



LATVIJAS UNIVERSITĀTE
FIZIKAS UN MATEMĀTIKAS FAKULTĀTE

Oļesja Smirnova

Nestacionāru procesu pētījumi maiņzvaigznēs

Promocijas darba – publikāciju kopas kopsavilkums

Darba vadītājs Dr. Phys. Laimons Začs

Rīga, 2011

Promocijas darbs izstrādāts
Latvijas Universitātes
Fizikas un matemātikas fakultātē
Lāzeru centrā
Laika posmā no 2007. gada līdz 2011. gadam



Eiropas Sociālā fonda projekta
„Atbalsts doktora studijām
Latvijas Universitātē”,
Nr.
2009/0138/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/
VIAA/004

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

Darba zinātniskais vadītājs: Dr. Phys., vadošais pētnieks Laimons Začs

Anotācija

Nestacionāri procesi tiek novēroti dažādu evolūcijas stadiju un temperatūru zvaigznēs. Visbiežāk tie ir saistīti ar vielas pārnešību dubultsistēmās, vai zvaigžņu vielas izmešanu apzvaigznes telpā. Analizējot šo procesu izraisītās īpatnības zvaigžņu fotometriskajā uzvedībā un raksturīgajās spektra detaļās, ir iespējams labāk izprast šo procesu fizikālo mehānismu. Darba pamatā ir izvēlēto nestacionāro zvaigžņu (novu, AGB un post-AGB zvaigžņu) kompleksi novērojumi, to analīze un interpretācija piesaistot gan oriģinālos (fotometrijas un spektroskopijas), gan literatūras datus. Novu optisko uzliesmojumu pētījumos pēc M31 galaktikas 1999.-2007. gadu uzņēmumiem tika atkāšas sešas jaunās novas, divas no kurām tika identificētas ar supermīkstā rentgenstarojuma avotiem. Divu oglekļa zvaigžņu ar ilgtermiņa satumsumiem V1983 Cyg un V2074 Cyg augstas izšķirtspējas spektroskopija parādīja, ka šīs zvaigznes ir piedzīvojušas masas zaudēšanas epizodes, kuru rezultātā pašlaik apzvaigžņu viela ar lielu ātrumu ($\sim -60 \text{ km s}^{-1}$) kustās prom no zvaigznēm. V1983 Cyg spektrā tika konstatēta neparasti intensīva H α absorbcijas līnija, kas varētu liecināt par aktīvās hromosfēras esamību šai zvaigznei vai kompanjonzvaigznes pastāvēšanu. Protopanētārā miglāja IRAS22272+5435 kompleksie fotometriskie un spektroskopiskie novērojumi ļāva secināt, ka šī zvaigzne ir pārdzīvojusi masas zaudēšanas epizodes, kuras iespējams ir inducējušas zvaigznes pulsācijas.

Abstract

Nonstationary processes are observed in the stars of various temperatures and evolutionary stages. Most frequently they are related to the mass transfer within the binary systems and the star's mass ejection. By analyzing the peculiarities in the observed photometric behavior and characteristic spectral features induced by these processes, it is possible to better understand the underlying physical mechanisms. This work is based on the complex observations of the selected nonstationary stars (novae, AGBs and post-AGB) and those analysis and interpretation using both the original (photometric and spectroscopic) and literature data. In our studies of the optical novae outbursts in M31 galaxy on the photographs taken in 1999-2007, six previously unknown novae have been discovered, two of which were identified with the supersoft X-ray sources. The high-resolution spectroscopy of two carbon stars with long-term obscurations V1983 Cyg and V2074 Cyg showed, that these stars have experienced the mass-loss episodes, resulting in the presently observed expansion of the circumstellar matter at high velocities ($\sim -60 \text{ km s}^{-1}$). In the spectrum of V1983 Cyg unusually strong H α absorption line has been detected, that may indicate the presence of the active chromospheres in this star or existence of a binary companion. The simultaneous photometric and spectroscopic observations of the proto-planetary nebula IRAS22272+5435 suggested that the star experiences mass-loss episodes probably induced by stellar pulsations.

Saturs

1.	Ievads.....	7
1.1	Darba tēmas aktualitāte un pamatojums.....	7
1.2	Darba mērķi un uzdevumi.....	8
1.3	Darba zinātniskā novitāte.....	9
1.4	Autora ieguldījums.....	10
2.	Literatūras apskats.....	11
2.1	Klasisko novu uzliesmojumi.....	11
2.1.1	Novu uzliesmojuma mehānisms.....	11
2.1.2	Sakarības starp novas optiskā uzliesmojuma parametriem un fizikālajām īpašībām.....	13
2.1.3	Novu supermīkstā rentgenstarojuma emisijas fāze.....	14
2.1.4	Novu pētījumi Andromēdas galaktikā (M31).....	15
2.2	Oglekļa zvaigznes.....	16
2.2.1	Zvaigznes ķīmiskā sastāva izmaiņas AGB fāzes laikā.....	17
2.2.2	Oglekļa zvaigžņu pamatklašu raksturojums.....	20
2.2.3	Oglekļa zvaigznes ar ilgtermiņa spožuma satumsumiem.....	21
2.3	Protoplanetārie miglāji.....	24
3.	Pētījumos izmantotās metodikas un novērojumu dati.....	26
3.1	M31 galaktikas novu pētījumu metodika.....	26
3.1.1	Novu meklēšanas metodikas un astrometrija.....	26
3.1.2	Novu fotometrija.....	26
3.2	Oglekļa zvaigžņu pētījumu metodika.....	29
3.2.1	Augstās izšķirtspējas spektru novērojumi un datu pirmapstrāde.....	29
3.2.2	Spektroskopijas datu analīzes metodika.....	30
3.2.3	Fotometrijas datu analīzes metodika.....	31
3.3	Protoplanetārā miglāja IRAS 22272+5435 novērojumi un datu pirmapstrāde.....	33
4.	Pētījumu rezultāti un diskusija.....	36
4.1	Novu pētījumi M31 galaktikā.....	36

4.2	Divu oglekļa zvaigžņu ar ilgtermiņa spožuma satumsumiem augstas izšķirtspējas spektroskopija un spektrālās enerģijas sadalījuma analīze.....	42
4.3	Proto-planetārā miglāja IRAS 22272+5435 fotometriskie pētījumi.....	52
5.	Rezultātu kopsavilkums.....	56
	Promocijas darbā iekļautās autores publikācijas.....	58
	Autores publikācijas par citām tēmām.....	58
	Publikācijas konferenču izdevumos.....	59
	Ziņojumi un stenda referāti zinātniskajās konferencēs.....	59
	Literatūras saraksts.....	60

1. Ievads

1.1. Darba tēmas aktualitāte un pamatojums

Evolūcijas rezultātā zvaigžņu raksturlielumi mainās lēni un cilvēka mūža laikā izmaiņas parasti nav pamanāmas, taču dažu zvaigžņu ārējos slāņos salīdzinoši īsā laika periodā notiek būtiskas fizikālo parametru izmaiņas, kas konstatējamas ar spektroskopijas un fotometrijas metodēm. Nestacionāri procesi tiek novēroti dažādu evolūcijas stadiju un temperatūru zvaigznēs. Visbiežāk nestacionārie procesi zvaigznēs saistīti ar vielas pārneši dubultsistēmās, vai zvaigžņu vielas izmešanu apzvaigznes telpā. Piemēram, gāzes pārplūde zvaigžņu dubultsistēmā uz karstu balto punduri izraisa kodoltermisko eksploziju, kas izpaužas kā zvaigznes spožuma un spektra dramatiskas izmaiņas (novas fenomēns). Lai gan novu veidošanās mehānisms kopumā ir izprasts, tomēr detaļas joprojām prasa vispusīgu izpēti, piemēram, rentgenstarojuma ģenerēšanās novas uzliesmojumā. Novu populācijas un uzliesmojuma teorētiskajai modelēšanai joprojām trūkst homogēnu novērojumu datu, kādi var tikt iegūti pētot šos objektus mūsu tuvākajā spirālgalaktikā M31. Joprojām mazpētīti ir nestacionārie procesi citās vēlo evolūcijas stadiju zvaigznēs, piemēram, oglekļa zvaigznēs, kuras ir Latvijas astrofiziķu tradicionāls pētījumu objekts. Ilgstoši auksto pulsējošo zvaigžņu fotometriskie pētījumi Baldones observatorijā deva iespēju konstatēt jauna tipa maiņzvaigzni, ekstremāli aukstu R Coronae Borealis (RCB) tipa zvaigzni DY Persei, kurai ir raksturīgas straujas un neprognozējamas spožuma, un spektra izmaiņas. Nesenie DY Per spektroskopiskie pētījumi parāda zvaigžņu vielas izvirdumus, kuros Doplera ātrums sasniedz 200 km/s. Tagad literatūrā šai zvaigznei fotometriski līdzīgi objekti tiek dēvēti par DY Per tipa zvaigznēm, tomēr to saistība ar RCB zvaigznēm, kā arī tajās noritējošo nestacionāro procesu mehānisms joprojām nav noskaidroti spektroskopisko pētījumu trūkuma dēļ. Dažu post-AGB zvaigžņu spektros, kas evolūcijas ķēdē atrodas pēc oglekļa (AGB) zvaigznēm, konstatētas izmaiņas, kas liecina par nestacionāriem procesiem augšējās atmosfēras slāņos. Nestacionārie procesi post-AGB zvaigznēs sistemātiski nav pētīti un svarīgi noskaidrot to lomu apzvaigznes vides formēšanā.

Šī darba ietvaros tiek pētītas minētās zvaigžņu grupas (novas, AGB un post-AGB zvaigznes, DY Per tipa zvaigznes), kurām ir konstatējams novērojumu datu trūkums un līdz ar to pastāv neskaidrības par to fizikālajām īpašībām, vai tajos noritošo procesu mehānismu. Tā kā nestacionārie procesi, kas noris zvaigžņu atmosfērās, mēdz izpausties ar neparasto zvaigznes spožuma maiņu raksturu un/vai īpatnējām spektru īpašībām, ir svarīga šādu objektu virspusējā izpēte, pielietojot fotometrijas un spektroskopijas metodes. Pētījumā tiek veikti kompleksi šāda tipa zvaigžņu novērojumi un iegūto datu analīze, un interpretācija piesaistot gan oriģinālos, gan literatūras datus.

1.2 Darba mērķi un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir iegūt, apkopot un analizēt novērojumu datus par izvēlētajām zvaigznēm, kuras atrodas evolūcijas stadijā pēc galvenās secības (novas, AGB un post-AGB zvaigznes) un kuru atmosfērās norisinās nestacionārie procesi, izmantojot fotometrijas, spektroskopijas un teorētisko spektru aprēķināšanas metodes. Darba mērķi saistībā ar katru pētāmo zvaigžņu grupu ir sekojošie:

- 1) Noteikt M31 galaktikā 1999-2005. gadā uzliesmojošo novu fotometriskos un, ja nepieciešams, astrometriskos parametrus; pārbaudīt šo novu saistību ar rentgenavotiem M31 galaktikā;
- 2) Noskaidrot post-AGB zvaigznes IRAS22272+5435 spožuma un enerģijas sadalījuma maiņu raksturu šī objekta komplekso novērojumu laikā (fotometrisko, spektroskopisko un Doplera ātruma mērījumu), lai precizētu tā radiālā ātruma maiņu mehānismu;
- 3) Noskaidrot oglekļa zvaigžņu V1983 Cyg un V2074 Cyg spektru īpašības un noteikt šo zvaigžņu parametrus; izmantojot iegūtos datus izdarīt secinājumus par tām novēroto neparasto vizuālā spožuma maiņu dabu un cēloņus.

Promocijas darba uzdevumi

1. Veikt optisko novu uzliesmojumu izpēti M31 galaktikā, kuras tika identificētas uz Baldones observatorijas 1999-2005. gadu fotogrāfiskajām platēm:
 - a) Noteikt darba autores un citu autoru identificēto novu fotometriskās īpašības un jaunatklātajām zvaigznēm veikt precīzo astrometriju;

- b) Pārbaudīt optisko uzliesmojumu saistību ar supermīkstā rentgenstarojuma avotiem M31 galaktikā un izmantojot fotometrijas datus precizēt novu rentgenstarošanas fāzes parametrus.
2. Veikt proto-planetārā miglāja IRAS22272+5435 fotometriskos pētījumus optiskajā diapazonā paralēli šī objekta veiktajiem spektroskopiskiem novērojumiem un Doplera ātrumu mērījumiem:
 - a) Veikt zvaigznes fotometriskos novērojumus *BVRI*-joslās ar 1.2m Baldones Šmita teleskopu septiņu mēnešu laika intervālā un reducēt iegūtos novērojumu datus;
 - b) Veikt zvaigznes spožuma mērījumus, iegūt spožuma maiņas līknes *BVRI*-joslās, noteikt krāsu indeksu izmaiņas atkarībā no zvaigznes fotometriskās fāzes.
 - c) Salīdzināt iegūtos fotometrijas datus ar radiālo ātrumu mērījumu rezultātiem.
 3. Veikt auksto oglekļa zvaigžņu ar neparasto spožuma mainīguma raksturu izpēti, pielietojot augstās izšķirtspējas spektroskopijas metodi un sintētisko spektru aprēķināšanu:
 - a) Novērot oglekļa zvaigžņu augstās izšķirtspējas spektrus ar 2.6m Ziemeļvalstu Optisko Teleskopu un veikt novērojumu redukciju;
 - b) Analizēt iegūtos spektrus, pielietojot zvaigžņu spektroskopijas metodiku, kā arī sintētisko spektru aprēķināšanas metodi;
 - c) Izdarīt secinājumus par pētāmo zvaigžņu līdzību aukstajai RCB zvaigznei DY Persei, kā arī par zvaigznes neparasta spožuma mainīguma iespējamiem cēloņiem.

1.3 Darba zinātniskā novitāte

Darba autore ir veikusi novu meklējumus uz Baldones arhīva M31 galaktikas uzņēmumiem, novu astrometriskos mērījumus, lielāko daļu no fotometriskajiem novu mērījumiem, novu identificēšanu ar rentgenstarojuma avotiem, novu meklējumus rentgenstarojuma avotu pozīcijās un daļēji novu parametru noteikšanu. Autore veica oglekļa zvaigžņu V1983 Cyg, V2074 Cyg, kā arī DY Per augstās izšķirtspējas spektru

novērojumus ar 2.6m Ziemeļvalstu optisko teleskopu, spektru pirmapstrādi, to analīzi un iegūto rezultātu interpretāciju. Spektru analīze tika veikta gan ar salīdzināšanas metodi, gan rēķinot teorētiskos spektrus. Pētāmajām oglekļa zvaigznēm tika veikta arī literatūrā atrodamo fotometrisko datu analīze. Darba gaitā pie augstās izšķirtspējas spektru analīzes tika saņemtas konsultācijas un ieteikumi no darba vadītāja un kolēģiem. Darba autore veica gandrīz visus protoplanetārā miglāja IRAS22272+5435 fotometriskos novērojumus ar 1.2m Baldones Šmita teleskopu, veica iegūto novērojumu datu pirmapstrādi, zvaigznes fotometriskos mērījumus un krāsu indeksu noteikšanu. Darba autore ir līdzautore piecām par promocijas darba tēmu publicētajām publikācijām, kā arī ir vēl vienas publikācijas vienīgā autore. Darba rezultāti ir prezentēti starptautiskajās konferencēs piedaloties tajās ar stenda referātiem, kā arī Latvijas Universitātes konferencēs ar mutiskiem referātiem un publicēti divos konferenču izdevumos.

1.4 Autora ieguldījums

Pētot novu uzliesmojumus M31 galaktikā tika pirmo reizi aprakstīti seši līdz šim nezināmie objekti un noteikti to parametri. Pētījumā iegūtie dati par novu pozīcijām un optiskā uzliesmojuma īpašībām ļāvuši ieviest skaidrību par dažu optisko objektu identitāti rentgenstaru diapazonā, kā arī labojot citu autoru publikācijās pieļautās kļūdas. Publicētie dati par optiskajām novām tiek aktīvi lietoti novu supermīkstā rentgenstarojuma emisijas fāzes pētījumos.

Šī darba ietvaros tika pirmo reizi veikta augstas izšķirtspējas spektru analīze neperiodiskajām oglekļa maiņzvaigznēm ar ilgtermiņa satumsumiem, kuras pēc sava spožuma maiņu rakstura ir līdzīgas DY Per tipa zvaigznēm. Uz šādas analīzes nepieciešamību šī tipa zvaigžņu ķīmiskā sastāva un fizikālo īpašību noskaidrošanai, kā arī korektai klasificēšanai, tika daudzkārt norādīts zinātniskajā literatūrā.

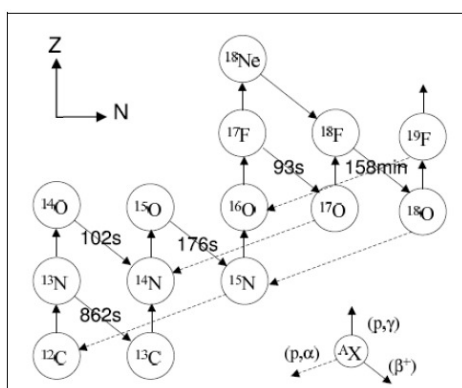
Pirmo reizi fotometriskie protoplanetārā miglāja IRAS22272+5435 novērojumi tika veikti kompleksi ar šī objekta spektroskopiskajiem un Doplera ātruma mērījumiem. Tas ļāva veikt spektru pētījumus dažādu pulsāciju fāzu laikā un izdarīt secinājumus par šīs zvaigznes piedzīvoto masas zaudēšanas epizožu saistību ar tās pulsācijām. Iegūtie fotometrijas dati var tikt izmantoti šīs zvaigznes ilgtermiņa perioda maiņas pētījumos.

1. Literatūras apskats

2.1 Klasisko novu uzliesmojumi

2.1.1 Novu uzliesmojuma mehānisms

Klasiskās novas uzliesmojumu izraisa kodoltermiskais sprādziens ciešajā dubultzvaigžņu sistēmā. No Zemes tas var tikt novērots kā straujš zvaigznes spožuma pieaugums līdz pat simts tūkstošiem reizēm ar sekojošu raksturīgo spožuma krišanu līdz sākotnējai vērtībai. Novas dubultzvaigžņu sistēmas primārā komponente ir CO- vai ONe-tipa baltais punduris, uz kura virsmas notiek vielas pārnese (akrēcija) no zemākas masas galvenās secības kompanjona, kurš aizpilda savu Roša tilpumu. Tipisks akrēcijas ātrums šādās sistēmās ir $M_{\text{acc}} \sim 10^{-9} M_{\odot}$ gadā, bet sistēmas starжда mierīgajā fāzē ir līdzīga Saules starждаudai (Bode 2010). Pieaugot ar ūdeņradi bagātās akrēcētās vielas masai uz baltā pundura virsmas, paaugstinās spiediens šī slāņa pamatnē, līdz elektroni tajā kļūst daļēji deģenerēti. Rezultātā temperatūra strauji pieaug, un tai sasniedzot 2×10^7 K vērtību, akrēcētajā apvalkā sākas CNO kodolsintēzes cikls (Starrfield et al. 1998). Tam seko eksponenciāls temperatūras pieaugums, kas paātrina kodoltermisko reakciju ātrumu. Kodolreakciju laikā tiek ražoti β^+ -radioaktīvie kodoli ar īsiem sabrukšanas periodiem, kuru

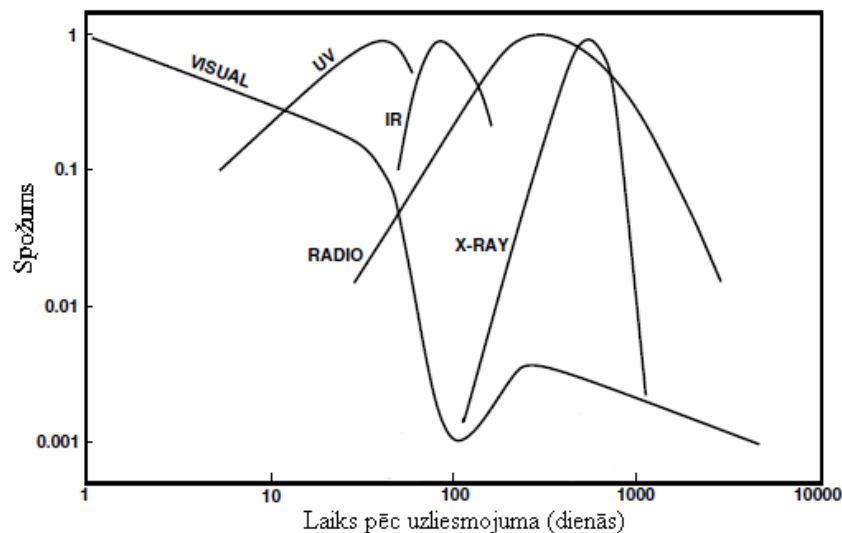


2.1. att. Ūdeņraža kodoltermiskās degšanas CNO cikls. Ar skaitļiem ir norādīti β^+ -radioaktīvo kodolu dzīves laiki (Hernanz 2005).

sabrukšanas laiks sākotnēji ir mazāks par protona satveršanas laiku, tādēļ CNO cikls norisinās līdzsvaroti (2.1. attēls). Tomēr temperatūrai paaugstinoties līdz $\sim 10^8$ K, protona satveršanas laiks kļūst mazāks par β^+ -radioaktīvo kodolu sabrukšanas laiku, un CNO cikls kļūst eksplozīvs, veidojas konvektīvais apgabals, un konvekcijas rezultātā β^+ -radioaktīvie kodoli tiek nogādāti uz augšējiem slāņiem, kur to sabrukums veicina liela enerģijas daudzuma izdalīšanos un apvalka strauju izplešanos – notiek novas uzliesmojums.

Starojuma spiediena ietekmē notiek novas apvalka izplešanās ar ātrumu no dažiem simtiem līdz dažiem tūkstošiem kilometru sekundē. Optiskais maksimums tiek novērots, kad fotosfēras rādiuss sasniedz maksimālo vērtību, $\sim 100 R_{\odot}$, kas atbilst dažu tūkstošu grādu efektīvajai temperatūrai. Pie šīs temperatūras notiek ūdeņraža rekombinācija, apvalka caurspīdība pieaug un zvaigznes fotosfēra saraujas, bet tās bolometriskā starjauca paliek konstanta, jo uz baltā pundura virsmas turpinās līdzsvarota kodoltermiskā degšana. Samazinoties fotosfēras rādiusam, palielinās zvaigznes efektīvā temperatūra, kā rezultātā enerģijas plūsmas maksimums novirzās uz īsākiem viļņa garumiem, ko vizuālajā diapazonā novēro kā novas spožuma kritumu (2.2. attēls). Kad kodoltermiskās degšanas rezultātā apvalka masa samazinās zem minimālās vērtības, kas ir nepieciešama līdzsvarotas ūdeņraža kodoldegšanas uzturēšanai, kodolreakcijas apstājas un sākas baltā pundura atdzišana (Hachisu & Kato 2006). Klasisko novu sistēmās laiks starp uzliesmojumiem ir $\sim 10^3 - 10^5$ gadi, un katra sistēma var pārdzīvot tūkstošiem uzliesmojumu (Warner 2005).

Novas, kurām tiek reģistrēts vairāk nekā viens uzliesmojums, sauc par atkārtotajām novām. Pašlaik mūsu Galaktikā ir zināmas tikai 10 atkārtotās novas, un vēl daži kandidāti ir zināmi citās galaktikās. Atkārtotās novas tiek uzskatītas par Ia tipa pārnovu izraisītāju kandidātiem, jo īsais uzliesmojumu atkārtotāšanās periods liecina par to, ka šajās sistēmās



2.2. att. Klasiskās novas spektrālās enerģijas sadalījuma evolūcijas shēma atkarībā no laika, kas ir pagājis kopš novas uzliesmojuma sākuma (pēc Bode 2010).

baltā pundura masa ir tuva Čandrasekāra limitam. Tā kā pēc katra novas uzliesmojuma baltā pundura masa arvien pieaug, beidzot tā var sasniegt kritisko vērtību, ka rezultātā var notikt pārnovas sprādziens ar pilnīgu baltā pundura iznīcināšanu (Kanabka et al. 1999).

2.1.2. Sakarības starp novas optiskā uzliesmojuma parametriem un fizikālajām īpašībām

Par novas uzliesmojuma pamata raksturīpašību tiek pieņemta tās optiskā spožuma maiņas līkne (2.2. attēls). Galvenie novas spožuma maiņas līknes raksturlielumi ir maksimālais sasniegtais spožums, kā arī spožuma krišanas ātrums vai apgrieztais lielums – satumšanas laiks. Satumšanas laiks t_2 (t_3) reprezentē laiku, kas ir nepieciešams, lai novas spožums pēc maksimuma B vai V fotometriskajā joslā samazinātos par diviem (trim) zvaigžņlielumiem. Izmantojot šos lielumus, definē spožuma krišanas ātrumus $v_2 = 2/t_2$ un $v_3 = 3/t_3$. Atkarībā no spožuma krišanas ātruma lieluma, novas sadala piecās klasēs (sk. 1. tabulu). Teorētiskie pētījumi parādīja, ka novas satumšanas laiks ir sekojoši atkarīgs no sistēmas fizikāliem parametriem (Livio 1992):

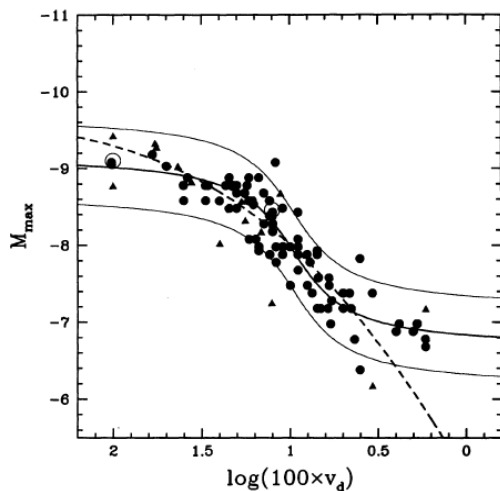
$$L_{Edd} t_3 \cong \alpha \frac{GM_{WD}}{R_{WD}} M_e, \quad (1)$$

kur α ir konstante, L_{Edd} ir Edingtona starjauka, M_e ir novas uzliesmojuma laikā izmestās vielas masa (tuvināti tā ir vienāda ar akrēcētā apvalka masu), M_{WD} un R_{WD} ir attiecīgi baltā pundura masa un rādiuss. Apvalka masu kodoltermiskā sprādziena laikā pārsvarā nosaka baltā pundura masa, starjauka, magnētiskā lauka stiprums, akrēcijas ātrums un akrēcētās vielas ķīmiskais sastāvs (Starrfield et al 1985), tomēr galvenais faktors, kas nosaka apvalka masu ir spiediens akrēcētā slāņa pamatnē (Fujimoto 1982), kurš ir jo augstāks, jo lielākā ir baltā pundura masa.

Skaitliskie novu modeļu aprēķini rāda, ka novas maksimālā starjauka var tikt izteikta kā (Livio 1992):

$$(L^{\max} / L_S) = \beta(M_{WD}, L_{WD}, B, \dot{M}, X_i)(L_{Edd} / L_S), \quad (2)$$

kur L_S ir Saules starjauka, B ir baltā pundura magnētiskā lauka intensitāte uz virsmas, \dot{M} ir vielas akrēcijas ātrums, X_i apzīmē akrēcētās vielas ķīmisko sastāvu. Parametrs β ir atkarīgs



2.3. att. Sakarība starp spožumu maksimumā un spožuma krišanas ātrumu M31(pilnie aplīši) un Lielā Magelāna Mākoņa (trijstūrīši) novām. Tukšie aplīši reprezentē divas Galaktikas novas. Sakarību aproksimējošā līkne, kā arī $\pm 3\sigma$ līknes ir parādītas ar nepārtrauktām līnijām, Livio (1992) teorētiskā sakarība ir parādīta ar pārtrauktu līkni (Della Valle & Livio 1995).

kalibrēšanai tiek izmantotas M31 galaktikas novas sakarā ar to, ka attālums līdz tām ir vienāds un labi zināms.

2.1.3 Novu supermīkstā rentgenstarojuma emisijas fāze.

Pēdējos gados ir radusies pastiprināta interese par novām kā supermīkstā rentgenstarojuma avotiem (*supersoft X-ray source*, SSS), sakarā ar jaunajiem datiem, ko sniedza kosmisko rentgenstaru observatoriju XMM-Newton un Chandra veiktie M31 galaktikas novērojumi. Supermīkstā rentgenstarojuma emisijas novērojumi ļauj noteikt novas uzliesmojuma nobeiguma laiku, atklāt atkārtotas novas, kā arī noteikt tādas svarīgas īpašības, ka baltā pundura masa un uz tā palikušā apvalka masa un metālskums.

Novas uzliesmojuma laikā tiek izsviesta tikai daļa no akrēcētā apvalka, bet uz baltā pundura virsmas paliekošajā slānī turpinās līdzsvarota ūdeņraža kodoldegšana, uzkaršējot zvaigznes fotosfēru līdz temperatūrai $\sim 10^5$ – 10^6 K (Kato 2010), kas veicina mīkstā

galvenokārt no baltā pundura masas, bet atkarība no pārējiem parametriem ir daudz vājāka (Starrfield 1988). β ir monotoni augoša baltā pundura masas funkcija, jo pie lielākas baltā pundura masas tiek sagaidīts arī augstākas jaudas sprādziens (Fujimoto 1982).

Tādējādi novas optiskais spožums maksimumā M_{max} un spožuma krišanas ātrums t_3 pirmajā tuvinājumā ir atkarīgi tikai no baltā pundura masas. To apstiprina praksē novērotā korelācija starp šiem lielumiem: maksimuma laikā spožākās novas satumst ātrāk, nekā vājākās novas (2.3 attēls). Novu augstās starjaudas dēļ šī sakarība ir potenciāli izmantojama starpgalaktisko attālumu noteikšanai, turklāt tā bieži tiek izmantota attāluma noteikšanai līdz jaunatklātajām Galaktikas novām. Pamatā šīs sakarības

rentgenstarojuma ($E \leq 1$ keV) emisiju. Izplešanās rezultātā samazinoties izmestā apvalka optiskajam biezumam, nova kļūst novērojama kā augstas starjaudas ($L_X \sim 10^{37} - 10^{38}$ erg s⁻¹) supermīkstā rentgenstarojuma avots, kurš izzūd izbeidzoties ūdeņraža kodoltermiskajai degšanai. Supermīksto rentgenstaru emisijas fāze ir diezgan īslaicīga gandrīz visām reģistrētajām novām: tipisks SSS fāzes ilgums ir ap vienu gadu, dažos gadījumos 2–3.5 gadi, un tikai trim novām tas ir ap 10 gadiem (Hernanz 2010). SSS fāzes ilgumu nosaka uz baltā pundura virsmas pēc uzliesmojuma paliekošā ar ūdeņradi bagāta apvalka masa, bet šī parametra lielums savukārt ir apgriezti proporcionāls baltā pundura masai (Jose & Hernanz 1998). Balto punduru apvalku modeļi rāda, ka SSS fāzes ilgums ir atkarīgs arī no akrēcētā apvalka metāliskuma (Sala & Hernanz 2005). Analītiski šīs fāzes ilgums ir izsakāms ar ūdeņraža kodoltermiskās degšanas laiku akrēcētajā apvalkā (Starrfield 1989):

$$\tau_{nuc}(yr) = 400 \left(\frac{M_H}{10^{-4} M_S} \right) / \left(\frac{L}{2 \times 10^4 L_S} \right), \quad (3)$$

kur M_H ir ūdeņraža masa uz baltā pundura paliekošajā apvalkā, bet L ir baltā pundura starjauda plato fāzes laikā. Savukārt to, cik ātri pēc optiska uzliesmojuma parādīsies SSS nosaka nomestā apvalka masa un izplešanās ātrums (Hachisu & Kato 2006).

No apgriestās sakarības starp SSS fāzes ilgumu un baltā pundura masu seko, ka atkārtotajām novām šī fāze ir ļoti īslaicīga (<100 d). Masīvie baltie punduri atkārtoto novu sistēmās tiek uzskatīti par iespējamiem Ia tipa pārnovu kandidātiem, tomēr mazs šādu objektu skaits starp optiskajām novām (Della Valle & Livio 1994) ir pretrunā ar novēroto Ia tipa pārnovu uzliesmojumu biežumu. M31 galaktikas novu SSS fāzes novērojumi norāda uz to, ka īstenībā šo objektu skaits varētu būt lielāks, nekā izriet no optisko novu novērojumiem (Pietsch et al. 2007).

2.1.4 Novu pētījumi Andromēdas galaktikā (M31).

Neskatoties uz pietiekoši intensīviem pētījumiem, novu fundamentālie parametri, telpiskais sadalījums un to izraisošo dubultzvaigžņu sistēmu populācijas īpašības pagaidām ir slikti zināmas, bet daži novērojumu dati nevar tikt izskaidroti pašreizējo novu uzliesmojumu teorijas ietvaros. Novu populācijas pētījumi mūsu Galaktikā ir apgrūtināti

starpzvaigžņu absorbcijas izraisīto selekcijas efektu dēļ. Šajā ziņā novu novērojumiem mūsu tuvākajā milzu galaktikā M31, kurā ik gadu tiek reģistrēts ievērojams novu uzliesmojumu skaits, ir vairākas priekšrocības. Starpzvaigžņu absorbcija Galaktikā M31 virzienā ir zema, turklāt var uzskatīt, ka visas šajā galaktikā uzliesmojošās novas atrodas vienādā, labi zināmā attālumā. Tas ļauj tieši salīdzināt novu spožuma maiņas līknes un to starjaudas maksimumā, kā arī veikt akurātus krāsu indeksu un temperatūras novērtējumus (Pietsch 2009). Turklāt ir iespējams veikt pietiekami lielas novu izlases vienlaicīgus novērojumus gan optiskajā, gan rentgenstaru diapazonā, kas sniedz vērtīgus datus par novu uzliesmojuma maz izpētīto SSS fāzi, kā arī ļauj identificēt retus un neparastus objektus. Novu populāciju pētījumi, izmantojot homogēno M31 galaktikas novu izlasi, var palīdzēt labāk izprast klasisko novu dubultzvaigžņu sistēmu evolūciju līdz atkārtotajām novām, un iespējams, ja tipa pārnovām. Tam nolūkam ir nepieciešams gan pašreizējo optisko novu uzliesmojumu nemitīgs monitorings, gan arī vēsturisko novu kataloga papildināšana un to koordināšu precizēšana, pielietojot modernās tehnoloģijas fotoplašu arhīva apstrādei.

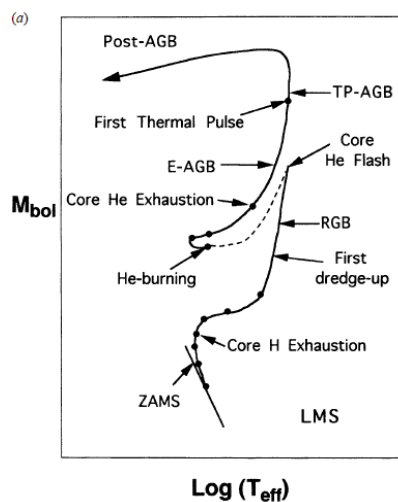
2.2 Oglekļa zvaigznes

Par oglekļa zvaigznēm sauc zvaigznes, kuru atmosfērās oglekļa atomu skaits ir lielāks par skābekļa atomu skaitu ($C/O > 1$). Viss šo zvaigžņu atmosfērās esošais skābeklis ir saistīts CO molekulās, un optiskajos spektros dominē C_2 , CN un CH molekulu absorbcijas joslas (Wallerstein & Knapp 1998). Tiek uzskatīts, ka absolūtais vairākums zvaigžņu Visumā rodas ar oglekļa un skābekļa daudzumu attiecību mazāku par vienu, bet oglekļa zvaigznēm inversā C/O attiecība atmosfērā veidojas evolūcijas gaitās. Pastāv divi pamata scenāriji oglekļa bagātinājuma izcelsmes izskaidrošanai zvaigznes atmosfēras ārējos slāņos. Tiek uzskatīts, ka lielas starjaudas oglekļa zvaigznes ($L \sim 10^4 L_{\odot}$) atrodas evolūcijas stadijā uz Asimptotiskā Milžu Zaru (*Asymptotic Giant Branch*, AGB), kad zvaigznes iekšienē notiek pārmijus kodoltermiskās degšanas epizodes udeņraža un hēlija slāņos ap zvaigznes deģenerēto C-O kodolu. Novērotais oglekļa bagātinājums attiecībā pret skābekli uz šo zvaigžņu virsmas var izveidoties hēlija kodoltermiskās degšanas produktu konvektīvās samaisīšanas rezultātā no ap C-O kodolu esošā slāņa (Iben 1981).

Savukārt oglekļa zvaigznēm, kuru starjauca ir pārāk zema, lai tās atrastos AGB fāzē ($L \sim 10^3 L_{\odot}$), tiek uzskatīts, ka to atmosfēru pekulārais ķīmiskais sastāvs veidojas vielas pārnese rezultātā dubultzvaigžņu sistēmā, kurā donora zvaigzne ir AGB oglekļa zvaigzne (piem. McClure & Woodsworth 1990).

2.2.1 Zvaigznes ķīmiskā sastāva izmaiņas AGB fāzes laikā.

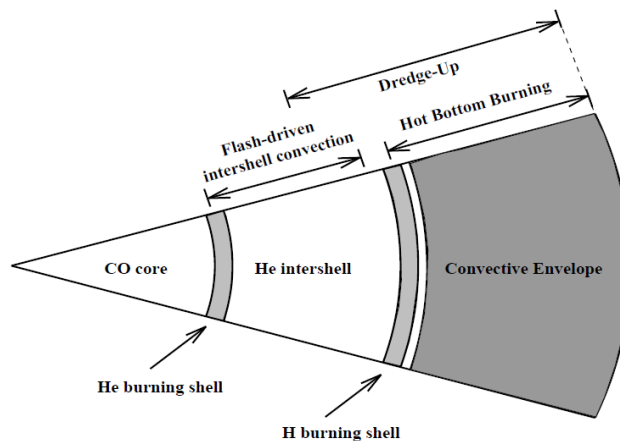
AGB fāze ir beigu evolūcijas stadija zemas un vidējas masas zvaigznēm ar $0.8 \leq M/M_{\odot} \leq 8$ (sk. 2.4 attēlu). Šo zvaigžņu evolūcijas gaitās uz Galvenās Secības (*Zero Age Main Sequence*, ZAMS) to galvenais enerģijas avots ir kodoltermiskās reakcijas, kuru rezultātā ūdeņradis tiek pārveidots hēlijā proton-protona vai CNO cikla rezultātā. Zvaigznes centrā izveidojoties hēlija kodolam pēc ūdeņraža krājumu izsīkšanas, zvaigzne atstāj galveno secību un turpina evolūciju uz Sarkano Milžu Zaru (*Red Giant Branch*, RGB). Šajā fāzē sāk mainīties zvaigznes virsmas sastāvs, jo konvektīvā apvalka pamats izplatās dziļāk zvaigznes iekšienē un kodoltermiskajās reakcijās pārstrādātā viela tiek nogādāta uz augšējiem slāņiem – notiek t.s. pirmā konvektīvā samaisīšanās. Tās rezultātā zvaigznes virsmas ķīmiskajā sastāvā notiek sekojošās pārmaiņas: ^{14}N koncentrācija



2.4. attēls. Shematisks evolūcijas treks uz Hercšprunga-Rasela diagrammas zvaigznei ar $1 M_{\odot}$ masu un Saulei identisko ķīmisko sastāvu (Busso et al. 1999).

divkāršojas, ^{12}C samazinās par aptuveni 30%, $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ attiecība kļūst $\sim 20-30$, Li un Be koncentrācijas samazinās par dažām kārtām (Iben & Renzini 1983). Pašām masīvākajām vidējās masas zvaigznēm notiek arī otrā konvektīvā samaisīšanās, pēc kuras slāpekļa daudzums kļūst lielāks par skābekļa daudzumu atmosfērā. Vēlāk hēlija kodoltermiskās degšanas trīskāršās alfa-reakcijas rezultātā zvaigznei veidojas deģenerēts oglekļa-slāpekļa (C-O) kodols.

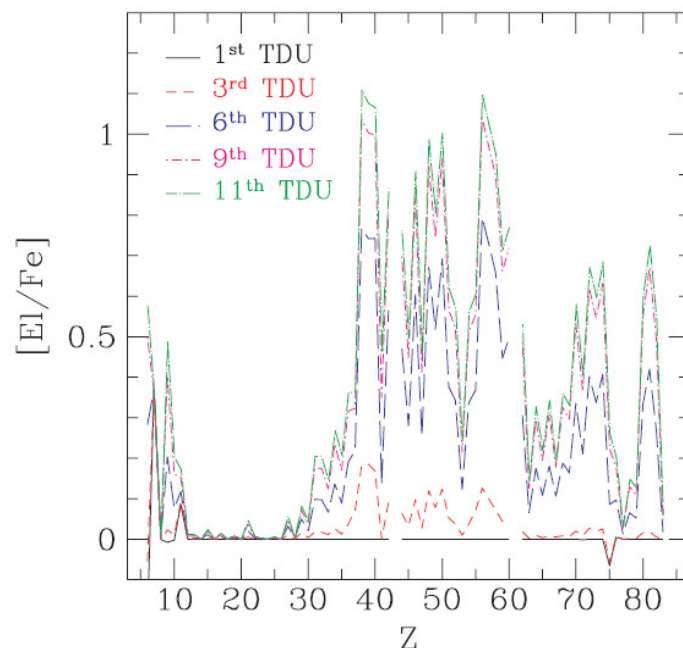
AGB fāzē tiek izdalīti divi posmi: agrīnā AGB fāze (*early AGB*, E-AGB) un termālo pulsāciju AGB fāze (*thermally pulsing AGB*, TP-AGB). E-AGB laikā hēlija slānī ap deģenerēto C-O



2.5. att. AGB zvaigznes sheatiska struktūra (Lattanzio 1998).

kodolu notiek līdzsvarotā kodoltermiskā degšana. Kad hēlija slānī izsīkst kodoldegvielas krājumi, uzsākas TP-AGB fāze, kuras laikā galvenais zvaigznes enerģijas avots ir CNO cikla reakcijas, kuras norisinās plānajā ārējā udeņraža slānī (sk. 2.5. attēlu). Šo reakciju rezultātā pakāpeniski pieaug ar hēliju bagātinātā starpslāņa masa, un tai sasniedzot kritisko vērtību, hēlijā slānī strauji atsākas trīskāršās alfa-reakcijas – notiek kodoltermiskais uzliesmojums, t.s. termālais pulss (Schwarzschild & Harm 1965). Termālā pulsa laikā hēlija starpslānis kļūst dinamiski nestabils un tajā notiek konvektīvā samaisīšanās, kā rezultātā tas tiek bagātināts ar oglekli un smagajiem elementiem. Pēc termālā pulsa izbeigšanās, zvaigznes ārējās konvektīvās zonas pamatne sāk arvien pietuvoties hēlija starpslānim, līdz, beidzot iespiežas tajā. Notiek tā saucamā trešā konvektīvā samaisīšanās (*third dredge-up*, TDU), kuras rezultātā zvaigznes ārējie slāņi tiek bagātināti ar kodolreakcijās pārstrādāto vielu un smagajiem elementiem. Zvaigznei vairakkārt pārdzīvojot TDU epizodes, šo elementu koncentrācija arvien pieaug (sk. 2.6. attēlu), kamēr C/O attiecība kļūst lielāka par vienu un zvaigzne kļūst par oglekļa zvaigzni (Smith & Lambert 1990).

Lēno neitronu satveršanas elementi (*slow neutron capture process elements*), jeb s-procesa elementi, kas TDU laikā arī nokļūst zvaigznes ārējos slāņos, tiek sintezēti divu reakciju rezultātā. Laika periodos starp termālajiem pulsiem lēno neitronu plūsmu nodrošina reakcija $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$. Tā norisinās plānajā ^{13}C slānī (*^{13}C pocket*), kas atrodas hēlija starpslāņa augšējā daļā (Straniero et al. 2006), un šīs reakcijas rezultātā tiek



2.6. att. Virsmas ķīmiskais sastāvs (pēc elementu satura) zemas masas zvaigznei ar Saules metāliskumu pēc noteiktajām TDU epizodēm (Cristallo et al. 2009).

sintezēti smagākie (piem. Ba, La, Ce, Nd, Sm) elementi. Otrās lēno neironu avota, t.i. reakcijas $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ iedarbināšanai, kura nosaka vieglāko elementu sintēzi (piem. Rb, Sr, Y, Zn), ir nepieciešama augstāka temperatūra, $T \geq 3.5 \times 10^8$ K. Tā kā zemas masas AGB zvaigznēs ($M < 3M_{\odot}$) maksimālā temperatūra, kas var tikt sasniegta nepārsniedz 3×10^8 K (Straniero et al. 2005), tad galvenais neitronu avots zemas masas zvaigznēs ir ^{13}C slānis. Savukārt vidējas masas zvaigznēs tiek iedarbināti abi neitronu avoti. Tādējādi pēc vieglo un smago s-procesa elementu koncentrāciju attiecības AGB zvaigznes atmosfērā var spriest par zvaigznes masu.

Termāli pulsējošo zvaigžņu virsmas ķīmiskā sastāva evolūcijas modelēšana paredz, ka ^{13}C izotopa koncentrācija attiecībā pret ^{12}C koncentrāciju zvaigznes atmosfērā paliek zema (Cristallo et al. 2009). Tomēr vairākām AGB zvaigznēm tiek novērota paaugstināta ^{13}C izotopa koncentrācija. Masīvākajām zvaigznēm ($M \geq 4M_{\odot}$) tas tiek skaidrots ar ūdeņraža kodoltermisko degšanu zvaigznes konvektīvajā apvalkā laikā starp termālajiem pulsēm, kad šī apvalka pamatnē temperatūra var pārsniegt 5×10^7 K un sākas CN cikla reakcijas. Šo reakciju rezultātā ^{12}C tiek pārstrādāts par ^{13}C un ^{14}N un $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ attiecība var pazemināties līdz CNO cikla līdzsvara vērtībai, t.i. ap 3 – 3.5 (Lattanzio 1998). Tomēr, tā

kā tai pašā laikā ^{12}C izotops tiek pārvērsts par ^{14}N , zvaigznei var samazināties C/O attiecība, un tā var atkal kļūt par skābekļa zvaigzni. Tādēļ oglekļa zvaigzne ar zemu $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ attiecību šajos modeļos ir iegūstama tikai pie specifiskiem modeļa parametriem. Alternatīvais modelis zemas masas zvaigznēm paredz papildus samaisīšanās mehānisma eksistēšanu laika periodā pēc pirmās konvektīvās samaisīšanās (Boothroyd & Sackmann 1999), kā arī, iespējams, agrīnās AGB fāzes laikā (Abia & Isern 2000).

2.2.2 Oglekļa zvaigžņu pamatklašu raksturojums

Par klasiskajām oglekļa zvaigznēm, kuras atrodas AGB termisko pulsāciju fāzē, tiek uzskatītas spektrālā tipa N oglekļa zvaigznes. Tās ir augstas starjaudas zemas masas zvaigznes, kurām ir raksturīga zema efektīvā temperatūra, stipras molekulāro pāreju joslas spektrā, metāliskums tuvu Saules vērtībai, ievērojams s-procesa elementu bagātinājums, kā arī mēreni augsta $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ attiecība (Abia et al. 2001, 2002). N-tipa zvaigznēm līdzīgas īpašības uzrāda vēlās R-tipa zvaigznes, kuras iespējams atrodas AGB termālo pulsāciju agrīnajā stadijā (Zamora et al. 2009).

J-tipa oglekļa zvaigznēm ir raksturīga ļoti zema $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ attiecība, lielākajai daļai ir paaugstināts Li saturs attiecībā pret normālajām oglekļa zvaigznēm, kā arī šīm zvaigznēm netiek novērots s-procesa elementu bagātinājums to atmosfērā. Tomēr starjauda un spožuma mainīgums šīm zvaigznēm ir tipiski AGB zvaigznēm. Lai izskaidrotu anomālo atmosfēras ķīmisko sastāvu, zemas masas J-tipa zvaigznēm ($2-3 M_{\odot}$) tiek piedāvāti nestandarta samaisīšanās mehānismi agrīnajā AGB fāzē, bet augstākās masas J-zvaigznēs - ūdeņraža kodoltermiskā degšana karstajā konvektīvā apvalka pamatnē (Abia & Isern 2000).

Agrajām R-tipa zvaigznēm ir raksturīga zemāka starjauda, nekā tiek sagaidīts termiski pulsējošajām AGB zvaigznēm. Tām piemīt augstākas temperatūras nekā N-tipa zvaigznēm, to metāliskums ir tuvs Saules vērtībai ar palielinātu slāpekļa saturu, $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ attiecība ir zema un s-procesa elementu koncentrācijas nav paaugstinātas, bet ir paaugstināts Li saturs. Oglekļa bagātinājuma izcelsme šajās zvaigznēs pagaidām nav skaidra; tiek uzskatīts, ka R-zvaigznēs varētu norisināties nestandarta oglekļa pārvešanas

mehānismi uz zvaigznes ārējiem slāņiem, iespējams anomāla hēlija kodola uzliesmojuma rezultātā (Zamora et al. 2009).

Zvaigznes, kuras visticamāk ir izveidojušās masas pārneses rezultātā dubultsistēmā sauc par neīstajām (*extrinsic*) oglekļa zvaigznēm. Par tādām tiek uzskatītas CH-tipa zvaigznes. CH zvaigznes tiek raksturotas ar spēcīgām CH molekulārajām joslām to spektros. Līdzīgi, ka agrajām R-tipa zvaigznēm, tām ir relatīvi augsta temperatūra. Tomēr šīm zvaigznēm ir raksturīgs metālu deficīts, un paaugstināts s-procesa elementu saturs atmosfērā, ar augstāku smago elementu saturu. Visas CH zvaigznes ir dubultzvaigznes.

Atsevišķa oglekļa zvaigžņu grupa ir R Coronae Borealis (RCB) tipa zvaigznes, kuras atrodas uz evolūcijas stadijas pēc AGB (*post-AGB*) un spektroskopiski tiek raksturotas ar ievērojamu ūdeņraža deficītu, bet fotometriski – ar neparastu spožuma mainīguma raksturu. Šo zvaigžņu spektri spožuma maksimuma laikā reprezentē F vai G tipa pārmilžus, tomēr ar vairākām pekulāritātēm atmosfēras ķīmiskajā sastāvā: ūdeņraža daudzums šajās zvaigznēs ir $10\text{--}10^8$ reizēs mazāks nekā Saulē (Lambert & Rao 1994); visām zvaigznēm ir novērojams Na, Al, Si un S bagātinājums, dažām zvaigznēm ir raksturīgs arī Li bagātinājums, utt. (Asplund et al. 2000). Spektroskopiski izdala vairākuma (*majority*) un mazākuma (*minority*) RCB zvaigžņu grupas, no kurām pie otrās grupas piederošās zvaigznes izceļas ar īpaši pekulāru ķīmisko sastāvu. Pastāv divi scenāriji RCB zvaigžņu izcelsmes izskaidrošanai: divkārtšas deģenerācijas un hēlija apvalka pēdējā uzliesmojuma modelis (Iben et al. 1996; Saio & Jeffery 2002). Pirmais paredz, ka RCB zvaigzne veidojas C-O baltā pundura saplūšanas rezultātā ar He balto punduri (Webbink 1984). Pēc otrā modeļa topošā planetārā miglāja centrālajā zvaigznē notiek hēlija apvalka pēdējais uzliesmojums, ka dēļ tā izplešas, sasniedzot pārmilža izmērus (Fujimoto 1977; Renzini 1979). Iespējams, ka ar Li bagātinātas zvaigznes veidojas pēc otrā scenārija (Herwig & Langer 2001), bet vairākums RCB zvaigžņu rodas balto punduru saplūšanas rezultātā (Clayton et al. 2007).

2.2.3 Oglekļa zvaigznes ar ilgtermiņa spožuma satumsumiem.

AGB fāzes laikā zvaigznes kļūst nestabilas pret plašām pulsācijām, kuras savukārt veicina intensīvo masas zaudēšanu šajā evolūcijas stadijā. Pulsāciju dēļ zvaigznes atmosfērā veidojas triecienviļņi, ka rezultātā viela tiek aizdzīta prom no zvaigznes, kur

temperatūra un spiediens ir labvēlīgi putekļu graudu izveidei. Amorfajiem oglekļa putekļiem piemīt liels optiskais biezums, tādēļ starojuma spiediena iespaidā putekļu graudi iegūst pietiekamu momentu, lai sadursmju rezultātā „aizvilktu” sev līdzī arī gāzi, tādējādi izraisot lēnu vielas noplūšanu no zvaigznes (Fleischer et al. 1992). Vairāku novērojumu dati liecina, ka AGB zvaigznes masas zaudēšanas ātrums ievērojami mainās laikā. Termālais pulss tieši vai netieši var ievērojami modulēt masas zaudēšanu (Vassiliadis & Wood 1993), jo tas ietekmē gan virsmas starjaudu, gan ķīmisko sastāvu, kas savukārt ietekmē atmosfēras struktūru un putekļu veidošanos. Saskaņā ar novērojumu datiem radio- un infrasarkanajā diapazonā (Knapp & Morris 1985, Bedijn 1987) tipisks masas zaudēšanas ātrums AGB zvaigznēm ir no $\sim 10^{-8}$ līdz $10^{-4} M_{\odot}$ gadā.

Oglekļa zvaigznēm, kuras atrodas termālo pulsu AGB fāzes evolūcijas stadijā ir raksturīgas relatīvi plašas spožuma maiņas ar periodu starp 80 un 1000 dienām; tās sauc par ilgperioda maiņzvaigznēm (*Long Period Variables*, LVPs). Pēc novēroto spožuma maiņu periodiskuma, amplitūdas un perioda garuma lielāka daļa LPV var tikt iedalītas Miras tipa (M), pusperiodiskajās (SR) un neperiodiskajās (Lb) maiņzvaigznēs. Miras un pusperiodiskās maiņzvaigznes uzrāda periodiskas vai multiperiodiskas pulsācijas, bet neperiodiskajām zvaigznēm ir raksturīgas haotiskas zemas amplitūdas spožuma maiņas (piem. Wallerstein & Knapp 1998). Iespējams, ka neperiodiskās zvaigznes īstenībā neveido atsevišķu klasi, bet ir pieskaitāmās pie pusperiodiskajām zvaigznēs ar īsākiem pulsāciju periodiem un mazākām amplitūdām (Lebzelter et al. 2009).

Dažām oglekļa zvaigznēm uz pulsāciju izraisīto vai zemas amplitūdas neperiodisko spožuma maiņu fona tiek novērotas papildus ilgtermiņa spožuma satumsumi vai spožuma trendi (piem. Feast et al. 1984, Whitelock et al. 1997, Alksnis 2003). Ilgtermiņa satumsumi tiek novēroti aptuveni katrai trešajai oglekļa Mirai (Whitelock et al. 2006), bet šīs parādības biežums SR un Lb maiņzvaigžņu vidū pagaidām nav noskaidrots. Iespējams, ka neperiodiskajās maiņzvaigznēs relatīvi lielās amplitūdas ($\Delta R > 1^m$) ilgtermiņa spožuma variācijas ir līdz pat 10 reizēs retākas, nekā Mirām (Alksnis & Alksne 1988).

Šīs parādības detalizēts mehānisms un cēloņi pagaidām nav skaidri. Saskaņā ar oglekļa Miru pētījumu rezultātiem tuvajā infrasarkanajā diapazonā, par piemērotāko šī fenomena modeli tiek atzīta putekļu mākoņu veidošanās skata virzienā (Whitelock et al. 1997, Feast et al. 2003). Par iemeslu šādai asimetriskajai masas zaudēšanai var būt

nehomogenitātes zvaigznes atmosfērā (Feast et al. 2003). Uz to, ka apzvaigžņu apvalki oglekļa zvaigznēm ir strukturēti un mainīgi, norāda gan augstas izšķirtspējas novērojumi (Feast et al. 2003), gan novērojumi CO radiolīnijā (piem. Olofsson et al. 1996). Skābekļa Miru interferometrijas dati norāda uz to, ka to ārējos atmosfēras slāņos pastāv nobīdes no radiālās simetrijas, kas varētu būt saistīts ar dažādas temperatūras apgabalu veidošanos plaša konvektīvā apvalka dēļ (Lattanzi et al. 1997). Soker & Clayton (1999) piedāvāja teoriju, ka putekļu veidošanās AGB un RCB zvaigznēs notiek galvenokārt virs aukstajiem magnētiskajiem plankumiem. Whitelock et al. (2006) diskutē, ka oglekļa zvaigznes ar ilgtermiņa spožuma satumsumiem iespējams ir dubultzvaigžņu sistēmas, kurās mijiedarbība ar kompanjonzvaigzni varētu veicināt novērotās masas zaudēšanas epizodes.

Teorētiskie AGB zvaigžņu masas zaudēšanas modeļi rāda, ka hidrodinamisko, starojuma vai termālo nestabilitātes rezultātā zvaigznes tuvumā neregulārajos laika intervālos var veidoties putekļu mākoņi, kuri starojuma spiediena iedarbības rezultātā tiek aizdzīti prom no zvaigznes virsmas (Woitke & Niccolini 2005). Tai pašā laikā, bet kādā citā vietā, no putekļiem brīva gāze kustās atpakaļ pie zvaigznes virsmas. Šādā veidā zvaigznes apkārtnē veidojas ļoti dinamiska un turbulenta vide, kurā tiek sagaidīts nehomogēns putekļu sadalījums, kas, iespējams, izpaužas, kā oglekļa zvaigžņu ilglaicīgas spožuma modulācijas.

Vairāki autori atzīmē, ka putekļu mākoņu veidošanas mehānisms aukstajās oglekļa zvaigznēs ir fenomenoloģiski līdzīgs ar ūdeņradi nabadzīgo RCB zvaigžņu satumsumu modelim. Tomēr parasti RCB zvaigznēs novērotie satumsumu ir dziļāki (līdz pat 8 mag) un ar straujāku norisi, nekā parastajām oglekļa zvaigznēm. DY Persei ir vienīgā aukstā oglekļa zvaigzne ar ilgtermiņa spožuma satumsumiem (Alksnis & Jumike 1990), kurai spektroskopiski tika pierādīta tās piederība pie RCB zvaigžņu grupas (Keenan & Barnbaum 1997, Začs et al. 2007). Šai zvaigznei gandrīz katrā ilgperioda pulsācijas ciklā notiek līdz pat 5.5 mag dziļi (R-joslā) spožuma kritumi, kuru laikā zvaigznes spožuma krišanas ātrums ir ievērojami lēnāks, nekā RCB zvaigznēm (Alksnis et al. 2009). Galaktikas baldžā un Magelānu Mākoņos ir atklātas vairākas zvaigznes, kuras pēc savu spožuma maiņas līkņu īpašībām atgādina šo auksto RCB zvaigzni; literatūrā tās tiek dēvētas par DY Per tipa zvaigznēm (piem. Alcock et al 2001, Tisserand et al. 2008). Analizējot spektrālās enerģijas sadalījumu no vizuālā līdz infrasarkanajām diapazonam

RCB un DY Per tipa zvaigznēm Magelāna Mākoņos, tika secināts, ka pēc šī parametra DY Per tipa zvaigznes ir līdzīgas parastajām oglekļa zvaigznēm (Tisserand et al. 2009). Tomēr pagaidām nevienai no šīm zvaigznēm (kā arī nevienai no zināmajām neperiodiskajām zvaigznēm ar spožuma satumsumiem) nav veikti augstas izšķirtspējas spektroskopiski pētījumi, tādēļ nav datu par šo zvaigžņu ķīmisko sastāvu un nav arī iespējams spriest par to evolūcijas stadiju un iespējamo saistību ar RCB zvaigznēm.

2.3 Protoplanetārie miglāji

Zvaigžņu evolūcija uz asimptotiskā milžu zara beidzas ar ļoti spēcīgas masas zaudēšanas fāzi ($10^{-7} - 10^{-4} M_{\odot}$ gadā), pēc kuras ap zvaigzni veidojas izplatošs atdalītais gāzes un putekļu apvalks. Zvaigzne sāk strauji pārvietoties pa kreisi uz Hercšprunga-Rasela diagrammas, jo tās efektīvā temperatūra palielinās, bet starjauca paliek aptuveni konstanta. Šajā fāzē, ko apzīmē kā post-AGB jeb protoplanetārā miglāja fāzi, zvaigzne vēl nav pietiekami karsta, lai jonizētu apzvaigznes vielu un parādītos kā planetārais miglājs. Šī evolūcijas stadija ir ļoti īsa, tādēļ post-AGB zvaigznes ir retas. Sistemātiski šo objektu pētījumi kļuva iespējami tikai salīdzinoši nesen, ar Infrasarkanā astronomiskā satelīta (*Infrared Astronomical Satellite*, IRAS) palaišanu. Protoplanetārie miglāji tika identificēti pēc infrasarkanā ekscesa un to apzvaigžņu apvalku krāsām (piem. van der Veen et al. 1989, Hrivnak et al. 1989). Tā kā apzvaigznes apvalks, absorbējot zvaigznes starojumu, vēlāk to izstaro vidējā infrasarkanajā diapazonā, bet pašas zvaigznes starojuma maksimums atrodas vizuālajā vai tuvajā infrasarkanajā diapazonā, tad šo objektu spektrālas enerģijas sadalījumā ir novērojami divi maksimumi. Centrālā zvaigzne visbiežāk ir F vai G tipa zvaigzne, Pretēji sagaidītajām, post-AGB zvaigznēm novērojumos tika konstatēta masas zaudēšana, kaut arī ar ļoti zemu ātrumu $\sim 10^{-8} M_{\odot}$ gadā. Savukārt vielas noplūšanas ātrums šiem objektiem ir daudz lielāks, nekā AGB zvaigznēm (līdz pat 10^3 km s^{-1}). Modeļiem paredzētais post-AGB fāzes ilgums ir no 10 līdz 10^5 gadiem atkarībā no zvaigznes kodola masas un masas zaudēšanas AGB laikā (Blocker 1995). Post-AGB zvaigžņu optiskās spektroskopijas rezultāti parādīja, ka pēc ķīmiskā sastāva šie objekti ir ļoti neviendabīgi. Post-AGB zvaigznes fotosfēras ķīmiskais sastāvs var būt atkarīgs no termālā pulsa cikla fāzes tajā laika momentā, kad zvaigzne atstāj AGB (Engels 2005). Bez

tam to var ietekmēt kompanjonzvaigznes esamība. Ir nepieciešami vairāk šo objektu pētījumi lai izskaidrotu novēroto post-AGB zvaigžņu tipu dažādību. Nav skaidrs arī kā notiek pāreja no sākotnēji sfēriski simetriskas masas zaudēšanas AGB fāzes laikā pie zemākas simetrijas lielā ātruma plūsmām, kas tiek novērotas post-AGB zvaigznēm. Masas zaudēšanas mehānisma fizikas izprašanai ir lielā nozīme gan AGB, gan post-AGB evolūcijas modeļu izveidei.

3. Pētījumos izmantotās metodikas un novērojumu dati

3.1. M31 galaktikas novu pētījumu metodika

3.1.1 Novu meklēšanas metodikas un astrometrija

Novu pētījumi M31 galaktikā tika veikti izmantojot Baldones observatorijas arhīva uzņēmumus, kas bija iegūti ar Šmita sistēmas teleskopu (80/120/240 cm) laika periodā no 1997. līdz 2005. gadam. Šie novērojumi tika veikti M31 novu ilgtermiņa pētījumu programmas ietvaros izmantojot platleņķa teleskopus, sadarbībā ar Krievijas zinātniekiem (sk., piemēram, Sharov et al. 2000). Pētījumiem tika izmantoti uz 13×18 cm ($\sim 3^\circ \times 4^\circ$) fotoplatēm iegūtie uzņēmumi fotogrāfiskajā *B*-joslā. Tā kā minētās programmas galvenais mērķis bija pētīt plašās M31 apkārtnes, novērojumos visbiežāk tika pielietota 40 minūšu ekspozīcijas, ka dēļ M31 centrālā daļa ir pārgaismota.

Ārpus uzliesmojuma novu izraisošajām dubultzvaigžņu sistēmām ir pārāk zema starjanda, lai, atrodoties M31 attālumā, tās tiktu reģistrētas uz Baldones fotoplatēm, toties novas var tikt reģistrētas uzliesmojuma laikā, kaut arī spožuma ziņā šie objekti parasti neizceļas fona zvaigžņu vidū. Tātad salīdzinot fotoplates, kas tika uzņemtas pirms novas uzliesmojuma un tā laikā, novas var tikt identificētas kā „jaunās” zvaigznes ar raksturīgo spožuma maiņas gaitu. Novu meklēšanai uz 2001.-2003. gada fotoplatēm tika pielietota stereoskopiskā metode izmantojot zvaigžņu plašu komparatoru. Salīdzināto uzņēmumu pāris tika izvēlēts tā, lai galaktikas fona spožums un reģistrēto zvaigžņu robežzvaigžņlielums uz abām platēm būtu aptuveni vienāds. Turklāt laika intervālam starp fotoplašu uzņemšanas momentiem bija jābūt pietiekami lielam, lai nova nebūtu redzama uz abām platēm vienlaicīgi. Tad abas fotoplates vienlaicīgi tika izskatītas uz komparatora, un gadījumā, ja kāds objekts bija redzams tikai uz vienas plates, stereoskopiskās redzes īpatnības tas izcēlās uz citu zvaigžņu fona. Tādā veidā atrasto novu kandidātu pozīcijas tika pārbaudītas uz tuvākajiem (pēc uzņemšanas datuma) uzņēmumiem un Vizier astronomiskajā datubāzē¹ pieejamos on-line katalogos. Tādējādi tika identificētas trīs līdz šim nezināmās novas: ShA 66, 68 un 69.

¹ <http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR>

Tā kā novu meklēšanas metodei ar komparatoru ir vairāku trūkumi, vēlāk fotoplates tika digitalizētas (skenējot ar komerciālo skeneri), un novas tika meklētas ar datorprogrammu palīdzību, pielietojot darba autores izstrādāto vizuālās identificēšanas metodiku. Tam nolūkam uz digitalizētās fotoplates attēla tika projicēti objekti no USNO-B1.0 kataloga (Monet et al. 2003) un Magnier et al. (1992) kataloga „BVRI CCD photometry in the field of M31”, ar ko tika panākta gandrīz visu uz Baldones fotoplatēm redzamo M31 galaktikas apkārtnes zvaigžņu identificēšana. Caurskatot iegūto fotoplates attēlu, tika meklēti katalogos neiekļautie objekti – novu kandidāti. Ar šo metodi tika atklātas trīs novas: ShA 65, 67 un 70.

Koordināšu noteikšana visām atklātajām novām tika veiktā uz digitalizētajām platēm, šim nolūkam izmantojot ar augsto izšķirtspēju (7200 dpi) ieskenētos fotoplates apgabalus attēlus novas apkārtnē. Astrometriskās kalibrēšanas gaitā, izmantojot zvaigznes ar zināmajām ekvatoriālajām koordinātēm, tiek aprēķināta plates atrisinājuma funkcija un katra attēla pikseļa koordinātēm (x, y) tiek piesaistītas noteiktas ekvatoriālās koordinātes (α, δ). Pēc šādā veidā kalibrētā attēla tika noteiktās novu koordinātes. Automātiskajai attēlu kalibrēšanai tika izmantota MaximDL komerciālo programmu pakete. Atbalsta zvaigžņu koordinātes tika iegūtas no augstās precizitātes astrometriskā kataloga UCAC2 (Zacharias et al. AJ 120, 2131 (2000)). Pēc šīs metodes veiktās koordināšu noteikšanas precizitāti var ietekmēt vairāki faktori: atbalsta zvaigžņu ekvatoriālo koordināšu kļūda; attēla kropļojumi, kas rodas plates skanēšanas procesā; zvaigznes centra noteikšanas neprecizitāte; attēla pikseļu izmērs. Katras novas koordinātes tika izmērītas uz vairākām platēm ar rezultējošo koordināšu vidējās kvadrātiskās kļūdas vērtību 0.3–0.6 loka sekundes.

3.1.2 Novu fotometrija

M31 galaktikas novu fotometrija tika veiktā daļēji uz fotogrāfiskajām platēm, bet daļēji – uz digitalizētajiem fotoplašu attēliem.

Vispārpieņemta metode zvaigžņu fotometrijai uz fotoplatēm ir nomelnojuma mērīšana izmantojot mikrofotometru. Fotografiskās plates emulsijas reakciju uz krītošo starojumu var raksturot ar diviem fizikāliem lielumiem: pieaugot zvaigznes eksponēšanas laikam, pirmkārt, pieaug zvaigznes attēla diametrs, otrkārt palielinās fotoplates apgabala

nomelnojums, uz kura iedarbojas zvaigznes starojums. Tomēr zvaigznes diametra mērījumi ir grūti veicami, jo astronomiskās fotoplates emulsijas graudiem ir relatīvi liels izmērs, tādēļ zvaigznes spožuma novērtēšanai tiek mērīts fotoplates nomelnojums. Fotoplati apgaismo ar augstās stabilitātes gaismas plūsmu, un veido zvaigznes attēlu plaknē, kurā ir uzstādīta konstanta izmēra diafragma. Uz diafragmas pārmaiņus projicē zvaigžņu un fona attēlus, un caur to izejošo gaismu reģistrē ar fotoelektrisko ierīci. Šādi tiek izmērītas pētāmas zvaigznes, salīdzinājuma zvaigžņu un to apkārtnes fona rādītis nomelnojums. Lai ievērotu nevienmērīgu emulsijas jutīgumu, zvaigznes rādītā nomelnojuma vērtība N tiek dalīta ar tās apkārtnes vidējo fona rādītis nomelnojumu N_f . Lai pēc tām noteiktu pētāmas zvaigznes zvaigžņlielumu ir jākonstruē tā saucama kalibrēšanas līkne, t.i. sakarība starp salīdzinājuma zvaigžņu zināmajiem zvaigžņlielumiem un N/N_f attiecībām.

Novu fotometrija tika veikta izmantojot mikrofotometru MF-2. Salīdzinājuma zvaigžņu spožumu vērtības tika paņemtas no Magnier et al. (1992) kataloga, kurā zvaigžņu spožuma novērtējuma vidējā kļūda ir $0.^m02$. Kalibrēšanas līknes konstruēšanai novas tuvākajā apkārtņē tika izvēlētas tādas salīdzinājuma zvaigznes, kuru spožumi maz atšķiras no novas spožuma. Sakarība starp iegūtajām N/N_f attiecībām un zvaigžņu zvaigžņlielumiem tika attēlotā grafiski, un datu punkti tika aproksimēti ar taisni, no kurās tika noteikts novas N/N_f attiecībai atbilstošs zvaigžņlielums. Fotometrijas precizitāti bez kalibrēšanas līknes izklīdes varēja ietekmēt vairāki uz fotoplates esošie defekti. Turklāt uz vairākām fotoplatēm iegūtās N/N_f attiecības bija ļoti zemas (īpaši ja nova atrādās tuvu M31 kodolam), tādēļ pat ļoti nelielas fona fluktuācijas varēja ietekmēt mērījumos iegūtas vērtības. Ievērojot šos faktorus, maksimālā kļūda novu spožuma mērījumiem tiek novērtēta kā $0.^m2$. Ja zvaigzne bija uz redzamības robežas vai tai tuvu atrādās emulsijas defekts, noteiktā spožuma kļūda var sasniegt vienu zvaigžņlielumu, tādēļ šādi novērtējumi tika apzīmēti kā nedrošie.

1. tabula. Novu ātruma klases (pēc Warner 1995)

Novu ātruma klases	t_2 (dienās)	v_2 (mag dienā)
Ļoti ātrās	≤ 10	≥ 0.20
Ātrās	11-25	0,18-0,08
Mēreni ātrās	26-80	0,07-0,025
Lēnās	81-150	0,024-0,013
Ļoti lēnās	151-250	0,013-0,008

Novu spožumu mērījumi uz digitalizētajām platēm tika veikti izmantojot MaximDL programmu paketi. Zvaigznēm tika veiktā apertūras fotometrija, kuras pamatprincips ir novērotas gaismas plūsmas (attēla pikseļu vērtības) summēšana dotā rādiusa apļveida apertūras robežās ap pētāmā objekta centru. Papildus tika mērīts debess fona līmenis ap zvaigzni riņķveida apgabalā ap zvaigzni. Fona pikseļu vērtības programmā tiek pēc vidējotas pēc mediānas metodes rezultējošs signāla līmenis tiek atņemts no zvaigznes spožuma. Apertūras rādiuss tika izvēlēts mazāks par zvaigznes redzamo izmēru. Kā parādīja Howell et al. (1989) vislabākā signāla un trokšņa attiecība (S/N) tiek sasniedzama izmantojot tieši samēra maza izmēra apertūru: fotometrijas precizitāte gadījumā, ja apertūras izmērs ir nedaudz lielāks par vizuālo avota izmēru ir līdz pat 60% zemāka, nekā ja tiek izmantota mazāka izmēra apertūra. Izmērot pētāmas novas un salīdzinājuma zvaigžņu plūsmas, kalibrēšanas līknes tika konstruētas kā tika iepriekš aprakstīts.

Noteicot iegūto novu spožuma maiņas līkņu slīpumu, novas tika klasificētas saskaņā ar Payne-Gaposchkin (1957) klasifikācijas shēmu (1. tabula).

3.2 Oglekļa zvaigžņu pētījumu metodika

3.2.1 Augstās izšķirtspējas spektru novērojumi un datu pirmapstrāde

Oglekļa zvaigžņu DY Per, V1983 Cyg un V2074 Cyg un spektroskopiskie novērojumi tika veikti 2008. gada 19., 21. un 22. augustā ar 2.56 m Ziemeļvalstu Optisko Teleskopu (La Palma). Šo zvaigžņu augstās izšķirtspējas ešelle spektri ($R = 67000$) tika

uzņemti izmantojot FIES (*Fibre-fed Echelle Spectrograph*) spektrogrāfu. Katrs spektrs tika uzņemts vienīgas ekspozīcijas laikā; ekspozīcijas ilgums DY Per, V1983 Cyg un V2074 Cyg bija attiecīgi 1800, 2200 un 3600 s. Uzņemtie spektri sastāv no 79 daļēji pārklājušām spektrālajām kārtām un aptver 3640–7360 Å viļņu garumu diapazonu. Tomēr pie viļņa garumiem īsākiem par ~4750 Å (V1983 Cyg) un ~5165 Å (V2074 Cyg) spektriem ir ļoti zema signāla-pret-troksni (S/N) attiecība. Viļņu garumu skalas kalibrēšanas nolūkos pēc katras zvaigznes novērojuma tika uzņemts torija-argona (ThAr) lampas spektrs.

Izmantojot automātiskās datu apstrādes paketi FIEStool² tika veikta iegūto spektru pamata pirmapstrāde: 1) kombinēto BIAS attēlu atņemšana (termiskā un CCD kameras nolasišanas trokšņa novākšanai); 2) attēlu korekcija izmantojot kombinēto līdzena lauka attēlu (optiskās sistēmas ienesto kropļojumu korekcijai); 3) spektrālo kārtu noteikšana un 2-d spektra ekstrakcija; 4) spektrālo kārtu korekcija pret nevienmērīgo gaismas uztveršanas efektivitāti (blaze shape). Pēc tam tika veikta viļņa garumu skalas kalibrēšana izmantojot pēc ThAr lampas spektrā identificētajām līnijām; tika panākta ~0.03 Å kalibrēšanas precizitāte visiem spektriem.

Tālākā spektru apstrāde un analīze tika veikta izmantojot Dech20T programmu (Galazutdinov 1992). Pēc mazāk blendētajām CN līnijām pētāmo zvaigžņu spektros tika noteikts spektrālo līniju viļņu garumu nobīdes lielums attiecībā pret laboratorijas vērtībām. Tādējādi, ievērojot korekciju pret Zemes kustību attiecībā pret Sauli, tika atrasts zvaigžņu heliocentriskais radiālais ātrums, -30.3 ± 0.7 un -50.8 ± 0.5 km s⁻¹ attiecīgi V1983 Cyg un V2074 Cyg. Tas pats lielums tika izmērīts izmantojot atomu līnijas, konstatējot, ka starpība starp radiālajiem ātrumiem, kas tika atrasti pēc molekulām un atomiem ir mērījuma kļūdas robežās.

3.2.2 Spektroskopijas datu analīzes metodika

Auksto oglekļa zvaigžņu spektros liela daudzuma tuvu esošo molekulāro līniju dēļ kontinuuma līmenis ir pilnīgi apslēpts, bet gandrīz visas atomu līnijas ir blendētas. Šī iemesla dēļ klasiskā zvaigžņu ķīmiskās analīzes metode mērot līniju ekvivalentos platumus tiešā veidā nav pielietojama šīm zvaigznēm. Tādēļ V1983 Cyg un V2074 Cyg zvaigžņu atmosfēru parametru un ķīmisko īpašības noteikšanai tika pielietota spektru salīdzinājuma

² <http://www.not.iac.es/instruments/fies/fiestool/FIEStool.html>

analīzes metode. Auksto oglekļa zvaigžņu teorētisko spektru aprēķini rāda, ka šo zvaigžņu spektru izskatu pamatojoties nosaka četri parametri: fotosfēras efektīvā temperatūra, oglekļa un skābekļa koncentrāciju attiecība (C/O), kā arī mazākajā mērā oglekļa izotopu koncentrāciju attiecība $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ un metālu saturs. Nosākot šos parametrus ir iespējams spriest par zvaigznes piederību pie vienas no oglekļa zvaigžņu apakšklasēm: SC, N, R vai CH, un pašreizējo zināšanu robežās secināt par zvaigznes evolucionāro statusu un atmosfērā novērotā oglekļa bagatinājuma izcelsmi.

Spektru kvalitatīvajā analīzē kā salīdzinājuma spektri tika izmantoti 87 oglekļa zvaigžņu augstās izšķirtspējas ešelle spektri, kurus autorei lietošanai laipni nodeva Dr. C. Barnbaum (personiskā komunikācija). Tie ir Lika observatorijā iegūtie spektri laika periodā starp 1988. un 1991. gadiem. Spektru izšķirtspēja pie 6100 Å ir 0.13 Å un tie aptver viļņu garumu diapazonu no 5084 līdz 7852 Å. Spektri sastāv no 40 nepārklājušos spektrālajām kārtām, starp kurām ir 34-53 Å lieli pārtraukumi. Pilnīga informācija par šiem spektriem ir atrodama Barnbaum (1994) publikācijā. Dati par analīzē izmantoto zvaigžņu atmosfēras parametriem un ķīmisko sastāvu tika savākti no literatūras: Lambert et al. (1986); Abia & Isern (1997, 2000); Abia et al. (2002, 2010); Bergeat & Chevallier (2005); Zamora et al. (2009) un Ohnaka & Tsuji (1996).

Pētījumā arī tika izmantotas Ya. V. Pavlenko aprēķināti oglekļa milžu zvaigžņu atmosfēru modeļi (Pavlenko 2003, Pavlenko & Yakovina 2009). Izmantotie modeļi aptver efektīvo temperatūru intervālu $T_{\text{eff}} = 2000\text{--}3000\text{K}$ un C/O attiecības no 1.007 līdz 3.162. Visi modeļi ir aprēķināti pieņemot Saules metāliskuma vērtības, pie brīvas krišanas paātrinājuma $\log g = 0$ un mikroturbulences ātruma $\xi = 3 \text{ km s}^{-1}$. Izmantojot šos modeļus un programmu WITA6 (Pavlenko 1997), tika aprēķināti oglekļa zvaigžņu sintētiskie spektri, pielietojot B. Pleza aprēķinātos molekulāro C_2 un CN līniju sarakstus (Zamora 2010, personīgā komunikācija) un atomu līniju sarakstus no VALD datu bāzes (Kupka et al. 2000).

3.2.3 Fotometrijas datu analīzes metodika

Tā kā visas novērotas zvaigznes ir maiņzvaigznes, tad fotometriskās fāzes zināšana spektroskopisko novērojumu laikā ir ļoti svarīga. Divu nedēļu laikā pēc spektroskopiskajiem novērojumiem Baldones observatorijā tika veikta V1983 Cyg un

V2074 Cyg zvaigžņu fotometrija; kas parādīja, ka uz to laiku abas zvaigznes bija sava maksimālajā spožumā. DY Per zvaigzne 2008. gada augustā arī atradās savā spožākajā fāzē saskaņā ar Amerikas maiņzvaigžņu novērotāju asociācijas (AAVSO) datiem.

V1983 Cyg un V2074 Cyg fotometrijas datu analīzei B -, V - un R -joslās tika izmantoti Baldones observatorijā iegūtie novērojumu dati (Alksnis 2011, personiskā komunikācija). Daļēji šie dati, kā arī informācija par tiem ir atrodami Alksnis & Alksne (1988) un Alksnis (2003). Tika iegūti V - R krāsu indeksi abām zvaigznēm, izmantojot novērojumu pārus, kuriem to iegūšanas laiku starpība ir ne vairāk, ka 10 dienas. Fotometrijas dati tuvajā infrasarkanajā diapazonā (J -, H - un K_s -joslās) tika iegūti no Divu mikronu pilnās debess apskates (Two Micron All Sky Survey, 2MASS) on-line kataloga (Cutri et al. 2003). Precīzas fotometriskās fāzes šo mērījumu laikā gan V1983 Cyg, gan V2074 Cyg gadījumā nav zināmas (sk. 4.4. attēlu), tomēr apsverot kopumā novēroto spožuma maiņas raksturu abām zvaigznēm, darbā tiek pieņemts, ka šie infrasarkanie novērojumi ar lielu varbūtību notika zvaigžņu spožuma maksimuma laikā. V2074 Cyg bija iekļauta arī Infrasarkanā astronomiskā satelīta (InfraRed Astronomical Satellite, IRAS) apskata, tādēļ šai zvaigznei ir pieejami infrasarkanās plūsmas mērījumi IRAS on-line katalogā (IPAC 1988), kuri tika veikti zvaigznes maksimālā vizuālā spožuma laikā. Analīzē tika izmantoti dati par plūsmas blīvumu $12\mu\text{m}$ (F12) un $25\mu\text{m}$ (F25) joslās, jo pārējās joslās šai zvaigznei ir pieejamas tikai vērtību augstākās robežas. K -[12] un [12]-[25] krāsu indeksu aprēķināšanai tika izmantotas sekojošas formulas, lai atrastu [12] un [25] zvaigžņlielumus: $[12] = -2.5 \log(F12/28.3)$ un $[25] = -2.5 \log(F25/6.73)$.

Zvaigžņu efektīvo temperatūru noteikšanai tika veikta pēc krāsu indeksu ($J-K$)₀, ($H-K$)₀ un ($V-K$)₀ kalibrācijām oglekļa zvaigznēm (Bergeat et al. 2001), izmantotas formulas:

$$T_{\text{eff}} = -0.184(J-K)_0 + 3.74,$$

$$T_{\text{eff}} = -0.287(H-K)_0 + 3.6,$$

$$T_{\text{eff}} = -0.079(V-K)_0 + 3.91.$$

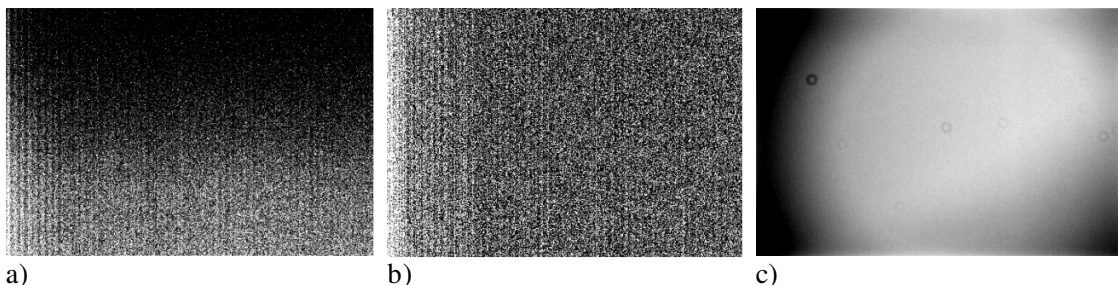
Krāsu indeksu korekcija pret starpzvaigžņu ekstinkciju tika noteiktā pēc sekojošas metodes. Tika pieņemts, ka absolūtais spožums K_s -joslā (M_{K_s}) mūsu zvaigznēm ir vienāds ar šī parametra vidējo vērtību 300 oglekļa zvaigznēm Lielajā Magelāna Mākonī, t.i. $M_{K_s} = -7.91 \pm 0.4$ (Demers et al. 2002). Tad, izmantojot formulu $M_{K_s} = K_s + 5 - 5 \log d - A_{K_s}$,

(kur d ir attālums līdz zvaigznei parsekos), tika aprēķināts attālums līdz zvaigznēm, pieņemot, ka zvaigžņu spožums nav ekstinkcijas ietekmēts. Tālāk, izmantojot trīsdimensionālo Galaktikas starpzvaigžņu ekstinkcijas sadalījuma karti (Marshall et al. 2006), iteratīvā veidā tika atrasti katras zvaigznes attālums un ekstinkcijas A_{K_s} vērtība zvaigznes virzienā. Izmantojot sakarības starp starpzvaigžņu ekstinkcijām dažādās joslās (Caldelli et al. 1989): $A_K/A_V = 0.114$, $A_J/A_V = 0.282$, $A_H/A_V = 0.190$ un pieņemot, ka $A_K = 0.95A_{K_s}$ (Dutra et al. 2002), tika aprēķinātas ekstinkcijas vērtības arī V , J un H -joslās un veiktā zvaigžņu spožuma korekcija pret nosarkumu attiecīgajās joslās.

3.3 Protoplanetārā miglāja IRAS 22272+5435 novērojumi un datu pirmapstrāde

Protoplanetārā miglāja IRAS 22272+5435 centrālās oglekļa zvaigznes HD 235858 fotometriskie novērojumi tika veikti Latvijas Universitātes Astronomijas institūta Astrofizikas observatorijā Baldonē, laika periodā no 2007. gada jūnijam līdz 2008. gada janvārim, izmantojot 80/120/240 cm Šmita teleskopu. Attēlu uzņemšana tika veikta izmantojot uz teleskopa uzstādīto SBIG-ST10XME CCD kameru ar sensora izmēru 2184 x 1472 pikseļi. Sensors tika dzesēts līdz temperatūrai, kas ir par 15 °C zemāka par apkārtējās vides temperatūru, izmantojot Peltjē elementu. Novērojumi tika veikti B , V , R un I fotometriskajās joslās, izmantojot nestandartizētus gaismas filtrus.

Attēlu kalibrēšanas nolūkos katrā novērojumu naktī bez zvaigznes attēliem tika iegūti seši BIAS uzņēmumi ar ekspozīcijas laiku 1s, kā arī pa 30 tumsas strāvas

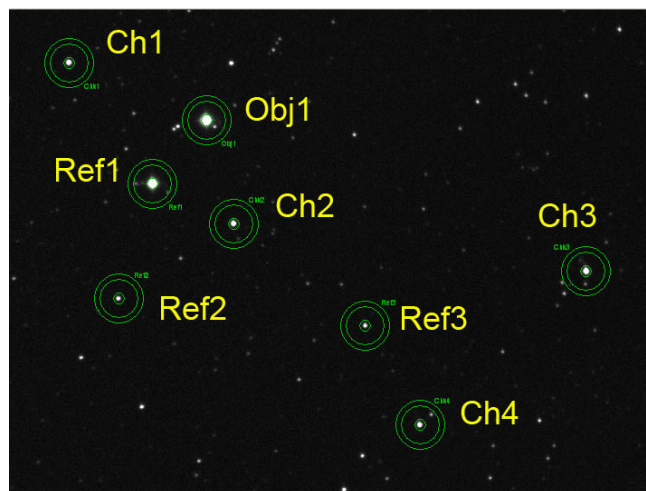


3.1. att. Novērojumu pirmapstrādei izmantoti kombinētie kalibrēšanas attēli: a) BIAS attēls; b) tumsas strāvas attēls; c) līdzena lauka attēls I -joslā.

uzņēmumiem katra filtra attēlu kalibrēšanai ar attiecīgiem ekspozīcijas laikiem. Divkārt novērojumu periodā tika iegūti teleskopa līdzena lauka uzņēmumi katrā izmantotajā filtrā, uzņemot debess attēlus neilgi pēc saulrieta.

Attēlu apstrāde tika veikta izmantojot MaximDL komerciālo programmu paketi. Novērojumos iegūto uzņēmumu pirmapstrādes procesā tie tika koriģēti pret CCD termisko troksni, atskaitot kombinēto tumsas strāvas attēlu, un kalibrēti pret katra atsevišķa pikseļa jutību, izdalot ar kombinēto līdzena lauka attēlu. Kombinētā tumsas strāvas attēla izveidei no katra no 30 attēliem tika atņemts nolasīšanas trokšņa līmenis (t.s. BIAS attēls), bet pēc tam attēli tika kombinēti pēc mediānas metodes. Savukārt kombinētais līdzena lauka attēls tika veidots sākotnēji no katra attēla atskaitot kombinēto tumsas strāvas attēlu un iegūtos attēlus kombinējot pēc mediānas metodes.

Augstākas signāla un trokšņa attiecības sasniegšanai zvaigznes novērojumi tika veikti pēc saliktās ekspozīcijas metodes: katrā filtrā tika iegūti seši secīgi uzņēmumi, pēc tam katrs uzņēmums tika reducēts un kombinējot iegūtos attēlus tika veidots gala attēls. Ekspozīciju kombinēšanai attēli tika apvienoti pa trīs pēc mediānas metodes, lai reducētu kosmisko staru rādītus defektus, un pēc tam rezultējošo divu attēlu atbilstošo pikseļu vērtības tika vidējotas.



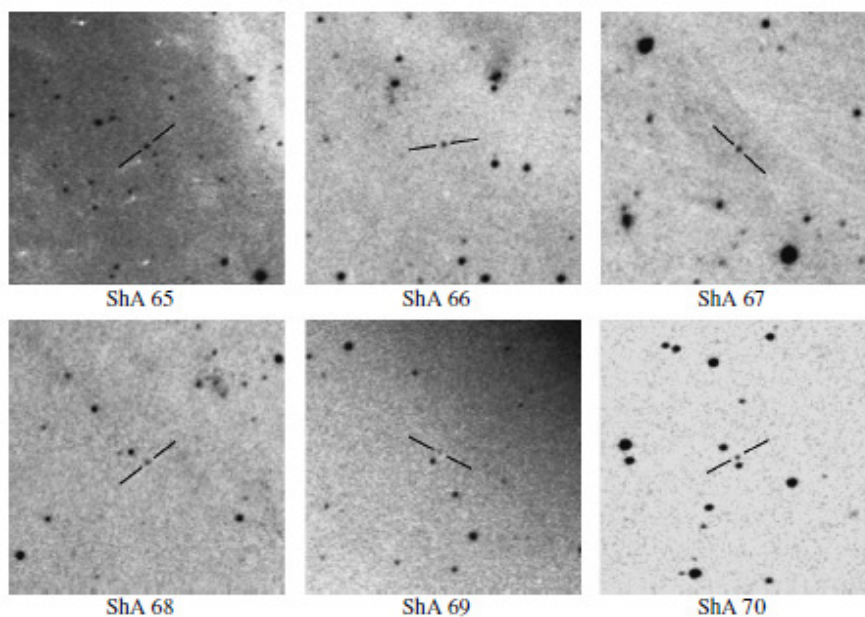
3.2. att. IRAS 22272+5435 protoplanetārā miglāja apkārtnes uzņēmums *I*-joslā. Attēlā ir atzīmētas fotometriskajiem mērījumiem izmantotas salīdzinājuma zvaigznes (Ref1-Ref4) un kontroles zvaigznes (Ch1-Ch4), kā arī mērāma zvaigzne (Obj1).

Zvaigznes spožuma mērījumi tika veikti izmantojot MaximDL programmu, pielietojot apertūras fotometrijas metodi (sk. sadaļu 3.1.2). Spožuma noteikšanas kļūdas novērtēšanas nolūkā uz katra attēla bez pētāmā objekta un salīdzinājuma zvaigžņu spožumu mērījumiem, tika veikti arī kontroles zvaigžņu mērījumi, kuru spožums novērojumu laikā tika uzskatīts par nemainīgu. Šo zvaigžņu spožumu novirzes no novērojumu laikā to vidējām vērtībām tika izmantotas IRAS 22272+5435 fotometrijas precizitātes novērtēšanai.

4. Pētījumu rezultāti un diskusija.

4.1 Novu pētījumi M31 galaktikā

Darbā tika pētīti novu optiskie uzliesmojumi, kas bija reģistrēti uz M31 galaktikas 1999.-2005. gada Baldones observatorijas uzņēmumiem fotogrāfiskajā *B*-joslā un to saistība ar rentgenstaru avotiem. Pētījumu rezultāti tika apkopoti sekojošās publikācijās: Smirnova & Alksnis (2006), Smirnova et al. (2006), Alksnis et al. (2008), Bode et al. (2009). Darba autores veiktās novu meklēšanas rezultātā tika identificētas sešas līdz šim nezināmās novas, kurām tika piešķirti apzīmējumi ShA 65-70, saskaņā ar programmā pielietoto numurēšanas shēmu (Sharov et al. 2000). 2. tabulā ir apkopoti dati par šīm novām, kur 1., 2. un 3. kolonnā ir uzrādīts attiecīgi novas pirmā novērojuma datums, novai piešķirtais apzīmējums un apzīmējums M31 optisko novu katalogā³; 4. un 5. kolonnā ir dotas novu koordinātes



4.1 att. Apkārtnes kartes novām ShA 65-70, kuras tika atklātas uz Baldones fotoplatēm. Kartēs redzamā lauka izmērs ir 5'×5', ziemeļi ir augšā un austrumi – pa kreisi.

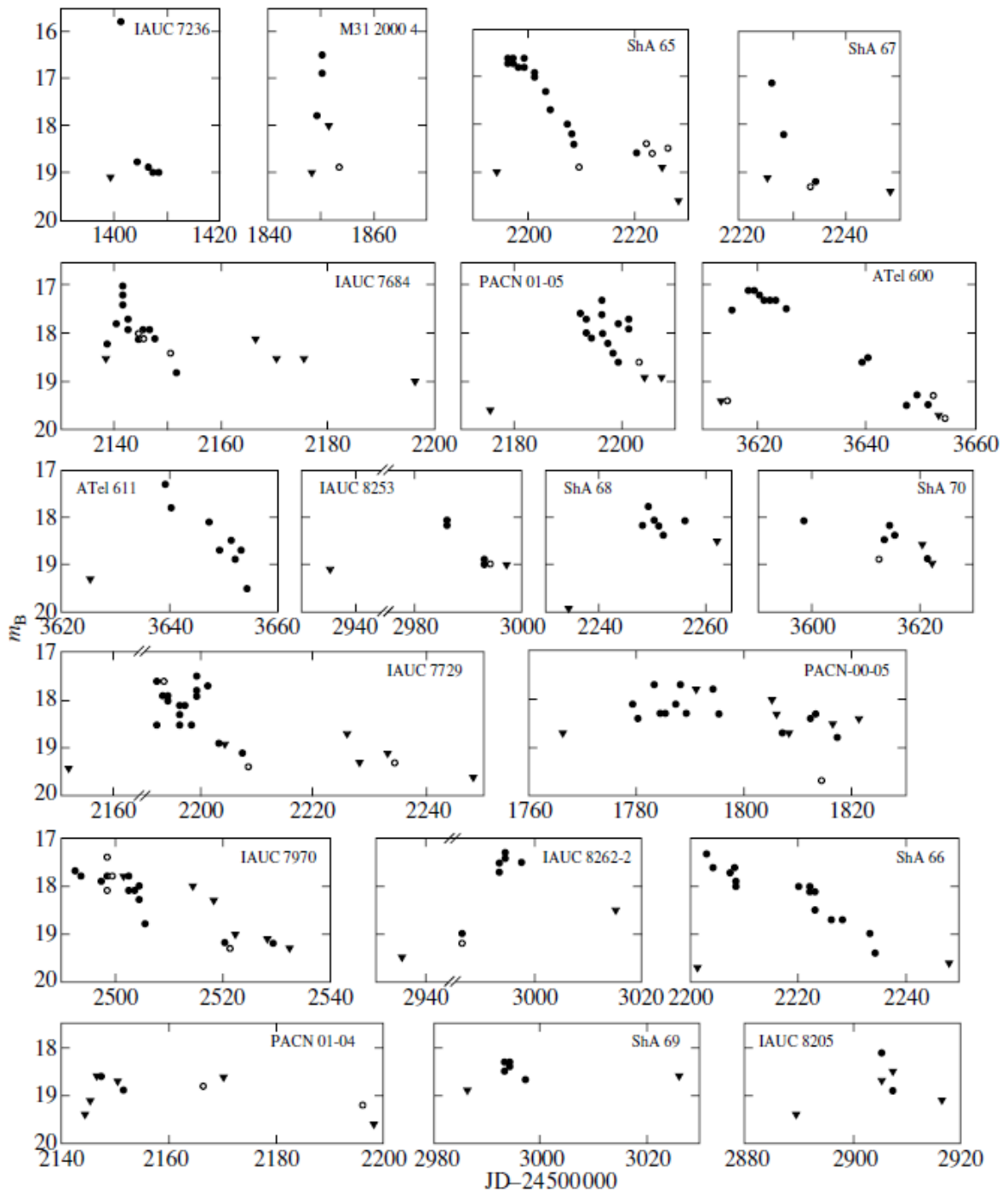
³ http://www.mpe.mpg.de/~m31novae/opt/m31/M31_table.html

2. tabula. Uz Baldones fotoplatēm atklāto novu koordinātes un apzīmējumi.

Date of first observation	Designation	Designation from M31 optical nova cat.	R.A. (2000)	Dec. (2000)	Accuracy of coordinates	<i>N</i>
Oct. 13, 2001	ShA 65	2001-10f	00 ^h 41 ^m 54 ^s 28	+41°07'23".6	0".4	7
Oct. 20, 2001	ShA 66	2001-10g	00 41 34.55	+40 49 48.6	0.4	3
Nov. 12, 2001	ShA 67	2001-11a	00 44 14.55	+41 22 04.2	0.5	2
Dec. 4, 2001	ShA 68	2001-12c	00 44 00.66	+41 45 28.5	0.3	6
Dec. 18, 2003	ShA 69*	2003-12a	00 43 04.77	+41 12 23.6	0.6	6
Aug. 15, 2005	ShA 70	2005-08a	00 38 12.73	+40 42 50.3	0.4	6

3. tabula. Novu fotometriskie un astrometriskie parametri.

Nova	t_{\max}	$m_{B\max}$	$\log(100d)$	Type	$(m_{B\max} - R)$	<i>n</i>	R, r', u	X'	Y'	<i>R</i> , kpc
IAUC 7236	1400-01	15.8	1.65	Ļoti ātrā	-0.4	1	CCD _u	-5	-2	2
PACN-00-05	1760	≤ 17.7	0.36	Lēnā	0	2	r'	13	-4	5
M31 2000 4	1850	16.5	1.87	Ļoti ātrā	0.3	2	CCD _u	18	3	5
IAUC 7684	2141	17.2	1.16	Ātrā	0.3	2	R_C	-6	-2	2
					0.3	4	r'			
PACN-01-04	2149:	18.6:	≈ 0.3	Lēnā	(0.2)		r'	-7	4	4
IAUC 7729	2193:	17.7	0.46:	Mēreni ātra	0.1	2	r'	-1	5	5
					0.5	1	R_C			
PACN-01-05	2192-96	17.6	0.7	Mēreni ātrā	1.1	3	r'	20	10	10
ShA 65	2196-97	16.6	1.16	Ātrā	-			-13	-2	4
ShA 66	2202-03	17.0-17.3	0.48:	Mēreni ātrā	-			-29	6	8
ShA 67	2226	17.1	1.41	Ļoti ātrā	-			15	10	10
ShA 68	2249:	17.6	≈ 0.3	Lēnā	-			32	-7	9
IAUC 7970	2490:	(17.7)	0.71	Mēreni ātrā	(0.8)		<i>R</i>	-9	4	4
IAUC 8205	2895-99	≤ 18.1	-	-	-			-8	10	9
IAUC 8253	2974-79	≤ 18.1	≈ 1.0	Ātrā	(0.4)		<i>R</i>	-2	5	5
IAUC 8262-2	2994-95	17.4	-	-	-0.5	1	<i>R</i>	6	-3	3
ShA 69	2992:	18.3	-	-	0.8	1	<i>R</i>	-1	5	5
ShA 70	3598:	(17.5)	0.46	Mēreni ātrā	-			-58	20	23
ATel 600	3616-19	17.1	0.83	Mēreni ātrā	(0.5)		CCD _u	-72	-1	16
ATel 611	3637:	≤ 17.3	1.04	Ātrā	0.6	2	<i>R</i>	-65	-5	15

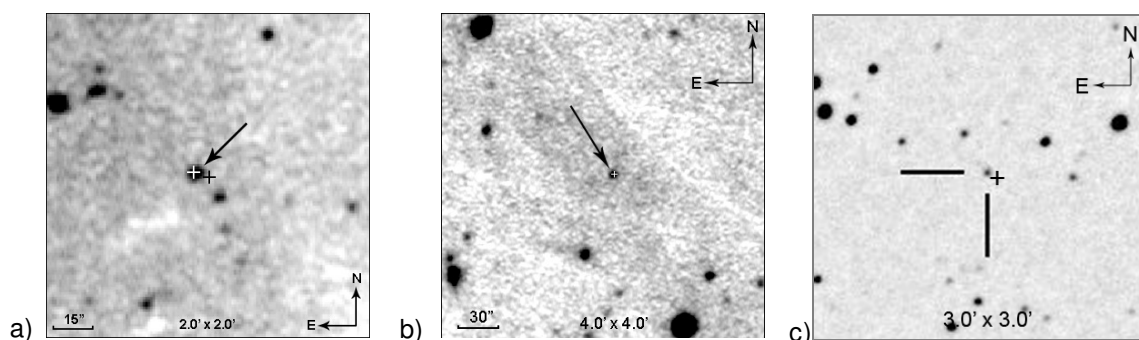


4.2. att. Novu spožuma maiņas līknes fotogrāfiskajā m_B -joslā. Pilnie aplīši ir drošie spožuma novērtējumi, tukšie aplīši ir nedrošie novērtējumi, trijstūrīši ir spožuma augšējās robežas.

saskaņā ar autores mērījumiem; 6. un 7. kolonnā ir dotas koordināšu vidējās kvadrātiskās novirzes un to fotoplašu skaits, uz kurām tika veikti koordināšu mērījumi. 4.1. attēlā ir parādītas jaunatklāto novu apkārtnes kartes.

Visām identificētajām novām, kā arī vēl trīspadsmit novām, kuras uzliesmoja apskatāmajā laika periodā un ir redzamas uz Baldones fotoplatēm, tika veikti spožuma mērījumi, vai noteiktas spožuma augšējās robežas. 4.2. attēlā ir parādītas pēc šo fotometrisko mērījumu rezultātiem konstruētās novu spožuma maiņas līknes. Diemžēl, novērojumu skaits un biežums nav pietiekoši, lai precīzi noteiktu novu fotometriskos parametrus, tomēr daži novu raksturlielumi var tikt novērtēti. 3. tabulā ir apkopoti pēc spožuma maiņas līknēm novērtētie novu parametri, tādi kā novas maksimālā spožuma laiks t_{max} , novas spožums maksimumā m_{Bmax} , $\log(100d)$ parametrs, kurš raksturo novas spožuma krišanas ātrumu zvaigžņlielumos dienā (no maksimuma momenta līdz momentam, kad novas spožums samazinās par diviem zvaigžņlielumiem) un attiecīgais novas tips: ļoti ātrā, ātrā, mēreni ātrā vai lēnā nova. 3. tabulas pēdējās trīs kolonnās ir doti novu ortogonālās koordinātes X un Y (loka minūtēs) pēc Arp (1956) sistēmas un attālumi līdz galaktikas centram (kiloparsekos), pieņemot, ka novas atrodas M31 galaktikas plaknē un šīs galaktikas asu attiecība ir 4:1. 6., 7. un 8. kolonnā ir doti vidējais novu krāsu indekss maksimuma laika tuvumā ($m_{Bmax} - R$), novērtējumam izmantoto novērojumu skaits un fotometriskā sistēma. Novu krāsu raksturlielumi tika novērtēti, izmantojot literatūrā pieejamos fotometrijas datus dažādās fotometriskajās joslās.

Nesenajos pētījumos (piem. Pietsch et al. 2005a) tika parādīts, ka vairākas M31 galaktikas novas ir saistītas ar īslaicīgiem supermīkstā rentgenstarojuma avotiem. Tādēļ arī visām uz Baldones platēm atklātajām novām tika pārbaudīta to iespējamā saistība ar pieejamo rentgenavotu katalogu objektiem. Rezultātā nova ShA 65 tika identificēta ar kosmiskās rentgenstaru observatorijas XMM-Newton kataloga (Pietsch et al. 2005a) īslaicīgo supermīkstā rentgenstarojuma avotu №191 (turpmāk tekstā [PFH]191). Gan rentgenavota pozīcijas tuvums novas pozīcijai, gan tā parādīšanās laiks neilgi pēc novas optiskā uzliesmojuma norādīja uz to, ka šie divi objekti ir fizikāli saistīti. Tomēr citi autori (Pietsch et al. 2005b un Orió 2006), agrāk piesaistīja rentgenavotu [PFH]191 citai novai, kas uzliesmoja 1992. gadā (turpmāk tekstā [SI]1992-01). Pietsch et al. (2005b) secināja, ka rentgenstarošanas fāzes aizkavēšanās varētu norādīt uz to, ka nova [SI]1992-01 ir atkārtotā



4.3. att. a) Novas ShA65 apkārtnes karte (nova ir parādīta ar bultiņu). Ar balto un melno krustiņu ir norādītas atbilstoši rentgenavota [PFH]191 un novas [SI]1992-01 pozīcijas. b) Novas ShA 67 apkārtnes karte. Krustiņš norāda rentgenavota [PFH]543 pozīciju. c) Novas M31N 2007-12b apkārtnes karte (K. Hornoča uzņēmums). Krustiņš norāda novas M31N 1969-08a pozīciju.

nova, kurai pēc aptuveni astoņiem gadiem notika jauns uzliesmojums. Lai pārbaudītu šo hipotēzi, tika veikti novas [SI]1992-01 koordināšu mērījumi uz Baldones observatorijas arhīva fotoplatēm, ka rezultātā tika secināts, ka a) kaut arī novas ShA 65 un [SI]1992-01 pozīcijas ir ļoti tuvas, tā nav viena uz tā pati (atkārtotā) nova; b) tieši nova ShA 65 ir īstais rentgenavota [PFH]191 optiskais dublikāts. 4.3a attēlā visu trīs objektu – divu optisko novu un rentgenstaru avota – savstarpējais izvietojums. Pēc novas ShA 65 identifikācijas ar SMR avotu tika pārbaudīti Chandra un XMM-Newton kosmisko observatoriju 2000.-2002. gadā atklāto 55 rentgenstarojuma avotu pozīcijas uz Baldones arhīva fotoplatēm, kā rezultātā vēl viena optiskā nova, ShA67 tika identificēta ar Pietsch et al. (2005a) kataloga SMR avotu №543 (sk. 4.3b attēlu), spožāko no pašlaik zināmajiem SMR avotiem M31 galaktikā.

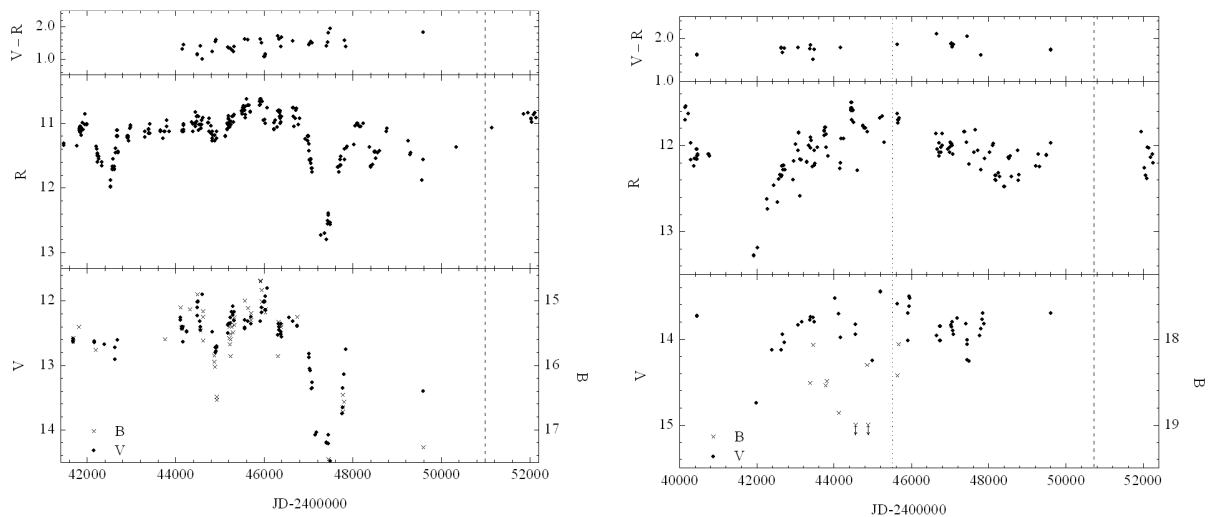
Pētījuma gaitā izdevās labot vēl vienas ar SMR avotu asociētās novas kļūdainu identificējumu ar vēsturiskās novas uzliesmojumu, uz kā sākotnēji pamatojās šīs novas kā atkārtotas novas klasifikācija. Izmantojot Baldones observatorijas M31 galaktikas arhīva uzņēmumu, tika noteikts, ka nova M31N 2007-12b, kas sākotnēji tika identificēta ar vēsturisko novu M31N 1969-08a, nav viens un tas pats objekts (sk. 4.3c attēlu). Tas skaidri parādīja oriģinālo uzņēmumu izmantošanas nepieciešamību precīzai astrometrijai ārpusgalaktikas atkārtoto novu pētījumos (Bode et al. 2009).

Pētījumā iegūtās optisko novu identifikācijas un parametri ir svarīgi homogēnas statistiskās datu bāzes izveidei par šiem objektiem, kura ir nepieciešama ticamu novas uzliesmojuma parametru noteikšanai, novu populāciju īpašību pētīšanai, šo dubultzvaigžņu

sistēmu evolūcijas un fizikālo parametru noskaidrošanai. Pētījumā iegūtie dati jau tiek izmantoti novu rentgenstarošanas fāzes pētījumos (piem. Stiele et al. 2011, Henze et al. 2011), tai skaitā arī korelāciju noteikšanai starp novu optisko uzliesmojumu un rentgenstarošanas fāzes raksturīpašībām, kuras nākotnē var tikt izmantotas kā ievades parametri šajos objektos notiekošo procesu teorētiskajos modeļos.

4.2 Divu oglekļa zvaigžņu ar ilgtermiņa spožuma satumsumiem augstas izšķirtspējas spektroskopija un spektrālās enerģijas sadalījuma analīze

Tika pētītās divas oglekļa zvaigznes (V1983 Cyg un V2074 Cyg), kuras saskaņā ar fotometriskajiem pētījumiem vizuālajā diapazonā (Alksnis 2003) izrāda ievērojamus, neperiodiskus ilgtermiņa spožuma satumsumus (sk. 4.4. attēlu). Abām zvaigznēm tika veikta augstas izšķirtspējas optisko spektru analīze zvaigžņu spožuma maksimuma laikā. Papildus tika analizēti no dažādiem literatūras avotiem iegūti abu zvaigžņu fotometrijas dati vizuālajā un infrasarkanajā diapazonā. Pētījuma mērķis bija noteikt pētāmo zvaigžņu pamatparametrus, kā arī noskaidrot, vai to spektros ir konstatējamas kādas īpatnības, kuras varētu palīdzēt izprast šo zvaigžņu neparastās fotometriskās uzvedības fizikālos cēloņus. Tika pārbaudīts arī pieņēmums (hipotēze), ka pētāmās zvaigznes varētu būt pieskaitāmas pie aukstajām R CrB tipa maiņzvaigznēm, par kuru prototipu tiek uzskatīta oglekļa zvaigzne DY Persei. Šīm nolūkam tika veikta spektru kvalitatīva analīze, salīdzinot tos ar vairākiem dažādu tipu oglekļa zvaigžņu spektriem, vai pielietojot spektru sintēzes metodi, kā arī tika analizētas zvaigžņu spektrālās enerģijas



4.4. att. Spožuma maiņas līknes *BVR* joslās oglekļa zvaigznēm V1983 Cyg (kreisais panelis) un V2074 Cyg (labais panelis), iegūtas Baldones observatorijā (sk. Alksnis & Alksne 1988, Alksnis 2003). Augšējos paneļos ir arī parādītas zvaigžņu krāsu indeksa *V-R* izmaiņas laikā. Ar pārtraukto un punktēto līniju ir atzīmēti attiecīgi 2MASS un IRAS novērojumu datumi infrasarkanajā diapazonā.

4. tabula. Iegūtie V1983 Cyg un V2074 Cyg parametri un par starpzvaigžņu vides ekstinkciju koriģētie krāsu indeksi.

Zvaigzne	d (kpc)	A_{K_s}	$(J-H)_0$	$(J-K)_0$	$(H-K)_0$	$(V-K)_0$	$T_{\text{eff}}(\text{K})$	$K_0-[12]$	$[12]-[25]$
V1983 Cyg	4.1	0.18	1.19	1.77	0.58	5.52	2761	–	–
V2074 Cyg	4.0	0.24	1.18	1.82	0.64	6.43	2557	1.67	0.19

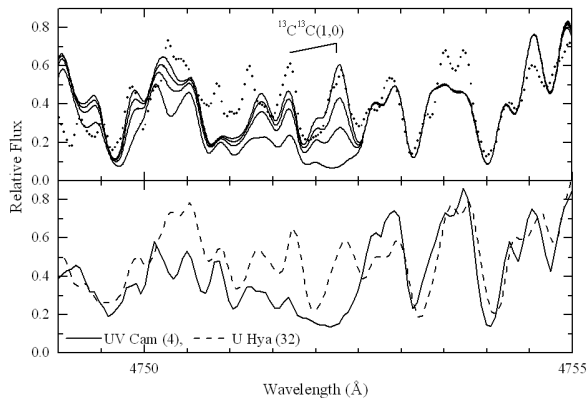
sadalījums vizuālajā un infrasarkanajā diapazonā, izmantojot pieejamos fotometrijas datus. Pētījuma rezultāti tika apkopoti zinātniskajā publikācijā (Smirnova 2011).

Zvaigžņu efektīvā temperatūra tika noteikta izmantojot efektīvās temperatūras kalibrācijas pret krāsu indeksiem $(V-K)_0$ un $(J-K)_0$ un $(H-K)_0$ oglekļa zvaigznēm (Bergeat et al. 2001). Spektrālās enerģijas sadalījuma korekcijai par starpzvaigžņu ekstinkciju tika noteikti attālumi līdz abām zvaigznēm un atbilstošie nosarkuma lielumi zvaigžņu virzienā. 4. tabulā ir apkopoti iegūtie zvaigžņu parametri (attālums, nosarkuma lielums K_s fotometriskajā joslā, vidējā efektīvā temperatūra pēc trim krāsu indeksiem), kā arī par starpzvaigžņu ekstinkciju koriģēti krāsu indeksi un (V2074 Cyg gadījumā) infrasarkanie krāsu indeksi, kas tika iegūti, izmantojot $12\mu\text{m}$ un $25\mu\text{m}$ plūsmu blīvumus no IRAS kataloga. Tā kā infrasarkanā ekscesa lielums norāda uz apzvaigznes putekļu apvalka biezumu un, sekojoši, masas zaudēšanas ātrumu oglekļa zvaigznei, tad pēc iegūtajiem infrasarkanajiem krāsu indeksiem, analizējot enerģijas sadalījumu pētāmo oglekļa zvaigžņu spektros, var izdarīt secinājumus par to apzvaigžņu vides īpašībām. Abu zvaigžņu izvietojums uz $(J-H)_0 - (H-K)_0$ diagrammas oglekļa zvaigznēm (Whitelock et al. 2006) norāda uz to, ka šīm zvaigznēm ir relatīvi plāni apzvaigžņu apvalki, tipiski ne-Miras tipa zvaigznēm ar zemo masas zaudēšanas ātrumu. Arī $K_0-[12]$ un $[12]-[25]$ krāsas V2074 Cyg atbilst tam, kas tiek novērots ne-Miras tipa oglekļa maiņzvaigznēm (Whitelock et al. 2006). Izmantojot korelācijas starp $K_0-[12]$ krāsu un masas zaudēšanas ātrumu Mirām (Whitelock et al. 1994) un AGB, un post-AGB zvaigznēm (Bieging et al. 2006), var secināt, ka $K_0-[12]$ krāsas vērtība V2074 Cyg atbilst mērenam masas zaudēšanas ātrumam $\sim 2.5 \times 10^{-7} M_{\odot}$, kas nedaudz pārsniedz vidējo lielumu neperiodiskajām zvaigznēm (Olofsson et al. 1993). Tomēr pieejamie fotometrijas dati neliecina par to, ka pētāmo zvaigžņu apzvaigžņu videi piemistu kādas neparastas īpašības salīdzinājumā ar tipiskajām aukstajām neperiodiskajām oglekļa maiņzvaigznēm.

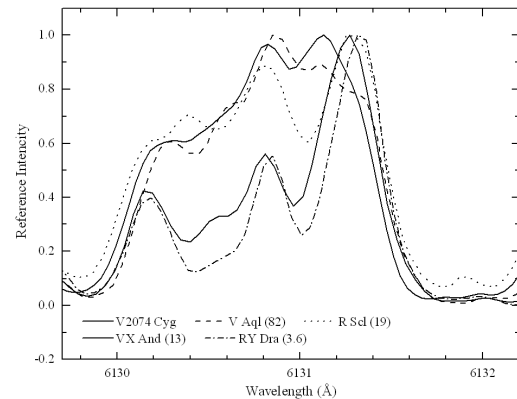
Fiksējot temperatūras parametru kā aprakstīts augstāk un, ievērojot sagaidāmo nenoteiktību iegūtajās vērtībās līdz pat ± 300 K, C/O attiecības noteikšanai pētāmo zvaigžņu spektri tika salīdzināti ar oglekļa zvaigžņu spektriem no Lika spektru datubāzes. Rezultātā tika konstatēts, ka vispārīgi labu atbilstību V1983 Cyg spektram demonstrē oglekļa zvaigznes ar efektīvajām temperatūrām diapazonā $T_{\text{eff}} \sim 2880 \pm 100$ K un relatīvi zemām C/O attiecībām 1.02–1.14, bet V2074 Cyg gadījumā tās ir aukstākās zvaigznes ar $T_{\text{eff}} \sim 2600 \pm 100$ K un augstākām C/O attiecībām 1.14–1.52. Visas šīs zvaigznes ir spektrālā N tipa neperiodiskās (Lb) vai pusperiodiskas (SR) maiņzvaigznes. Pēc detalizētākas šo spektru izpētes apgabalos, kuros dominē stipras molekulārās absorbcijas līnijas, tika atlasītas zvaigznes ar vistuvāko spektru atbilstību, kuras tālākajā analizē tika izmantotas kā salīdzinājuma zvaigznes, pieņemot, ka mūsu zvaigznēm piemīt tām līdzīgas C/O attiecības (t.i. ~ 1.05 V1983 Cyg un ~ 1.25 V2074 Cyg).

V1983 Cyg un V2074 Cyg augstas izšķirtspējas spektru izpēte liecina par to, ka oglekļa izotopu attiecība $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ nav pārāk zema abās pētāmajās zvaigznēs. Stiprās izotopiskās absorbcijas detaļas, kas ir raksturīgās J-tipa oglekļa zvaigznēm (kurām $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} < 15$) nav izteiktas mūsu spektros. Diemžēl pieejamā viļņa garumu diapazonā kaut cik precīza šīs attiecības noteikšana ir problemātiska; tomēr tika noteiktas apakšējās robežas. Abām zvaigznēm tika novērtēts, ka $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} < 20$. V1983 Cyg gadījumā tas tika secināts sintezējot $^{13}\text{C}^{13}\text{C}$ (1,0) molekulārās joslas galvu apgabālā ap 4752 \AA (sk. 4.5. attēlu) un šī apgabala salīdzināšanas ar pieejamiem spektriem. V2074 Cyg šis apgabals nav pieejams, tādēļ tika izmantots spektra apgabals ap 6131 \AA , kurā absorbcija ne-izotopisko C_2 un CN molekulāro līniju dēļ ir vāja. Zvaigznēm ar zemākām temperatūrām un relatīvi augstajām C/O attiecībām šajā reģionā bija pamanīta korelācija starp $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ attiecības vērtību un absorbcijas līniju stiprumu, norādot uz to, ka tās ir izotopisko C_2 vai CN molekulu līnijas. No salīdzinājuma ar zvaigznēm ar dažādām oglekļa izotopu attiecībām tika izsecināta šī parametra apakšēja robeža, pie kuras izotopiskās līnijas nav izteiktas, kā tas tiek novērots V2074 Cyg spektrā (sk. 4.6. attēlu).

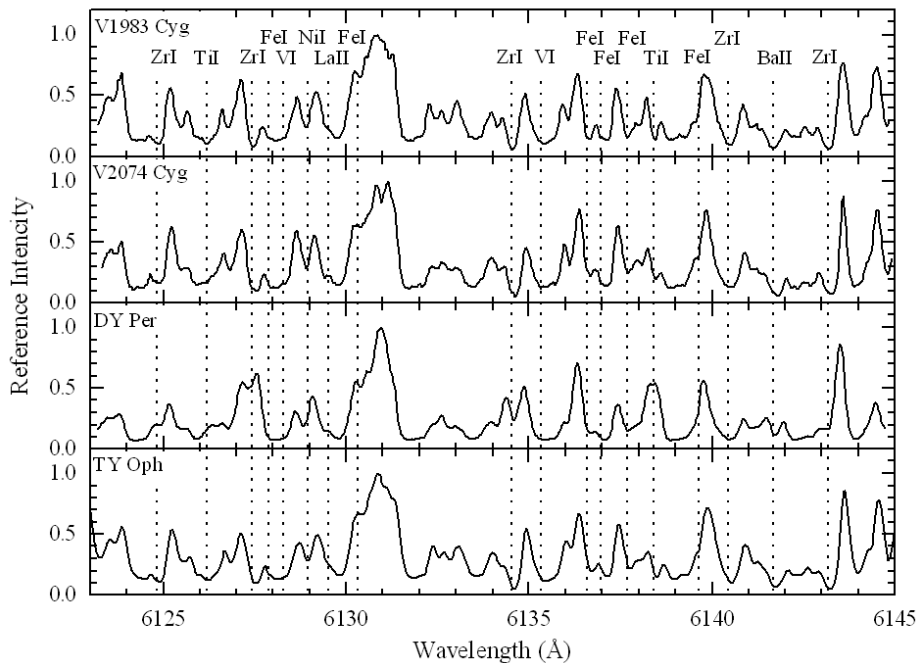
Zvaigžņu vidējā metālistuma un s-procesa elementu satura noteikšana tika veikta, salīdzinot atomu un jonu līniju intensitātes pētāmo un salīdzinājuma zvaigžņu spektros, kuri vispirms tika pielāgoti (*matched*), vadoties pēc apkārtējām molekulārajām absorbciju līnijām. Salīdzinošā analīze parādīja, ka pēc Fe, Ti un Cr līnijām noteikts V1983 Cyg



4.5. att. Augšējais panelis: V1983 Cyg spektrs (parādīts ar punktiem) $^{13}\text{C}^{13}\text{C}$ (1,0) molekulāras joslas galvas apgabalā ap 4752 Å. Ar nepārtrauktajām līnijām ir parādīti teorētiskie spektri, kuri tika aprēķināti oglekļa zvaigznes fotosfērai ar $T_{\text{eff}} = 2800$ K, $\text{C/O} = 1.05$ pie dažādām $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ attiecības vērtībām: 10, 20, 30 un 90. Apakšējais panelis: tas pats apgabals, bet N-tipa zvaigznei U Hya (pārtrauktā līnija) un J-tipa zvaigznei UV Cam (nepārtrauktā līnija); šo zvaigžņu $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ attiecības ir norādītas iekavās.



4.6. att. Attēlā ir parādīti dažādu oglekļa zvaigžņu spektri apgabalā ap 6131 Å, kurā absorbcija $^{12}\text{C}^{12}\text{C}$ un $^{12}\text{C}^{14}\text{C}$ līniju dēļ ir vāja. Salīdzinājuma zvaigžņu temperatūras ir robežās no 2500 līdz 2680 K, bet C/O attiecības – no 1.16 līdz 1.34. Zvaigžņu $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ attiecības ir norādītas iekavās.



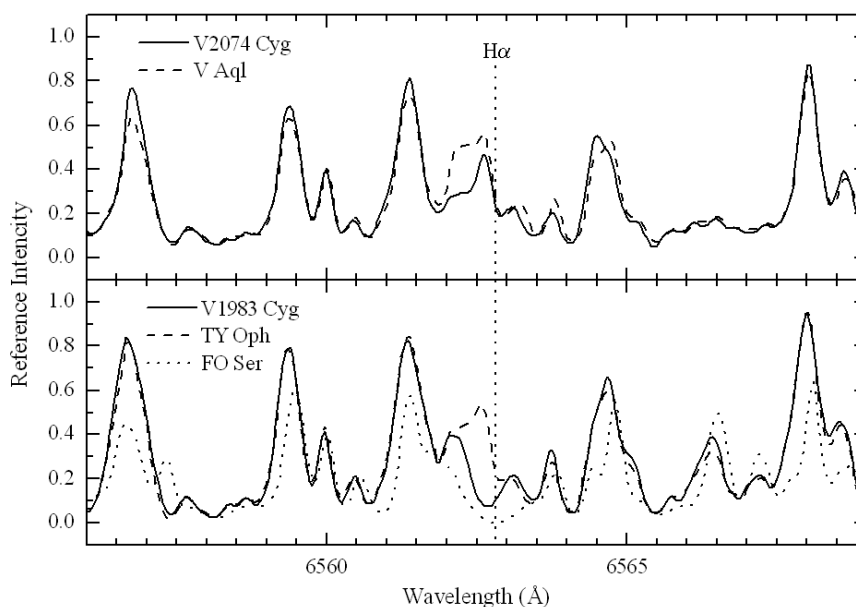
4.7. att. V1983 Cyg, V2074 Cyg, aukstās RCB zvaigznes DY Per un N-tipa oglekļa zvaigznes TY Oph augstas izšķirtspējas spektri apgabalā ar 6130 Å. Relatīvi intensīvo atomu un jonu līniju pozīcijas ir atzīmētas ar vertikālajām punktētajām līnijām; jāievēro, ka visas šīs līnijas ir mazākā, vai lielākajā mērā blendētas ar molekulu līnijām.

zvaigznes vidējais metāliskums ir tuvs šī parametra Saules vērtībai, bet s-procesa elementu saturs ir paaugstināts, līdzīgi kā tas tiek novērots tipiskajās N-tipa zvaigznēs. V2074 Cyg spektra metālu līniju intensitātes liecina par nelielu deficītu attiecībā pret Saules metāliskumu, toties s-procesa elementu saturs ir ievērojami paaugstināts. Abām zvaigznēm tika novērtētas arī litija koncentrācijas, izmantojot Li I 6707.8 Å rezonanses dubleta līniju. Salīdzinājuma zvaigznēm ar līdzīgu šīs līnijas intensitāti ir raksturīgas zemas Li koncentrācijas, $\log \epsilon(\text{Li}) < -1$. Litija deficīts ir raksturīgs oglekļa zvaigznēm, kas atrodas uz AGB (Palmerini et al. 2011).

4.7. attēlā ir parādīts spektra apgabals ap 6130 Å abām pētāmajām zvaigznēm, kā arī aukstajai RCB zvaigznei DY Per, kurai s-procesa elementu saturs nav ievērojami paaugstināts attiecībā pret Sauli (Začs et al. 2007). Tāpat ir parādīta tipiskā N-tipa oglekļa zvaigzne TY Oph, kurai ir raksturīgs paaugstināts s-procesa elementu saturs atmosfērā (Abia et al. 2002). No attēla ir redzams, ka Zr I līniju intensitātes abu mūsu zvaigžņu spektros līdzinās tām, kādas tiek tipiski novērotas N-tipa zvaigznēs.

V2074 Cyg spektra izpēte H α 6562.826 Å līnijas apkārtnē atklāja, ka šī līnija nav izteikta uz C₂ un CN līniju fona, kā tas arī tiek sagaidīts zvaigznei ar tik zemu atmosfēras temperatūru. Diemžēl pēc šī apgabala ir grūti spriest par iespējamo ūdeņraža deficītu aukstajā oglekļa zvaigznē dēļ H α līnijas augstā ierosmes potenciāla un spēcīgas blendēšanās ar molekulu līnijām (Rao 2008). Tomēr V2074 Cyg spektra salīdzinājums ar zvaigznēm, kurām ir līdzīgas T_{eff} un C/O attiecība, ļauj secināt, ka mūsu zvaigznes spektrā absorbcija H α līnijas apkārtnē nav vājāka par to, kas tiek novērots normālo oglekļa zvaigžņu spektros, un tātad ūdeņraža deficīts nav sagaidāms (sk. 4.8. attēla augšējo paneli).

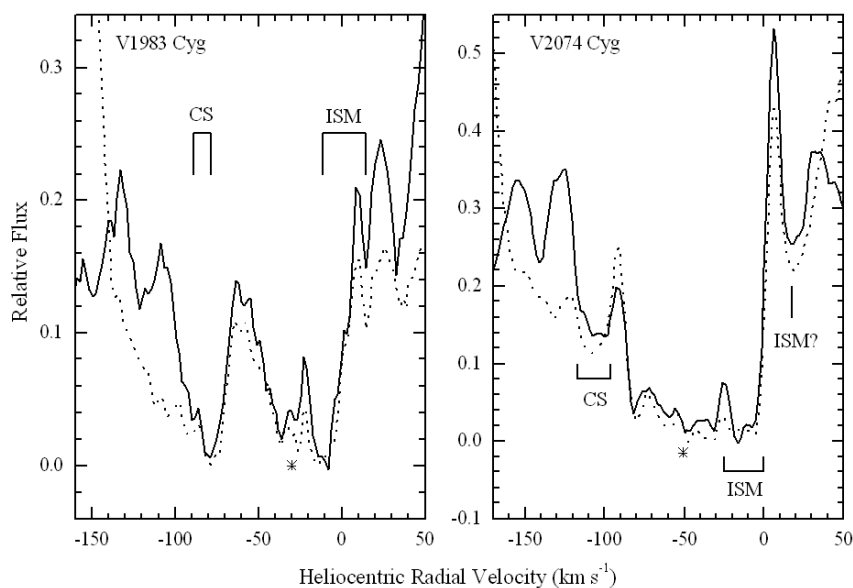
Atšķirīga aina tiek novērota V1983 Cyg spektrā: pretēji sagaidītajam, šai zvaigznei H α līnijas tuvumā ir redzama relatīvi stipra absorbcijas līnija, kuras centrs ir nobīdīts par -6 km s^{-1} attiecībā pret zvaigznes radiālo ātrumu. 4.8. attēla apakšējā panelī ir parādīts V1983 Cyg spektrs H α līnijas apkārtnē, kā arī normālās N-tipa zvaigznes TY Oph spektrs, kas pārsvarā rāda ļoti tuvu sakritību ar mūsu zvaigznes spektru, izņemot H α apgabalu. Tāpat ir parādīts J-tipa zvaigznes FO Ser spektrs, kura ir viena no retajām aukstajām oglekļa zvaigznēm ar izteiktu absorbciju H α līnijā. Ir redzams, ka kaut arī absorbcija H α līnijā V1983 Cyg spektrā ir vājāka par novēroto FO Ser spektrā, tomēr tās intensitāte stipri



4.8. att. Apgabals ap $H\alpha$ līniju V1983 Cyg (augšējais panelis) un V2074 Cyg (apakšējais panelis) spektros salīdzinājumā ar dažādu oglekļa zvaigžņu spektriem. $H\alpha$ līnijas pozīcija pie 6562.826 Å ir atzīmēta ar vertikālo punktēto līniju.

pārsniedz parasti novēroto oglekļa zvaigznēm ar temperatūru ap 2800 K. Jāpiebilst, ka literatūras izpēte norāda uz to, ka līdz šim neviena N-tipa zvaigzne ar ievērojamu absorbciju nav aprakstīta. Diskutējot par šīs neparastās spektra detaļas izcelsmi, var minēt divas pamata versijas. Pēc pirmās, $H\alpha$ absorbcija V1983 Cyg varētu rasties zvaigznes hromosfērā. Pusempīriski oglekļa zvaigžņu hromosfēru modeļi paredz, ka aktīvās hromosfēras esamības gadījumā tiek sagaidīta ievērojama šīs līnijas ierosināšana (Luttermoser et al. 1989). Novērojumi ultravioletajā diapazonā liecina par to, ka dažām ne-Miras N-tipa zvaigznēm tiešām varētu pastāvēt hromosfēras, tomēr optiskajā diapazonā šīm zvaigznēm hromosfēras izcelsmes līnijas netika atrastas (Luttermoser 2000). Šajā sakarā būtu interesanti V1983 Cyg spektra novērojumi ultravioletajā diapazonā.

Otrais iespējamais izskaidrojums novērotajai $H\alpha$ absorbcijas līnijai V1983 Cyg spektrā ir kompanjonzvaigznes esamība. Tādā gadījumā $H\alpha$ absorbcija varētu rasties kombinējoties mūsu aukstās zvaigznes spektram ar karstāka hipotētiskā kompanjona spektru. Kombinētais spektrs ar uz zilo pusi nobīdītajām Balmera absorbcijas līnijām, kas iespējams ir saistītas ar kompanjonzvaigzni, tika novērots pekulārajai oglekļa zvaigznei V Hya (Lloyd Evans 1991). Tomēr V1983 Cyg spektra novērotajā diapazonā bez absorbcijas $H\alpha$ un (iespējams) $H\beta$ līnijās nekādas citas kombinētā spektra pazīmes netika atklātas.



4.9. att. Attēlos ir parādītas Na I D1 un D2 rezonanses līnijas V1983 Cyg (kreisais panelis) un V2074 Cyg (labais panelis) spektros heliocentrisko radiālo ātrumu skalā. D1 līnijas pie 5895.92 Å ir atveidotas ar nepārtrauktajām līnijām, bet punktētas līnijas reprezentē D2 līnijas pie 5889.95 Å. Zvaigžņu radiālais ātrums ir atzīmēts ar zvaigznītēm. Ir norādītas arī komponentes, kuras visticamāk rodas apzvaigžņu apvalkos (CS) un starpzvaigžņu vidē (ISM).

Jautājuma noskaidrošanai būtu noderīgi zvaigznes spektra papildus novērojumi, lai noteiktu, vai H α līnijas nobīdes lielums mainās ar laiku.

Gan V1983 Cyg, gan V2074 Cyg spektros ir novērojama neparasta Na I D rezonanses dupleta struktūra, kurā ir identificējamās komponentes ar relatīvi lielu ātrumu attiecībā pret zvaigznes fotosfēru. 4.9. attēla ir parādītas Na I D līnijas heliocentrisko radiālo ātrumu skalā, un atzīmētas tās komponentes, kuras saskaņā ar mūsu analīzi visticamāk rodas zvaigznes fotosfērā, starpzvaigžņu vidē vai apzvaigžņu apvalkos. Visvairāk uz zilo spektra pusi nobīdītās līnijas visticamāk rodas apzvaigžņu apvalkos (mākoņos), kas kustas prom no zvaigznes virsmas ar maksimālo ātrumu $\sim 59 \text{ km s}^{-1}$ (V1983 Cyg) un $\sim 55 \text{ km s}^{-1}$ (V2074 Cyg). Tik lieli ātrumi nav raksturīgi oglekļa zvaigznēm, kurām saskaņā ar novērojumiem radio diapazonā tipisks vielas izplūšanas ātrums ir ap 10 km s^{-1} , bet augstākās šī parametra vērtības nepārsniedz 30 km s^{-1} . Tomēr tik liela ātruma komponentu esamība Na I D līnijās nav unikāls gadījums oglekļa zvaigznēm. Piemēram, aukstajai RCB zvaigznei DY Per Na I D līniju komponentu ātrums ir ap -150 km s^{-1} , binārās Miras UV Aur kompanjona spektrā to ātrums sasniedz -116 km s^{-1} .

s^{-1} , bet neparastajai oglekļa zvaigznei ar bipolāro molekulāro plūsmu V Hya tas ir ap -90 $km\ s^{-1}$. Tomēr, visas šīs zvaigznes parāda būtiskas spektroskopiskas atšķirības no mūsu pētāmajām zvaigznēm, kas neļauj droši secināt, vai kāds no fizikālajiem mehānismiem, kas izraisa liela ātruma komponentu parādīšanos šajās zvaigznēs, ir atbildīgs arī par līdzīgu parādību V1983 Cyg un V2074 Cyg.

Jāpiemin, ka ir zināma vēl viena neliela oglekļa zvaigžņu grupa – zvaigznes ar atdalīto CO apvalku, un šo zvaigžņu apvalku ātrumi arī nedaudz pārsniedz tipiskās vērtības, būdami robežās no -12.5 līdz -23 $km\ s^{-1}$. Tiek uzskatīts, ka atdalītie apvalki šīm zvaigznēm izveidojas He-slāņa uzliesmojuma laikā, kas izraisīja ļoti liela ātruma masas zaudēšanas epizodi. Divas šādas zvaigznes (TT Cyg un U Cam) spektroskopiski ļoti līdzinās V1983 Cyg un V2074 Cyg un pat tika izmantotas kā salīdzinājuma zvaigznes spektru analīzē. Diemžēl optiskajā diapazonā zvaigznes ar atdalīto CO apvalku neizceļas starp parastajām oglekļa zvaigznēm, pretēji tam, kas tiek novērots infrasarkanajā diapazonā un molekulārajās radiolīnijās. Vairāk novērojumu ir nepieciešams, lai noskaidrotu, vai mūsu zvaigznēm piemīt šādi nesen notikušā termiskā pulsa laikā izveidojušies apvalki.

Salīdzinājums ar DY Per spektru parādīja, ka, neskatoties uz šīs zvaigznes un V1983 Cyg fotometriskās uzvedības līdzību, šo zvaigžņu spektroskopiskās īpašības ļoti atšķiras: a) DY Per zvaigznei tiek novērots ievērojams ūdeņraža deficīts (Začs et al. 2007), toties V1983 Cyg gadījumā ūdeņraža deficīts var tikt viennozīmīgi noraidīts (ja Ha absorbcija izceļas no tās atmosfēras); b) s-procesa elementu saturs DY Per atmosfērā nav būtiski paaugstināts attiecībā pret Sauli (Začs et al. 2007), bet V1983 Cyg spektroskopijas rezultāti norāda uz to, ka šī zvaigznes atmosfēra ir bagātināta ar s-procesa elementiem; c) DY Per spektra enerģijas sadalījuma modelēšana norāda uz netipiski augstu C/O attiecību šai zvaigznei (Yakovina et al. 2009), toties V1983 Cyg šis parametrs ir tipisks N-tipa oglekļa zvaigznēm; d) kaut arī Na I D līniju komponentu ātrumi V 1983 Cyg krietni pārsniedz oglekļa zvaigznēs parasti novērotās vērtības, tomēr DY Per spektrā šīm komponentēm ir gandrīz trīs reizes lielāks ātrums (Začs et al. 2005), kas ir tuvs RCB zvaigznēm novērotajam. Tādējādi V1983 Cyg spektrālās īpašības nenorāda uz to, ka šī zvaigzne varētu būt līdzīga DY Per aukstā RCB zvaigzne. Līdzīgi secinājumi var tikt izdarīti salīdzinot DY Per un V2074 Cyg spektrus.

Tika ievērots, ka V1983 Cyg un V2074 Cyg fotometriskās spožuma maiņas līknes demonstrē līdzību ar dažām Magelānu Mākoņos Galaktikas baldžā atrastajām DY Per tipa zvaigznēm, kurām ir raksturīgas mazākas spožuma izmaiņu amplitūdas un lēnāks spožuma krišanas ātrums, nekā DY Per zvaigznei (piem. Tisserand et al. 2009). Par DY Per tipa zvaigznēm ir zināms, ka vairākumam no tām (bet ne visām) ir raksturīga zema $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ attiecība, bet to spektrālās enerģijas sadalījums liecina, ka tās ir līdzīgas klasiskajām oglekļa zvaigznēm. Diemžēl pagaidām nav datu par šo zvaigžņu ķīmisko sastāvu, tomēr esošie dati norāda uz to, ka V1983 Cyg un V2074 Cyg varētu tikt pieskaitītas pie DY Per tipa maiņzvaigžņu grupas.

Rezumējot, V1983 Cyg un V2074 Cyg augstas izšķirtspējas spektru kvalitatīvas analīzes rezultāti norāda un to, ka abām šīm zvaigznēm kopumā piemīt spektroskopiskās īpašības, kas raksturīgas N-tipa oglekļa zvaigznēm, kuras atrodas uz AGB. Šīs īpašības ir: zema efektīvā temperatūra, spēcīgas C_2 un CN molekulu absorbcijas joslas, ne īpaši zema oglekļa izotopiskā attiecība, vidējais metāliskums līdzīgs Saulei novērotajai vērtībai, vai nedaudz zemāks par to, palielināts s-procesa elementu saturs atmosfērā, litija deficīts. Spektroskopisko klasifikāciju apstiprina arī infrasarkanās fotometrijas dati. Tomēr, atšķirībā no vairākuma normālo N-tipa zvaigžņu, pētāmo zvaigžņu spektros tiek novērotas liela ātruma ($\sim -60 \text{ km s}^{-1}$) komponentes Na I D līnijās, kā arī neparasti stipra absorbcija $\text{H}\alpha$ līnijā V1983 Cyg spektrā.

V1983 Cyg un V2074 Cyg novēroto starojuma satumšanas epizožu daba paliek neskaidra. Tomēr šķietami līdzīga parādība ir labi izpētīta Miras tipa zvaigznēm, kurām ilgstoši spožuma aptumsumi tiek skaidroti ar ierobežota izmēra putekļu mākoņu veidošanos skata virzienā (Whitelock et al. 1997, Feast et al. 2003). Principiāli šis modelis ir līdzīgs RCB zvaigžņu aptumsumu modelim, bet atšķirības spožuma maiņas līknēs ir sagaidāmas no Miru un RCB zvaigžņu fizikālo parametru dažādības (Feast et al. 2003). Tiek uzskatīts, ka RCB zvaigznēs putekļu mākoņu veidošanos izraisa atmosfēras pulsācijas (Woitke et al. 1996). Vairākām RCB zvaigznēm to apstiprina novērotā sakarība starp radiālo pulsāciju fāzi un aptumsuma iestāšanos (Crause et al. 2007). Tomēr V1983 Cyg un V2074 Cyg zvaigznēm periodiskums spožuma maiņās netika atklāts. Tas, ka ir zināmas arī dažas citas neperiodiskās zvaigznes ar RCB-līdzīgajiem spožuma aptumsumiem (piem. Whotelock et al. 2006) varētu norādīt uz to, ka lielas amplitūdas pulsācijas iespējams nav

nepieciešams nosacījums šādu aptumsumu veidošanai. Pastāv arī viedoklis, ka gaismas obskurācijas notikumi oglekļa zvaigznēs varētu tikt saistīti ar šo zvaigžņu iespējamo binaritāti (Whitelock et al. 2006). Teorētiskie apzvaigžņu putekļu evolūcijas modeļi oglekļa zvaigznēm uz AGB rāda, ka hidrodinamiskās, starojuma vai termiskās nestabilitātes var novest pie putekļu mākoņu veidošanās (Woitke & Niccolini 2005). Novērotā zvaigžņu krāsas nosarkšana vizuālajā diapazonā spožuma minimumu laikā nav pretrunā ar šo modeli; tomēr šī jautājuma precizēšanai ir nepieciešams vairāk novērojumu.

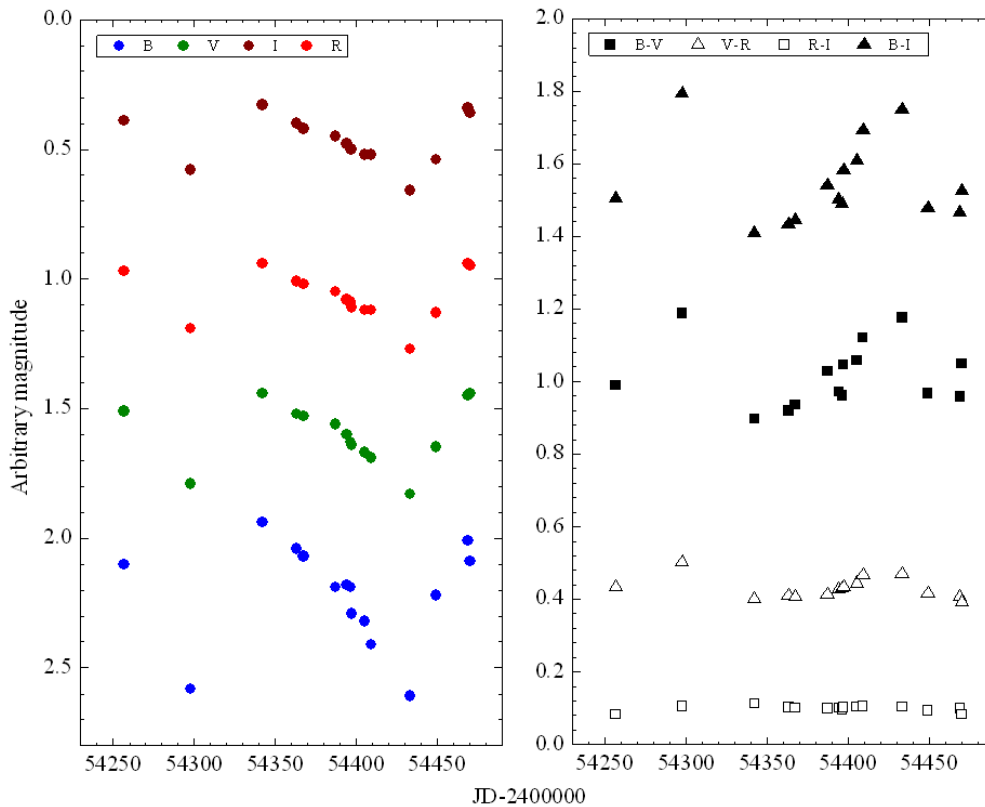
4.3 Proto-planetārā miglāja IRAS 22272+5435 fotometriskie pētījumi

Ar mērķi izpētīt proto-planetārā miglāja IRAS 22272+5435 optiskā spektra izmaiņas zvaigznes pulsāciju dažādu fāžu laikā, tika veikti šīs zvaigznes kompleksi spektroskopiskie, Doplera ātruma un fotometriskie novērojumi. Autore veica zvaigznes fotometriskos pētījumus, kuru rezultāti tika publicēti Začs et al. (2009). Spektroskopiski pētot zvaigznes, kuru atmosfērās norisinās dinamiskie procesi, ir nepieciešams ievērot šo procesu ietekmi uz zvaigznes atmosfēru, un sekojoši, spektra īpašībām. Zvaigznes pulsācijas rada triecienviļņus, kuri izplatās uz āru, stipri ietekmējot zvaigznes atmosfēru: zvaigznes spožuma maksimuma laikā var tikt novērotas emisijas līnijas un molekulāro līniju dubultošanās (Nowotny et al. 2005). Ir zināms, ka daudzas post-AGB zvaigznes uzrāda spožuma un radiālo ātrumu maiņas pulsāciju dēļ. Šo pulsāciju pētījumi var palīdzēt labāk izprast šo objektu dabu, sniedzot papildus informāciju par to fizikālajām īpašībām.

Ar 1.2m Baldones Šmita teleskopu tika veikti IRAS 22272+5435 fotometriskie novērojumu *BVRI* joslās. Kopumā septiņu mēnešu laikā tika veikti 15 novērojumi katrā filtrā. Zvaigznes spožuma mērījumu rezultāti un krāsu indeksi ir apkopoti 5. tabulā. Pirmajā kolonnā ir doti novērojumu datumi Juliāna dienās; 2.–5. kolonnā ir doti zvaigznes spožumi zvaigžņlielumos *B*, *V*, *R* un *I* fotometriskajās joslās; 6.–9. kolonnā – krāsu indeksi.

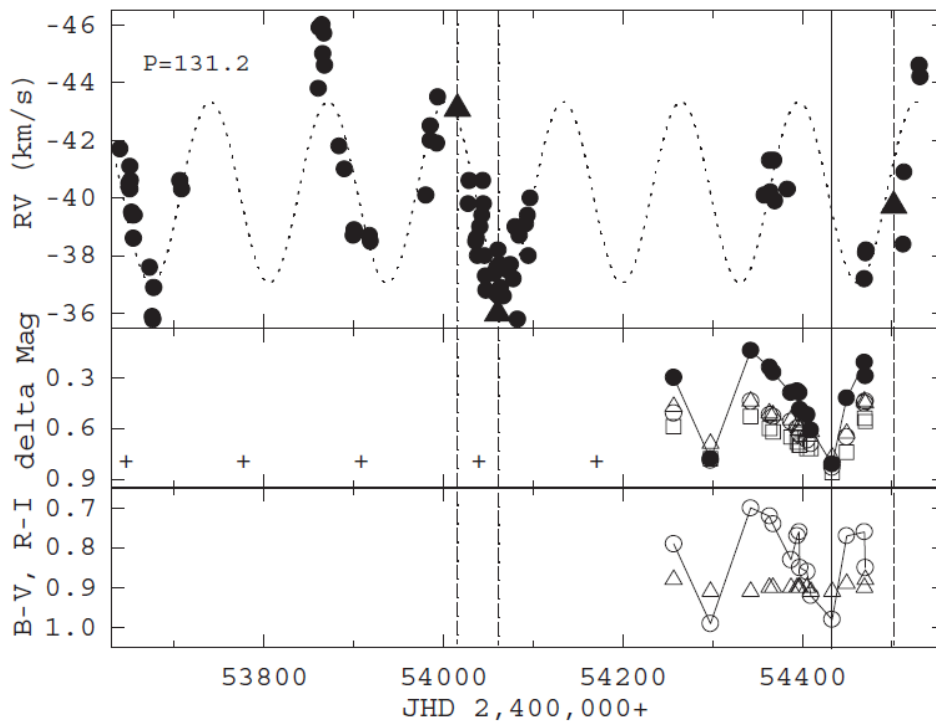
5. tabula. IRAS 22272+5435 fotometrijas rezultāti

T (JD)	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>R</i>	<i>I</i>	<i>B–V</i>	<i>V–R</i>	<i>R–I</i>	<i>B–I</i>
2454256.494	11.30	8.51	7.47	6.59	2.79	1.03	0.88	4.70
2454297.482	11.78	8.79	7.69	6.78	2.99	1.10	0.91	4.99
2454342.301	11.14	8.44	7.44	6.53	2.70	1.00	0.91	4.61
2454363.359	11.24	8.52	7.51	6.60	2.72	1.01	0.90	4.63
2454367.276	11.27	8.53	7.52	6.62	2.74	1.01	0.90	4.64
2454387.244	11.39	8.56	7.55	6.65	2.83	1.01	0.90	4.74
2454394.254	11.38	8.60	7.58	6.68	2.77	1.03	0.90	4.70
2454396.389	11.39	8.63	7.59	6.70	2.76	1.03	0.90	4.69
2454397.240	11.49	8.64	7.61	6.70	2.85	1.03	0.90	4.78
2454405.250	11.52	8.67	7.62	6.72	2.86	1.05	0.90	4.81
2454409.337	11.61	8.69	7.62	6.72	2.92	1.07	0.91	4.89
2454433.209	11.81	8.83	7.77	6.86	2.98	1.07	0.91	4.95
2454449.206	11.42	8.65	7.63	6.74	2.77	1.02	0.89	4.68



4.10. att. IRAS 22272+5435 spožuma maiņas līknes B , V , R un I fotometriskajās joslās (kreisais panelis) un krāsu indeksu izmaiņas (labais panelis). Visi grafiki ir nobīdīti gar zvaigžņlielumu asi.

4.10. attēlā ir parādītas zvaigznes spožuma maiņas līknes $BVRI$ joslās Baldones observatorijas lokālajā fotometriskajā sistēmā. Novērojumu laikā zvaigznes spožums mainījies sekojošās robežās: $B = 11.81\text{--}11.14$ mag ($\Delta B \sim 0.67$), $V = 8.83\text{--}8.44$ mag ($\Delta V \sim 0.39$), $R = 7.77\text{--}7.44$ mag ($\Delta R \sim 0.33$) un $I = 6.86\text{--}6.53$ mag ($\Delta I \sim 0.33$). Mērījumu precizitāte, kas tika noteikta pēc kontroles zvaigznēm, kuru spožums tika pieņemts par konstantu novērojumu laikā, ir 0.04 mag (B), 0.03 mag (V), 0.02 mag (R) un 0.03 mag (I). Attēlā ir parādītas arī zvaigznes krāsu indeksu $B-V$, $V-R$, $R-I$, $B-I$ izmaiņas atkarībā no laika. Ir redzams, ka pastāv korelācija starp zvaigznes spožumu un krāsu: zvaigznes spožumam samazinoties tā kļūst sarkanāka, kas saskan ar citu protoplanetāro miglāju novērojumiem (Hrivnak et al. 2010). Novērotās zvaigznes krāsu indeksu izmaiņas ir izskaidrojamas ar temperatūras izmaiņām, maksimālās izplešanās momentā zvaigznes atmosfērai kļūstot vēsākai. Saskaņā ar Hrivnak et al. (2010) šai zvaigznei novērojamā



4.11. att. IRAS 22272+5435 radiālā ātruma (RV) variācijas saskaņā ar CORAVEL spektrometra mērījumiem (augšējais panelis, pilnie aplīši) un šo variāciju periodu aproksimējošā sinusoidālā līkne ($P = 131.2$ dienas; punktētā līnija). Ar pilniem trijstūrīšiem ir parādītas RV vērtības, kas iegūtas pēc augstas izšķirtspējas spektriem. Zvaigžņlielumu diferenciālās variācijas ir parādītas vidējā panelī (B -pilnie aplīši, V -kvadrātiņi, R -trijstūrīši, I -tukšie aplīši). Apakšējā panelī ir dotas krāsu indeksu maiņas ($B-V$ – tukšie aplīši, $R-I$ – trijstūrīši). Paredzētie spožuma minimumu laiki ir norādīti ar krustiņiem. Attēls no Začs et al. (2009).

maksimālā diference $V-R$ krāsu indeksa vērtībai atbilst temperatūras differencei dažādās pulsācijas fāzēs ap 750 K.

4.11. attēls parāda korelāciju starp radiālā ātruma izmaiņām un vizuālā spožuma un krāsu indeksu maiņām. Monitorings ar CORAVEL spektrometru atklāja IRAS 22272+5435 radiālā ātruma izmaiņas ar periodu 131.2 dienas un amplitūdu 10 km s^{-1} , kas ir tipiski šāda tipa objektiem (Arhipova et al. 2000, Hrivnak & Lu 2000). Novērotās zvaigznes spožuma maiņas notiek ar līdzīgu periodu, tomēr, kā redzams pēc 4.11. attēla, ir novērojama fāžu nobīde. Spožuma ekstrēmi tiek novēroti heliocentriskā ātruma izmaiņu cikla vidū, pie vērtības -40.2 km s^{-1} . Tas apstiprina Hirvnak & Lu (2000) secinājumu, ka šī zvaigzne sasniedz maksimālo spožumu izplešanās vidējā fāzē un minimālo spožumu saraušanās vidējā fāzē. Tiek uzskatīts, ka par spožuma maksimuma atpaukšanu no

maksimālās saspiešanas momenta ir atbildīgi procesi H jonizācijas zonā, bet fāzu novirzes lielums ir atkarīgs no He II zonas attāluma no zvaigznes virsmas (Collins 2003).

Spektru pētījumi dažādu pulsāciju fāzu laikā parādīja, ka IRAS 22272+5435 piedzīvo masas zaudēšanas epizodes, kuras iespējams inducē zvaigznes pulsācijas. Spektros tika novērotas triecienviļņu izplatīšanās pazīmes, tādas kā emisija CN līnijās zvaigznes spožuma maksimuma laikā un zema ierosmes potenciāla līniju dubultošanās. Na un Li rezonances līniju komponentu sarkanā nobīde $\sim 10 \text{ km s}^{-1}$ norāda uz atmosfēras slāņu kustību pulsāciju rezultātā izveidojošos triecienviļņu dēļ.

Pulsāciju modelēšanas rezultāti norāda uz to, ka protoplanetāro miglāju spožuma maiņas līknes kopā ar radiālo ātrumu variāciju līknēm var tikt izmantotas tādu zvaigžņu fundamentālo īpašību kā masa un starjauca noteikšanai (Hrivnak et al. 2010). Kombinējot iegūtos datus ar citu autoru mērījumiem, tie var tikt izmantoti, lai pēfītu ilgtermiņa perioda maiņas, kas ir novērojami šai zvaigznei (Hrivnak et al. 2010). Šīs izmaiņas liecina par straujām zvaigznes parametru izmaiņām, un to pētījumi varētu palīdzēt labāk izprast tos fizikālos procesus, kas norisinās zvaigznēs post-AGB fāzes laikā.

5. Rezultātu kopsavilkums

Promocijas darba izstrādes gaitā tika veikti trīs tipu astronomisko objektu pētījumi, kuru atmosfērās norisinās nestacionārie procesi, izpaužoties caur dažādām īpatnībām to fotometriskajā uzvedībā un raksturīgajās spektru detaļās. Ir iegūti sekojoši rezultāti:

1) Novu pētījumu rezultāti:

- a) Tika veikti 1999.–2005. gados M31 galaktikā notikušo 19 novu uzliesmojumu fotometriskie mērījumi un pamatojoties uz tiem novērtēti šo optisko novu pamatparametri, tādi kā maksimuma laiks, spožums maksimumā un spožuma krišanas ātrums. Sešām jaunatklātajām novām tika veikti precīzi astrometriskie mērījumi. Iegūtie un apkopotie dati ir nepieciešami ticamas statistikas bāzes izveidei par šiem objektiem, kas ļautu nākotnē izmantot novas kā starpgalaktikas attālumu indikatorus, pārbaudīt novu populāciju teoriju, kā arī sniegt nepieciešamus datus novu rentgenstarošanas fāzes pētīšanai.
- b) No 19 izpētītajām novām, divas tika identificētas ar īslaicīgiem supermīkstā rentgenstarojuma avotiem, bet vēlāk Hense et al. (2010) konstatēja rentgenstarošanas fāzi vēl četrām no mūsu izpētītajām novām. Pētījumā iegūtie dati jau tiek izmantoti novu rentgenstarošanas fāzes pētījumos, kas liecina par promocijas darba ietvaros veikto pētījumu aktualitāti.
- c) Pētījuma gaitā, izmantojot Baldones fotoplašu arhīva uzņēmumus, divām novām tika pierādīta to kļūdainā identifikācija ar rentgenstaru avotu un vēsturisko novu. Tādējādi tika parādīts, ka fotoplašu arhīva datu izmantošana fotometrisko datu iegūšanai un precīzai novu astrometrijai ir kritisks nosacījums M31 galaktikas supermīkstā rentgenstarojuma avotu nepārprotamai identificēšanai ar optisko novu uzliesmojumiem, kā arī atkārtoto novu uzliesmojumu identificēšanai.

- 2) Proto-planetārā miglāja IRAS22272+5435 fotometrisko pētījumu rezultāti:
- a) Tika veikti zvaigznes novērojumi izmantojot Baldones observatorijas 1.2m Šmita teleskopu šī objekta komplekso novērojumu programmas ietvaros;
 - b) Tika iegūta zvaigznes spožuma mērījumu sērija septiņu mēnešu laikā četrās fotometriskajās joslās (*BVRI*), un noteiktas spožuma un krāsu indeksu maiņas līknes. Šo novērojumu izmantošana kopā ar spektru un radiālo ātrumu mērījumiem ļāva Začs et al. (2009) secināt, ka šī objekta piedzīvotās masas zaudēšanas epizodes iespējams tiek inducētas ar pulsācijām.
- 3) Oglekļa zvaigžņu ar ilglaicīgām spožuma satumsumu epizodēm pētījumu rezultāti:
- a) Tika veikti divu oglekļa zvaigžņu V1983 Cyg un V2074 Cyg spektroskopiskie novērojumi izmantojot 2,6m Ziemeļvalstu Optisko Teleskopu;
 - b) Zvaigznēm tika noteikti tādi pamatparametri, ka efektīvā temperatūra, attālums, un starpzvaigžņu ekstinkcija;
 - c) Pirmo reizi tika veikta ilglaicīgi satumstošo neperiodisko oglekļa zvaigžņu augstās izšķirtspējas spektru analīze, kura parādīja, ka
 - Abām zvaigznēm to spektroskopiskās īpašības ir pārsvarā tipiskās aukstajām N-tipa oglekļa zvaigznēm;
 - Netipiskas ir abām zvaigznēm novērotas lielā ātruma ($\sim -60 \text{ km s}^{-1}$) komponentes Na I D līnijās;
 - V1983 Cyg zvaigznes spektrā tika novērota neparasti intensīvā $H\alpha$ absorbcijas līnija;
 - Salīdzinot pētāmo zvaigžņu un DY Per zvaigznes spektrālās īpašības, tika secināts, ka abas zvaigznes visticamāk nav aukstās RCB zvaigznes;
 - Tika secināts, ka pēc fotometriskajām īpašībām V1983 Cyg un V2074 Cyg ir līdzīgas DY Per tipa zvaigznēm.
 - d) Tika apspriesti pētāmo zvaigžņu spektru īpatnību iespējamie izcelsmes mehānismi.

Promocijas darbā iekļautās autores publikācijas

- 1) Smirnova, O.; Alksnis, A. (2006). Found a Nova in M31: The True Optical Counterpart of the M31 Supersoft X-ray Source 191. *Information Bulletin on Variable Stars*, № 5720, pp. 1-4
- 2) Smirnova, O.; Alksnis, A.; Zharova, A. V. (2006). The Optical Counterpart of the Possible Brightest Transient X-ray Source in M31 is Found. *Information Bulletin on Variable Stars*, № 5737, pp. 1-3
- 3) Alksnis, A.; Smirnova, O.; Zharova, A.V. (2008). Novae in M31 in 1999–2005. *Astronomy Letters*, Vol. 34, pp. 563-573
- 4) Bode, M. F.; Darnley, M. J.; Shafter, A.W.; Page, K. L.; Smirnova, O.; Anupama, G.C.; Hilton, T. (2009). Optical and X-ray Observations of M31N 2007-12b: An Extragalactic Recurrent Nova with a Detected Progenitor? *The Astrophysical Journal*, Vol. 705, pp. 1056-1062
- 5) Začs, L.; Sperauskas, J.; Musaev, F. A.; Smirnova, O.; Yang, T. C.; Chen, W. P.; Schmidt, M. (2009). Dynamical Phenomena in the Atmosphere of the Proto-Planetary Nebula IRAS 22272+5435, *The Astrophysical Journal Letters*, Vol. 695, pp. 203-207
- 6) Smirnova, O. (2011). High-Resolution Spectroscopy of Two Carbon Stars with Long-Term Obscuration Events. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 10 lpp, iesniegts

Autores publikācijas par citām tēmām

- 1) Alksnis, A.; Larionov, V. M.; Smirnova, O.; Arkharov, A. A.; Konstantinova, T. S.; Larionova, L. V.; Shenavrin, V. I. (2009). On the Latest Deep Light Decline Event of DY Persei. *Baltic Astronomy*, Vol. 18, p. 53-64
- 2) Somero, A.; Smirnova, O.; Micheva, G.; Kajava, J.; Kankare, E.; Telting, J.; Karjalainen, R.; Mattila, S.; Pastorello, A. (2009). Supernovae 2009fv and 2009gf. *Central Bureau Electronic Telegrams*, № 1846, 1

Publikācijas konferenču izdevumos

- 1) Smirnova, O., Začs, L., Pavlenko, Ya. V. (2011). High-resolution spectroscopy of cool R CrB star candidates V1983 Cyg and V2047 Cyg. *Proceedings of the conference Why Galaxies Care About AGB Stars II. ASP Conference Series*, ed. F. Kerschbaum, T. Lebzelter and B. Wing, Vol. 445, pp. 205-206
- 2) Smirnova, O.; Začs, L.; Alksnis, O.; Musaev, F. (2009). The Spectroscopy of the Pulsating Carbon Stars. *Proceedings of the 15th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems and the Sun. AIP Conference Proceedings*, Vol. 1094, pp. 880-883

Ziņojumi un stenda referāti zinātniskajās konferencēs

- From Atoms to Stars, Oxford, UK, July 26 - 28, 2011. Smirnova, O., Začs, L., Pavlenko, Ya. V., Kaminsky, B. Spectroscopic Analysis of Cool Galactic R CrB Star Candidates.
- Latvijas Universitātes 69. Konference, Rīga, Latvija, 2011. gada 3. februārī. Smirnova, O. Divu auksto R Coronae Borealis mainzvaigžņu kandidātu spektroskopija.
- Why Galaxies Care About AGB Stars II, Wiena, Austria, August 16-20, 2010. Smirnova, O., Začs, L., Pavlenko, Ya. V. High-resolution spectroscopy of cool R CrB star candidates V1983 Cyg and V2047 Cyg.
- Latvijas Universitātes 68. Konference, Rīga, Latvija, 2010. gada 3. februārī. Smirnova, O., Začs, L. Auksto R CrB kandidātzvaigžņu V1983 Cyg un V2074 Cyg augstas izšķirtspējas spektroskopija.
- Deciphering the Universe through Spectroscopy, Potsdam, Germany, September 21-25, 2009. Smirnova, O., Začs, L. High-resolution spectroscopy of cool R CrB star candidates V1983 Cyg and V2047 Cyg.
- 15th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems and the Sun, St. Andrews, UK, July 20-25, 2008. Smirnova, O.; Začs, L.; Alksnis, O.; Musaev, F. The Spectroscopy of the Pulsating Carbon Stars.

Literatūras saraksts

- Abia, C., & Isern, J. 1997, MNRAS, 289, 11
Abia, C., & Isern, J. 2000, ApJ, 536, 438
Abia, C., Cunha, K., Cristallo, S., et al. 2010, ApJ, 715, L94
Abia, C., Domínguez, I., Gallino, R., et al. 2002, ApJ, 579, 817
Alcock, C., Allsman, R. A., Alves, D. R., et al. 2001, ApJ, 554, 298
Alksnis, A. & Jumike, Z. 1990, Issled. Solntsa Krasnykh Zvezd, 33, 83
Alksnis, A. 2003, Baltic Astron., 12, 595
Alksnis, A., Alksne, Z. 1988, Carbons Stars in a Field in Cygnus, Zinatne Publ. House, Riga
Alksnis, A., Larionov, V.M., Smirnova, O., Arkharov, A.A. et al. 2009, BaltA, 18, 53
Alksnis, A., Smirnova, O., & Zharova, A. V. 2008, Astronomy Letters, 34, 563
Arkhipova, V. P., Ikonnikova, N. P., Noskova, R. I., & Sokol, G. V. 2000, Astron. Lett., 26, 609
Arp H. C., 1956, AJ, 61, 15
Asplund, M., Gustafsson, B., Lambert, D. L., & Rao, N. K. 2000, A&A, 353, 287
Barnbaum, C. 1994, ApJS, 90, 317
Bedijn, P. 1987, A&A, 186, 136
Bergeat J., Chevallier L., 2005, A&A, 429, 235
Bergeat, J., Knapik, A., & Rutily, B. 2001, A&A, 369, 178
Blocker, T. 1995, A&A, 299, 755
Bode M. F., 2010, Astronomische Nachrichten, 331, 160
Bode, M. F., Darnley, M. J., Shafter, A. W. et al. 2009, ApJ, 705, 1056
Boothroyd A. I., Sackmann I. J., 1999, ApJ, 510, 232
Busso M., Gallino R., Wasserburg G. J., 1999, ARA&A, 37, 239
Cardelli, J. A., Clayton, G. C., & Mathis, J. S. 1989, ApJ, 345, 245
Clayton, G. C., Geballe, T. R., Herwig, F., Fryer, C., & Asplund, M. 2007, ApJ, 662, 1220
Collins G.W. Fundamentals of Stellar Astrophysics , 2003, WEB Edition
Crause, L. A., Lawson, W. A., & Henden, A. A. 2007, MNRAS, 375, 301
Cutri, R. M., Skrutskie, M. F., van Dyk, S., et al. 2003, 2MASS All Sky Catalog of point sources
Della Valle M., Livio M., 1995, ApJ, 452, 704
Della Valle, Livio M, 1994, A&A, 286, 786
Demers, S., Dallaire, M., & Battinelli, P. 2002, AJ, 123, 3428
Dutra, C.M., Santiago, B.X., & Bica, E. 2002, A&A, 383, 219
Engels, D. 2005, Mem. S. A. It., 76, 441
Feast M. W., Whitelock P. A., & Marang F. 2003, MNRAS, 346, 878
Feast, M. W., Whitelock, P. A., Catchpole, R. M., & Roberts, G. 1984, MNRAS, 211, 331
Fleischer A. J., Winters J. M., Sedlmayr E., 2000, in IAU Symp. 177, The Carbon Star Phenomenon, ed. R. F. Wing, 377
Fujimoto, M. Y. 1977, PASJ, 29, 331
Fujimoto, M. 1982, ApJ, 257, 752
Galazutdinov, G. A., 1992, Special Astrophysical Observatory preprint, 92, 2
Hachisu, I. & Kato, M., 2006a, ApJS, 167, 5
Henze, M.; Pietsch, W.; Haberl, F. et al. 2011, A&A, 533, 52
Hernanz M., 2005, ASPC, 330, 265
Hernanz, M., & Sala, G. 2010, Astronomische Nachrichten, 331, 169
Herwig, F., & Langer, N. 2001, Nucl. Phys. A, 688, 221
Hrivnak, B. J., Kwok, S., & Volk, K. M. 1989, ApJ, 346, 265
Hrivnak, B. J., & Lu, W. 2000, in IAU Symp. 177, The Carbon Star Phenomenon, ed. R. F. Wing, 293

- Hrivnak, B.J., Lu, W., Maupin, R.E. & Spitzbart, B.D. 2010, *ApJ*, 709, 1042
- Iben, I. Jr. 1981, *ApJ*, 246, 278
- Iben, Jr., I. & Renzini, A. 1983, *ARA&A*, 21, 271
- IRAS Point Source Catalogue, 2nd Edition, 1988, NASA Reference Publications, Washington DC.
- Jose, J. & Hernanz, M., 1998, *ApJ*, 494, 680
- Kahabka, P., Hartmann, H.W., Parmar, A.N., & Negueruela, I. 1999, *A&A* 347, L43
- Kato, M. 2010, *Astron. Nachr.*, 331,140
- Keenan, P. C. & Barnbaum, C. 1997, *PASP*, 109, 969
- Knapp G. R., Morris M., 1985, *Astrophys. J.*, 292, 640
- Kupka F., Ryabchikova T. A., Piskunov N. E., Stempels H. C., & Weiss W. W. 2000, *Baltic Astron.*, 9, 590
- Lambert, D. L., Gustafsson, B., Eriksson, K., & Hinkle, K. H. 1986, *ApJS*, 62, 373
- Lambert, D. L., & Rao, N. K. 1994, *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 15, 47
- Lattanzio, J.C. 1998, *astro-ph/9810094*
- Lattanzi M. G., Munari U., Whitelock P. A., Feast M. W. 1997, *ApJ*, 485, 328
- Lebzelter, T., & Obbrugger, M., 2009, *Astron. Nachr.*, 330, 39
- Livio M., 1992, *ApJ*, 393, 516
- Lloyd Evans, T. 1991, *MNRAS*, 248, 479
- Luttermoser, D. G., 2000, in *The carbon star phenomenon*, ed. R. F. Wing, IAU Symp., 177, 105
- Luttermoser, D.G., Johnson, H.R., Avrett, E.H., & Loeser, R. 1989, *ApJ*, 345, 543
- Magnier, E.A., Lewin, W.H.G., van Paradijs, J. et al., 1992, *A&AS*, 96, 379
- Marshall, D. J., Robin, A. C., Reyle, C., Schultheis, M., & Picaud, S. 2006, *A&A*, 453, 635
- McClure R. D., Woodsworth A. W., 1990, *ApJ*, 352, 709
- Monet, D. G., Levine, S. E., Canzian, B. et al., 2003, *AJ*, 125, 984
- Nowotny, W., et al. 2005, *A&A*, 437, 273
- Ohnaka, K. & Tsuji, T. 1996, *A&A*, 310, 933
- Olofsson, H., Bergman, P., Eriksson, K., Gustafsson, B. 1996, *A&A*, 311, 587
- Olofsson H., Eriksson K., Gustafsson B., & Carlstrom U. 1993, *ApJS*, 87, 267
- Orio, M., 2006, *ApJ*, 643, 844
- Palmerini, S., Cristallo, S., Busso, M. et al. 2011, *ApJ*, 741, 26
- Pavlenko Ya.V.: 1997, *Ap&SS*, 253, 43
- Pavlenko Ya.V. & Yakovina L.A. 2009, *Kinem. & Physics of Celest. Bodies*, 25, 452
- Pavlenko Ya.V. 2003, *Astron. Rept.*, 47, 59
- Payne-Gaposchkin, C., 1957, *The Galactic Novae*, North-Holland Publ. Comp., Amsterdam, p.24
- Pietsch, W., Fliri, J., Freyberg, M.J., Greiner, J. et al., 2005b, *A&A*, 442, 879
- Pietsch, W., Freyberg, M., Haberl, F., 2005a, *A&A*, 434, 483
- Pietsch, W., Haberl, F., Sala, G. et al., 2007, *A&A*, 465, 375
- Rao, N. K. 2008, in *ASP Conf. Ser. 391, Hydrogen Deficient Stars*, ed. K. Werner & T. Rauch (San Francisco, CA: ASP), 25
- Renzini, A. 1979, in *Stars and Star Systems*, ed. B. E. Westerlund (Dordrecht: Reidel), 155
- Sala, G., Hernanz, M., 2005, *A&A*, 439, 1061
- Sharov, A. S., Alksnis, A., Zharova, A. V., & Shokin, Yu. A. 2000, *Astron. Lett.* 26, 433
- Schwarzschild, M., & H`arm, R., 1965, *ApJ*, 142, 855
- Smirnova, O. 2011, *MNRAS*, iesniegts
- Smirnova, O. & Alksnis, A. 2006, *IBVS*, 5720, 1
- Smirnova, O., Alksnis, A., & Zharova, A. V. 2006, *IBVS*, 5737, 1
- Smith, V. V., & Lambert, D. L. 1986, *ApJ*, 311, 843
- Soker N., Clayton G. C. 1999, *MNRAS*, 307, 993
- Starrfield, S., Sparks, W. M., & Truran, J. W. 1985, *ApJ*, 291, 136
- Starrfield, S. Truran J., Sparks M. et al., 1998, in "Wild Stars In The Old West: Proceedings of the 13th North American Workshop on Cataclysmic Variables and Related Objects", *ASPC*, 7, 52

Stiele, H., Pietsch, W., Haberl, F. et al. 2011, *A&A*, 534, 55
Straniero O., Gallino R, Cristallo S., 2006, *Nucl. Phys. A*, 777, 311
Tisserand, P., Marquette, J. B., Wood, P. R., et al. 2008, *A&A*, 481, 673
Tisserand, P., Wood, P. R., Marquette, J. B., et al. 2009, *A&A*, 501, 985
van der Veen, W. E. C. J., Habing, H. J., & Geballe, T. R. 1989, *A&A*, 226, 108
Vassiliadis, E., & Wood, P. R. 1993, *ApJ*, 413, 641
Wallerstein, G., & Knapp, G. R. 1998, *AR&A*, 36, 369
Warner, B., 1995, *Cataclysmic variable stars* (Cambridge Astrophysics Series, Cambridge, New York: Cambridge University Press, 1995)
Webbink, R. F. 1984, *ApJ*, 277, 355
Whitelock P. A., Feast M. W., Marang F., & Groenewegen M. A. T. 2006, *MNRAS* 369, 751
Whitelock P. A., Feast M.W., Marang F., & Overbeek M.D. 1997, *MNRAS*, 288, 512
Woitke P. & Niccolini G., 2005, *A&A*, 433, 1101
Woitke, P., Goeres, A., & Sedlmayr, E. 1996, *A&A*, 313, 217
Yakovina, L.A., Pugach, A.F. & Pavlenko, Ya.V. 2009, *Astr. Reports*, 53, 187
Začs, L., Chen, W. P., Alksnis, O., et al. 2005, *A&A*, 438, L13
Začs, L., Mondal, S., Chen, W. P. et al. 2007, *A&A*, 472, 247
Začs, L., Sperauskas, J., Musaev, F. A. et al. 2009, *ApJ*, 695, L203
Zamora, O., Abia, C., Plez, B., Domínguez, I., & Cristallo, S. 2009, *A&A*, 508, 909