lielumi un nospraustās robežas, kas ar saistītas ar zvaigznes masu, ir atkarīgas arī no zvaigznes metāliskuma. Zvaigzne, kura ir aptuveni ar tādu metāliskumu kā Saule ($Z = 0.02$), AMZ stadijas beigās sasniedz aptuveni $10^{3.5} L_{\odot}$ lielu starjaudu, ja tās sākotnējā masa ir $1 M_{\odot}$. Ja sākotnējā masa ir $3 M_{\odot}$, tad tiek sasniegta apmēram $10^{4.1} L_{\odot}$ liela starjauda [4].

Vēl viens būtisks process, kas saistās ar ievērojamām virsmas sastāva izmaiņām AMZ zvaigznēs, ir ķīmisko elementu, kas smagāki par dzelzi, kodolsintēze. Šādi smagie elementi tiek radīti, kad uz kāda jau zvaigznē esoša ķīmiskā elementa kodola tiek absorbēti neitroni. Šis absorbcijas jeb satveršanas rezultātā rodas smagāks izotops, kas var būt vai nu stabils vai nestabils. Pirmajā gadījumā seko nākamā neitrona satveršana, bet, ja izotops ir nestabils, notiek beta sabrukšana un rodas jauns ķīmiskais elements, kura kārtas skaitlis ir par vienu lielāks. AMZ zvaigznēs neitronu plūsma nav liela, un tikai viens neitrons tiek satverts uz nestabila izotopa pirms tā sabrukšanas. Šādu neitronu satveršanas procesa veidu sauc par s procesu un tajā var veidoties ķīmiskie elementi, kas nav smagāki par svini. S procesam nepieciešamos brīvos neitronus AMZ zvaigznēs nodrošina divi mehānismi. Viens no tiem sākas ar alfa daļiņas satveršanu uz ^{14}N , kas rezultējas ^{18}F . Tālāk šis kodols sabrūk par ^{18}O , uz kura, savukārt, tiek satverta alfa daļiņa, radot ^{22}Ne . Tālāk notiek vēl viena alfa daļiņas satveršana, kuras rezultāts ir ^{25}Mg un brīvs neitrons, kas var iesaistīties s procesa reakcijās. Šī mehānisma darbībai nepieciešama augsta temperatūra (3×10^8 K), tāpēc tas noris dziļi starpslānī tikai termiskā pulsa laikā un būtisku ieguldījumu smago elementu sintēzē dod tikai tām zvaigznēm, kuru sākotnējā masa ir lielāka par aptuveni $4 M_{\odot}$. Otrs mehānisms, kas rada brīvos neitronus AMZ zvaigznēs, sākas ar protona satveršanu uz ^{12}C . Rezultējošais ^{13}N sabrūk par ^{13}C , kas, savukārt, satver alfa daļiņu, radot ^{16}O un brīvu neitronu. Šī mehānisma norisei nav nepieciešama tik augsta temperatūra, tāpēc periodā starp termiskajiem impulsiem kodolreakcijas notiek starpslāņa augšdaļā. Mehānisma pirmajai reakcijai nepieciešamie protoni šajā apgabalā ieplūst no zvaigznes ārējā apvalka. Trešās uzņemšanas laikā s procesa kodolsintēzes produkti no starpslāņa nonāk uz zvaigznes virsmas. Bez novērotās paaugstinātās smago elementu klātbūtnes AMZ zvaigznēs un to pēctečos s procesa kodolsintēzi AMZ zvaigznēs pierāda radioaktīvā elementa tehnēcija absorbcijas līnijas to spektros [2].

Aprakstītie AMZ zvaigžņu kodolsintēzes procesi ir būtiski Visuma ķīmiskās evolūcijas ziņā. Kodolsintēzes produkti AMZ stadijā nonāk uz zvaigznes virsmas, no kurienes ar zvaigznes vēja palīdzību (skatīt nākamos Punktus) aizplūst starpzvaigžņu vidē un bagātina tās ķīmisko sastāvu. Līdz ar to, nākamās zvaigžņu paaudzes satur arī tos ķīmiskos elementus, kas radušies AMZ zvaigznēs. Novērtēts, ka AMZ zvaigznes ir radījušas būtisku daudzumu no aptuveni puses no Visumā sastopamajiem smagajiem ķīmiskajiem elementiem. AMZ zvaigznes lielā daudzumā rada arī tādus astrofizikāli nozīmīgus elementus kā litijs, ogleklis un slāpekļis [5]. Zvaigznes vējš ne tikai nodrošina starpzvaigžņu vidi ar svaigiem kodolsintēzes produktiem, bet arī izsauc AMZ stadijas beigas.

1.1.2. Dinamiskie procesi atmosfērā

Visvieglāk novērojamais dinamiskais process AMZ zvaigznēs ir to pulsēšana, kas izpaužas kā zvaigznes spožuma izmaiņas ar apmēram no 100 līdz 1000 dienām garu periodu. Tādas īpatnības šo zvaigžņu spektros, kā spektrālīniju sašķelšanās un emisija, norāda uz sarežģītāku procesu klātbūtni to atmosfērās (skatīt, piemēram, publikāciju [6]). Detalizētu ieskatu vielas kustībās AMZ zvaigžņu atmosfērās dod dinamiskie atmosfēras modeļi un trīsdimensionālās starojuma un hidrodinamikas simulācijas. Piemērs rezultātiem, kādus dod šāda zvaigznes modelēšana, ir parādīts Attēlā 1.2.



Attēls 1.2: Trīsdimensionālās starojuma un hidrodinamikas simulācijas rezultāts AMZ zvaigznei dažādos laika momentos [7, 8]. Augšpusē attēlots gāzes blīvums un lejasdaļā redzama gāzes ātruma radiālā komponente zvaigznes šķēlumā caur tās centru. Pozitīvie ātrumi apzīmē kustību virzienā prom no zvaigznes centra. Pelēkie riņķi iezīmē vidējo zvaigznes rādiusu ($370 R_{\odot}$).

Simulācijās novērots, ka lielmēroga konvektīvās plūsmas, mijiedarbojoties ar zvaigznes pulsācijām, atmosfērā rada triecienviļņus, kas pārvietojas virzienā prom no zvaigznes. Rezultātā iekšpusē dažu zvaigznes rādiusu attāluma virs fotosfēras ir ievērojami palielināts gāzes blīvums, ko sauc par paplašināto atmosfēru. Šādos attālumos gāzes temperatūra var nokristies zem 1500 K, kā rezultātā sāk rasties tādi putekļu graudi, kuri ļoti efektīvi absorbē zvaigznes izstaroto tuvo infrasarkanā (IS) starojumu. Uz šiem putekļiem darbojas tik liels starojuma spiediens, ka tie spēj pārvarēt zvaigznes gravitācijas spēku. Putekļu sadursmes ar gāzes daļiņām izsauc apjomīgu vielas aizplūšanu no zvaigznei vāji gravitatīvi piesaistītajiem ārējiem atmosfēras slāņiem jeb zvaigznes vēju.

AMZ zvaigžņu dinamiskos procesus var novērot to augstas izšķirtspējas spektros. Spektrālīniju, kas atbilst dažādiem ierosmes potenciāliem², profili satur informāciju par vielas kustības ātrumiem dažādos augstumos zvaigznes atmosfērā un virs tās. Dinamisko procesu pētījumiem bieži izmanto CO molekulas svārstību-rotācijas spektrālīnijas tuvajā IS diapazonā. Pamatjoslas līnijas formējas tādā attālumā no zvaigznes, kurā vielas kustību nosaka zvaigznes vējš. Tām ir Gulbja P tipa profils (līnijas profils sastāv no absorbcijas, kas nobīdīta uz īso viļņu pusi, un emisijas, kas nobīdīta uz garo viļņu pusi), kas laika gaitā īpaši nemainās. Pirmā virstoņa spektrālīnijas rodas tur, kur notiek putekļu un zvaigznes vēja rašanās. Šajā gadījumā profili ir ļoti sarežģīti un mainīgi. Otrā virstoņa līnijas formējas dziļākos paplašinātās atmosfēras slāņos. Novērojama periodiska to profilu sašķelšanās, ko izsauc triecienviļņi, kas šķērso zonu, kur rodas šīs spektrālīnijas [8].

1.1.3. Apzvaigznes apvalks

Zvaigznes vēja rezultātā zvaigznes masa laika gaitā samazinās. Skaitliski to raksturo ar masas zaudēšanas ātrumu kas AMZ zvaigžņu gadījumā tipiski ir robežās no 10^{-7} līdz $10^{-5} M_{\odot}$ gadā. Visas AMZ stadijas laikā zvaigzne zaudē ievērojamu daļu savas masas. Piemēram, ja zvaigznes sākotnējā masa ir $4 M_{\odot}$, tad tā zaudēs apmēram 80% no tās. Savukārt, ja sākotnējā masa ir $1 M_{\odot}$, tad tiks zaudēta aptuveni ceturtdaļa no tās. Vēl viens būtisks parametrs, kas raksturo zvaigznes vēju, ir tā ātrums un tā tipiskās vērtības AMZ zvaigznēm ir no 5 līdz 15 km/s. Zvaigznes vējš rada zvaigzni aptverošu miglāju, kas no tās pastāvīgi attālinās. Šo AMZ objekta sastāvdaļu sauc par apzvaigznes apvalku (AA), un tipiski tas stiepjas aptuveni 10^{17} cm attālumā no zvaigznes.

Pamatā gāzes blīvums AA samazinās apgriezti kvadrātiski līdz ar attālumu no zvaigznes. Visbiežāk sastopamā molekula AA ir H_2 un CO molekula ir ar nākamo lielāko koncentrāciju. Tas, kādas vēl molekulas ir sastopamas, ir atkarīgs no AA ķīmiskā tipa. Līdzīgi kā ar AMZ zvaigznes atmosfēru un spektra klasi, tā arī AA var dominēt vai nu oglekli vai skābekli saturošas molekulas. Pēdējā gadījumā bieži sastopama ir arī H_2O molekula. Neskaitot dažādus izotopologus, AMZ zvaigžņu AA novērotas vairāk kā 90 dažādas molekulas. Dažādu molekulu blīvums ne vienmēr seko kopējam gāzes blīvumam, jo tās iesaistās dažādās ķīmiskās reakcijās un ar dažādu efektivitāti tiek fotodisociētas starpzvaigžņu ultravioletā starojuma ietekmē. Vistālāk no zvaigznes var atrasties H_2 molekulas, bet putekļu graudi - vēl tālāk. Putekļu graudi sastāda tikai aptuveni 1% no kopējās AA masas.

Tiem AMZ objektiem, kuriem masas zaudēšanas ātrums ir liels, visu centrālās zvaigznes emitēto starojumu spēcīgi absorbē AA putekļi. Šajos gadījumos viss novērojamais AMZ objekta starojums rodas no putekļiem, kas staro IS dia-

²Konkrētai spektrālīnijai atbilstošās pārejas apakšējā līmeņa enerģija.

pazonā. Lai gan lielam vairumam no AMZ zvaigznēm AA nav tik "biezi", ne vienmēr ir iespējams nošķirt to starojumu, kas nāk no AA, un to, kas no centrālās zvaigznes. AA tiek pētīti balstoties gan uz molekulu, gan putekļu spektra īpašībām. Visbiežāk tiek lietotas CO molekulas rotācijas pāreju emisijas līnijas radio diapazonā. AA, kuros dominē skābekļa molekulas, bieži izmanto arī OH molekulas 1612 MHz māzera emisiju. Putekļi ietekmē nepārtrauktā spektra formu un rada konkrētām putekļu daļiņām atbilstošas emisijas IS diapazonā. Parasti AA pētījumos tiek pieņemts, ka zvaigznes vējš ir izotropš. Vairumā gadījumu tas ir korekts pieņēmums, un AA forma ir ar aptuveni sfērisku simetriju, bet dažos AA ir novērotas būtiskas nobīdes no izotropijas, piemēram, lokveida struktūras un spirālžari.

Zvaigznes evolūcijas gaitā masas zaudēšanas ātrums palielinās, bet pašās AMZ stadijas beigās tas īpaši strauji paātrinās līdz pat $10^{-4} M_{\odot}$ gadā. Šī intensīvā vēja fāze, ko sauc par supervēju, ilgst dažus simtus vai tūkstošus gadus un "aizpūš prom" teju visu zvaigznes ārējo konvektīvo apvalku, iezīmējot PAMZ stadijas sākumu [8].

1.2. Pēcasimptomiskā milžu zara objekti

1.2.1. Zvaigznes evolūcija

Tā kā masas zaudēšanas ātrums AMZ stadijas beigās ir ļoti liels, tad tikko radušos PAMZ zvaigzni ieskauj necaurspīdīgs miglājs. Tāpēc par pāreju no AMZ uz PAMZ fāzi ir zināms ļoti maz. Zināms tas, ka, zvaigznei nonākot PAMZ stadijā, masas zaudēšanas ātrums samazinās par vairākām kārtām. Tā rezultātā "biezais" AA atdalās no zvaigznes. Līdz ar AA izplešanos, tā blīvums pakāpeniski samazinās un kļūst iespējams novērot PAMZ zvaigznes izstaroto redzamo gaismu. PAMZ zvaigžņu novērojumi liecina, ka tām ir lielākas virsmas temperatūras un aptuveni tādas pašas starjaudas, kādas tiek sasniegtas AMZ stadijas beigās (no apmēram 10^3 līdz dažiem $10^4 L_{\odot}$).

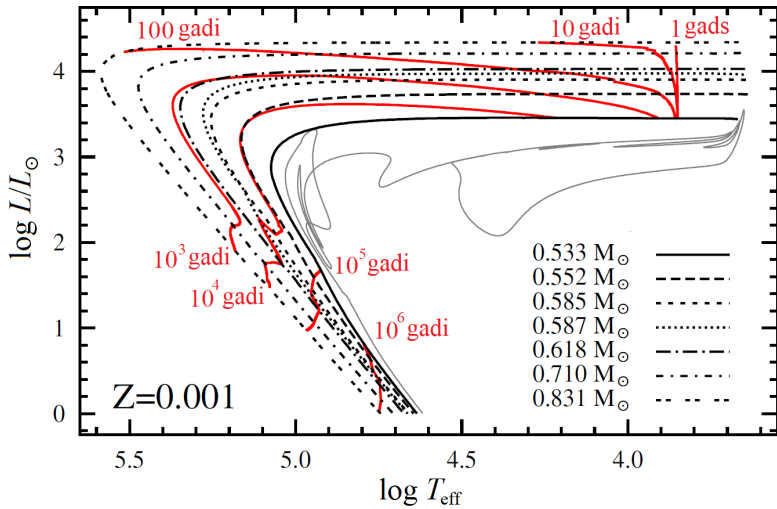
Īsti nav konkrēta, precīza brīža, kad sākas PAMZ stadija. Parasti par to pieņem momentu, kad AMZ zvaigznes ārējais konvektīvais apvalks ir nomests tiktāl, ka tā masa sastāda 1% no zvaigznes kopējas masas. Aptuveni pēc šī brīža pat neliela ārējā apvalka masas samazināšanās izsauc būtisku virsmas temperatūras palielināšanos un zvaigznes rādiusa samazināšanos. Līdz ar turpmāku ārēja apvalka masas samazināšanos, zvaigzne pārvietojas uz Hercšprunga-Rasela diagrammas augsto temperatūru pusi, īpaši nemainot starjaudu. Kad virsmas temperatūra sasniedz apmēram 25000 K, zvaigzne izstaro tik enerģētiskus fotonus, ka lielā apjomā tiek jonizēts atdalītais AA un rodas PM. Lai gan PM rašanās pašās zvaigznes evolūciju neietekmē, saka, ka ir sākusies nākamā, planetārā miglāja centrālās zvaigznes (PM CZ) evolūcijas stadija. Galu galā zvaigzne pārtop par balto punduri, kas laika gaitā atdziest un kļūst blāvāks.

Tas, cik ātri tiek zaudēta ārēja apvalka masa, nosaka PAMZ fāzes ilgumu. Ārējais apvalks zaudē masu gan kodolreakciju, kas notiek tā lejasdaļā, gan zvaigznes vēja iespaidā. Par zvaigznes vēju PAMZ stadijā teju nekas nav zināms, ja neskaita to, ka kādā brīdī sākas vējš, kuru izsauc zvaigznes starojuma absorbēšanās metālu spektrālīnijās [9]. Tomēr PAMZ zvaigznes vējš būtiski ietekmē tās evolūcijas ātrumu šīs stadijas sākumā jeb agrīnajā PAMZ fāzē, kurā, iespējams, vēl joprojām darbojas tādi paši vēji kā AMZ zvaigznēm. Arī moments, kad beidzas agrīnā PAMZ stadija, nav viennozīmīgi definēts. Tam lietoti dažādi kritēriji, kā piemēram, 50 dienu ilgs pulsāciju periods (skatīt Punktu 1.2.4) vai konkrētas efektīvās temperatūras³ vērtības ($\log T_{\text{eff}} = 3.85$, $\log T_{\text{eff}} = 4$). Pēc agrīnās PAMZ stadijas zvaigznes vējš evolūcijas ātrumu vairs neietekmē tik būtiski. Teorētiski PAMZ zvaigžņu evolūcijas modeļi liecina, ka zvaigznei ar sākotnējo masu $1 M_{\odot}$ un metāliskumu $Z = 0.001$ šī stadija (līdz tiek sasniegta 25000 K virsmas temperatūra) ilgst apmēram 60000 gadus. Savukārt, zvaigznei ar sākotnējo masu $3 M_{\odot}$ PAMZ stadija ir vien 800 gadus ilga. Pirmajā gadījumā PAMZ zvaigzne evolucionē ar aptuveni 5400 L_{\odot} lielu starjau, bet otrajā - ar 22000 L_{\odot} . Šādu un citas masas zvaigžņu evolūcijas treki parādīti Attēlā 1.3. Jo lielāka ir zvaigznes masa, jo PAMZ stadija ir īsāka un starjau da tās laikā ir lielāka [4]. Straujā PAMZ zvaigžņu evolūcija noved pie tā, ka šādas zvaigznes ir sastopamas reti. Toruņas galaktikas PAMZ un ar to saistīto zvaigžņu katalogā uzskaitītas vien 209 PAMZ, 87 iespējamās PAMZ un 184 ar PAMZ saistītas zvaigznes [10, 11].

Parasti pēc AMZ stadijas beigām termiskie pulsi vairs nenotiek un noris tikai H kodolreakcijas, bet, ja zvaigzne pamet AMZ fāzi neilgi pēc termiskā pulsa, tad var notikt tikai He degšana vai arī gan H, gan He degšana reizē. Ja zvaigzne pamet AMZ stadiju neilgi pirms termiskā pulsa, tad tas var notikt, kad zvaigzne jau ir PAMZ fāzē. Šajā gadījumā zvaigzne strauji atgriežas AMZ fāzē un pēc tam atkal, palielinot temperatūru, šķērso Hercšprunga-Rasela diagrammu. Var notikt vairāk kā viens šāds novēlots termiskais pulss, un zvaigzne to var piedzīvot pat esot baltā pundura stadijā [12].

Kaut arī PAMZ stadijā evolūcijas ātrums ir salīdzinoši liels, izsekot atsevišķas zvaigznes evolūcijai ir bijis iespējams tikai dažām PMZ vai arī zvaigznēm, kas piedzīvojušas novēlotu termisko pulsu [13—15]. Nesen pētījumā [16] publicēti pierādījumi atsevišķu salīdzinoši vēsu PAMZ zvaigžņu evolūcijai. Ilgtermiņa fotometrisks monitorings 12 PAMZ objektiem liecina, ka zvaigznei IRAS 07134+1005 (HD 56126) un, iespējams, arī zvaigznei IRAS 19500-1709 laika gaitā ir samazinājies pulsāciju periods. Tieši šādas izmaiņas ir sagaidāmas sekas PAMZ zvaigznes evolūcijai (skatīt Punktu 1.2.4). Novēroti arī daži netieši un apšaubāmi pierādījumi atsevišķu karstu PAMZ objektu evolūcijai (skatīt, piemēram, publikāciju [17]). Pētījumā [18] izteikts minējums par salīdzinoši vēsās PAMZ zvaigznes HD 161796 strauju virsmas temperatūras palielināšanos.

³Zvaigznes efektīvā (virsmas) temperatūra jeb T_{eff} ir paskaidrota Punktā 2.3.3.



Attēls 1.3: Dažādu sākotnējo masu PAMZ zvaigžņu un PMZ, kurās noris H degšana, kā arī balto punduru evolūcijas atspoguļojums Hercšprunga-Rasela diagrammā [4]. Norādītajām zvaigznes beigu masām, sākot no mazākās, atbilst sekojošās sākotnējās masas: 0.9, 1.0, 1.25, 1.75, 2.0, 2.5 un 3.0 M_{\odot} . Sarkanās līnijas apzīmē izohronas laikam, kopš agrīnās PAMZ stadijas beigām ($\log T_{\text{eff}} = 3.85$). Ar pelēko līniju attēlots sarežģītais evolūcijas treks zvaigznei ar sākotnējo masu 0.8 M_{\odot} , kas piedzīvo vairākus termiskos pulsus pēc (pirmās) AMZ stadijas.

1.2.2. Ķīmisko elementu koncentrācijas fotosfērā

PAMZ zvaigznes ir izcili piemērotas AMZ zvaigžņu kodolsintēzes procesu pētījumiem divu iemeslu dēļ. Pirmkārt, PAMZ zvaigžņu atmosfēras ir karstākas, kas noved pie tā, ka optiskajos spektros nav tik būtiskas molekulu ietekmes, kas citādi sarežģītu ķīmisko elementu koncentrāciju fotosfērā aprēķinus. Otrkārt, saskaņā ar teoriju, PAMZ zvaigžņu atmosfērās joprojām klātesošiem jābūt AMZ kodolsintēzes produktiem, kā piemēram, ogleklim un s procesa elementiem, kuri uz zvaigznes virsmas nonākuši trešās uznešanas ceļā. Novērojumi liecina par šādu elementu klātbūtni palielinātā daudzumā dažu, bet ne visu, PAMZ zvaigžņu atmosfērās. Tām zvaigznēm, kuras ir bagātinātas ar AMZ kodolsintēzes produktiem, vidējās s procesa elementu koncentrācijas⁴ fotosfērā ir aptuveni $[s/Fe] = 1.0 - 2.0$. Tik lielas relatīvās koncentrācijas noved pie tā, ka spektros ir ļoti daudz s procesa elementu absorbcijas līniju. Tomēr pat tām zvaigznēm, kuru atmosfēras ir raženi bagātinātas ar s procesa produktiem, šie ķīmiskie elementi ir ar mazu absolūto koncentrāciju un var būt sastopami pat retāk kā,

⁴Šajā darbā lietotās koncentrāciju skalas paskaidrotas Punktā 2.3.2.

piemēram, Saules atmosfērā (PAMZ zvaigznes ir metālnabadzīgas - galvenokārt, $[Fe/H] = -0.2 - -1.5$). Pamatā visām PAMZ zvaigznēm, kuru atmosfēras ir bagātinātas ar s procesa elementiem, novērojams arī palielināts oglekļa daudzums.

Turpretī teju visās to zvaigžņu atmosfērās, kuras nav bagātinātas ar s procesa elementiem, skābekļa kodolu ir skaitliski vairāk kā oglekļa kodolu. Novērots, ka šķietami trūkst tādu PAMZ objektu, kuriem atmosfēras ir mēreni bagātinātas ar AMZ stadijas kodolsintēzes produktiem - vai nu zvaigznes atmosfēra ir ļoti bagātināta vai nav bagātināta vispār. Šis novērojums ir pretrunā ar esošajiem AMZ zvaigžņu ķīmiskā sastāva evolūcijas modeļiem. Ilgu laiku tika domāts, ka izteikti dažādie ķīmiskie sastāvi ir saistīti dažādām zvaigžņu sākotnējām masām, kuras, savukārt, bija grūti novērtēt neprecīzi zināmo attālumu dēļ. Tomēr arī kosmiskās observatorijas "Gaia" astrometriskie mērījumi, kas ļauj noteikt precīzus attālumus un līdz ar to arī masas PAMZ zvaigznēm, nav atrisinājuši problēmu, un joprojām nav skaidrs, kas izsauc divējādo ķīmisko sastāvu [19].

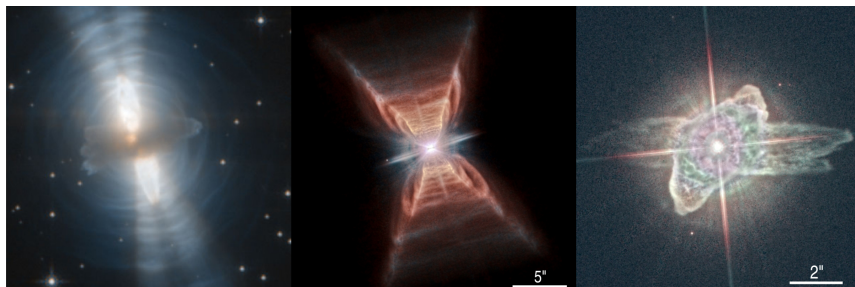
Daudzām PAMZ zvaigznēm novērota virsmas sastāva anomālija, ko dēvē par noplicinājumu. Tas izpaužas kā salīdzinoši zemākas koncentrācijas tiem ķīmiskajiem elementiem, kuriem ir liela putekļu kondensācijas temperatūra. Šī temperatūra nosacīti iezīmē robežu, pie kuras konkrētais elements sāk piesaistīties putekļu graudiem. Valda uzskats, ka noplicinātais koncentrāciju sadalījums pamatā rodas sekojošā procesā. Putekļu rašanās diskā, kas aptver zvaigzni (skatīt nākamo Punktu), izsauc ķīmisko elementu selektīvu piesaistīšanos pie tiem (piesaistās tie ķīmiskie elementi, kuriem ir augsta putekļu kondensācijas temperatūra). Zvaigznes starojuma spiediens "aizpūš" putekļu daļiņas prom no gāzes. Pēc tam notiek noplicinātās gāzes akrēcija, kā rezultātā mainās zvaigznes virsmas ķīmiskais sastāvs.

1.2.3. Apzvaigznes apvalka formas veidošanās

PAMZ zvaigznes aptverošie AA ir pietiekami lieli, ka, uzņemot zvaigznes attēlu, tos ir iespējams izšķirt, vismaz tuvāko objektu gadījumā. Tā kā no AA galu galā radīsies PM, tad PAMZ objektus mēdz dēvēt arī par protoplanetārajiem miglājiem (PPM). Tomēr ne visas PAMZ zvaigznes radīs PM. Ja zvaigznes evolūcija noris pārāk lēni, tad atdalītais AA līdz momentam, kad zvaigzne sasniedz nepieciešamo temperatūru, lai rastos PM, ir izpleties pārāk tālu no zvaigznes un, līdz ar to, izklīdis. Savukārt, ja zvaigznes evolūcija notiek pārāk strauji, tad tā priekš PM veidošanās nepieciešamo temperatūru sasniedz vēl tad, kad AA ir pārāk "biezs". Vietas jonizācija, kas notiek AA iekšpusē, nav novērojama no ārpusē, jo to aizklāj joprojām neaurspīdīgie AA ārējie slāņi.

Novērots, ka tikai aptuveni 20% no visiem PM ir ar sfērisku formu. Lielākā daļa no PM ir ar eliptisku vai bipolāru struktūru [20]. Tomēr vairums AMZ zvaigžņu AA, kas ir PM iedīgļi, ir sfēriski. Zināms, ka ievērojamās AA struktūras izmaiņas notiek tuvu pārejai starp AMZ un PAMZ stadijām, jo jau PPM ir novērojamas dažādas sarežģītas formas (Attēls 1.4). Lai arī PAMZ zvaigžņu

vēji ir slikti izprasti, tiek domāts, ka tie formē PPM struktūru, mijiedarbojoties ar AA AMZ stadijas vēja komponenti. Izskatītas vairākas konkrētas hipotēzes par to, kā veidojas nobīdes no sfēriskās simetrijas. Šādu formas maiņu, iespējams, izraisa vai nu zvaigznes rotācija, vai magnētisko lauku klātbūtne, vai arī gravitācijas mijiedarbības dubultzvaigžņu sistēmā [21]. Pēdējais minējums guvis vislielāko popularitāti, bet daudzos gadījumos nav izdevies pierādīt to, ka nesfēriska PPM centrā ir dubultzvaigžņu sistēma [22]. Pēdējā laikā pētījumos sāk apspriest to, kā zvaigznes un AA mijiedarbība ar potenciāli klātesošajām planētām varētu ietekmēt PPM un PM struktūru [23, 24]. Zvaigznei nonākot no AMZ stadijas PAMZ fāzē, izmaiņas notiek ne tikai AA formā, bet arī tā ķīmiskajā sastāvā. Ap PAMZ zvaigznēm novērotas sarežģītākas molekulas kā AMZ zvaigznes aptverošajos miglājos [25]. Salīdzinoši vienkāršie PAMZ optiskie spektri paver iespēju tajos viegli identificēt tās spektrālīnijas, kas radušās AA [26].



Attēls 1.4: Ar Habla kosmisko teleskopu iegūti trīs PPM attēli: Olas miglājs (pa kreisi) [27], Sarkanā Taisnstūra miglājs (vidū) un PAMZ objekts IRAS 19475+3119 (pa labi) [28]. Kreisā attēla izmērs ir $32'' \times 32''$. Tikai IRAS 19475+3119 gadījumā centrālo zvaigzni neaizklāj necaurspīdīgs putekļu apvalks, un tā ir redzama tiešos staros. Visi trīs PPM ir attēloti ar mākslīgām krāsām.

Ir konstatēta ķīmisko elementu koncentrāciju fotosfērā saistība ar PAMZ objektu starojuma enerģijas sadalījumu spektrā (ESS) un tajā novērojamo IS ekscesu (tā IS starojuma daļa, kas nerodas zvaigznes fotosfērā). Pēc IS ekscesa PAMZ zvaigžņu ESS var iedalīt divās galvenajās kategorijās. Vienu no tām, kuru sauc par čaulas tipa ESS, raksturo divi maksimumi - viens redzamās gaismas vai tuvajā IS, otrs tālāk IS diapazonā. Starojums redzamajā gaismā atbilst zvaigznes fotosfēras gaismai un IS starojumu rada putekļi, kas koncentrējušies atdālītajā AA. Otrā kategorijā, kurā divi atsevišķi maksimumi nav izšķirami, bet IS ekscess joprojām ir klātesošs, dēvē par diska tipa ESS. Šajā gadījumā putekļi koncentrējas diskveida struktūrā, kas rotē ap zvaigzni. Novērots, ka tām PAMZ zvaigznēm, kuru atmosfēras ir bagātinātas ar oglekli un s procesa elementiem, ir čaulas tipa ESS. Interesanti, ka mīklainā 21 mikrona emisija ir novērota teju tikai PAMZ objektiem ar šādu ķīmisko sastāvu un ESS tipu [29]. Čaulas tipa ESS

novērots arī tām PAMZ zvaigznēm, kuru atmosfēras nav bagātinātas ar AMZ kodolsintēzes produktiem. Tiem objektiem, kam ir diska tipa ESS, bieži konstatēts noplicinājums, piederība dubultzvaigžņu sistēmai vai abi [30]. Pētījumā [31] tika modelēts, kā gāzes akrēcija no zvaigzni ieskaujošā diska rada noplicinājumu. Teorētisko aprēķinu rezultātā iegūtie noplicinātie koncentrāciju sadalījumi labi sakrīt ar novērotajiem. Tika arī secināts, ka šādā mehānismā PAMZ zvaigznes evolūcijas ilgums var tik pagarināts līdz pat piecām reizēm.

1.2.4. Pulsāciju īpašības

Pulsācijas turpinās arī kādu laiku pēc tam, kad zvaigzne pametusi AMZ, bet tām ir mazāka amplitūda un periods. Pulsējošās PAMZ zvaigznes pamatā iedala Jaunavas W tipa, Vērša RV tipa vai pusregulārās maiņzvaigznēs. Tā kā konkrētās zvaigznes, kas aprakstītas Nodaļā 3, ir pusregulārās maiņzvaigznes, tad turpmāk tiks apspriestas tikai šāda veida pulsējošās PAMZ zvaigznes. Jaunavas W tipa un Vērša RV tipa maiņzvaigžņu raksturojumu var atrast, piemēram, pārskatā [32]. Ļoti daudz no tā, kas zināms par pusregulāro PAMZ zvaigžņu pulsāciju īpašībām, nāk no rakstu sērijas, kas sākās ar publikāciju [33]. Šie pētījumi balstās uz PPM fotometriskiem, kā arī radiālā ātruma⁵ novērojumiem ilgā laika periodā. Konstatēts, ka visie novērotie PPM, kuri atbilst spektra klasēm no agrīnās K līdz agrīnajai B, laika gaitā maina spožumu. Tomēr tikai tiem PPM, kuriem ir salīdzinoši vēsas centrālās zvaigznes ($T_{\text{eff}} \lesssim 9500$ K), ir izdevies noteikt pulsāciju periodu. Karstāku zvaigžņu gadījumā novērots, ka tās būtiski izmainīt savu spožumu spēj laikā no 35 dienām un līdz pat mazāk kā 10 dienām.

Zvaigznēm, kurām izdevies noteikt pulsāciju periodus, tie ir robežās no 30 līdz 160 dienām (primārie periodi). Maksimālā spožuma izmaiņa V fotometriskajā joslā šīm zvaigznēm ir robežās no aptuveni 0.1^m līdz 0.7^m . Spožuma maiņas līknes ir sarežģītas. Tajās novērojamas pazīmes vairākām vienlaicīgām pulsāciju modām ar mainīgiem periodiem un citu atmosfēras dinamisko procesu ietekmei. Primārā un sekundārā perioda ilgumi tipiski ir ļoti līdzīgi viens otram, kas noved pie tā, ka spožuma maiņas līknēs novērojami sitiēni. Novērotas arī spožuma izmaiņas ilgā laika periodā, kas saistītas ar izmaiņām uz skata līnijas esošo AA putekļu radītajā gaismas absorbcijā. Radiālā ātruma monitorings veikts tikai dažiem objektiem. Maksimālās izmaiņas, kas novērotas zvaigžņu fotosfēras ātrumā, nav lielākas par aptuveni 16 km/s. Izmaiņas zvaigžņu krāsas indeksā liecina par to, ka efektīvā temperatūra pulsāciju ietekmē mainās vairāku 100 K diapazonā. Spožuma un krāsas indeksa maiņas līknes ir vienā fāzē, bet radiālā ātruma maiņas līknes fāze atšķiras par 0.25 periodiem. No tā secināts, ka zvaigzne ir spožākajā un karstākajā pulsāciju fāzē, kad tā ir maksimāli saspiedusies, un pretēji. Novērota saistība starp pulsāciju periodu un zvaigznes virsmas temperatūru - vēsākas zvaigznes pulsē ar ilgāku periodu.

⁵Zvaigznes radiālais ātrums paskaidrots Punktā 2.2.3.

Pastāv perspektīva noteikt pusregulāro PAMZ zvaigžņu masas izmantojot teorētiskus pulsāciju modeļus, kas dotu iespēju pārbaudīt PAMZ zvaigžņu evolūcijas modeļu precizitāti. Esošie pulsāciju modeļi [34, 35] prognozē, piemēram, evolūcijas izraisītu pulsāciju perioda samazināšanos līdz ar virsmas temperatūras palielināšanos, bet nespēj paredzēt pareizus pulsāciju periodus. Faktiskie pulsāciju periodi ir garāki kā tie, kas iegūti modelēšanas ceļā.

1.2.5. Dinamisko procesu izpausmes optiskajos spektros

Pulsācijas viegli novērojamas PAMZ zvaigžņu spektros kā (pus) periodiskas izmaiņas absorbcijas līniju pozīcijās un intensitātēs. Tomēr spektrālīniju profili liecina arī par sarežģītākiem dinamiskajiem procesiem. Ne vienmēr ir skaidri zināms, kādi fizikāli mehānismi izraisa dažādus savdabīgos profilus. Reizēm ir grūti nošķirt atmosfēras un AA ieguldījumu spektrālīnijas formā. Šajā Punktā īsi aprakstīti dinamisko procesu indikatori, kas ir svarīgi šim darbam.

Ievērojamākais dinamisko procesu indikators PAMZ zvaigžņu spektros ir $H\alpha$ līnija. Šī spektrālīnija novērota ar dažnedažādām formām. Novēroti gan tādi profili, kas sastāv tikai no absorbcijas, gan tādi, kas tikai no emisijas. Novēroti arī Gulbja P tipa un apgrieztie Gulbja P tipa (emisijas un absorbcijas komponentes samainītas vietām), kā arī vēl sarežģītāki profili, piemēram, ar emisiju abās pusēs centrālajai absorbcijai. Šie profili arī laika gaitā var būtiski mainīt formu. Daudzu PAMZ un citu saistītu objektu $H\alpha$ līnijas prezentētas darbā [36]. Novērots, ka vairumā gadījumu PAMZ zvaigžņu $H\alpha$ profili ir ar Gulbja P tipa formu. Nākamais izplatītākais profils raksturojams ar absorbciju, kuru tās centrālajā apgabalā daļēji aizpilda emisijas komponente. Šādas formas spektrālīnijas ir interpretētas kā sekas pašreizējam vidēja ātruma (ap 50 km/s) PAMZ zvaigznes vējam, un tās novērojamas tikai zvaigznēm ar F un G spektra klasēm. Gulbja P tipa formas spektrālīnijas novērotas teju visu spektra klašu PAMZ zvaigznēm, bet visbiežāk tieši B klases objektiem. Arī šāda tipa $H\alpha$ līnijas interpretētas kā pazīme zvaigznes vējam, kas pašreiz pamet zvaigzni, bet ar lielāku ātrumu. Uz īso viļņu pusi nobīdītās absorbcijas liecina par ātrumiem robežās no simts līdz vairākiem simtiem km/s. Secināts, ka Gulbja P tipa $H\alpha$ līnijas novērojamas tām zvaigznēm, kuru tuvumā ir salīdzinoši silti putekļi. Šādi putekļi atrodas zvaigzni ieskaujošajā diskā un tipiski novēroti PAMZ zvaigznēm, kas atrodas dubultzvaigžņu sistēmās, kurās, savukārt, mēdz novērot prom no zvaigznes vērstas, kolimētas vielas plūsmas. Sistēmās, kas rada šādas plūsmas, novēro $H\alpha$ profila izmaiņas laikā, kas ir atkarīgas no orbitālās kustības fāzes. Lielu daļu no aprīņojuma perioda laikā $H\alpha$ profils ir Gulbja P tipa formu [37].

Pētījumā [38] prezentēts pusregulārās PAMZ mainīgzvaigznes HD 56126 spektroskopisks monitorings. Novērots, ka dažu dienu laikā zvaigznes $H\alpha$ līnijas profils būtiski mainās. Secināts, ka novērotās izmaiņas ir saistītas ar triecienviļņiem atmosfērās ārējos slāņos. Arī dažām citām PAMZ zvaigznēm spektros redzamas būtiskas izmaiņas laikā un, tai skaitā, intensīvu absorbcijas līniju, kas

veidojas pārejās ar zemu ierosmes potenciālu, sašķelšanās. Šis novērojums arī tiek saistīts ar triecienviļņu, ko izraisa zvaigznes pulsācijas, klātbūtni [39, 40]. Tomēr spektrālīniju sašķelšanās tikusi interpretēta arī kā sekas mainīgai gaismas absorbcijai AA [41, 42].

Optiskajos spektros molekulu spektrālīnijas pamatā novērotas ar oglekli bagātinātiem PAMZ objektiem. Visbiežāk tās redzamas kā šauras un uz īso viļņu pusi nobīdītas absorbcijas līnijas. Tiek uzskatīts, ka šīs spektrālīnijas rodas AA. Visbiežāk novērotas ir molekulu līnijas, kas pieder C_2 Svana, C_2 Filipsa un CN Sarkanās sistēmas pārejām [26]. Konstatēts, ka agrīnā PAMZ stadijas objektā IRAS 22272+5435 oglekli saturošo molekulu absorbcijas maina intensitāti līdz ar zvaigznes pulsāciju fāzi [43]. Tajos brīžos, kad zvaigzne ir visvēsākā, uz īso viļņu pusi nobīdītās molekulu absorbcijas līnijas ir ļoti intensīvas. Šāda uzvedība ir interpretēta kā sekas absorbcijai prom no zvaigznes vērsta, virs fotosfēras esošā, pulsāciju ierosinātā vēsas vielas plūsmā. Iespējams, nesen atklāts zvaigznes IRAS 22272+5435 molekulu līniju mainīguma analogs gadījumā, kad atmosfērā ir vairāk skābekļa kā oglekļa (zvaigzne Lapsiņas AU) [44]. Dažām PAMZ zvaigznēm novērotas molekulu emisijas līnijas. Pamatā tās saistītas ar C_2 molekulu un pastāv uzskats, ka šīs emisijas līnijas rodas AA. Salīdzinot dažādos pētījumos uzņemtus PAMZ zvaigžņu spektus, novērots, ka molekulu emisijas līnijas maina intensitāti, bet nav pilnīgi skaidrs, vai to izraisa reāli fizikāli efekti zvaigznē vai apzvaigznes vidē. Iespējams, mainīgums rodas dažādu tehnisku, ar novērojumiem saistītu, iemeslu dēļ [41].

Kopumā dinamiskie procesi PAMZ zvaigžņu atmosfērās un to tuvumā ir ļoti vāji izprasti. Viens no iemesliem ir tas, ka PAMZ objektiem nav veikta tāda detalizēta dinamisko procesu modelēšana kā AMZ zvaigznēm (Punkts 1.1.2). Visas zināšanas par šiem procesiem pamatā balstās uz novērojumu interpretāciju, kas mēdz būt apšaubāma. Vēl viens iemesls ir tādu pētījumu, kuros veikts spektroskopisks PAMZ zvaigžņu monitorings, trūkums⁶. Vairumā darbu, kuros izdarīti secinājumi par dinamiskajiem procesiem, izmantots tikai viens spektrs vai arī daži spektri, kas parasti uzņemti ik pēc vairākiem mēnešiem vai gadiem. Lai labāk izprastu procesus atmosfērās un virs tām, ir nepieciešams bieži un regulāri novērot spektus dažādām atsevišķām PAMZ zvaigznēm.

⁶Ja neskaita PAMZ dubultzvaigžņu pētījumus, kā piemēram, [37].

2. Izmantotie spektri un to analīzes metodika

2.1. Augstas izšķirtspējas spektri

2.1.1. Ešeltipa spektrogrāfi

Lai veiktu detalizētu zvaigznes spektra analīzi, piemēram, aprēķinātu ķīmisko elementu koncentrācijas zvaigznes fotosfērā, nepieciešama augsta spektra izšķirtspēja ($R = \lambda/\Delta\lambda \gtrsim 30000$). Šādus spektrus visbiežāk iegūst ar ešeltipa spektrogrāfiem, jo ar tiem iespējams vienlaikus reģistrēt zvaigznes gaismu plašā viļņu garumu diapazonā. To panāk spektrogrāfā lietojot vienlaicīgi divus optiskos elementus, kas spēj izvērst gaismu spektrā. Visvienkāršākajā gadījumā zvaigznes starojums no teleskopa caur spraugu vai optisko šķiedru nokļūst spektrogrāfā, kurā tas nonāk uz ešeltipa difrakcijas režģa. Šāds difrakcijas režģis ir optimizēts darbam augstās difrakcijas kārtās, kur tās pārklājas. Pēc tam, kad difrakcijas režģis starojumu sadala spektrā, tas, parasti ar prizmas palīdzību, tiek vēlreiz sadalīts spektrā, bet nu jau perpendikulārā virzienā. Šādā veidā iespējams telpiski nošķirt starojumu no dažādām difrakcijas kārtām - īsākajiem viļņu garumiem atbilstošās kārtas nonāk detektora vienā pusē, savukārt, garākajiem viļņu garumiem atbilstošās - otrā. Rezultātā zvaigznes sākotnējais spektrs ir attēla formā, un to ir nepieciešams reducēt jeb pārveidot par spektru ierastā formā (starojuma intensitāte atkarībā no viļņu garuma). Zvaigžņu spektri, kas aprakstīti nākamajā Punktā, ir iegūti ar ešeltipa spektrogrāfiem un daļai no tiem redukciju veikuši mani kolēģi. Otrai daļai redukcija veikta īsi pēc to uzņemšanas ar automatizētām redukcijas programmām.

2.1.2. Izmantotie spektri un spektrogrāfi

Šajā darbā veikta optiskā spektroskopija trīs agrīnā PAMZ zvaigznēm: HD 161796, IRAS 22272+5435 un IRAS Z02229+6208. Analizētie spektri uzņemti ar dažādiem spektrogrāfiem.

- VUES ir Molētu observatorijas 1.65 metru teleskopa spektrogrāfs [45], ar kuru uzņemti zvaigžņu HD 161796 un IRAS 22272+5435 spektri. Pirmās zvaigznes gadījumā spektri uzņemti 2017. gada 17. martā, 2021. gada 23. martā un 1. maijā. Spektru vidējā signāla pret trokšņa attiecība (S/T) ir aptuveni 55 tajos viļņu garumu diapazonos, kas tika izmantoti zvaigznes analīzei. Zvaigznei IRAS 22272+5435 spektri novēroti 23 dažādās naktīs laika posmā no 2015. gada oktobra līdz 2017. gada oktobrim. Īpašs uzsvars likts uz divos laika posmos uzņemto spektru analīzi. Pirmajam atbilst spektri, kas uzņemti 2015. gada 30. septembrī, kā arī 6., 7., 14. un 15. oktobrī. Otrajam laika posmam atbilstošie spektri uzņemti 2015. gada

7., 16. un 28. decembrī, kā arī 2016. gada 6. janvārī. Lai palielinātu S/T, tika summēti spektri, kas iegūti 5. un 6., kā arī 14. un 15. oktobrī. Rezultātā visiem septembra un oktobra spektriem S/T \gtrsim 150. Decembra un janvāra spektriem S/T \approx 100 un vēlāk uzņemtiem spektriem S/T ir vēl mazāka. Abām zvaigznēm spektri nepārtraukti pārklāj viļņu garumu intervālu no 4060 līdz 9096 Å un ir novēroti ar spektra izšķirtspēju R \approx 30000.

- MAESTRO ir Terescolas observatorijas 2 metru teleskopa spektrogrāfs [46], ar kuru arī novēroti zvaigžņu HD 161796 un IRAS 22272+5435 spektri. Pirmās zvaigznes gadījumā spektri uzņemti 2011. gada 14., 19., 21. un 22. novembrī, kā arī 2013. gada 7. un 8. martā. Tiem R \approx 31000 un vidēji S/T \approx 110, bet spektri arī tika summēti, kā rezultātā 19.-22. novembra spektram S/T \approx 195 un 7.-8. marta spektram S/T \approx 155. Zvaigznes IRAS 22272+5435 spektri novēroti 2010. gada 17., 20., 21., 22., 25., 27. un 28. septembrī, kā arī 2011. gada 14., 15., 18., 19., 20. un 21. novembrī. Katram spektram S/T \approx 100 apgabalā, kur atrodas Na D spektrālīnijas, un R \approx 45000. Abu zvaigžņu spektri pārklāj 4000 līdz 9700 Å lielu viļņu garumu diapazonu ar pārtraukumiem starp difrakcijas kārtām virs 6800 Å.
- ELODIE arhīvs [47] tika izmantots, lai iegūtu divus zvaigznes HD 161796 spektrus. ELODIE bija Haute-Provence observatorijas 1.9 metru teleskopa spektrogrāfs [48]. Lejupielādētie spektri novēroti 2003. gada 26. martā un 2004. gada 19. augustā ar attiecīgi S/T \approx 175 un 160. Spektri nepārtraukti pārklāj viļņu garumu diapazonu no 4000 līdz 6800 Å, un R \approx 35000.
- ESPaDONs ir 3.6 metru Kanādas-Francijas-Havaju teleskopa spektropolarimētrs [49]. Šis instruments ir avots diviem zvaigznes HD 161796 spektriem, kas novēroti 2005. gada 22. augustā un 2009. gada 16. septembrī, un zvaigznes IRAS 22272+5435 spektram, kas uzņemts 2015. gada 22. septembrī. Spektri tika lejupielādēti no teleskopa arhīva [50], un katrs no tiem sastāv no vairākām, dažādos polarizācijas virzienos uzņemtām ekspozīcijām. Salīdzinot šīs ekspozīcijas savā starpā, netika novērotas nekādas būtiskas atšķirības starp tām, tāpēc tika izmantoti katram datumam atbilstošie visu ekspozīciju summētie spektri. Vidēji S/T \approx 420, 685 un 410 attiecīgi 2005., 2009. un 2015. gada spektram. Spektri pārklāj viļņu garumu intervālu no 3690 līdz 10482 Å ar trīs pārtraukumiem pēc 9220 Å, un R \approx 55000.
- CARMENES ir Kalar Alto observatorijas 3.5 m teleskopa instruments, kas sastāv no diviem atsevišķiem spektrogrāfiem. Spektrogrāfi pārklāj divus viļņu garumu diapazonus no 5200 līdz 9600 Å (nepārtraukti) un no 9600 līdz 17100 Å (ar pārtraukumiem starp difrakcijas kārtām pēc 11600 Å) [51].

Šī darba ietvaros tika sagatavots un iesniegts⁷ novērojumu laika pieteikums ar mērķi novērot agrīnā PAMZ zvaigznes, izmantojot CARMENES. Rezultātā tika iegūti trīs šādu zvaigžņu, tai skaitā IRAS Z02229+6208, spektri 2022. gada 23. jūlijā, 21. augustā, 18. septembrī un 14. oktobrī. Zvaigznes IRAS Z02229+6208 spektrus īso viļņu garumu diapazonā raksturo $S/T \approx 50$ un $R \approx 80000$, savukārt, garo viļņu garumu diapazonā - $S/T \approx 100$ un $R \approx 95000$.

2.2. Spektru analīzes pamata procedūra

Visas skaitliskās darbības ar reducētajiem spektriem ir veiktas ar programmu DECH [52]. Šajā apakšnodaļā aprakstīta spektru analīzes pamata procedūra un, tai skaitā, spektrālīniju parametru mērījumi.

2.2.1. Spektra normēšana

Sākumā spektri tika normēti, izmantojot zvaigznes nepārtrauktā spektra līmeni. Šis līmenis novērtēts, spektros atlasot tādus punktus, kuri atrodas salīdzinoši tālu no absorbcijas vai emisijas līnijām, un veicot tiem splainu interpolāciju. Pēc tam zvaigznes spektrs izdalīts ar rezultējošo interpolācijas funkciju (Attēls 2.1). Normēšanas procedūra ir nedroša spektra apgabalos, kurus ietekmē intensīvas un platas spektrālīnijas, kā piemēram, $H\alpha$. Tāpat tā ir nedroša viļņu garumu diapazonos, kur vienviet ir ļoti daudz spektrālīniju. Šāda situācija atbilst darbā izmantoto zvaigžņu spektru īso viļņu daļai. Tas un zemā S/T , ir iemesls, kāpēc Nodaļā 3 prezentētajā zvaigžņu spektru analīzē netika izmantoti īso viļņu garumu diapazoni.

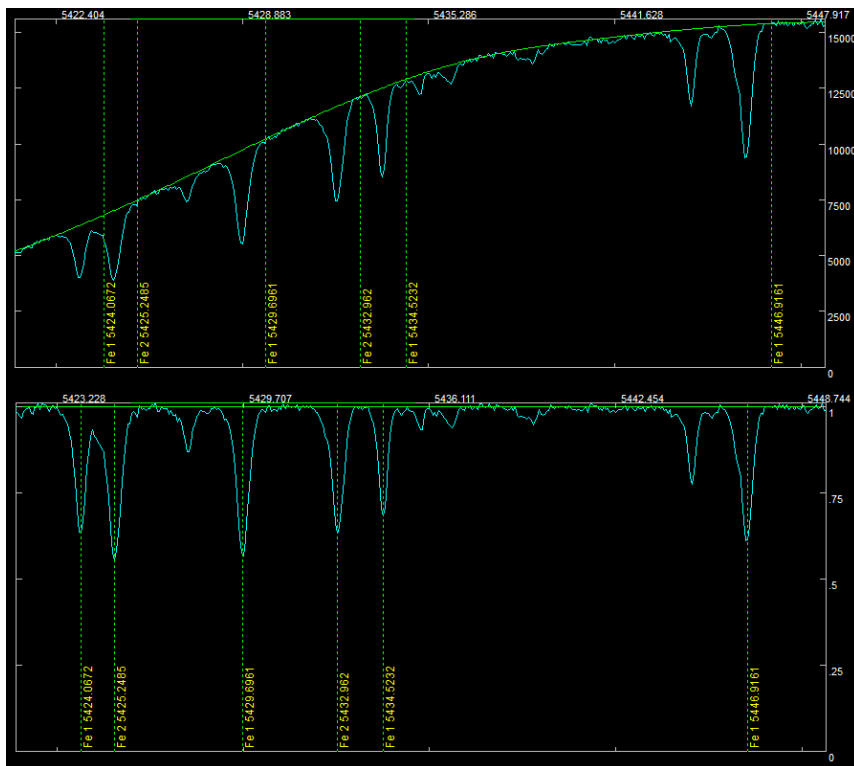
2.2.2. Spektrālīniju identifikācija

Šajā darbā apskatīto zvaigžņu spektros novērojamas daudzas absorbcijas līnijas, kas pamatā rodas zvaigznes fotosfērā. Ir nepieciešams identificēt spektrālīnijas, un to ir ērti izdarīt lietojot līniju sarakstu - sarakstu, kurā, kā minimums, norādīti laboratorijā izmērīti vai teorētiski aprēķināti spektrālīniju viļņu garumi un tiem atbilstošie atomi, joni vai molekulas. Šajā darbā izmantotajiem līniju sarakstiem ir vairāki avoti. Viens no tiem ir Vīnes atomu līniju datubāze (VALD, [53, 54]). Atomu un jonu līniju identifikācijai izmantota iespēja no VALD lejupielādēt tādu līniju sarakstu, kas atbilst sagaidāmi stiprākajām absorbcijas līnijām konkrētās zvaigznes spektrā. Šim mērķim datubāzē tiek norādīts zvaigznes brīvās krišanas pātrinājums uz tās virsmas, efektīvā temperatūra, mikroturbulences ātrums⁸ un ķīmisko elementu koncentrācijas fotosfērā. Molekulu līniju identifikācijā izmantoti gan no VALD lejupielādēti, gan kolēģu sagatavoti C_2 un CN

⁷<https://www.orp-h2020.eu/optical-telescope-transnational-access>

⁸Mikroturbulences ātrums paskaidrots Punktā 2.3.3.

molekulu līniju saraksti. C_2 Filipsa sistēmas līniju identifikācijai izmantoti arī darbā [55] publicētie viļņu garumi. Ne visas spektrālīnijas zvaigžņu spektros ir ar ārpuszemes izcelsmi. Daudzās O_2 un H_2O molekulu absorbcijas līnijas rodas Zemes atmosfērā (teluriskās līnijas). Tā kā šo līniju pozīcijas ir labi zināmas, tās nav grūti identificēt. Tomēr reizēm nepieciešams novērtēt to intensitāti, kas ir atkarīga no konkrētās zvaigznes novērojumu laika un vietas (piemēram, observatorijas augstuma virs jūras līmeņa), un tas šajā darbā darīts, izmantojot teluriskos spektros jeb tādu zvaigžņu spektros, kurām spektrā ir ļoti maz spektrālīniju.



Attēls 2.1: Programmā DECH attēlots zvaigznes HD 161796 spektrs viļņu garumu diapazonā no 5421 līdz 5449 Å pirms (augšā, analogciparu mērvienībās) un pēc normēšanas (apakšā). Spektrs uzņemts 2011. gada 19. novembrī un ir attēlots ar gaiši zilo līniju. Viļņu garumu skala redzama gan augšējā, gan apakšējā spektra virspusē. Novērtētais nepārtrauktā spektra līmenis attēlots ar zaļu krāsu. Parādītas arī dažu stiprāko spektrālīniju pozīcijas. Augšējam spektram viļņu garumu skala nav pārbīdīta, bet apakšējam tā ir pārbīdīta atbilstoši zvaigznes fotosfēras radiālajam ātrumam.

Spektrālīniju identifikācija ir saistīta ar zvaigznes radiālā ātruma novērtējumu. Ja zvaigznes kustībai attiecībā pret Zemi (observatoriju) ir radiāla ātruma komponente, tad zvaigznes spektrālīniju pozīcijas nobīdās Doplera efekta ietekmē. Pirms uzsāk spektrālīniju identifikāciju, zvaigznes spektra viļņu garumu skala jāpārbīda par konkrētajā laika momentā zvaigznei atbilstošu radiālā ātruma vērtību. Nākamajā Punktā paskaidrots, kā precīzi novērtēts pārbīdei nepieciešamais ātrums, bet aptuveni sākotnējai pārbīdei lietotas intensīvas, viegli atpazīstamas spektrālīnijas, kā piemēram, H α , Na D vai Ca II IS tripleta līnijas, un to labi zināmie viļņu garumi.

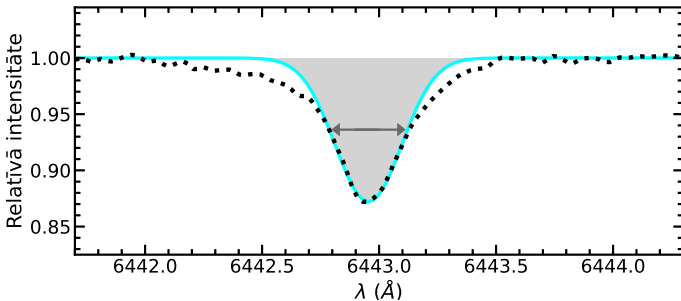
2.2.3. Radiālais ātrums un citi spektrālīniju parametri

Pamatā radiālie ātrumi tika mērīti, izmantojot sekojošu metodi. Sākmā novērtēta identificētas spektrālīnijas precīza pozīcija (viļņu garums) zvaigznes spektrā, veicot tās profila un tā spoguļattēla šķērskorelāciju. Pēc tam, izmantojot starpību starp zvaigznes spektrā izmēritajām un līniju sarakstā uzrādītajām līniju pozīcijām, tiek aprēķināts no Doplera efekta izrietošais, konkrētajai spektrālīnijai atbilstošais radiālais ātrums. Zvaigznes (fotosfēras) radiālo ātrumu iegūst, nosakot radiālos ātrumus lielam skaitam mazas un vidējas intensitātes fotosfēras absorbcijas līniju un aprēķinot vidējo vērtību. No individuālo mērījumu standartnovirzes novērtēta gadījuma kļūda, un secināts, ka tā lielāka par aptuveni 0.3 km/s nav neviena spektra gadījumā. Izmantojot telurisko līniju pozīcijas, noteikts, ka radiālā ātruma sistemātiskā kļūda nav lielāka par 0.3 km/s. Izņēmums ir MAESTRO spektri, kuriem radiālā ātruma sistemātiskā kļūda novērtēta kā ne lielāka kā 1 km/s. Tādām spektrālīnijām, kuru profilus ietekmē citas līnijas (vai kuras ir emisijā), radiālais ātrums noteikts arī, izmantojot profila intensitātēs minimuma (vai maksimuma) pozīciju.

Zemes rotācijas un orbitālās kustības iespaidā spektrā izmērāmā radiālā ātruma vērtība ir atkarīga no novērojumu vietas un laika. Izmantojot spektra novērošanas laiku, kā arī observatorijas un zvaigznes koordinātas, aprēķināta zvaigznes radiālā ātruma korekcija - heliocentriskais ātrums jeb radiālais ātrums attiecībā pret Sauli. Vēl viena radiālā ātruma korekcija, kas lietota šajā darbā, ir pārbīde par sistēmisko ātrumu. Tā kā konkrētās apskatītās zvaigznes ir pulsējošas mainīgzvaigznes, tad to fotosfēras radiālais ātrums (pus) periodiski mainās. Tomēr zvaigznes masas centra jeb sistēmiskais ātrums nemainās. Izmantojot sistēmiskā ātruma vērtību, ir ērti noteikt, vai, piemēram, kādā laika momentā zvaigznes fotosfēra saraujas vai izplešas, vai arī viela plūst prom no zvaigznes vai arī krīt tai virsū. Zvaigznes IRAS 22272+5435 gadījumā izmantotā sistēmiskā ātruma vērtība -40.8 km/s balstās uz vidējo fotosfēras radiālā ātruma vērtību, kas iegūta, veicot tās monitoringu daudzu gadu garumā [56]. Zvaigznei HD 161796 lietotā vērtība -54.1 km/s balstās uz CO molekulas radio diapazona emisijas līniju analīzi [57]. Uz līdzīgu analīzi balstās arī zvaigznei IRAS Z02229+6208 izmantotā vērtība +20.1 km/s [58, 59]. Spektrālīniju attēlošana radiālā ātruma skalā attie-

cībā pret zvaigznes fotosfēru vai Sauli (heliocentriskā radiālā ātruma skalā) ļauj uzskatāmi redzēt, ar kādiem ātrumiem kustās viela, kurā formējas spektrālīnijas vai to komponentes.

Spektrālīniju intensitātes tiek raksturotas ar ekvivalento platumu (EP) - laukumu, ko absorbcijas līnijas profils normētā spektrā iezīmē zem nepārtrauktā spektra līmeņa. Šajā darbā EP mērīti, interaktīvi aprakstot visu līnijas profilu vai arī tā centrālo, simetrisko daļu ar Gausa funkciju. Līniju profili aprakstīti tikai daļēji zvaigznes HD 161796 gadījumā. Iemesls šādai pieejai saistās ar konstatētajām īpatnējām spektrālīniju izmaiņām laikā (Punkts 3.1.5). Līnijas platums pie puses no tās maksimālā dziļuma (vai augstuma emisijas līnijas gadījumā), turpmāk saukts par pusaugstuma platumu, tiek izmantots, lai raksturotu, cik platas ir spektros novērojamās spektrālīnijas. Gan pusaugstuma platumus, gan EP ir ilustrēti Attēlā 2.2.



Attēls 2.2: Fe II 6422.96 Å absorbcijas līnija zvaigznes HD 161796 spektrā, kas uzņemts 2005. gada 8. augustā. Novērotais līnijas profils ir attēlots ar melnu punktētu līniju un izvēlētais, tā centrālajai daļai vislabāk atbilstošais Gausa profils parādīts ar gaiši zilu līniju. Viļņu garumu skala ir pārbīdīta atbilstoši zvaigznes fotosfēras radiālajam ātrumam. Pelēki iekrāsotais laukums ilustrē EP, kura lielums ir 45.5 mÅ. Tumši pelēkā abpusējā bulta ir pusaugstuma platums, kura lielums ir 0.43 Å jeb 15.4 km/s, ja līniju attēlo radiālā ātruma skalā.

2.3. Spektu analīze izmantojot atmosfēras modeļus

2.3.1. Atmosfēras modeļi

No zvaigznes nākošo starojumu visbiežāk modelē, pieņemot, ka zvaigznes atmosfēra, vai, konkrētāk, fotosfēra sastāv no vairākiem atsevišķiem slāņiem. Atmosfēras modelis raksturo dažādus fizikālos parametrus katrā fotosfēras slānī (Attēls 2.3). Kaut arī katrs slānis atbilst dažādām temperatūrām, atmosfēras modeli raksturo ar vienu temperatūru - efektīvo temperatūru. Vēl divi būtiskākie parametri, ar ko raksturo atmosfēras modeli, ir brīvās krišanas paātrinājums uz

zvaigznes virsmas un zvaigznes metālistikums. Atmosfēras modeļi (un zvaigžņu teorētiskie spektri) tipiski tiek aprēķināti veicot vairākus tuvinājumus. Viens no tiem ir pieņēmums par lokālo termodinamisko līdzsvaru (LTL), kurā visus fizikālos procesus viena fotosfēras slāņa ietvaros apraksta ar vienu un to pašu temperatūru. Hidrostatiskais līdzsvars ir vēl viens pieņēmums, ko svarīgi pieminēt šī darba sakarā.

Zvaigznes HD 161 796 spektru analīzei lietoti ar ATLAS kodu [60] aprēķināti atmosfēras modeļi un zvaigznes IRAS 22272+5435 gadījumā izmantots tāds modelis, kas aprēķināts ar kodu SAM12 [61]. Atmosfēras modeļi tiek publicēti nevis visām iespējamām modeļa parametru vērtībām, bet gan ar kādu konkrētu soli. Piemēram, ar efektīvās temperatūras soli 250 K - 7000, 7250, 7500 K u.t.t. Lai iegūtu atmosfēras modeļi ar temperatūru, piemēram, 7100 K, jāveic modeļu interpolācija. Tas darīts, izmantojot kodu iSpec [62].

6.15910317E-03	3587.8	1.942E-02	2.536E+06	5.134E-05	8.589E-03	2.00E+05
8.07911303E-03	3631.4	2.548E-02	3.549E+06	5.491E-05	7.809E-03	2.00E+05
1.05681276E-02	3640.8	3.333E-02	4.394E+06	5.351E-05	7.116E-03	2.00E+05
1.39018683E-02	3661.3	4.385E-02	5.660E+06	5.358E-05	6.975E-03	2.00E+05
1.83012866E-02	3681.9	5.773E-02	7.303E+06	5.374E-05	6.696E-03	2.00E+05
2.40949145E-02	3703.4	7.601E-02	9.447E+06	5.403E-05	6.426E-03	2.00E+05
3.17066975E-02	3725.5	1.000E-01	1.224E+07	5.445E-05	6.166E-03	2.00E+05
4.16859453E-02	3748.0	1.315E-01	1.585E+07	5.496E-05	5.924E-03	2.00E+05

Attēls 2.3: Šajā darbā izmantotā SAM12 atmosfēras modeļa struktūra. No kopumā 71 parādīti tikai 8 modeļa slāņi. Augšējā rinda atbilst pašam ārējam slānim. Kolonnas, sākot no kreisās puses, raksturo dziļumu zvaigznē, temperatūru, gāzes spiedienu, elektronu spiedienu, absorbcijas koeficientu, starojuma spiedienu un mikroturbulences ātrumu.

2.3.2. Programma SPECTRUM un koncentrācijas

Šajā darbā izmantota programma SPECTRUM, kas risina starojuma pārneses vienādojumu atmosfēras modelī un aprēķina zvaigznes teorētisko (sintētisko) spektru [63]. Programmas spēkos ir aprēķināt sintētiskos spektrus zvaigznēm, kas atbilst spektra klasēm no M līdz B. Tas iekļauj absorbcijas līniju aprēķinu visiem 92 dabā sastopamajiem ķīmiskajiem elementiem vairākās jonizācijas pakāpēs, dažādiem izotopiem, kā arī 15 divatomu molekulām. Sintētiskā spektra aprēķinam, kas ir veikts zvaigznes IRAS 22272+5435 gadījumā, nepieciešams norādīt atmosfēras modeļi, ķīmisko elementu koncentrācijas fotosfērā, mikroturbulences ātrumu, viļņu garumu diapazonu, kurā vēlamas aprēķināt spektru un šajā diapazonā esošo spektrālīniju atomu datus - atoms vai jons, kas rada konkrēto spektrālīniju, līnijas viļņu garumus, pārejas augšējā un apakšējā līmeņa enerģijas un oscilatora stiprums. Atomu datu avots ir VALD.

Programmas SPECTRUM papildu programma ABUNDANCE izmantota, lai aprēķinātu ķīmisko elementu koncentrācijas zvaigznes HD 161796 fotosfērā. Aprēķinam nepieciešams norādīt to pašu, ko sintētiskā spektra aprēķina

gadījumā, izņemot to, ka nav nepieciešams norādīt koncentrācijas un viļņu garumu diapazonu, kā arī atomi dati un EP jānorāda tikai tām līnijām, kurām ir veikti EP mērījumi. ABUNDANCE aprēķinu rezultāts ir katrai spektrālīnijai atbilstošā ķīmiskā elementa (kopējā atomu un visu jonu) logaritmiskā koncentrācija, kas izteikta absolūtā skalā (kur kopējā H atomu un to kodolu - protonu - koncentrācija vienāda ar 12)

$$\log \varepsilon(X) = \log (n_X/n_H) + 12 \quad (2.1)$$

un arī relatīvā skalā (attiecībā pret koncentrācijām Saules fotosfērā)

$$[X/H] = \log \varepsilon(X) - \log \varepsilon(X)_\odot, \quad (2.2)$$

kur $\log \varepsilon(X)$ ir konkrētam atomam vai jonam X atbilstošā ķīmiskā elementa logaritmiskā koncentrācija, $\log \varepsilon(X)_\odot$ ir attiecīgā vērtība Saulē, n_X ir X atbilstošā ķīmiskā elementa koncentrācija (daļiņas uz tilpuma vienību) un n_H ir kopējā H atomu un to kodolu koncentrācija. No atsevišķām spektrālīnijām iegūtām koncentrācijām katra atoma vai jona gadījumā aprēķināta vidējā vērtība un standartnovirze. Koncentrācijas kļūda Δ aprēķināta, ņemot vērā gan vērtību izkliedi, gan fotosfēras parametru kļūdas (skatīt nākamo Punktu)

$$\Delta = \sqrt{(\sigma/\sqrt{N})^2 + (\Delta_{T_{\text{eff}}})^2 + (\Delta_{\log g})^2 + (\Delta_{V_{\text{mikro}}})^2}, \quad (2.3)$$

kur σ ir standartnovirze un N ir skaits līnijām, kas izmantotas, lai aprēķinātu ķīmiskā elementa koncentrāciju attiecīgā atoma vai jona gadījumā. Lielumi $\Delta_{T_{\text{eff}}}$, $\Delta_{\log g}$ un $\Delta_{V_{\text{mikro}}}$ atbilst izmaiņām koncentrācijās, ko izsauc fotosfēras parametru izmaiņa tiem noteikto kļūdu ietvaros.

2.3.3. *Fotosfēras parametru noteikšana*

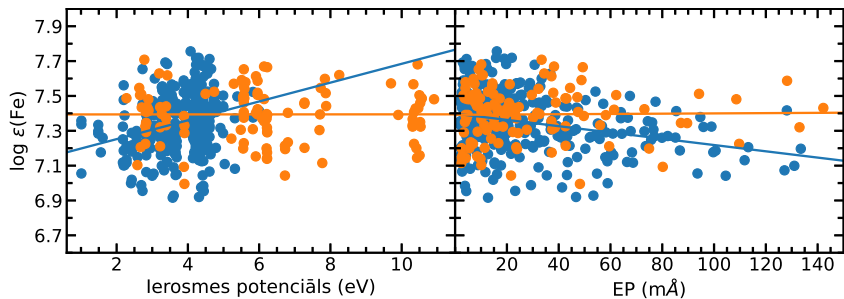
No atsevišķām absorbcijas līnijām iegūtās koncentrācijas izmantotas, lai noteiktu zvaigznes HD 161796 fotosfēras parametrus - efektīvo temperatūru, brīvās krišanas paātrinājumu uz virsmas un mikroturbulences ātrumu. Zvaigznes efektīvā temperatūra ir tās virsmas temperatūra, ko definē kā tāda absolūti melna ķermeņa temperatūra, kam ir tik pat liela enerģētiskā spīdība (integrālā emisijas spēja; W/m^2) kā konkrētajai zvaigznei. Brīvās krišanas paātrinājums uz zvaigznes virsmas⁹ nosaka spiedienu zvaigznes atmosfērā. Mikroturbulences ātrums (V_{mikro}) ir parametrs, ar ko tiek raksturota vielas kustība atmosfēras modeļa slāņa ietvaros, kas nav saistīta ar termisko kustību.

Standarta metode fotosfēras parametru noteikšanai visbiežāk balstās uz dzelzs atoma (Fe I) un vienkārt jonizētas dzelzs (Fe II) absorbcijas līnijām un ir sekojoša. Efektīvo temperatūru nosaka, veicot koncentrāciju aprēķinus ar dažā-

⁹To parasti uzdod kā decimālogaritmu no brīvās krišanas paātrinājuma uz zvaigznes virsmas, kas izteikts cgs sistēmā ($\log g$).

du temperatūru atmosfēras modeļiem. Ar zvaigznes efektīvo temperatūru sakrīt tā atmosfēras modeļa temperatūra, kurš dod rezultātu, ka no Fe I līnijām iegūtās koncentrācijas nav atkarīgas no attiecīgo pāreju ierosmes potenciāla. Parasti tas tiek pārbaudīts, koncentrācijas un ierosmes potenciālus attēlojot grafiski un izmantojot attiecīgo lineārās tendences līkni un tās virziena koeficientu (Attēls 2.4). Brīvās krišanas paātrinājumu uz zvaigznes virsmas nosaka, veicot koncentrāciju aprēķinus ar dažādām $\log g$ vērtībām atbilstošiem atmosfēras modeļiem. Tas modelis, kurš noved pie no Fe I un Fe II līnijām iegūto koncentrāciju sakritības, raksturo reālo $\log g$ vērtību zvaigznē. Mikroturbulences ātrumu nosaka, veicot koncentrāciju aprēķinus ar dažādām V_{mikro} vērtībām. Ja no Fe I līnijām iegūtās koncentrācijas nav atkarīgas no attiecīgo līniju EP, tad ir atrasta zvaigznes fotosfērai atbilstošā V_{mikro} vērtība.

Tomēr secināts, ka aprakstīto metodi tiešā veidā zvaigznei HD 161796 pielietot nevar, jo tās gadījumā slikti izpildās LTL tuvinājums, kā rezultātā no Fe I līnijām noteiktās koncentrācijas ir nekorektas. Tāpēc lietota darbā [64] piedāvātā pieeja, kas no standarta metodes atšķiras ar to, ka efektīvā temperatūra un mikroturbulences ātrums noteikti, izmantojot Fe II līnijas, un par no Fe I līnijām iegūto dzelzs koncentrāciju pieņemta nevis vidējā vērtība, bet gan ekstrapolētā vērtība, kas atbilst $EP = 0$ (skatīt Attēlu 2.4). Efektīvās temperatūras un mikroturbulences ātruma kļūdas noteiktas, izmantojot attiecīgo virziena koeficientu kļūdas. Savukārt, kļūda $\log g$ vērtībai noteikta novērtējot, kāda šī lieluma izmaiņa nepieciešama, lai rastos konkrēta atšķirība no Fe I un no Fe II līnijām aprēķinātajās koncentrācijās ($|\log \varepsilon(\text{Fe I}) - \log \varepsilon(\text{Fe II})| = 0.1$).



Attēls 2.4: Dzelzs koncentrācijas, kas noteiktas no Fe I (zilie apļi) un Fe II (oranžie apļi) absorbcijas līnijām, kā funkcija no ierosmes potenciāla un EP. Parādītas arī lineārās tendences līknes. Koncentrācijas aprēķinātas, izmantojot zvaigznes HD 161796 spektru, kas uzņemts 2009. gada 16. februārī, un atmosfēras modeļi, kam $T_{\text{eff}} = 7230$ K un $\log g = 0.53$, kā arī izvēloties V_{mikro} vērtību 4.0 km/s.

3. Rezultāti un diskusija

3.1. HD 161796: daudzepohu spektroskopija

3.1.1. Būtiskākie zvaigznes iepriekšējo pētījumu rezultāti

Pirmie mēģinājumi noteikt HD 161796 - spožas ($V \approx 7^m$) PAMZ zvaigznes - virsmas temperatūru ar fotometriskām metodēm bija problemātiski. Tika secināts, ka aptuveni 6400 K iegūtā vērtība [65, 66] ir būtiski mazāka, kādai tai vajadzētu būt, balstoties uz zvaigznes F3Ib spektra klasi [66, 67]. Nesenāki zvaigznes HD 161796 pētījumi, kuros analizēti tās attēli un veikta ESS modelēšana, liecina, ka virsmas temperatūra ir lielāka - 7250-7500 K [68, 69]. Šī vērtība ir diezgan tuva vairāku augstas izšķirtspējas spektra analīžu rezultātos iegūtajai aptuveni 7150 K lielajai efektīvajai temperatūrai [18, 70—72]. Tomēr agrākais augstas izšķirtspējas spektrs liecina par temperatūru 6600 K [73]. Kad pēdējoreiz tika noteikta zvaigznes spektra klase, tika iegūts karstākai zvaigznei atbilstošs rezultāts - A7I [74]. Viss augstāk minētais liek domāt, ka zvaigzne, iespējams, strauji evolucionē. HD 161796 evolūcijas ātrums varbūt pat ir ne mazāks kā 50 K gadā [18]. Tik ātra evolūcija liecina, ka zvaigzne pieder masīvajiem PAMZ objektiem. Salīdzinot zvaigznes T_{eff} un $\log g$ vērtības ar evolūcijas modeļu aprēķiniem, pētījumā [75] secināts, ka tās sākotnējā masa ir 3 M_{\odot} vai arī lielāka. Izmantojot tādu pašu pieeju un arī dažu spektrālīniju īpašības, pētījumā [70] tika novērtēts, ka sākotnējā masa ir 5-7 M_{\odot} . Pētījumā [68], kurā analizēti HD 161796 attēli un veikta ESS modelēšana, noteikts, ka sākotnēja masa ir 1-2 M_{\odot} . Zvaigznes masas noskaidrošanai varētu palīdzēt evolūcijas ātruma precizēšana un tā salīdzināšana ar evolūcijas modeļu aprēķiniem.

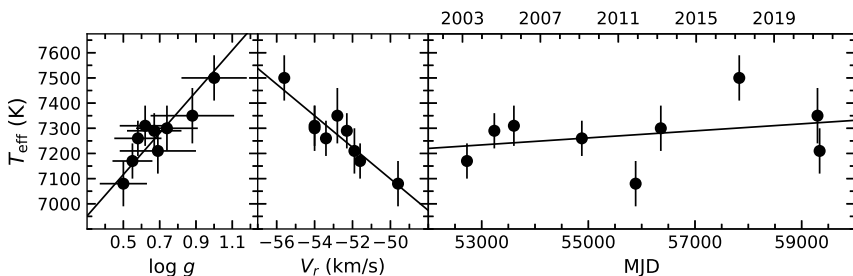
Tomēr zvaigznes evolūcijas ātrums varētu arī būt neliels un temperatūras izmaiņas laikā, iespējams, saistītas ar pulsācijām. HD 161796 fotometrisks monitoringa ilgā laika posmā liecina par 45 dienas ilgu primāro pulsāciju periodu. Izmaiņas krāsas indeksā norāda uz 700 K lielām izmaiņām virsmas temperatūrā zvaigznei pulsējot. HD 161796 ir viena tām PPM centrālajām zvaigznēm, kurām konstatēta 0.25 periodu nobīde fāzē starp krāsas indeksa un radiālā ātruma maiņas līknēm. Tajā pašā laikā zvaigznes spožums un krāsas indekss mainās vienā fāzē. Tas liecina par to, ka HD 161796 ir karstāka un spožāka, kad pulsāciju ietekmē ir saspīdusies un pretēji [76, 77]. Iespējams, ka novērotās izmaiņas $H\alpha$, tuvā IS Ca II tripleta, Na D un citās līnijās, kurām ir zems ierosmes potenciāls, ir saistītas ar zvaigznes pulsācijām [40, 78]. Balstoties gan uz HD 161796 pulsāciju periodu, gan virsmas temperatūru, var uzskatīt, ka zvaigzne savā evolūcijā tikko ir šķērsojusi vai teju šķērsos agrīnās PAMZ stadijas beigu robežu.

Tabula 3.1: Zvaigznes HD 161796 fotosfēras parametri, dzelzs koncentrācijas un heliocentriskie radiālie ātrumi, kas noteikti, izmantojot dažādās epohās uzņemtus spektrus

Datums	T_{eff} (K)	$\log g$	V_{mikro} (km/s)	$\log \varepsilon(\text{Fe})$	V_r (km/s)
23/3/2003	7170±70	0.55±0.11	4.5±0.5	7.44±0.08	-51.6
19/8/2004	7290±70	0.67±0.15	4.6±0.6	7.47±0.09	-52.3
22/8/2005	7310±80	0.62±0.14	4.5±0.8	7.38±0.10	-54.0
16/2/2009	7260±70	0.58±0.13	4.3±0.5	7.43±0.08	-53.4
19-22/11/2011	7080±90	0.50±0.13	5.3±0.9	7.30±0.09	-49.6
7-8/3/2013	7300±90	0.74±0.17	4.8±0.8	7.50±0.09	-54.1
17/3/2017	7500±90	1.00±0.18	5.5±1.2	7.50±0.10	-55.6
23/3/2021	7350±110	0.88±0.23	4.9±0.9	7.46±0.11	-52.8
1/5/2021	7210±90	0.69±0.21	4.6±0.8	7.45±0.10	-51.9

3.1.2. Evolūcijas ātrums un starjauca

Lai novērtētu HD 16176 evolūcijas ātrumu, tika analizēti šīs zvaigznes spektri, kas uzņemti 18 gadu ilgā laika periodā. Spektra analīze veikta homogēnā ceļā - EP visos spektros mērīti vienām un tām pašām dzelzs līnijām, kā arī izmantota viena un tā pati pieeja gan EP mērījumu veikšanai, gan fotosfēras parametru noteikšanai. Katrā spektrā tika nomērīti 127 Fe I un 47 Fe II līniju EP viļņu garumu diapazonā no 4007 līdz 6678 Å. Izņēmums ir VUES spektri, kuriem tika nomērītas par aptuveni 20 līnijām mazāk zemās S/T dēļ. Rezultātā iegūtie fotosfēras parametri, to kļūdas, kā arī radiālie ātrumi (V_r), kas mērīti, izmantojot ne tikai dzelzs, bet arī citas līnijas, parādīti Attēlā 3.1. Bez šiem lielumiem Tabulā 3.1 dotas arī aprēķinātās dzelzs koncentrācijas, to kļūdas un spektru uzņemšanas datumi. Zvaigznes evolūcijas ātrums ir neliels - formāli, 5 ± 6 K gadā. Šī vērtība kombinācijā ar vidējo efektīvo temperatūru (7275 K) un brīvās krišanas paātrinājumu ($\log g = 0.7$) salīdzināta ar darbā [4] publicētajiem evolūcijas trekiem. Noteiktie HD 161796 parametri labi atbilst zvaigznei, kurai ir Saulei līdzīgs metāliskums ($Z = 0.01, 0.02$) un aptuveni $2 M_{\odot}$ vai mazliet lielāka sākotnējā masa. Šāda zvaigzne atbilst aptuveni $8000 L_{\odot}$ lielai starjaucai. Pētījumos, kuros modelēts zvaigznes ESS [68, 69], iegūtas aptuveni 2.5 reizes mazākas starjaukas vērtības. Taču tie balstās uz nepareizu attālumu līdz zvaigznei (1.2 kpc; [79]). Ja šajos pētījumos būtu lietots nesen noskaidrotais, precīzais attālums 1.9 kpc [80], tad starjaukas sakristu ar šajā darbā iegūto vērtību.



Attēls 3.1: Zvaigznes HD 161796 efektīvā temperatūra atkarībā no brīvās krišanas pātriņājuma uz zvaigznes virsmas, heliocentriskā radiālā ātruma un laika, kas dots gan gados, gan kā modificētā Juliāna diena (MJD). Melnās taisnes apzīmē lineāras tendences līknes.

3.1.3. Ķīmiskā sastāva analīze

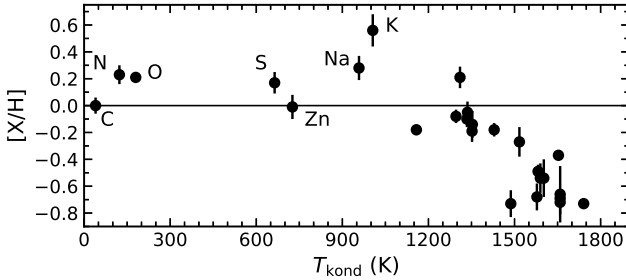
Fotosfēras parametru noteikšanas laikā, bez dzelzs koncentrācijām, papildus tika aprēķināts arī citu ķīmisko elementu daudzums HD 161796 atmosfērā. Lai iegūtu pēc iespējas precīzākas koncentrācijas, tika izmantots 2009. gadā novērotais spektrs, jo tam ir visaugstākā S/T un R, un tika precizēti šim spektram atbilstošie fotosfēras parametri, izmantojot lielāku skaitu dzelzs absorbcijas līniju (286 Fe I un 117 Fe II līnijas). Iegūtas šādas vērtības: $T_{\text{eff}} = 7230 \pm 50$ K, $\log g = 0.53 \pm 0.11$ un $V_{\text{mikro}} = 4.0 \pm 0.4$ km/s. Rezultējošās ķīmisko elementu koncentrācijas un to kļūdas redzamas Tabulā 3.2.

Lai mazinātu ietekmi tam, ka zvaigznes fotosfērā precīzi neizpildās LTL tuvinājums, oglekļa, slāpekļa, skābekļa, sēra un cinka koncentrāciju vērtības koriģētas, pielietojot korekcijas faktoros nobīdēm no LTL, kas aprēķinātas darbā [71]. Šo un pārējo ķīmisko elementu koncentrāciju atkarība no putekļu kondensācijas temperatūras parādīta Attēlā 3.2. Labi redzams jau iepriekšējos darbos [70, 71] konstatētais - pazemināta koncentrācija s procesa elementiem un noplicinājums. Šajā darbā veiktā analīze ļauj secināt, ka zemās s procesa elementu koncentrācijas ir noplicinājuma sekas. Turklāt, izdevies pārliecināties, ka noplicinājums saistāms ar ķīmisko elementu selektīvu piesaistīšanos uz putekļu graudiem, jo kālija un nātrijs koncentrācijas ir salīdzinoši lielas. Šie divi ķīmiskie elementi saistās ar mehānismu, kurā var rasties noplicinājumam līdzīgs koncentrāciju sadalījums - pieņemot, ka skaitliski vairāk jonu kā atomu pamet atmosfēru līdz ar zvaigznes vēju, tiem elementiem, kuriem ir zemāks jonizācijas potenciāls, vajadzētu būt ar salīdzinoši mazāku koncentrāciju [81]. Kālijam un nātrijam ir neliels jonizācijas potenciāls, bet HD 161796 atmosfērā to ir salīdzinoši daudz. Maz ticams, ka, izmantojot korekcijas faktoros nobīdēm no LTL [82, 83], varētu ļoti būtiski samazināt šo elementu aprēķināto koncentrāciju. Tātad var secināt, ka agrāk notikusi noplicinātas vielas akrēcija. Tomēr noplicinājums ir salīdzinoši neliels, un tādos gadījumos, kā liecina pētījuma [31] rezultāti, nav sagaidāms, ka

Tabula 3.2: Ķīmisko elementu koncentrācijas
zvaigznes HD 161796 fotosfērā, kas iegūtas
padziļinātā 2009. gada spektra analizē

Atoms/jons	N	$\log \varepsilon$	σ	Δ	[X/H]
C I	50	8.54	0.11	0.06	0.11
N I	10	8.52	0.18	0.07	0.69
O I	12	9.00	0.12	0.04	0.31
Na I	3	6.52	0.07	0.09	0.28
Mg I	5	7.48	0.02	0.09	-0.12
Mg II	2	7.71	0.11	0.10	0.11
Al I	1	6.06	0.20	0.22	-0.39
Al II	1	6.10	0.20	0.22	-0.35
Si I	28	7.72	0.15	0.08	0.21
S I	13	7.42	0.11	0.08	0.30
K I	2	5.59	0.08	0.12	0.56
Ca I	21	6.07	0.08	0.11	-0.27
Ca II	2	6.12	0.01	0.03	-0.22
Sc II	7	2.46	0.14	0.07	-0.69
Ti I	6	4.42	0.23	0.13	-0.53
Ti II	31	4.47	0.20	0.05	-0.48
V I	1	3.71	0.20	0.22	-0.22
V II	11	3.76	0.12	0.05	-0.17
Cr I	19	5.49	0.13	0.10	-0.15
Cr II	36	5.60	0.11	0.04	-0.04
Mn I	7	5.25	0.10	0.10	-0.18
Mn II	11	5.25	0.06	0.03	-0.18
Fe I	286	7.40	0.16	0.09	-0.10
Fe II	117	7.39	0.15	0.03	-0.11
Co I	4	4.75	0.17	0.13	-0.24
Co II	3	4.86	0.13	0.08	-0.13
Ni I	47	6.08	0.10	0.10	-0.14
Zn I	2	4.34	0.01	0.09	-0.23
Y II	6	1.49	0.19	0.09	-0.72
Zr II	7	1.85	0.04	0.04	-0.73
La II	6	0.42	0.12	0.10	-0.68
Ce II	7	0.85	0.12	0.10	-0.73
Nd II	5	0.89	0.23	0.14	-0.54
Sm II	4	0.42	0.15	0.11	-0.54
Gd II	2	0.41	0.29	0.21	-0.66

akrēcija būtiski ietekmē zvaigznes evolūciju. Tieši otrādi, HD 161796 ķīmiskais sastāvs sliecas apstiprināt iegūto rezultātu par salīdzinoši nelielu zvaigznes masu. Oglekļa, slāpekļa un skābekļa koncentrācijas, ņemot vērā korekcijas faktorus nobīdēm no LTL, labi sakrīt ar virsmas ķīmisko sastāvu, kādu 1-1.25 M_{\odot} sākotnējās masas zvaigznei paredz evolūcijas modeļu aprēķini [4]. Ņemot to vērā, precizēts, ka zvaigznes sākotnējā masa ir aptuveni 2 M_{\odot} vai mazāka. Tas atbilst pašreizējai masai, kas ir 0.58 M_{\odot} vai mazliet mazāka.



Attēls 3.2: Ķīmisko elementu koncentrācijas zvaigznes HD 161796 fotosfērā atkarībā no putekļu kondensācijas temperatūras. Oglekļa, slāpekļa, skābekļa, sēra un cinka ir koriģētas, pielietojot korekcijas faktorus nobīdēm no LTL. Izmantotas pētījumā [84] publicētās putekļu kondensācijas temperatūras vērtības.

3.1.4. Pulsāciju īpašības

Noteiktie HD 161796 fotosfēras parametri izmantojami, lai spriestu par zvaigznes pulsāciju raksturu. Tā kā evolūcijas ātrums ir neliels, tad novērotās būtiskās fotosfēras parametru izmaiņas pamatā rodas pulsāciju ietekmē. Analizētie spektri liecina, ka pulsāciju ietekmē zvaigznes virsmas temperatūra mainās par 420 K, kas apstiprina tipisko, balstoties uz fotometrisko monitoringu iegūto, izmaiņu diapazonu PAMZ zvaigznēm. Pulsācijas izsauca brīvās krišanas paātrinājuma izmaiņas diapazonā no $\log g = 0.5$ līdz 1.0. Kļūdu robežās mikroturbulences ātrums pulsāciju ietekmē nemainās. Attēlā 3.1 labi redzama korelācija starp T_{eff} un $\log g$, kā arī starp T_{eff} un radiālo ātrumu. Pirmā korelācija apstiprina, ka HD 161796 virsma ir karstāka tad, kad tā pulsāciju ietekmē ir sarāvusies, un pretēji. Otrā korelācija liecina, ka zvaigznes virsmas temperatūra mainās vienā fāzē ar fotosfēras radiālo ātrumu, kas ir pretrunā ar HD 161796 fotometrisko un radiālā ātrumu monitoringu, kurā atrasta 0.25 periodu nobīde fāzē. Visticamāk šīs nesaskaņas saknes meklējamas tajā, ka analizētie spektri nepārklāj visas pulsāciju fāzes, ko uzskatāmi var redzēt, ja salīdzina noteikto radiālo ātrumu diapazonus. Šajā darbā nomērītie heliocentriskie radiālie ātrumi ir robežās no -55.6 līdz -49.6 km/s, bet radiālā ātruma monitoringus liecina par diapazonu no -60.7 līdz -46.2 km/s.

Zvaigznes starждаudas izmaiņas novērtētas, izmantojot noteiktos fotosfēras parametrus un labi zināmo formulu

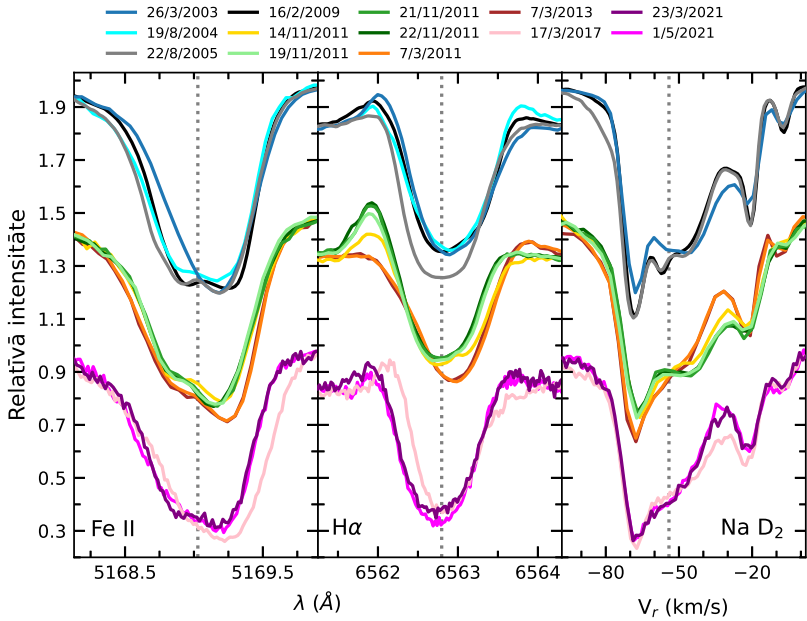
$$L = 4\pi G\sigma MT_{\text{eff}}^4/g, \quad (3.1)$$

kur G ir gravitācijas konstante, σ ir Stefana—Bolcmaņa konstante un M ir zvaigznes pašreizējā masa. Aprēķinātie fotosfēras parametri noved pie rezultāta, ka zvaigznes starждаudas mainās ar vismaz 40% amplitūdu. Tik liela spožuma maiņa atbilst aptuveni 1^m izmaiņām zvaigžņlielumā, taču fotometriskā monitoringa rezultātos redzams, ka HD 161796 spožums V joslā nekad zvaigznes novērojumu vēsturē nav izmainījies vairāk par 0.3^m . Iespējams, ka šo nesakrītību izraisa tas, ka iegūtās izmaiņas log g vērtībās realitātē ir mazākas. Tas, savukārt, varētu būt saistīts ar to, ka pat ar īpašo pieeju fotosfēras parametru noteikšanai nav izdevies pilnībā izvairīties no ne līdz galam korektā LTL tuvinājuma ietekmes uz koncentrācijām, kas iegūtas no Fe I līnijām. Spožuma izmaiņas nesakrītība varētu būt saistīta arī ar to, ka dinamiskā, pulsējošā zvaigznes atmosfēra tiek modelēta ar hidrostatiskiem atmosfēras modeļiem. Visdrīzāk tieši tas arī ir iemesls, kāpēc, analizējot dažādus spektrus, tiek iegūtas dažādas dzelzs koncentrācijas.

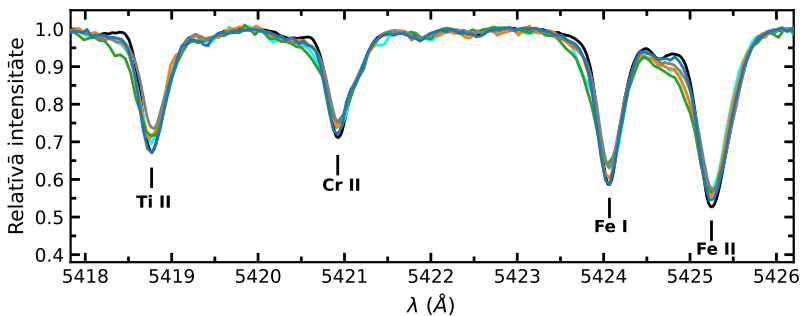
3.1.5. Triecienviļņu un uz ārpusi vērstas plūsmas pazīmes

Bez pulsācijām un agrākas akrēcijas, zvaigznes HD 161796 spektrā novērojamas arī citu dinamisko procesu pazīmes. Tās izpaužas intensīvājās spektrālīnijās (Attēls 3.3) un vidējas intensitātes absorbcijas līniju mainīgumā (Attēls 3.4).

H α līnija HD 161796 spektrā raksturojama kā plats un teju nemainīgs absorbcijas profils, kura centrā ir vēl viens absorbcijas profils, kas ir šaurs un laikā mainīgs. Ar centrālo absorbciju šķietami saistīta tās īso viļņu, garo viļņu vai abās pusēs novērojamā emisijas komponente. Saskaņā ar pētījumu [36] šāda tipa H α līnija sastāv no atmosfēras absorbcijas profila, kuru tā centrālajā apgabalā daļēji aizpilda emisija, un liecina par pašreizēju vielas aizplūšanu no zvaigznes (PAMZ stadijas zvaigznes vēju). Emisija ir saistīta ar triecienviļņiem vai nu atmosfērā vai arī tālāk AA, kur notiek PAMZ un AMZ stadiju zvaigznes vēju mijiedarbība. H α līnijai HD 161796 spektrā emisijas komponente centrālās absorbcijas garo viļņu pusē tiecas būt vājāka kā īso viļņu pusē [40], kas skaidrojams ar to, ka zvaigzni aptverošais H α emisijas apgabalš atrodas tās tuvumā (attālumā, kas salīdzināms ar zvaigznes rādiusu) [36]. Šis secinājums un tas, ka 2011. gada novembrī redzamas H α profila izmaiņas dažu dienu laikā, norāda, ka, visticamāk, tajā redzamo emisiju izsauc triecienviļņi zvaigznes atmosfērā. Tas, ka profila emisijas komponente ir laikā mainīga, visdrīzāk saistīts ar izmaiņām zvaigznes vējā. Triecienviļņu pazīmes novērojamas arī dažās intensīvās metālu absorbcijas līnijās. Piemēram, Fe II 5169.03 Å profilam dažās epohās ir acīmredzama sašķelšanās. Iespējams, arī šaurā absorbcijas komponente Na D līnijās, kas neseko zvaigznes pulsācijām un laika gaitā nemaina savu pozīciju un kuras heliocentriskais radiālais ātrums



Attēls 3.3: Atlasītu intensīvu absorbcijas līniju izmaiņas zvaigznes HD 161796 spektrā. Na D₂ profils attēlots heliocentriskā radiālā ātruma skalā, vertikālā punktētā līnija iezīmē zvaigznes sistēmisko ātrumu. Pārējie divi profili attēloti viļņu garumu skalā, kas pārbīdīta par attiecīgajiem fotosfēras radiālajiem ātrumiem, un punktētās vertikālās līnijas iezīmē attiecīgās pārejas viļņu garumu. Uzskatāmības nolūkos daļa profilu pārbīdīti augšup pa relatīvās intensitātes asi. Parādīta ir tikai pati H α profila centrālā daļa. 2004. gada spektra Na D₂ profils nav parādīts telurisko līniju ietekmes dēļ.



Attēls 3.4: Vidējās intensitātes absorbcijas līniju mainīgums zvaigznes HD 161796 spektrā. Summētais 2011. gada novembra spektrs ir attēlots ar zaļu krāsu, savukārt, summētais 2013. gada marta spektrs - ar oranžu. Pārējie spektri apzīmēti ar tādu pašu krāsu līnijām kā Attēlā 3.3.

ir -68.3 km/s, ir saistīta ar vēju, kas radies PAMZ stadijā. Pie tāda paša radiālā ātruma pētījumā [57] uz CO molekulas radio emisijas līnijas profila tika novērota vāja absorbcija, kas tika saistīta ar ātra un telpiski maza vēja komponenti iekšpus AA.

Salīdzinot vidējas intensitātes absorbcijas līnijas HD 161796 spektros, redzamas izmaiņas laika gaitā gan līniju centrā, gan īso viļņu puses spārnā (līnijas sānos). Interesanti, ka garo viļņu puses spārns ir nemainīgs. Visizteiktākā absorbcija īso viļņu puses spārnā redzama summētajā 2011. gada spektrā. Pretēja situācija novērojama 2009. gada spektrā - īso viļņu puses spārnā ir šķietami par maz absorbcijas un dažām līnijām šajā spārnā novērojama pat neliela emisija. Šāds īpatnējs mainīgums novērojams vairumam vidējas intensitātes absorbcijas līniju. Turklāt, nav atkarīgs, kāds jons vai molekula rada absorbcijas līniju. Tāpat šīm izmaiņām nav novērojama atkarība no līnijas ierosmes potenciāla. Salīdzinot 2009. un 2005. gada spektru, kuri ir ar vislielāko S/T un R, var novērot līdzīgu mainīgumu arī mazas intensitātes spektrālīnijās. Aprakstīto absorbcijas līniju mainīgumu varētu izraisīt izmaiņas prom no zvaigznes vērstā siltas gāzes plūsmā tās virsmas tuvumā.

3.2. IRAS 22272+5435: izmaiņas spektrā īsā laika posmā

3.2.1. Būtiskākie zvaigznes iepriekšējo pētījumu rezultāti

IRAS 22272+5435 ir PAMZ stadijā esoša G spektra klases pārmilzu zvaigzne, kam $V \approx 9^m$. Tās atmosfēra ir bagātināta ar oglekli un s procesa elementiem [85—87]. Primārais pulsāciju periods ir 132 dienas ilgs [16, 33, 56]. Zvaigznes spektra klase un pulsāciju periods apliecina, ka tā ir agrīnajā PAMZ stadijā.

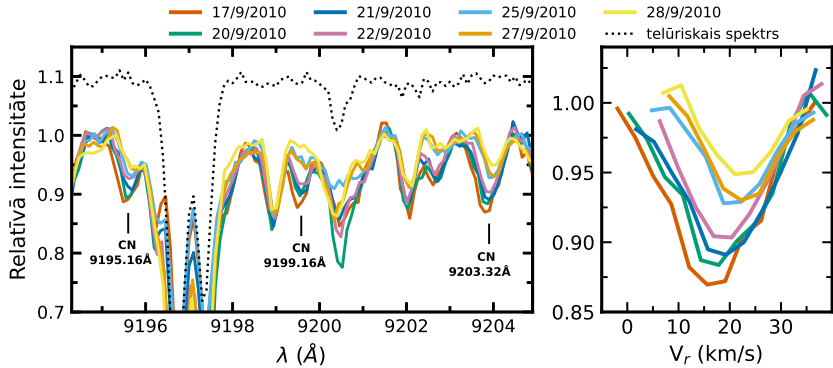
IRAS 22272+5435 spektrā novērotas C_2 , C_3 un CN molekulu absorbcijas līnijas [26, 85, 86, 88, 89]. Daļai no tām piedēvēta izcelsme fotosfērā un otrai daļai - AA. Tomēr pētījumi [39, 43] liek apšaubīt hipotēzi par formēšanos fotosfērā. Tajos novērots, ka platas CN Sarkanās un C_2 Svana sistēmas līnijas, kas līdz ar zvaigznes pulsācijām maina intensitāti, ir nobīdītas uz īso viļņu pusi attiecībā pret fotosfēras metālu absorbcijas līnijām. Tad, kad zvaigzne ir spožuma minimuma pulsāciju fāzēs, molekulu absorbcijas ir ļoti intensīvas. Šāda spektrālīniju uzvedība tika interpretēta kā sekas virs fotosfēras esošai, pulsāciju izraisītai vēsai vielas plūsmai virzienā prom no zvaigznes. Tika arī novērota CN Sarkanās sistēmas līniju, kas pieder (5,1) svārstību joslai, vāja emisija momentos, kad zvaigzne ir spožuma maksimuma pulsāciju fāzē. Darbā [89] konstatēti Gulbja P tipa profili C_2 Filipsa sistēmas (1,0) līnijās. Emisija tuvā IS diapazona CO molekulas $\Delta v = 2$ joslās, kas vēlāk novērotas absorbcijā, interpretēta kā sekas epizodei, kurā no zvaigznes tika izsviesta viela [90]. Spektrā arī novērota intensīvu metālu absorbcijas līniju sašķelšanās [39, 91].

3.2.2. *Vielas krišana uz zvaigzni*

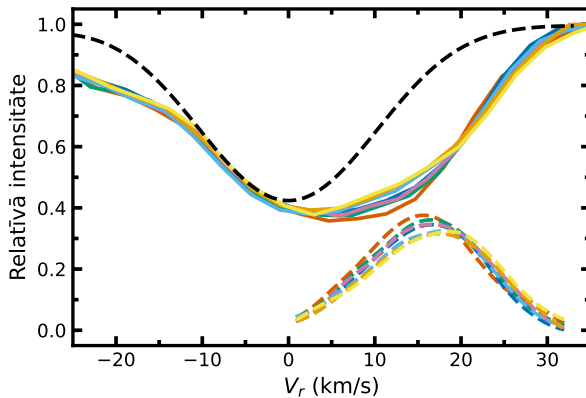
Tika salīdzināti septiņi IRAS 22272+5435 spektri, kas uzņemti 11 dienu laikā 2010. gada septembrī, lai tajos meklētu strauji notiekošas izmaiņas. Tāpat darīts ar sešiem spektriem, kas uzņemti 7 dienu laikā 2011. gada novembrī. Spektros, kas iegūti 2010. gadā, tika konstatēts mainīgums CN Sarkanās sistēmas (1,0) līnijās, kā arī intensīvās metālu absorbcijas līnijās. Spektros, kas iegūti 2011. gadā, mainīgums netika konstatēts. Zināms, ka 2010. gada spektri atbilst spožuma maksimuma pulsāciju fāzei un 2010. gada spektri - minimuma [43].

Spektra apgabals, kurā identificētas trīs mainīgās CN Sarkanās sistēmas (1,0) līnijas, kā arī detalizētāks skats uz CN 9203.32 Å līnijas izmaiņām parādīts Attēlā 3.5. Redzams, ka šai līnijai 11 dienu laikā palielinās radiālais ātrums attiecībā pret fotosfēru no apmēram +15.9 līdz +23.1 km/s. Tai pat laikā no metālu absorbcijas līniju pozīcijām secināms, ka šajā epohā fotosfēra attiecībā pret zvaigznes masas centru izplešas ar ātrumu 1.5 km/s. Mainīgums un lielā nobīde no fotosfēras ātruma liecina par to, ka CN Sarkanās sistēmas (1,0) līnijas formējas ārpus zvaigznes fotosfēras. To apstiprina arī pētījumā [43] veiktais secinājums, ka spožuma maksimuma pulsāciju fāzēs CN Sarkanās sistēmas līnijām nevajadzētu būt novērojamām, jo zvaigznes fotosfēras temperatūra ir pārāk liela. Nomērtie CN 9203.32 Å līnijas radiālie ātrumi liecina, ka 11 dienu laikā viela, kas radīja šo absorbciju, pārvietojās aptuveni 17 miljonus kilometrus virzienā uz zvaigzni. Tātad, 17. septembrī šī viela bija vismaz 25 R_{\odot} augstumā virs zvaigznes virsmas. IRAS 22272+5435 rādiuss ir aptuveni 100 R_{\odot} [29]. Līdz ar radiālā ātruma palielināšanos CN 9203.32 Å līnijas intensitāte samazinās - 11 dienu laikā EP mainās no aptuveni 80 līdz 23 mÅ. Tas varētu būt saistīts ar pieaugušo gāzes temperatūru, tai krītot zvaigznes virzienā.

Analizējot mainīgumu intensīvu s procesa elementu absorbcijas līniju, kam ir zems ierosmes potenciāls, izlasei, atklājās, ka nevienu no šiem profiliem nav iespējams atveidot sintētiskajā spektrā. Visos gadījumos bez fotosfēras absorbcijas novērojama papildus absorbcija profila garo viļņu pusē, kuras intensitāte 11 dienu laikā samazinās. Attēlā 3.6 kā piemērs parādīts Y II 5402.77 Å līnijas profils un tā izmaiņas. No sintētiskā spektra atskaitot novērotos zvaigznes spektrus, kļūst redzams, ka papildus absorbcija ir ar aptuveni Gausa funkcijas formu un tās radiālais ātrums palielinās no +15.8 līdz +18.8 km/s, kas liecina par vielas krišanu uz zvaigzni. Tas, ka radiālie ātrumi ir citādāki kā CN līniju gadījumā, varētu būt saistīts ar dažādiem augstumiem virs zvaigznes virsmas, kādos formējas absorbcijas līnijas. Domājams, ka atmosfēras dinamiskie procesi agrīnā PAMZ un AMZ zvaigznēm ir līdzīgi. AMZ zvaigžņu paplašināto atmosfēru modelēšana liecina par līdz pat aptuveni 20 km/s lieliem augšup un lejupejošās vielas kustības ātrumiem dažu zvaigznes rādiusu attālumā no tās virsmas [92]. Iespējams, novērotā vielas krišana uz IRAS 22272+5435 ir saistīta ar līdzīgiem dinamiskajiem procesiem, kādi novēroti AMZ zvaigznēs - lielmēroga konvekciju un triecienviļņiem.



Attēls 3.5: Izmaiņas CN Sarkanās sistēmas (1,0) līnijās zvaigznes IRAS 22272+5435 spektrā 2010. gada septembrī. Kreisajā pusē: viļņu garumu diapazons no 9194.5 līdz 9204.6 Å. Bez izmaiņām telūriskajās līnijās mainīgums novērojams arī citās, no kurām trīs identificētas kā CN molekulas spektrālīnijas. Labajā pusē: CN 9203.32 Å līnijas maiņīgums radiālā ātruma skalā attiecībā pret zvaigznes fotosfēru.



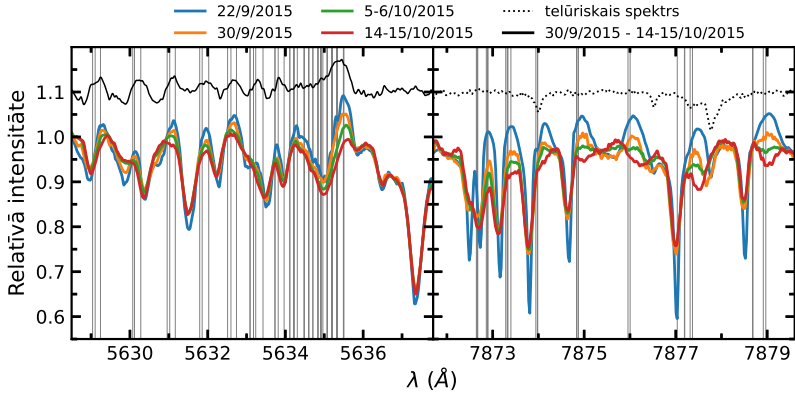
Attēls 3.6: Y II 5402.77 Å līnijas izmaiņas zvaigznes IRAS 22272+5435 spektrā 2010. gada septembrī. Līniju apzīmējumi ir tādi paši kā Attēlā 3.5, izņemot melno pārtraukto līniju, kas apzīmē sintētisko spektru, kā arī krāsainās pārtrauktās līnijas, kas konstruētas atskaitot no sintētiskā spektra novērotos zvaigznes spektrus. Sintētiskais spektrs aprēķināts, izmantojot zvaigznes fotosfērai atbilstošas ķīmisko elementu koncentrācijas un parametrus spožuma maksimuma pulsācijas fāzes laikā ($T_{\text{eff}} = 5750$ K, $\log g = 0.5$ un $V_{\text{mikro}} = 4.5$ km/s).

3.2.3. Epizodiska molekulu līniju emisija

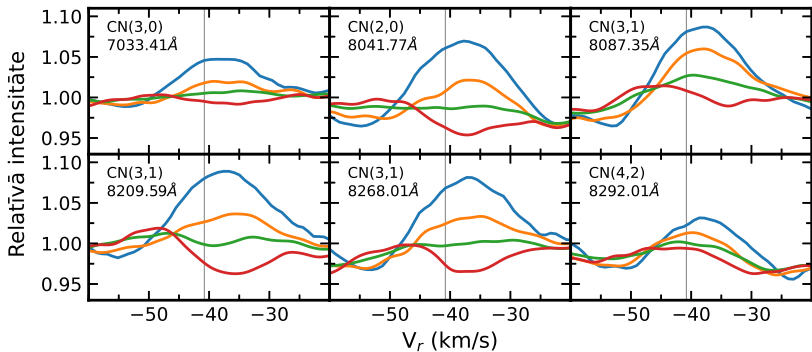
Straujas izmaiņas tika meklētas arī 2015.-2017. gada IRAS 22272+5435 spektros. Apskatot spektrus, kas uzņemti laika posmā no 2015. gada 22. septembra līdz 15. oktobrim, novērotas CN un C₂ molekulu emisijas līnijas un to izmaiņas. Visintensīvākās emisijas, kas pieder CN Sarkanajai un C₂ Svana sistēmai, redzamas 22. septembra spektrā. Pēc tam to intensitāte samazinās, un summētajā 14.-15. oktobra spektrā redzams, ka daļa emisiju ir kļuvušas par absorbcijām. Ja iepriekšējos pētījumos novērotās CN Sarkanās sistēmas (5,1) emisijas līnijas pārsniedz nepārtrauktā spektra līmeni vien par dažiem procentiem, tad 22. septembra spektrā redzamas emisijas, kas sniedzas 10 % virs nepārtrauktā spektra līmeņa un pat augstāk. Turklāt, novērotas emisijas, kas pieder daudzām CN Sarkanās sistēmas svārstību joslām - $\Delta v = 1$ līdz (3,2), $\Delta v = 2$ līdz (5,3), $\Delta v = 3$ līdz (7,4) un $\Delta v = 4$ līdz (7,3). Identificētās CN Sarkanās sistēmas emisijas līnijas (1,0) un (2,1) joslu gadījumā atbilst rotācijas kvantu skaitļiem līdz $J \approx 70$. Pārējo joslu gadījumā šī augšējā robeža ir ne mazāka kā $J \approx 30$. Novērotās C₂ Svana sistēmas emisijas pieder (0,2), (3,1), (0,1), (1,2), (2,3) un (0,0) svārstību joslām. CN Sarkanās sistēmas (2,0) un C₂ Svana sistēmas (0,1) emisijas un to attīstība ilustrēta Attēlā 3.7. Emisija Gulbja P tipa profilu formā novērota arī C₂ Filipisa sistēmas (1,0) un (2,0) līnijām. Dažās šo līniju pozīcijās redzama mainīga emisija, bet, ļoti iespējams, ka tā rodas CN Sarkanās sistēmas emisiju izmaiņu ietekmē. Ja C₂ Filipisa sistēmas emisijas maina intensitāti īsā laika posmā, tad šīs izmaiņas pavisam noteikti ir mazāk izteiktas kā CN Sarkanās un C₂ Svana sistēmu gadījumā. Daudzu svārstību joslu klātbūtne zvaigznes IRAS 22272+5435 spektrā novērota pirmo reizi, piemēram (3,1) un (4,1), kuras pieder C₂ Filipisa sistēmai.

IRAS 22272+5435 spektrā C₂ Svana sistēmas gadījumā nav iespējams atrast tādu atsevišķu līniju, kas nepārklājas ar citām molekulu vai arī fotosfēras metālu līnijām. Turpretī, CN Sarkanās sistēmas gadījumā šādas līnijas ir atrastas un dažas no tām parādītas Attēlā 3.8. Spektrā, kas uzņemts 22. septembrī, emisijas līniju profila maksimuma radiālais ātrums attiecībā pret sistēmisko ātrumu ir aptuveni +3.2 km/s un profila pusaugstuma platums vidēji ir apmēram 13 km/s liels. Iespējams, ka arī C₂ Svana sistēmas emisijas līnijām šajā datumā ir aptuveni tāds pats radiālais ātrums un pusaugstuma platums. CN Sarkanās sistēmas līnijām 22. un 30. septembra spektrā novērojama arī vāja absorbcijas komponente ar radiālo ātrumu aptuveni -12 km/s, kas kombinācijā ar emisiju atveido Gulbja P tipa profilu. Šāda tipa profili liecina par vielas plūsmu prom no zvaigznes. Bez uz garo viļņu pusi nobīdītās absorbcijas, CN Sarkanās sistēmas līnijām summētajā 14.-15. oktobra spektrā šķietami redzama arī vāja, uz īso viļņu pusi nobīdīta emisijas komponente. Šāda līnijas forma, savukārt, iezīmē apgriezto Gulbja P tipa profilu un liecina par vielas krišanu uz zvaigzni.

CN Sarkanās un C₂ Svana sistēmas emisijas novērotas arī spektros, kas uzņemti 2015. gada decembrī un 2016. gada janvārī, tikai šajā gadījumā redzama emisiju parādīšanās, nevis izzušana. Ja 7. decembra spektrā novērojamas tikai



Attēls 3.7: Molekulu emisijas līnijas un to izmaiņas zvaigznes IRAS 22272+5435 spektrā 2015. gada septembrī un oktobrī. Pa kreisi: izmaiņas C_2 Svana sistēmas (0,1) joslas galvā. Ar vertikālām pelēkām līnijām atzīmētas spēcīgāko (lielākie oscilatora stiprumi) līņu pozīcijas. Melnā līnija konstruēta no 30. septembra spektra atņemot summēto 14.-15. oktobra spektru, un tā parāda, ka daudzas mainīgās emisijas nav viegli pamanāmas, jo tās maskē absorbcijas līnijas. Intensīvo līniju ap 5637.36 \AA izsauc Ce II un Sm II fotosfēras absorbcijas. Pa labi: Izmaiņas CN Sarkanās sistēmas (2,0) līnijās. Līdz ar mainīgajām emisijām redzamas arī uz īso viļņu pusi nobīdītas absorbcijas, kas formējas AA. Šīs šaurās absorbcijas līnijas 22. septembra spektrā ir daudz dziļākas, jo tas ir ar lielāku R kā oktobra spektri.



Attēls 3.8: Atsevišķu CN Sarkanās sistēmas līniju mainīgums heliocentriskā radiālā ātruma skalā zvaigznes IRAS 22272+5435 spektros, kas uzņemti 2015. gada septembrī un oktobrī. Katrai līnijai parādīts viļņu garums un svārstību josla, kurai tā pieder. Ar vertikālām pelēkām līnijām iezīmēts zvaigznes sistēmiskais ātrums. Spektri apzīmēti ar tādu pašu krāsu līnijām kā Attēlā 3.7.

molekulu absorbcijas līnijas, tad 16. decembra spektrā jau redzamas arī vājas emisijas. Vislielāko novēroto intensitāti emisijas līnijas sasniedz 28. decembra un 5. janvāra spektros. Šajos divos datumos emisijas ir teju identiskas. Intensitātes un pusaugstuma platuma ziņā tās ir ļoti līdzīgas 22. septembra emisijas līnijām, bet radiālais ātrums ir atšķirīgs - profīlu maksimumu pozīcijas aptuveni atbilst sistēmiskajam ātrumam. Spektri liecina, ka nepieciešamas 2-3 nedēļas, lai emisijas kopš parādīšanās sasniegtu maksimālo novēroto intensitāti vai no tās samazinātos līdz absorbcijai. Molekulu emisijas, lai gan vājākas kā 22. septembra spektrā, redzamas arī 2016. gada 12. oktobra, 2017. gada 11. janvāra un 17. jūnija spektros. Diemžēl šajos gadījumos nav iespējams izsekot to attīstībai vai nu zemās S/T dēļ, vai arī tāpēc, ka nav novēroti citi spektri šo epochu tuvumā.

Izmantojot darbā [93] prezentētās fotometrisko novērojumu programmas datus, noteiktas 2015.-2017. gada spektriem atbilstošās IRAS 22272+5435 pulsāciju fāzes. Secināts, ka emisijas redzamas kādā to fāžu laikā, kurās zvaigzne ir tuvāk spožuma maksimumam kā minimumam. Šis secinājums saskan ar iepriekšējos pētījumos novērotajām CN Sarkanās sistēmas (5,1) emisijas līnijām momentos, kad zvaigzne ir spožuma maksimumā. Tomēr šai šķietamajai saistībai starp molekulu emisijām un pulsāciju fāzi ir arī izņēmumi. Piemēram, 2017. gada 28. oktobra spektrā, kas atbilst spožuma maksimuma pulsāciju fāzei, novērojamas tikai molekulu absorbcijas līnijas.

Novērotās molekulu emisijas visdrīzāk saistītas ar dinamiskajiem procesiem IRAS 22272+5435 paplašinātajā atmosfērā. Pētījumā [94] šādi procesi tika modelēti AMZ zvaigznes atmosfēras gadījumā. Tai skaitā, tika ilustrēts vienkāršs modelis, kurā atmosfērai piešķir vienmērīgu izplešanās vai saraušanas ātrumu, kā rezultātā konkrētā CO $\Delta v = 2$ līnijā parādās emisija. Dažu modelēšanā izvēlēto ātrumu gadījumā, šī emisija līdzinās tām, kādas ir novērotas IRAS 22272+5435 spektrā. Tomēr šāds modelis līnijas profilā vienlaikus ar emisiju paredz arī intensīvu absorbciju. Ja pieņem, ka gāzes blīvums uz skata līnijas ir mazāks kā citos virzienos, tad absorbcija būtu mazāk intensīva. AMZ zvaigžņu trīsdimensionālās starojuma un hidrodinamikas simulācijās novērotas būtiskas paplašinātās atmosfēras nobīdes no sfēriskās simetrijas, ko izraisa lielmēroga konvekcija [7, 92, 95]. Iegūtie augšup un lejupejošās vielas ātrumi labi sakrīt ar radiālajiem ātrumiem, kas atbilst novērotajām molekulu emisijas un ar tām saistīto absorbcijas līniju pozīcijām. Ņemot šo visu vērā, var spriest, ka IRAS 22272+5435 spektrā novērotās emisijas rodas ne tālāk kā dažu zvaigznes rādiusu attālumā no tās virsmas. Iemesls, kāpēc C₂ Filipsa sistēmas emisijas ir mazāk mainīgas īsā laika posmā kā CN Sarkanās un C₂ Svana sistēmas emisijas, varētu būt saistīts ar to formēšanos citā augstumā virs zvaigznes. Tomēr ir jāuzsver, ka dotā interpretācija nav pilnīga, jo neizskaidro šķietamo saistību starp molekulu emisijām un zvaigznes pulsācijām.

3.3. IRAS Z02229+6208: tuvā IS spektra monitorings

3.3.1. Būtiskākie zvaigznes iepriekšējo pētījumu rezultāti

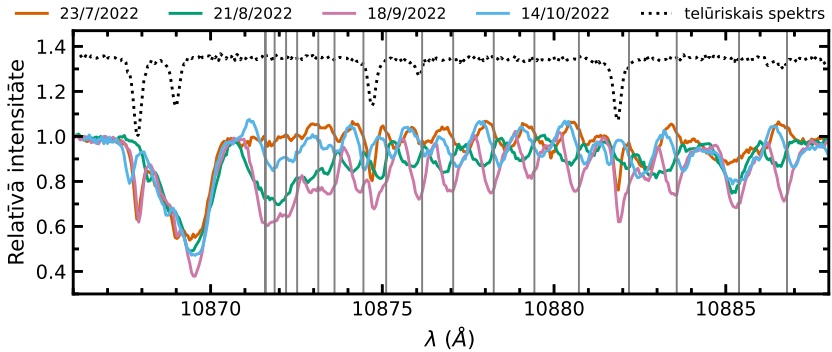
Zvaigzne IRAS Z02229+6208 ir blāvs ($V \approx 12^m$) PAMZ stadijā esošs vēlīnās G spektra klases pārmilzis. Primārais pulsāciju periods ir 155 dienas ilgs [16, 33] un kopā ar spektra klasi tas apliecina, ka zvaigzne ir agrīnajā PAMZ stadijā.

Sākotnējā zvaigznes pētījumā [58] tās spektrā tika novērotas CN, C₂ un C₃ molekulu absorbcijas. Pirmajā augstas izšķirtspējas spektra analizē atklājās, ka tās atmosfēra ir bagātināta ar oglekli un s procesa ķīmiskajiem elementiem [96]. Tika arī novērotas uz īso viļņu pusi nobīdītas CN Sarkanās sistēmas (2,0) un C₂ Filipa sistēmas (2,0) un (3,0) līnijas, kas skaidrotas ar absorbciju AA. Ziņots arī par CN molekulas fotosfēras absorbcijas līnijām. Nesen pētījumā [97] tika prezentēti četri augstas izšķirtspējas IRAS Z02229+6208 redzamās gaismas spektri. Novērots, ka intensīvas, zema ierosmes potenciāla absorbcijas līnijas laika gaitā mainās un mēdz būt sašķeltas. Konstatēts ievērojams mainīgums arī C₂ Svana sistēmas absorbciju intensitātes. Var secināt, ka IRAS Z02229+6208 ir līdzīgas spektra īpašības kā IRAS 22272+5435.

3.3.2. Mainīgās molekulu līnijas

Pirmo reizi veikts IRAS Z02229+6208 spektroskopisks monitorings tuvā IS starojuma diapazonā un novērotie spektri gan redzamajai gaismai, gan tuvajam IS atbilstošos viļņu garumos salīdzināti savā starpā ar mērķi atrast tajos izmaiņas. Galvenokārt, tās redzamas fotosfēras metālu un CN molekulas līnijās, kas pieder dažādām CN Sarkanās sistēmas svārstību joslām, kā piemēram, (0,0), (1,0), (2,0), (2,1), (3,0) un (5,1). Teju visu novēroto svārstību joslu klātbūtne zvaigznes IRAS Z02229+6208 spektrā konstatēta pirmo reizi. Attēlā 3.9 ilustrēts mainīgums CN Sarkanās sistēmas (0,0) līnijās. Spektrā, kas uzņemts 23. jūlijā, šīs līnijas novērojamas emisijā. Spektros, kas uzņemti 21. augustā un 18. septembrī, tās ir absorbcijā, turklāt 18. septembra spektrā absorbcija ir intensīvāka. Spektrā, kas uzņemts 14. oktobrī, molekulu līnijām ir apgrieztais Gulbja P tipa profils. Mainīgums kvalitatīvi ir līdzīgs arī citu joslu gadījumā, bet molekulu līniju vidējie radiālie ātrumi ir atšķirīgi. Fotosfēras metālu un konkrētām svārstību joslām atbilstošo molekulu līniju radiālie ātrumi attiecībā pret sistēmisko ātrumu doti Tabulā 3.3. Izmaiņas redzamas arī C₂ Svana sistēmas (0,1) joslas galvā. Augusta spektrā tā redzama absorbcijā, septembra spektrā absorbcija ir vēl lielāka, savukārt, pārējos divos spektros nav novērojama ne būtiska emisija, ne absorbcija.

Izmantojot tādu pašu fotometriskos datus, kā IRAS 22272+5435 gadījumā, secināts, ka jūlija un oktobra IRAS Z02229+6208 spektri atbilst pulsāciju fāzēm, kas nav tālu no spožuma maksimuma, savukārt, pārējie divi spektri atbilst fāzēm, kas nav tālu no spožuma minimuma. Tātad, molekulu absorbcijas līnijas



Attēls 3.9: Izmaiņas zvaigznes IRAS Z02229+6208 spektrā viļņu garumu diapazonā no 10866 līdz 10888 Å. Spēcīgāko CN Sarkanās sistēmas (0,0) līniju viļņu garumi parādīti ar pelēkām vertikālām līnijām. Izteikto absorbciju pie 10869.5 Å rada Ca I un Si I līnijas.

Tabula 3.3: Vidējie radiālie ātrumi dažādu tipu spektrālīnijām zvaigznes IRAS Z02229+6208 spektros

Līniju tips	Datums			
	23/7/2022	21/8/2022	18/9/2022	14/10/2022
Fotosfēras ^a	+4.0	-2.1	+3.6	+4.7
CN Sarkanās sistēmas				
(0,0)	-2.3 ^b	-11.5	+1.1	-6.0 ^c
(1,0)	-2.4 ^b	-7.3	+1.9	-7.6 ^c
(2,0)	-1.0 ^b	-6.8	+2.7	-6.6 ^c
(2,0) ^d	-11.6	-11.2	-11.0	-11.4
(2,1)	-4.4 ^b	-8.1	+2.7	-10.4 ^c
(3,0)	-1.2 ^b	-8.3	+1.4	-3.9 ^c
(5,1)	-1.0 ^b	-7.0	+2.1	-7.1 ^c
C ₂ Filipsa sistēmas				
(3,0) ^d	-11.2	-10.9	-10.8	-11.0
(2,0) ^d	-11.4	-11.2	-11.0	-11.2

Ātrumi norādīti kilometros sekundē attiecībā pret sistēmisko ātrumu

^aMazas un vidējas intensitātes metālu absorbcijas līnijas

^bEmisijas līnijas

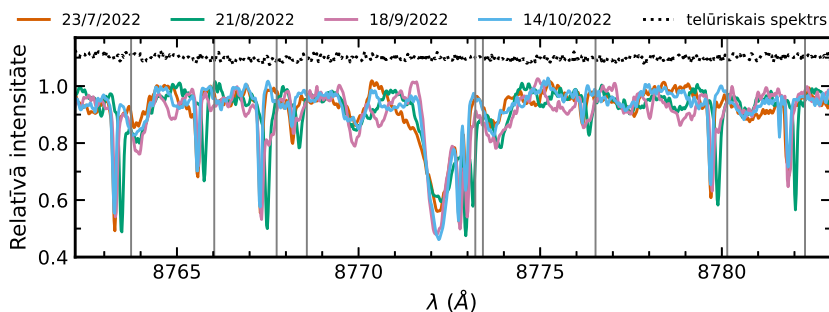
^cGulbja P tipa profilu emisijas komponentes

^dŠauras absorbcijas līnijas

tiek novērotas spožuma minimuma tuvumā un molekulu līnijas, kurām ir emisijas komponentes, redzamas spožuma maksimuma tuvumā. Tāda pati uzvedība novērota IRAS 22272+5435 gadījumā, kas liek domāt, ka molekulu līniju izmaiņas IRAS Z02229+6208 spektrā arī varētu būt saistītas ar zvaigznes pulsācijām. Arī mainīgo molekulu līniju formas un radiālie ātrumi abām zvaigznēm ir līdzīgi. Var secināt, ka molekulu līniju mainīgumu abu zvaigžņu gadījumā izsauc vieni un tie paši dinamiskie procesi. Lielmēroga konvektīvās plūsmas un triecienviļņu klātbūtne atmosfērā varētu būt izplatīta parādība agrīnā PAMZ zvaigznēm.

3.3.3. Stacionārās molekulu līnijas

Novērotajos IRAS Z02229+6208 spektros redzamas arī šauras, uz īso viļņu pusi nobīdītas un šķietami stacionāras absorbcijas līnijas (Attēls 3.10). Tās rodas AA un pieder CN Sarkanās sistēmas (2,0) un C₂ Filipša sistēmas (2,0) un (3,0) joslām. Visu trīs joslu līnijām visos spektros radiālais ātrums ir teju vienāds un liecina par to, ka gāze, kurā formējas šaurās molekulu absorbcijas, attālinās no zvaigznes ar ātrumu 11.1 km/s. Šo lielumu dēvē par AA izplešanās ātrumu, kam IRAS Z02229+6208 gadījumā iegūtas dažādas vērtības, sākot no 10.7 līdz vairāk kā 15 km/s [58, 59, 96, 97]. Šāds diapazons nav nekas neparasts, jo AA izplešanās ātruma aprēķināšanai izmantotas dažāda tipa molekulu līnijas, kas var būt saistītas ar dažādiem tā apgabaliem. Tomēr pētījumā [58] ziņots par vērtību 14 km/s, kas būtiski atšķiras no šajā darbā iegūtās, lai gan tās noteikšanā izmantotas to pašu C₂ Filipša sistēmas joslu līnijas. Pētījumā [89] konstatēta līdzīga nesakrītība zvaigznes IRAS 22272+5435 gadījumā. Šīs atšķirības AA izplešanās ātrumos, iespējams, saistītas ar dinamiskajiem procesiem, kas ir sarežģītāki par vienkāršu tā attālināšanos no zvaigznes.



Attēls 3.10: Zvaigznes IRAS Z02229+6208 spektri viļņu garumu diapazonā no 8762 līdz 8783 Å. Identificēto C₂ Filipša sistēmas (2,0) līniju viļņu garumi iezīmēti ar vertikālām pelēkām līnijām. Pa kreisi no tām redzamas šauras absorbcijas līnijas. Šīs spektrālīnijas neizskatās stacionāras, jo viļņu garumu skala katrā spektrā ir pārbīdīta atbilstoši fotosfēras radiālajam ātrumam. Mainīgumu, ko var novērot šajā spektra apgabalā, izsauc pamatā CN Sarkanās sistēmas (3,1) līnijas. Izteikto absorbciju pie 8772 Å rada Ce II līnija.

3.4. Secinājumi un rezultātu kopsavilkums

Iespējams, būtiskākais prezentētā darba rezultāts ir piemērs ieguvumiem, kādus var dot dažādos laikos novērotu atsevišķu agrīnā PAMZ zvaigžņu spektru analīze. Zvaigznes HD 161796 spektroskopija parāda, ka ir pagājis pietiekami ilgs laiks kopš pirmajiem augstas izšķirtspējas spektru novērojumiem, lai varētu uzsākt mēģinājumus noteikt evolūcijas ātrumus. Zvaigznes IRAS 22272+5435 spektra analīze lieliski ilustrē biežu un regulāru spektroskopiska monitoringa potenciālu ieskatīties dažādos sarežģītos procesos, kas noris PAMZ zvaigžņu atmosfērās un virs tām. Šajā darbā tika atklātas jaunas, iepriekš nezināmas spektra īpatnības neskatoties uz to, ka konkrētās zvaigznes spektrs iepriekš ir pētīts daudzkārt. Zvaigžņu IRAS 22272+5435 un IRAS Z02229+6208 spektri norāda uz priekšrocībām tam, ka monitoringa tiek veikts plašā viļņu garumu diapazonā. Spektra mainīgums, ko izsauc vieni un tie paši dinamiskie procesi, dažādās molekulu joslās izpaužas citādi, kas paver iespēju pētīt, kā konkrētie fizikālie procesi ir atkarīgi no augstuma zvaigznes atmosfērā vai virs tās.

Lai labāk izprastu PAMZ zvaigžņu evolūciju un tajās notiekošos dinamiskos procesus, ir nepieciešams novērot augstas izšķirtspējas spektrus dažādos laika momentos. Šāda veida spektroskopija nesīs jaunas zināšanas ne tikai par vēl nenovērotām zvaigznēm, bet arī par tām, kas pētītas vairākkārt. Tomēr jārēķinās, ka zinātniskie rezultāti nenāks viegli. Kopumā ir nepieciešams liels teleskopa novērošanas laiks, lai bieži un regulāri iegūtu kvalitatīvus augstas izšķirtspējas spektrus. Lai precīzi noteiktu evolūcijas ātrumus, būs nepieciešams novērot zvaigznes daudzu gadu garumā.

Tā kā šajā darbā analizētas tikai trīs zvaigznes, nav iespējams veikt vispārīgus secinājumus par evolūciju un dinamiskajiem procesiem agrīnā PAMZ stadijā. Var tikai uzskaitīt būtiskākos rezultātus katras analizētās zvaigznes gadījumā:

- HD 161796:
 - balstoties uz 18 gadu garumā uzņemtu spektru homogēnu analīzi, noteikts, ka zvaigznes efektīvā temperatūra evolūcijas ietekmē mainās ar ātrumu 5 ± 6 K gadā,
 - novērtēts, ka zvaigznes sākotnējā masa ir aptuveni $2 M_{\odot}$ vai mazāka, un starжда ir apmēram $8000 L_{\odot}$,
 - secināts, ka efektīvā temperatūra laikā mainās, galvenokārt, pulsāciju ietekmē, turklāt 420 K lielais iegūto vērtību diapazons apstiprina, ka PAMZ zvaigznēm tā mainās vairāku simtu grādu robežās,
 - apstiprināts, ka fotosfēra ir karstāka, kad zvaigzne pulsāciju ietekmē ir saspiedusies, un pretēji,
 - secināts, ka mazā s procesa elementu koncentrācija zvaigznes fotosfērā ir sekas senāk notikušai akrēcijai,

- novērotais H α līnijas mainīgums liecina par pašreizēju, mainīgu vielas aizplūšanu no zvaigznes un triecienviļņiem tās atmosfērā, ko apstiprina gan sašķeltās intensīvās absorbcijas līnijas, gan izmaiņas mazas un vidējas intensitātes absorbcijas līniju profilos - mainīgs īso viļņu puses spārns un nemainīgs garo viļņu puses spārns;
- IRAS 22272+5435:
 - izmaiņas īsā laika posmā CN Sarkanās sistēmas absorbcijas līnijās, kas pieder (5,1) svārstību joslai, un intensīvu s procesa elementu absorbcijas līniju profilos liecina par vielas krišanu uz zvaigzni 2010. gada septembrī,
 - novērota epizodiska emisijas līniju, kas pieder vairākām CN Sarkanās un C₂ Svana sistēmas svārstību joslām, parādīšanās un izsekota to evolūcija,
 - novērotās izmaiņas molekulu spektrālīnijās interpretētas kā sekas dinamiskajiem procesiem ne tālāk kā dažu zvaigznes rādiusu attālumā no tās fotosfēras, kā piemēram, atmosfēras triecienviļņiem un lielmēroga konvekcijai;
- IRAS Z02229+6208:
 - pirmo reizi veikts šīs zvaigznes spektra monitorings tuvā IS starojuma diapazonā,
 - CN Sarkanās sistēmas spektrālīnijās, kas pieder vairākām svārstību joslām, novērots kvalitatīvi tāds pats mainīgums, kā zvaigznes IRAS 22272+5435 gadījumā, kas norāda uz vieniem un tiem pašiem dinamiskajiem procesiem abās zvaigznēs,
 - izmantojot CN Sarkanās sistēmas absorbcijas līnijas, kas pieder (2,0) svārstību joslai un C₂ Filipsa sistēmas absorbcijas līnijas, kas pieder (2,0) un (3,0) svārstību joslām, noteikts, ka apzvaigznes apvalka izplešanās ātrums ir 11.1 km/s.

Pateicības

Paldies Laimonam Začam par manis vadīšanu zinātnē un astronomijā daudzu gadu garumā. Daļa no šī darba nebūtu iespējama bez Juliusa Sperauskas un viņa palīdzības ar novērojumiem Molētu observatorijā. Man bija tas gods saņemt Kārļa Kaufmaņa piemiņas stipendiju, par ko pasakos Latvijas Universitātes fondam. Vēlos arī pateikties Mirekam Šmitam un Rišardam Šerbam par viesmīlīgo uzņemšu Toruņā. Vislielākais paldies manai draudzenei un ģimenei par dažādos veidos sniegto atbalstu.

Šajā darbā iekļautās zinātniskās publikācijas ir tapušas ar finansiālu atbalstu no Latvijas Zinātnes padomes projekta “Zvaigžņu vēlo evolūcijas stadiju pētījumi izmantojot spektroskopijas jaunākās metodes un instrumentus”, FLPP Nr. lzp-2020/1-0088.

Literatūras saraksts

- [1] F. Herwig, “Evolution of Asymptotic Giant Branch Stars”, [Annual Review of Astronomy and Astrophysics](#), 43, 435 (2005).
- [2] A. I. Karakas un J. C. Lattanzio, “The Dawes Review 2: Nucleosynthesis and Stellar Yields of Low- and Intermediate-Mass Single Stars”, [Publications of the Astronomical Society of Australia](#), 31, e030 (2014).
- [3] A. I. Karakas, J. C. Lattanzio un O. R. Pols, “Parameterising the Third Dredge-up in Asymptotic Giant Branch Stars”, [Publications of the Astronomical Society of Australia](#), 19, 515 (2002).
- [4] M. M. Miller Bertolami, “New models for the evolution of post-asymptotic giant branch stars and central stars of planetary nebulae”, [Astronomy & Astrophysics](#), 588, A25 (2016).
- [5] A. Arcones un F.-K. Thielemann, “Origin of the elements”, [The Astronomy and Astrophysics Review](#), 31, 1 (2023).
- [6] R. Alvarez, A. Jorissen, B. Plez u. c., “Envelope tomography of long-period variable stars III. Line-doubling frequency among Mira stars”, [Astronomy & Astrophysics](#), 379, 305 (2001).
- [7] B. Freytag, S. Liljegren un S. Höfner, “Global 3D radiation-hydrodynamics models of AGB stars. Effects of convection and radial pulsations on atmospheric structures”, [Astronomy & Astrophysics](#), 600, A137 (2017).
- [8] S. Höfner un H. Olofsson, “Mass loss of stars on the asymptotic giant branch. Mechanisms, models and measurements”, [The Astronomy and Astrophysics Review](#), 26, 1 (2018).
- [9] J. Krtička, J. Kubát un I. Krtičková, “Stellar wind models of central stars of planetary nebulae”, [Astronomy & Astrophysics](#), 635, A173 (2020).
- [10] R. Szczerba, N. Siódmiak, G. Stasińska un J. Borkowski, “An evolutionary catalogue of galactic post-AGB and related objects”, [Astronomy & Astrophysics](#), 469, 799 (2007).
- [11] R. Szczerba, N. Siódmiak, G. Stasińska u. c., “The second release of the Toruń catalogue of Galactic post-AGB objects: New classification scheme”, [Planetary Nebulae: An Eye to the Future](#), 283. sējums, izdevis A. Manchado, L. Stanghellini un D. Schönberner, [Proceedings of the International Astronomical Union](#) (2012), 506. lpp.
- [12] H. Van Winckel, “Post-AGB Stars”, [Annual Review of Astronomy and Astrophysics](#), 41, 391 (2003).

- [13] M. Hajduk, “The real time evolution of post-AGB stars”, *White Dwarfs as Probes of Fundamental Physics: Tracers of Planetary, Stellar and Galactic Evolution*, 357. sējums, izdevis M. A. Barstow, S. J. Kleinman, J. L. Provencal un L. Ferrario, *Proceedings of the International Astronomical Union* (2019), 154. lpp.
- [14] M. Peña, M. Parthasarathy, F. Ruiz-Escobedo un R. Manick, “Evolution of Hen 3-1357, the Stingray Nebula”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 515, 1459 (2022).
- [15] Y. A. Fadeyev, “The Nature of Anomalous Period Increase in the Pulsating Variable V725 Sgr”, *Astronomy Letters*, 48, 614 (2022).
- [16] B. J. Hrivnak, W. Lu, W. C. Bakke un P. J. Grimm, “Variability in Proto-planetary Nebulae. IX. Evidence for Evolution in a Decade”, *The Astrophysical Journal*, 939, 32 (2022).
- [17] V. P. Arkipova, M. A. Burlak, V. F. Esipov u. c., “Variability and possible rapid evolution of the hot post-AGB stars Hen 3-1347, Hen 3-1428, and LSS 4634”, *Astronomy Letters*, 40, 485 (2014).
- [18] V. G. Klochkova, V. E. Panchuk un N. S. Tavalzhanskaya, “HD 331319: A Post-AGB F Supergiant with He I Lines”, *Astronomy Letters*, 28, 49 (2002).
- [19] D. Kamath, H. Van Winckel, P. Ventura u. c., “Luminosities and Masses of Single Galactic Post-asymptotic Giant Branch Stars with Distances from Gaia EDR3: The Revelation of an s-process Diversity”, *The Astrophysical Journal Letters*, 927, L13 (2022).
- [20] Q. A. Parker, A. Acker, D. J. Frew u. c., “The Macquarie/AAO/Strasbourg H α Planetary Nebula Catalogue: MASH”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 373, 79 (2006).
- [21] B. Balick un A. Frank, “Shapes and Shaping of Planetary Nebulae”, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 40, 439 (2002).
- [22] B. J. Hrivnak, G. Van de Steene, H. Van Winckel u. c., “Where are the Binaries? Results of a Long-term Search for Radial Velocity Binaries in Proto-planetary Nebulae”, *The Astrophysical Journal*, 846, 96 (2017).
- [23] L. Decin, M. Montargès, A. M. S. Richards u. c., “(Sub)stellar companions shape the winds of evolved stars”, *Science*, 369, 1497 (2020).
- [24] J. Kluska, H. Van Winckel, Q. Coppée u. c., “A population of transition disks around evolved stars: Fingerprints of planets. Catalog of disks surrounding Galactic post-AGB binaries”, *Astronomy & Astrophysics* 658, A36 (2022).

- [25] D. A. García-Hernández un A. Manchado, “On the formation of molecules and solid-state compounds from the AGB to the PN phases”, *Journal of Physics: Conference Series*, 728, 032009 (2016).
- [26] E. J. Bakker, E. F. van Dishoeck, L. B. F. M. Waters un T. Schoenmaker, “Circumstellar C₂, CN, and CH⁺ in the optical spectra of post-AGB stars”, *Astronomy & Astrophysics*, 323, 469 (1997).
- [27] B. Balick, T. Gomez, D. Vinković u. c., “The Illumination and Growth of CRL 2688: An Analysis of New and Archival Hubble Space Telescope Observations”, *The Astrophysical Journal*, 745, 188 (2012).
- [28] G. Ramos-Larios, E. Santamaría, M. A. Guerrero u. c., “Rings and arcs around evolved stars - I. Fingerprints of the last gasps in the formation process of planetary nebulae”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 462, 610 (2016).
- [29] A. Mishra, A. Li un B. W. Jiang, “On the Relation between the Mysterious 21 μ m Emission Feature of Post-asymptotic Giant Branch Stars and Their Mass-loss Rates”, *The Astrophysical Journal*, 825, 68 (2016).
- [30] I. Gezer, H. Van Winckel, Z. Bozkurt u. c., “The WISE view of RV Tauri stars”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 453, 133 (2015).
- [31] G.-M. Oomen, H. Van Winckel, O. Pols un G. Nelemans, “Modelling depletion by re-accretion of gas from a dusty disc in post-AGB stars”, *Astronomy & Astrophysics*, 629, A49 (2019).
- [32] G. Wallerstein, “The Cepheids of Population II and Related Stars”, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 114, 689 (2002).
- [33] B. J. Hrivnak, W. Lu, R. E. Maupin un B. D. Spitzbart, “Variability in Proto-planetary Nebulae. I. Light Curve Studies of 12 Carbon-rich Objects”, *The Astrophysical Journal*, 709, 1042 (2010).
- [34] T. Aikawa, “The instability strip and pulsation features of post-AGB star models”, *Astronomy & Astrophysics*, 514, A45 (2010).
- [35] Y. A. Fadeyev, “Evolution and Pulsations of Population I Post-AGB Stars”, *Astronomy Letters* 45, 521 (2019).
- [36] C. Sánchez Contreras, R. Sahai, A. Gil de Paz un R. Goodrich, “Echelle Long-Slit Optical Spectroscopy of Evolved Stars”, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 179, 166 (2008).
- [37] D. Bollen, D. Kamath, H. Van Winckel u. c., “The structure of jets launched from post-AGB binary systems”, *Astronomy & Astrophysics*, 666, A40 (2022).
- [38] A. Lebrè, N. Mauron, D. Gillet un D. Barthès, “A first optical spectroscopic monitoring of the post-AGB star SAO 96709=IRAS 07134+1005: pulsation and shock waves”, *Astronomy & Astrophysics*, 310, 923 (1996).

- [39] L. Začs, J. Sperauskas, F. A. Musaev u. c., “Dynamical Phenomena in the Atmosphere of the Proto-Planetary Nebula IRAS 22272+5435”, *The Astrophysical Journal Letters*, **695**, L203 (2009).
- [40] G. Van de Steene, B. Hrivnak, H. Winckel, J. Sperauskas un D. Bohlender, “Spectroscopic and Photometric Variability of Three Oxygen Rich Post-AGB “Shell” Objects”, *Galaxies*, **6**, 131 (2018).
- [41] V. G. Klochkova, “Circumstellar envelope manifestations in the optical spectra of evolved stars”, *Astrophysical Bulletin*, **69**, 279 (2014).
- [42] M. Gangi, M. Giarrusso, M. Munari u. c., “Long-term photospheric instabilities and envelopes dynamics in the post-AGB binary system 89 Herculis”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **500**, 926 (2021).
- [43] L. Začs, F. Musaev, B. Kaminsky u. c., “Spectroscopic Variability of IRAS 22272+5435”, *The Astrophysical Journal*, **816**, 3 (2016).
- [44] N. P. Ikonnikova, V. I. Shenavrin, G. V. Komissarova u. c., “Multicolor Photometry and Peculiarities of the Spectrum for the post-AGB Candidate AU Vulpeculae (IRAS 20160+2734)”, *Astronomy Letters*, **47**, 485 (2021).
- [45] C. Jurgenson, D. Fischer, T. McCracken u. c., “Design and Construction of VUES: The Vilnius University Echelle Spectrograph”, *Journal of Astronomical Instrumentation*, **5**, 1650003 (2016).
- [46] F. A. Musaev, G. A. Galazutdinov, A. V. Sergeev u. c., “Coudé echelle spectrometer for the Terskol 2-meter telescope”, *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **15**, 216 (1999).
- [47] J. Moultaqa, S. A. Ilovaisky, P. Prugniel un C. Soubiran, “The ELODIE Archive”, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, **116**, 693 (2004).
- [48] A. Baranne, D. Queloz, M. Mayor u. c., “ELODIE: A spectrograph for accurate radial velocity measurements”, *Astronomy & Astrophysics Supplement Series*, **119**, 373 (1996).
- [49] J.-F. Donati, C. Catala, J. D. Landstreet un P. Petit, “ESPaDOnS: The New Generation Stellar Spectro-Polarimeter. Performances and First Results”, *Solar Polarization* **4**, 358. sējums, izdevis R. Casini un B. W. Lites, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series* (2006), 362. lpp.
- [50] D. Durand, S. Gaudet, D. Crabtree, N. Hill un M. Sauvage, “The CFHT Archive”, *Handling and archiving data from ground-based telescopes*, **50**. sējums, izdevis M. A. Albrecht un F. Pasian, *European Southern Observatory Conference and Workshop Proceedings* (1994), 25. lpp.

- [51] A. Quirrenbach, P. J. Amado, J. A. Caballero u. c., “CARMENES instrument overview”, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V*, 9147. sējums, izdevis S. K. Ramsay, I. S. McLean un H. Takami, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series (2014), 91471F.
- [52] G. A. Galazutdinov, “DECH: A Software Package for Astronomical Spectral Data Processing and Analysis”, *Astrophysical Bulletin*, 77, 519 (2022).
- [53] N. E. Piskunov, F. Kupka, T. A. Ryabchikova, W. W. Weiss un C. S. Jeffery, “VALD: The Vienna Atomic Line Data Base”, *Astronomy & Astrophysics Supplement Series*, 112, 525 (1995).
- [54] F. Kupka, N. Piskunov, T. A. Ryabchikova, H. C. Stempels un W. W. Weiss, “VALD-2: Progress of the Vienna Atomic Line Data Base”, *Astronomy & Astrophysics Supplement Series*, 138, 119 (1999).
- [55] W. Chen, K. Kawaguchi, P. F. Bernath un J. Tang, “Simultaneous analysis of the Ballik-Ramsay and Phillips systems of C₂ and observation of forbidden transitions between singlet and triplet states”, *The Journal of Chemical Physics*, 142, 064317 (2015).
- [56] B. J. Hrivnak, W. Lu, J. Sperauskas u. c., “Studies of Variability in Proto-planetary Nebulae. II. Light and Velocity Curve Analyses of IRAS 22272+5435 and 22223+4327”, *The Astrophysical Journal*, 766, 116 (2013).
- [57] J. H. He, R. Szczerba, T. I. Hasegawa un M. R. Schmidt, “Observed Relationship between CO 2-1 and Dust Emission during the Post-asymptotic-giant-branch Phase”, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 210, 26 (2014).
- [58] B. J. Hrivnak un S. Kwok, “Discovery of Two New, Carbon-rich Proto-Planetary Nebulae:IRAS Z02229+6208 and IRAS 07430+1115”, (1999), *The Astrophysical Journal*, 513, 869 (1999).
- [59] B. J. Hrivnak un J. H. Bieging, “CO J = 2-1 and 4-3 Observations of Proto-planetary Nebulae: Time-variable Mass Loss”, *The Astrophysical Journal*, 624, 331 (2005).
- [60] R. L. Kurucz, “ATLAS12, SYNTH3, ATLAS9, WIDTH9, et cetera”, *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi*, 8, 14 (2005).
- [61] Y. V. Pavlenko, “Model Atmospheres of Red Giants”, *Astronomy Reports*, 47, 59 (2003).
- [62] S. Blanco-Cuaresma, C. Soubiran, U. Heiter un P. Jofré, “Determining stellar atmospheric parameters and chemical abundances of FGK stars with iSpec”, *Astronomy & Astrophysics*, 569, A111 (2014).

- [63] R. O. Gray un C. J. Corbally, “The Calibration of MK Spectral Classes Using Spectral Synthesis. I. The Effective Temperature Calibration of Dwarf Stars”, [The Astronomical Journal](#), *107*, 742 (1994).
- [64] V. V. Kovtyukh un S. M. Andrievsky, “Do we really obtain reliable elemental abundances for supergiant stars?”, [Astronomy & Astrophysics](#), *351*, 597 (1999).
- [65] J. D. Fernie, “Pulsational mode switching in HD 161796”, [The Astrophysical Journal](#), *265*, 999 (1983).
- [66] J. D. Fernie un R. F. Garrison, “New results for HD 161796”, [The Astrophysical Journal](#), *285*, 698 (1984).
- [67] W. P. Bidelman, “Spectral Classification of Stars Listed in Miss Payne’s Catalogue of C Stars”, [The Astrophysical Journal](#), *113*, 304 (1951).
- [68] T. M. Gledhill un J. A. Yates, “Mid-infrared imaging of the dust shell around the post-asymptotic giant branch star HD 161796”, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), *343*, 880 (2003).
- [69] M. Min, S. V. Jeffers, H. Canovas u. c., “The color dependent morphology of the post-AGB star HD 161796”, [Astronomy & Astrophysics](#), *554*, A15 (2013).
- [70] T. Kipper, “Optical Spectrometry of the Post-AGB Star HD 161796”, [Baltic Astronomy](#), *16*, 191 (2007).
- [71] Y. Takeda, H. Taguchi, K. Yoshioka u. c., “Abundances of Volatile Elements in Post-AGB Candidates”, [Publications of the Astronomical Society of Japan](#), *59*, 1127 (2007).
- [72] R. E. Luck, “Parameters and Abundances in Luminous Stars”, [The Astronomical Journal](#), *147*, 137 (2014).
- [73] R. E. Luck, H. E. Bond un D. L. Lambert, “Chemical Compositions of Four High-Latitude A–F Supergiants”, [The Astrophysical Journal](#), *357*, 188 (1990).
- [74] O. Suárez, P. García-Lario, A. Manchado u. c., “A spectroscopic atlas of post-AGB stars and planetary nebulae selected from the IRAS point source catalogue”, [Astronomy & Astrophysics](#), *458*, 173 (2006).
- [75] G. Stasińska, R. Szerbera, M. Schmidt un N. Siódmiak, “Post-AGB stars as testbeds of nucleosynthesis in AGB stars”, [Astronomy & Astrophysics](#), *450*, 701 (2006).
- [76] B. J. Hrivnak, W. Lu un K. A. Nault, “Variability in Proto-planetary Nebulae. IV. Light Curve Analysis of Four Oxygen-rich, F Spectral Type Objects”, (2015), [The Astronomical Journal](#), *149*, 184 (2015).

- [77] B. J. Hrivnak, G. Van de Steene, H. Van Winckel, W. Lu un J. Sperauskas, “Variability in Proto-planetary Nebulae. V. Velocity and Light Curve Analysis of IRAS 17436+5003, 18095+2704, and 19475+3119”, [The Astronomical Journal](#), **156**, 300 (2018).
- [78] A. R. Hasanova, A. M. Khalilov un Y. M. Maharramov, “Investigation of the H α spectral line and the Na D sodium doublet in the spectrum of the post-AGB star HD 161796”, [Kinematics and Physics of Celestial Bodies](#), **30**, 288 (2014).
- [79] C. J. Skinner, M. M. Meixner, G. W. Hawkins u. c., “Mid-Infrared Images of the Post-Asymptotic Giant Branch Star HD 161796”, [The Astrophysical Journal Letters](#), **423**, L135 (1994).
- [80] C. A. L. Bailer-Jones, J. Rybizki, M. Fouesneau, M. Demleitner un R. Andrae, “Estimating Distances from Parallaxes. V. Geometric and Photogeometric Distances to 1.47 Billion Stars in Gaia Early Data Release 3”, [The Astronomical Journal](#), **161**, 147 (2021).
- [81] N. K. Rao un B. E. Reddy, “High-resolution spectroscopy of the high galactic latitude RV Tauri star CE Virginis”, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), **357**, 235 (2005).
- [82] K. Lind, M. Asplund, P. S. Barklem un A. K. Belyaev, “Non-LTE calculations for neutral Na in late-type stars using improved atomic data”, [Astronomy & Astrophysics](#), **528**, A103 (2011).
- [83] H. Reggiani, A. M. Amarsi, K. Lind u. c., “Non-LTE analysis of K I in late-type stars”, [Astronomy & Astrophysics](#), **627**, A177 (2019).
- [84] K. Lodders, “Solar System Abundances and Condensation Temperatures of the Elements”, [The Astrophysical Journal](#), **591**, 1220 (2003).
- [85] L. Začs, V. G. Klochkova un V. E. Panchuk, “The chemical composition of the post-AGB star, protoplanetary nebula candidate IRAS 22272+5435 =SAO 34504”, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), **275**, 764 (1995).
- [86] B. E. Reddy, D. L. Lambert, G. Gonzalez un D. Yong, “Spectroscopic Analysis of Two Carbon-rich Post-Asymptotic Giant Branch Stars”, [The Astrophysical Journal](#), **564**, 482 (2002).
- [87] K. De Smedt, H. Van Winckel, D. Kamath u. c., “Detailed homogeneous abundance studies of 14 Galactic s-process enriched post-AGB stars: In search of lead (Pb)”, [Astronomy & Astrophysics](#), **587**, A6 (2016).
- [88] B. J. Hrivnak un S. Kwok, “The Carbon-rich Proto-Planetary Nebula IRAS 22272+5435”, [The Astrophysical Journal](#), **371**, 631 (1991).

- [89] M. R. Schmidt, L. Začs, M. Pulecka un R. Szczerba, “The excitation of circumstellar C₂ in carbon-rich post-AGB object IRAS 22272+5435”, *Astronomy & Astrophysics*, 556, A46 (2013).
- [90] B. J. Hrivnak, S. Kwok un T. R. Geballe, “Near-Infrared Spectroscopy of Proto-Planetary Nebulae”, *The Astrophysical Journal*, 420, 783 (1994).
- [91] V. G. Klochkova, V. E. Panchuk un N. S. Tavolganskaya, “New spectroscopic observations of the post-AGB star V354 Lac = IRAS 22272+5435”, *Astrophysical Bulletin*, 64, 155 (2009).
- [92] B. Freytag un S. Höfner, “Three-dimensional simulations of the atmosphere of an AGB star”, *Astronomy & Astrophysics*, 483, 571 (2008).
- [93] C. S. Kochanek, B. J. Shappee, K. Z. Stanek u. c., “The All-Sky Automated Survey for Supernovae (ASAS-SN) Light Curve Server v1.0”, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 129, 104502 (2017).
- [94] W. Nowotny, S. Höfner un B. Aringer, “Line formation in AGB atmospheres including velocity effects. Molecular line profile variations of long period variables”, *Astronomy & Astrophysics*, 514, A35 (2010).
- [95] S. Liljegren, S. Höfner, B. Freytag un S. Bladh, “Atmospheres and wind properties of non-spherical AGB stars”, *Astronomy & Astrophysics*, 619, A47 (2018).
- [96] B. E. Reddy, E. J. Bakker un B. J. Hrivnak, “An Abundance Analysis of Two Carbon-rich Proto-Planetary Nebulae: IRAS Z02229+6208 and IRAS 07430+1115”, *The Astrophysical Journal*, 524, 831 (1999).
- [97] V. G. Klochkova un V. E. Panchuk, “Detailed Spectroscopy of Post-AGB Supergiant GSC 04050–02366 in IRAS Z02229+6208 IR Source System”, *Astrophysical Bulletin*, 77, 292 (2022).