



**LATVIJAS
UNIVERSITĀTE**

**Promocijas darba
kopsavilkums**

Artis Aberfelds

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

Rīga 2024



LATVIJAS UNIVERSITĀTE

FIZIKAS, MATEMĀTIKAS UN OPTOMETRIJAS FAKULTĀTE

Artis Aberfelds

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

PROMOCIJAS DARBA KOPSAVILKUMS

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

Rīga 2024

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Universitātes Fizikas, matemātikas un optometrijas fakultātē, un Ventspils Augstskolas Inženierzinātņu institūtā „Ventpils 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 Šmels, 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

ISBN 978-9934-36-192-0

ISBN 978-9934-36-193-7 (PDF)

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 starжда 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 agrīnākajās 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. Ir konstatēti visi būtiskākie mainīguma veidi (periodisks, uzliesmojošs, vienmērīgi pieaugošs vai dilstošs) ar ļoti dažādām relatīvajām plūsmas izmaiņu amplitūdām (no nemainīgas plūsmas līdz 300 reizu 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 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.

Saturs

Anotācija	3
1 Vispārīgais darba raksturojums	6
1.1 Tēmas aktualitāte un motivācija	6
1.2 Darba mērķis un uzdevumi	6
1.3 Darba novitāte	7
1.4 Autora ieguldījums	7
1.5 Izmantotās metodes	7
1.6 Rezultātu aprobācija	8
1.6.1 Publikācijas par darba tēmu	8
1.6.2 Citas publikācijas	10
1.6.3 Dalība starptautiskajās konferencēs	10
1.6.4 Zinātniskie projekti	11
1.7 Promocijas darba kopsavilkuma struktūra	11
2 Literatūras apskats	12
2.1 Kosmiskie māžeri	12
2.1.1 Ievads	12
2.1.2 6.7 GHz metanola māžeri	12
2.1.3 Mainīgums	13
2.1.4 Periodiskums	14
2.1.5 Uzliesmojumi	16
2.2 Masīvu zvaigžņu veidošanas	16
2.2.1 Ievads	16
2.2.2 YSO klasifikācija	17
2.2.3 Masīvas zvaigznes kolaps un akrēcija	17
2.2.4 Gāzes jonizācija	20
3 Metodika	21
3.1 Ievads	21
3.2 Situācijas apraksts Irbenes radioteleskopos	21
3.3 Frekvences nobīdes metode izmantojot SDR	22
3.4 Sistemātiskās kļūdas	23
3.4.1 Autora ieguldījums	24
4 Metanolu māžeru monitorings	25
4.1 Ievads	25
4.2 Novērojumi	25
4.3 Rezultāti	25
4.3.1 EVN novērojumiem atlasīto avotu mainīguma raksturojums.	26

4.4	Diskusija	28
4.5	Autora ieguldījums	30
5	EVN novērojums	31
5.1	Avoti	31
5.2	Novērojums	32
5.3	Rezultāti	32
5.4	Analīze un diskusija	35
5.4.1	G78.122+3.633	35
5.4.2	G90.925+1.486	39
5.4.3	G94.602-1.796	41
5.5	Secinājumi	41
5.6	Autora ieguldījums	44
6	Noslēguma daļa	45
6.1	Secinājumi	45
6.2	Tēzes	46
6.3	Nobeigums	46

1 Vispārīgais darba raksturojums

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 akrecijas procesā, ir aktuāls pētījumu virziens mūsdienu astronomijā. Šiem pētījumiem tiek atvēlēta būtiska daļa no pasaulē vadošo instrumentu novērojumu programmu laikā. Jaunākie un aktuālākie rezultāti norāda uz šo procesu nelinearitāti, citiem vārdiem, tie notiek astronomijas mērogos straujās, varētu teikt pat katastrofālās, notikumos. Pašlaik izvirzītās teorijas nespēj paredzēt šos straujos akrecijas 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 akrecijas uzliesmojuma laikā, ar pozitīvu korelāciju starp zvaigznes un māzeru starojumu intensitāti. Neformālas māzeru monitoringa organizācijas (Maser Monitoring Organisation) 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.

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 starptautiskā 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 Izmantotās metodes

Māzeru līniju novērojumiem ar Irbenes radioteleskopiem, kā piemērotāko izvēlējamies 4 soļu frekvences nobīdes metodi. Metanolu māzeru monitoringa programmai tika atlasīti 42 avoti un tos novērojot vismaz reizi nedēļā. Iegūtas tika 5 gadus ilgas avotu plūsmas blīvuma laika sērijas. Trīs, pie debesīm tuvi avoti tika izvēlēti pieteikumam EVN, lai iegūtu to loka milisekundes izšķirtspējas radio attēlus.

1.6 Rezultātu aprobācija

1.6.1 Publikācijas par darba tēmu

1. A Aberfelds, J Šteinbergs, I Shmeld, R. Burns, 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>
2. A Aberfelds, A Bartkiewicz, M Szymczak, J Šteinbergs, G Surcis, A Kobak, M Durjasz, I Shmeld, Milliarsecond 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>
3. 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>
4. 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>
5. Svetlana V Saliĭ, 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, *stac739*
6. 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, Tiede P McCarthy, Karl Menten, Kazuhito Moto-
gi, 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, Yoshino-
ri 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, psac067

7. Antyufeyev, O. ; Bleiders, M. ; Patoka, O. ; Bezrukovs, V. ; Aberfelds, A. ; Shmeld, I. ; Orbidans, A. ; Steinbergs, J. ; Karelin, Y. ; Shulga, 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>
8. 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)
9. 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)
10. 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)
11. 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)
12. 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.

1.6.2 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

1.6.3 Dalība starptautiskajās konferencēs

- A. Aberfelds, K. Berzins and I. Shmeld, Initial methanol maser measurements with VIRAC RT32 Irbene radio telescope, Young European Radio Astronomers Conference (YERAC), Bonna, Vācija (2016)
- A. Aberfelds, K. Berzins and I. Shmeld, Long term methanol maser monitoring program, Internacional Astronomy Union (IAU) 336. symposium Astrophysical Masers: Unlocking the Mysteries of the Univers, Kaljari, Itālija (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, Odessa, 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", Korķa, 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)

1.6.4 Zinātniskie projekti

- “Physical and chemical processes in the interstellar medium”, No 1.1.1.11/6A/213 supported by ERDF (ASTRA), 2017 - 2020 (molecular maser line observations)
- Latvian Council of Science Project “Organic matter evolution in stars and planets forming regions” Nr.: lzp-2018/1-0170 (LZP OMG), 2018 - 2021; (various molecule observations around HMYSOs)
- Latvian Council of Science Project “Research of Galactic Masers” Nr.: lzp-2018/1-0291 (LZP GMP), 2018 - 2021 (maser observations and monitoring using single-dish mode)
- ”A single-baseline radio interferometer in a new age of transient astrophysics” Nr.: lzp-2022/1-0083 (LZP IVAR), 2023-2026; (HMYSOs monitoring with single-baseline radio interferometer)
- “Multi-Wavelength Study of Quasi-Periodic Pulsations in Solar and Stellar Flares” Nr.: lzp-2022/1-0017 (LZP STEF), 2023-2026; (Single-baseline radio interferometer use for observing M-dwarf flares)

1.7 Promocijas darba kopsavilkuma struktūra

Darbā tiek pētīta metanolu māzeru aktivitātē. Kopsavilkuma iekļauts literatūras apskats, par masīvu zvaigžņu veidošanos, kosmisko māzeru fenomenu. Metodikas nodaļā, tiek aprakstīta Irbenes radioteleskopu piemērošana māzeru novērojumiem. Galvenie zinātniskie rezultāti ir sadalīti divās nodaļās, pirmā par māzeru monitoringa rezultātiem, otrā par trīs avotu loka milisekundes izšķirtspējas pētījumiem ar EVN.

2 Literatūras apskats

2.1 Kosmiskie māzeri

2.1.1 Ievads

Termini "lāzers" un "māzers" ir cēlušies no angļu valodas akronīmiem termiņiem: "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, vēlu evolūcijas stadiju zvaigžņu apvalkos un galaktiku kodolos.

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). Pirmais zināmais avots ir W49 – masīvs zvaigžņu veidošanās apgabals, konstatējot hidroksil-radikāļa (OH) pārejas starojumu 1665 MHz frekvencē.

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

2.1.2 6.7 GHz metanola māzeri

Metanols (CH_3OH) ir sarežģītākā molekula, kurai Visumā novērota māzeru emisija. Būtiska ir dažādo metanola māzeru, ierosināšanas vielu (sadursmes vai starojums) saistība ar māzera avota evolūcijas stadiju. Attiecīgi, sadursmēs ierosinātie māzeri pieder pie pirmās klases (Class I) un starojuma ierosinātie pie otrās (Class II). No visām novērotajām metanola māzeru pārejām, $5_1 \rightarrow 6_0A^+$ 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 un pirms tam jau zināmo spožo 12 GHz metanola $2_0 \rightarrow 3_{-1}E$ māzeriem, norāda uz piederību pie otrās klases jaunajiem zvaigžņu objektiem (angliski *young stellar object*, YSO). Turpmākie novērojumi, tikai pastiprināja sākotnēji novēroto saistību, un mūsdienās otrās klases 6.7 GHz metanola māzeri tiek ekskluzīvi saistīti ar masīvu zvaigžņu veidošanos (Breen et al., 2013).

Tiek uzskatīts, ka otrās klases māzeriem ierosinošais starojums, nenāk no pašām molekulām. Kā ticamākais avots, termiskajam starojumam tiek uzskatīts putekļi, kas kalpo kā frekvences samazināšanas konvektors, zvaigznes ultravioletā (UV) starojumam.

Metanola māzeru kinemātikas pētījumi (van der Walt, D. J. et al., 2007) parādīja, to ka radiālie 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 (De Buizer, J. M. et al., 2009) attiecībā pret diska modeli, vairums no zināmajiem māzeriem ir orientēti perpendikulāri diskam, tātad vienā virzienā ar plūsmu (džetu, angļiski *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 robežslāni starp disku un plūsmu.

2.1.3 Mainīgums

Pirmās ziņas par 6.7 GHz metanolu māzeru mainīgumu nāca no plašiem debess apgabalu apskatiem (angļiski *surveys*). Kā pirmo vēlēties izcelt 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 nemainās būtiski, un tikai 25% no novērotajām līnijām intensitāte pieauga, vai samazinājās divas reizes. Tādu pašu izmaiņas amplitūdu, 5 – 7% gadījumos novēroja 972 avotu pārskatā, metanola daudz-staru pārskata komanda (angļiski *methanol multi beam survey*) (Breen et al., 2015).

Līdz šim 2 plašākos metanola māzeru mainīguma apskatus ir veikušas komandas no Dienvidāfrikas Republikas (Goedhart et al., 2004) un Polijas (Szymczak et al., 2017). Pirmie monitorēja 54 avotus 4.2 gadus ar biežumu 2 līdz 4 novērojumi mēnesī, bet atsevišķos gadījumos avoti tika novēroti pat katru dienu. Poļi apskatīja 166 avotus 2 līdz 4 reizes nedēļā, un apkopoja 3.7 gadus ilgus pētījuma rezultātus. Abas komandas noteica, ka attiecīgi 81% un 79% no monitorētajiem avotiem var uzskatīt par mainīgiem.

Neraugoties uz nelielāku skaitu monitorēto māzeru Goedhart et al. (2004) pirmais, konstatēja visus svarīgākos mainīguma veidus. Tika konstatēti avoti, kas monotoni zaudē vai palielina novēroto plūsmu, neregulāri svārstošas amplitūdas izmaiņas, īsa un gara perioda uzliesmojumi, bet nozīmīgākais, ir periodiska plūsmas izmaiņu atklāšana, Goedhart et al. (2004) konstatēja 7 avotus ar periodiem no 132 līdz 520 dienām.

Lai iegūto 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), šo statistikas rīku maiņzvaigznes mainīguma aprakstam ieviesa Stetson (1996). Māzeru mainīguma analīzei gan ērtāk ir izmantot pārveidotu formulu (1), ko izveidoja Aller et al. (2003).

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

Kur S_{max} un S_{min} ir attiecīgi, maksimālais un minimālais plūsmas blīvums, σ_{max} un σ_{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, kam 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 arī ieteica izmantot Aller et al. (2003). Fluktuāciju indekss pēc būtības mēra datu izkliedi ap mediānas vērtību (2).

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

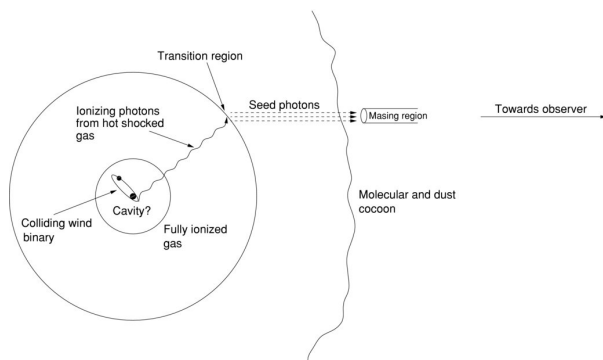
Kur S_i ir individuāla plūsmas blīvuma vērtība, mērījumā i , \bar{S} – plūsmas blīvuma mediānas vērtība, σ_i konkrētā mērījuma kļūda, un N – novērojumu skaits. Līdzīgi kā mainīguma indekss fluktuāciju indekss maz mainīgiem avotiem tieksies uz nulli, bet FI augstākā vērtība nav limitēta.

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

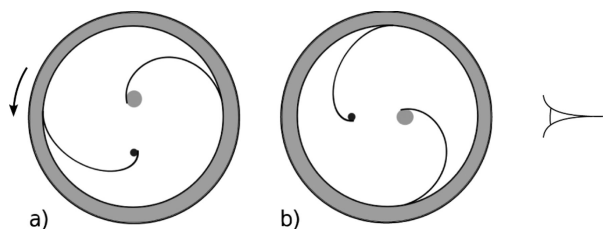
Visbeidzot, iekļausim arī χ_r^2 testu (3), jeb svērto vidējo kvadrātisko novirzi (angliski *reduced chi-square statistic* vai arī *Mean Squared Weighted Deviation*, MSWD), kas raksturo nemainīgas plūsmas modeļa – atbilstību novērotajai plūsmas izmaiņai. Avotam ar konstantu plūsmas blīvumu χ_r^2 vērtība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

2.1.4 Periodiskums

Līdz ar periodisku metanola māzeru atklāšanu teorētiski sāka piedāvāt modeļus, kas izskaidro šo parādību. Tipiski strikti periodisku starojumu mainību skaidro kā ciešu dubultzvaigzni sistēmas centrā. Viens šāds modelis ir zvaigžņu vēju sadursmes modelis (angliski *colliding-wind binary*, CWB). Jonizējošās daļiņas



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



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

vai fotoni, kas rodas zvaigžņu vēju sadursmes rezultātā, sasniedzot robežslāni star jonizētu un nejonizētu gāzi, izjauc ierasto līdzsvaru, un rada papildus fotoņus. Orbitālās kustības dēļ pozīcija, kur nonāk papildus jonizācijas starojums mainās. Periodiskās šīs pozīcijas izmaiņas uz HII zonas robežas attiecīgi izraisa māzera mainīgumu (skatīt 1. attēlu) (van der Walt, 2011).

Alternatīvi Araya et al. (2010) piedāvāja modeli, kurā dubultzvaigžņu sistēma modulē akrēcijas ātrumu, ar orbītu mehāniku. Periodiski piesaistot vairāk matēriju, kas maina starojuma intensitāti. Līdzīgi, orbitālā mehānika var izraisīt sablīvējumu rašanos diskā, konkrētāk šoka viļņus, kas līdzinās galaktiku spirālzarjiem (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 shēmu 2.).

Savukārt Inayoshi et al. (2013) modelēja zvaigznes starjaudu, aktīvas akrēcijas laikā un konstatēja, ka pie pietiekoši strauja procesa, ir novērojamas pulsācijas. Mehāniski svārstības notiek κ procesa ietekmē He slānī, līdzīgi kā citās maiņzvaigznēs.

2.1.5 Uzliesmojumi

Īpaša uzmanība tiek pievērsta arī ļoti straujam māzera spožuma pieaugumam. Šeit runa ir par daudzkārtīgu plūsmas 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 modeli apskatīsim aktīvu māzeru apgabalu (angliski *cloudlets*, darbā lietosim mezglī) pārklāšanos. No vispārējas teorijas jau zinām, ka novērotā māzera intensitāte ir proporcionāla aktīvas vides dziļumam, ja divi patstāvīgi apgabali, savas kustības dēļ nonāk uz vienas taisnes ar novērotāju. Tad ir iespējama būtiska novērotās starojuma plūsmas blīvuma pieaugums. Šo efektu pirmoreiz aprakstīja Elitzur (1992) un piemēram, tas labi skaidro novēroto uzliesmojumu Orion KL (Shimoikura et al., 2005).

Aktīvā vide ir lokālā termodinamiskā līdzsvarā, kurā nobeigta daļa no molekulām ir augstākā enerģijas stāvoklī. Sākotnēji apdzīvotības proporcijas ir dominējoši atkarīga no ierosinošā starojuma intensitātes. Līdz piesātinājuma stāvoklim, kad papildus pumpējošā enerģija vairs nespēj palielināt ierosināto molekulu skaitu. Norādot, ka nepiesātinātie māzeri ir būtiski mainīgāki par piesātinātajiem. Nepiesātinātu māzeru mezglu nonākšana uz vienas ass tādējādi var izpausties eksponenciālai starojuma plūsmas pieaugumā.

Daudz iespaidīgāks māzeru uzliesmojumu vieds tiek saistīts ar 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), regulāri monitorējot S255IR-NIRS3 (īsāk S255) avotu, tika konstatētas vairākas jaunas spektrālās līnijas un to spožums strauji pieauga. Sekojošie novērojumi tuvā infrasarkanā diapazonā, parādīja ievērojamu spožu pieaugumu no centrālā objekta un polārajiem aizplūstošās gāzes (džeta) rajoniem, kas apliecināja akrēcijas uzliesmojuma notikšanu (Uchiyama et al., 2019). Salīdzinot pagātnes 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 Masīvu zvaigžņu veidošanas

2.2.1 Ievads

Zvaigznes formējas blīvos un optiski necauraidīgos 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 objektus četrās klasēs, balstoties uz to spektru īpašībām. Tika ieviests spektrālais indekss α (4, kur λ ir viļņu garums un F_λ ir starojuma plūsma), kas kvalitatīvi norāda uz apjomu, starojumam, kas nāk no uzsildītā protoplanetārā diska (Lada, 1987).

$$\alpha = \frac{d \log(\lambda F_\lambda)}{d \log \lambda} \quad (4)$$

Kvalitatīvi šo klasifikāciju var apskatīt attēlā 3.

0 klase (Class 0) visagrīnākā evolūcijas stadija, grūti novērojami, $\lambda < 20 \mu\text{m}$.

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

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

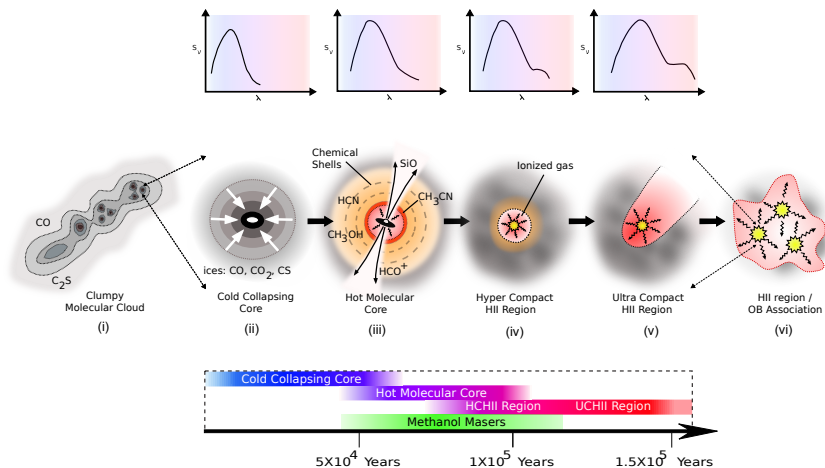
III klase (Class III) $\alpha < -1.6$, spektrs tuvojas absolūti melna ķermeņa starojuma profilam, zvaigznei zaudējot blīvo disku un nostabilizējoties uz galvenās secības zara Hercšprunga–Rasela diagrammā.

2.2.3 Masīvas zvaigznes kolaps 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 Helmholtza–Kelvina (Helmholtz–Kelvin) sakarības palīdzību 5, kur τ_{HK} – kolapsa laiks, G – gravitācijas konstante, M – protozvaigznes masa, R – protozvaigznes rādiuss un L – protozvaigznes starjauca.

$$\tau_{HK} = \frac{GM^2}{2RL} \quad (5)$$

Izmantojot empīrisku starjauca 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 Saules masas protozvaigznei un $10 M_\odot$ iegūstam attiecīgi 10^7 un 10^5 gadus. Tipisks akrēcijas ātrums tiek novērtēts kā $10^{-5} M_\odot/\text{gadā}$, tātad, salīdzinot τ_{HK} ar akrēcijas ilgumu (τ_{acc}), jāsecina, ka zvaigznēm ar masu $M > 8 M_\odot$ kolapss noslēdzas ātrāk nekā akrēcijas process, un kodolsintēzes reakcijas sākas pirms



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 oglekļa 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 novērojams. (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 infrasarkanā 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)

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 putekliem. Šo dinamiku var apskatīt ar Edingtona robežas (angliski *Eddington limit*) palīdzību, ko nosaka līdzsvars starp gravitācijas (6) un starojuma radīto (7) spiedienu.

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

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

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

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

Zvaigznes, kuru starjauka 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 $30 M_\odot$, tad tiek zaudēts $10^{-4} - 10^{-3} M_\odot$ 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. Salīdzinoši ar mazas masas zvaigznes formēšanos, šeit daudz lielāka loma ir diskam, kam esot gana blīvam un optiski ēnotam no centrālā objekta, ir iespēja efektīvi turpināt audzēt masu (Vorobyov and Basu, 2006).

Novērojumi ir parādījuši (Brandl et al., 1996), ka masīvās zvaigznes veidojas blīvajos zvaigžņu veidošanās apgabalu centros, tipiski grupās. 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 audzināt 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*). Kā jau nosaukums saka priekšā, piedāvātais modelis apskata masīvu zvaigžņu veidošanos kā rezultātu saplūstot divām vai vairāk mazākas masas protozvaigžēm. 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. Lai gan 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 – kompaktais HII zonas ir nelielas $\sim 0.01 pc$ 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, nesen izveidojušos 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 – kompaktais HII zonas pieaugšanas ātrums ir mazāks par skaņas ātrumu (aptuveni $10 km s^{-1}$) 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 starjauca, 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 starjauca 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 attēlā 3., kas parāda masīvas zvaigznes tapšanas laika skalu, ar visiem būtiskākajiem etapiem.

3 Metodika

3.1 Ievads

Zemes 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. Tā kā radioviļņi ir ar ievērojami lielāku viļņa garumu kā redzamā gaisma, sasniedzamā izšķirtspēja, izmantojot līdzīga izmēra primāros spoguļus, ir daudz zemāka. Tāpēc vairums radioteleskopu starojumu no debesīm var reģistrēt tikai kā punktveida avotu. Lielākā daļa no savāktā starojuma teleskopā nonāk ar primāro staru (angliski *main beam*), kas pret debesīm veido telpisko leņķi. Starojuma plūsmu no izplatījuma mēra Janskos ($1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$).

Novērojumu laikā radioteleskops reģistrē ne tikai avota signālu, bet arī sistēmas iekšējos trokšņus, lai no tiem atbrīvotos ir jāreģistrē instrumenta signāls. Ir izstrādātas dažādas metodes iekšējā (instrumentālā) signālā reģistrēšanai, divas plašāk zināmās ir: pozīcijas maiņa (teleskopa primāro staru novirza prom no avota), frekvences nobīdes (maina frekvences, ko reģistrē uztvērējs).

3.2 Situācijas apraksts Irbenes radioteleskopos

Irbenes radioteleskopiem ir gana interesanta un nepierasta vēsture, ko šajā darbā pilnā apmērā neatspoguļosim. No šeit prezentēto pētījumu viedokļa, kompleksa rekonstrukcija 2014. un 2015. gadā, ir robežšķirtne pēc kuras, vispār zinātniskie pētījumi, izmantojot Irbenes instrumentus var tikt veikti. Tika atjaunotas abu antenu optiskās īpašības, iegādāti un uzstādīti jutīgi plašas joslas uztvērēji un ieviesta moderna teleskopu kontroles sistēma.

Vēlēšanās veikt pētījumus, saistībā ar masīvu zvaigžņu formēšanos un balstoties uz VSRC instrumentu iespējām, tika secināts, ka produktīvākais virziens, ir 6.7 GHz II klases metanolu māzeru novērojumi. Tomēr, to norisei, bija jāveic priekšdarbi, lai zinātniski kvalitatīvi dati varētu tik iegūti. Veiktā rekonstrukcija, un teleskopu aprīkošana neietvēra, šādiem novērojumiem nepieciešamo aprīkojumi, kā arī papildus aparatūras iegādei, nebija pieejams finansējums. Tāpēc, ciešā sadarbībā ar institūta tehnisko personālu tika izstrādātas metodes esošā aprīkojuma pielāgošana to izmantošanai spektrālo līniju novērojumos.

Šis uzdevums tika īstenot dažos etapos, vispirms izmēģinājuma novērojumos, spektru reģistrēja elektronikas laboratorijas spektra analizators. Pēc tam jau automatizēti novērojumi, tika īstenoti izmantojot otrās paaudzes digitālo bāzes joslas konvektoru, angliski *digital baseband converter* (DBBC2)¹, un visbeidzot izmantojot programmējamo radio ierīci (angliski *software defined radio*, SDR).

¹<https://www.hat-lab.cloud/dbbc2/>

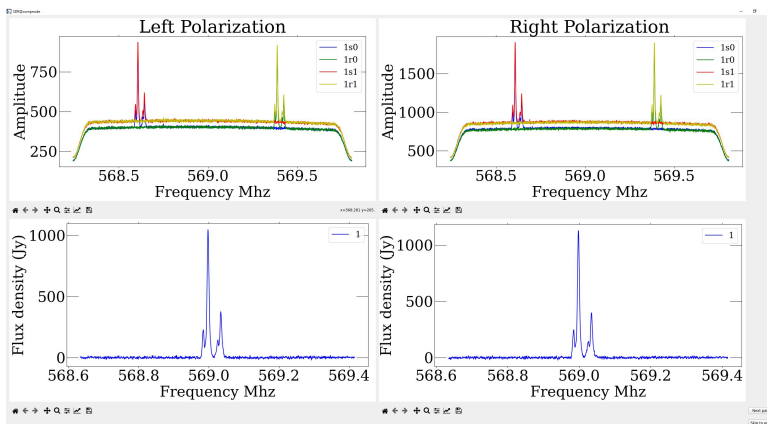
3.3 Frekvences nobīdes metode izmantojot SDR

Abos teleskopos kā spektrālais reģistrators tiek izmantots Ettus Research USRP X300. Pāreja uz SDR ļāva būtiski atvieglot slodzi uz institūta datu serveriem, jo spektri tiek iegūti novērojumu laikā, veicot reālā laika ātro Furjē transformāciju (FFT), ja ar DBBC2 viena avota 15 min novērojuma ieraksts aizņēma aptuveni 1.5 GB, kam vēl jāveic FFT, lai iegūtu spektru, tad izmantojot SDR, saglabāti tiek tikai 8.5 MB. SDR ir arī jutīgāks par DBBC2 galvenokārt pateicoties, ka dati tiek digitalizēti izmantojot 14 bitu signāla līmeņa izšķirtspēju (angliski *sample*)(DBBC2 efektīvi lieto tikai 2 bitu). Pilnu aprakstu par SDR pielietošanu kā spektrālo reģistrators skatiet Bleiders et al. (2020).

Regulāri tiek veiktas kalibrēšanas sesijas, novērtējot ilgtermiņā stabilus kvazārus, kas dot atskaites punktus sistēmas jutības novērtējumiem. Neatsveramu atbalstu šajā jomā veic Amerikas Savienoto Valstu Ļoti Lielā Tīkla (*Very Large Array*, VLA) zinātnieki (Perley and Butler, 2013), kuru avotu plūsmu blīvumu novērtējumus lietojam arī mēs. Būtisks sistēmas parametrs, kura novērtēšanai nepieciešama ārēja informācija ir no elevācijas atkarīgā antenas temperatūras un plūsmas blīvuma vienība, angliski *Degrees Per Flux Units* (DPFU), RT–32 tā ir 0.0857 K Jy^{-1} un RT–16 tā ir 0.046 K Jy^{-1} zenītā. Tās izmaiņa atkarībā no teleskopa elevāciju 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 sekojoši: 1.5625 MHz joslas platums, 4096 FFT kanāli, kas atbilst 0.017 km s^{-1} spektrālai izšķirtspējai. Teleskopa kontroles skripts, līniju novērojumu laikā, ģenerē novērojuma unikālo `”*.log”` failu, kas satur nepieciešamo informāciju par novērojuma uzstādījumiem, un teleskopa darbību novērojuma gaitā.

Māzeru un citu līniju novērojumos izmantojam frekvences nobīdes metodes variantu, 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 $1/2^N$ (N - veseli pozitīvi skaitļi, biežāk izmantotā ir $1/4$) no joslas platuma, ko apzīmē kā sig_{off} un ref_{off} (saīsinot: $s0$ un $r0$), tādu pašu frekvences nobīdi veic arī ierakstot datus ar ieslēgtu trokšņu diodi, apzīmē kā sig_{on} un ref_{on} (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 novērojumu 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 (Piem. `cepa_f6668_ib_1292_no001r0.dat`).



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

Novērojumus reducē ar institūta izstrādāto programma nodrošinājumu: Maser Data Processing Suite (MDPS). Plašāku aprakstu par izveidoto programmatūru spektru apstrādei, lasiet: Šteinbergs et al. (2021) izmantoto kodu ar dokumentāciju var iegūt no GitHub repozitorijā². MDPS darbības piemēru skatīt attēlā 4.

3.4 Sistemātiskās kļūdas

Būtisks aspekts mērījumu precizitātē ir teleskopa mērķēšana uz avotu jeb pozicionēšanu (angliski *pointing*). 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° jeb 2 loka minūtes, kam aptuveni atbilst 92% no normalizētās amplitūdas.

Amplitūdas kļūdu nosaka nenoteiktības teleskopa pastiprinājums atkarībā no elevācijas un sistēmas temperatūra. Sistēmas temperatūras (T_{sys}) nenoteiktība Irbenes radioteleskopiem ir neliela, kā to parādījuši Antyufeyev et al. (2022) mērījumi, labos laik apstākļos tā ir ap 1% , bet lietū vai, ja ir biezi mākoņi tad 1 – 3%. Savukārt pastiprinājums mainās būtiski, gadalaikos ar augstu mitrumu un daudz nokrišņiem, laika rindu izkliede ir būtiska. Apkopojot maz mainīgu avotu laika rindas un salīdzinot to ikdienas vērtības pret mediānu vērtībām, novērtēju amplitūdas relatīvo nenoteiktību. Īpaši augsta nenoteiktība ir ziemas laikā, kas būtiski palielināja noteikto (20%) vērtību.

²<https://github.com/sklandrausis/Maser-Data-Processing-Suite>

Tabula 1: Tipiska māzeru novērojumu konfigurācija ar SDR

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	Joslās 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

3.4.1 Autora ieguldījums

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

4 Metanolu māzeru monitorings

4.1 Ievads

Metanola māzeru monitorings ir viena no būtiskākajām Ventspils Starptautiska Radioastronomijas Institūta zinātniskajām aktivitātēm. Kā jau norādīts iepriekš, šie objekti ir cieši saistīti ar masīvu zvaigžņu veidošanos, kas mūsdienās joprojām ir aktīvs astronomijas pētījumu virziens. Māzeriem kalpojot par nozīmīgiem indikatoriem, procesiem, kas viedo lielas masas zvaigznes. Lai gan atsevišķa objekta padziļinātai izpētei ir nepieciešami interferometra dati, būtisku informāciju par evolūciju sniedz spektra izmaiņas.

Metanola māzeru monitorēšanas programma tika sākta 2017. gada martā. Tika atlasīti 42 avoti, kuru deklinācija ir virs -10° un plūsmas blīvums virs 3 Jy. Novērojām katru avotu ar 3 līdz 5 dienu intervālu, bet situācijās, kad plūsmas blīvums mainās strauji – katru dienu.

Mūsu monitoringa rezultāti tiek regulāri prezentēti māzeru monitorēšanas organizācijas sanāksmēs. Pirmo reizi šo programmu prezentējām starptautiskās Astronomijas Savienības (IAU) 336 simpozija laikā.

4.2 Novērojumi

Novērojumu metodiku un tās pakāpenisko uzlabošanu jau aplūkojām iepriekšējā nodaļā. Tā kā pētāmie māzeri atrodas Galaktikas plaknē, kas nosaka piemērotāko diennakts laiku novērojumu veikšanai. Zemes orbitālās kustības dēļ šis laiks pakāpeniski mainās. Praktiski, novērojumus un piemērotā laika atrašanu veic teleskopu operatori. Balstoties uz atlasīto avotu skaitu un tiem avotiem, ko vēlamies novērot katru dienu. Nedēļā novērojumus veicam aptuveni 14 – 17 stundas nedēļā, jeb atbilstoši 800 – 1200 stundas gadā, un kopumā virs 6000 stundām visas programmas laikā. Vairums novērojumu (ap 97%) ir veikti ar RT–16, pārsvarā tāpēc, ka RT–32 joprojām tiek modernizēts.

4.3 Rezultāti

Tika iegūtas 42 atlasīto avotu plūsmas izmaiņu laika sērijas, kas vēsta par starojuma izmaiņām laikā, dažādos radiālajos ātrumos. Balstoties uz to ir iespējams, veikt avotu mainīguma klasifikāciju un noteikt tiem statistikas parametrus. Statistikas parametrus radam tikai trim atlasītiem avotiem (skatīt tabulu 2.). Kur $V_p(\text{km s}^{-1})$ spektrālās līnijas radiālais ātrums attiecība pret lokālo miera stāvokli (LSR), $S_p(\text{Jy})$ spektrālās komponentes plūsmas blīvuma mediāna, VI un FI – mainīguma un fluktuāciju indeksi, χ_r^2 parametrs. MJD_s novērojumu sākumu diena norādīta norādīta Modificētajās Juliāna dienās (dienu skaits kopš 1858. gada 17. novembra), T_s laika sērijas ilgums – gados, N - novērojumu skaits, $C(\text{month}^{-1})$ vidējais novērojumu biežums mēnesī.

Tabula 2: Iegūto māzeru mainīguma laika sēriju statistikas parametri.

$V_p(\text{km s}^{-1})$	$S_p(\text{Jy})$	VI	FI	χ_r^2
G78.122+3.633 (MJD _s =57832 T_s = 5.549, N =882, $C(\text{month}^{-1})$ =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, $C(\text{month}^{-1})$ =4.725)				
-69.2	61.49	0.36	0.44	3.99
-70.4	29.79	0.37	0.39	1.60
G94.602-1.796 (MJD _s =58027 T_s = 4.996, N =351, $C(\text{month}^{-1})$ =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

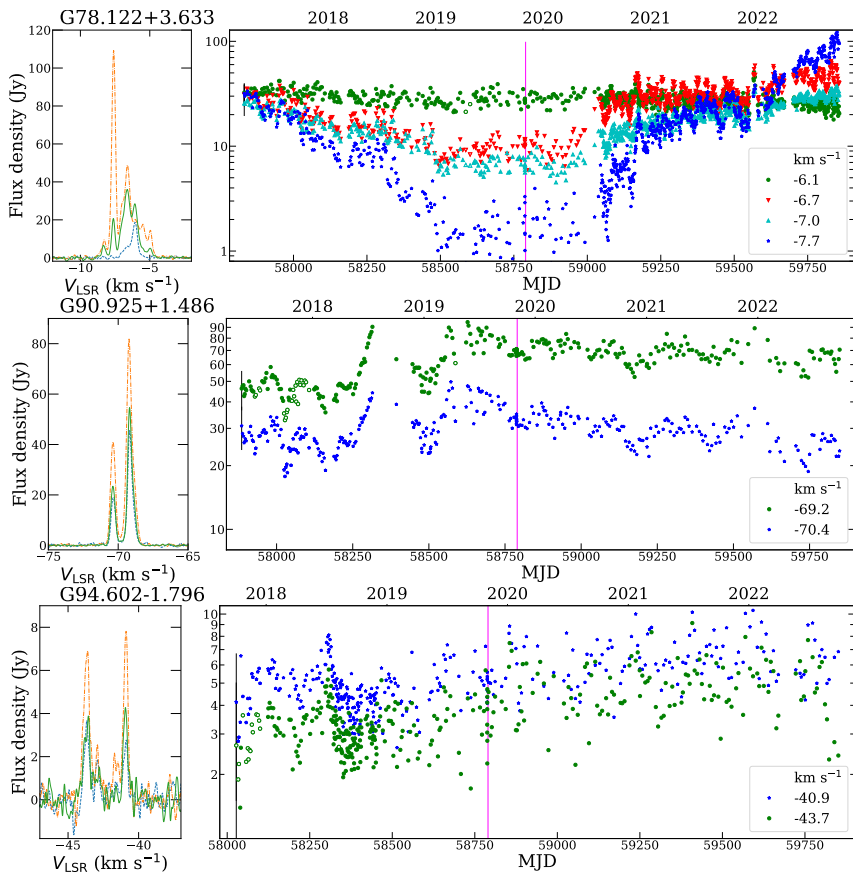
4.3.1 EVN novērojumiem atlasīto avotu mainīguma raksturojums.

Mainīguma statistiskās vērtības ir apkopotas tabulā 2. Iegūtās avotu gaismas līknes ir parādītas 5. attēlā.

G78.122+3.633. Visas komponentes izņemot -6.1 km s⁻¹ piecu gadu periodā mainās būtiski. Jāizceļ -7.7 km s⁻¹ 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) periodogramma gan neuzrādīja nevienu statistiski nozīmīgu periodu šīm fluktuācijām (pārlicība par signāla "īstumu" virs 95 %).

G90.925+1.486. Divas galvenās avota līnijas ir sinhroni mainīgas. 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).



Att. 5: Spektri un gaismas līknes 3 atlasītajiem avotiem. Kreisajā panelī: parādītas trīs starojuma blīvuma līmeņi: oranžs – augsts, zaļš – vidējs un zils – zems. Labajā panelī: atlasīto komponentu 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 fūksina (magenta) līnija norāda uz EVN novērojumu laika momentu.

4.4 Diskusija

Monitoringa programmas ietveros ieguvu 42 6.7 GHz metanola māzeru avotu piecus gadus ilgas laika sērijas. Programmas ietveros jauni mainīguma veidi netika konstatēti, bet pamanījām, ka vairāki avoti ir mainījuši savu ierasto "uzvedību". Kā arī konstatējām virkni būtiskākos mainīguma tipus.

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^{-1} , 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. Šis 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^{-1} ir anti-korelēts ar līnijām 63.2 un 62.7 km s^{-1} . Tikai 7% avotu autors pamanīja šo mainīguma tipu.

Ātruma pārbīde ir situācijās, kad novērojama būtiska (>0.07 km s^{-1}) līnijas radiālā ātruma izmaiņa. No atlasītajiem avotiem, šo tipu autors pamanīja tikai vienā piemērā: G121.298+0.659.

Periodisks. Periodiskas svārstības tika konstatētas 19% atlasīto avotu. Periodisko avotu parametri ir apkopoti tabulā 3. 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 atsaucē 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.

Krišošs. Līdzīgi, ja plūsmas krīt par vairāk kā 50% intervālā līdz 100 dienām, tad klasificējam to kā krišošu. 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 slidošo 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.

Kā būtisku priekšrocību, monitoringa programmai, izmantojot Irbenes kompleksu, var minēt ievērojami biežākus novērojumus. Mūsu pētījumā, 21 % no visiem avotiem var tikt uzskatīti par maz mainīgiem, izmantojot iepriekš minēto kritēriju, un tas neatšķiras no 19% Goedhart et al. (2004) un 21% Szymczak et al. (2017) rezultātiem. Būtiskākā atšķirība ir ļoti mainīgo komponentu īpatsvarā, bet tas ir skaidrojams ar avota atlasē 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). Monitoringu programmu salīdzinājums ir parādīts tabulā 4.

Astoņi no novērotajiem avotiem ir ar periodiskām plūsmas fluktuācijām (Tabula 3.), vairums no tiem jau zināmi, un ar norādēm literatūrā. Pamanījām trīs, iespējams, periodiskus signālus, kas nav minēti literatūrā, G192.60-0.05 -6.3 km s⁻¹ līnija, G32.04+0.06 92.7 km s⁻¹ līnija un G33.641-0.228 61.0 km s⁻¹ līnija. Jāatzīmē, ka norādītajos avotos periodiski mainās tikai viena spektra līnija, kas ir salīdzinoši retāk kā visu komponentu periodiskas svārstības. Kā arī to relatīvais plūsmas pieaugums (par cik procentiem maksimuma plūsma pārsniedz minimuma) ir samērā mazāks, par jau literatūrā zināmajiem periodiskajiem avotiem. 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 sērijās, ar pārliecinošu konfidenci, ilgāki periodi netika konstatēti. Īsākais periods ir G107.298+5.639 un tas ir 34.4 dienas. 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.

Iegūtās mainīguma aprakstošo parametru vidējās vērtības, viesiem avotiem ir sekojošas: mainīguma indeksam 0.33; fluktuāciju indeksam 0.54 un χ_r^2 parametram 4.66. Augstākā noteiktā mainīguma indeksa vērtība ir 0.99, fluktuāciju indeksam 6.76, un χ_r^2 parametram 308, šīs vērtības tikai konstatētas dažādām G107.298+5.63 komponentēm. Norādot, ka periodiski uzliesmojošais G107.298+5.63 ir mainīgākais avots monitorēto avotu grupā. Vairums mainīgo avotu, kam ir augsts mainīguma indekss ($VI > 0.5$) ir zemas vai vidējas plūsmas blīvums. Līdzīgas sakarības ir arī starp avota plūsmu un FI un χ_r^2 parametru. Ir novērota: mainīguma indeksa, fluktuāciju indeksa un χ_r^2 parametra, savstarpēja pozitīvi korelācija.

Tabula 3: Periodisku mainīgu (ciklisku) avotu parametri

Avots	Aptuvenus Periods dienas	Novēroto ciklu skaits cikli	Mainīguma diapazons (Jy)	Relatīvais Pieaugums (%)	Atsauce
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 × 10 ⁴	Szymczak et al. (2016)

* Avota plūsmā regulāri pazeminājās zem uztveršanas sliekšņa.

Tabula 4: Salīdzinājums ar Goedhart et al. (2004) [1]; Szymczak et al. (2017) [2] un Sugiya et al. (2019) [3] pētījumiem.

	[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

* Nezināma vērtība

4.5 Autora ieguldījums

Autors atlasīja programmā iekļautos avotus, iepazīs un apgruva nepieciešamos literatūras avotus, izstrādāja un ieviesa datu iegūšanas metodiku, un veica būtisku daudzumu novērojumu, īpaši programmas pirmajos divos gados. Šo pieņēmumu 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 Avoti

Sadarbībā ar Nikolaja Kopernika Universitātes radioastronomijas departamenta zinātniekiem tika izveidots, pieteikums, lai izmantotu EVN. Tika atlasīti trīs mainīgi avoti no monitoringa programmas, kuri: nav nesen novēroti ar EVN, un to savstarpējais leņķiskais attālums nav pārāk liels. Tika izraudzīti sekojoši avoti:

G78.122+3.633. Plaši zināms arī ar nosaukumu IRAS 20126+4104. Centrā esošo $\sim 7M_{\odot}$ 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 un divām grupām 6.7 GHz metanola māzeru, kuru V_{LSR} vērtības daļēji pārklājas (-4.5 līdz -8.5 km s^{-1}). 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 dzeta plūsmas mijiedarbības zonā. Jaunākie paralakses mērījumi ir 0.645 ± 0.030 mas, kas atbilst $1.6^{+0.3}_{-0.12}$ kpc distancei (Reid et al., 2019). Hu et al. (2016) pārskats liecina par metanola māzeru emisiju no -8.43 līdz -4.74 km s^{-1} , izvietotu $0.36'' \times 0.25''$ bez ievērojamām regularitātēm, bet būtiski, ka netika konstatēta termiskā starojuma plūsma.

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 ± 0.031 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 $0.4'' \times 0.5''$ plašā apgabalā, no -71.5 līdz -68.31 km s^{-1} . Ir ievērojams ātruma gradients no dienvidrietumiem uz ziemeļaustrumiem. Tika konstatēts radio termiskais starojums ar intensitāti 0.63 Jy aptuveni $0.15''$ uz dienvidi austrumiem no māzeru pozīcijas.

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 ± 0.013 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^{-1} VLSR, izvietotu $0.10'' \times 0.22''$, ar ziemeļi dienvidi virzienā vērstu ātruma gradientu, kā arī ar radio termisko starojumu ar intensitāti 0.42 Jy.

Pieteikums tika iesniegts 2019. gada 1. jūnija uzsaukumam, iegūstot 1.4 punktus EVN program-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.

5.2 Novērojums

Pēc piemērotāko desmit stundu atrašanas, novērojuma pieteicējam sadarbībā ar JIVE atbalsta zinātniekiem, man atbalstu nodrošināja Katrīna Immere (Katharina Immer), jāizveido detalizēts novērojuma plāns. Katram avotam ir jāatrod, tuvs (ne tālāk par 2 grādiem) fāzes kalibrators. 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. Savukārt instrumentālo efektu kalibrēšanai tika izvēlēts 3C345 – spožu kvazāru.

JIVE (Joint Institute for VLBI ERIC), kas bāzēta Dwingeloo pilsētīnā, Nīderlandē, tika 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^{-1}) ar 128 kanāliem katrā joslā, lai nodrošinātu labu signāla trokšņu attiecību fāzes kalibratoriem, otrā reizē tikai joslu, kur novērojamas māzeru starojums, ar 2048 kanāliem, jeb 1.95 kHz uz kanālu (0.088 km s^{-1}). Tā kā ne man, ne kolēģiem no institūta nav pietiekoša pieredze apstrādāt VLBI datus, tika izmantota iespēja doties uz JIVE, un tur to apgūtu. 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 izklāstīta, mājas lapā³.

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

5.3 Rezultāti

Izmantojot EVN tika iegūti trīs atlasīto objektu loka milisekunžu izšķirtspējas attēli. 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 platumā (Bartkiewicz et al., 2020). Māzeru mezglu parametri ir apkopoti Tabulā 5. Tajā dotas relatīvās koordinātes ΔRA , ΔDEC , no māzera plankuma ar LSR ātrumu -4.9 km s^{-1} un pozīciju $RA=20^h 14^m 26.05839^s$, $Dec=+41^\circ 13' 32.5278''$ (J2000). Šoreiz, kā reference netika izmantots spožākas

³<https://www.evlbi.org/evn-data-reduction-guide>

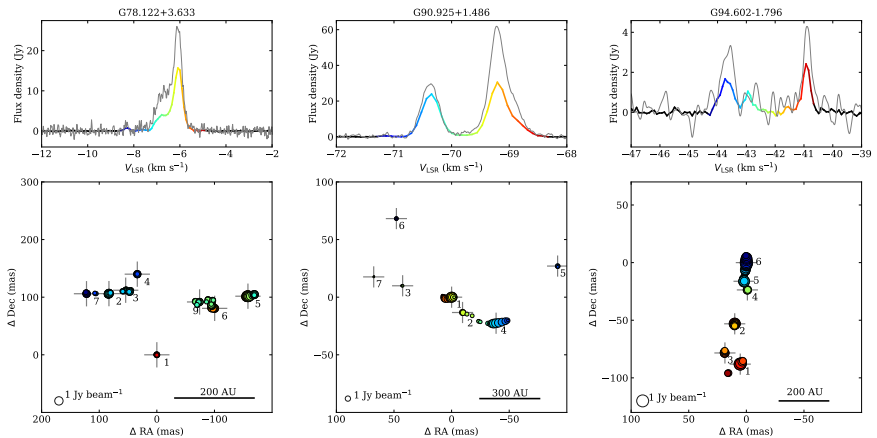
plankums, jo tas vēlāk ļauj ērtāk salīdzināt rezultātus ar Moscadelli et al. (2011). Plankumu radiālā ātruma un intensitātes sakarība tika modelēta ar Gausa funkciju, ļaujot noteikt sekojošus parametrus: ar V_{fit} tiek apzīmēta radiālā ātruma vērtību, kad funkcijas plūsma ir visaugstākā (S_{fit}), kā arī tiek noteikts līnijas platums (FWHM). Māzeru mezgla lineārais izmērs (L_{proj}) ir definēts kā lielākais attālums starp diviem māzeru plankumiem vienā mezglā. Ātruma gradients (V_{grad}) 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_{grad} zīmi ir pieņemts atnest. 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 $0.31 \pm 0.02 \text{ km s}^{-1}$. Iegūto struktūru vislabāk reprezentē attēls 6. (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 līdz -8.37 km s^{-1} , aizņemot $300 \text{ mas} \times 160 \text{ mas}$ debess apgabalu, kam atbilst $480 \text{ AU} \times 260 \text{ AU}$. Individuālo mezglu emisijas aizņem no 0.5 līdz 7 mas ar vidējo $L_{\text{proj}} = 4.2 \pm 0.3 \text{ AU}$. Savukārt ātruma gradients ir 0.05 līdz $0.45 \text{ km s}^{-1} \text{ AU}^{-1}$ robežās ar vidējo vērtību $0.14 \pm 0.03 \text{ km s}^{-1} \text{ AU}^{-1}$. No visiem parametriem, tikai starp L_{proj} un S_{fit} , pastāv vidēji nozīmīga korelācija ($r=0.596$).

Attēlā 7. parādīta plankumu karte ar to ātruma gradientu virzieniem. Mezgli ar relatīvi augstām (virs 0.14 km s^{-1}) ātruma gradienta vērtībām, pārsvarā atrodas avota centrālajā daļā, un to virziens ir aptuveni ortogonāls protoplanetārā 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 $5 - 20 \text{ AU}$ izmēriem. Māzera mezgla nr. 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 attēla 6. vidū. Tika konstatēti 47 metanola māzeru plankumi, kas izvietoti septiņos dažādos mezglos, un to parametri ir parādīti tabulā 6. Individuālo līniju vidējais platums (FWHM) ir 0.30 km s^{-1} . Emisija tika konstatēta radiālā ātruma diapazonā no -71.31 līdz -68.31 km s^{-1} un tā aizņem $160 \text{ mas} \times 90 \text{ mas}$, kam atbilst $950 \text{ AU} \times 530 \text{ AU}$. Mezglu lineārie izmēri ir no 6 līdz 100 AU . Apakšējā – zili nobīdītā komponente ir ar izteiktu ātruma gradientu, tā kopējā vērtība ir $0.007 \text{ km s}^{-1} \text{ AU}^{-1}$. 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^{-1} ir būtiski izšķirta 63%, bet -70.3 km s^{-1} komponente tikai par 19%. Kopējā integrālā spožuma $S_{\text{int}}(\text{EVN})/S_{\text{int}}(\text{Ir})$ attiecība ir 0.43.

Tabula 5: G78.122+3.633 6.7 GHz metanola māzera mezglu parametri. ΔRA un ΔDec norāda relatīvas koordinātes no centra punkta: $RA=20^h14^m26.05839^s$, $Dec=+41^\circ13'32.5278''$ (J2000). V_{fit} ir Gausa funkcijas modeļa radiālā ātruma vērtībā tās maksimumā. Gausa funkcijas pusaugstuma platums (FWHM). S_{fit} plūsmas blīvuma maksimums ar Gausa funkcijas modeli. L_{proj} māzera mezgla lineārais izmērs. V_{grad} ātruma gradients, ja nosakāms. PA ir pozīcijas leņķis māzera plankumu galvenai asiņ. Vērtības slīprakstā ir relatīvi lielu kļūdu.

Clouplet	ΔRA (mas)	ΔDec (mas)	V_{fit} (km s^{-1})	FWHM (km s^{-1})	S_{fit} (Jy beam^{-1})	L_{proj} (mas(AU))	V_{grad} ($\text{km s}^{-1} \text{ mas}^{-1} (\text{km s}^{-1} \text{ AU}^{-1})$)	PA ($^\circ$)
1	0.0	0.0	-4.94	0.26	0.12	1.3(2.1)	0.29(0.173)	57
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. 6: 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 māzera izvietojums. Punktu krāsas ir atbilstošas to LSR radiālā ātrumu krāsām, to izmēri proporcionāli spožuma logaritmam.

Tabula 6: G90.925+1.486 mezglu parametri, tā paša tipa informācija, kas Tabulā 5. Koordinātu centrs (0,0): RA=21^h09^m12.97474^s, Dec=+50°01'03.6580" (J2000), kas atbilst spožākajam māzeru plankumam.

Cloudlet	Δ RA (mas)	Δ Dec (mas)	V_{fit} (km s^{-1})	FWHM (km s^{-1})	S_{fit} (Jy beam ⁻¹)	L_{proj} (mas(AU))	V_{grad} ($\text{km s}^{-1} \text{mas}^{-1} \text{AU}^{-1}$)	PA (°)
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 7: G94.602–1.796 mezglu parametri, līdzīgi kā Tabulā 5. Koordinātu centrs (0,0): RA=21^h39^m58.25507^s, Dec=+50°14'20.9989" (J2000) atbilst spožākajam māzeru plankumam.

Cloudlet	Δ RA (mas)	Δ Dec (mas)	V_{fit} (km s^{-1})	FWHM (km s^{-1})	S_{fit} (Jy beam ⁻¹)	L_{proj} (mas(AU))	V_{grad} ($\text{km s}^{-1} \text{mas}^{-1} \text{AU}^{-1}$)	PA (°)
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

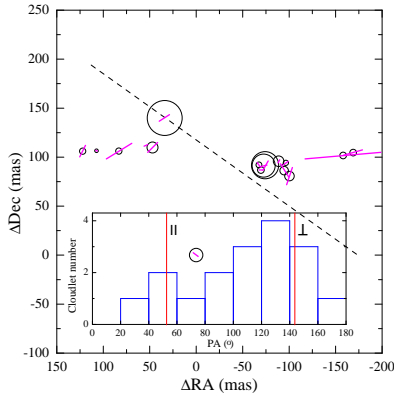
G94.602–1.796 ir vājākais novērotais avots, un tas ir parādīts attēlā 6. labajā malā. Tika pamanīti 59 māzeru plankumi, kas ir veido sešus mezglus, to parametri ir apkopoti tabulā 7., šī emisija tika konstatēta –40.55 līdz –44.4 km s^{-1} LSR ātrumu diapazonā. Māzeri ir izvietoti iegareni ziemeļu – dienvidu virzienā un aizņem 33 mas×115 mas ar atbilstoši 150 AU×520 AU lieliem, fiziskiem izmēriem, un ir ar uzskatāmu 0.035 $\text{km s}^{-1} \text{mas}^{-1}$ jeb 0.008 $\text{km s}^{-1} \text{AU}^{-1}$ lielu ātruma gradientu. Plūsmas attiecība spektrā $S_{\text{int}}(\text{EVN})/S_{\text{int}}(\text{Ir})$ ir 0.42, un komponentu FWHM vidējā vērtība ir 0.37 km s^{-1} .

5.4 Analīze un diskusija

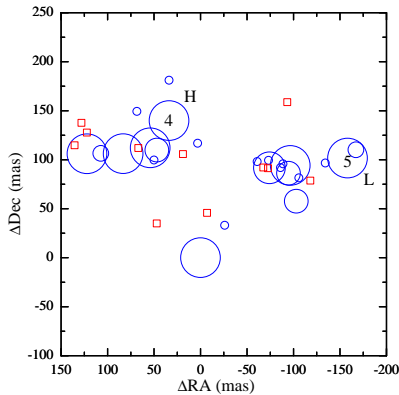
Salīdzinot interferometra iegūtos spektrus ar individuāla teleskopa iegūto, redzams, ka EVN tos ievērojami izšķir, zaudētā plūsma ir 57-58% un nav atkarīga no avota spožuma vai distances. Bartkiewicz et al. (2016) ziņoja par līdzīgu zaudētās plūsmas blīvumu, savos rezultātos aplūkojot lielu skaitu avotu.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

5.4.1 G78.122+3.633

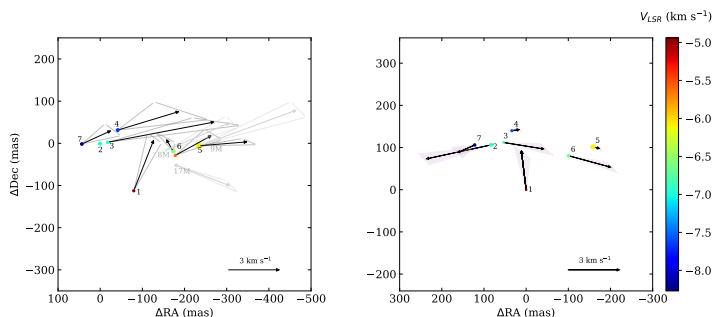
Autors veica individuālu māzeru mezglu struktūras evolūcijas pētījumu ar dažu loka milisekunžu precizitāti. G78.122+3.633 ir novērots ar EVN 2004., 2007., 2009. un 2011. gadā (programmas kodi EL032, EM064C, EM064D un



Att. 7: 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, diagonālē līnijā 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 vertikālās līnijas parāda leņķus paralēlus un perpendikulārus diska plaknei.



Att. 8: Māzēru mezglu karte, izmantojot EVN datus no 2004. līdz 2019. gadam. Simbolu izmēri ir proporcionāli skaitam cik daudz novērojums mezgls ir pamanīts. Zilie apli un sarkanie kvadrāti norāda vai plūsmu no mezgliem var attiecīgi aprakstīt ar Gausa profilu. Mezgli ar augstāko un zemāko mainību, vadoties pēc parametriem no 2. tabulas, ir atzīmēti attiecīgi ar H un L burtiem.



Att. 9: Māzeru mezglu relatīvā īpaškusība. **Pa kreisi:** Diska un plūsmas modeļa Moscadelli et al. (2011) rezultāti 2004.-2019. periodā. Numuri pie punktiem atbilst mezglu numuriem no 5. tabulas. Blāvie punkti ar gaiši pelēkajiem vektoriem parāda komponentšu 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 īpaškusība noteikta pēc mezglu savstarpējo attālumu izmaiņām.

ES066E), dati tika lejupielādēti no arhīva un apstrādāti, līdzīgi kā vēstīts iepriekš. Izņemot 2011. gada datus, radiālā ātruma izšķirtspēja ir vienāda, šim novērojumam tā ir divas reizes augstāka jeb 0.044 km s^{-1} . Kopējais māzeru izvietojums G78.122+3.633 piecos dažādos epohos, jeb 15 gados ir parādīts 12 attēlā. Autors konstatēja, ka septiņi māzeru mezgli ir atrodami visos piecos EVN novērojumos, to parametri ir norādīti 8 tabulā. 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 izmaiņas ir ar lineāru sakarību. Šo pieeju konceptuāli parāda attēls 13. Mezgls 1 (Attēls 13.) ir kompaktākais visos piecos novērojumos, kā konsekvence tam virkne tā parametru ir slikti nosakāmi (r_s , r_v , V_{grad} un PA). Otrā mezgla spožākie plankumi veido lineāru struktūru, ar augstām r_s , r_v vērtībām un teju nemainīgu $\pm 10^\circ$ PA. Trešā mezgla struktūra ir būtiski mainījiesies no kompaktiem trīs plankumiem 2004. gadā uz kompleksu struktūru ar diviem maksimumiem sākot ar 2009. gadu. Ceturtais mezgls ir ļoti kompakts. Augstākā radiālā ātruma plankumi piektajā mezglā veido unikāli ieliektu struktūru, kas ir stabila 15 gados. 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 ļoti 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 atkarīgs no protozvaigznes aktivitātes izmaiņas. Sestais mezgls ir ievērojami savēries un tā morfoloģija ir ļoti mainīga. Septītā mezgla morfoloģija ir lok-veidīga, novērojām pakāpenisku iztaisnošanos. 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 (angliski *transient*) mezgli, un 21 no tiem novērots tikai vienā EVN epohā. Vienpadsmit no tiem netika konstatēts Gausa profils, tas varētu būt tāpēc, ka VLBI detektē tikai viskompaktāko emisijas apgabalu no gāzes ar zemu māzera pastiprinājuma līmeni. Attēlā 8. parādīts mezglu izvietojums, 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 CH₃CN (J = 12–11, K=3) emisijas zonu, kuras ierosināšanas temperatūra ir 133 K. Tālāk uz dienvidiem parādās augstākas enerģijas CH₃CN 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⁻¹ komponente ir ļoti mainīga, bet -6.1 km s⁻¹ 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.

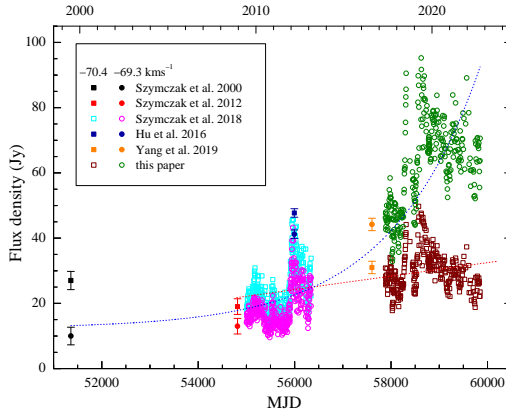
Izmantojot visus pieejamos EVN novērojumu datus, tika veikta avota īpaškustības analīze. Vispirms, izmantojām identisku pieeju kā Moscadelli et al. (2011), otrais māzeru mezgls ar LSR ātrumu -7.1 km s⁻¹ kalpo kā atskaites punkts. Procedūra ir sekojoša: (1) identificē mezglus, kas novērojami visās piecās EVN epohās, (2) pārbaude, vai šie mezgli kustās lineāri attiecībā pret otro mezglu, (3) visbeidzot lineārās kustības apjoms tiek novērtēts ar lineāras regresijas metodi, izmantojot visu 5 novērojumu datus. Īpaškustības virziens un ātrums parādīti attēlā 9. pa kreisi. Kopumā mūsu rezultāti ir ļoti tuvi Moscadelli et al. (2011) iegūtajiem, kad tika novērtēta kustība 5 gados izmantojot 3 datu masīvus. Kustības ātrumi ir 1.5 līdz 6.0 km s⁻¹ robežās, un PA atšķirība no īpaškustības vektoru virziena ir zem 30°. Austrumu mezglu klasterī pamanījām vēl vienu, 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 septiņiem stabilajiem mezgliem

(kopā 21 pāri), vienmēr pieņemot pirmā mezgla pozīciju kā (0,0), (2) izmantojot mazāko kvadrātu metodi, tiek novilkta taisnes, kas apraksta vienmērīgu kustību visos pāros (iegūstot 6 vektorus katram mezglam), (3) aprēķina summāro vektoru katram mezglam, ko interpretējam kā tā kustību katram mezglam. Šīs metodes rezultāts ir parādīts attēlā 9. pa labi. Pirmais mezgls kustas pretim visiem pārējiem, līdzīgi kā pirmajā metodē. Otrais un septītais mezgls virzās projām no trešā un ceturta, 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^{-1}), 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_3CN emisijas līnijas kartēs (Cesaroni et al., 2014).

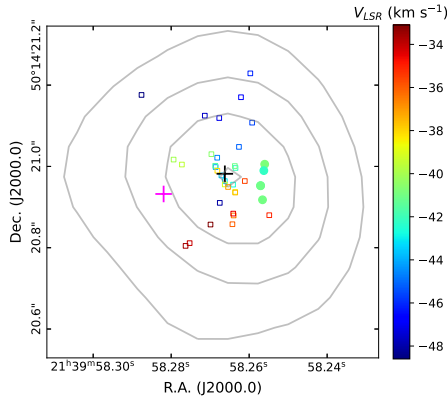
5.4.2 G90.925+1.486

Kopējā struktūra ir ļoti līdzīga tai, ko 2012. gadā ieguva BeSSeL pārskats, izmantojot VLBA. Mūsu 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. JVLVA novērojumi 2012. gadā (Hu et al., 2016) pamanīja plašu $\sim 300 \times 600 \text{ mas}$ ($\sim 1700 \times 3500 \text{ AU}$) emisijas apgabalu, norādot uz paplašināto emisijas pastiprināšanas zonu, ko izšķir VLBA un EVN. Emisija no mezgla 4 ar -70.3 km s^{-1} 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^{-1} nāk no pirmā mezgla, bet mazāk mainīgā -70.3 km s^{-1} no ceturta mezgla. Pēdējos 4 gadus, ar 2 līdz 3 mēnešu ilgstošiem cikliem, šīs komponentes ir mainījušās sinhroni ar amplitūdu 20 – 50 procenti no 2009. līdz 2013. gadam Szymczak et al. (2017) novēroja tādu pašu komponentu 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^{-1} komponentu pīķa plūsmas monotoni krītas no 2.5 līdz 0.4 reizi, laika posmā no 1999. līdz 2022. (Attēls 10.). Tā kā 6.7 GHz metanola māzera emisija ir starojuma ierosināta (Cragg et al., 2002), sinhronas svārstības laika diapazonā no 3 mēnešiem līdz dažiem gadiem, ar līdz pat 3.8 reizi lielām amplitūdas svārstībām, norāda uz būtiskām izmaiņām ierosinātajā starojuma intensitātē no centrālā objekta. Attēlā 10. redzams, ka -70.4 km s^{-1} komponentes plūsma aug ļoti lēnām (0.75 Jy yr^{-1}) no 2008. līdz 2022. gadam, bet -69.2 km s^{-1} komponentes plūsma aug eksponenciāli (23 gados pieauga 7 reizes). Autors izvirza hipotēzi, ka novērotās plūsmas



Att. 10: G90.925+1.486 spektrālo -70.4 un -69.3 km s^{-1} komponentu pīku plūsmas blīvuma ilgtermiņa mainīgums, atbilstoši atzīmēts ar kvadrātiem un apliem. 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. 11: G94.602–1.796 1.37 mm termiskā starojuma karte (Beuther et al., 2018). Pirmās kontūras līmenis ir 4.0 mJy beam $^{-1}$ ar 2.0 mJy beam $^{-1}$ pieauguma soli. Metanola māzeru mezglu pozīcijas parādītas ar punktiem, CH_3CN 220747.261 GHz līnijas emisija ar tukšajiem kvadrātiem, izmantojot NOEOMA datus (Gieser et al., 2021). Krāsa ir atbilstoša mezglu LSR ātrumam un parādīta skalā. Melnais un magenta krusti attiecīgi attēlo 5.8 un 44 GHz termiskā starojuma maksimuma pozīcijas (Purser et al., 2021).

blīvuma svārstības izraisa aktīvās vides izmēru (garuma) izmaiņas, gāzes kustības rezultātā (Caswell et al. 1995), diska spirālzaros (Bayandina et al. 2022).

5.4.3 G94.602-1.796

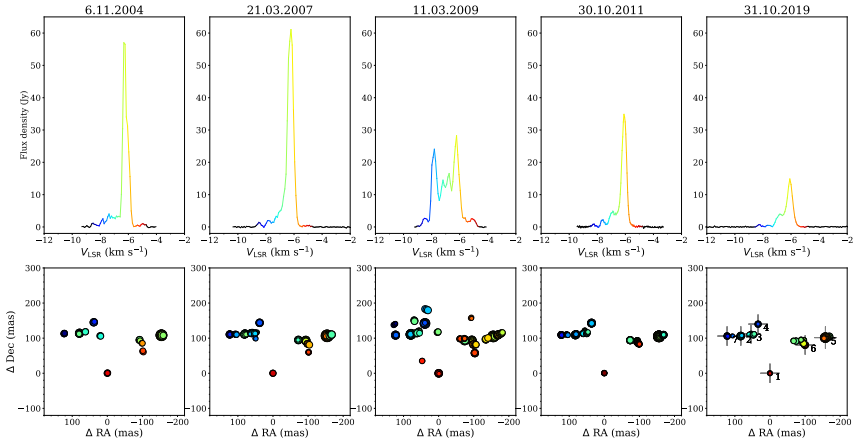
Salīdzinot Irbenes datus ar literatūrā atrodamajiem (Szymczak et al. 2017; Hu et al. 2016), šī avota spektrs ir mainījies būtiski. Emisija ar radiālo ātrumu -43.2 līdz -42.2 km s⁻¹ ir samazinājusies divas reizes. Apskatot vēl senākus datus (Slysh et al. 1999; Szymczak et al. 2000), varam ievērot būtiskas 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⁻¹, nevaram veikt mezglu struktūras analīzi, bet norādām, ka avota kopējā morfoloģija ar vertikālo lineāro struktūru un ātruma gradientu ir ļoti līdzīga. Salīdzinot māzera 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).

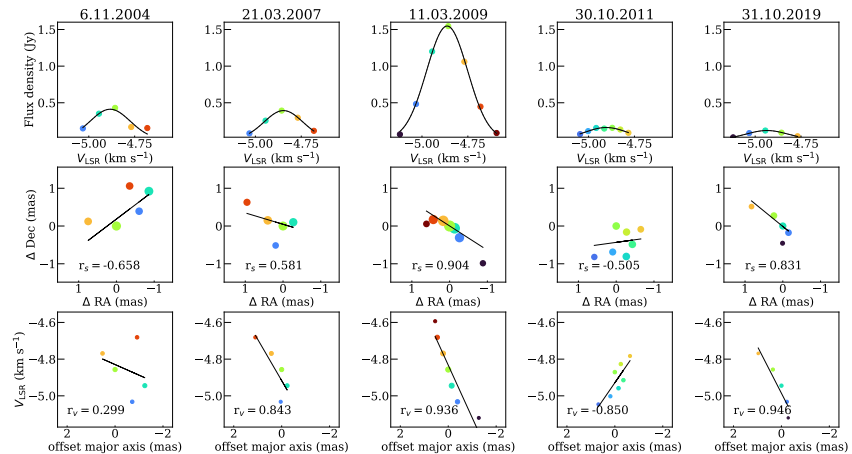
G94.602–1.796 tuvo infrasarkanā starojuma novērojumi liecināja, ka plūsma ir orientēta teju pret novērotāju (Murakawa et al., 2013). Savukārt, kompakts termiskais starojums novērots 5.8 un 44 GHz ar intensitāti atbilstoši 0.23 un 0.52 mJy ar izstiepumu, kura pozīcijas leņķis ir $91 \pm 71^\circ$, tas varētu liecināt par avota plūsmu (jetu) (Purser et al., 2021). Svarīgi atzīmēt, ka C-joslas termiskā starojuma maksimums ir vien 100 mas attālumā no māzera 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 māzera pozīcijas. NOEMA pārskata spektru dati (Gieser et al., 2021), mums ļāva iegūt 220747.261 GHz CH₃CN emisijas līnijas karti, kas tiek uzskatīta ka laba indikācija molekulu diskiem (Cesaroni et al. 2014). Šīs termiskās emisijas plankumi, tā pat kā metanola māzera mezgli, ir orientēti Ziemeļu - Dienvidu virzienā ar skaidru ātruma gradientu (Attēls 11.), ļaujot secināt, ka metanola māzera ir izvietoti diska rietumu malas centrālajā daļā.

5.5 Secinājumi

Apkopojām 3 avotu 4.5 gadus ilgas monitoringa laika sērijas un analizējam tās kontekstā ar VLBI datiem. Avotu plūsmas blīvuma izmaiņas ir dažādas, bet to kopējā iezīme ir tādas, ka sinhroni mainās visas spektra komponentes. Veiksmīgi ieguvām loka milisekundes izšķirtspējas attēlus trim atlasītajiem – mainīgiem avotiem. G90.925+1.486 un G94.602–1.796 šādas kvalitātes dati iegūti pirmoreiz. Aplūkojot atsevišķus māzera mezglus (cloudlets), to struktūras izmaiņas



Att. 12: *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 km s^{-1} , kas ir stabils un kompakts visos epohos. Tā koordinātes ir dotas Tabulā 5. Pelēkie krusti un cipari apakšējā labajā panelī, parāda pozīcijas septiņiem māzera mezgliem, kas saglabājas visus 15 gadus.



Att. 13: *Augšā*: Pirmā mezgla (kā Tabulā 12) spektrs ar Gausa profila modeli *Vidū*: Māzeru plankumu izvietojums pie debesīm ar galvenās ass modeli un korelācijas koeficientu r_s . 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_v .

Tabula 8: G78.122+3.633 6.7 GHz māzeru mezglu parametri, kas pastāv 15 gadus. Tie paši parametri, kas tabulā 5, bet ar viesiem pieciem epoha datiem. Iekļauti arī lineārās korelācijas koeficienti punktu izvietojumam (r_s) un novirzei no galvenās ass (r_v), un galvenās ass virziena leņķis (PA).

Cloud Epoch	ΔRA (mas)	ΔDec (mas)	V_{fit} (km s^{-1})	FWHM (km s^{-1})	S_{fit} (Jy beam^{-1})	r_s	r_v	V_{grad} ($\text{km s}^{-1} \text{mas}^{-1} (\text{AU})^{-1}$)	PA ($^\circ$)
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(0.16)	73
2009	-0.2	-0.1	-4.86	0.26	1.5	0.90	0.93	0.29(0.18)	57
2011	0.3	0.8	-4.90	0.27	0.2	-0.51	-0.92	0.18(0.12)	-82
2019	0.0	0.0	-4.94	0.26	0.1	0.83	0.95	0.28(0.17)	51
Cloudlet 2									
2004	79.3	114.4	-7.15	0.17	1.9	-0.90	0.94	0.28(0.18)	142
2007	79.7	112.4	-7.14	0.52	1.7	-0.89	0.77	0.13(0.08)	134
2009	78.6	111.2	-7.10	0.42	9.2	-0.65	0.59	0.15(0.09)	129
2011	82.3	109.4	-6.93	0.20	1.2	-0.99	0.99	0.12(0.07)	123
	-	-	-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									
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
	-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	0.24	0.2	0.79	-0.94	0.11(0.07)	139
	-100.4	80.6	-5.70	0.40	0.7	0.70	-0.80	0.20(0.12)	-114
Cloudlet 7									
2004	123.1	113.0	-8.34	0.34	0.5	-0.96	0.41	0.17(0.11)	127
2007	123.2	110.5	-8.30	0.32	1.0	0.52	-0.95	0.30(0.19)	-147
2009	122.9	108.5	-8.30	0.32	2.1	0.33	-0.98	0.26(0.16)	-132
2011	122.5	109.0	-8.27	0.30	0.6	0.85	-0.99	0.15(0.09)	-140
2019	122.1	106.0	-8.27	0.29	0.5	0.87	-0.98	0.13(0.08)	-137

* Korelācijas koeficients nav labi definēts punktu kopai kuri izvietoti austrumi rietumu virzienā, t.i. Y ass izkļiede tuvā 0.

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, kas izvietoti plūsmas ārēja malā. Novērojām, ka vairums mezglu ātruma gradienta virzieni labi saskan ar mezgla īpaškustības vektora virzienu, ko noteicām, 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 komponentu mainīguma profils 23 gados ir būtiski atšķirīgs, viena mainās lineāri ar 0.75 Jy yr^{-1} izmaiņu, otrās plūsma aug eksponenciāli. Ticamākais kā šis mainības iemesls ir izmaiņas aktīvās vides garumā.

Arī **G94.602–1.796** struktūra kopumā ir stabila vismaz 7 gadus. Galveno komponentu 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 saistām ar gāzes kustību.

5.6 Autora ieguldījums

Kā jau minēts iepriekš, pirms šī pētījuma, institūtā (VSRC) 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 pasākumus, 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 rezultāti tika apkopoti un interpretēti, un publicēti MNRAS žurnālā, autors ir šīs publikācijas pirmais un korespondējošais autors.

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 versijas programmatūrai 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. Esam konstatējuši, būtiskas izmaiņas vairāku avotu mainīguma tendencēs, ieskaitot varbūtējas trīs avotu periodiskas svārstības.

Šī darba ietveros 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 vērsti teju ar tā malu. Nākotnē jau veiktie atkārtotie novērojumi, ļaus pētīt atsevišķo mezglu evolūciju un detalizēti analizēt abus avotus.

Analizējot kopumā piecus G78.122+3.633 EVN novērojumus secinājām, ka novērotā māzeru mainība ir dominējoši saistīta ar plūsmas izmaiņām māzeru mezglos, nevis ar to jaunu mezglu parādīšanos, vai to izzušanu. Individuālu mezglu evolūcija norāda uz to vērpšanos, saraušanos un izstiepšanos. Ir norādes, ka lielāka plūsma izmaiņa no mezgliem saistītās 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 strūkļas robežzonā. Salīdzinot abu grupu mezglu individuālo morfoloģiju, tika secināts, ka otrās grupas mezgli ir izmēros lielāki un vairāk savērti. 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, tika secināts, 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 termiņa 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 ietveros 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 atkārtēšanas 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 akrēcijas uzliesmojumiem. Mūsu 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.

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
- 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., 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
- 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
- Menten, K. M.: 1991, *The Astrophysical Journal Letters* **380**, L75
- 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
- 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
- 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'ts, I. E., Slysh, V. I., Voronkov, M. A., and Migenes, V.: 2002, *ASP Conference Proceedings* **279**, 279
- 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
- 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
- Winkel, B., Kraus, A., and Bach, U.: 2012, *Astronomy & Astrophysics* **540**, A140
- 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
- Zinnecker, H. and Yorke, H. W.: 2007, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **45(1)**, 481