# Latvijas Universitāte Fizikas, matemātikas un optometrijas fakultāte



Artis Aberfelds

# 6.7 GHZ METANOLA MĀZERU PĒTĪJUMI: NOVĒROJUMU METODES, MONITORINGS UN AVOTU MORFOLOĢIJA

Promocijas darbs

Zinātnes doktora grāda iegūšanai Dabaszinātnēs, nozarē: Fizika un astronomija Apakšnozare: astrofizika un fundamentālā astronomija

Rīga, 2024

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Universitātes

Fizikas, matemātikas un optometrijas fakultātē,

un

Ventspils Augstskolas Inženierzinātņu institūtā "Ventspils Starptautiskais Radioastronomijas Centrs" laika posmā no 2014. līdz 2023. gadam.

Darbs sastāv no vispārīgā raksturojuma, sešām nodaļām, tai skaitā ievada, literatūras apskata, metodikas apraksta un rezultātu analīzes un izmantotās literatūras saraksta, kā arī viena pielikuma.

Darba forma: disertācija fizikas nozarē, astrofizikas un fundamentālās astronomijas apakšnozarē

Darba zinātniskais vadītājs: Dr. Phys. Ivars Šmelds, vadošais pētnieks Darba recenzenti:

- 1) Dr. Phys. Ilgmārs Eglītis
- 2) Dr. Phys. Alberto Sanna
- 3) Dr. Phys. Kazi Lucie Jessica Rygl

Promocijas darba aizstāvēšana notiks 2024. gada 22. martā, plkst. 15:00 Latvijas Universitātes fizikas, astronomijas un mehānikas nozares promocijas padomes atklātā sēdē, Jelgavas ielā 3. Ar promocijas darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Universitātes Bibliotēkā Rīgā, Kalpaka bulvārī 4.

LU fizikas, astronomijas un mehānikas nozares promocijas padome pieņēmusi promocijas darbu doktora grāda piešķiršanai dabaszinātne 2024. gada \_\_\_\_\_

promocijas padomes priekšsēdētājs\_\_\_\_\_

promocijas padomes sekretārs\_\_\_\_\_

©Latvijas Universitāte, 2024 ©Artis Aberfelds, 2024

# Anotācija

Masīvās zvaigznes būtiski ietekmē sev apkārtējo vidi. Tās spēj jonizēt starpzvaigžņu gāzi, veidojot HII zonas, un, savas evolūcijas noslēgumā eksplodējot kā supernovas, bagātina to ar virkni smagiem elementiem. Kā arī to lielā starjauda nosaka galaktiku izskatu, veidojot spirālzarus.

Par spīti to lielajai nozīmei, masīvu zvaigžņu veidošanas joprojām ir problemātiska tēma. Masas audzēšana, pārsniedzot Edingtona robežu, joprojām ir aktuāls pētījumu virziens. Lielais attālums, absorbcija no gāzes un putekļiem ir būtisks šķērslis to novērošanai, evolūcijas agrīnā-kajās stadijās. Šeit būtisku lomu sāk spēlēt otrās klases metanola māzeri, īpaši 6.7 GHz, kuri Visumā ir novērojami tikai masīvu zvaigžņu veidošanās rajonos. Izmantojot ļoti garas bāzeslīnijas interferometrus (VLBI), tika noteikts, ka vairums metanola māzeru atrodas vidē, kas plūst uz disku un seko tā rotācijai.

Autors savā darbā ir veicis 42 šādu avotu monitoringu un trīs avotus pētījis padziļināti, iegūstot un analizējot to radio attēlus. Promocijas darba ietvaros, restaurētie Irbenes radioteleskopi tika pielāgoti kosmisko māzeru novērojumiem. Tika ieviesta četru soļu frekvences nobīdes metode un izstrādāts datorprogrammu kopums datu reducēšanai.

Autors apkopoja metanola māzeru monitoringa rezultātus piecos gados, iegūstot 42 avotu mainīguma laika rindas. Tika konstatēti visi būtiskākie mainīguma veidi (periodisks, uzliesmojošs, vienmērīgi pieaugošs vai dilstošs) ar ļoti dažādām relatīvajām plūsmas izmaiņu amplitūdām (no nemainīgas plūsmas līdz 300 reižu liela pieauguma). Dažiem avotiem novērojumu laikā būtiski mainījās spožuma izmaiņu tendences. Kā arī 3 avotiem konstatējam, iespējams, pirmoreiz, periodiskas plūsmas svārstības.

Darba ietvaros autors pieteica un guva iespēju novērot trīs avotus ar Eiropas VLBI tīklu (EVN), iegūstot to loka milisekundes izšķirtspējas attēlus. Divi avoti ar šādu izšķirtspēju tika novēroti pirmoreiz. Iegūtie attēli atklāj ilgi pastāvošus māzeru mezglus, kas kontekstā ar iegūtajām laika sērijām, norāda uz atbalstu hipotēzei par mainīguma saistību ar izmaiņām pumpējošā starojuma intensitātē. Pašu mezglu evolūcija norāda uz dinamiskiem procesiem vidē. G78.122+3.633 pamanījām atšķirības morfoloģijā un mainīgumā, starp mezglu grupām, kas piesaistītas diskam vai diska un aizplūstošās gāzes plūsmas mijiedarbības zonai.

# Abstract

Massive stars significantly influence their surrounding environment. They are capable of ionizing interstellar gas, creating HII regions, and in the final stages of their evolution, exploding as supernovae, enriching the surroundings with heavy elements. Additionally, their intense luminocity shapes the appearance of galaxies by forming spiral arms.

Despite their importance, the formation of massive stars remains a challenging topic. The growth of mass beyond the Eddington limit continues to be an active subject of research. The large distances and absorption by gas and dust pose significant obstacles to their observation in their early evolutionary stages. This is where second-class methanol masers, especially at 6.7 GHz, start to play a crucial role, as they are exclusivly found in regions of massive star formation.

Using very long baseline interferometry (VLBI), it was determined that most methanol masers are located in the environment that flows toward the disk and follows its rotation.

In this work, the author monitored 42 such sources and conducted in-depth studies of three sources, obtaining and analyzing their radio images.

As part of the doctoral thesis, the restored Irbene radio telescopes were adapted for cosmic maser observations. A four-step frequency shift method was introduced, and a set of computer programs for data reduction was developed.

The author compiled the results of methanol maser monitoring over five years, obtaining 42 source variability time series. These series exhibit various types of variability and relative amplitudes. For some sources, significant changes in the trends of brightness variations were observed during the monitoring period. Additionally, periodic flux oscillations are potentially detected in three sources.

As part of the thesis work, the author applied for and obtained the opportunity to observe three sources with the European VLBI Network (EVN), obtaining millisecond-resolution images. Two sources were observed with this resolution for the first time. The obtained images reveal long-standing maser cloudlets, which, in the context of the acquired time series, support the hypothesis of variability being linked to changes in pumping radiation intensity. The evolution of the maser spots indicates dynamic processes in the environment. In the case of G78.122+3.633, differences in morphology and variability were noted between groups of spots associated with the disk or the interaction zone between the disk and outflowing gas.

# Saturs

An	otāci	ja		3
Ab	strac	t		4
1	Ieva	ds		7
	1.1	Tēmas	aktualitāte un motivācija	7
	1.2	Darba r	nērkis un uzdevumi	7
	1.3	Darba r	novitāte	8
	1.4	Autora	ieguldīiums	8
	1.5	Promoc	zijas darba struktūra	8
2	Lite	ratūras :	apskats	9
	2.1	Kosmis	skie māzeri	9
		2.1.1	Ievads	9
		2.1.2	Metanola māzeri	9
		2.1.3	6.7 GHz metanola māzeri	9
		2.1.4	6.7 GHz metanola māzeru vide	10
		2.1.5	Mainīgums	10
		2.1.6	Periodiskums	11
		2.1.7	Uzliesmojumi	12
	2.2	Masīvo	zvaigžņu veidošanās	13
		2.2.1	Ievads	13
		2.2.2	YSO klasifikācija	13
		2.2.3	Masīvas zvaigznes kolapss un akrēcija	14
		2.2.4	Gāzes jonizācija	16
3	Meto	odika		17
	3.1	Radioas	stronomijas metodes	17
		3.1.1	Ievads	17
		3.1.2	Novērojumi ar atsevišķu radioteleskopu	17
		3.1.3	Interferometrija un apertūras sintēze	19
	3.2	Irbenes	radioteleskopu piemērošana māzeru novērojumiem	20
		3.2.1	Ievads	20
		3.2.2	Izmēģinājuma novērojumi	21
		3.2.3	Frekvences nobīdes metode ar DBBC2	21
		3.2.4	Frekvences nobīdes metode izmantojot SDR	22
		3.2.5	Sistemātiskās kļūdas	27
		3.2.6	Veivleta analīze	27
		3.2.7	Secinājumi	28
		3.2.8	Autora ieguldījums	28
4	Meta	anolu m	āzeru monitorings	29
	4.1	Ievads	-	29
	4.2	Monito	ringa programma	29
	4.3	Novēro	jumi	29
	4.4	Rezultā	iti	31
		4.4.1	Statistika	31
		4.4.2	EVN novērojumiem atlasīto avotu mainīgums	31
		4.4.3	Padziļināta trīs citu izceļamu avotu mainīguma pētījuma rezultāti	39

4	.5 Diskusija						 	 	 	 •		. 46
4	.6 Secinājun	ni					 	 	 			. 53
4	7 Autora ieg	guldījums .					 	 • •	 	 •	 •	. 53
5 E	VN novēroju	ms										54
5	.1 Ievads .						 	 	 	 •		. 54
5	2 Pieteikum	IS					 	 	 	 •		. 54
5	3 Novēroju	ma plāns					 	 	 			. 55
5	4 Datu apst	rāde					 	 	 			. 56
5	5 Rezultāti						 	 	 			. 58
5	6 Analīze u	n diskusija .					 	 	 			. 60
	5.6.1 G	78.122+3.63	3				 	 	 			. 60
	5.6.2 G	90.925+1.480	5				 	 	 			. 63
	5.6.3 G	94.602-1.796					 	 	 			. 65
5	7 Secinājun	ni					 	 	 			. 65
5	8 Autora ieg	guldījums .					 	 	 	 •		. 71
6 N	oslēguma da	a										77
6	1 Secinājun	ni					 	 	 			. 77
6	2 Tēzes .						 	 	 			. 77
6	.3 Nobeigun	ns					 	 	 			. 78
6	4 Autora pu	blicitāte					 	 	 			. 78
	6.4.1 P	ublikācijas pa	r darb	a tēmu	ι		 	 	 			. 78
	6.4.2 C	itas publikāci	ias				 	 	 			. 79
	6.4.3 D	alība starptau	ıtiskajā	is kont	ferenc	eēs	 	 	 	 •		. 80
A N	lāzeru mainī	guma tabula										86

# 1 Ievads

# 1.1 Tēmas aktualitāte un motivācija

Zvaigžņu evolūcijas teorijas tapšana ir viens no būtiskākajiem divdesmitā gadsimta astronomijas sasniegumiem. Īpaši izaicinoši bija pētījumi par jaunu zvaigžņu veidošanos. Šie procesi notiek dziļi optiski necaurspīdīgu miglāju centros, tādēļ to pētījumiem bija nepieciešami jutīgi un ar augstu izšķirtspēju apveltīti instrumenti. Vienkāršota teorija labi apraksta Saules un mazākas masas zvaigžņu veidošanos, tomēr lielas masas zvaigžņu tapšana ir problemātiska, jo nepārprotami tiek paredzēta zvaigznes apverošās matērijas aizpūšana zvaigznes starojumu ietekmē, apturot pašas zvaigznes tālāko augšanu.

Faktori, kas ļauj zvaigznei turpināt palielināt tās masu akrēcijas procesā, ir aktuāls pētījumu virziens mūsdienu astronomijā. Šiem pētījumiem tiek atvēlēta būtiska daļa no pasaulē vadošo instrumentu novērojumu programmu laika. Jaunākie un aktuālākie rezultāti norāda uz šo procesu nelinearitāti, citiem vārdiem, tie notiek astronomijas mērogos straujos, varētu teikt pat katastrofālos, notikumos. Pašlaik izvirzītās teorijas nespēj paredzēt šos straujos akrēcijas uzplūdumus. Tādējādi par vienīgo veidu, kā šos notikumus pamanīt un pētīt, ir šo avotu monitorēšana.

Šajā aspektā būtiska kļūst otrās klases 6.7 GHz metanola māzeru ekskluzīvā atrašanās pie potenciāli interesantiem objektiem. Līdzšinējie rezultāti norāda, ka māzera starojums tiek būtiski ietekmēts akrēcijas uzliesmojuma laikā, ar pozitīvu korelāciju starp zvaigznes un māzeru starojumu intensitāti. Neformālas māzeru monitoringa organizācijas (Maser Monitoring Organisation)<sup>1</sup> koordinētie novērojumi ir ļāvuši pamanīt vienu līdz trīs šādus notikumus gadā. Māzera signāli ir šaurjoslas un intensīvi, un tos var produktīvi monitorēt ar vidējas klases radioteleskopiem, kādi ir arī Latvijā, Ventspils Starptautiskajā Radioastronomijas Centrā (VSRC).

Šajā darbā piecu gadu laikā ir iegūtas četrdesmit divas metanola māzeru laika rindas ar to plūsmas blīvumiem. Trīs avoti novēroti ar Eiropas interferometrijas tīklu, iegūstot to loka milisekundes izšķirtspējas radio attēlus. Aprakstīta to struktūras morfoloģija un iespējamie māzeru mainīguma cēloņi. Kā arī aprakstīti veiktie darbi, lai Irbenes radioteleskopus pielāgotu māzeru novērojumiem.

## 1.2 Darba mērķis un uzdevumi

Darba mērķis ir pētīt otrās klases 6.7 GHz metanola māzeru aktivitāti, īpaši to mainīgumu, kontekstā ar masīvu zvaigžņu veidošanas procesiem.

Darba īstenošanai tika izvirzīti sekojoši uzdevumi:

- pielāgot Irbenes radioteleskopus māzeru novērojumiem;
- atlasīt piemērotus avotus ilgtermiņa monitoringa programmai;
- veikt sistemātisku ilgtermiņa novērojumu kampaņu;
- apkopot un analizēt iegūtās māzeru plūsmas blīvuma laika sērijas;
- iegūt atsevišķus avotu attēlus, tos novērot ar interferometru;
- analizēt iegūtos attēlus kontekstā ar iegūtajām laika sērijām.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>https://www.masermonitoring.com/

# 1.3 Darba novitāte

Darbā iegūtie rezultāti ir ar zinātnisku novitāti, un ir publicēti vairākos anonīmi recenzētos starptautiskos žurnālos. Svarīgākie darba rezultāti:

- Irbenes radioteleskopu pielāgošana māzeru novērojumiem;
- iegūtas 42 māzeru plūsmu izmaiņas laika sērijas;
- pirmoreiz iegūti divu māzeru reģionu loka milisekundes precizitātes attēli;
- detalizēti analizētas individuālu māzeru mezglu īpašības;
- noteikta saistība starp māzeru mezglu izvietojumu ap zvaigzni un to mainīgumu.

# 1.4 Autora ieguldījums

Radioteleskopu sagatavošana māzeru novērojumiem tika veikta ciešā sadarbībā ar VSRC inženieru komandu. Autors veica novērojumu plānošanu un apertūras konfigurācijas prasību formulēšanu. Darba autors veicis visu darbā prezentēto rezultātu apstrādi un interpretāciju. Darba rezultātus autors ir prezentējis 7 starptautiskās konferences un tie ir publicēti 11 anonīmi recenzētos izdevumos, no kuriem četriem autors ir korespondējošais autors.

Lielāko daļu novērojumu ir veikuši VSRC teleskopu operatori. Datu apstrādes skriptus izveidot palīdzēja Jānis Šteinbergs. Interferometra datu apstrādes un interpretācijas procesā autoru mentorēja Anna Bartkiewicz un Marian Szymczak.

# 1.5 Promocijas darba struktūra

Darbā tiek pētīta metanolu māzeru aktivitāte kontekstā ar masīvu zvaigžņu veidošanos. Literatūras apskatā ir teorētisks ievads par masīvu zvaigžņu veidošanos un kosmisko māzeru fenomenu. Metodikas nodaļa sastāv no divām daļām: pirmā – metožu teorētisks izklāsts, un otrā, to ieviešana un pielāgošanu darbam ar Irbenes radioteleskopiem. Darba rezultātu sekcija ir sadalīta divās nodaļās, katra ar īsu ievadu par aktualitāti un motivāciju, un to rezultātiem un secinājumiem.

# 2 Literatūras apskats

### 2.1 Kosmiskie māzeri

### 2.1.1 Ievads

Termini "lāzers" un "māzers" ir cēlušies no angļu valodas akronīmiem terminiem: "light amplification by stimulated emission of radiation" un "microwave amplification by stimulated emission of radiation", kas latviešu valodā nozīmē "gaismas pastiprināšana, izmantojot inducēto starojumu" un "mikroviļņu pastiprināšana, izmantojot inducēto starojumu". Visums savā daudzveidībā ir radījis apstākļus, lai šī parādība izpaustos arī dabā. Šajā apskatā neaplūkosim šīs parādības fizikālo pusi, kas nosaka stimulētās emisijas pastāvēšanu un aktīvās vides ierosināšanu. No novērotāja skatu punkta, inducētās emisijas starojums izpaužas kā ievērojami paaugstināta gaismas plūsma viļņu garumos, kur notiek stimulētās emisijas pārejas.

Visumā māzeri ir konstatēti Saules sistēmas komētās, jauno zvaigžņu formēšanās miglājos, vēlo evolūcijas stadiju zvaigžņu apvalkos un galaktiku kodolos. Salīdzinājumā ar laboratorijas lāzeriem un māzeriem, būtiskākā atšķirība ir izmēri - mazākie māzeri, kas konstatēti komētu gāzu apvalkos, ir lielumā apmēram 10<sup>7</sup> metri, bet lielākie māzeri, kas atrodami galaktiku kodolos, var sasniegt pat 10<sup>19</sup> metru apmēru.

Vēsturiski pirmo reizi māzera signāls no izplatījuma tika konstatēts 1965. gadā (Weinreb et al., 1965). Cita grupa neatkarīgi un vienlaicīgi veica līdzīgus novērojumus (Gundermann, 1965), taču nesaistīja novēroto fenomenu ar stimulēto emisiju. Pirmais zināmais avots ir W49 – masīvs zvaigžņu veidošanās apgabals, kas atrodas Ērgļa zvaigznājā aptuveni 36 tūkstošus gaismas gadu attālumā no Zemes (Wu et al., 2019), un tajā tika konstatēts hidroksil-radikāļa (OH) pārejas starojums 1665 MHz frekvencē.

Literatūras apskatā konspektīvi aplūkosim otrās klases 6.7 GHz metanola māzerus, to mainīguma īpašības un potenciālos cēloņus un masīvu zvaigžņu veidošanās procesus.

### 2.1.2 Metanola māzeri

Metanols (*CH*<sub>3</sub>*OH*) ir sarežģītākā molekula, kurai Visumā novērota māzeru emisija. Metanola kompleksā uzbūve noved pie enerģijas pārejām bagātas kvantu sistēmas, kopumā veidojot vairāk kā 30 pārejas. Visumā ir novērotas māzeru emisijas ar viļņu garumiem no centimetriem līdz milimetriem (Cragg et al., 2005). Daudzās pārejas detaļās neapskatīsim.

Skatoties no radioastronomijas skatu punkta, būtiska nozīme ir ciešai saistībai starp konkrētām kvantu pārejām un novēroto objekta evolūcijas stadiju jeb klasi (skatīt 2.2.2), kā to empīriski novēroja Val'tts et al. (1999). Agrīnākas evolūcijas stadijas objekti (Class I) var saturēt pirmās klases metanola māzerus, un tie tiek ierosināti sadursmju rezultātā. Savukārt otrās klases (Class II) metanola māzeri tiek pārsvarā ierosināti ar starojumu un saistīti ar objektiem, kuri ir tālākā evolūcijas stadijā.

### 2.1.3 6.7 GHz metanola māzeri

No visām novērotajām metanola māzeru pārejām,  $5_1 \rightarrow 6_0 A^+$  ir pati spožākā. Šo pāreju ar frekvenci 6668519200 Hz (6.7 GHz) pirmoreiz novēroja 1991. gadā (Menten, 1991). Māzeru saturošo objektu saistība ar OH māzeriem, ultra-kompaktajām HII zonām (jonizēta Ūdeņraža apgabali) un jau zināmajiem spožajiem 12 GHz metanola  $2_0 \rightarrow 3_{-1}E$  māzeriem norādīja uz to piederību otrās klases jaunajiem zvaigžņu objektiem (angliski young stellar object, YSO). Turpmākie novērojumi tikai pastiprināja sākotnējo novēroto saistību, un mūsdienās otrās klases 6.7 GHz metanola māzeri tiek ekskluzīvi saistīti ar masīvu zvaigžņu veidošanos (Breen et al., 2013). Novērtējumi liecina, ka mazākas masas zvaigzne, kas teorētiski spētu nodrošināt 6.7 GHz māzera pastāvēšanu, ir 3  $M_{\odot}$  (Minier et al., 2003), tādējādi 6.7 GHz māzera pastāvēšana kalpo par principiālu indikatoru masīvai protozvaigznei tās agrīnās evolūcijas stadijā.

### 2.1.4 6.7 GHz metanola māzeru vide

Tiek uzskatīts, ka otrās klases māzeriem ierosinošais starojums nenāk no pašām molekulām. Kā ticamākais avots termiskajam starojumam ir putekļi, kas kalpo kā zvaigznes dominējošā ultravioletā (UV) starojuma, frekvences samazināšanas konvertors, izstarojot, galvenokārt, vidējos un tālos infrasarkanos starus.

Metanola māzeru kinemātikas pētījumi (van der Walt, D. J. et al., 2007) parāda, ka radiālo ātrumu vērtības labi atbilst diska rotācijai ap zvaigzni saskaņā ar Keplera likumiem. Tomēr pašu māzeru lineārās struktūras virzieni un orientācija pret magnētisko lauku ir neviennozīmīga attiecībā pret diska modeli (De Buizer, J. M. et al., 2009). Vairums no zināmajiem māzeriem ir orientēti perpendikulāri diskam, tātad vienā virzienā ar plūsmu (džetu, angliski jet). Attīstoties modeļiem, mūsdienās nozīmīgs daudzums no zināmajiem 6.7 GHz metanola māzeriem tiek saistīts ar matērijas plūsmu uz disku (Vlemmings et al., 2010). Pestalozzi, M. R. et al. (2009) analizējot NGC 7538, secināja, ka māzeru apgabali var arī atrasties robežslānī starp disku un plūsmu. Šo māzeru mezglu struktūra biežāk ir savērpta, jo atrodoties salīdzinoši turbulentā vidē.

### 2.1.5 Mainīgums

Pirmās ziņas par 6.7 GHz metanolu māzeru mainīgumu nāca no plašiem debess apgabalu apskatiem (angliski surveys), kas meklēja jaunus avotus. Kā pirmo izcelt vēlāmies Caswell et al. (1995) grupas pētījumu, kurā novēroja 245 avotus (novērojot katru 4 vai 5 reizes 1.5 gadu periodā) un secināja, ka 75% māzeru līniju būtiski nemainās, un tikai 48 no novērotajām līnijām intensitāte pieauga, vai samazinājās divas reizes. Tādu pašu izmaiņas amplitūdu, 5 – 7% novērotajos avotos, konstatēja metanola daudz-staru pārskata komanda (angliski *methanol multi beam survey*), kuri kopumā novēroja 972 metanola māzerus (Breen et al., 2015).

Līdz šim divus plašākos metanola māzeru mainīguma apskatus ir veikušas pētnieku komandas no Dienvidāfrikas Republikas (Goedhart et al., 2004) un Polijas (Szymczak et al., 2017). Dienvidāfrikas Republikas pētnieki novēroja 54 avotus 4.2 gadus, veicot novērojumus ar biežumu no 2 līdz 4 reizēm mēnesī, bet atsevišķos gadījumos avoti tika novēroti pat katru dienu. Savukārt, Polijas komanda apskatīja 166 avotus, veicot novērojumus 2 līdz 4 reizes nedēļā un apkopojot pētījuma, kurš ilga 3.7 gadus, rezultātus. Abas komandas klasificēja avotus kā mainīgus, ja pat tikai viena no māzera spektra komponentēm atbilda mainīguma kritērija slieksnim, secinot, ka attiecīgi 81% un 79% no atlasītajiem avotiem var tikt uzskatīti par būtiski mainīgiem.

Neraugoties uz mazāku monitorēto māzeru skaitu, Goedhart et al. (2004) pirmie konstatēja visus svarīgākos mainīguma veidus. Viņi novēroja avotus, kuros plūsma monotoni kritās vai palielinājās, pamanīja arī neregulāras amplitūdas svārstības, kā arī īsāka un garāka perioda uzliesmojumu parādības. Nozīmīgākais sasniegums bija periodisku plūsmas izmaiņu atklāšana, un Goedhart et al. (2004) konstatēja 7 avotus ar periodiem no 132 līdz 520 dienām.

Nozīmīgus 6.7 GHz metanolu māzeru mainīguma pētījumus veica arī Japānā ar Ibaraki radioteleskopiem (Yonekura et al., 2016). Ibaraki 6.7 GHz metanolu māzeru monitoringa programma (iMet) regulāri veic 442 avotu novērojumus, un tā ir pasaulē plašākā šāda programma. Savus avota plūsmas blīvuma mērījumus Japāņu komanda regulāri publicē brīvi pieejamā datubāzē<sup>2</sup>. Saskaņā ar atrodamo informāciju, ir publicēts tikai rezultātu kopsavilkums par periodiski mainīgiem avotiem (Sugiyama et al., 2019).

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>http://vlbi.sci.ibaraki.ac.jp/iMet/

Lai novēroto spektrālo līniju plūsmas izmaiņu raksturojums nebūtu tikai aprakstošs, saprātīgi ir izmantot statistikas rādītājus mainīguma raksturošanai. Goedhart et al. (2004) un Szymczak et al. (2017) savos pētījumos kā vienu no šādiem parametriem izmantoja mainīguma indeksu (*VI* – variability index). Minēto statistikas rīku maiņzvaigznes mainīguma aprakstam ieviesa Stetson (1996). Māzeru mainīguma analīzei gan ērtāk ir izmantot pārveidotu formulu (1), ko izveidoja Aller et al. (2003).

$$VI = \frac{(S_{max} - \sigma_{max}) - (S_{min} + \sigma_{min})}{(S_{max} - \sigma_{max}) + (S_{min} + \sigma_{min})}$$
(1)

Ar  $S_{max}$  un  $S_{min}$  ir attiecīgi atzīmēti maksimālais un minimālais plūsmas blīvums,  $\sigma_{max}$  un  $\sigma_{min}$  attiecīgi šo mērījumu nenoteiktības. Spektrālajam līnijām, kas ir ar konstantu plūsmu VI būs tuvs 0, bet ļoti mainīgiem avotiem - mainīguma indekss tuvosies vieniniekam. Diemžēl vājiem avotiem, kuriem plūsmas vērtības un to nenoteiktības ir tuvas, šis rīks var dot arī negatīvas vērtības un tā kā tiek izmantotas tikai 2 raksturīgās vērtības no visas mainīguma kopas, VI ir jūtīgs pret rupjas kļūdas gadījumiem.

Tāpēc par labāku rīku mainīguma raksturošanai, var uzskatīt fluktuāciju indeksu (*FI* – fluctuation index), kuru ieteica izmantot Aller et al. (2003). Fluktuāciju indekss pēc būtības mēra datu izkliedi ap mediānas vērtību (2).

$$FI = \left[\frac{N}{\sum_{i=1}^{N}\sigma_i^2} \left(\frac{\sum_{i=1}^{N}S_i^2\sigma_i^2 - \overline{S}\sum_{i=1}^{N}S_i\sigma_i^2}{N-1} - 1\right)\right]^{0.5}/\overline{S}$$
(2)

Ar  $S_i$  atzīmēta individuāla plūsmas blīvuma vērtība, mērījumā  $i, \overline{S}$  – plūsmas blīvuma mediānas vērtība,  $\sigma_i$  konkrētā mērījuma kļūda, un N – novērojumu skaits. Līdzīgi kā mainīguma indekss, fluktuāciju indeks maz mainīgiem avotiem tieksies uz nulli, bet *FI* augstākā vērtība nav limitēta.

$$\chi_r^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left( \frac{S_i - \overline{S}}{\sigma_i} \right)^2 \tag{3}$$

Visbeidzot, iekļausim arī  $\chi_r^2$  testu (3) jeb svērto vidējo kvadrātisko novirzi (angliski reduced chi-square statistic vai arī Mean Squared Weighted Deviation, MSWD), kas raksturo nemainī-gas plūsmas modeļa – atbilstību novērotajai plūsmas izmaiņai. Avotam ar konstantu plūsmas blīvumu  $\chi_r^2$  vērtība tieksies uz viens.

### 2.1.6 Periodiskums

Līdz ar periodisku metanola māzeru atklāšanu teorētiķi sāka piedāvāt modeļus, kas izskaidro iepriekš minēto parādību. Šie modeļi var tikt grupēti divās daļās. Pirmā grupa saista mainīgumu ar fona starojuma līmeņa izmaiņām, bet otra grupa ar māzeru ierosināšanas efektivitātes izmaiņām, kas ir stipri atkarīga no infrasarkanās gaismas intensitātes.

Piemērs pirmajai grupai ir zvaigžņu vēju sadursmes modelis (angliski "colliding-wind binary", CWB). Šajā scenārijā divas masīvas zvaigznes (vismaz vienai jābūt spējīgai jonizēt apkārtējo gāzi) riņķo tuvu viena otrai, un to zvaigžņu vēji saduras, veidojot šoka zonu, kas spēj radīt jonizējošu starojumu vai daļiņas. Šis papildus jonizējošais starojums nonāk uz HII zonas robežas, mainot ierasto līdzsvaru starp jonizāciju un rekombināciju, radot papildus fotonus, kas ierosina metanola molekulas. Pozīcija, kurā nonāk papildus jonizācijas starojums, periodiski mainās, orbitālās kustības dēļ. Šīs periodiskās jonizācijas un rekombinācijas izmaiņas uz HII zonas robežas attiecīgi izraisa māzera mainīgumu (skatīt 1. attēlu) (van der Walt, 2011).

Inayoshi et al. (2013) modelēja zvaigžņu stāvokļa izmaiņas, kad notiek aktīva akrēcija, un konstatēja, ka pie pietiekoši strauja akrēcijas procesa ir novērojamas pulsācijas. Mehāniskās



Att. 1: Māzeru mainīguma un zvaigžņu vēju sadursmes modelis (CWB) (van der Walt, 2011)



Att. 2: Bināra zvaigžņu sistēma ar disku un spirālrzariem. Parādīti 2 stāvokļi pēc puses no perioda, bultiņa parāda rotācijas virzienu. (Parfenov and Sobolev, 2014)

svārstības notiek  $\kappa$  procesa ietekmē hēlija slānī, līdzīgi kā citās maiņzvaigznēs. Autori secināja, ka akrēcijas ātrumam jābūt lielākam kā  $10^{-3} M_{\odot} yr^{-1}$ , lai iesāktos svārstības. Paredzamie zvaigznes pulsācijas periodi ir no desmit līdz vairākiem simtiem dienu, atkarībā no akrēcijas ātruma un zvaigznes masas.

Jauna masīva dubultzvaigžņu sistēma var periodiski modulēt akrēcijas ātrumu, orbitālās mehānikas dēļ (Araya et al., 2010). Brīžos, kad uz zvaigznes krīt vairāk gāzes un putekļu, tās starojuma līmenis palielinās. Tā kā orbītas ir ar fiksētiem periodiem, mainīgs infrasarkanā starojuma līmenis var izraisīt otrās klases māzeru mainīgumu ar to pašu periodu. Lai šis process būtu efektīvs, nepieciešama augsta orbītu ekscentritāte un līdzvērtīgs masas sadalījums starp komponentēm.

Līdzīgi, orbitālā mehānika var izraisīt sablīvējumu rašanos diskā, konkrēti - triecienviļņus, kas līdzinās galaktiku spirālzariem (Parfenov and Sobolev, 2014). Šajā gadījumā diska sablīvējumi seko zvaigžņu orbitālajai kustībai un periodiski var sastapt aktīvos māzeru apgabalus, piegādājot tiem vairāk nekā ierasto pumpējošo fotonu daudzumu (skatīt 2. attēlu).

Aprakstītie scenāriji spēj veiksmīgi skaidrot vairumu no novērotajiem periodiskajiem māzeriem. Pirmais un ceturtais scenārijs labāk skaidro individuālu māzera komponenšu spožuma maiņu, savukārt otrais un trešais periodisku visu spektrālo līniju intensitātes izmaiņu.

#### 2.1.7 Uzliesmojumi

Bez periodiskajiem māzeriem, īpaša uzmanība tiek pievērsta scenārijiem, kad novērots tiek ļoti straujš māzera spožuma (plūsmas blīvuma) pieaugums. Šeit runa ir par daudzkārtīgu plūs-

mas blīvuma pieaugumu īsā laika periodā, kura rezultātā avota spektrs var mainīties līdz nepazīšanai. Uzliesmojumu (angliski *flare*) var novērot vienlaicīgi visās spektra komponentēs, vai arī uzliesmot var tikai viena atsevišķa spektra komponente.

Kā vienkāršāko uzliesmojuma gadījumu apskatīsim aktīvu māzeru apgabalu (angliski *cloudlets*, darbā lietosim mezgli) pārklāšanos. No vispārējas teorijas jau zinām, ka novērotā māzera intensitāte būs proporcionāla aktīvas vides dziļumam. Ja divi patstāvīgi apgabali, savas kustības dēļ, nonāk uz vienas taisnes ar novērotāju, tad šis efekts var izpausties, ievērojami palielinot novēroto starojuma plūsmu. Šo efektu pirmoreiz aprakstīja Elitzur (1992), un tas, piemēram, labi skaidro novēroto uzliesmojumu Orion KL (Shimoikura et al., 2005).

Iepriekš minētais modelis labi sasaucas ar māzeru starojuma piesātinājumu. Kā zināms, aktīvā vide ir lokālā termodinamiskā līdzsvarā, kurā daļa no molekulām ir ierosinātā enerģijas līmenī. Sākotnēji, apdzīvotības proporcija ir dominējoši atkarīga no ierosinošā starojuma intensitātes. Piesātinātā stāvoklī papildus pumpējošā enerģija vairs nespēj palielināt ierosināto molekulu skaitu. Tas norāda, ka nepiesātinātie māzeri ir būtiski mainīgāki par piesātinātajiem. Nepiesātinātu māzeru mezglu nonākšana uz vienas ass var izpausties eksponenciāli pieaugošā starojuma plūsmā.

Daudz iespaidīgāks māzeru uzliesmojuma veids tiek saistīts ar ievērojamu akrēcijas uzliesmojumu, kad centrālā zvaigzne īsā laikā uzņem ievērojamu matērijas daudzumu (no Jupitera masas līdz ievērojamai daļai no Saules masas). Pirmo šāda veida 6.7 GHz metanola māzera uzliesmojumu atklāja Fujisawa et al. (2015). Minētā pētījumu grupa regulāri monitorēja S255IR-NIRS3 (īsāk S255) avotu un konstatēja vairākas jaunas spektrālās līnijas, kuru spožums strauji pieauga. Sekojošie novērojumi tuvā infrasarkanā diapazonā parādīja ievērojamu spožuma pieaugumu no centrālā objekta un polārajiem aizplūstošās gāzes jeb džetiem (angliski *jet*) rajoniem, kas apliecināja akrēcijas uzliesmojuma notikšanu (Uchiyama et al., 2019). Salīdzinot iepriekšējos VLBI novērojumus ar tiem, kas iegūti uzliesmojuma laikā, Moscadelli et al. (2017) secināja, ka iepriekš novērotie aktīvie māzeru apgabali ir pazuduši un ir parādījušies jauni, kopumā tālāk no centrālās zvaigznes.

### 2.2 Masīvo zvaigžņu veidošanās

### 2.2.1 Ievads

Zvaigznes formējas blīvos un optiski necaurlaidīgos miglājos, gravitācijas kolapsa rezultātā. Lai gan šis process vispusīgi ir labi izprasts, joprojām ir nenoteiktība par procesiem, kas ļauj veidoties tik dažādas masas objektiem, konkrētāk, lielas masas zvaigznēm (M>8  $M_{\odot}$ ). Zvaigžņu statistika liecina, ka masīvas zvaigznes formējas relatīvi reti, bet to ietekme galaktiku evolūcijā ir būtiska, radot virkni ķīmisko elementu, veidojot jonizācijas zonas (HII) un dominējoši veidojot galaktiku spirālzarus.

### 2.2.2 YSO klasifikācija

Lada and Wilking (1984), apkopojot lielu skaitu YSO infrasarkanā spektra novērojumu datus, klasificēja šos (YSO) objektus četrās klasēs, balstoties uz to spektru īpašībām. Tika ieviests spektrālais indekss  $\alpha$  (4), kur  $\lambda$  ir viļņu garums un  $F_{\lambda}$  ir starojuma plūsma, kas kvalitatīvi norāda uz apjomu – starojumam, kas nāk no uzsildītā protoplanetārā diska (Lada, 1987).

$$\alpha = \frac{dlog(\lambda F_{\lambda})}{dlog\lambda} \tag{4}$$

**0** klase (Class 0) visagrīnākā evolūcijas stadija, neuztverami  $\lambda < 20 \mu m$ .



Att. 3: Ilustrācija attēlo ticamāko evolūcijas scenāriju masīvu zvaigžņu klasterim, numerācija atbilstoša vidējai rindai, sākot no kreisās malas, 4 paneļi vidū parāda individuālo objektu evolūciju, bet abi malējie - kopas. (i) Masīvas zvaigznes rodas blīvos un aukstos gāzes un putekļu mezglos, kas atrodas gigantiskajos molekulārajos mākoņos. (ii) Šie mezgli sadalās un kļūst par kodoliem, gravitācijas iedarbība ļauj tiem audzēt masu, notiekot kodolu saplūšanai vai akrēcijai. Šai stadijai atbilst nultās un pirmās klases jaunie zvaigžņu avoti. (iii) Siltums un gāzes izplūdes no centrālās proto-zvaigznes, iztvaicē ledu no putekļu graudiņiem, veicinot bagātīgu un laikā mainīgu ķīmisku procesu norisi, radot sarežģītus ogļūdeņražu savienojumus. Šī stadija atbilst otrās klases YSO. (iv) Jaunās zvaigznes ultravioletais starojums rada hiper-kompakto HII (HCHII) reģionu, kas paplašinās un laika gaitā iznīcina kompleksos ķīmiskos savienojumus. Atbilst trešās klases YSO. (v) Jonizācijas zona ir pieaugusi un kļuvusi par ultra-kompakto HII (UCHII) rajonu, termiskais radio starojums ir viegli novērojums. (vi) Ultra-kompaktajām zonām augot, tās sastopas ar citu masīvu zvaigžņu UCHII zonām, izveidojot HII rajonu - OB asociāciju. Augšējā rindā parādīts atsevišķa avota starojuma spektrs dažādos evolūcijas etapos, ievērojot, papildus infrasarkano plūsmu no diska. Apakšējā rinda rāda dažādo evolūcijas procesu laika skalu, un periodu, kad otrās klases metanola māzeri (ieskaitot 6.7 GHz) var pastāvēt šajos objektos. (Purcell, 2007)

I klase (Class I) avoti ar pozitīvu spektrālo indeksu (tipiski  $\alpha > 0.3$ ), spējīgākais starojumus mm un sub – mm viļņu garumos.

II klase (Class II) -0.3> $\alpha$ >-1.6, objekti kļūst optiski novērojami, ar augstu tuvo un vidējo infrasarkano staru līmeni no protoplanetārā diska. Tipiski šīs klases objekti ir T Tauri zvaigznes.

III klase (Class III)  $\alpha$ <-1.6, spektrs tuvojas absolūti melna ķermeņa starojuma profilam, zvaigznei zaudējot blīvo disku un nostabilizējoties uz galvenās secības zara Hercšprunga–Rasela diagrammā.

Kvalitatīvi masīvo zvaigžņu evolūciju šajās stadijās var apskatīt attēlā 3. vidējā rindā.

### 2.2.3 Masīvas zvaigznes kolapss un akrēcija

Protozvaigznes kolapss (periods zvaigznes evolūcijā, kad starojumu enerģija nāk no saraušanās gravitācijas ietekmē), ir viegli aprakstāms ar modeli, balansējot starojuma spiedienu un smaguma spēku. Šī procesa ilgumu var noteikt ar Helmholca–Kelvina (Helmholtz–Kelvin) sakarības palīdzību (5), kur  $\tau_{HK}$  – kolapsa laiks, G – gravitācijas konstante, M – protozvaigznes masa, R – protozvaigznes rādiuss un L – protozvaigznes starjauda.

$$\tau_{HK} = \frac{GM^2}{2RL} \tag{5}$$

Izmantojot empīrisko starjaudas un masas sakarību  $L \propto M^{3.2}$ , un izmēru-masas sakarību  $R \propto M^{0.6}$  var novērtēt kolapsa laiku  $\tau_{HK} \propto M^{-1.8}$ . Pielīdzinot aprēķināto laiku laiku Saules masas protozvaigznei un 10 M<sub>☉</sub>, iegūstam attiecīgi 10<sup>7</sup> un 10<sup>5</sup> gadus. Tipisks akrēcijas ātrums tiek novērtēts kā 10<sup>-5</sup> M<sub>☉</sub>/gadā, tātad, salīdzinot  $\tau_{HK}$  ar akrēcijas ilgumu ( $\tau_{acc}$ ), jāsecina, ka zvaigznēm ar masu M>8 M<sub>☉</sub> kolapss noslēdzas ātrāk nekā akrēcijas process, un kodolsintēzes reakcijas sākas pirms akrēcijas process ir noslēdzies. No minētā novērtējuma izriet divi būtiski secinājumi par atšķirībām starp mazas un lielas masas zvaigznes veidošanos: lielas masas zvaigznēm nav galvenās secības priekšstadijas; kolapsam noslēdzoties, lielas masas zvaigzne "*piedzimst*" kā galvenās secības O vai B klases zvaigzne.

OB zvaigznes ir ar augstu temperatūru un ievērojamu starjaudu, kas rada ievērojamu starojuma spiedienu uz protoplanetārā diska gāzi un putekļiem. Šo dinamiku var apskatīt ar Edingtona robežas (angliski *Eddington limit*) palīdzību, ko nosaka līdzsvars starp gravitācijas (6) un starojuma radīto (7) spiedienu.

$$\frac{dp}{dr} = -G\frac{M\rho}{r^2} \tag{6}$$

$$\frac{dp}{dr} = -\frac{k\rho}{c}\frac{L}{4\pi r^2} \tag{7}$$

Šeit attiecīgi  $\rho$  ir gāzes blīvums, r attālums no masas centra, k vides optiskais blīvums un c gaismas ātrums. Jonizācijas gadījumā  $k = \sigma_T / m_p$ , kur  $\sigma_T$  Tomsona izkliedes rādiuss un  $m_p$  protona masa, ļaujot izteikt Edingtona robežu sekojoši (8).

$$L_{Edd} = \frac{4\pi G M m_p c}{\sigma_T} = 3.2 \times 10^4 \left(\frac{M}{M_\odot}\right) L_\odot \tag{8}$$

Zvaigznes, kuru starjauda ir lielāka par Edingtona robežu ( $L>L_{Edd}$ ), ir nestabilas starojuma spiediena ietekmē tiek zaudēta masa. Tipiski šis efekts kļūst būtisks, ja zvaigznes masa ir virs 30 M<sub> $\odot$ </sub>, tad tiek zaudēts  $10^{-4} - 10^{-3}$  M<sub> $\odot$ </sub> gadā.

No iepriekš minētā un veicot detalizētas skaitliskās simulācijas (Vorobyov and Basu, 2006), ir skaidrs, ka monotona akrēcija nespēj veidot lielas masas zvaigznes. Tādējādi masīvu zvaigžņu formēšanos nevar aprakstīt, kā vienkārši mērogotu modeli, ar ko apraksta zemas masas zvaigznes veidošanos (Zinnecker and Yorke, 2007). Zinnecker and Yorke (2007) savā pārskatā apkopoja idejas, skaidrojot šo mistēriju. Vispārīgi piedāvātie modeļi grupējas 3 klasēs.

Monotona kolapsa modelis, bet ar blīvu, turbulentu un fragmentāru (ar sabiezējumiem) disku. Šajā modeļu grupā tiek piedāvāts par pamatu izmantot mērogotu standarta zvaigžņu veidošanās modeli, bet daudz lielāka loma masas augšanā ir diskam, kam esot gana blīvam un optiski ēnotam no centrālā objekta starojuma, ir iespējams turpināt audzēt masu. Piemēram, šādas modelēšanas procesus ir veikuši Vorobyov and Basu (2006), parādot, ka ir iespējami periodi (īsāki par 100 gadiem), kad akēcijas ātrums var būt būtiski (vismaz ×10) lielāks par tipisko.

Novērojumi ir parādījuši (Brandl et al., 1996), ka masīvās zvaigznes veidojas blīvajos zvaigžņu veidošanās apgabalu centros, tipiski grupās, kas vēlāk evolucionēs kā atvērtās zvaigžņu kopas. Zemākas masas zvaigžņu aizmetņi ir sastopami visā miglāja tilpumā. Bate and Bonnell (2005) savos pētījumos parādīja, ka jauno zvaigžņu aizmetņi miglāja centrā, kopējā gravitācija lauka ietekmē, spēj piesaistīt lielāku gāzes daudzumu, ļaujot efektīvāk audzēt to masu, salīdzinājumā ar aizmetņiem miglāja nomalē. Šos modeļus kolektīvi, latviskojot, varētu saukt par *"masu iegūst konkurētspējīgākais"*, angliski *"Competitive Accretion"*.

Visbeidzot piedāvāts ir arī zvaigžņu saplūšanas modelis (angliski *Coagulation*). Atbilstoši nosaukumam, piedāvātais modelis apskata masīvu zvaigžņu veidošanos kā rezultātu, saplūstot divām vai vairāk mazākas masas protozvaigzēm. Piemēram Bally and Zinnecker (2005) ar šo modeli skaidro novērojumus Oriona miglāja OMC-1 kodolā. Dale and Davies (2006) pētījumi gan norāda, ka šādas sadursmes ir gana retas, tikai ~ 0.1 procenti no masīvajām zvaigznēm būtu pieredzējušās zvaigžņu saplūšanu. Tomēr pašos blīvākajos zvaigžņu veidošanās miglāju kodolos varētu būt pietiekoši augsts blīvums (>  $10^8 M_{\odot} pc^{-3}$ ), lai izskaidrotu lielo dubultzvaigžņu populāciju starp masīvajām zvaigznēm.

### 2.2.4 Gāzes jonizācija

Gana masīvas zvaigznes saspiežoties kļūst pietiekami karstas, lai to starojums spētu jonizēt apkārtējo gāzi, veidojot hiper - kompakto un pēc tam ultra - kompakto HII zonu. Hiper – kompaktās HII zonas ir nelielas ~ 0.01pc un blīvas  $n_H \sim 10^6 cm^{-3}$  jonizētas gāzes mākoņi, kas intensīvi izstaro termisko radio starojumu. Tiek uzskatīts, ka minētās zonas ir saistītas ar individuālu protozvaigžņu disku ap nesen izveidojošos OB klases zvaigzni (Keto, 2007). Svarīgi ir ņemt vērā, ka šajā evolūcijas stadijā zvaigznes pievilkšanās spēks un akrēcijas plūsmas joprojām var dominēt pār starojumu un zvaigznes vēja spiedienu, neļaujot hiper - kompaktajai HII zonai augt hidrodinamiski. Tas ir spēkā, kamēr hiper - kompaktās HII zonas pieaugšanas ātrums ir mazāks par skaņas ātrumu (aptuveni 10 km s<sup>-1</sup>) jonizētajā gāzē (ieslēgtās HII zonas modelis) (Keto, 2005). Aktuāls jautājums ir, vai jonizētās gāzes klātbūtne tikai palēnina zvaigznes masas audzēšanu, jo, kā zināms, joni spēcīgi "izjūt" magnētisko lauku un var samazināt gāzes leņķisko momentu, palielinot akrēcijas apjomus (Keto and Wood, 2006). Centrālajai OB klases zvaigznei pieaudzējot masu, pieaug arī starjauda, un, neizbēgami, tiek sasniegta kritiskā robeža, kad HII izplešanās pārvar uz gravitācijas centru vērstos spēkus. Tad sākās strauja HII zonas izplēšanās, sagraujot protozvaigznes disku un izklīdinot apkārtējo gāzi, padarot zvaigzni optiski novērojamu. Tipiskā starjauda ir tik liela, ka tiek jonizēta arī gāze citu gan mazas, gan lielas masas zvaigžņu veidošanās grupās, nozīmīgi ietekmējot to tālāko evolūciju.

Visi iepriekš uzskaitītie procesi ir apkopoti 3. attēlā, kas parāda masīvas zvaigznes tapšanas laika skalu, ar visiem būtiskākajiem etapiem.

# 3 Metodika

## 3.1 Radioastronomijas metodes

### 3.1.1 Ievads

Novērošana ar radioteleskopiem vairākos aspektos būtiski atšķiras no plašāk pazīstamajiem optiskajiem teleskopiem. Šajā nodaļā apskatīsim svarīgākās atšķirības un nozīmīgākos jēdzienus.

Kārlis Janskijs (Karl Guthe Jansky) tiek uzskatīts par radioastronomijas pamatlicēju. Viņš ir pirmais, kurš 1933. gadā publicēja informāciju par radiosignāliem, kuru izcelsme ir Visums. Minētajam amerikāņu astronomam par godu ir nosaukta radio starojuma plūsmas blīvuma mērvienība Janskis (Jy), ko aktīvi izmantosim arī šajā darbā (1 Jy =  $10^{-26}$  W m<sup>-2</sup> Hz<sup>-1</sup>). Zemes atmosfēras molekulu (pārsvarā ūdens un skābekļa) absorbcijas dēļ, nav novērojams viss elektromagnētiskais spektrs. Bez redzamās gaismas, atmosfēra ir arī caurlaidīga viļņiem, kuri ir īsāki par 20 m ( $v \cong 15$  MHz), bet garāki par 0.2 mm ( $v \cong 1.5$  THz), šo diapazonu sauc par radiologu.

#### 3.1.2 Novērojumi ar atsevišķu radioteleskopu

Radio viļņu garums ir vismaz simttūkstoš reižu lielāks par redzamās gaismas fotoniem, līdz ar to pēc Releja likuma, atšķiras arī telpiskā izšķirtspēja. Lai arī tipiski radioteleskopu primāro spoguļu diametri ir lielāki, tas nespēj kompensēt atšķirību viļņu garuma dēļ. Tāpēc, parasti, radioteleskopi uz konkrēto debess apgabalu skatās kā vienu punkt-veida avotu. Lielāka daļa no antenas savāktās jaudas, nāk no primārā stara (angliski *main beam*), kas attiecībā pret debesīm veido telpisko leņķi, ko mēra steradiānos (sr). Leņķisko izmēru tam apraksta kā platumu, kurā tiek uztverta vairāk kā puse no maksimālās jaudas (angliski *full width to half power*, FWHP), kas ir analoģisks Gausa profila raksturojošajam parametram. Šajā gadījumā gan runa ir par divdimensionālu Gausa profilu, atbilstoši azimuta un elevācijas leņķim. Šis stara platums nosaka minimālo precizitāti, ar kādu radioteleskopa uzvadīšanas sistēmai ir jāvar notēmēt uz mērķi, angliski to sauc par *pointingu*. Primārā stara mērķēšana var būt būtiski ietekmēta atkarībā no teleskopa azimuta un elevācijas, apgrūtinot novērojumu veikšanu.

Saskaņā ar Releja – Džīnsa likumu par spožuma temperatūru  $T_b$  (angliski *brightness temperature*) sauc temperatūru pie kuras absolūti melns ķermenis izstarotu, attiecīgu starojuma plūsmu  $I_v$  konkrētajā viļņu garumā  $\lambda$  (9), k ir Bolcmaņa konstante.

$$T_b = \frac{\lambda^2}{2k} I_{\rm v} \tag{9}$$

Analogi bieži tiek lietots jēdziens trokšņu temperatūra  $T_n$ , kas raksturo elektronikas sistēmas elementa ar pretestību, radīto trokšņu daudzumu (10), kur N ir attiecīgi trokšņu jauda, B joslas platums un k Bolcmaņa konstante, jeb analoģiski, kāds būtu ģenerētais baltā trokšņa signāla līmenis pie dotās temperatūras (Wilson et al., 2013).

$$T_n = \frac{N}{kB} \tag{10}$$

Tā kā radio uztvērēju sistēmas nesastāv tikai no viena elementa ar pretestību, rezultējošais sistēmas iekšējais troksnis ir summa no visiem elementiem, kas ģenerē iekšējo troksni un ko raksturo ar sistēmas temperatūru  $T_{sys}$ . Uztvērēju vai raidītāju elementiem, virknē pastiprinot interesējošo signālu, svarīgi ir ievērot, ka pastiprināts tiek ne tikai signāls, bet arī troksnis. Tāpēc sistēmās pirmais pastiprinošais elements dominējoši nosaka sistēmas kopējo trokšņu daudzumu (temperatūru). Praksē radioastronomijā, lai uzlabotu efektivitāti, signālu uztvērējus un pirmos pastiprinātājus dzesē ar šķidrā Hēlija palīdzību.

Spektrālo līniju novērojamos ir jākontrolē arī frekvence. Katra kvantu pāreja notiek ar noteiktu frekvenci, ko pieņemts saukt par laboratorijas frekvenci vai miera (angliski *rest*) frekvenci. Avota un novērotāja radiālās kustības dēļ, šī frekvence ir izmainīta Doplera efekta dēļ, tāpēc novērojumos viena un tā pati pāreja tiek novērota dažādās frekvencēs. Principā interesējoša ir tikai pētāmā avota kustība, tāpēc novērotāja kustība tiek aprēķināta un kompensēta. Lai to veiktu jāņem vērā trīs kustības veidi.

- 1. **Zemes rotācija.** Zemes rotācijas dēļ, redzam šķietamu debess ķermeņu kustību no austrumiem uz rietumiem. Kompensējot šo kustības veidu, jāveido ģeocentriska koordinātu sistēma. Šīs kustība radiālā daļa skaitliski ir vienāda ar  $v=0.46510\cos\varphi$  km s<sup>-1</sup>, kur  $\varphi$  ir observatorijas ģeogrāfiskais platums.
- Zemes masas centra kustība attiecībā pret Saules sistēmas baricentru. Kompensējot šo efektu iegūstam heliocentrisku koordinātu sistēmu, kas ir plaši lietota astronomijā radiālo ātrumu aprēķinos. Praksē šis process ir gana matemātiski sarežģīts, jo jāņem vērā daudzi efekti, un to veic ar datorprogrammatūras palīdzību izmantojot astronomiskās Efemerīdass.
- 3. Saules kustība attiecībā pret tuvējām zvaigznēm. Fizikāli heliocentriskā sistēma jau ir ņēmusi vērā visas sezonālās un ikdienas novērotāja kustības, tomēr veicot Galaktikas rotācijas pētījumus, kā piemēram, neitrālā ūdeņraža, ērtāk ir lietot sistēmu, kur kompensēta ir arī Saules sistēmas īpaškustība attiecība pret tuvējam zvaigznēm, kas reprezentē Saules orbītas novirzi no ideālas riņķveida orbītas ap Galaktikas centru. Šo atskaites sistēmu sauc par lokālo miera stāvokli (angliski *local standart of rest*, LSR), to kā galveno sistēmu izmantosim šajā darbā. Praksē šo kustības virzienu nosaka pētot tuvējo zvaigžņu attiecībā pret Sauli, kas reizēm tiek saukts arī par Apex virzienu. Tās kustības ātrums ir v<sub>0</sub>=20 km s<sup>-1</sup> un virziens ir vērsts pret RA 18<sup>h</sup> 03<sup>m</sup> 50.2<sup>s</sup> un DEC +30<sup>o</sup> 00' 16.8", Herkulesa zvaigznājā uz Dienvidrietumiem no Vegas, un šīs vērtības tiek regulāri precizētas.

Veicot spektrālos novērojumus, bez avota spektra tiek reģistrēts arī instrumentālais spektrs, kura efektu nepieciešams noņemt. To veic, izmantojot atskaites mērījumus, kurā reģistrēts tiek tikai instrumentālais spektrs. Šos divus spektrus (avota ar instrumenta, tikai instrumenta) atskaitot vienu no otra iegūst tīru avota spektru. Izdala vārākus paņēmienus atskaites spektra reģistrācijai:

- 1. **Signāla pārslēgšana zināmai pretestībai.** Šajā metodē signāls no antenas tiek regulāri aizvietots ar signālu no līdzīgas temperatūras pretestības. Mūsdienās reti izmantota, jo rezistori un antenas ir ar būtiski atšķirīgām instrumentālā spektra īpašībām.
- 2. Frekvenču pārslēgšana. Metode paredz regulāru nelielu izmaiņu frekvencē, uz ko tiek noregulēts uztvērējs. Pieņemts, ka avota spektrs ir šaurs, salīdzinājumā ar visu novēroto frekvences joslas platumu. Frekvences izmaiņa par kādu daļu no joslas platuma ļauj iegūt atskaites mērījumu šajā frekvencē. Šos divus mērījums atņemot, esam ieguvuši avota spektru. Uztvērēja frekvenci var noregulēt tā, ka avots joprojām ir redzams otrajā mērījumā, tas ļauj efektīvi izmantot visu novērojumu laiku. Šādā gadījumā parasti izmanto simetrisku frekvences novirzi no vidējās, un pēc instrumentālā spektra noņemšanas vienu no šīm pusēm invertē un tad veic vidējošanu kopā ar otru.
- 3. Pozīcijas maiņa. Veicot novērojumus, tiek ierakstīts avota signāls, pēc tam teleskops tiek nedaudz novirzīts no mērķa, lai reģistrētu arī signālu no "*tukšas*" debess. Būtiski, ka signāla ierakstam bez avota, jābūt tik pat ilgam kā ar avotu. Faktiski, teleskops tikai pusi no novērojuma laika ieraksta avota signālu.

4. Pārlidojuma kartēšana. Šī metode ir atvasināta no iepriekšējās. Tikai šajā gadījumā iegūtais spektrs un teleskopa pozīcija tiek fiksēta vismaz reizi sekundē. Teleskopam algoritmiski, virzot tā staru pa debess apgabalu, tiek iegūta karte. Katra atsevišķa apgabala pārbrauciena signāla attiecība pret trokšņa līmeni ir zema, bet tos vairākus summējot kopā iespējams iegūt gana jūtīgu apgabala karti.

Pēc avota un atskaites spektru atņemšanas, būtu jāiegūst plakans spektrs, kur mediānas vērtība būtu jābūt nullei un nebūtu redzamas slīpums, protams, izņemto frekvences, kurās novērojams avots. Tomēr novērojumu apstākļi spektru iegūšanas laikā var mainīties, kā arī pats instruments var nebūt stabils laikā. Radot slīpumu vai viļņveidīgus efektus iegūtajā spektrā, tos parasti kompensē, veicot trokšņa līmeņa aproksimāciju ar matemātisku funkciju, un tad no spektra atņemot šīs funkcijas vērtību dotajās frekvencēs.

### 3.1.3 Interferometrija un apertūras sintēze

Viena no galvenajiem prasībām, astronomijas novērojumos, ir izšķirtspēja. Radioastronomijā šī ir īpaša problēma, jo balstoties uz Releja kritēriju (11), optiskās sistēmas leņķiskā izšķirtspēja R ir tieši proporcionāla viļņu garumam, bet apgriezti proporcionāla tās diametram.

$$R = 1.22 \frac{\lambda}{D} \tag{11}$$

Kā piemēru aplūkojot 32 m diametrā lielu radioteleskopu, novērojot 5 GHz radio signālu, tā izšķirtspēja ir ap 6 loka minūtēm, kas ir sliktāk kā cilvēka acij (1 loka minūte).

Pastāv iespēja izšķirtspēju uzlabot, kombinējot signālu no vairākiem radioteleskopiem, šo metodi sauc par interferometriju. Šajā gadījumā izšķirtspēju nenosaka instrumenta optiskais diametrs (D), bet gan maksimālais attālums (B) starp interferometra elementiem. Izmantojot šos elementus var veidot attēlu, ar apertūras sintēzes palīdzību. Iegūtā attēla izšķirtspēja atbilst – milzu teleskopa izšķirtspējai, bet attēla veidošanā piedalās tikai daži tā fragmenti.

Tomēr šis process nav triviāls, jo interferometra elementu izvietojums, izvēlētā frekvence un citi apstākļi atstāj iespaidu uz attēla veidošanu. Pilns apraksts attēlu veidošanai ar interferometru ir pārāk apjomīgs šim apskatam, plašu un detalizētu apskatu var iegūt piem. Thompson Richard and Swenson George Jr (2001). Turpmāk tiks akcentēts dažas būtiskākās un praktiskākās nianses, veiksmīgai attēla iegūšanai ar ļoti lielas bāzes līnijas interferometru (VLBI).

Interferences aina no interferometra (angliski *fringe*) principāli ir Furjē transformācija no avota spožuma sadalījuma debesīs (attēla). Avota redzamība ir funkcija no leņķa, tad interferences aina ir funkcija no viļņa garuma un bāzes līnijas garuma. Furjē telpā pieņemts lietot u, v, w koordinātu sistēmu, kur w – vērst pret avotu, u – pret austrumiem un v – uz debess ziemeļpolu. Šajā koordinātu sistēmā mērvienības ir viļņu garumi. Zemei rotējot, divu elementu interferometrs atstāj lokveida grafiku u - v plaknē, jo mainās bāzes līnijas garums, skatoties no avota. Šis ir pozitīvs aspekts, jo punkta vietā, tiek iegūts loks, dodot plašāku informāciju par avota struktūru. Kombinējot daudzus interferometra tīkla elementus ar ilgāku novērojuma laiku, tiek efektīvi "*aizpildīta*" u - v plakne. Tas ir būtiski, jo, balstoties uz van Kitterta – Zernikē teorēmu (angliski *van Cittert–Zernike theorem*), ar Furjē funkcijas palīdzību var koherences mērījumus u - v plaknē transformēt uz avota intensitāti debesīs, citiem vārdiem – attēlu. Ģeogrāfiski tāli interferometra elementi ir jutīgi pret leņķiski mazām avota detaļām, bet nav jutīgi pret lielām avota detaļām, bet nepamana sīkās detaļas (Releja kritērijs).

Praktiski iegūtie interferometra Furjē attēli "*atpaliek*" no iedomāta tik pat liela viena-vienota teleskopa attēla vairākos veidos, visbūtiskāk, savāktā avota plūsma – interferometra efektīvā virsma ir tikai tā veidojošo elementu virsmu summa. Veidotais Furjē attēls ir arī nepilnīgs, jo aizpildīta nav visa u - v plakne, ir pieejama informācija tikai par tās daļu, ko angliski sauc

par *Sampling funkciju*, un tā atstāj pēdas attēlā. Tas bieži izpaužas kā regulāras struktūras attēlā (piem. svītras un riņķi), bet to efektu iespējams mazināt ar dažādiem attēla tīrīšanas algoritmiem.

Radioastronomijā VLBI attēli tiek galvenokārt iegūti ar divu datorprogrammu palīdzību: 1) AIPS<sup>3</sup> (Astronomical Image Processing System) un 2) CASA<sup>4</sup> (Common Astronomy Software Applications package). Abas programmatūras spēj apstrādāt iegūtos interferometra koherences mērījums, iegūstot kalibrētus, attīrītus avota attēlus. Detaļās abas programmas nepalūkosim, abu mājas lapas satur plašu informāciju par to iespējām un pielietojumu.

### 3.2 Irbenes radioteleskopu piemērošana māzeru novērojumiem

### 3.2.1 Ievads

Irbenes radioteleskopiem ir gana interesanta un neparasta vēsture, ko šajā darbā pilnā apmērā neatspoguļosim. No šeit prezentēto pētījumu viedokļa, kompleksa rekonstrukcija 2014. un 2015. gadā ir robežšķirtne, pēc kuras Irbenes radioteleskopu varēja tikt izmantoti zinātniskajiem pētījumiem. Uzsverot būtiskāko: tika atjaunotas abu antenu optiskās īpašības, iegādāti un uzstādīti jutīgi plašas joslas uztvērēji un ieviesta moderna teleskopu kontroles sistēma. Rekonstrukcijas mērķis bija sagatavot minētos instrumentus tādā pakāpē, lai VSRC varētu pievienoties Eiropas interferometrijas tīklam (EVN). Tomēr tikai nelielā daļā no laika, teleskopiem ir jāveic novērojumi EVN tīklā, pārējā laikā teleskopi var tikt izmantoti institūtu pētnieku izvēlētos novērojumos.

Izvērtējot iespējas veikt masīvu zvaigžņu formēšanas pētījumus, izmantojot VSRC instrumentu iespējas, tika secināts, ka produktīvākais virziens ir 6.7 GHz II klases metanolu māzeru novērojumi. Tomēr šādu novērojumu veikšanai bija nepieciešami priekšdarbi. Diemžēl instrumentu rekonstrukcija un aprīkošana neietvēra visas vēlamās iespējas, jo papildus aparatūras iegādei trūka finansējuma. Tāpēc, ciešā sadarbībā ar institūta tehnisko personālu (autora ieguldījumu skatīt sekojošā nodaļā), tika izstrādātas metodes esošā aprīkojuma pielāgošanai un izmantošanai spektrālo līniju novērojumos.

Šajā nodaļā ir aprakstīta māzeru līniju novērošanas metodikas ieviešana Irbenes radioteleskopiem. Izmantojot literatūrā atrodamos un rekomendētos radioteleskopu kalibrēšanas algoritmus, pielāgojot metodes, tika izveidoti Irbenes kompleksam unikāli rīki novērojumu veikšanai, ietverot: skriptus teleskopa kontrolei māzeru novērojumu laikā, datu glabāšanas un arhivēšanas metodiku, datorprogrammu kopumu spektru reducēšanai un rezultātu saglabāšanai.

Lai apgūtu māzeru novērošanas metodiku, autors 3 mēnešus bija ERASMUS studijās Nikolaja Kopernika Universitātē, Polijā (LU rīkojuma nr. 8/80856)

Atsevišķas daļas no šīs nodaļas ir publicētas:

Antyufeyev, O.; Bleiders, M.; Patoka, O.; Bezrukovs, V.; Aberfelds, A.; Shmeld, I.; Orbidans, A.; Steinbergs, J.; Karelin, Y.; Shukga, V. (2022), Receiver gain and system temperature instability during the calibration of spectral data at radio telescopes in C-band, in Euro-Asian Astronomical Society, Astronomical and Astrophysical Transactions, Vol. 33, No. 2.., Cambridge Scientific Publishers, Coll. Astronomical and Astrophysical Transactions, France, ISBN : 9781908106865, pp. 113-122, doi : https://doi.org/10.17184/eac.6474

Šteinbergs, J ; Aberfelds, A ; Bleiders, M ; Shmelds, I., VIRAC maser data processing suite, Astronomical and Astrophysical Transactions, Vol. 32, No. 3.,pp. 227-240, Cambridge Scientific Publishers, Coll., France, doi : https://doi.org/10.17184/eac.5643 , (2021)

M. Bleiders, O. Antyufeyev, O. Patoka, A. Orbidans, A. Aberfelds, J. Steinbergs, V. Bezrukovs and I.Shmeld, Spectral Line Registration Backend Based on USRP X300 Software Defined Radio, Journal of Astronomical Instrumentation, Volume 9, Issue 2, id. 2050009-773, (2020)

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>http://www.aips.nrao.edu/index.shtml

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>https://casa.nrao.edu/index.shtml

Antyufeyev, O. ; Bleiders, M. ; Patoka, O. ; Bezrukovs, V. ; Aberfelds, A. ; Shmeld, I. ; Orbidans, A. ; Steinbergs, J. ; Shulga, V., Estimation of errors at the calibration of spectral data at the Irbene RT-32 radio telescope, Astronomical & Astrophysical Transactions, Issue 1, Vol. 32, p. 23-38, (2020)

### 3.2.2 Izmēģinājuma novērojumi

Pirmie mēģinājumi veikt metanola māzeru novērojumus 6.7 GHz frekvencē sākās uzreiz pēc tam, kad RT-32 modernizācijas tehniskie darbi bija paveikti. Pirmie veiksmīgie novērojumi tika veikti 2016. gada 9. jūlijā. Sākotnējos novērojumos, kā spektrometrs tika izmantots institūta elektronikas laboratorijas industriālais spektra analizators R&S<sup>®</sup>FSW43<sup>5</sup>, kas piedāvāja elastīgu un lietotājam draudzīgu saskarni, kas palīdzēja apgūt līniju atrašanu un joslas uzstādīšanas pamatprincipus, tādus kā: reģistrējamās avota frekvences maiņu, novērotāja kustības dēļ, dažādu joslas platumu izvēli dažādiem avotiem un nepieciešamo signāla uzkrāšanas laiku atkarībā no avota plūsmas blīvuma. Jāpiebilst, ka ~ 6.7 GHz signālu ir tehniski sarežģīti digitalizēt, tāpēc tiek izmantota signālu frekvences saskaitīšanas īpašība – lokālais oscilators (LO) nodrošina starpfrekvenci (6100 MHz), ļaujot spektra reģistratoram darboties daudz jutīgākā ~ 500 – 600 MHz diapazonā. Jāpiebilst, ka R&S<sup>®</sup>FSW43 spēj vienlaicīgi reģistrēt tikai vienu no cirkulārās polarizācijas signāliem.

Amplitūdas kalibrēšana sākotnēji notika tikai "salīdzinošā" veidā, nosakot sistēmas pastiprinājumu tikai sesijas sākumā, novērojot maz mainīgu avotu un pieņemot tā plūsmas blīvumu par nemainīgu un atbilstošu literatūrā norādītajai. Lai mazinātu atmosfēras ietekmi, novērojumi tika plānoti ar pēc iespējas nemainīgu antenas elevācijas leņķi. Joslas efektus kontrolēja un laboja paša spektrometra iebūvētās funkcijas.

Radioteleskopi tiek kontrolēti ar Nacionālās Aeronautikas un Kosmosa Aģentūras (NASA) izstrādāto Field System (bieži izmanto saīsinājumu FS Himwich 2000). Minēto sistēmu var raksturot kā teleskopa kontroles "mugurkaulu", kas nodrošina sinhronu sadarbību starp dažādiem elementiem, ļaujot veikt: sekošanu avotiem, uztvērēja kontroli un datu ierakstīšanu. Tomēr šī sistēma ir gana veca un nav viegli apgūstama, radot izaicinājumus novērojumu plānošanā un instrumenta stāvokļa izpratnē. Viens no piemērotākajiem risinājumiem ir veikt novērojumu norises automatizēšanu, izstrādājot Python vai citas programmēšanas valodas skriptus, attiecīgi nodrošinot gan FS komandas, gan tiešu kontroli pār modernākām ierīcēm.

Tā kā katrs radioteleskops ir unikāls, kontroles procesi un metodes novērojumu veikšanā nevar tikt tieši pārnesti uz citu observatoriju. Iegūtā novērošanas pieredze un zināšanas par metodēm ļāva pēc dažiem mēnešiem jau izveidot daudz precīzāku novērojumu metodiku.

### 3.2.3 Frekvences nobīdes metode ar DBBC2

Balstoties uz iegūto pieredzi un gūtajām zināšanām stažēšanās laikā, tika īstenota daudz robustāka māzeru līniju novērošanas metodika, salīdzinājumā ar iepriekš aplūkoto. Šoreiz kā spektrālo reģistratoru izmantojām otrās paaudzes digitālo bāzes joslas konvektoru (angliski *digital baseband converter*, DBBC2<sup>6</sup>), kas sūta digitālos datus ierakstīšanai ar Mark5c reģistratoru vai arī saglabā datus Flexbuff datu serverī. Ierakstot uztvērēja signālu, cietajos diskos tiek veidots VDIF<sup>7</sup> (VLBI datu apmaiņas formāts, angliski "*VLBI Data Interchange Format*") formāta fails, kas binārā formā fiksē abu polarizāciju signālu momentāno amplitūdu un fāzi. Minētās ierīces ierasti izmanto VLBI novērojumu veikšanai. Spektra iegūšanai nepieciešams veikt šo datu

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>https://www.rohde-schwarz.com/us/products/test-and-measurement/benchtop-analyzers/ rs-fsw-signal-and-spectrum-analyzer\_63493-11793.html

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup>https://www.hat-lab.cloud/dbbc2/

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup>https://vlbi.org/vlbi-standards/vdif/

Furjē transformāciju. To veic ar mark5access<sup>8</sup> bibliotēkām, kas attiecīgi pareizi ielasa VDIF failu un veic tā Ātro Furjē transformāciju (FFT). Rezultātā iegūst failu ar iegūto spektru trīs kolonās: pirmā – signāla frekvence, otrā – signāla amplitūda kreisās cirkulārās polarizācijas kanālā, trešā – signāla amplitūda labās cirkulārās polarizācijas kanālā.

Teleskopu, uztvērēju, DBBC2 un datu ieraksti uz Flexbuff novērojuma laikā kontrolē FS, kuras komandas atbilstoši novērojumu plānam tika ģenerētas ar skripta palīdzību. Teleskopa operatori vēlamajā novērojumu laikā, izsauc sagatavoto komand–failu (tā saucamie, \*.snap faili, kur \* – attiecīgi novērojuma kods). Vēlāk tika veiktas izmaiņas, kas paredz definēt katram mērķa avotam specifisku teleskopa kontroles konfigurāciju, kas atbilstoši novērojama momentam tiek automātiski modificēta, saskaņā ar paredzamo reģistrējamās frekvences izmaiņu, atbilstoši novērotāja kustībai attiecībā pret avotu.

Izmantojot aprakstīto metodiku, pirmie dati tika iegūti 2017. gada martā, un tā tika plaši lietota aptuveni divus gadus. Šo metodi abos teleskopos var izmantot joprojām, tomēr tā ikdienā ir aizstāta ar efektīvāku metodi.

### 3.2.4 Frekvences nobīdes metode izmantojot SDR

Sākot no 2019. gada maija abos teleskopos kā spektrālos reģistratorus tika sāksts lietot programmatūras definēto radio ierīci, no angļu valodas *software defined radio* (SDR), konkrēti Ettus Research USRP X300<sup>9</sup>. Veiktā reģistratoru nomaiņa izmaiņa ļāva būtiski atvieglot slodzi institūta datu serveriem, jo spektri tiek iegūti novērojumu laikā, veicot ātro Furjē transformāciju (FFT) reālā laikā. DBBC2 viena avota 15 min novērojuma ieraksts aizņēma aptuveni 1.5 GB diska vietas un bija nepieciešams pielietot FFT, lai iegūtu spektru, bet izmantojot SDR, saglabāti tiek tikai 8.5 MB. SDR ir arī jutīgāks par DBBC2, galvenokārt, tādēļ, ka dati tiek digitalizēti izmantojot 14 bitu signāla līmeņa izšķirtspēju (angliski *sample*, DBBC2 efektīvi lieto tikai 2 bitu līmeņus). Pilnu aprakstu par SDR pielietošanu kā spektrālo reģistratoru skatiet Bleiders et al. (2020).

Amplitūdas kalibrēšanai jāzina virkne parametru, ko tehniski ir sarežģīti novērtēt tikai ar līniju novērtējumiem. Tāpēc regulāri tiek veiktas kalibrēšanas sesijas, novērojot ilgtermiņā stabilus kvazārus, kas dod atskaites punktus sistēmas jutības novērtējumiem. Pasaules mērogā vadošus pētījums šajā jomā veic Amerikas Savienoto Valstu Ļoti Lielā Tīkla (*Very Large Array*, VLA) zinātnieki (Perley and Butler, 2013), kuru avotu plūsmu blīvumu novērtējumus tiek lietoti arī Irbenes teleskopu kompleksā. Aktuālos avotu spožumu novērtējumus ir iespējams iegūt no VLA observatorijas mājas lapas. Būtisks sistēmas parametrs, kura novērtēšanai nepieciešama ārēja informācija, ir no elevācijas atkarīgā antenas temperatūras un plūsmas blīvuma proporcijas vienība, angliski *Degrees Per Flux Units* (DPFU), RT–32 tā ir 0.0857 K Jy<sup>-1</sup> un RT–16 tā ir 0.046 K Jy<sup>-1</sup> zenītā. Tās izmaiņa atkarībā no teleskopa elevācijas tiek aprakstīta ar trešās kārtas polinoma aproksimāciju.

Novērojumu norisei ir noteikts kopējs nepieciešamo parametru kopums, ko satur avota konfigurācijas ieraksts (skatīt piemēru tabulā 1). Tipiskie novērošanas parametri māzeru monitorēšanai ir sekojoši: 1.5625 MHz joslas platums, 4096 FFT kanāli, kas atbilst 0.017 km s<sup>-1</sup> spektrālai izšķirtspējai. Precīzi saskaņot DBBC2 un SDR izšķirtspējas nav iespējams. Līniju novērojumu laikā, teleskopa kontroles skripts, ģenerē novērojuma unikālo "\*.log" failu (skatīt tabulu 2.), kas satur nepieciešamo informāciju par novērojuma uzstādījumiem un teleskopa darbību novērojuma gaitā.

Māzeru un citu līniju novērojumos tiek izmantots frekvences nobīdes metodes variants, ko detaļās apraksta uz iesaka izmantot Winkel et al. (2012). Kalibrācija ietver četrus soļus, pirmajos divos ar izslēgtu trokšņu diodi simetriski mainām (nobīdām) lokālā oscilatora frekvenci par  $1/2^N$ 

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup>https://github.com/demorest/mark5access

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup>https://www.ettus.com/all-products/x300-kit/



Att. 4: MDPS skripta sdr\_fs.py darba logs. Labā un kreisā puse parāda attiecīgi pa labi un kreisi cirkulāri polarizēta signāla apstrādi. Augšēja panelī parādīts četru kalibrēšanas soļu FFT spektrs, katrs savā krasā. Apakšējā panelī kalibrēts spektrs, pēc algoritma izpildes.

(N - veseli pozitīvi skaitļi, biezāk izmanto tā vērtība ir 2) no joslas platuma, ko apzīmē kā sig<sub>off</sub> un ref<sub>off</sub> (saīsinot: s0 un r0), tādu pašu frekvences nobīdi veic arī ierakstot datus ar ieslēgtu trokšņu diodi, apzīmē kā sig<sub>on</sub> un ref<sub>on</sub> (saīsinot: s1 un r1). Trokšņu diodes signāla līmenis  $T_{cal}$  ir zināms, un abiem teleskopiem ir vienāds ar 3.820791 K. Katrs no šiem soļiem tiek saglabāts savā failā, kas satur 3 datu kolonas ar attiecīgu frekvenci un abu polarizāciju amplitūdas. Datu ieraksti tiek saglabāti šī novērojuma unikālā mapē, kuras nosaukumu veido avota nosaukums, frekvence, stacijas apzīmējums un novērojuma kārtas numurs (Piem. cepa\_f6668\_ib\_1292), kurā attiecīgi atrodas iepriekš minētie datu faili (piemēram, cepa\_f6668\_ib\_1292\_no001r0.dat).

Novērojumus reducē ar institūta izstrādāto programmas nodrošinājumu: "Maser Data Processing Suite "(MDPS). Plašāku aprakstu par izveidoto programmatūru spektru apstrādei, lasiet: Šteinbergs et al. (2021). Izstrādāto kodu ar dokumentāciju var iegūt no GitHub repozitorija<sup>10</sup>. MDPS izstrādāta izmantojot python programmēšanas valodu un izmantojot daudzas atvērtā koda astronomijas, matemātikas un signāla apstrādes bibliotēkas.

Ikdienā datu apstrāde tiek iesākta ar main\_gui.py skriptu, kas pārbauda vai visi viena noteikta avota novērojumi ir apstrādāti un to rezultāti ir atrodami attiecīgajā mapē. Nepieciešamības gadījumā, tiek izsaukts sdr\_fs.py skripts (Attēls 4.) ar attiecīgajiem parametriem, kas veic iepriekš aprakstīto frekvences nobīdes algoritmu. Novērojuma veiksmīgi iegūtie soļi tiek apstrādāti neatkarīgi, summāri veidojot vidējoto rezultējošo spektru (Attēls 5.). Visbeidzot, iepriekš iegūtajam spektram veicam trokšņu līmeņa modelēšanu, novācot novērojuma laikā reģistrētos ne-Stohastiskos efektus (Attēls 6). Pēc šī soļa spektra apstrāde ir pabeigta un rezultāts tiek ierakstīts failā.

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup>https://github.com/sklandrausis/Maser-Data-Processing-Suite



Att. 5: MDPS skripta sdr\_fs.py rezultējošais darba logs. Augšā parādīts abu polarizāciju rezultējošais spektrs, jau transformēts no frekvences uz LSR. Pa kreisi apakšā, vidējā sistēmas temperatūras vērtība katrā novērojumu solī. Pa labi apakšā, signāla un trokšņa attiecība katrā novērojumu iterācijā.



Att. 6: MDPS skripta total\_spectrum\_analyzer\_qt5.py logs. Parādot abu polarizāciju trokšņu līmeņa modelēšanu ar polinomu, vidū ir izgriezts avota signāls.

Konfigurācijas ieraksta piemērs	Skaidrojums
[g78p12_f6668]	Konfigurācijas galvene;
	norāda arī pārejas laboratorijas frekvenci
source = g78p12	Avota saīsinātais nosaukums
RA=20h14m26.05839s	Avota Rektascensija (ICRS J2000)
DEC= 41d13m32.5278s	Avota Deklinācija (ICRS J2000)
v_rad = −7.1	Avota radiālais ātrums, km s $^{-1}$
lo = 6100	Uztvērēja lokālā oscilatora pamat-frekvence; MHz
n_scans = 15	Iegūstamo iterāciju skaits
cal_interval = 1	Kalibrācijas biežums pret iterācijām
t_int = 15	Viena datu reģistrācijas soļa ilgums, s
bw_num = 3	Joslas platuma uzstādīšana
ns = 4096	FFT kanālu skaits
raw_flag = 0	Norāda vai tiks saglabāts arī digitalizētais signāls
win = 2	Norāda FFT loga metodi
fov = 1	Norāda FFT loga pārklāšanu
df_div = 4	Lokālā oscilatora frekvences izmaiņas solis

Tabula 1: Tipiska māzeru novērojumu konfigurācija ar SDR

	Skaidrojums	Izmantotais teleskops	Pilnais novērojama identifikators	Mērķa avota saīsinātais nosaukums	Avota koordinātes; (ICRS J2000)	Veicamo iterāciju skaits un kalibrēšanas biežums; iterāciju skaits	Vienas iterācijas integrācijas laiks un kopējais laiks avotam; s	Joslas platums, MHz; FFT punktu skaits; spektrālā izšķirtspēja, MHz	FFT loga formāts, FFT loga pārklāšanās parametrs, digitalizēto datu saglabāšana	Frekvences nobīdes daļa no joslas platuma, frekvences nobīde, MHz	Kalibrēšanas sekvence	Novērotāja radiālais ātrums, km s <sup>-1</sup> ; Avota radiālais ātrums, km s <sup>-1</sup> ; Laboratorijas frekvence, MHz	Novērojamā frekvence, MHz; Lokālā oscilatora frekvence, MHz; digitalizējamā frekvence, MHz	Trokšņa diodes kalibrētā signāla līmenis, K	Grādu uz Jansku pārejas koeficients	Polinoma parametri, kas raksturo jutības atkarību no elevācijas leņķa	Informācijas pieprasījums par uztvērēja statusu	Parametri no metroloģiskas stacijas	Pirmās iterācijas, pirmā soļa ieraksta, tā laiks un antenas pozīcija	otrā soļa ieraksts	trešā soļa ieraksts	ceturtā soļa ieraksts	Informācijas pieprasījums par uztvērēja statusu	Parametri no metroloģiskas stacijas	Otrās iterācijas pirmā soļa ieraksts	**	carīgs no veicamo skanu skaita
1auuia 2. 11pisha 111a251u	Log faila ieraksta piemērs	#station,id: RT-16 ib	#exp_name: g78p12_f6668_ib_527	#source: g78p12	#RA,DEC: 20h14m26.05839s 41d13m32.5278s	#N_scans,N_cal: 15 1	#T_int,T_obs: 15.000 900.000	#Fs,Ns,RBW: 1.562500 4096 0.000381	#win,fov,raw_flag: 2 1 0	#df_div,df: 4.000000 0.390625	#cal_sequence: ['s0', 's1', 'r1', 'r0']	#v_obs,v_rad,f_lab: 32.723510 -7.100000 6668.518000	#f_obs,L0,IF: 6669.403825 6100.000000 569.403825	#Tcal: 3.820864 3.820864	#DPFU: 0.046000 0.043800	#Elev_poly: 0.9144626256 0.0033676682 -3.33143e-05	2022-05-19T05:32:08 rxc/XS=4;+15.4;*	2022-05-19T05:32:08 wx/10.4,*	2022-05-19T05:32:14 1 s0 252.489498 60.928218	2022-05-19T05:32:33 1 s1 252.579447 60.887676	2022-05-19T05:32:51 1 r1 252.677061 60.843508	2022-05-19T05:33:08 1 r0 252.746227 60.812317	2022-05-19T05:33:26 rxc/XS=4;+15.4;*	2022-05-19T05:33:26 wx/10.4,*	2022-05-19T05:33:32 2 s0 252.859655 60.761122	2022-05-19T05:33:49 2 s1 252.948069 60.720878	* Šīs rindas saīsinātas, lai ietilptu tabulā, ** Log faila lielums ir atl

Tabula 2: Tipiska māzeru novērojumu log faila piemērs

#### 3.2.5 Sistemātiskās kļūdas

Neviens mērinstruments nav absolūti precīzs, tai skaitā arī radioteleskopi ir ar mērījumu kļūdu. Tā kā pamatā darbā aprakstītie mērījumi ir avota spektri, tad novērojumu kļūmi varam nosacīti sadalīt divās daļās: frekvences un amplitūdas. Pirmā ir neievērojami maza, jo signālu reģistrators spēj darboties ar 1 Hz precizitāti, kas ir stipri mazāka par izvēlēto signāla kanāla platumu 381 Hz. Būtiski kļūda palielinās, veicot transformāciju no frekvences uz radiālā ātruma skalu. Tam pamatā ir nenoteiktība novērotāja (observatorijas ātrumā attiecībā pret avotu) ātrumā. Kā jau minēts iepriekš to aprēķina ar datorprogrammu, bet labi dokumentēti ir tikai galvenie faktori. Balstoties uz lielo daudzumu novērojumu empīrisko salīdzinājumu un mūsu izmantotās programmas salīdzinājumu ar citām publiski pieejamajām, tika novērtēts, ka mērījuma radiālā ātruma precizitāte ir līdzvērtīga viena kanāla platumam jeb 0.017 km s<sup>-1</sup>.

Būtisks aspekts mērījumu precizitātē ir teleskopa mērķēšana (pozicionēšana) uz avotu (angliski *pointing*). Ekstrēmi sliktā scenārijā tas var novest pie nespējas uztvert avota signālu, bet daudz izplatītāk, tiek zaudēta daļa no starojuma plūsmas. Par teleskopa uzvadīšanu uz avotu rūpējas teleskopu kontroles sistēmas, kurā izveido tā modeli, balstoties uz liela skaita avotu novērojumu, aptverot visu debesi, atbilstoši dažādiem Azimuta un Elevācijas leņķiem. Teleskopu mērķēšanas precizitāti ietekmē arī vējš, kura ietekme ir būtiskāka, ja ir novērojamas brāzmas un to ātrums ir tuvs teleskopu ekspozīcijas robežai (15 m s<sup>-1</sup>). Pie lielāka vēja ātruma novērojumi netiek veikti. Novērojumu laikā antenu pozīcija tiek noteikta un kontrolēta vairākas reizes sekundē un praktiski sistēmas precizitāti ierobežo brīvkustības piedziņas sistēmā. Veicot lielu skaitu amplitūdas mērījumu ar pozīcijas nobīdes metodi, var noteikt vidējo pointinga nobīdi no avota reālās pozīcijas. RT–16 šī novirze ir 0.033<sup>o</sup> jeb 2 loka minūtes, kam aptuveni atbilst 92% no normalizētās amplitūdas, un tāda paša amplitūdas nenoteiktība ir arī RT–32.

Amplitūdas kļūdas novērtēšana ir būtiski sarežģītāka, jo šī kļūda mainās laika gaitā. Spektra veidošana, kā jau aplūkojām, notiek izmantojot vairākus neatkarīgus mērījums, un amplitūdu nosaka standarta parametri – teleskopa pastiprinājums atkarībā no elevācijas un sistēmas temperatūras. Sistēmas temperatūras ( $T_{sys}$ ) nenoteiktība abiem Irbenes radioteleskopiem ir neliela, kā to parādījuši Antyufeyev et al. (2022) mērījumi, labos laika apstākļos tā ir ap 1%, bet lietū vai, ja ir biezi mākoņi tad 1 – 3 %.  $T_{sys}$  vērtība attiecīgi labos apstākļos ir ap 32 K, nelabvēlīgos 40 – 50 K, pasliktinoties novērojumu apstākļiem, tā pieaug, un vērtības virs 100 K norāda, ka mērījums jāatmet kā rupja kļūda.

Teleskopu pastiprinājums un tā atkarība no elevācijas leņķa ir būtiskākais amplitūdas kļūdas cēlonis. Tas strauji mainās, atkarībā no atmosfēras apstākļiem, lēnākas izmaiņas ir sezonālas – atkarībā no vidējās temperatūras un mitruma, kā arī ilgtermiņa tendence – pastiprinājums krīt, teleskopa uztvērējiem pakāpeniski novecojot. Empīriski mērījumi amplitūdas kļūdu ļāva novēr-tēt kā aptuveni 20 % no amplitūdas. Balstoties uz virkni maz mainīgu avotu plūsmas mērījumu salīdzinājumu ar to mediānas amplitūdu, tika novērots, ka īpaši amplitūdas mērījumu izkliede pieaug ziemas mēnešos, kad teju nepārtraukti ir 100 % atmosfēras mitruma līmenis. Irbenes radioteleskopu komplekss atrodas tikai 4.2 km no Baltijas jūras, no kuras arī pūš ziemas sezonā dominējošie vēji. Šo faktoru dēļ, atmosfēras apstākļi ir strauji mainīgi un tas izraisa straujas pastiprinājuma izmaiņas, un tās nav izdevies pilnīgi kompensēt ar esošajām metodēm. Šādos apstākļos arī kalibrēšanas mērījumi ir ar ļoti augstu izkliedi un tie slikti apraksta radioteleskopu pastiprinājumu, tāpēc tika nolemts – arī šādos apstākļos lietot noteiktās vidējās pastiprinājumu vērtības. Mērījumi, kas atbilst rupjas kļūdas kritērijiem, tika atmesti.

### 3.2.6 Veivleta analīze

Mūsdienās veivletu spektru analīze ir kļuvusi par efektīvu rīku monitoringa datu analizēšanai. Autors izmantoja PYCWT skriptu (Sebastian et al., 2023), kurš ir brīvi pieejams, un tā implementācija seko Torrence and Compo (1998) un Liu et al. (2007) ieteikumiem, lai veiktu laika sēriju analīzi ar veivletu. Skripta parametru izvēle un datu ielasīšana ir veikta atbilstoši PYCWT dokumentācijai. Veivletu transformācijai ir nepieciešama regulāra (nepārtraukta) datu sērija, tā kā novērojumi nav veikti ar regulāriem intervāliem, ir nepieciešama datu pārlasīšana. Minētajiem nolūkam izmantojām lineāro interpolācijas funkciju interp1d no SciPY (Virtanen et al., 2020). Izmantojot lineāro funkciju, pārlasītajai datu kopai, tika noņemta tendence un veikta normalizācija, izmantojot tās standartnovirzi. Izmantojot globālo veivleta spektru kopā ar FFT un Lomb-Scargle periodogramu (Scargle, 1982), veicām periodisku signālu meklēšanu iegūtajās māzeru plūsmu izmaiņu laika sērijās.

Skripts izveido attēlu (kā piemēru skatīt attēlu 22.) ar trīs paneļiem, kur a) panelī ir parādīti sākotnējie dati (sarkanie punkti) kopā ar pārlasītajiem datiem (melnā līnija). Savukārt b) panelis parāda laika sērijas Morleta veivleta jaudas spektru. X ass attēlo laiku, Y ass – periodu, bet krāsa norāda jaudu vai spēku signāla komponentei ar noteiktu frekvenci konkrētajā laika brīdī (Torrence and Compo, 1998). Intensīvāka krāsa norāda uz būtiskāku konkrētās frekvences klātbūtni laika sērijā konkrētā laika momentā. Izsvītrotais apgabals norāda uz frekvenču un laika kombinācijām, kas izjūt robež-efektu, sauktu arī par ietekmes konusu. Visbeidzot c) panelis attēlo kopējo veivleta intensitātes spektru, kas raksturo konkrētās frekvences klātbūtni visā laika sērijas periodā, kopā ar FFT spektru un Lomb-Scargle periodiogramu. Šeit arī tiek parādīts 95% pārliecības līmenis, kas norāda uz jaudas līmeni, ko jāsasniedz veveleta, FFT un Lomb-Scargle spektriem, lai periodisku signālu uzskatītu par konstatētu. Ievērojiet, ka Y asis b) un c) paneļiem ir ar logaritmisko skalu. Tika uzskatīts, ka laika sērija ir periodisks signāls, ja veivleta kopējās intensitātes spektrs un Lomb-Scargle periodiograma, norāda uz kopēju periodu un tas ir virs 95% pārliecības līmeņa.

### 3.2.7 Secinājumi

Izstrādātā metodika māzeru un citu līniju novērojumiem ir adaptīva un robusta. Tās pamatā ir frekvences nobīdes algoritms, kas, pēc autora zināšanām, tiek uzskatīts par šobrīd pasaulē labāko. Izstrādātā sistēma ļauj izvēlēties: novērojuma ilgumu, joslas platuma un spektrālo izšķirtspēju. Datu reducēšanas programmu nodrošinājums ir brīvi pieejams. Irbenes radioteleskopu vidējā amplitūdas kļūda ir relatīvi augsta, bet tam pamatā nav nozīmīgas nepilnības metodēs vai apertūra, bet gan izaicinājumi, kas saistās ar ilgstošiem novērojumiem nelabvēlīgiem laikapstākļiem.

### 3.2.8 Autora ieguldījums

Sagatavot teleskopus darbam ar jaunu novērošanas metodiku ir darbietilpīgs process, kas nav pa spēkam vienam cilvēkam. Šajā procesā bija iesaistīti: Mācis Bleiders, Artūrs Orbidāns un Jānis Šteinbergs, kuri sniedza būtisku ieguldījumu. Mārcis Bleiders uzturēja un kalibrēja abu teleskopu elektroniku tehniskā kārtībā, kā arī būtiski palīdzēja pie metodikas ieviešanas. Artūrs Orbidāns uzturēja observatorijas datortīklus un kontroles datorus. Viņa pārziņā bija novērojumu praktiskās norises automatizācija un ģenerēto datu pārvalde. Jānis Šetinbergs veica lielāko daļu no praktiskās MDPS programmēšanas un uzturēja tās repozitoriju. Autors formulēja datu iegūšanas algoritmu, izvēlējās piemērotāko kalibrēšanās algoritmu, veica kvalitātes testus un datu apstrādes procesu. Kā arī izstrādāja skriptu prototipus un rezultātu apkopošanas algoritmus.

# 4 Metanolu māzeru monitorings

### 4.1 Ievads

Viena no būtiskākajām Ventspils Starptautiska Radioastronomijas Centra zinātniskajām aktivitātēm ir metanola māzeru monitorēšana. Kā jau norādīts iepriekš, šie objekti ir cieši saitīti ar masīvu zvaigžņu veidošanos, kas mūsdienās joprojām ir aktīvs astronomijas pētījumu virziens.

Arvien vairāk māzerus izmanto kā rīku, lai ielūkotos procesos, kas veido lielas masas zvaigznes. Lai gan atsevišķa objekta padziļinātai izpētei ir nepieciešami interferometra dati, būtisku informāciju par evolūciju sniedz arī avotu spektru izmaiņas laikā. Kombinējot šo informāciju ir iespējams gūt pilnīgāku priekšstatu par dinamiskajiem procesiem masīvu zvaigžņu veidošanās laikā. Autors atzīmē, ka, starojuma izkliedes dēļ, infrasarkanajos staros avoti ir maz mainīgi, to starojums reti kad svārstās vairāk par divām magnitūdām.

Pēc abu teleskopu rekonstrukcijas tika uzsākts regulāru metanola māzeru monitorēšanas programmu. Savos pētījumos fokusējos uz 42 avotiem, ko regulāri novērojam jau kopš 2017. gada marta. Būtiska ir arī piedalīšanās neformālajā māzeru monitorēšanas organizācijā (Maser Monitoring Organizatio), kas tika izveidota Starptautiskās Astronomijas Savienības (IAU) 336. simpozija laikā.

Rezultāti, kas apkopoti šai nodaļā ir publicēti Monthly Notices of the Royal Astronomical Society žurnālam: A Aberfelds, J Šteinbergs, I Shmeld, Five years of 6.7 GHz methanol maser monitoring with Irbene radio telescopes. Dažu atlasīto avotu monitoringa rezultāti ir publicēti: Svetlana V Salii, Igor I Zinchenko, Sheng-Yuan Liu, Andrej M Sobolev, Artis Aberfelds, Yu-Nung Su, The methanol emission in the J1– J0 A–+ line series as a tracer of specific physical conditions in high-mass star-forming regions, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 512, Issue 3, May 2022.

### 4.2 Monitoringa programma

Atlasot avotus, tika balstīts uz uz sekojošiem kritērijiem: avota deklinācijai jābūt virs -10°, lai vismaz reizi dienā tā pozīcija būtu gana augstu virs horizonta kvalitatīvai novērošanai, plūsmas blīvums virs 3 Jy, lai konstatētu tā starojumu pieņemamā laika intervālā. Avoti tika atlasīti no Toruņas metanolu māzera kataloga Szymczak et al., 2012. Vairums no atlasītajiem avotiem jau ir pētīti, kas ļauj salīdzināt mūsu rezultātus ar literatūrā atrodamajiem. Balstoties uz nepieciešamo laiku apstrādāt un analizēt iegūtos mērījumus, tiek secināts, ka produktīvam darbam, vienam pētniekam pa spēkam ir sekot 40 – 50 avotam. Visu monitorēto avotu nosaukumi un koordinātes ir apkopotas tabulā 3. Vairums no tiem jau ir novēroti kopš 2017. gada pavasara, bet daži pievienoti vēlāk, pārsvarā reaģējot uz avota aktivitāti, apmainoties ar informāciju māzeru monitoringa organizācijas ietvaros. Katrs avots tika novērots ar 3 līdz 5 dienu intervālu, bet situācijās, kad plūsmas blīvums mainās strauji – katru dienu.

### 4.3 Novērojumi

Novērojumu metodiku jau aplūkojām iepriekšējā nodaļā. Šeit uzmanību vērsīšu uz to plānošanu un norisi. Tā kā pētāmie māzeri ir atrodami masīvo zvaigžņu veidošanas rajonos un tie atrodas Galaktikas plaknē, tās redzamība arī nosaka piemērotāko diennakts laiku novērojumu veikšanai. Zemes orbitālās kustības dēļ šis laiks pakāpeniski mainās. Avota pozīcijai pie debesīm ir iespējams ērti sekot, izmantojot vienkāršu datorprogrammu, kas attēlo avota elavācijas leņķi atkarībā no laika. Avotam ar zemu deklināciju labvēlīgs novērojumu laiks ir samērā īss, tādējādi ierobežojot sesijai piemēroto laiku.

Praksē novērojumus un piemērotā laika atrašanu veic teleskopu operatori, balstoties uz atlasīto avotu skaitu un tiem avotiem, ko vēlamies novērot katru dienu. Nedēļā novērojumiem

Tabula 3: Sarak	sts ar regulā	ri novērotiem 6.7 GH	z metanola m	āzeriem.	Avota nosaukı	ımi ir
atvasināti no to (	Galaktiskajār	n koordinātēm. Norāc	lītās avota koc	rdinātes u	un tā radiālais ā	trums
V <sub>lsr</sub> (lokālā mier	a stāvokļa si	stēmā).				
-		$\mathbf{D} + (\mathbf{I} \mathbf{O} \mathbf{O} \mathbf{O})$	$\mathbf{D}$ ( <b>IO</b> OO)	* 7		

Avots	RA(J2000)	Dec(J2000)	V <sub>lsr</sub>
	(h m s)	(° ' '')	$({\rm km}~{\rm s}^{-1})$
G22.357+0.066	18 31 44.12	-09 22 12.3	79.4
G24.33+0.14	18 35 08.09	-07 35 03.6	112.0
G25.709+0.044	18 38 03.15	-06 24 14.9	95.5
G25.64+1.05	18 34 21.99	-05 59 38.6	41.0
G30.99-0.08	18 48 10.80	-01 45 39.3	77.8
G32.04+0.06	18 49 36.6	-00 45 45.6	92.7
G32.744-0.076	18 51 21.87	-00 12 05.3	35.0
G33.641-0.228	18 53 32.56	00 31 39.2	60.0
G35.20-1.74	19 01 46.90	01 13 07.5	44.0
G34.396+0.222	18 53 18.00	01 25 24.55	60.0
G36.705+0.096	18 57 59.123	03 24 06.11	62.2
G37.479-0.105	19 00 07.14	03 59 53.3	59.1
G37.43+01.51	18 54 14.23	04 41 41.1	41.3
G37.55+0.20	18 59 09.986	04 12 15.6	85.0
G43.149+0.013	19 10 11.05	09 05 20.4	15.0
G43.796-0.12	19 11 54.016	09 35 49.46	40.0
G45.071+0.132	19 13 22.129	10 50 53.11	57.8
G49.04-1.08	19 25 22.30	13 47 20.1	37.1
G196.454-01.677	06 14 37.03	13 49 36.6	14.7
G49.490-0.388	19 23 43.96	14 30 35.0	57.9
G192.60-0.05	06 12 54.02	17 59 23.3	6.5
G189.030+0.784	06 08 40.67	21 31 06.9	9.6
G59.783+0.065	19 43 11.25	23 44 03.3	19.5
G69.540-0.976	20 10 09.074	31 31 35.95	7.5
G174.20-0.08	05 30 48.01	33 47 54.6	3.5
G173.482+2.446	05 39 13.06	35 45 51.3	-12.0
G73.06+1.80	20 08 10.20	35 59 23.7	6.1
G75.782+0.34	20 21 44.20	37 26 36.7	-0.5
G78.122+3.633	20 14 25.88	41 13 36.87	-6.5
G81.88+0.78	20 38 36.45	42 37 36.1	5.5
G188.95+0.89	06 08 53.34	42 37 36.1	10.5
G85.411+0.002	20 54 13.689	44 54 07.686	-29.4
G90.92+1.49	21 09 12.60	50 01 02.9	-69.2
G94.602-1.796	21 39 58.26	50 14 20.9	-43.0
G123.066-6.309	00 52 24.20	56 33 43.2	-31.0
G111.26-0.77	23 16 10.00	59 55 31.3	-37.0
G111.542+0.777	23 13 45.36	61 28 10.6	-56.2
G133.947+1.064	02 27 03.82	61 52 25.4	-43.0
G109.871+2.114	22 56 17.90	62 01 49.7	-3.5
G121.298+0.659	00 36 47.35	63 29 02.2	-25.8
G107.298+5.639	22 21 26.81	63 51 37.14	-8.5
G108.184+5.519	22 28 51.41	64 13 41.3	-11.0

tiek izmantotas aptuveni 14 – 17 stundas, jeb atbilstoši 800 – 1200 stundas gadā, un aptuveni 6000 stundas kopā no programmas sākšanas līdz 2023. gada augustam. Vairums novērojumu (ap 97%) ir veikti ar RT–16, pārsvarā tāpēc, ka RT–32 joprojām tiek modernizēts. Autors ir novērtējis, ka aptuveni 85% no veiktajiem novērojumiem tika veikti pareizi un ir izmantojami pētījumos.

# 4.4 Rezultāti

Katra avota individuālo novērojumu spektru kolekcija veido tā plūsmas blīvuma laika sēriju. Ilglaicīgu plūsmas izmaiņu laika sēriju iegūšana ir nozīmīgs monitoringa kampaņas rezultāts, avotam ir vairākas spektrālās līnijas, kuras tiek reģistrētas atsevišķi. Katras spektrālās komponentes amplitūdas mērījums tiek veikts tās maksimumā. Atlasītajiem avotiem mainīguma parametri ir apkopoti Tabulā 4., bet visiem avotiem tā ir pieejama pielikumā (Tabulā 12). Ar  $V_P(\text{km s}^{-1})$  tiek apzīmēts spektrālās līnijas radiālais ātrums attiecība pret LSR,  $S_P(Jy)$  spektrālās komponentes plūsmas blīvuma mediāna, VI un FI – mainīguma un fluktuāciju indeksi,  $\chi_r^2$  parametrs. MJD<sub>s</sub> novērojumu sākumu diena norādīta norādīta Modificētajās Juliāna dienās (dienu skaits kopš 1858. gada 17. novembra),  $T_s$  gaismas līknes ilgums – gados, N - novērojumu skaits,  $C(month^{-1})$  vidējais novērojumu biežums mēnesī.

### 4.4.1 Statistika

Iegūtās vidējās vērtības parametriem, kas apraksta avota mainīgumu, ir sekojošas mainīguma indeksam 0.33 fluktuāciju indeksam 0.54 un  $\chi_r^2$  parametra 4.66. Augstākā konstatētā mainīguma indeksa vērtība ir 0.99, vienai no G107.298+5.63 komponentei, līdzīgi cita šīs avota komponente bija ar augstāko fluktuāciju indeksu 6.76 un  $\chi_r^2$  parametra vērtību (308). Tas norāda, ka periodiski uzliesmojošais – G107.298+5.63 ir mainīgākais avots autora sarakstā. Vairums mainīgo avotu, kuriem mainīguma indekss ir lielāks par 0.5 (*VI* > 0.5), ir zems plūsmas blīvuma (S<sub>P</sub><10 Jy), skatīt 7. attēlu. Līdzīgas attiecības ir arī starp avota plūsmu un fluktuāciju indeksu (Attēls 8.) un  $\chi_r^2$  parametru (Attēls 9.). Mainīguma indeksa un fluktuāciju indeksa salīdzinājums attēlā 10. norāda, ka vismainīgākās līnijas ir ar vislielāko fluktuāciju amplitūdu.  $\chi_r^2$  parametra saistība ar mainīguma indeksu un ar fluktuāciju indeksu (Attēli 11. un 12) norāda uz lineāri – eksponenciālu sakarību ( $\chi_r^2$  vērtības ir attēlotas logaritmiskajā skalā).

### 4.4.2 EVN novērojumiem atlasīto avotu mainīgums

Kā jau norādīts iepriekš, visu avotu mainīguma statistiskās vērtības ir apkopotas tabulās 4. un 12. Turpmāk tiks aplūkots trīs avotu mainīgumu, ko atlasījām padziļinātam pētījumam, kurā tika izmantots EVN (Attēli 13., 14. un 15.).



Att. 7: Spektra komponenšu vidējā starojuma plūsmas blīvuma (S<sub>P</sub>) attiecība pret mainīguma indeksu (VI). Sarkanie apļi norāda uz mainīgām komponentēm (VI > 0.5), zilie maz-mainīgiem. Piezīme, avota plūsma rādīta logaritmiskā skalā.



Att. 8: Spektra komponenšu vidējā starojuma plūsmas blīvuma (S<sub>P</sub>) attiecība pret fluktuāciju indeksu (*FI*). Sarkanie apļi norāda uz mainīgām komponentēm (*VI* > 0.5), zilie maz-mainīgiem. Piezīme, avota plūsma rādīta logaritmiskā skalā.



Att. 9: Spektra komponenšu vidējā starojuma plūsmas blīvuma (S<sub>P</sub>) attiecība pret ( $\chi_r^2$ ) parametru. Piezīme, avota plūsma rādīta logaritmiskā skalā.



Att. 10: Mainīguma indeksa vērtības (VI) salīdzinājums ar fluktuāciju indeksu (FI).



Att. 11: Komponenšu mainīguma indeksu salīdzinājums ar  $\chi_r^2$  parametru. Piezīme, grafika vertikāla ass ir ar logaritmisko skalo.



Att. 12: Komponenšu fluktuāciju indeksu salīdzinājums ar  $\chi_r^2$  parametru. Ievērot, grafika vertikāla ass ir ar logaritmisko skalo.

Tabula 4: Iegūto māzeru mainīguma laika sēriju statistikas parametri, pilna tabula apskatāma pielikumā (tabulā 12.).

$V_P(\text{km s}^{-1})$	$S_P(Jy)$	VI	FI	$\chi^2_r$					
G33.641-0.22	28 (MJD <sub>s</sub>	=5782	$T_{s} = 5$	5.707,					
N=1136, C(n	$ionth^{-1})$ =	=16.586	6)						
59.3	18.78	0.83	1.05	17.86					
59.6	15.40	0.73	0.77	2.18					
60.3	161.73	0.21	0.50	2.66					
61.0	49.98	0.49	0.65	4.56					
62.7	18.39	0.32	0.18	0.56					
63.2	15.21	0.39	0.16	0.28					
G78.122+3.6	33 (MJD	s=5783	$2 T_{s} = 3$	5.549,					
N=882, C(ma	$pnth^{-1}) = 1$	13.247)							
-6.1	27.70	0.24	0.20	0.61					
-6.7	29.15	0.74	0.67	11.66					
-7.0	18.42	0.62	0.64	4.87					
-7.7	24.06	0.97	2.48	65.51					
$G90.925+1.486 (MJD_s=57885 T_s=5.379,$									
N=305, C(ma	$pnth^{-1}) = 4$	4.725)							
-69.2	61.49	0.36	0.44	3.99					
-70.4	29.79	0.37	0.39	1.60					
G94.602-1.79	96 (MJD <sub>s</sub>	=58027	$7 T_{s} = 4$	.996,					
N=351, C(ma	$onth^{-1})=$	5.854)							
-40.9	5.30	0.14	0.45	0.68					
-43.0	2.88	0.73	0.26	0.43					
-43.7	3.74	0.43	0.47	0.59					
G107.298+5.	639 (MJI	$D_{s} = 582$	$98 T_{s} =$	4.285,					
N=1823, C(n)	$nonth^{-1})$ =	=35.452	2)						
-16.7	1.71	0.91	3.09	1.96					
-11.0	1.53	0.61	0.81	1.10					
-9.2	7.46	0.98	6.76	23.56					
-8.6	4.30	0.88	1.76	8.21					
G192.60-0.03	$5 (MJD_s =$	57856	$T_{s} = 5.4$	476,					
N=368, C(ma	$(nth^{-1}) = (1 + 1)^{-1}$	5.600)							
2.3	7.47	0.92	2.52	8.66					
4.2	7.19	0.67	0.78	1.68					
4.8	15.75	0.63	0.74	2.52					
5.9	176.91	0.37	0.52	3.07					
6.3	161.27	0.81	1.59	17.11					
7.5	4.48	0.97	4.24	6.27					



Att. 13: Spektri un gaismas līknes avotam: G78.122+3.633. Kreisajā panelī: parādītas trīs starojuma blīvuma līmeņi: oranžs - maksimālais, zaļš vidējs (izraudzīts avota novērojums, kas labi ataino tipisku starojuma intensitāti) un zils - minimālais. Labajā panelī: atlasīto komponēšu mainīguma laika sērijas, atvērtie punkti norāda datu punktus, kas iegūti ar RT-32; aizpildītie ar RT-16. Tipiska novērojumu kļūda parādīta pie pirmā datu punkta. Vertikālā fuksīna (magenta) līnija norāda uz EVN novērojumu laika momentu.








**G78.122+3.633.** Visas komponentes izņemot -6.1 km s<sup>-1</sup> piecu gadu periodā mainās būtiski (Attēls 13.). Jāizceļ -7.7 km s<sup>-1</sup> komponente, kas sāknēji bija ar 30 Jy intensitāti, bet ~1.5 gadu laikā zaudēja intensitāti un 1.6 gadus tā nepārsniedza trokšņu līmeni (~ 1.5 Jy), tad pusotrā gadā pieauga līdz 120 Jy (apskatītā perioda beigās). Parējās komponentes ir ar ļoti līdzīgu mainīguma profilu. Veicot novērojumus katru dienu, tika atklātas šī avota fluktuācijas ar faktoru 0.7 – 3.5, kuru ilgums svārstās no 9 līdz 40 dienām, kas pārklājas ar ilgtermiņa plūsmas pieaugumu. Šīs relatīvi straujās fluktuācijas ir sinhronas ar precizitāti līdz 3–4 dienām. Lomb-Scarg (Scargle, 1982) periodiagramma gan neuzrādīja nevienu statistiski nozīmīgu periodu šīm fluktuācijām (pārliecība par signāla *"īstumu"* virs 95 %).

G90.925+1.486. Divas galvenās avota līnijas ir sinhroni mainīgas (Attēls 14.). Ap 58250 MJD vērojams neliels uzliesmojums, kad 58 dienās plūsma pieauga divkārt, diemžēl pilnu izmaiņu profilu nevarēja iegūt novērojumu pārtraukumu dēļ. Avota plūsma atgriezās sākotnējā līmenī 7.5 mēnešu laikā. Visbeidzot, sākot ar 58570 MJD avota plūsma ir samazinājusies 1.5 reizes pēdējo 3 gadu laikā.

**G94.602**–**1.796.** Avots nav nozīmīgi mainījies monitoringa perioda laikā (novērotā mainība ir zemāka par instrumentālo efektu kļūdām, skatīt 15. attēlu).

#### 4.4.3 Padziļināta trīs citu izceļamu avotu mainīguma pētījuma rezultāti

























Avots	Aptuvens Periods	Novēroto ciklu skaits	Mainīguma	Relatīvais	Atsauce
	dienas	cikli	diapazons (Jy)	Pieaugums (%)	
G22.357+0.066	170	9.2	11-37	240	Szymczak et al. (2011)
G32.04+0.06	57	11	108-200	90	Šis darbs
G33.641-0.228	500	4.4	5-55	100	Olech et al. (2019)
G33.641-0.228	115	7	40-95	130	Šis darbs
G37.55+0.20	250	5.2	3-13	330	Araya et al. (2010)
G73.06+1.80	123	5	4-14	250	Szymczak et al. (2015)
G192.60-0.05	235	5.5	60-120	100	Šis darbs
G196.454-01.67	110	7	5-32	600	Szymczak et al. (2017)
G107.298+5.63	34.4	43	*-250	$> 2.5  imes 10^4$	Szymczak et al. (2016)

Tabula 5: Periodisku mainīgu (ciklisku) avotu parametri

\* Avota plūsma regulāri pazeminājās zem uztveršanas sliekšņa.

**G107.298+5.639.** Ir periodiski uzliesmojošs avots, aktivitātes starplaikos, māzeru emisija ir zem uztveršanas sliekšņa (Attēls 16.). Tika pamanīti 43 šī avota uzliesmojumus, un, saskaņā ar perioda novērtējumu, tikai 2 uzliesmojumi ir izlaisti novērojumu pārtraukumu dēļ. Novērojumu biežums ir mainīgs, no vienam nedēļā līdz dažiem novērojumiem stundā. Kopumā šie rezultāti ļoti labi saskan ar Szymczak et al. (2016) iegūtajiem. Spektra komponente ar -7.4 km s<sup>-1</sup> radiālo ātrumu vienmēr ir pati spilgtākā, tās intensitāte var atšķirties desmit reižu dažādos uzliesmojumos. Starp komponentēm ir novērojama laika nobīde, kā piemēram, -8.6 km s<sup>-1</sup> komponente sasniedz savu maksimumu aptuveni 2.2 dienas pirms -7.4 un -9.2 km s<sup>-1</sup> komponentes (Attēlā 23.). Veivleta analīze -7.4 km s<sup>-1</sup> komponentei ir parādīta attēlā 22. (detalizētāku metodes aprakstu skat. 3.2.6). Tajā: panelis a) attēlo oriģinālos datus (sarkanie punkti), pārklātus ar vienmērīgi pārlasīto un normalizēto laika rindu, kas iegūta ar lineāro interpolāciju (melnā līnija). Panelis b) parāda Morleta Veivleta spektru un panelis c) akumulēto Morleta Veivleta intensitātes spektru, kopā ar FFT spektru un Lomb-Scargle periodiogrammu. Attēls 22. skaidri parāda augstas pārliecības 35 dienas perioda signālu, kas ļoti labi saskan ar Szymczak et al. (2016) rezultātu, norādot, ka veivleta analīzes rīks sniedz sagaidāmos rezultātus.

**G33.641-0.228.** Avotam raksturīga ir komplicēta mainība (Attēls 17.). Sākotnēji šis avots tika novērots reizi 4 dienās, bet sākot ar 58929 MJD izlēmām, ka ikdienas novērojumi būtu atbilstošāki straujā mainīguma pētīšanai. Komponentes ar 59.3 un 59.6 km s<sup>-1</sup> radiālo ātrumu ir savstarpēji korelētas un reizē anti-korelētas ar 62.7 un 63.2 km s<sup>-1</sup>. Monitoringa gaitā tika konstatēts virkni straujus un īslaicīgus 59.6 km s<sup>-1</sup> komponentes uzliesmojumus: 58153, 58167, 58601, 58895, 59015, 59103, 59170, 59216, 59241, 59264 MJD, par šādu avota īpašību ziņoja Fujisawa et al. (2014). Tika novēroti arī divi 61.0 km s<sup>-1</sup> līnijas uzliesmojumi: laikā no 58270 līdz 58371 un 59460 līdz 59550 MJD. Attēls 24. parāda konstatētās regularitātes laika sērijā.

**G192.60-0.05.** Zināms arī kā S255IR. Avots ieguva plašu ievērību tā masīvā uzliesmojuma laikā (Fujisawa et al. 2015 un Moscadelli et al. 2017). Autora veiktajā monitoringa programmas sākumā 2017. gada februārī, minētais uzliesmojums jau bija noslēguma fāzē, avota plūsmai strauji krītoties (Attēls 18.). Spilgtāko komponenšu (5.9 un 6.3 km s<sup>-1</sup>) plūsma kritās 6 reizes, tas turpinājās līdz 58325 – 58600 MJD, kad plūsma stabilizējās. Sākot ar 58600 MJD 6.3 km s<sup>-1</sup> komponentei, iespējams, parādījās daļēji regulāras svārstības (Attēls 25.). Veivleta spektrs parāda, ka fluktuāciju intervāls kļūst ilgāks, kas var skaidrot, atšķirību starp Lomb - Scargle un pārējo perioda analīzes algoritmu vērtībām (atbilstoši 170 un 235 dienas). Citas spektra komponentes neuzrāda šādas fluktuācijas. Līnija ar radiālo ātrumu 7.6 km s<sup>-1</sup> plūsma ap 58200 MJD nokrita zem jūtības sliekšņa. Savukārt ap 58000 MJD parādījās jauna komponente (2.3 km s<sup>-1</sup>).

## 4.5 Diskusija

Monitoringa programmas ietvaros autors ieguvu 42 6.7 GHz metanola māzeru avotu piecus gadus ilgas laika sērijas. Programmas ietveros jauni mainīguma veidi netika konstatēti, bet tika pamanīts, ka vairāki avoti ir mainījuši savu ierasto *"uzvedību"*. Kā piemēram, G78.122+3.633/IRAS



Att. 22: a) G107.298+5.639 -7.4 km s<sup>-1</sup> dati parādīti ar sarkaniem punktiem, pārklāti ar regulāri pārlasīto un normalizēto laika sēriju parādīta ar melno līniju. b) Morleta veivleta spektrs. c) Veivleta kopējās intensitātes spektrs, kopā ar nozīmības līmeni, papildus rādām arī Furjē spektru un Lomb - Scargle periodigramu.



Att. 23: Viena atsevišķa G107.298+5.639 uzliesmojuma piemērs, ar redzamu laika nobīdi starp spektra komponentēm. Rezultāts, iegūts izmantojot ļoti biežus, ik 15 minūtes, veiktus novērojumus.



Att. 24: Tā pati informācija, kas Attēlā 22., bet G33.641-0.22 61.0 km s<sup>-1</sup> līnijai.



Att. 25: Tā pati informācija, kas Attēlā 22., bet G192.60-0.05 6.3 km s<sup>-1</sup> līnijai. Piezīme, tikai dati, iegūti pēc 58600 MJD, tika izmantoti perioda noteikšanai.



Att. 26: Tā pati informācija, kas Attēlā 22., bet G32.04+0.06 92.7 km s<sup>-1</sup> līnijai. Piezīme, perioda noteikšanai tika izmantoti dati līdz 59500 MJD.

20126+410 pēc 500 dienām ar ļoti mazām spožuma izmaiņām strauji kļuva mainīgs. Vai arī otrādi G192.60-0.05/S255IR pēc uzliesmojuma – norima un pēdējos 4 gadus ir maz mainīgs avots. Avotu mainīguma tipi ir apkopoti tabulā 7. un aprakstīti sekojošajās rindkopās.

**Maz-mainīgs.** Avots tiek uzskatīts par maz-mainīgu, ja mainīguma indekss visām spektra komponentēm ir zem 0.25. Piezīme – G133.947+1.064/W3(OH) zemas intensitātes komponentes ar radiālo ātrumu -41.8 un -42.2 km s<sup>-1</sup>, ir būtiski saplūdušas un netika ņemtas vērā apkopojot datus. Šai kategorijai pieder 21 % no monitorētajiem avotiem.

**Vidēji mainīgs.** Ja avota vismainīgākās komponentes mainīguma indekss ir robežās starp 0.26 un 0.5, tad autors uzskata to par vidēji mainīgu. Šajā kategorijā ir 26% no izvēlētajiem avotiem.

**Ļoti mainīgs.** Avotu tiek klasificēts kā ļoti mainīgu, ja pat vienas komponentes mainīguma indekss ir virs 0.5. Šīs kritērijs izpildās 55% avotu.

Korelētas svārstības. Šajā kategorijā divas vai vairākas spektrālās līnijas uzrāda augstu un pozitīvu (virs 0.7) korelācijas koeficientu. Kategorijā ieskaitījām tikai nozīmīgi mainīgus avotus, kuru mainīguma indekss ir virs 0.2. Konstatējam, ka 19% avotu piemīt šis mainīguma tips.

Anti-korelācijas svārstības. Līdzīgi, ja tika konstatēta būtiska (zem -0.7) negatīva korelācija starp komponentēm. Piemēram, G33.641-0.228 līniju pāris ar radiālo ātrumu 59.6 un 59.3 km s<sup>-1</sup> ir anti-korelēts ar līnijām 63.2 un 62.7 km s<sup>-1</sup>. Tikai 7% avotu autors pamanīja šo mainīguma tipu.

**Ātruma pārbīde** ir situācijās, kad novērojama būtiska (>0.07 km s<sup>-1</sup>) līnijas radiālā ātruma izmaiņa. No atlasītajiem avotiem, šo tipu autors pamanīja tikai vienā piemērā: G121.298+0.659, skatīt attēlu 27.

**Periodisks.** Periodiskas svārstības tika konstatētas 19% atlasīto avotu. Periodisko avotu parametri ir apkopoti tabulā 5. Tajā tiek norādīts aptuvenais perioda ilgumu, novēroto ciklu skaitu, tipisku plūsmas izmaiņu diapazonu (no minimuma līdz maksimumam), relatīvo plūsmas pieaugumu no minimuma, kā arī tiek norādīta atsauce uz literatūras avotu, kur šī avota periodiskais

signāls pirmoreiz minēts.

**Augošs.** Ja 100 dienu intervālā avota plūsma monotoni pieaug vairāk kā par 50%, tad tas tiek klasificēts kā augošs. Plūsmas pieauguma tendence tika pamanīta tikai 7% avotu.

**Krītošs.** Līdzīgi, ja plūsmas krīt par vairāk kā 50% intervālā līdz 100 dienām, tad klasificējām to kā krītošu. 10% avoti no atlasītajiem būtiski zaudēja plūsmu. Kā arī autors ievēroja būtisku šo divu grupu pārklāšanos, kad šāda monotona spožuma augšana un krišana, laika gaitā tika novērota tām pašām komponentēm.

Uzliesmojošs. Kā jau minēts, uzliesmojums ir straujš māzera starojuma pieaugums. Ierosinām nosaukt spožuma pieaugumu par uzliesmojumu tad, ja māzera plūsmas blīvums pārsniedz slīdošo vidējo starojuma blīvumu un piecas tā standartnovirzes šajā laika posmā. Ja starojuma palielināšanās periods pārsniedz 25 dienas, tad to turpmāk klasificējam kā **ilgu uzliesmojumu**. Otrādi, ja blīvums atgriežas uz ierastajiem līmeņiem mazāk par 25 dienām, tad to klasificējam kā **īsu uzliesmojumu**. Ierasti pēc uzliesmojuma, avota plūsmas blīvums parasti atgriežas uz iepriekšējo līmeni, bet uzliesmojuma plūsmas pieauguma un krituma profili bieži ir nesimetriski, kā to norādīja Szymczak et al. (2017). Autors konstatēja uzliesmojuma aktivitāti 10 % atlasīto avotu.

Visbeidzot, tika ievērots, ka 3 avoti G59.783+0.065; G192.60-0.05 un G78.122+3.633, būtu jāklasificē dažādi, aplūkojot tikai daļu no iegūtajām monitoringa laika rindām, kas liecina par nozīmīgu uzvedības maiņu.

Goedhart et al. (2004) māzera līniju uzskatīja par nozīmīgi mainīgu, ja tā mainīguma indekss ir lielāks par 0.5, bet Szymczak et al. (2017) lietoja nedaudz citu pieeju, balstītu uz apgriezto varbūtību komponentei būt konstantai. Neraugoties uz to proporcija starp mainīgajiem un nemainīgajiem avotiem ir teju vienāda abos pētījumos (Szymczak et al., 2017). Tabulā 6. ir apkopti un salīdzināti monitoringu programmu parametri. Faktiski publicētajos materiālos aplūkotie monitoringu programmu periodi nepārklājas. Tomēr, ļoti ticams, ka visas monitoringu veicošās grupas to turpina darīt, un nākotnē būs iespējams salīdzināt un kombinēt iegūtos datus. Kā būtisku priekšrocību monitoringa programmai, izmantojot Irbenes kompleksu, var minēt ievērojami biežākus novērojumus. Autora pētījumā, 21 % no visiem avotiem var tik uzskatīt par maz mainīgiem, izmantojot iepriekš minēto kritēriju, un tas neatšķirās no 19% Goedhart et al. (2004) un 21% Szymczak et al. (2017) rezultātiem. Būtiskākā atšķirība ir ļoti mainīgo komponenšu īpatsvarā (Tabula 6.), bet tas ir skaidrojams ar avota atlases ietekmi. Primāri izvēlētie spožie avoti mēdz būt mazāk mainīgi (Szymczak et al., 2017). Kvantitatīvi mūsu rezultāti saskan ar Goedhart et al. (2004) un Szymczak et al. (2017).

Astoņi no novērotajiem avotiem ir ar periodiskām plūsmas fluktuācijām (Tabula 5.), vairums no tiem jau zināmi un ar norādēm literatūrā. Tika pamanīti trīs, iespējams, periodiskus signālus, kas nav minēti literatūrā, G192.60-0.05 -6.3 km s<sup>-1</sup> līnija (Attēli 18. un 25.), G32.04+0.06 92.7 km s<sup>-1</sup> komponentē (Attēli 20. un 26.), un G33.641-0.228 61.0 km s<sup>-1</sup> līnija (Attēli 17. un 24.). Jāatzīmē, ka norādītajos avotos periodiski mainās tikai viena spektra līnija, kas ir salīdzinoši retāk kā visu komponenšu periodiskas svārstības. Kā arī to relatīvais plūsmas pieaugums (par cik procentiem maksimuma plūsma pārsniedz minimuma) ir samērā mazāks par jau literatūrā zināmajiem periodiskajiem avotiem, kas varētu liecināt, ka biežāki plūsmas mērījumi, kombinācijā ar veikto perioda analīzi (veivleta analīzi, Lomb - Scargle periodigramu un Furjē spektru), var atklāt vājākus periodiskus signālus māzeru plūsmas izmaiņu laika sērijās. Ilgākais no novērotajiem periodiem ir 500 dienas (G33.641-0.228), lai gan literatūrā ir informācija par ilgākiem G33.641-0.228; G196.454-01.67 un G188.95+0.89/S252 (Goedhart et al. 2004; Olech et al. 2019) periodiem, iegūtajās laika sērijas, ar pārliecību, ilgāki periodi netika konstatēti. Īsākais periods ir G107.298+5.639 un tas ir 34.4 dienas (Attēls 22.). Avoti, kam novērojama pārmaiņus augoša un krītoša plūsmas izmaiņa, iespējams, ilgākā laika periodā var izrādīties periodiski, bet, lai šo hipotēzi apstiprinātu, jāiegūst ilgākas avotu plūsmas izmaiņu laika rindas.

Uzliesmojumi tika novēroti 10% atlasīto avotu, visi jau ar literatūras norādēm par zinā-

	[1]	[2]	[3]	Šis pētījums
Monitoringa programmas sākums	Jan 1999	Jun 2009	Dec 2012	Mar 2017
Apskatītā perioda beigas	Mar 2003	Feb 2013	Nov 2016	Oct 2022
Apskatītais laika periods (g)	4.2	3.7	3.9	5.3
Avotu skaits	54	137	442	42
Kopējais avotu īpatsvars pret mūsu (%)	24	90	97	-
Vidējais novērojumu biežums (mēnesī)	2-4	1	6-8	6.5
Periodisko avotu īpatsvars (%)	13	7	10	19
Ļoti mainīgo komentēšu īpatsvars (%)	55	54	*	28
Maz mainīgo avotu īpatsvars (%)	19	21	*	21
* Ne	ezināma vērtī	ība		

Tabula 6: Salīdzinājums ar Goedhart et al. (2004) [1]; Szymczak et al. (2017) [2] un Sugiyama et al. (2019) [3] pētījumiem.



Att. 27: G121.298+0.659 dinamiskais spektrs, ilustrējot ātruma pārbīdi.

miem uzliesmojumiem. G33.641-0.22 dominējoši mainās atbilstoši jau zināmajām tendencēm, 61.0 km s<sup>-1</sup> līnija divas reizes būtiski uzliesmoja (Attēls 17.). Straujie un intensīvie 59.6 km s<sup>-1</sup> līnijas uzliesmojumi turpinājās visu monitoringa programmas laiku, lai gan to intensitāte un biežums, šķiet, zemāks par norādīto Fujisawa et al. (2014). Katru dienu tika veikti G24.329+0.144 novērojumi tā uzliesmojuma laikā (to pirmais pamanīja Wolak et al. 2019). Uzliesmojuma laikā visu komponenšu plūsma pieauga 3 līdz 10 reižu (Attēls 19.). Līdzīgs uzliesmojums tika pamanīts 8 gadus iepriekš (Szymczak et al., 2017), tādējādi G24.329+0.144, atbilstoši mūsu zināšanai, ir pirmais avots, kuram atkārtojas spēcīgs un ilglaicīgs uzliesmojums. Teju visiem uzliesmojušiem un periodiski mainīgiem avotiem ir novērojamas laika nobīdes starp dažādu spektra komponenšu minimumu un maksimumu laikiem. Šī parādība vislabāk ilustrēta ir attēlos 23. un 16.

Tikai vienam avotam G121.298+0.659 tika novērota pamanāma kādas spektra komponentes ātrumu pārbīde (Attēls 27.). Spektra komponente ar sākotnējo radiālo ātrumu -25.8 km s<sup>-1</sup> tuvojās (driftēja) pretim -24.9 km s<sup>-1</sup> līnijai un saplūda ar to. Process ilga aptuveni 500 dienas, bet plūsmas blīvums saplūšanas rezultātā pieauga tikai par 30 - 50%. Tas varētu liecināt, ka novērojām tikai plūsmas summēšanos no diviem māzeru mezgliem, bet ne māzeru pastiprināšanos, tiem nonākot uz vienas optiskās ass, kā tas, piemēram, tika novērots Orion KL gadījumā (Shimoikura et al., 2005).

Visi mainīgumu aprakstošie statistiskie parametri (mainīguma indekss, fluktuāciju indekss, un reducētais  $\chi_r^2$  parametrs) uzrāda pozitīvu korelāciju (skatīt 4.4.1). Avota plūsmas blīvums ir negatīvi korelēts ar šiem mainīguma statistikas parametriem, citiem vārdiem, spožākie avoti ir mazāk mainīgi. Šāds rezultāts bija gaidāms un labi saskan ar Szymczak et al. (2017). Novērotās spožuma maiņas tendences un to amplitūdas, aptuveni vienādi bieži ir kopējas visām avota komponentēm, vai arī katra atsevišķa avota spektra komponente mainās neatkarīgi. Kopumā iegūtie māzeru mainīguma rezultāti (strauji mainīgas spektra komponentes ar nemainīgu radiālo ātrumu, laika nobīdēm starp dažādām komponentēm, faktiski nemainīgu konstatēto spektrālo

	rabula /. ramantic maniguna upi
Avots	Mainīguma tips
G22.357+0.066	Ļoti mainīgs; Korelētas svārstības; Periodisks
G24.33+0.14	Ļoti mainīgs; Ilgs uzliesmojums
G25.709+0.044	Maz-mainīgs
G25.64+1.05	Vidēji mainīgs
G30.99-0.08	Loti mainīgs
G32.04+0.06	Vidēji mainīgs; Periodisks
G32.744-0.076	Maz-mainīgs
G33.641-0.228	Loti mainīgs: Korelētas svārstības:
	Anti-korelācijas svārstības: Ātrs uzliesmojums: Periodisks
G35 20-1 74	Loti mainīgs: Korelētas svārstības: Krītošs
G34 396+0 222	Vidēji mainīgs
G36 705+0 096	Maz-mainīgs
G37 479-0 105	Maz-mainīgs
G37 43+01 51	Maz-mainīos
G37 55+0 20	Vidēji mainīgs: Korelētas svārstības: Periodisks
G43 149+0 013	Maz_mainīde
G43 796-0 17	Maz-mainīgs: Korelētas svāretības
G45 071+0 132	Maz_mainīge
G49.071+0.152 G49.04-1.08	I oti mainīgs
G106 454 01 677	Loti mainīgs: Korelātas svārstības: Pariodisks
C40 400 0 288	Ļoti mainīgs, Koleicias svaistības, i enotisks
G102 60 0 05	Loti mainīgs: Poriodiska
C192.00-0.03	Ļou maings, renouisks
$C_{50}$ 782 + 0.065	Ļou mainīgs Lati mainīga: Augača: Krītača:
039.783+0.003	Ļou maings, Augoss, Kinoss,
C 60 540 0 076	Anti-Kolelacijas svalstibas
G09.340-0.976	videji mainigs
G1/4.20-0.08	Ļoti mainigs; Kritoss
G1/3.482+2.440	
$U/3.00 \pm 1.80$	Ļou mainigs; Periodisks
$U/3./82 \pm 0.34$	Ļon mainigs
U/8.122+3.033	Ļoti mainigs; Augoss; Koreletas svarstibas
U81.88+0.78	videji mainigs
G188.95+0.89	Ļoti mainigs
G85.411+0.002	Videji mainigs; ligs uzliesmojums
G90.92+1.49	Vidēji mainīgs
G94.602-1.796	Ļoti mainīgs
G123.066-6.309	Ļoti mainīgs
G111.26-0.77	Ļoti mainīgs
G111.542+0.777	Vidēji mainīgs
G133.947+1.064	Maz-mainīgs
G109.871+2.114	Ļoti mainīgs; Korelētas svārstības;
	Anti-korelācijas svārstības
G121.298+0.659	Ļoti mainīgs; Augošs; Krītošs; Ātruma pārbīde
G107.298+5.639	Ļoti mainīgs; Ātrs uzliesmojums; Periodisks
G108.184+5.519	Ļoti mainīgs

līniju radiālo ātrumu) norāda, ka mūsu rezultāti ļoti labi saskan ar konsensus ideju, ka 6.7 GHz metanola māzeru mainīgumu izraisa izmaiņas ierosinošā starojuma intensitātē.

# 4.6 Secinājumi

Autors ieguva līdz pat piecus gadus ilgas 42 6.7 GHz metanola māzeru plūsmas izmaiņu laika sērijas. Vairums avotu spožuma izmaiņas sekoja jau zināmajām tendencēm, bet daži avoti to būtiski mainīja. Veidojot laika sēriju kopsavilkumu, iezīmējās dažas sistemātiskas novērojumu problēmas, kas būtiski samazina rezultātu precizitāti ziemas mēnešos (skatīt 3.2.5). Tika pamanītas trīs, literatūrā vēl neziņotas, avotu periodiskas svārstības. Savāktais materiāls ir būtisks, lai atlasītu avotus ar interesantām mainīguma tendencēm detalizētai pētīšanai un to novērojumu pieteikšanai, izmantojot interferometru tīklus.

# 4.7 Autora ieguldījums

Autors atlasīja programmā iekļautos avotus, iepazinās un apguva nepieciešamos literatūras avotus, izstrādāja un ieviesa datu iegūšanas metodiku, un veica būtisku daudzumu novērojumu, īpaši programmas pirmajos divos gados. Šo pienākumu vēlāk pārņēma teleskopu operatori, jo ieviešanas process bija noslēdzies, sistēma kopumā ir stabila – gatava citiem lietotājiem. Autora darba pienākumos ietilpa datu apstrāde un interpretācija. Sadarbībā ar Jāni Šteinbergu tika radītas datorprogrammas laika sēriju pārvaldei. Tika arī izveidotas datu attēlošanas un periodisku signālu meklēšanas skripti. Iegūtie rezultāti ir apkopoti un interpretēti un ir publicēti MNRAS žurnālā, autors ir šīs publikācijas pirmais un korespondējošais autors.

# 5 EVN novērojums

# 5.1 Ievads

Ar atsevišķu radioteleskopu iegūtie māzeru spektri ir kompozīcija no starojuma, kas ir nācis no dažādiem apgabaliem, bieži to radiālie ātrumi var būtiski pārklāties. Lai arī spektri un to monitorings sniedz būtisku informāciju par pētāmo avotu, tā struktūra, īpatnēja kustība un izmaiņas laika gaitā, nav nosakāmas tikai ar vienu teleskopu, kompakto izmēru dēļ.

Apkopojot monitoringa rezultātus, autors izraudzījās 3 avotus, kuru laika sērijas liecina par interesantiem procesiem, kā arī tie nav pēdējos gados novēroti ar radiointerferometriju. Avotu mainīguma mehānismus nevarēja noteikt tikai ar monitoringa palīdzību, to noteikšanai, ir nepieciešam arī struktūras analīze.

Rezultāti, kas prezentēti šajā nodaļā, ir publicēti A Aberfelds, A Bartkiewicz, M Szymczak, J Šteinbergs, G Surcis, A Kobak, M Durjasz, I Shmeld, Milliarcsecond structure and variability of methanol maser emission in three high-mass protostars, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 524, Issue 1, September 2023, Pages 599–618, stad1752

# 5.2 Pieteikums

Pētīšanai ar radiointerferometriju tika atlasīti trīs mainīgi avoti, kuri ir autora izstrādātās monitoringa programmas objekti un kuri nav nesen novēroti ar VLBI, un to savstarpējais leņķiskais attālums nav pārāk liels. Sadarbībā ar Nikolaja Kopernika Universitātes radioastronomijas departamenta zinātniekiem, tika izveidots pieteikums, lai šim nolūkam izmantotu EVN. Tika izraudzīti sekojoši avoti:

#### 1. G78.122+3.633

Plaši zināms arī ar nosaukumu IRAS 20126+4104. Centrā esošo ~ 7M<sub>☉</sub> B0.5 zvaigzni aptver iespaidīgs protoplanetārais disks (Cesaroni et al., 1997). Izmantojot VLBI metodes, Moscadelli et al. (2011) ziņoja par 22 GHz ūdens māzeru struktūru izplūdes plūsmās (džetos) un divām grupām 6.7 GHz metanola māzeru, kuru V<sub>LSR</sub> vērtības daļēji pārklājas (-4.5 līdz -8.5 km s<sup>-1</sup>). Balstoties uz īpatnējās kustības mērījumiem un magnētiskā lauka mērījumiem (Surcis et al., 2014), tika secināts, ka pirmā grupa atrodas uz disku krītošā gāzes plūsmā, bet otrā grupā diska un džeta mijiedarbības zonā. Jaunākie paralakses mērījumi ir 0.645±0.030 mas, kas atbilst 1.6<sup>+0.3</sup><sub>-0.12</sub> kpc distancei (Reid et al., 2019). Hu et al. (2016) pārskats liecina par metanola māzeru emisiju no −8.43 līdz −4.74 km s<sup>-1</sup>, izvietotu 0.36"×0.25" bez ievērojamām regularitātēm, bet būtiski, ka netika konstatēta termiskā starojuma plūsma.

## 2. **G90.925**+1.486

Šo metanola māzera avotu 2000. gadā atklāja Szymczak et al. (2000). BeSSeL debess pārskatā tika noteikta šī objekta paralakse  $0.171\pm0.031$  mas, atbilstoši  $5.9^{+1.3}_{-0.9}$  kpc distancei (Reid et al., 2019). Izmantojot JVLA (Hu et al., 2016), 6.7 GHz māzera emisija tika konstatēta  $0.4^{"}\times0.5^{"}$  plašā apgabalā, no -71.5 līdz -68.31 km s<sup>-1</sup>. Ir ievērojams ātruma gradients no dienvidrietumiem uz ziemeļaustrumiem. Tika konstatēts radio termiskais starojums ar intensitāti 0.63 Jy, aptuveni 0.15" uz dienvid-austrumiem no māzeru pozīcijas.

## 3. G94.602-1.796

Pazīstams arī kā V645 Cyg un AFGL2789. Tas ir agrīnas evolūcijas objekts, kura centrā ir O7 spektra klases zvaigzne (Cohen, 1977), ar optiski ievērojamu gāzes plūsmu (Clarke

et al., 2006). Trigonometriskā paralakse ir  $0.221\pm0.013$  mas, atbilstoša  $4.5^{+0.3}_{-0.2}$  kpc attālumam (Reid et al., 2019). Val'tts et al. (2002), novēroja šo avotu ar EVN 1998. un 2000. gadā ar 5 teleskopiem. Viņu attēli liecina par 4 māzeru grupām un iespējamu indikāciju diska rotācijai. JVLA rezultāti (Hu et al., 2016) liecina par māzeru emisiju no -44.08 līdz -40.39 km s<sup>-1</sup> VLSR, izvietotu  $0.10^{\circ} \times 0.22^{\circ}$ , ar ziemeļu-dienvidi virzienā vērstu ātruma gradientu, kā arī ar radio termisko staroju ar intensitāti 0.42 Jy.

Pieteikums tika iesniegts 2019. gada 1. jūnija uzsaukumam ar piešķirto kodu: E19B010. Kopumā pieteicējiem ir atvēlētas septiņas lappuses komitejas pārliecināšanai, četras no tām atvēlot zinātniskajam pamatojumam, iekļaujot grafikus. No tehniskās puses, lielā mērā sekojām ierastajam māzeru novērojumu parametriem, atskaitot redzes lauku, ko prasījām četras reizes lielāku, jo, pieteikuma tapšanas laikā, G90.925+1.486 pozīcija nebija labi zināma. Izvērtējuma rezultāti bija zināmi tā paša gada augustā. Pieteikums guva 1.4 punktus EVN programmas komitejas vērtējumā (0 – augstas prioritātes, 3 – zemākās prioritātes). Tika atvēlētas visas prasītās 10 stundas uz pieejamajiem teleskopiem 2019. rudens sesijā. EVN plānojumā un arhīvā šo novērojumu var atrast ar programmas kodu: EA063.

## 5.3 Novērojuma plāns

Aptuveni divus mēnešus pirms 2019. gada rudens sesijas sākās detalizēta sesijas plānošana. Pirmkārt, jau EVN sesijas ir sadalītas frekvenču joslu blokos, jo ne visas observatorijas var lietot vairākas vienlaicīgi. Nākamais solis ir atrast piemērotu diennakts laiku novērojumam, ko nosaka avota redzamība. Vairums EVN radioteleskopu atrodas Eiropā, kas arī dominējoši nosaka laika izvēli, tomēr, piedaloties arī ģeogrāfiski tālu esošajām Tianmai (Ķīnas Tautas Republika) un Hartebeesthoek (Dienvidāfrikas Republika), ir nepieciešama optimizācija, lai pēc iespējas palielinātu periodu, kurā šīs observatorijas var piedalīties.

Tika izraudzītas diennaktī piemērotākās desmit stundas. Novērojuma pieteicējam, sadarbībā ar JIVE atbalsta zinātniekiem, kuri konsultē pieteicējus un nodrošina kvalitatīvu novērojumu plānu izstrādi, jāizstrādā detalizēts novērojumu plāns. Autora gadījumā, atbalstu nodrošināja Katrīna Immere (Katharina Immer). EVN mājas lapa satur gana detalizētas norādes principiem, kas jāievēro veiksmīgai novērojuma plānošanai, kā arī norādes uz noderīgām datubāzēm. Katram avotam ir jāatrod tuvs (ne tālāk par 2 grādiem) fāzes kalibrators. Lai to paveiktu, tika izmantots Astrogeo VLBI Kalibratoru Meklēšanas rīks<sup>11</sup>, un no piedāvātajiem kalibratoriem, ieteicams izvēlēties pēc iespējas tuvāku un pietiekoši spožu. Tika atlasīti sekojoši kalibratori: J2007+4029 attiecīgi priekš G78.122+3.633, J2114+4953 priekš G90.925+1.486 un J2007+4029 priekš G94.602–1.796. Fāzes kalibratori, ierasti ir kosmoloģiskas distances aktīvo galaktiku kodoli, kuru leņķiskie izmēri ir zem loka milisekundes. Bez šiem relatīvi vājajiem kalibratoriem, lai spētu atrast risinājumu datu korelēšanai, instrumentālai signālu aizkavei un blakus bandpass (frekvenču joslas pāreju) savienošanai, ir jānovēro viens vai vairāki spoži, bet kompakti avoti. Autora novērojumā izvēlējamies 3C345 – spožu kvazāru.

Pēc iepriekš minētās informācijas apkopošanas, nepieciešams veidot eksperimenta \*.key failu (Autora gadījumā ea063.key) – programmai saprotamu novērojama plānu. Lai arī *key* fails ir strikta formāta, bet teksta redaktorā labojams fails, tā pārveidošanai par teleskopu kontroles sekvencēm un arī ērtākai tā interpretācijai, tiek izmantota pySCHED<sup>12</sup> programma. Galvenā priekšrocība pySCHED, salīdzinājumā ar pagātnē lietoto SCHED, ir iespēja grafiski analizēt daudzus novērojuma plāna elementus. Balstoties uz laika sadales rekomendācijām starp mērķiem un kalibratoriem, tika nonākts pie sekojoša plāna: divas reizes novērojama laikā 10 minūtes novērojam 3C345, pavadām minūti un 45 sekundes novērojam kalibratoru, un trīs minūtes

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup>http://astrogeo.org/calib/search.html

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup>https://github.com/jive-vlbi/sched



Att. 28: EVN novērojuma (EA063) plāna shematisks attēlojums (ģenerēts ar pySCHED), parāda iesaistīto teleskopu pavadīto laiku mērķējot uz dažādiem avotiem.

un 15 sekundes – mērķi. Lai veiksmīgi kalibrētu datus, jāievēro princips: kalibrators – mērķis – kalibrators. Pēc iespējas salāgojot laiku starp avotiem, izveidojām plānu atbilstošu attēlā 28. redzamajam. Iespējams ir arī paredzēt UV plaknes aizpildījumu (Attēls 29.). Var ievērot, ka centrā ir blīvs pārklājums – Eiropā izvietoto teleskopu savstarpējas bāzes līnijas, un trīs grupas ar tālākām bāzes līnijām, starp Eiropu un Ķīnu, un Eiropu un Dienvidāfriku. Kā plānots, novērojums, tika veikts 2019. gada 31. oktobrī.

## 5.4 Datu apstrāde

Pēc EVN novērojumu sesijas seko dažu mēnešu ilgs periods no visām stacijām iegūto datu nodošanai (vairums pārsūta, izmantojot internetu, dažas fiziski sūta cieto disku pakas) JIVE (Joint Institute for VLBI ERIC), kas bāzēta Dwingeloo ciematā, Nīderlandē. Tur tiek veikta datu korelācija, izmantojot SFXC (Keimpema et al., 2015) korelātoru. Ierasti līniju novērojumiem, dati tiek korelēti divreiz: vispirms, izmantojot visas astoņas 4 MHz frekvenču joslas (jeb 200 km s<sup>-1</sup>) ar 128 kanāliem katrā joslā, lai nodrošinātu labu signāla trokšņu attiecību fāzes kalibratoriem, otrā reizē tikai joslu, kurā novērojamas māzeru starojums, ar 2048 kanāliem jeb 1.95 kHz uz kanālu (0.088 km s<sup>-1</sup>). Autora gadījumā, pēc korelācijas, pirmā datu grupa aizņem aptuveni 340 GB un otrā - 680 GB. Datus ir iespējams lejupielādēt, izmantojot JIVE arhīvu<sup>13</sup>. Izmantojot automatizētu pieeju, atbalsta zinātnieki, arī veic apriori datu inspekciju, kas iekļauj: slikto datu atzīmēšanu, plūsmas pastiprinājuma novērtējumu un frekvenču joslu kalibrāciju. Šie rezultāti ir iekļauti tā sauktajā novērojuma \**.tasav* tabulu failā.

Tā kā ne autoram, ne kolēģiem no VSRC nav pietiekoša pieredze apstrādāt VLBI datus, tika izmantota iespēja doties uz JIVE, un tur, atbalsta zinātnieku vadībā, apstrādāt novērojuma datus. Zināšanu iegūšanas komandējuma ilgums bija viena nedēļa, pēc kuras dati bija veiksmīgi apstrādāti un gatavi interpretēšanai.

Datu reducēšana notiek sekojot EVN vadlīnijām, kas pietiekoši detalizēti izklāstītas mājas lapā<sup>14</sup>. Katru atsevišķu datu apstrādes komandu ar AIPS netiks apskatīts šī darba ietvaros, bet

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup>http://archive.jive.nl/scripts/portal.php

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup>https://www.evlbi.org/evn-data-reduction-guide



Att. 29: EVN novērojuma (EA063) UV plaknes aizpildījums G78.122+3.633 avotam. Irbenes ieguldījums ir attēlots ar zilu līniju.

secīgi tiks raksturots process kopumā.

- 1. Datu ielasīšana ar AIPS jāielasa lejupielādētie dati un tasav faili.
- 2. Paralakses leņķa, joslu pāreju un atmetamo datu risinājumu pielietojums datiem.
- 3. Atmosfēras efektu koriģēšana, izmantojot jonosfēras datus.
- 4. Instrumentālas signāla aizkaves noņemšana, izmantojot spožāko kalibratoru.
- 5. Laikā mainīgu fizikālo aizkavju un amplitūdu izmaiņas koriģēšana.
- 6. Atrasto risinājumu pielietošana pašiem kalibratoriem un to interpolācija avota datiem.
- 7. Amplitūdas koriģēšana kanālos atkarībā no polarizācijas un frekvences (tikai māzeriem).
- 8. Konvertēšana no frekvences uz radiālo ātrumu (tikai māzeriem).
- 9. Datu sadalīšana un saglabāšana pa atsevišķiem avotiem rezultāts ir \*.fits fails.

Tālākie soļi principā vairs nav attiecināmi uz interferometrijas un apertūras sintēzes datu apstrādi, bet jau uz attēlu apstrādi. Termiskā starojuma avotam, kā, piemēram, kvazāram, sasummējam visus frekvenču kanālus kopā, lai iegūtu attēlu. Māzeru attēlu gadījumā rīkojas citādāk, tiek veidots atsevišķs attēls katram kanālam – principā iegūstot datu kubu, sava veida tomogrāfijas analogu.

Bieži interferometra attēlus var uzlabot ar paš-kalibrēšanas palīdzību, māzeru datiem, atrodot kanālu ar augstāko plūsmas blīvumu, manuāli vai ar kādas funkcijas palīdzību norāda uz, šķietami, īstajiem emisijas apgabaliem. Balstoties uz tā, tīrīšanas algoritms (CLEAN) iteratīvi mēģinās samazināt attēla artefaktu daudzumu. Uzkrāto artefaktu modeli piemēro, lai attīrītu pārējos kanālus.

Kopumā EA063 novērojums bija veiksmīgs, jo nebija jāatmet daudz datu, efektīvais uz avotiem vērstais laiks bija atbilstoši 135, 105 un 98 minūtes. Datu apstrādē kā references antenu izmantojām Effelsbergu. Sintezētā stara izmērs ir ap 4 mas  $\times$  3 mas, un tas ir vērsts -60° grādos. Tika izveidoti datu kubi ar izmēru 1024 px $\times$ 1024 px, pikseļu izmērs atbilstoši ir 1 loka milisekunde (mas). Attēlu trokšņu līmenis ir ap 3.8 mJy beam<sup>-1</sup>. Māzeru plankumu (angliski *spots*) parametru mērīšanai izmantojām AIPS rīku JMFIT, kas atbilstoši veic divdimensiju Gausa funkcijas piedzīšanu.

## 5.5 Rezultāti

Izmantojot EVN, tika iegūti trīs atlasīto objektu loka milisekunžu izšķirtspējas attēli. Avotu G90.925+1.486 un G94.602-1.796 šādas kvalitātes attēli tika iegūti pirmoreiz.

G78.122+3.633 attēlā tika pamanīti 98 māzeru plankumi, kas grupējās 14 mezglos (*cloudlets*). Tos definējam kā māzeru plankumu grupu, ar S/N > 10, kas atkārtojas vismaz trīs secīgos kanālos, un leņķiski tie nav tālāki par pusi no sintezētā stara platuma (Bartkiewicz et al., 2020). Māzeru mezglu parametri ir apkopoti Tabulā 8. Tajā dotas relatīvās koordinātes ΔRA, ΔDEC, no māzera plankuma ar LSR ātrumu  $-4.9 \text{ km s}^{-1}$  un pozīciju RA= $20^{h}14^{m}26.05839^{s}$ , Dec= $+41^{o}13'32.5278''$ (J2000). Šoreiz, kā reference netika izmantots spožākas plankums, jo tas vēlāk ļauj ērtāk salīdzināt rezultātus ar Moscadelli et al. (2011). Plankumu radiālā ātruma un intensitātes sakarība tika modelēta ar Gausa funkciju, ļaujot noteikt sekojošus parametrus: ar V<sub>fit</sub> tiek apzīmēta radiālā ātruma vērtību, kad funkcijas plūsma ir visaugstākā (S<sub>fit</sub>), kā arī tiek noteikts līnijas platums (FWHM). Māzeru mezgla lineārais izmērs (L<sub>proj</sub>) ir definēts kā lielākais attālums starp diviem māzeru plankumiem vienā mezglā. Ātruma gradients (Vgrad) tiek noteikts, ja tika novērota regulāra ātruma samazināšanās/palielināšanas mezgla struktūrā. To definē kā mezgla plankumu ar vislielāko radiālo ātrumu atšķirību, dalītu ar to lineāro distanci. V<sub>grad</sub> zīmi ir pieņemts atmest. Šī gradienta virzienu norāda pozīcijas leņķis (PA), ko nosaka mezgla plankuma izvietojumu galvenā ass, sākot no zilās uz sarkano nobīdītajiem plankumiem, ar austrumiem kā pozitīvo virzienu. Autors norāda, ka lineārajā regresijā ņem vērā plankumu plūsmas blīvumus. Visu mezglu vidējā FWHM vērtība ir  $0.31\pm0.02$  km s<sup>-1</sup>. Iegūto struktūru vislabāk reprezentē attēls 30. (pa kreisi), uzmanību jāpievērš arī augšējam panelim, kur salīdzināts EVN un RT-16 spektrs. Tika noteikts, ka EVN izmērītā plūsma ir par 57% zemāka. Māzeru emisija bija novērojama, radiālā ātrumu diapazonā no  $-4.77 \, \text{l} \, \text{d} \, z - 8.37 \, \text{km} \, \text{s}^{-1}$ , aizņemot 300 mas  $\times 160 \, \text{mas}$  debess apgabalu, kam atbilst 480 AU × 260 AU. Individuālo mezglu emisijas aizņem no 0.5 līdz 7 mas ar vidējo  $L_{\text{proj}} = 4.2\pm0.3$  AU. Savukārt ātruma gradients ir 0.05 līdz 0.45 km s<sup>-1</sup> AU<sup>-1</sup> robežas ar vidējo vērtību  $0.14\pm0.03$  kms AU<sup>-1</sup>. No visiem parametriem, tikai starp L<sub>proj</sub> un S<sub>fit</sub>, pastāv vidēji nozīmīga korelācija (r=0.596).

Attēlā 31. parādīta mezglu karte ar to ātruma gradientu virzieniem. Mezgli, ar relatīvi augstām (virs  $0.14 \text{ km s}^{-1} \text{ AU}^{-1}$ ) ātruma gradienta vērtībām, pārsvarā atrodas avota centrālajā daļā un to virziens ir aptuveni ortogonāls protopanetārā diska plaknei. Tomēr kopumā mezglu PA sadalījums neseko šai tendencei, īpaši jau mezgli, ar zemām gradienta vērtībām, to PA vērtības ir plašās robežās. Tas varētu norādīt uz komplekso gāzes kinemātiku struktūrās ar 5 – 20 AU izmēriem. Māzera mezgla numur 5 ātruma gradienta virziens saskan ar īpaš-kustības vektora virzienu (Moscadelli et al., 2011), kas varētu norādīt, ka šis mezgls kustās kopā ar aizplūstošu gāzi.

**G90.925**+1.486. Māzeru emisija ir parādīta attēlos 30. vidū un 45. Tika konstatēti 47 metanola māzeru plankumi, kas izvietoti septiņos dažādos mezglos, un to parametri ir parādīti tabulā 9. Individuālo līniju vidējais platums (FWHM) ir 0.30 km s<sup>-1</sup>. Emisija tika konstatēta radiālā ātruma diapazonā no -71.31 līdz -68.31 km s<sup>-1</sup> un tā aizņem 160 mas × 90 mas, kam atbilst 950 AU×530 AU. Mezglu lineārie izmēri ir no 6 līdz 100 AU. Apakšējā – zili nobīdītā komponente ir ar izteiktu ātruma gradientu, tā kopējā vērtība ir 0.007 km s<sup>-1</sup>AU<sup>-1</sup>. Sistēmā kopumā mezglu ātruma gradientu virzieni saskan ar kopējo struktūras izstiepumu. Salīdzinot EVN iegūto spektru ar Irbenes teleskopa iegūto, redzams, ka komponente ar LSR ātrumu -69.2 km s<sup>-1</sup> ir būtiski izšķirta 63%, bet -70.3 km s<sup>-1</sup> komponente tikai par 19%. Kopējā integrālā spožuma S<sub>int</sub>(EVN)/S<sub>int</sub>(Ir) attiecība ir 0.43.

**G94.602**–**1.796** ir vājākais novērotais avots, un tas ir parādīts attēlos 30. labajā malā un 48. Tika pamanīti 59 māzeru plankumi, kas veido sešus mezglus un kuru parametri ir apkopoti tabulā 10. Šī emisija tika konstatēta –40.55 līdz –44.4 km s<sup>-1</sup> LSR ātrumu diapazonā. Māzeri ir izvietoti iegareni ziemeļu – dienvidu virzienā un aizņem 33 mas×115 mas ar atbilstoši 150 AU×520 AU lieliem, fiziskiem izmēriem, un ir ar uzskatāmu 0.035 km s<sup>-1</sup> mas<sup>-1</sup> jeb

Tabula 8: G78.122+3.633 6.7 GHz metanola māzera mezglu parametri.  $\Delta$ RA un  $\Delta$ Dec norāda relatīvas koordinātes no centra punkta: RA=20<sup>h</sup>14<sup>m</sup>26.05839<sup>s</sup>, Dec=+41<sup>o</sup>13'32.5278" (J2000). V<sub>fit</sub> ir Gausa funkcijas modeļa radiālā ātruma vērtībā tās maksimumā. Gausa funkcijas pusaugstuma platums (FWHM). S<sub>fit</sub> plūsmas blīvuma maksimums ar Gausa funkcijas modeli. L<sub>proj</sub> māzeru mezgla lineārais izmērs. V<sub>grad</sub> ātruma gradients, ja nosakāms. PA ir pozīcijas leņķis māzeru plankumu galvenai asij. Vērtības slīprakstā ir relatīvi lielu klūdu.

<u>F</u>								
Cloudlet	ΔRA	ΔDec	$V_{\rm fit}$	FWHM	$S_{\mathrm{fit}}$	$L_{\rm proj}$	$V_{ m grad}$	PA
	(mas)	(mas)	$({\rm km}{\rm s}^{-1})$	$({\rm km}{\rm s}^{-1})$	$(Jy beam^{-1})$	(mas(AU))	$(\mathrm{km}\mathrm{s}^{-1}\mathrm{mas}^{-1}(\mathrm{km}\mathrm{s}^{-1}\mathrm{AU}^{-1}))$	(°)
1	0.0	0.0	-4.94	0.26	0.12	1.3(2.1)	0.29(0.173)	51
2	83.2	106.2	-6.93	0.33	1.38	5.5(8.8)	0.13(0.079)	122
3	54.1	112.1	-6.85	0.76	0.11	6.8(10.9)	0.10(0.064)	-65
4	33.9	139.9	-7.60	0.27	0.42	0.6(1.0)	0.72(0.451)	119
5	-168.9	104.6	-6.72	0.31	0.80	1.1(1.7)	0.14(0.085)	108
	-158.1	101.7	-6.08	0.41	8.09	6.9(11.1)	0.14(0.085)	92
6	-96.5	94.1	-6.60	0.24	0.22	1.6(2.6)	0.11(0.067)	139
	-100.4	80.6	-5.69	0.40	0.68	2.7(4.3)	0.20(0.123)	-114
7	122.1	106.0	-8.27	0.29	0.45	4.2(6.7)	0.13(0.079)	-137
8	107.2	106.5	-7.75	0.31	0.04	2.4(3.8)	0.07(0.046)	-107
9	-74.2	91.7	-6.71	0.36	0.37	0.6(1.0)	0.56(0.352)	-30
10	47.0	109.8	-7.10	0.25	0.51	1.2(1.9)	0.23(0.142)	-44
11	-94.6	86.2	-6.41	0.37	0.58	2.5(4.0)	0.17(0.109)	-133
12	-67.5	92.0	-6.70	0.33	0.17	1.4(2.2)	0.12(0.076)	45
13	-88.7	95.8	-	-	-	0.8(1.3)	0.22(0.136)	-31
14	-94.9	-80.9	-5.86	0.46	0.41	3.3(5.3)	0.11(0.066)	-67



Att. 30: Augšā: G78.122+3.633, G90.925+1.486 un G94.602-1.796 spektri iegūti ar EVN (krāsainās līnijas) un ar Irbenes RT-16 radioteleskopu (pelēkās līnijas) 2019. gada 31. oktobrī. Apakšā: Metanola māzeru izvietojums. Punktu krāsas ir atbilstošas to LSR radiālā ātrumu krāsām, to izmēri proporcionāli spožuma logaritmam.

Tabula 9: G90.925+1.486 mezglu parametri, tā paša tipa informācija, kas Tabulā 8. Koordinātu centrs (0,0): RA= $21^{h}09^{m}12.97474^{s}$ , Dec=+50°01'03.6580" (J2000), kas atbilst spožākajam māzeru plankumam.

Cloudlet	ΔRA	ΔDec	$V_{\rm fit}$	FWHM	$S_{\mathrm{fit}}$	$L_{\rm proj}$	$V_{\rm grad}$	PA
	(mas)	(mas)	$({\rm km}{\rm s}^{-1})$	$({\rm km}{\rm s}^{-1})$	(Jy beam <sup>-1</sup> )	(mas(AU))	$(\text{km s}^{-1} \text{mas}^{-1} (\text{km s}^{-1} \text{AU}^{-1}))$	(°)
1	0.0	0.0	-69.21	0.30	21.71	2.8(12.4)	0.18(0.031)	93
	5.1	-1.4	-68.79	0.24	3.10	4.3(19.5)	0.14(0.024)	62
2	-9.5	-13.3	-69.41	0.28	1.64	0.6(3.3)	0.35(0.060)	68
	-14.1	-7.7	-69.82	0.24	0.38	1.9(11.5)	0.10(0.018)	62
3	42.5	9.9	-69.59	0.36	0.19	1.1(6.4)	0.18(0.031)	-96
4	-38.6	-22.6	-70.34	0.34	9.37	17.5(103.2)	0.05(0.008)	100
5	-92.0	27.0	-70.49	0.32	0.65	0.7(4.0)	0.29(0.050)	6
6	47.9	68.2	-71.14	0.19	0.40	0.9(5.4)	0.32(0.055)	143
7	67.6	17.6	-69.60	0.34	0.10	1.0(5.7)	0.20(0.035)	146

Tabula 10: G94.602–1.796 mezglu parametri, līdzīgi kā Tabulā 8. Koordinātu centrs (0,0):  $RA=21^{h}39^{m}58.25507^{s}$ ,  $Dec=+50^{o}14'20.9989''$  (J2000) atbilst spožākajam māzeru plankumam.

141 -1			,		(0=0)	<i>(</i> )	pozumjum muzeru prumu	
Cloudlet	ΔRA	ΔDec	$V_{\mathrm{fit}}$	FWHM	$S_{\mathrm{fit}}$	Lproj	$V_{ m grad}$	PA
	(mas)	(mas)	$({\rm km}{\rm s}^{-1})$	$({\rm km}{\rm s}^{-1})$	$(Jy beam^{-1})$	(mas(AU))	$(\text{km s}^{-1} \text{mas}^{-1} (\text{km s}^{-1} \text{AU}^{-1}))$	(°)
1	5.3	-88.1	-40.85	0.53	1.05	5.1(23.0)	0.11(0.024)	137
2	10.1	-53.1	-40.98	0.30	0.59	2.3(10.4)	0.36(0.081)	-30
	10.1	-53.7	-41.43	0.58	0.10	2.6(12.0)	0.42(0.091)	-21
3	18.6	-78.4	-41.07	0.56	0.15	2.1(9.5)	0.23(0.051)	179
4	-0.9	-23.7	-42.20	0.19	0.12	0.5(2.3)	0.43(0.96)	85
5	2.0	-16.2	-42.94	0.36	0.54	5.7(25.7)	0.14(0.031)	3
6	0.0	0.0	-43.65	0.54	0.96	14.0(63.0)	0.11(0.024)	7

 $0.008 \text{ km s}^{-1} \text{AU}^{-1}$  lielu ātruma gradientu. Plūsmas attiecība spektrā S<sub>int</sub>(EVN)/S<sub>int</sub>(Ir) ir 0.42, un komponenšu FWHM vidējā vērtība ir 0.37 km s<sup>-1</sup>.

## 5.6 Analīze un diskusija

Salīdzinot interferometra iegūtos spektrus ar individuāla teleskopa iegūto, redzams, ka EVN tos ievērojami izšķir, zaudētā plūsma ir 57-58% un nav atkarīga no avota spožuma vai distances (zaudētā plūsma norāda uz plūsmas daļu, ko uztver interferometrs salīdzinājumā ar atsevišķu radioteleskopu). Bartkiewicz et al. (2016) ziņoja par līdzīgu zaudētās plūsmas blīvumu, savos rezultātos, aplūkojot lielu skaitu avotu. G90.925+1.486 spektra komponentes ir izšķirtas dažādā apmērā.

#### 5.6.1 G78.122+3.633

Autors veica individuālu māzeru mezglu struktūras evolūcijas pētījumu ar dažu loka milisekunžu precizitāti. G78.122+3.633 ir novērots ar EVN 2004., 2007., 2009. un 2011. gadā (programmas kodi EL032, EM064C, EM064D un ES066E), dati tika lejupielādēti no arhīva un apstrādāti, līdzīgi kā vēstīts iepriekš. Izņemot 2011. gada datus, radiālā ātruma izšķirtspēja ir vienāda, 2011. gada novērojumam tā ir divas reizes lielāka jeb 0.044 km s<sup>-1</sup>. Kopējais māzeru izvietojums G78.122+3.633 piecās dažādās epohas jeb 15 gados ir parādīta attēlā 36. Autors konstatēja, ka septiņi māzeru mezgli ir atrodami visos piecos EVN novērojumos, to parametri ir norādīti tabulā 11. Pētot māzeru plankumu izvietojumu, izmantojot svērto mazāko kvadrātu metodi, tiek atrasta taisne, kas raksturo to galveno asi. Lineārais korelācijas koeficients  $r_s$  tika aprēķināts, balstoties uz plankumu (matemātiski tos pieņem kā punktus) izvietojuma atbilstību šai taisnei. Līdzīgi tika arī noteikts korelācijas koeficients  $r_v$ , kas raksturo plankumu radiālā ātruma maiņu, atkarībā no tā distances līdz galvenai asij. Abos gadījumos tika izvēlēts lietot Pīrsona korelācijas koeficientu kā matemātisku instrumentu, kas raksturo vai divu lielumu iz-



Att. 31: G78.122+3.633 māzera mezglu karte, izmantojot 2019. gada EVN datus. Ar fuksīna (magenta) līnijām parādīti ātruma gradientu virzieni, līnijas garums atbilst kvadrātsaknei no plūsmas blīvuma, savukārt, riņķa izmērs parāda ātruma gradienta vērtību. Melnā, raustītā diagonāle līnija parāda diska plaknes orientāciju (Cesaroni et al., 2005). Ievietotā histogramma parāda ātruma gradientu pozīcijas leņķu (PA) sadalījumu (piezīme: negatīvie un atvērtie leņķi ir pārlocīti 0 – 180°diapazonā), divas sarkanās vertikālas līnijas parāda leņķus – paralēlus un perpendikulārus diska plaknei.



Att. 32: G78.122+3.633 māzeru mezglu karte, izmantojot EVN dotus no 2004. līdz 2019. gadam. Simbolu izmēri ir proporcionāls skaitam, cik daudzos novērojumos mezgls ir pamanīts. Zilie apļi un sarkanie kvadrāti norāda vai plūsmu no mezgliem var attiecīgi aprakstīt ar Gausa profilu var arī nevar. Mezgli ar augstāko un zemāko mainību, vadoties pēc parametriem no Tabulas 4., ir atzīmēti attiecīgi ar H un L burtiem.



Att. 33: G78.122+3.633 māzeru mezglu relatīvā īpaškustība. **Pa kreisi:** Diska un plūsmas modeļa no Moscadelli et al. (2011) pielietojums rezultātiem 2004-2019. periodā. Numuri pie punktiem atbilst mezglu numuriem no 8. tabulas. Blāvie punkti ar gaiši pelēkajiem vektoriem parāda komponenšu 8, 9 un 17 kustību no Moscadelli et al. (2011) pirmās tabulas, šie mezgli nav detektēti 2011. un 2019. gada novērojumos. Pelēkie trīsstūri parāda nenoteiktību. **Pa labi:** Mezglu īpaškustība noteikta pēc mezglu savstarpējo attālumu izmaiņām.

maiņas ir ar lineāru sakarību. Šī informācija ir apkopota attēlos 38-44. Tā kā detaļās autors aplūkoja katra mezgla īpašības, rādām arī mezglu kopējās intensitātes karti (Attēls 37.). Mezgls 1 (Attēls 38.) ir kompaktākais visos piecos novērojumos, kā konsekvence tam, ka virkne mezglu raksturojošie parametri ir slikti nosakāmi (r<sub>s</sub>, r<sub>v</sub>, V<sub>grad</sub> un PA). Otrā mezgla (Attēls 39.) spožākie plankumi veido lineāru struktūru ar augstām  $r_s$ ,  $r_v$  vērtībām un teju nemainīgu  $\pm 10^{\circ}$ PA. Trešā mezgla (Attēls 40.) struktūra ir būtiski mainījusies no kompaktiem trīs plankumiem 2004. gadā uz kompleksu struktūru ar diviem maksimumiem, sākot ar 2009. gadu. Ceturtais mezgls ir ļoti kompakts (Attēls 41.). Augstākā radiālā ātruma plankumi piektajā mezglā (Attēls 42.) veido unikāli ieliektu struktūru, kas ir stabila 15 gadus. Zemāka ātruma komponente parādījās 2009. gadā un ir ar nemainīgu lineāru struktūru pēdējos divos novērojumos. Šis mezgls ir tuvākais aizplūstošajai strūklai, kurā ir aktīvi 22 GHz ūdens māzeri (Moscadelli et al., 2011), un ātruma gradienta virziens ir loti tuvs gāzes plūsmas virzienam. Jāatzīmē, ka šī mezgla spožuma maiņa būtiski atšķiras no visu citu mezglu uzvedības - tā maksimums bija 2009. gadā. Tas norāda, ka šī mezgla plūsmas blīvuma izmaiņas ir mazāk atkarīgas no protozvaigznes aktivitātes izmaiņas. Sestais mezgls (Attēls 43.) ir ievērojami savērpts un tā morfoloģija ir ļoti mainīga. Septītā mezgla (Attēls 44.) morfoloģija ir lok-veidīga, un novērojama ir pakāpeniska iztaisnošanās. Autors secina, ka septiņu stabilo mezglu struktūra un spožums ir ievērojami mainīgi 2 līdz 15 gadu periodā.

Bez septiņiem pastāvīgajiem māzeru mezgliem, tika pamanīti arī 27 īslaicīgi pastāvoši (angliski *tranzient*) mezgli un 21 no tiem novērots tikai vienā EVN epohā. Vienpadsmit no tiem netika konstatēts Gausa profils. Tas varētu tikt skaidrot, ka VLBI detektē tikai viskompaktāko emisijas apgabalu no gāzes ar zemu māzera pastiprinājuma līmeni. Attēls 32. parāda mezglu izvietojumu, un simbola izmērs norāda, cik epohās konkrētais mezgls ir ticis novērots. Interesanti, ka īslaicīgi pastāvošie mezgli ir izvietoti uz ziemeļiem no pastāvīgajiem, bet teju nekad uz dienvidiem. Mezgli 4 un 5 ir atbilstoši galvenie plūsmas avoti vismainīgākajai un mazāk mainīgākajai spektra komponentei, kas grafikā attiecīgi norādīti ar H un L. 6.7 GHz metanola māzeru pozīcija daļēji sakrīt ar CH<sub>3</sub>CN (J = 12–11, K=3) emisijas zonu, kuras ierosināšanas temperatūra ir 133 K. Tālāk uz dienvidiem parādās augstākas enerģijas CH<sub>3</sub>CN emisijas (Cesaroni et al. 2014, skatīt viņu Attēlu 5.). Tas ļauj izdarīt secinājumu, ka apgabali, kuros nenovērojam metanola emisiju, ir ar augstāku kinētisko temperatūru, kā tas ir saskaņā ar metanolu māzeru ierosināšanas standart modeli (Cragg et al. 2002). Irbenes 5 gadus ilgā monitoringa kampaņas rezultāti ir līdzīgi tiem, kādus 2009 – 2013. gadā ieguva Szymczak et al. (2017): -7.7 km s<sup>-1</sup> komponente ir ļoti mainīga, bet -6.1 km s<sup>-1</sup> maz-mainīga. Vēl agrāki šī avota 6.7 GHz metanola māzera spektri liecina, ka G78.122+3.633 ir aktīvi mainīgs vismaz pēdējos 27 gadus.

Izmantojot visus piecus pieejamos EVN novērojumu datus, veicām avota īpaškustības analīzi. Vispirms, izmantojām identisku pieeju kā Moscadelli et al. (2011), otrais māzeru mezgls ar LSR ātrumu -7.1 km s<sup>-1</sup> kalpo kā atskaites punkts. Procedūra ir sekojoša: (1) identificē mezglus, kas novērojami visās piecās EVN epohās, (2) pārbauda, vai šie mezgli kustās lineāri attiecībā pret otro mezglu, (3) visbeidzot, novērtē lineārās kustības apjomu ar lineāras regresijas metodi, izmantojot visu 5 novērojumu datus. Īpaškustības virziens un ātrums parādīti attēlā 33. pa kreisi. Kopumā autora rezultāti ir ļoti tuvi Moscadelli et al. (2011) aprakstītajiem, kad tika novērtēta kustība 5 gados izmantojot 3 datu masīvus. Kustības ātrumi ir 1.5 līdz 6.0 km s<sup>-1</sup> robežās, un PA atšķirība no īpaškustības vektoru virziena ir zem 30°. Austrumu mezglu klasterī tika pamanīts vēl vienus mezgls, kam var veikt īpaškustības novērtējumu, tajā pašā laikā 3 mezgli, kam īpaškustības analīzi veica Moscadelli et al. (2011) pazuda vēlākajos novērojumos. Iekšējās kustības novērtējums atbalsta hipotēzi, ka rietumu klastera mezgli seko gāzes kustībai, kas paceļas no diska, netālu no plūsmas sākuma, uz ko norāda 22 GHz ūdens māzeri (Moscadelli et al., 2011). Papildus tika izmantota vēl cita pieeja īpaškustības novērtēšanai, (1) tiek izmērītas visas distances starp septiniem stabilajiem mezgliem (kopā 21 pāri), vienmēr pieņemot pirmā mezgla pozīciju kā (0,0), (2) izmantojot mazāko kvadrātu metodi, tiek novilktas taisnes, kas apraksta vienmērīgu kustību visos pāros (iegūstot 6 vektorus katram mezglam), (3) tiek aprēkināts summārais vektors katram mezglam, un tas tika interpretēts kā kustības vektors katram mezglam. Šīs metodes rezultāts ir parādīts attēlā 33. pa labi. Pirmais mezgls kustas pretim visiem pārējiem, līdzīgi kā pirmajā metodē. Otrais un septītais mezgls virzās projām no trešā un ceturtā, kā arī no vistālāk uz rietumiem esošajiem mezgliem. Mezgli, kas izvietoti vistālāk uz ziemeļiem (mezgli 4, 5 un 7), ir ar ļoti zemu kustības ātrumu (zem 1 km s<sup>-1</sup>), kas būtiski atšķiras no citu mezglu, kas atrodas tuvāk centrālajai zvaigznei, aptuveni 400 AU uz dienvidiem (Cesaroni et al., 2013), ātrumu vērtībām. Līdz ar to šīs metodes rezultāti nesaskan ar postulēto diska un diska - plūsmas mijiedarbības zonas modeli (Moscadelli et al., 2011), bet varētu atbilst telpiski turbulentai diska kinemātikai, skaidri redzamai CH<sub>3</sub>CN emisijas līnijas kartēs (Cesaroni et al., 2014).

#### 5.6.2 G90.925+1.486

Kopējā struktūra ir ļoti līdzīga tai, ko 2012. gadā ieguva BeSSeL pārskats, izmantojot VLBA. Autora pētījumā iegūto mezglu 1, 2, 4 un 6 LSR ātrumi un pozīcijas sakrīt ar BeSSeL datiem. Atlikušie divi mezgli netika konstatēti 2012. gadā, ticamākais, ka VLBA augstākas izšķirtspējas dēļ. JVLA novērojumi 2012. gadā (Hu et al., 2016) pamanīja plašu  $\sim 300 \times 600$  mas ( $\sim 1700 \times 3500$  AU) emisijas apgabalu, norādot uz paplašināto emisijas pastiprināšanas zonu, ko izšķir VLBA un EVN. Emisija no mezgla 4 ar -70.3 km s<sup>-1</sup> saglabāja savu morfoloģiju 7 gadus. Citi mezgli mainījās būtiskāk, bet to PA izmaiņas palika 40°robežās. Kopumā morfoloģija bija stabila 7 gadus.

VLBI dati un monitoringa rezultāti norāda, ka spektrālā komponente ar LSR ātrumu -69.2 km s<sup>-1</sup> nāk no pirmā mezgla, bet mazāk mainīgā -70.3 km s<sup>-1</sup> no ceturtā mezgla. Pēdējos 4 gadus, ar 2 līdz 3 mēnešu ilgstošiem cikliem, šīs komponentes ir mainījušās sinhroni ar amplitūdu 20 - 50 %no 2009. līdz 2013. gadam Szymczak et al. (2017) novēroja tādu pašu komponenšu "*uzvedību*". Akumulējot visus pieejamos G90.925+1.486 spektra datus no literatūras (Szymczak et al. 2000, 2012; Szymczak et al. 2017; Hu et al. 2016;Yang et al. 2019) un mūsu monitoringa rezultātus, redzams, ka attiecība starp -70.4 un -69.2 km s<sup>-1</sup> komponenšu pīķa plūsmas monotoni krītas no 2.5 līdz 0.4 reižu, laika posmā no 1999. līdz 2022. (Attēls 34.). Tā kā 6.7 GHz metanola



Att. 34: G90.925+1.486 spektrālo -70.4 un -69.3 km s<sup>-1</sup> komponenšu pīķu plūsmas blīvuma ilgtermiņa mainīgums, atbilstoši atzīmēts ar kvadrātiem un apļiem. Plūsmas kalibrēšanas precizitāte ir ap  $\sim 10\%$  55005-56340 MJD datiem un ap  $\sim 20\%$  datiem pēc 57885 MJD. Gaiši sarkanā un gaiši zilā punktētās līnijas parāda veiksmīgākos tuvinājumus, attiecīgi lineāra (r=0.46, p<0.001) -70.4 komponentei laika sērijai un eksponentes (r=0.80, p<0.001) līknei -69.3 laika sērijai.



Att. 35: G94.602–1.796 1.37 mm termiskā starojuma karte (Beuther et al., 2018). Pirmās kontūras līmenis ir 4.0 mJy beam<sup>-1</sup> ar 2.0 mJy beam<sup>-1</sup> pieauguma soli. Metanola māzeru mezglu pozīcijas parādītas ar punktiem, CH<sub>3</sub>CN 220747.261 GHz līnijas emisija ar tukšajiem kvadrātiem, izmantojot NOEOMA datus (Gieser et al., 2021). Krāsa ir atbilstoša mezglu LSR ātrumam un parādīta skalā. Melnie un fuksīna (magenta) krāsas krusti attiecīgi attēlo 5.8 un 44 GHz termiskā starojuma maksimuma pozīcijas (Purser et al., 2021).

māzera emisija ir starojuma ierosināta (Cragg et al., 2002), sinhronas svārstības laika diapazonā no 3 mēnešiem līdz dažiem gadiem ar līdz pat 3.8 reižu lielām amplitūdas svārstībām, norāda uz būtiskām izmaiņām ierosinošā starojuma intensitātē no centrālā objekta. Attēlā 34. redzams, ka -70.4 km s<sup>-1</sup> komponentes plūsma aug ļoti lēnām (0.75 Jy yr<sup>-1</sup>) no 2008. līdz 2022. gadam, bet -69.2 km s<sup>-1</sup> komponentes plūsma aug eksponenciāli (23 gados pieauga 7 reizes). Autors izvirza hipotēzi, ka novērotās plūsmas blīvuma svārstības izraisa aktīvās vides izmēru (garuma) izmaiņas, gāzes kustības rezultātā (Caswell et al. 1995), diska spirālzaros (Bayandina et al. 2022).

#### 5.6.3 G94.602-1.796

Salīdzinot Irbenes datus ar literatūrā atrodamajiem (Szymczak et al. 2017; Hu et al. 2016), šī avota spektrs ir mainījies būtiski. Emisija ar radiālo ātrumu -43.2 līdz -42.2 km s<sup>-1</sup> ir samazinājusies divas reizes. Apskatot vēl senākus datus (Slysh et al. 1999; Szymczak et al. 2000), ir iespējams ievērot būtiskas atšķirības spektra struktūrā.

VLBA dati tika iegūti BeSSeL programmas ietvaros, veicot novērojumus 2012. gada decembrī. Tad tika pamanīti 12 māzera plankumi, visticamāk atbilstoši mezgliem 1, 2, 4, 5 un 6. Tā kā spektrālā izšķirtspēja bija vien 0.36 km s<sup>-1</sup>, nav iespējams veikt mezglu struktūras analīzi, bet autors norāda, ka avota kopējā morfoloģija ar vertikālo lineāro struktūru un ātruma gradientu ir ļoti līdzīga. Salīdzinot māzeru mezglu plankumu pozīcijas ar visaugstāko amplitūdu, kam ir teju identisks radiālais ātrums 2012. gadā un 2019. gadā, redzams, ka tās neuzrāda būtisku kustību (0.85 mas). Zemākas telpiskās izšķirtspējas novērojumi ar VLA-C (Hu et al. 2016) un EVN (Slysh et al. 2002) arī parāda līdzīgu telpisko morfoloģiju, norādot uz to, ka kopējās struktūras īpašības saglabājušās vismaz 20 gadus, bet novērotā mainība ir saistīta ar individuālo mezglu mainību (Szymczak et al., 2017).

G94.602–1.796 tuvo infrasarkano staru novērojumi liecināja, ka plūsma ir orientēta teju pret novērotāju (Murakawa et al., 2013). Savukārt, kompakts termiskais starojums novērots 5.8 un 44 GHz ar intensitāti atbilstoši 0.23 un 0.52 mJy ar izstiepumu, kura pozīcijas leņķis ir 91 $\pm$ 71°. Iegūtie rezultāti varētu liecināt par avota plūsmu (džetu) (Purser et al., 2021). Svarīgi atzīmēt, ka C-joslas termiskā starojuma maksimums ir vien 100 mas attālumā no māzeru pozīcijas. Šis debess apgabals tika novērots arī 1.3 mm diapazonā, un tika konstatēti 4 avoti. Stiprākais no tiem ir aptuveni tikai 90 mas no metanola māzeru pozīcijas. NOEMA pārskata spektru dati (Gieser et al., 2021), ļāva autoram iegūt 220747.261 GHz CH<sub>3</sub>CN emisijas līnijas karti, kas tiek uzskatīta ka laba indikācija molekulu diskiem (Cesaroni et al. 2014). Šīs termiskās emisijas plankumi, tā pat kā metanola māzeru mezgli, ir orientēti Ziemeļu - Dienvidu virzienā ar skaidru ātruma gradientu (Attēls 35.), ļaujot secināt, ka metanola māzeri ir izvietoti diska rietumu malas centrālajā daļā.

#### 5.7 Secinājumi

Tika pakopotas 3 avotu 4.5 gadus ilgas monitoringa laika sērijas un tās tika analizētas kontekstā ar VLBI datiem. Avotu plūsmas blīvuma izmaiņas ir dažādas, bet to kopējā iezīme ir tādas, ka sinhroni mainās visas spektra komponentes. Veiksmīgi tika iegūti loka milisekundes izšķirtspējas attēli trim atlasītajiem – mainīgiem avotiem. G90.925+1.486 un G94.602-1.796 šādas kvalitātes dati iegūti pirmoreiz. Aplūkojot atsevišķus māzeru mezglus (*cloudlets*), to struktūras izmaiņas laika gaitā var būt ļoti būtiskas, norādot uz rotāciju, saraušanos vai izstiepšanos un to pārvietošanos diskā.

**G78.122**+**3.633** ir aktīvi mainīgs avots vismaz pēdējos 27 gadus. Septiņi pastāvīgie māzeru mezgli būtiski maina sukturu un plūsmu dažu gadu laikā. Mezgli, ko sasaista ar disku, ir būtiski mainīgāki gan dienu – mēnešu periodā ,gan ilgākā 2 – 15 gadu periodā, par māzeru mezgliem,



Att. 36: *Augšā*: G78.122+3.633 spektri, iegūti ar EVN, izmantojot arhīva datus. *Apakšā*: Māzeru apgabalu izvietojums. Simbola izmērs ir proporcionāls logaritmam no tā plūsmas blīvuma, bet krāsa atbilst tā LSR ātrumam, kā augšējā panelī. Koordinātu centrs (0,0) ir atbilstošs māzera plankumam, ar radiālo ātrumu  $-4.9 \text{ km s}^{-1}$ , kas ir stabils un kompakts visās epohās. Tā koordinātes ir dotas tabulā 8. Pelēkie krusti un cipari apakšējā labajā panelī parāda pozīcijas septiņiem māzeru mezgliem, kas saglabājas visus 15 gadus.



Att. 37: G78.122+3.633 māzeru mezglu kopējās intensitātes kartes, kas iegūtas 2019. gadā. Koordināšu centrs (0,0) atbilst mezgla centram kā norādīts tabulā 8. un parādīti attēlos 38 – 44. Krāsu atbilstība intensitātei (Jy beam<sup>-1</sup>× km s<sup>-1</sup>), un parādītais redzes lauks ir izvēlēts atšķirīgs katram mezglam, lai labāk parādītu tā īpašības. Elipse apakšējā kreisajā stūrī norāda stara izmēru.

Tabula 11: G78.122+3.633 6.7 GHz māzeru mezglu parametri, kas pastāv 15 gadus. Tie paši parametri, kas tabulā 8., bet izmantojot visu piecu epohu datus. Iekļauti arī lineārās korelācijas koeficienti punktu izvietojumam ( $r_s$ ) un novirzei no galvenās ass ( $r_v$ ), un galvenās ass virziena leņķis (PA).

Cloud	ΔRA	ΔDec	V <sub>fit</sub>	FWHM	Sfit	r.	r.,	Varad	PA
Epoch	(mas)	(mas)	$(\text{km s}^{-1})$	$(km s^{-1})$	$(Jv \text{ beam}^{-1})$	- 3	- V	$(\text{km s}^{-1} \text{ mas}^{-1} (\text{AU})^{-1})$	(°)
Cloudlet 1	()	()	(	(	(*) ****** )			(	()
2004	0.0	0.0	-4 88	0.26	0.4	-0.66	0.36	0.20(0.12)	127
2007	0.0	0.0	-4.85	0.25	0.4	0.58	0.88	0.26(0.12)	73
2007	-0.2	-0.1	-4.86	0.25	1.5	0.90	0.00	0.29(0.18)	57
2005	0.2	0.1	-4.00	0.20	0.2	-0.51	-0.92	0.18(0.12)	-82
2011	0.5	0.0	-4.90	0.27	0.2	0.83	0.92	0.18(0.12) 0.28(0.17)	-02 51
Cloudlet 2	0.0	0.0	-4.94	0.20	0.1	0.85	0.75	0.28(0.17)	51
2004	70.3	1144	7 15	0.17	1.0	0.00	0.04	0.28(0.18)	142
2004	79.5	114.4	-7.13	0.17	1.9	-0.90	0.94	0.28(0.18) 0.12(0.08)	142
2007	79.1	112.4	-7.14	0.52	1.7	-0.69	0.77	0.15(0.08)	134
2009	/0.0	111.2	-7.10	0.42	9.2	-0.05	0.39	0.13(0.09)	129
2011	82.3	109.4	-0.93	0.20	1.2	-0.99	0.99	0.12(0.07)	123
2010	-	-	-7.07	0.47	1.0	-	-	-	-
2019	83.2	106.2	-6.93	0.33	1.4	-0.99	0.99	0.13(0.08)	122
Cloudlet 3	(2.4	110.0				0.00	0.00	0.2((0.1()	20
2004	62.4	118.0	-	-	-	-0.99	-0.90	0.26(0.16)	-29
2007	62.2	114.5	-7.00	0.43	0.9	-0.72	-0.79	0.08(0.05)	-100
2009	61.6	114.9	-6.94	0.26	1.4	-0.54	0.24	0.04(0.03)	88
	56.3	120.0	-6.56	0.23	0.5	-0.94	-0.99	0.07(0.05)	-31
2011	60.1	113.3	-7.00	0.41	0.4	-0.90	-0.90	0.19(0.12)	-53
	55.8	121.5	-6.49	0.26	0.1	-0.91	-0.97	0.04(0.03)	-26
2019	54.1	112.1	-6.85	0.76	0.1	-0.94	-0.98	0.10(0.06)	-65
Cloudlet 4									
2004	38.3	145.6	-7.67	0.29	1.1	-0.59	0.94	0.10(0.06)	109
2007	38.1	143.7	-7.64	0.29	1.1	-0.67	0.82	0.10(0.06)	99
2009	38.8	142.2	-7.73	0.28	9.2	-0.10	-0.21	0.19(0.12)	101
2011	36.3	142.9	-7.62	0.27	1.8	0.91	-0.98	0.48(0.30)	153
2019	33.9	139.9	-7.60	0.27	0.4	-0.72	0.95	0.72(0.45)	119
Cloudlet 5									
2004	-154.2	108.4	-6.10	0.33	27.8	0.80	0.97	0.11(0.07)	79
2007	-154.3	106.6	-6.09	0.36	60.7	_*	0.97	0.12(0.07)	76
2009	-168.8	109.3	-6.74	0.32	2.2	-0.99	0.95	0.10(0.06)	118
	-155.6	105.0	-6.08	0.39	23.7	_*	0.92	0.11(0.07)	77
2011	-168.9	109.4	-6.76	0.35	0.9	-0.99	0.75	0.09(0.05)	115
	-155.9	105.1	-6.08	0.38	26.4	0.46	0.78	0.11(0.07)	75
2019	-168.9	104.6	-6.71	0.31	0.8	-0.56	0.65	0.14(0.09)	108
	-158.1	101.7	-6.08	0.41	8.3	-0.81	0.99	0.14(0.09)	92
Cloudlet 6									
2004	-91.7	95.3	-6.64	0.32	0.6	0.38	-0.73	0.37(0.23)	97
	-98.5	85.5	-	-	-	-	-	-	-
2007	-93.8	93.4	-6.52	0.33	2.9	0.62	0.99	0.11(0.07)	-128
	-98.1	83.8	-5.49	0.45	0.5	0.67	0.79	0.28(0.18)	70
2009	-94.7	93.4	-6.52	0.30	4.2	0.87	-0.98	0.09(0.06)	-162
	-99.0	82.2	-5.50	0.48	1.2	-0.88	-0.97	0.27(0.17)	-72
2011	-93.4	89.8	-6 39	0.44	0.3	0.71	-0.99	0.09(0.06)	-138
2011	-99.0	83.1	-5 74	0.82	0.4	0.91	-0.95	0.14(0.08)	-112
2019	-96.5	94 1	-6.60	0.02	0.4	0.79	-0.95	0.14(0.00) 0.11(0.07)	139
2017	-100.5	80.6	-5.70	0.24	0.2	0.70	-0.94	0.20(0.12)	-11/
Cloudlat 7	-100.4	00.0	-5.70	0.40	0.7	0.70	-0.00	0.20(0.12)	-114
2004	122 1	113.0	_8 3/	0.34	0.5	-0.96	0.41	0.17(0.11)	127
2004	123.1	110.5	-0.54	0.34	0.5	-0.90	_0.95	0.17(0.11) 0.30(0.10)	$\frac{12}{-147}$
2007	123.2	10.5	-0.30 0 20	0.32	1.U 2.1	0.32	0.95	0.30(0.13)	-14/
2009	122.9	100.0	-0.3U 0.27	0.52	2.1	0.55	-0.98	0.20(0.10) 0.15(0.00)	-132
2011	122.3	109.0	-0.21	0.30	0.0	0.03	-0.99	0.13(0.09) 0.12(0.09)	-140 127
2019	122.1	106.0	-8.27	0.29	0.5	0.87	-0.98	0.13(0.08)	-13/

\* Korelācijas koeficients nav labi definēts punktu kopai, kuri izvietoti austrumu–rietumu virzienā, t.i. Y ass izkliede tuvu 0.



Att. 38: *Augšā*: G78.122+3.633 pirmā mezgla (kā Tabulā 36.) spektrs ar Gausa profila modeli *Vidū*: Māzeru plankumu izvietojums pie debesīm ar galvenās ass modeli un korelācijas koeficientu r<sub>s</sub>. Punktu izmērs ir proporcionāls tā plūsmas blīvuma logaritmam. Koordinātu sākuma (0,0) punkts atbilst spožāka plankuma pozīcijai. *Apakšā*: Māzeru plankumu ātrums, attiecība pret tā novirzi no galvenās ass, un lineārais korelācijas koeficients r<sub>v</sub>.



Att. 39: Tā pati informācija, kas Attēlā 38., bet otrajam G78.122+3.633 mezglam(Cloudlet 2).



Att. 40: Tā pati informācija, kas Attēlā. 38., bet trešajam G78.122+3.633 mezglam(Cloudlet 3).



Att. 41: Tā pati informācija, kas Attēlā. 38., bet ceturtajam G78.122+3.633 mezglam(Cloudlet 4).



Att. 42: Tā pati informācija, kas Attēlā 38., bet piektajam G78.122+3.633 mezglam(Cloudlet 5).



Att. 43: Tā pati informācija, kas Attēlā 38., bet sestajam G78.122+3.633 mezglam(Cloudlet 6).



Att. 44: Tā pati informācija, kas Attēlā 38., bet G78.122+3.633 septītajam mezglam(Cloudlet 7).

kas izvietoti plūsmas ārēja malā. Tika novērots, ka vairums mezglu ātruma gradienta virzieni labi saskan ar mezgla īpaškustības vektora virzienu, kas tika noteiktas, izmantojot 5 datu kopas. Būtiskā mainība un liels uz īslaicīgi parādošos mezglu skaits norāda uz māzera starojuma nepiesātinātību diska zonā.

Kopumā **G90.925**+**1.486** struktūra ir stabila 7 gadus. Divu galveno komponenšu mainīguma profils 23 gados ir būtiski atšķirīgs, viena mainās lineāri ar  $0.75 \text{ Jy yr}^{-1}$  izmaiņu, otrās plūsma aug eksponenciāli. Ticamākais, ka šis mainības iemesls ir izmaiņas aktīvās vides garumā.

Arī **G94.602**–**1.796** struktūra kopumā ir stabila vismaz 7 gadus. Galveno komponenšu starojums nāk no dažādiem mezgliem, to spožumu mainās no 0.5 līdz 5.82 reizēm, īsākā laika periodā (līdz 3 mēnešiem) komponentes sinhroni svārstās ar 1.0 - 1.5 relatīvo amplitūdu. Īstermiņa mainīguma galvenais cēlonis ir izmaiņas pumpējošā starojumu intensitātē, bet ilgtermiņa izmaiņas var tikt saistītas ar gāzes kustību.

#### 5.8 Autora ieguldījums

Kā jau minēts iepriekš, pirms šī pētījuma, institūtā nebija liela pieredze veikt VLBI novērojumus, tos apstrādāt un analizēt. Zināšanu pārnesei no Toruņas kolēģiem bija būtiska loma šī pētījuma veikšanai, īpaši Annas Bartkiewicz, kas autoru konsultēja visos pētījuma etapos, un Marian Szymczak, ar kuru diskutējām par rezultātu interpretāciju. Daži datu apstrādes skriptu elementi tika pārņemti no viņas studentiem: Agneškas Kobak un Mihaila Durjasz. Vairākus datu vizualizācijas rīkus palīdzēja uzprogrammēt Jānis Šteinbergs. Kā norādīts datu apstrādes nodaļā, JIVE atbalsta zinātnieki un darbinieki veic noteiktus pasākums, lai novērojumu pieteicējiem process būtu vienkāršāks un veiksmīgāks.

Autors izveidoja pieteikumu EVN novērojumam un ir tā principiālais autors (Principal Investigator, PI). Izstrādāja detalizētu plānu novērojumam. Pēc datu korelācijas devās uz JIVE, kur apguva EVN datu reducēšanu, un apstrādāja iegūtos novērojuma datus, kā arī iepazinās ar pētījumam būtisko literatūru. Autors veica datu vizualizāciju un statistisko parametru mērījumus un aprēķinus, kā arī apstrādāja arhīva datus māzeru mezglu evolūcijas pētījumam. Iegūtie



Att. 45: G90.925+1.486 kopējās intensitātes attēls, elipse kreisajā apakšēja stūrī, parāda sintezētā primārā stara izmēru.


Att. 46: G90.925+1.486 māzeru mezgli, novēroti ar EVN (EA063), satur to pašu informāciju, ko attēls 38., bet šoreiz orientēta horizontāli. Katrā rindā parādīts cits mezgls. Secīgi rādīti 1, 2, 4, un 6 mezglu, nav rādīti 3, 5 un 7 mezgli, jo to struktūra ir ļoti vienkārša.



Att. 47: G90.925+1.486 māzeru mezglu dati, iegūti no BeSSeL pārskata. Attēlā tā paša informācija, kas attēlā 38., bet attiecīgi orientēta horizontāli.

rezultāti tika apkopoti un interpretēti, un publicēti MNRAS žurnālā, autors ir šīs publikācijas pirmais un korespondējošais autors.



Att. 48: G94.602–1.796 kopējās intensitātes attēls, elipse - kreisajā apakšēja stūrī, parāda sintezētā primārā stara izmēru.



Att. 49: Atsevišķie G94.602–1.796 mezgli, novēroti ar EVN (EA063), satur to pašu informāciju, ko attēls 38., bet šoreiz orientēta horizontāli.

## 6 Noslēguma daļa

## 6.1 Secinājumi

Ventspils Starptautiskā Radioastronomijas Centra radioteleskopi Irbenē ir veiksmīgi pielāgoti māzeru līniju novērojumiem. Ieviestā metodika ir atbilstoša pasaules standartiem. Tehniskie risinājumi izmanto jaunākas tehnoloģijas, tādas kā SDR un jaunākās publiskās datorprogrammas astronomijai.

Izmantojot abus teleskopus, ir izdevies iegūt piecus gadus ilgas māzeru plūsmas blīvuma laika sērijas. Vairums novērojumi ir veikti ar RT–16, jo RT–32 turpināja tikt modernizēts. Amplitūdas precizitātes novērtējums liecina par ap 20% lielu relatīvo kļūdu, kas ir skaidrojama ar ļoti augstu mitrumu ziemas mēnešos. Tika konstatētas būtiskas izmaiņas vairāku avotu mainīguma tendencēs, ieskaitot varbūtējas trīs avotu periodiskas svārstības.

Šī darba ietvaros tika veikts viens no pirmajiem EVN novērojumiem, kura principiālais pieteicējs (PI) ir zinātnieks no Latvijas. Tajā tika iegūti pirmie loka milisekundes izšķirtspējas attēli diviem māzeru avotiem. G90.925+1.486 rezultāti liecina par divām komponentēm ar būtiski atšķirīgu izšķirto starojumu plūsmā. Ilgtermiņa monitorings norāda uz to atšķirīgām tendencēm, vienas spožums aug lineāri, otras eksponenciāli, lai gan īsākā laika periodā abas spektra komponentes mainās izteikti korelēti. G94.602–1.796 attēls atklāja izteikti izstieptu struktūru ziemeļu dienvidu virzienā. Kā arī atsevišķie māzeru mezgli ir izstiepti tādā pašā virzienā. Balstoties uz šiem rezultātiem, pastāv augsta varbūtība, ka novērojam māzeru gredzenu, kas pret Zemi ir vērsts teju ar tā malu. Nākotnē jau veiktie atkātotie šo avotu novērojumi ļaus pētīt atsevišķo mezglu evolūciju un detalizēti analizēt abus avotus.

Analizējot kopumā piecus G78.122+3.633 EVN novērojumus autors secināja, ka novērotā māzeru mainība ir dominējoši saistīta ar plūsmas izmaiņām māzeru mezglos, nevis ar jaunu mezglu parādīšanos vai to izzušanu. Individuālu mezglu evolūcija norāda uz to vērpšanos, saraušanos un izstiepšanos. Ir norādes, ka lielāka plūsma izmaiņa no mezgliem saistīta ar izteiktāku un straujāku morfoloģijas izmaiņu.

G78.122+3.633 māzeru mezglu mainīgums un to izvietojums ir cieši saistīti. Pirmās grupas mezgli, kas izvietoti matērija virs diska un krīt uz tā, ir ar izteikti augstāku mainīgumu gan īstermiņa (mēnešos), gan ilgtermiņā (gados), nekā otrās grupas mezgli, kas izvietoti diska un matērijas izplūdes strūklas robežzonā. Salīdzinot abu grupu mezglu individuālo morfoloģiju, tika secināts, ka otrās grupas mezgli ir izmēros lielāki un vairāk savērpti. Pēdējā gada straujā mainība tikai spektra daļā, kas atbilst pirmās grupas mezgliem, un otrās grupas mezglu relatīvi neizteiktā mainība, norāda, ka, pirmās grupas mezgli ir nepiesātināti.

Analizējot iegūtās māzeru plūsmas izmaiņas piecos gados ar to attēliem un rezultātus no iepriekšējiem pētījumiem, autors secināja, ka dominējoši novēroto avotu mainīgums, ir saistīts ar atsevišķu vai vairāku māzeru mezglu aktivitātes izmaiņu, kas norāda, ka mainīguma pamatā ir izmaiņas ierosinošā infrasarkanā starojuma intensitātē. Ilgākā termiņā, ap 20 gadiem, būtisku lomu sāk spēlēt arī gāzes kustība un sistēmas rotācija.

## 6.2 Tēzes

Ieviestā metodika māzeru novērojumu veikšanai ļāva veikt 42 avotu monitoringu un pamatot atlasīto avotu novērojumus ar EVN.

- Irbenes radioteleskopi ir pielāgoti māzeru novērojumu veikšanai.
- Novērotais māzeru mainīgums ir dominējoši saistīts ar māzeru mezglu intensitātes maiņu, nevis ar to rašanos vai izzušanu.

## 6.3 Nobeigums

Darbā apskatīta plaša zinātnes tēma – metanola māzeru aktivitāte masīvu zvaigžņu veidošanas zonās. Kā arī sasniegti Latvijas mērogā būtiski metodiskie un tehniskie risinājumi VSRC teleskopu piemērošana māzeru novērojumiem. Darba rezultātiem ir novitāte un sniedz ieguldījumu nozarē.

Promocijas darbā prezentēto tēmu plašums ir skaidrojamas ar šī pētījuma virziena neilgo vēsturi VSRC, jo bija nepieciešams izveidot vietējo sistēmu, kas ļauj iegūt kvalitatīvus rezultātus, uz kuriem balstoties, var konkursa kartībā iegūt tiesības izmantot pasaules klases instrumentus un īstenot starptautisku sadarbību, kas šī darba ietvaros ir arī paveikts.

Irbenes radioteleskopu datu kvalitāte ir pieņemama. Tomēr, ir iezīmējušies izaicinājumi, jo teleskopi atrodas tuvu pie jūras un augstais mitrums būtiski samazina amplitūdas kalibrēšanas precizitāti. Papildus kalibrēšanas procedūras un instrumentāli uzlabojumi ir izstrādes stadijā.

Iegūtās māzeru plūsmas mainīguma laika rindas ir ar augstu novērojumu atkārtošanas intervālu un sniedz būtisku ieskatu 42 individuālu avotu izmaiņās piecu gadu laikā. Dalība Māzeru Monitoringa Organizācijā ir pavērusi iespējas piedalīties plašākos pētījumos, koncentrējoties uz būtiskākajiem pamanītajiem māzeru uzliesmojumiem. Autora un VSRC kolēģu nolūks ir turpināt un papildināt māzeru monitoringa programmu.

Iegūtie divu avotu pirmie augstas izšķirtspējas attēli sniedz būtiski ieskatu to dabā, ko noteikti ir pamats pētīt tālāk, novērojot avotus atkārtoti, ar mērķi noteikti māzeru mezglu īpaškustību, to globālo un atsevišķo mezglu struktūras evolūciju. Iegūtie rezultāti ir snieguši būtisku ieguldījumu G78.122+3.633 pētījumos.

## 6.4 Autora publicitāte

#### 6.4.1 Publikācijas par darba tēmu

- A Aberfelds, J Steinbergs, I Shmeld, Five years of 6.7 GHz methanol maser monitoring with Irbene radio telescopes, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 526, Issue 4, December 2023, Pages 5699–5714, https://doi.org/10.1093/mnras/stad3158
- A Aberfelds, A Bartkiewicz, M Szymczak, J Šteinbergs, G Surcis, A Kobak, M Durjasz, I Shmeld, Milliarcsecond structure and variability of methanol maser emission in three high-mass protostars, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 524, Issue 1, September 2023, Pages 599–618, https://doi.org/10.1093/mnras/stad1752
- R. A. Burns, Y. Uno, N. Sakai, J. Blanchard, Z. Rosli, G. Orosz, Y. Yonekura, Y. Tanabe, K. Sugiyama, T. Hirota, Kee-Tae Kim, A. Aberfelds, A. E. Volvach, A. Bartkiewicz, A. Caratti o Garatti, A. M. Sobolev, B. Stecklum, C. Brogan, C. Phillips, D. A. Ladeyschikov, D. Johnstone, G. Surcis, G. C. MacLeod, H. Linz, J. O. Chibueze, J. Brand, J. Eislöffel, L. Hyland, L. Uscanga, M. Olech, M. Durjasz, O. Bayandina, S. Breen, S. P. Ellingsen, S. P. van den Heever, T. R. Hunter, X. Chen, A Keplerian disk with a four-arm spiral birthing an episodically accreting high-mass protostar. Nat Astron 7, 557–568 (2023). https://doi.org/10.1038/s41550-023-01899-w
- Aberfelds, A ; Šteinbergs, J ; Shmeld, I. ; Bartkiewicz, A. , A preview look at the maser cloudlet evolution in the HMSFR IRAS 20126+4104, in Euro-Asian Astronomical Society, Astronomical and Astrophysical Transactions, Vol. 32, No. 4.., Cambridge Scientific Publishers, Coll. Astronomical and Astrophysical Transactions, France, ISBN : 9781908106827, pp. 383-388, doi : https://doi.org/10.17184/eac.5655
- Svetlana V Salii, Igor I Zinchenko, Sheng-Yuan Liu, Andrej M Sobolev, Artis Aberfelds, Yu-Nung Su, The methanol emission in the J1– J0 A–+ line series as a tracer

of specific physical conditions in high-mass star-forming regions, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 512, Issue 3, May 2022, Pages 3215–3229, https://doi.org/10.1093/mnras/stac739

- Tomoya Hirota, Pawel Wolak, Todd R Hunter, Crystal L Brogan, Anna Bartkiewicz, Michal Durjasz, Agnieszka Kobak, Mateusz Olech, Marian Szymczak, Ross A Burns, Artis Aberfelds, Giseon Baek, Jan Brand, Shari Breen, Do-Young Byun, Alessio Caratti o Garatti, Xi Chen, James O Chibueze, Claudia Cyganowski, Jochen Eislöffel, Simon Ellingsen, Naomi Hirano, Bo Hu, Ji-hyun Kang, Jeong-Sook Kim, Jungha Kim, Kee-Tae Kim, Mi Kyoung Kim, Busaba Kramer, Jeong-Eun Lee, Hendrik Linz, Tie Liu, Gordon MacLeod, Tiege P McCarthy, Karl Menten, Kazuhito Motogi, Chung-Sik Oh, Gabor Orosz, Andrey M Sobolev, Bringfried Stecklum, Koichiro Sugiyama, Kazuyoshi Sunada, Lucero Uscanga, Fanie van den Heever, Alexandr E Volvach, Larisa N Volvach, Yuan Wei Wu, Yoshinori Yonekura, Millimeter methanol emission in the high-mass young stellar object G24.33+0.14, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 74, Issue 5, October 2022, Pages 1234–1262, https://doi.org/10.1093/pasj/psac067
- Antyufeyev, O.; Bleiders, M.; Patoka, O.; Bezrukovs, V.; Aberfelds, A.; Shmeld, I.; Orbidans, A.; Steinbergs, J.; Karelin, Y.; Shukga, V. (2022), Receiver gain and system temperature instability during the calibration of spectral data at radio telescopes in C-band, in Euro-Asian Astronomical Society, Astronomical and Astrophysical Transactions, Vol. 33, No. 2.., Cambridge Scientific Publishers, Coll. Astronomical and Astrophysical Transactions, France, ISBN : 9781908106865, pp. 113-122, doi : https://doi.org/10.17184/eac.6474
- Šteinbergs, J ; Aberfelds, A ; Bleiders, M ; Shmelds, I., VIRAC maser data processing suite, Astronomical and Astrophysical Transactions, Vol. 32, No. 3., pp. 227-240, Cambridge Scientific Publishers, Coll., France, doi: https://doi.org/10.17184/eac.5643 , (2021)
- O. Patoka, O. Antyufeyev, I. Shmeld, V. Bezrukovs, M. Bleiders, A. Orbidans, A. Aberfelds, V. Shulga, New ex-OH maser detections in the northern celestial hemisphere, DOI: 10.1051/0004-6361/202037623, A&A 652 A17 (2021)
- M. Bleiders, O. Antyufeyev, O. Patoka, A. Orbidans, A. Aberfelds, J. Steinbergs, V. Bezrukovs and I.Shmeld, Spectral Line Registration Backend Based on USRP X300 Software Defined Radio, Journal of Astronomical Instrumentation, Volume 9, Issue 2, id. 2050009-773, (2020)
- Antyufeyev, O.; Bleiders, M.; Patoka, O.; Bezrukovs, V.; Aberfelds, A.; Shmeld, I.; Orbidans, A.; Steinbergs, J.; Shulga, V., Estimation of errors at the calibration of spectral data at the Irbene RT-32 radio telescope, Astronomical & Astrophysical Transactions, Issue 1, Vol. 32, p. 23-38, (2020)
- Aberfelds, A., Shmeld, I., & Berzins, K. (2017). Long term 6.7 GHz methanol maser monitoring program. Proceedings of the International Astronomical Union, 13(S336), 277-278.

## 6.4.2 Citas publikācijas

Burns, R. A.; Kobak, A.; Garatti, A. Caratti o.; Tolmachev, A.; Volvach, A.; Alakoz, A.; Wootten, A.; Bisyarina, A.; Dzodzomenyo, A.; Sobolev, A.; Bartkiewicz, A.; Aberfelds, A.; Stecklum, B.; Kramer, B.; Macdonald, C.; Cyganowski, C.; Paco, C.;

Garcia Miro, C, Recent updates on the Maser Monitoring Organisation, European VLBI Network Mini-Symposium and Users' Meeting 2021, 12-14 July, 2021

• J. Steinbergs; A. Aberfelds; V. Bezrukovs; K. Skirmante; A. Orbidans; I. Shmeld and R.A. Burns, Single-baseline interferometer for mJy observations, European VLBI Network Mini-Symposium and Users' Meeting 2021, 12-14 July, 2021

## 6.4.3 Dalība starptautiskajās konferencēs

- A. Aberfelds, K. Berzins and I. Shmeld, Initial methanol maser measurements with VI-RAC RT32 Irbene radio telescope, Young European Radio Astronomers Conference (YE-RAC), Bonna, Vācija (2016)
- A. Aberfelds, K. Berzins and I. Shmeld, Long term methanol maser monitoring program, Internacional Astronomy Uninon (IAU) 336. symposium Astrophysical Masers: Unlocking the Mysteries of the Univers, Kaljari, Italija (2017)
- A. Aberfelds and I. Shmeld, First year of 6.7 GHz methanol maser monitoring, European Week of Astronomy and Space Science (EWAS 2018), Liverpūle, Lielbritānija (2018)
- A. Aberfelds and K. Berzins and I. Shmeld, Metanol maser observations with Ventspils radio telescopes, Space physics, Jekaterinburga, Krievijas Federācija (2019)
- A. Aberfelds, Two year results of methanol maser monitoring program by Irbene radio telescopes, 6th Gamow International Conference in Odessa: "New Trends in Astrophysics, Cosmology and Radioastronomy after Gamow" un 19th Gamow Summer School: "Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Radioastronomy and Astrobiology, Odesa, Ukraina (2019)
- A. Aberfelds and I. Shmeld, Cloudlet evolution in IRAS 20126+4104 during last 15 years and its periodic variability, 15th European VLBI Network (EVN) Symposium and the EVN Users Meeting "15th EVN Symposium", Korka, Īrija (2022)
- A. Aberfelds, A. Bartkiewicz, M. Szymczak, J. Šteinbergs and I. Shmeld, New insides of 6.7 GHz methanol maser variability in IRAS 20126+4104, International Astronomical Union Symposium 380 Cosmic Masers: Proper Motion toward the Next-Generation Large Projects, Kagošima, Japāna (2023)

# Literatūras saraksts

Aller, M. F., Aller, H. D., and Hughes, P. A.: 2003, The Astrophysical Journal 586(1), 33-51

- Antyufeyev, O., Bleiders, M., Patoka, D., Bezrukovs, V., Aberfelds, A., Shmeld, I., Orbidans, A., Steinbergs, J., Karelin, Y., and Shulga, V.: 2022, Astronomical and Astrophysical Transactions 33(2), 113
- Araya, E. D., Hofner, P., Goss, W. M., Kurtz, S., Richards, A. M. S., Linz, H., Olmi, L., and Sewiło, M.: 2010, *The Astrophysical Journal Letters* 717(2), L133
- Bally, J. and Zinnecker, H.: 2005, The Astronomical Journal 129(5), 2281
- Bartkiewicz, A., Sanna, A., Szymczak, M., Moscadelli, L., van Langevelde, H. J., and Wolak, P.: 2020, *Astronomy & Astrophysics* 637, A15
- Bartkiewicz, A., Szymczak, M., and van Langevelde, H. J.: 2016, *Astronomy & Astrophysics* 587, A104
- Bate, M. R. and Bonnell, I. A.: 2005, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **356(4)**, 1201
- Bayandina, O. S., Brogan, C. L., Burns, R. A., Chen, X., Hunter, T. R., Kurtz, S. E., MacLeod, G. C., Sobolev, A. M., Sugiyama, K., Val'tts, I. E., and Yonekura, Y.: 2022, *The Astronomical Journal* 163(2), 83
- Beuther, H., Mottram, J. C., Ahmadi, A., Bosco, F., Linz, H., Henning, T., Klaassen, P., Winters, J. M., Maud, L. T., Kuiper, R., Semenov, D., Gieser, C., Peters, T., Urquhart, J. S., Pudritz, R., Ragan, S. E., Feng, S., Keto, E., Leurini, S., Cesaroni, R., Beltran, M., Palau, A., Sánchez-Monge, Á., Galvan-Madrid, R., Zhang, Q., Schilke, P., Wyrowski, F., Johnston, K. G., Longmore, S. N., Lumsden, S., Hoare, M., Menten, K. M., and Csengeri, T.: 2018, *Astronomy & Astrophysics* 617, A100
- Bleiders, M., Antyufeyev, O., Patoka, O., Orbidans, A., Aberfelds, A., Steinbergs, J., Bezrukovs, V., and Shmeld, I.: 2020, *Journal of Astronomical Instrumentation* **09(02)**, 2050009
- Brandl, B., Sams, B. J., Bertoldi, F., Eckart, A., Genzel, R., Drapatz, S., Hofmann, R., Loewe, M., and Quirrenbach, A.: 1996, *The Astrophysical Journal* 466, 254
- Breen, S. L., Ellingsen, S. P., Contreras, Y., Green, J. A., Caswell, J. L., Stevens, J. B., Dawson, J. R., and Voronkov, M. A.: 2013, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 435(1), 524
- Breen, S. L., Fuller, G. A., Caswell, J. L., Green, J. A., Avison, A., Ellingsen, S. P., Gray, M. D., Pestalozzi, M., Quinn, L. J., Richards, A. M. S., Thompson, M. A., and Voronkov, M. A.: 2015, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **450**(4), 4109
- Caswell, J. L., Vaile, R. A., and Ellingsen, S. P.: 1995, *Publications of the Astronomical Society* of Australia 12, 37
- Cesaroni, R., Felli, M., Testi, L., Walmsley, C. M., and Olmi, L.: 1997, Astronomy & Astrophysics 325, 725
- Cesaroni, R., Galli, D., Neri, R., and Walmsley, C. M.: 2014, Astronomy & Astrophysics 566, A73

- Cesaroni, R., Massi, F., Arcidiacono, C., Beltrán, M. T., McCarthy, D., Kulesa, C., Boutsia, K., Paris, D., Quirós-Pacheco, F., and Xompero, M.: 2013, *Astronomy & Astrophysics* 549, A146
- Cesaroni, R., Neri, R., Olmi, L., Testi, L., Walmsley, C. M., and Hofner, P.: 2005, Astronomy & Astrophysics 434(3), 1039
- Clarke, A. J., Lumsden, S. L., Oudmaijer, R. D., Busfield, A. L., Hoare, M. G., Moore, T. J. T., Sheret, T. L., and Urquhart, J. S.: 2006, *Astronomy & Astrophysics* **457(1)**, 183–188
- Cohen, M.: 1977, The Astrophysical Journal 215, 533
- Cragg, D. M., Sobolev, A. M., and Godfrey, P. D.: 2002, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 331(2), 521
- Cragg, D. M., Sobolev, A. M., and Godfrey, P. D.: 2005, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 360(2), 533
- Dale, J. E. and Davies, M. B.: 2006, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **366(4)**, 1424
- De Buizer, J. M., Redman, R. O., Longmore, S. N., Caswell, J., and Feldman, P. A.: 2009, *Astronomy & Astrophysics* **493(1)**, 127
- Elitzur, M.: 1992, Astronomical masers, Vol. 170, Springer Dordrecht
- Fujisawa, K., Aoki, N., Nagadomi, Y., Kimura, S., Shimomura, T., Takase, G., Sugiyama, K., Motogi, K., Niinuma, K., Hirota, T., and Yonekura, Y.: 2014, *Publications of the Astronomi*cal Society of Japan 66(6), 109
- Fujisawa, K., Yonekura, Y., Sugiyama, K., Horiuchi, H., Hayashi, T., Hachisuka, K., Matsumoto, N., and Niinuma, K.: 2015, *The Astronomer's Telegram* 8286, 1
- Gieser, C., Beuther, H., Semenov, D., Ahmadi, A., Suri, S., Möller, T., Beltrán, M. T., Klaassen, P., Zhang, Q., Urquhart, J. S., Henning, T., Feng, S., Galván-Madrid, R., de Souza Magalhães, V., Moscadelli, L., Longmore, S., Leurini, S., Kuiper, R., Peters, T., Menten, K. M., Csengeri, T., Fuller, G., Wyrowski, F., Lumsden, S., Sánchez-Monge, Á., Maud, L., Linz, H., Palau, A., Schilke, P., Pety, J., Pudritz, R., Winters, J. M., and Piétu, V.: 2021, *Astronomy & Astrophysics* 648, A66
- Goedhart, S., Gaylard, M. J., and van der Walt, D. J.: 2004, *Monthly Notices of the Royal* Astronomical Society **355(2)**, 553
- Gundermann, E. J.: 1965, Ph.D. thesis, Harvard University
- Himwich, E.: 2000, in F. Takahashi (ed.), International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2000 General Meeting Proceedings, pp 86–90
- Hu, B., Menten, K. M., Wu, Y., Bartkiewicz, A., Rygl, K., Reid, M. J., Urquhart, J. S., and Zheng, X.: 2016, *The Astrophysical Journal* **833(1)**, 18
- Inayoshi, K., Sugiyama, K., Hosokawa, T., Motogi, K., and Tanaka, K. E. I.: 2013, *The Astrophysical Journal* **769(2)**, L20

- Keimpema, A., Kettenis, M., Pogrebenko, S., Campbell, R., Cimó, G., Duev, D., Eldering, B., Kruithof, N., van Langevelde, H., Marchal, D., Molera Calvés, G., Ozdemir, H., Paragi, Z., Pidopryhora, Y., Szomoru, A., and Yang, J.: 2015, *Experimental Astronomy* 39(2), 259, VK: BIBCODE: 2015ExA....39..259K; DOI: 10.1007/s10686-015-9446-1; eprintid: arXiv:1502.00467
- Keto, E.: 2005, The Astrophysical Journal 635(2), 1373
- Keto, E.: 2007, The Astrophysical Journal 666(2), 976
- Keto, E. and Wood, K.: 2006, The Astrophysical Journal 637(2), 850
- Lada, C. J.: 1987, in M. Peimbert and J. Jugaku (eds.), Star Forming Regions, Vol. 115, p. 1
- Lada, C. J. and Wilking, B. A.: 1984, The Astrophysical Journal 287, 610
- Liu, Y., San Liang, X., and Weisberg, R. H.: 2007, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 24(12), 2093
- Menten, K. M.: 1991, The Astrophysical Journal Letters 380, L75
- Minier, V., Ellingsen, S. P., Norris, R. P., and Booth, R. S.: 2003, *Astronomy & Astrophysics* 403, 1095
- Moscadelli, L., Cesaroni, R., Rioja, M. J., Dodson, R., and Reid, M. J.: 2011, Astronomy & Astrophysics 526, A66
- Moscadelli, L., Sanna, A., Goddi, C., Walmsley, M. C., Cesaroni, R., Caratti o Garatti, A., Stecklum, B., Menten, K. M., and Kraus, A.: 2017, *Astronomy & Astrophysics* 600, L8
- Murakawa, K., Lumsden, S. L., Oudmaijer, R. D., Davies, B., Wheelwright, H. E., Hoare, M. G., and Ilee, J. D.: 2013, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **436(1)**, 511
- Olech, M., Szymczak, M., Wolak, P., Sarniak, R., and Bartkiewicz, A.: 2019, *Monthly Notices* of the Royal Astronomical Society **486(1)**, 1236
- Parfenov, S. Y. and Sobolev, A. M.: 2014, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **444(1)**, 620
- Perley, R. A. and Butler, B. J.: 2013, The Astrophysical Journal Supplement Series 204(2), 19
- Pestalozzi, M. R., Elitzur, M., and Conway, J. E.: 2009, Astronomy & Astrophysics 501(3), 999
- Purcell, C.: 2007, Phd thesis, UNSW School of Physics, Example City, CA, Available at https://unsworks.unsw.edu.au/entities/publication/ 662a36a9-8538-461a-9066-afdc1cf385f6
- Purser, S. J. D., Lumsden, S. L., Hoare, M. G., and Kurtz, S.: 2021, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 504(1), 338
- Reid, M. J., Menten, K. M., Brunthaler, A., Zheng, X. W., Dame, T. M., Xu, Y., Li, J., Sakai, N., Wu, Y., Immer, K., and et al.: 2019, *The Astrophysical Journal* 885(2), 131
- Scargle, J. D.: 1982, The Astrophysical Journal 263, 835
- Sebastian, K., Nabil, F., Alexey, B., Christopher, T., and Gilbert, P. C.: 2023, *PyCWT*, https://github.com/regeirk/pycwt

- Shimoikura, T., Kobayashi, H., Omodaka, T., Diamond, P. J., Matveyenko, L. I., and Fujisawa, K.: 2005, *The Astrophysical Journal* 634(1), 459
- Slysh, V. I., Val'tts, I. E., Kalenskii, S. V., Voronkov, M. A., Palagi, F., Tofani, G., and Catarzi, M.: 1999, Astronomy and Astrophysics Supplement Series 134, 115
- Slysh, V. I., Voronkov, M. A., Val'tts, I. E., and Migenes, V.: 2002, Astronomy Reports 46(12), 969
- Stetson, P. B.: 1996, Publications of the Astronomical Society of the Pacific 108, 851
- Sugiyama, K., Yonekura, Y., Motogi, K., Saito, Y., Momose, M., Honma, M., Hirota, T., Uchiyama, M., Tanaka, K. E. I., Kramer, B. H., Asanok, K., Jaroenjittichai, P., and Fujisawa, K.: 2019, *Journal of Physics: Conference Series* 1380(1), 012057
- Surcis, G., Vlemmings, W. H. T., van Langevelde, H. J., Moscadelli, L., and Hutawarakorn Kramer, B.: 2014, Astronomy & Astrophysics 563, A30
- Szymczak, M., Hrynek, G., and Kus, A. J.: 2000, Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 143(2), 269
- Szymczak, M., Olech, M., Sarniak, R., Wolak, P., and Bartkiewicz, A.: 2017, *Monthly Notices* of the Royal Astronomical Society **474(1)**, 219
- Szymczak, M., Olech, M., Wolak, P., Bartkiewicz, A., and Gawroński, M.: 2016, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **459(1)**, L56–L60
- Szymczak, M., Wolak, P., and Bartkiewicz, A.: 2015, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 448(3), 2284
- Szymczak, M., Wolak, P., Bartkiewicz, A., and Borkowski, K. M.: 2012, Astronomische Nachrichten 333(7), 634
- Szymczak, M., Wolak, P., Bartkiewicz, A., and van Langevelde, H. J.: 2011, Astronomy & Astrophysics 531, L3
- Thompson Richard, M. and Swenson George Jr : 2001, Very-Long-Baseline Interferometry, John Wiley & Sons, Ltd
- Torrence, C. and Compo, G. P.: 1998, *Bulletin of the American Meteorological Society* **79(1)**, 61
- Uchiyama, M., Yamashita, T., Sugiyama, K., Nakaoka, T., Kawabata, M., Itoh, R., Yamanaka, M., Akitaya, H., Kawabata, K., Yonekura, Y., Saito, Y., Motogi, K., and Fujisawa, K.: 2019, *Publications of the Astronomical Society of Japan* 72(1), 4
- Val'tts, I. E., Slysh, V. I., Voronkov, M. A., and Migenes, V.: 2002, *ASP Conference Proceedings* **279**, 279
- Val'tts, I. E., Ellingsen, S. P., Slysh, V. I., Kalenskii, S. V., Otrupcek, R., and Voronkov, M. A.: 1999, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 310(4), 1077–1086
- van der Walt, D. J.: 2011, The Astronomical Journal 141(5), 152
- van der Walt, D. J., Sobolev, A. M., and Butner, H.: 2007, Astronomy & Astrophysics 464(3), 1015

- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., van der Walt, S. J., Brett, M., Wilson, J., Millman, K. J., Mayorov, N., Nelson, A. R. J., Jones, E., Kern, R., Larson, E., Carey, C. J., Polat, İ., Feng, Y., Moore, E. W., VanderPlas, J., Laxalde, D., Perktold, J., Cimrman, R., Henriksen, I., Quintero, E. A., Harris, C. R., Archibald, A. M., Ribeiro, A. H., Pedregosa, F., van Mulbregt, P., and SciPy 1.0 Contributors: 2020, *Nature Methods* 17, 261
- Vlemmings, W. H. T., Surcis, G., Torstensson, K. J. E., and van Langevelde, H. J.: 2010, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 404(1), 134
- Vorobyov, E. I. and Basu, S.: 2006, The Astrophysical Journal 650(2), 956
- Šteinbergs, J., Aberfelds, A., Bleiders, M., and Shmeld, I.: 2021, Astronomical and Astrophysical Transactions 32(3), 227
- Weinreb, S., Meeks, M. L., and Carter, J. C.: 1965, Nature 208(5009), 440
- Wilson, T. L., Rohlfs, K., and Hüttemeister, S.: 2013, Tools of Radio Astronomy, Springer
- Winkel, B., Kraus, A., and Bach, U.: 2012, Astronomy & Astrophysics 540, A140
- Wolak, P., Olech, M., Szymczak, M., Bartkiewicz, A., and Durjasz, M.: 2019, *The Astronomer's Telegram* **13080**, 1
- Wu, Y. W., Reid, M. J., Sakai, N., Dame, T. M., Menten, K. M., Brunthaler, A., Xu, Y., Li, J. J., Ho, B., Zhang, B., Rygl, K. L. J., and Zheng, X. W.: 2019, *The Astrophysical Journal* 874(1), 94
- Yang, K., Chen, X., Shen, Z.-Q., Li, X.-Q., Wang, J.-Z., Jiang, D.-R., Li, J., Dong, J., Wu, Y.-J., and Qiao, H.-H.: 2019, Astrophysical Journal Supplement Series 241(2), 18
- Yonekura, Y., Saito, Y., Sugiyama, K., Soon, K. L., Momose, M., Yokosawa, M., Ogawa, H., Kimura, K., Abe, Y., Nishimura, A., Hasegawa, Y., Fujisawa, K., Ohyama, T., Kono, Y., Miyamoto, Y., Sawada-Satoh, S., Kobayashi, H., Kawaguchi, N., Honma, M., Shibata, K. M., Sato, K., Ueno, Y., Jike, T., Tamura, Y., Hirota, T., Miyazaki, A., Niinuma, K., Sorai, K., Takaba, H., Hachisuka, K., Kondo, T., Sekido, M., Murata, Y., Nakai, N., and Omodaka, T.: 2016, *Publications of the Astronomical Society of Japan* 68(5), 74
- Zinnecker, H. and Yorke, H. W.: 2007, Annual Review of Astronomy and Astrophysics 45(1), 481

# A Māzeru mainīguma tabula

$V_P(km s^{-1})$	S <sub>P</sub> (Jy)	VI	FI	$\chi^2_r$
G22.357+0.00	66 (MJD <sub>s</sub> =	=58220 T	$r_{\rm s} = 4.462,$	
N=202, C(mo	$(nth^{-1})=3$	.773)		
78.7	2.60	0.74	0.70	0.84
80.1	18.49	0.40	0.46	1.11
88.3	2.83	0.58	0.53	0.59
G24.329+0.14	44 (MJD <sub>s</sub> =	=58731 T	s = 3.060,	
N=236, C(mo	$(nth^{-1})=6$	.426)		
108.2	2.12	0.19	0.64	0.37
109.4	2.82	0.47	0.57	0.42
110.2	9.30	0.73	0.49	1.96
111.2	4.70	0.61	0.66	1.05
111.8	4.13	0.76	0.41	0.36
112.8	5.58	0.80	0.62	1.22
113.5	18.73	0.94	1.50	33.70
115.4	23.76	0.88	1.90	58.40
G25.709+0.04	44 (MJD <sub>s</sub> =	=58846 T	$r_{\rm s} = 2.751$ ,	
N=108, C(mo	$(nth^{-1})=3$	.271)		
89.8	50.14	0.04	0.09	0.15
91.3	12.65	0.16	0.22	0.27
92.0	26.63	0.07	0.14	0.20
93.3	43.55	-0.05	0.17	0.28
94.0	64.57	-0.03	0.12	0.24
95.5	321.65	-0.04	0.06	0.22
95.7	328.85	-0.01	0.07	0.17
97.9	7.48	0.12	0.28	0.15
G25.64+1.05	$(MJD_s=5)$	$8024 T_{s} =$	5.003,	
N=253, C(mo	$(nth^{-1})=4$	.214)		
38.6	2.42	0.43	0.89	0.34
40.3	4.38	0.15	0.56	0.34
41.8	129.75	0.07	0.17	0.99
42.5	3.06	0.35	0.58	0.36
G30.99-0.08 (	$(MJD_s=57)$	$7950 T_{s} =$	5.202,	
N=248, C(mo	$(nth^{-1})=3$	.972)		
74.8	7.91	0.01	0.36	0.81
77.8	12.69	0.45	0.59	3.48
88.4	4.87	0.63	0.61	1.55
G32.04+0.06	$(MJD_s=5)$	$8846 T_{s} =$	2.748,	
N=117, C(mo	$(nth^{-1})=3$	.547)		
101.1	47.37	0.10	0.16	0.35
92.7	172.25	0.40	0.50	2.50
94.7	5.36	0.47	0.51	0.45
95.5	9.30	0.23	0.28	0.39

Tabula 12: Iegūto māzeru mainīguma laika sēriju statistikas parametri

	140414 12	(impini	Jan 10)	
$V_P(km s^{-1})$	$S_P(Jy)$	VI	FI	$\chi^2_r$
98.4	96.06	0.07	0.07	0.28
99.5	15.12	0.25	0.38	0.76
G32.744-0.07	$76 (MJD_s =$	$=57825 T_{s}$	<sub>s</sub> = 5.596,	
N=1016, C(n	$nonth^{-1}) =$	15.131)		
30.5	15.01	-0.04	0.14	0.15
32.1	30.67	0.15	0.06	0.43
33.5	38.56	0.01	0.08	0.23
38.1	37.89	0.09	0.11	0.26
38.3	40.43	0.10	0.04	0.21
38.5	42.97	0.03	0.07	0.26
39.2	16.88	0.09	0.07	0.17
G33.641-0.22	$28 (MJD_s =$	$=57821 T_{s}$	= 5.707,	
N=1136, C(m	$nonth^{-1}) =$	16.586)		
59.3	18.78	0.83	1.05	17.86
59.6	15.40	0.73	0.77	2.18
60.3	161.73	0.21	0.50	2.66
61.0	49.98	0.49	0.65	4.56
62.7	18.39	0.32	0.18	0.56
63.2	15.21	0.39	0.16	0.28
G35.20-1.74	$(MJD_s = 57)$	$7956 T_{s} =$	5.186,	
N=277, C(ma	$pnth^{-1})=4$	.451)		
41.0	3.11	0.81	0.58	1.50
43.1	23.70	0.19	0.30	0.66
43.8	14.15	0.62	0.45	5.42
44.1	11.79	0.52	0.34	2.08
44.6	35.31	0.08	0.18	0.33
44.9	25.62	0.14	0.18	0.73
45.3	17.51	0.02	0.26	0.54
G34.396+0.2	$22 (MJD_s)$	=58312 T	$r_{s} = 4.210,$	
N=204, C(ma	$pnth^{-1})=4$	.038)		
55.6	24.10	0.42	0.52	2.34
62.5	5.55	0.17	0.27	0.25
G36.705+0.0	96 (MJD <sub>s</sub> =	=58289 T	$r_{s} = 4.273,$	
N=191, C(ma	$pnth^{-1})=3$	.725)		
62.2	2.56	0.25	0.43	0.41
G37.479-0.10	$05 (MJD_s =$	57881 T	= 5.393,	
N=256, C(ma	$pnth^{-1})=3$	.956)		
50.0	2.58	-0.31	0.17	0.55
52.3	1.87	-0.51	0.54	0.41
56.9	9.47	-0.06	0.18	0.32
58.3	4.85	-0.07	0.05	0.47
59.3	4.90	-0.16	0.25	0.24
60.1	1.99	0.21	0.46	0.29
62.0	9.11	0.13	0.35	0.28
62.5	7.38	-0.06	0.38	0.26
G37.43+1.52	$(MJD_s=5)$	$8846 T_{s} =$	2.748,	

Tabula 12 (turpinājums)

		· · ·	, ,	
$V_P(km s^{-1})$	S <sub>P</sub> (Jy)	VI	FI	$\chi^2_r$
N=111, C(mo	$(nth^{-1})=3.$	366)		
41.3	360.69	0.03	0.10	0.21
G37.55+0.20	$(MJD_s=58)$	$3298 T_{s} =$	4.246,	
N=198, C(mo	$(nth^{-1})=3.$	.886)		
83.8	6.25	0.40	0.56	1.13
84.8	5.81	0.20	0.42	0.73
86.4	3.60	0.28	0.34	0.51
G43.149+0.0	13 (MJD <sub>s</sub> =	=57881 <i>T</i>	$r_{s} = 5.398,$	
N=265, C(mo	$(nth^{-1})=4.$	091)		
13.2	16.11	-0.04	0.15	0.18
18.9	20.51	-0.06	0.14	0.30
19.6	12.24	0.16	0.32	0.33
20.2	8.53	0.03	0.23	0.28
8.4	16.17	-0.02	0.22	0.23
9.3	37.00	0.03	0.19	0.29
G43.796-0.12	$27 (MJD_s =$	58319 T	s = 4.189,	
N=204, C(mo	$(nth^{-1})=4.$	059)		
39.6	15.97	0.18	0.16	0.41
40.0	16.71	0.14	0.15	0.47
40.4	19.48	0.00	0.08	0.30
43.0	15.27	0.03	0.15	0.23
G45.071+0.0	$13 (MJD_s =$	=58854 T	$T_s = 2.724$ ,	
N=112, C(mo	$(nth^{-1}) = 3.$	426)	5	
57.8	40.06	-0.12	0.10	0.16
G49.04-1.08	$(MJD_s=58)$	$389 T_s =$	1.251,	
N=61, C(mon	$(h^{-1}) = 4.0$	63)	ŕ	
35.6	14.25	0.14	0.20	0.95
36.5	8.49	0.24	0.13	0.46
37.1	13.47	0.46	0.34	2.96
38.4	4.53	0.65	1.12	5.25
39.2	5.99	0.57	0.65	3.96
40.9	1.43	0.53	0.67	1.10
G196.454-01.	.67 (MJD <sub>s</sub>	=588427	$T_{\rm s} = 2.774$	,
N=88, C(mon	$(th^{-1})=2.6$	44)	~ · ·	
14.7	13.85	0.60	0.76	2.85
15.2	10.64	0.35	0.42	0.89
15.5	10.26	0.52	0.59	1.56
G49.490-0.38	$38 (MJD_s =$	57885 T	s = 5.388.	
N=297, C(mo	$(h^{-1}) = 4.$	594)	~ >	
50.1	11.87	0.19	0.23	0.21
51.8	55.05	0.03	0.22	0.34
56.2	39.85	0.04	0.25	0.44
57.9	128.99	0.22	0.22	1.61
58.3	147.05	0.02	0.23	0.83
58.8	274.17	0.41	0.49	5.37
59.3	842.08	0.00	0.14	0.49

Tabula 12 (turpinājums)

			/	
$V_P(km s^{-1})$	$S_P(Jy)$	VI	FI	$\chi^2_r$
G192.60-0.05	$(MJD_s=5)$	$57856 T_{s} =$	5.476,	
N=368, C(mo	$(nth^{-1})=5$	.600)		
2.3	7.28	0.92	2.52	8.39
4.2	7.17	0.67	0.79	1.71
4.8	15.74	0.63	0.75	2.56
5.9	176.49	0.37	0.52	3.05
6.3	162.01	0.81	1.59	17.18
7.5	4.51	0.97	4.24	6.32
G189.030+0.	784 (MJD	<sub>s</sub> =578397	$T_{\rm s} = 2.567$	7,
N=155, C(mo	$(nth^{-1})=5$	.032)		
8.8	16.80	0.55	0.12	1.03
9.6	14.55	0.28	0.28	2.48
G59.783+0.0	65 (MJD <sub>s</sub> :	=58854 T	s=2.724,	
N=113, C(mo	$(nth^{-1})=3$	.457)		
15.4	3.62	0.56	0.60	0.98
17.1	28.46	-0.05	0.12	0.14
19.2	26.52	-0.02	0.26	0.31
19.8	16.44	0.59	0.79	4.60
24.7	33.57	0.21	0.38	1.17
27.1	30.28	-0.08	0.15	0.13
G69.540-0.97	$^{\prime}6 (MJD_s =$	=57832 T <sub>s</sub>	= 5.530,	
N=206, C(mo	$(nth^{-1})=3$	.104)		
0.0	6.54	0.42	0.19	0.47
1.3	3.95	0.16	0.51	0.35
14.6	112.12	0.15	0.16	0.44
G174.20-0.08	$B (MJD_s = 5)$	$57832 T_{s} =$	5.542,	
N=261, C(mo	$(nth^{-1})=3$	.925)		
1.4	43.69	0.50	0.37	3.88
3.8	9.27	0.60	0.56	3.30
4.6	5.19	0.15	0.24	0.40
G173.482+2.4	446 (MJD	s=578217	$T_{\rm s} = 5.572$	2,
N=250, C(ma)	$(nth^{-1})=3$	.739)		
-11.8	6.78	0.18	0.40	0.49
-13.0	25.46	0.36	0.29	1.57
-13.8	18.91	0.15	0.43	1.02
-7.5	9.86	0.41	0.73	3.78
G73.06+1.80	$(MJD_s=5)$	$8859 T_{s} =$	2.709,	
N=137, C(mo	$(nth^{-1})=4$	.214)		
-2.7	1.65	0.68	0.76	0.67
6.0	7.42	0.36	0.55	1.20
G75.782+0.34	43 (MJD <sub>s</sub> :	=57885 T	s = 5.379,	
N=313, C(mo	$(nth^{-1})=4$	.849)		
-0.1	4.86	0.68	0.58	2.18
-0.4	6.68	0.35	0.28	0.92
-2.6	63.86	0.14	0.04	0.69
0.7	25.71	0.42	0.22	2.35

Tabula 12 (turpinājums)

$\mathbf{V}$ (1 m $a^{-1}$ )	$\mathbf{C}$ (I-r)	1/1		
$\frac{V_{P}(KM S^{-1})}{(770, 122 + 2)}$	$\frac{S_P(Jy)}{22}$	VI 57022.7	$\frac{FI}{5.540}$	$\chi_r^2$
G/8.122+3.6.	$33 (MJD_s^{=})$	=5/8321	s = 5.549,	
N=882, C(mc)	$pnth^{-1})=1.$	3.247)	<b>•</b> • •	0.61
-6.1	27.70	0.24	0.20	0.61
-6.7	29.15	0.74	0.67	11.66
-7.0	18.42	0.62	0.64	4.87
-7.7	24.06	0.97	2.48	65.51
G81.88+0.78	$(MJD_s=5)$	7834 $T_{s}$ =	5.525,	
N=300, C(ma)	$(nth^{-1})=4$	.525)		
3.5	83.53	0.33	0.42	1.34
4.1	219.65	0.38	0.47	1.92
4.6	311.00	0.16	0.27	0.80
5.2	105.18	0.17	0.22	0.57
5.8	99.84	0.15	0.24	0.62
7.3	264.17	0.34	0.37	1.92
9.5	36.10	0.52	0.66	2.87
G188.95+0.89	$9 (MJD_s = 3)$	57993 T <sub>s</sub>	= 5.101,	
N=223. C(ma)	$(nth^{-1}) = 3$	.643)	,	
10.5	478.64	0.28	0.23	1.60
10.8	868 89	0.11	0.32	1 30
11.6	13 51	0.46	0.37	1 18
11.8	8 32	0.71	0.52	2.88
8 5	6.88	0.17	0.32	0.36
9.7	39.52	0.06	0.20	0.50
$\frac{5.7}{685411\pm0.00}$	$\frac{37.52}{12}$	=58842 T	r = 2.832	0.75
N=698 C(mc)	$(1013D_{\rm S})$	0.536)	s 2.052,	
-28.6	5 15	0.330)	0.38	0.38
-28.0	9.19 84 00	0.04	0.56	0.38
-29.4	2 08	0.01	0.10	0.21
-30.8	5.90 00.06	0.50	0.37	0.52
-31.0	90.00	0.40	0.38	5.08
-33.0	2.42	0.04	0.00	0.40
G90.925+1.43	86 (MJD <sub>s</sub> =	=5/885 1	s = 5.3/9,	
N=305, C(mc)	$pnth^{-1})=4.$	.725)	0.44	2 00
-69.2	61.49	0.36	0.44	3.99
-/0.4	29.79	0.37	0.39	1.60
G94.602-1.79	$P6 (MJD_s =$	58027 T	<sub>s</sub> = 4.996,	
N=351, C(mo)	$pnth^{-1})=5.$	.854)		
-40.9	5.30	0.14	0.45	0.68
-43.0	2.88	0.73	0.26	0.43
-43.7	3.74	0.43	0.47	0.59
G173.482+2.446 (MJD <sub>s</sub> =57821 $T_s$ = 5.572,				
N=250, C(mo	$(nth^{-1})=3$	.739)		
-11.8	6.78	0.18	0.40	0.49
-13.0	25.46	0.36	0.29	1.57
-13.8	18.91	0.15	0.43	1.02
-7.5	9.86	0.41	0.73	3.78
G111.26-0.77	$(MJD_s=5)$	$7828 T_{s}$ =	= 5.535,	

Tabula 12 (turpinājums)

<b>TT</b> (1 1)	<u> </u>			<b>`</b>
$\frac{V_{\rm P}(\rm km~s^{-1})}{\rm N_{\rm P}(\rm s^{-1})}$	$\frac{S_P(Jy)}{J_F(J_F)}$	$\frac{VI}{742}$	FI	$\chi_r^2$
N=315, C(max)	$pnth^{-1})=4.$	(43)	1.0.0	0.25
-36.0	0.68	0.76	1.36	0.35
-38.0	1.64	0.59	0.66	0.69
G111.542+0.7	$/77 (MJD_s)$	=57832	$T_{\rm s} = 5.541$	,
N=276, C(mc)	$pnth^{-1})=4.$	151)	c • -	
-48.2	10.62	0.34	0.39	1.03
-48.8	9.82	0.40	0.40	1.15
-56.1	74.46	0.37	0.26	3.11
-56.8	103.97	0.14	0.31	0.62
-57.6	177.57	0.16	0.35	1.14
-58.0	247.68	0.19	0.31	0.72
-60.7	130.11	0.11	0.29	0.56
-61.3	165.87	0.20	0.44	1.70
G133.947+1.	064 (MJD	<sub>s</sub> =57841	$T_{\rm s} = 5.520$	,
N=297, C(ma	$(nth^{-1})=4.$	484)		
-41.8	40.17	0.41	0.49	2.13
-42.2	289.10	0.62	1.25	10.33
-42.6	1376.89	0.29	0.33	2.45
-43.0	2230.47	0.12	0.36	1.25
-43.5	2800.11	0.11	0.33	1.15
-44.6	3366.63	0.11	0.33	1.14
-45.1	2612.50	0.12	0.35	1.27
-45.5	2090.53	0.09	0.29	1.02
G109.871+2.	114 $\overline{(MJD_s)}$	=57829	$T_{\rm s} = 5.684$	,
N=1504, C(m)	$(onth^{-1})=2$	22.049)		
-1.8	225.67	0.45	0.72	18.04
-2.4	1026.05	0.59	0.83	50.19
-3.7	265.84	0.41	0.43	5.41
-4.0	418.37	0.18	0.30	1.17
-4.7	23.86	0.85	0.89	15.04
G121.298+0.	659 (MJD <sub>s</sub>	=57841	$T_{\rm s} = 5.605$	,
N=289, C(ma	$(nth^{-1})=4.$	297)		
-22.4	1.86	0.67	0.44	0.64
-24.4	8.08	0.44	0.51	1.36
-24.9	7.72	0.85	1.00	10.55
-25.8	5.09	0.87	1.74	6.74
-27.0	1.70	0.34	0.51	0.39
-27.5	1.43	0.64	0.43	0.57
G107.298+5.	639 (MJD <sub>s</sub>	=58298	$T_{\rm s} = 4.285$	,
N=1823, C(m	$(onth^{-1}) = ($	35.452)		
-11.0	1.53	0.61	0.81	1.10
-16.7	1.71	0.91	3.09	1.96
-7.4	27.04	0.99	4.81	307.60
-8.6	4.30	0.88	1.76	8.21
-9.2	7.46	0.98	6.76	23.56
G108.184+5.	519 (MJD <sub>s</sub>	<sub>s</sub> =57839	$T_{\rm s} = 5.523$	,

Tabula 12 (turpinājums)

S <sub>P</sub> (Jy)	VI	FI	$\chi^2_r$
$onth^{-1})=4$	.255)		
17.20	0.58	0.36	4.33
33.57	0.40	0.18	3.65
15.56	0.36	0.47	1.12
	$\frac{S_{P}(Jy)}{onth^{-1})=4}$ 17.20 33.57 15.56	$\begin{array}{c c} \hline S_{\rm P}({\rm Jy}) & VI \\ \hline onth^{-1}) = 4.255) \\ 17.20 & 0.58 \\ 33.57 & 0.40 \\ 15.56 & 0.36 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$

Tabula 12 (turpinājums)