

# Autoreferat

1. Imię i Nazwisko: **Anna Bartkiewicz** (Niezurawska)
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe:  
(z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej)
  - a) **magister astronomii**, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, 2001, *Analiza map polaryzacyjnych promieniowania maserowego OH czerwonego nadolbrzyna VX Sagitarii*,
  - b) **doktor nauk fizycznych w zakresie astronomii**, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, 2007, *Interferometryczne badania promieniowania maserowego molekuł OH i CH<sub>3</sub>OH w obszarach powstawania masywnych gwiazd*.
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych:
  - a) 2007–2009 – asystent w Katedrze Radioastronomii Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu,
  - b) od 2009 – adiunkt w Katedrze Radioastronomii Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu (w okresie III-VIII.2012 przerwa w zatrudnieniu związana z urlopem macierzyńskim).
4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz.595 ze zm.):

## Badania emisji maserowej metanolu w obszarach powstawania masywnych gwiazd ze szczególnym uwzględnieniem struktur pierścieniowych

- a) autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, bibliometria wg. Web of Science
  1. **Bartkiewicz A.**, Szymczak M., Pilhström Y.M., van Langevelde H.J., Brunthaler A., Reid M.J., *VLA observations of water masers towards 6.7 GHz methanol maser sources*, 2011, *Astronomy and Astrophysics*, 525, A120, 1-17, cytowana 11 razy,
  2. **Bartkiewicz A.**, Szymczak M., van Langevelde H.J., *Milliarcsecond structure of water maser emission in two young high-mass stellar objects associated with methanol masers*, 2012, *Astronomy and Astrophysics*, 541, A72, 1-9, cytowana 1 raz,
  3. De Buizer J.M., **Bartkiewicz A.**, Szymczak M., *Testing the Hypothesis that Methanol Maser Rings Trace Circumstellar Disks: High-resolution Near-infrared and Mid-infrared Imaging*, 2012, *The Astrophysical Journal*, 754, 149, 1-15, cytowana 6 razy,
  4. **Bartkiewicz A.**, Szymczak M., van Langevelde H.J., *European VLBI Network observations of 6.7 GHz methanol masers in clusters of massive young stellar objects*, 2014, *Astronomy & Astrophysics*, 564, A110, 1-22, cytowana 1 raz,
  5. **Bartkiewicz A.**, Szymczak M., van Langevelde H.J., *European VLBI Network imaging of 6.7 GHz methanol masers*, 2016 (w druku), *Astronomy & Astrophysics*, doi: 10.1051/0004-6361/201527541, astro-ph:1601.03197.

- b) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania:

## Wprowadzenie

Jednym z zagadnień współczesnej astrofizyki jest wyjaśnienie mechanizmu powstawania masywnych gwiazd, czyli gwiazd o masie powyżej  $8 M_{\odot}$ . Gwiazdy te pojawiają się na ciągu głównym diagramu H–R, gdy jeszcze trwa akrecja materii. Ich ewolucja zachodzi szybko, znajdują się na znacznych odległościach od nas (kilku kpc) i na dodatek obiekty te ukryte są w gęstych obłokach molekularnych. Te cechy utrudniają poznanie mechanizmów odpowiedzialnych za powstanie masywnych gwiazd. Wiadomo, że wraz ze wzrostem mas protogwiazd, ciśnienie promieniowania rośnie, przewyższa siły grawitacyjne i akrecja powinna zostać zatrzymana, zatem niemożliwy byłby dalszy przyrost masy. Pomimo tego powstają masywne gwiazdy, niektóre z nich osiągają masę nawet powyżej  $100 M_{\odot}$ . Tak więc pojawia się pytanie dotyczące mechanizmu formowania masywnych gwiazd. Czy dochodzi do zderzeń mniej masywnych gwiazd, czy też zachodzą te same mechanizmy (lecz przeskalowane), które odpowiadają za formowanie mniej masywnych gwiazd?

Okazuje się, że linia maserowa cząsteczki metanolu ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) z zakresu radiowego na częstotliwości  $6668,519 \text{ MHz}^1$  (ok. 4,5 cm) jest jednym z pierwszych przejawów powstania masywnych gwiazd (np. Breen i in. 2013). Emisja ta (tzw. *plamy* i *chmury maserowe*) tworzy się w pobliskich obszarach (setki–tysiące au) wokół młodych masywnych obiektów centralnych. Stosunkowo wysoka jasność emisji maserowej oraz jej niewielkie rozmiary, w połączeniu z najnowszymi technikami obserwacyjnymi interferometrią wielkobazową VLBI, umożliwiają badanie najmniejszych (rzędu kilku au) obszarów neutralnego gazu wokół tworzących się gwiazd. Zatem możliwe jest poznanie dynamiki i kinematyki ich bliskiego środowiska, choć same masywne protogwiazdy są prawie niewidoczne (pewne informacje można uzyskać w podczerwieni).

Pierwsze obserwacje interferometryczne linii maserowej metanolu 6,7 GHz wykazały, że emisja układa się w różnorodne struktury: proste, liniowe, łukowe, podwójne, czy też złożone (Norris i in. 1993, Phillips i in. 1998, Walsh i in. 1998, Minier i in. 2000). Poszukiwania radiowego kontinuum od obszarów zjonizowanego wodoru (H II) wykazały, że jedynie niektóre obiekty maserowe mogą być związane z obszarami H II. Zatem emisja 6,7 GHz tworzy się na bardzo wczesnym etapie ewolucyjnym młodych i masywnych gwiazd, zanim promieniowanie UV gwiazd zjonizuje materię wokół nich (np. Walsh i in. 1998).

W 2003 roku w naszej grupie badawczej z Centrum Astronomii Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu rozpoczęliśmy obserwacje o wysokiej rozdzielczości kątowej próbki obiektów emisji maserowej metanolu 6,7 GHz, aby znaleźć odpowiedź na podstawowe pytanie: *gdzie powstaje emisja maserowa metanolu?* Obiekty te zostały odkryte w systematycznym przeglądzie płaszczyzny Galaktyki przy użyciu 32 m radioteleskopu RT4 (Szymczak i in. 2002). Wykorzystanie europejskiej sieci interferometrii wielkobazowej *European VLBI Network* (EVN) zapewniło czułość obserwacji na poziomie kilku mJy i rozdzielczość kątową kilku milisekund łuku (mas), zaś rozdzielczość spektralną nawet  $87 \text{ m s}^{-1}$ . Były to jedne z pierwszych obserwacji spektralnych wykonane siecią EVN o tak wysokich parametrach (w 2004 roku przybyło anten z odbiornikami na pasmo metanolu w interferometrze, a w kolejnych latach ulepszono możliwości korelatora).

Pierwsze obserwacje potwierdziły istnienie różnorodnej morfologii emisji maserowej metanolu. Prócz znanych klas odkryłam nowe struktury o kształcie elipsy, tzw. pierścieniowe (ang. *rings*) (Bartkiewicz i in. 2009, cytowana 37 razy)<sup>2</sup>. Brak tej klasy morfologicznej w poprzednich przeglądach został użyty jako argument przeciwko postulatowi Elitzura (1992), że

<sup>1</sup>W dalszej części autoreferatu będę stosowała skrót 6,7 GHz.

<sup>2</sup>W przypadku publikacji niezaliczanych w skład osiągnięcia, w których jestem współautorem podaję liczbę cytacji według bazy Web of Science.

emisja 6,7 GHz tworzy się w warstwie chłodnego i gęstego gazu i pyłu, między falą uderzeniową a frontem jonizującym wokół obszaru H II (Norris i in. 1998). Odkrycie to dało podstawę kolejnych badań. Morfologia elipsy sugerowała związek z dyskiem czy też torusem molekularnym wokół powstającej gwiazdy, jednak rozkład prędkości nie przystawał do modelu dysku keplerskiego. Zaczęłam więc szczegółowe badania wykorzystując wysokiej klasy instrumenty do poznawania obszarów wykazujących emisję maserową metanolu, a więc obszarów formowania się masywnych gwiazd.

Poniżej w skrócie przedstawię najważniejsze rezultaty i wnioski dla każdej z publikacji wchodzących w skład osiągnięcia habilitacyjnego (*Publikacje 1–5*). Przedstawiają one różnorodne badania znacznej liczby (63) źródeł z emisją maserową metanolu 6,7 GHz. Głównym celem było ich scharakteryzowanie i odkrycie ich natury ze szczególnym uwzględnieniem nowo odkrytej klasy – struktur o kształcie pierścienia.

### Poszukiwanie śladów wpływów przy pomocy linii maserowej pary wodnej

W 2009 roku uzyskałam czas obserwacyjny ( $2 \times 12$ h) na sieć radioteleskopów *Very Large Array* (VLA) w Nowym Meksyku. Projekt miał na celu poszukiwanie emisji maserowej pary wodnej na częstotliwości  $22235,08 \text{ MHz}^3$  (ok. 1,3 cm), która związana jest z szybkimi wpływami materii w obszarach gwiazdotwórczych. Jak opisałam w *publikacji 1* w kierunku 27 z 31 źródeł zaobserwowałam emisję pary wodnej, przy czym w przypadku 15 obiektów była to emisja zarejestrowana po raz pierwszy. Przeanalizowałam odległości liniowe<sup>4</sup> między obiema liniami maserowymi oraz występowanie ich na podobnych prędkościach względem lokalnego układu odniesienia (LSR). Wykazałam, iż w przypadku 22 obiektów (71% badanej próbki) obie linie maserowe wzmacniane są przez ten sam obiekt centralny, choć związane są z innymi obszarami kinematycznymi. Występują więc w podobnej fazie ewolucyjnej młodej gwiazdy. Ponadto łatwo zauważyć, że emisja maserowa pary wodnej wykazuje kilkukrotnie szersze pokrycie w prędkości aniżeli emisja maserowa metanolu. Jest to zgodne z teorią, że obie linie związane są fizycznie z innym środowiskiem wokół powstającej gwiazdy. Cząsteczki  $\text{CH}_3\text{OH}$  pompowane są promieniście w relatywnie chłodnych (poniżej 150 K) oraz rzadszych obszarach (poniżej  $10^8 \text{ cm}^{-3}$ ), zaś cząsteczki  $\text{H}_2\text{O}$  pompowane są zderzeniowo w gęstszych (powyżej  $10^8 \text{ cm}^{-3}$ ) oraz cieplejszych (powyżej 400 K) chmurach gazowych (Cragg i in. 2005, Elitzur i in. 1989).

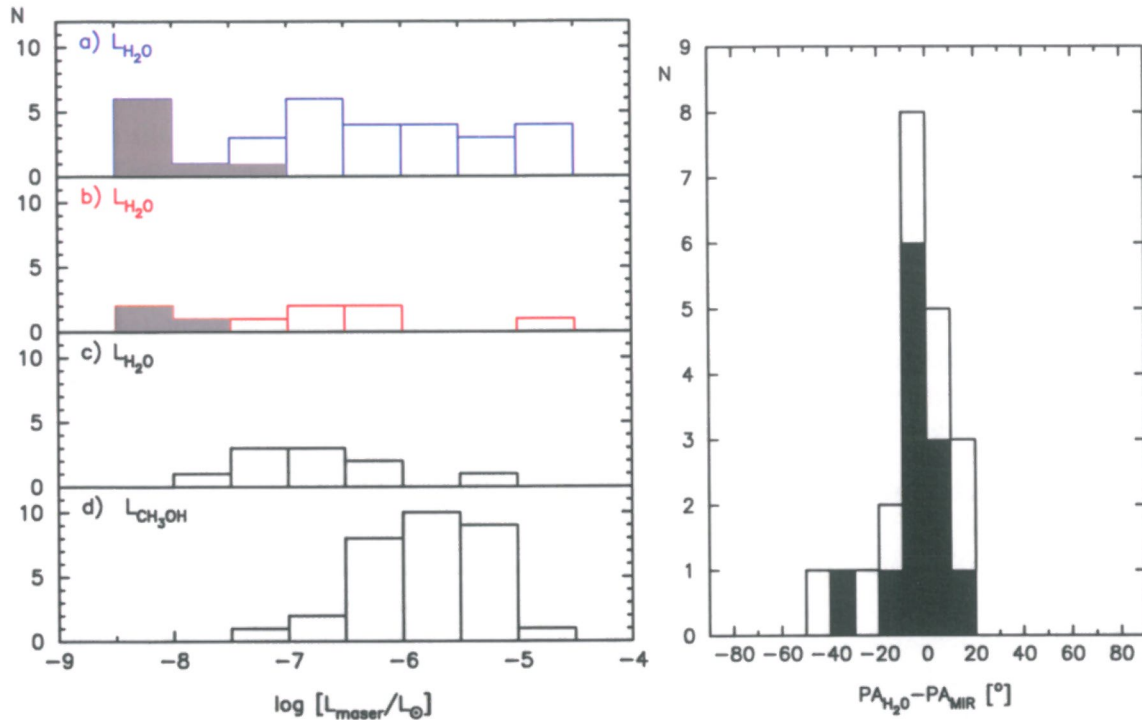
W kierunku czterech obiektów z emisją maserową metanolu nie zarejestrowałam emisji maserowej pary wodnej z limitem  $15 \text{ mJy beam}^{-1}$ . W przypadku kolejnych pięciu źródeł separacja w projekcji na niebie była powyżej 0,1 pc i ich fizyczne powiązanie jest mało prawdopodobne. Zauważyłam, że co najmniej cztery obiekty z wyżej wspomnianych dziewięciu źródeł wykazały strukturę pierścieniową emisji maserowej metanolu 6,7 GHz. Wyliczenie jasności emisji maserowej pary wodnej wykazało, iż nie ma znaczących różnic między tym parametrem w grupie maserów wykazujących powiązanie z emisją maserową metanolu czy też nie wykazujących tego związku. Jednakże grupa wykazująca emisję maserową metanolu o strukturze pierścienia w większości wykazuje najniższą jasność emisji masera 22,2 GHz (rys. 1). Obiekty te mogą być związane z gwiazdami znajdującymi się we wcześniejszym stadium ewolucji aniżeli źródła o innej strukturze emisji maserowej metanolu. W miarę ewolucji centralnego obiektu, kiedy następuje dominacja wiatrów i wpływów, struktura emisji maserowej metanolu związana z dyskiem zostałaby zniszczona i obie linie maserowe,  $\text{CH}_3\text{OH}$  oraz  $\text{H}_2\text{O}$  powstawałyby w wpływach.

Ważne było też porównanie struktury emisji maserowej 22,2 GHz z morfologią emisji widocznej w pośredniej podczerwieni ( $4,5 \mu\text{m}$ ) wykorzystując katalog Spitzera GLIMPSE<sup>5</sup>. Emisja

<sup>3</sup>W dalszej części autoreferatu będę stosowała skrót 22,2 GHz.

<sup>4</sup>Za odległości do źródeł uznano bliższe odległości kinematyczne wyliczone przy użyciu procedury wg. Reid i in. (2009).

<sup>5</sup><http://irsa.ipac.caltech.edu>



Rysunek 1: **Z lewej strony** przedstawiono histogramy jasności (L): **a)** emisji maserowej pary wodnej w kierunku 31 obiektów wykazujących emisję maserową metanolu, **b)** tak samo jak a), ale dla obiektów o pierścieniowej strukturze emisji maserowej metanolu, **c)** tak samo jak a), ale dla obiektów nie wykazujących powiązania z maserem metanolu (jeden obiekt okazał się podwójny (stąd dziesięć obiektów), obie grupy maserowe są znacznie oddalone od emisji maserowej metanolu), **d)** emisji maserowej metanolu. Szarym kolorem na panelach a) i b) zaznaczono obiekty, dla których wyznaczono górny limit wartości L (brak detekcji). **Po prawej stronie** przedstawiono histogram różnic między kątem pozycyjnym (PA) opisującym oś główną emisji maserowej pary wodnej a kątem osi głównej emisji w pośredniej podczerwieni (MIR)  $4,5 \mu\text{m}$ . Obiekty, w przypadku których niepewność pomiaru wartości PA była poniżej  $6^{\circ}$  zaznaczono kolorem czarnym. W przypadku pozostałych obiektów niepewności wyznaczenia kąta PA były rzędu  $10^{\circ}$ – $15^{\circ}$ . Rysunki pochodzą z *publikacji 1*.

ta wskazuje na istnienie szybkiego wypływu materii (np. Cyganowski i in. 2009). W większości przypadków występuje zgodność między kątem pozycyjnym głównej osi rozkładu obu emisji w granicy  $20^{\circ}$  (rys. 1). Jest to kolejny dowód na fizyczny związek emisji maserowej pary wodnej z wypływami materii występującymi w obszarach gwiazdotwórczych. Ciekawy rezultat otrzymano w przypadku czterech źródeł pierścieniowych, gdzie znaleziono emisję 22,2 GHz. Główna oś dopasowanej elipsy do rozkładu masera metanolu jest prostopadła do głównej osi rozkładu masera pary wodnej. Taki rozkład sugeruje związek odpowiednio z dyskiem okółgwiazdowym i wypływem.

### Milisekundowa struktura emisji pary wodnej

W 2010 roku wraz ze współpracownikami uzyskaliśmy czas (8h) na interferometrze EVN, by z rozdzielczością 1–2 milisekundy łuku oraz rozdzielczością spektralną  $0,1 \text{ km s}^{-1}$  zbadać strukturę dwóch źródeł o pierścieniowej strukturze emisji maserowej metanolu, które w powyżej omawianym projekcie (*publikacja 1*) zostały odkryte jako obiekty z emisją maserową pary wodnej.

W obiektach G31.581+00.077<sup>6</sup> oraz G33.641–00.228 zarejestrowałam odpowiednio 91 i 21 plam maserowych (stosunek sygnału do szumu dla najsłabszych składników wynosił 9). Pogrupowałam je w chmury maserowe na podstawie ich współrzędnych oraz prędkości LSR. Dokonałam szczegółowej analizy ich rozkładu przestrzennego oraz profili linii widmowych. Wyzaczyłam szerokości połówkowe linii, które wskazują na charakter nienasyconej emisji maserowej. Wylczyłam temperatury jasnościowe plam maserowych (powyżej  $10^8$  K). Jedynie 20% ze wszystkich zidentyfikowanych chmur wykazało gradient prędkości – typowa jego wartość to  $0,3 \text{ km s}^{-1} \text{ au}^{-1}$ . Po raz pierwszy wykazałam występowanie linii maserowej metanolu i pary wodnej w bliskim sąsiedztwie – separacja w projekcji na niebie wyniosła jedynie ok. 135 au ( $0,025''$ ) w obiekcie G31.581+00.077. Nie znalazłam jednak przypadku nakładania się na niebie plam maserowych obu linii, co potwierdza ich związek z różnymi obszarami ośrodka okołogwiazdowego i inne mechanizmy wzmocnienia.

W przypadku źródła G31.581+00.077 najlepsze dopasowanie do rozkładu przestrzennego uzyskałam dla przypadku modelu rotującego i ekspandującego dysku keplerowskiego, z którym związana jest emisja maserowa metanolu, zaś emisja maserowa pary wodnej powstaje w wypływie. Ze względu na brak danych w podczerwieni wskazujących na położenie młodej gwiazdy zaproponowałam dwa scenariusze: centrum wypływu pokrywa się z centrum ww. dysku (scenariusz O1, test  $\chi^2$  na poziomie 1,7), bądź też ulokowane jest poza dyskiem (scenariusz O2,  $\chi^2 = 0,7$ ) (rys. 2). W przypadku obiektu G33.641–00.228 łukowa struktura emisji maserowej metanolu może być związana z dyskiem czy też torusem wokół centralnego obiektu, zaś rozkład masera  $\text{H}_2\text{O}$  wyraźnie wskazuje na wypływ (rys. 2).

Rezultaty opisane w *publikacji 2* są wynikiem jednych z pierwszych obserwacji spektralnych na częstotliwości 22,2 GHz wykonanych przy użyciu sieci EVN. Milisekundowa dokładność absolutnych pozycji wyznaczenia plam maserowych oraz bardzo dobra rozdzielczość kątowna obserwacji umożliwia badanie ruchów własnych w okresie kilku lat, uzyskane obrazy mogą być podstawą takich badań.

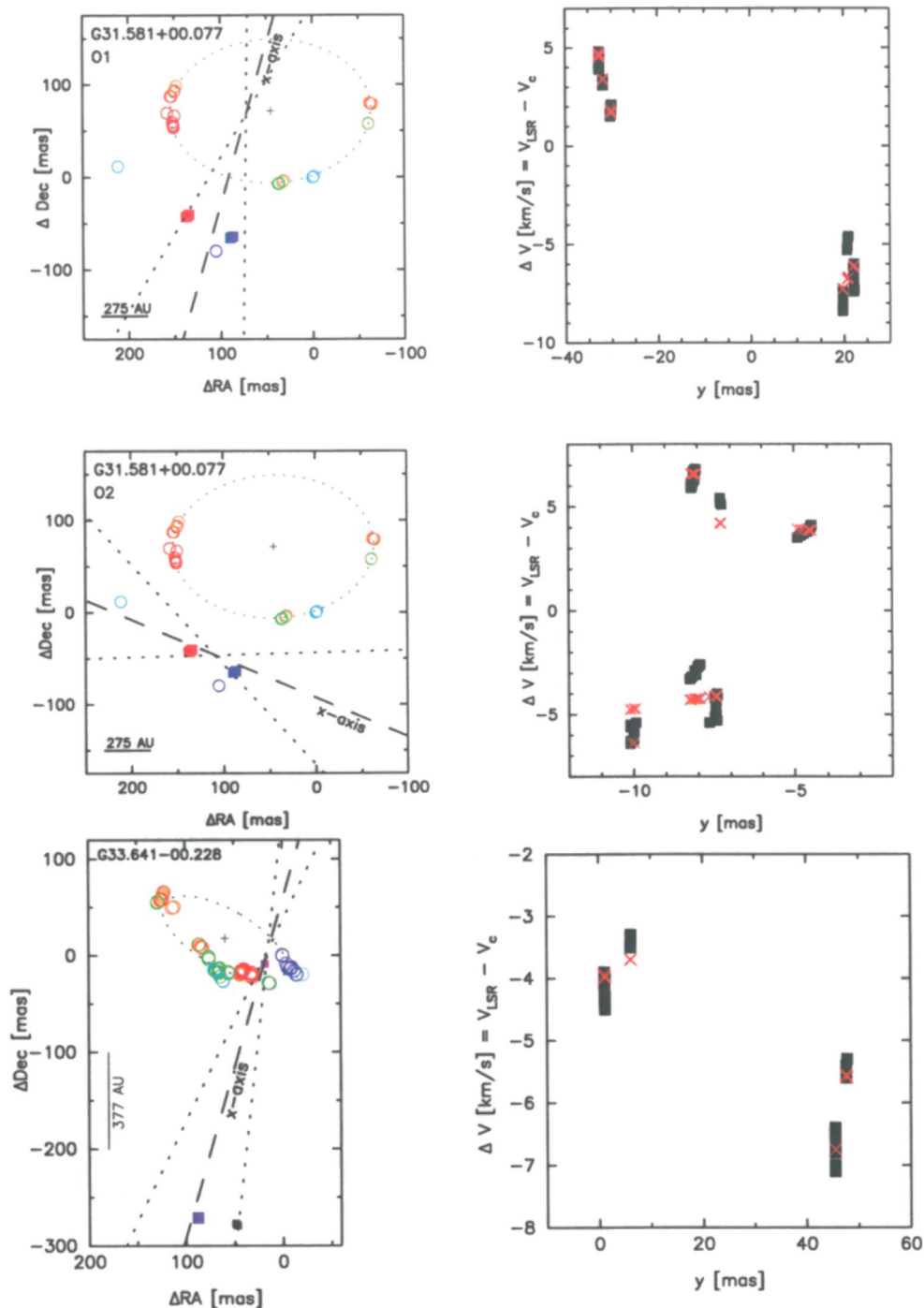
### Poszukiwanie obiektu centralnego w pierścieniach metanolu

Ze względu na brak danych w podczerwieni korespondujących z milisekundową rozdzielczością map emisji maserowej na falach radiowych zaproponowałam współautorom *publikacji 3* projekt mający na celu odpowiedź na pytanie: *czy młoda gwiazda znajduje się w centrum pierścieni metanolu?* Obserwacje z wykorzystaniem teleskopów Gemini South (na falach  $8,6 \mu\text{m}$ ,  $18,3 \mu\text{m}$ ) oraz Gemini North ( $2 \mu\text{m}$ ) w 2009 roku umożliwiły porównanie rozkładów emisji na podobnych rozdzielczościach kątowych w czterech obiektach z pierścieniową strukturą emisji maserowej metanolu. Okazało się, że centra emisji w podczerwieni są przesunięte (powyżej limitu niepewności astrometrycznej) względem wyznaczonych środków elips dopasowanych do rozkładu emisji maserowej metanolu. Przykład źródła G23.657–00.127 przedstawiłam na rys. 3. Taki układ sugeruje, że maser powstaje w wypływie lub za falą uderzeniową i wyklucza model dysku jako miejsce wzmocnienia emisji maserowej 6,7 GHz.

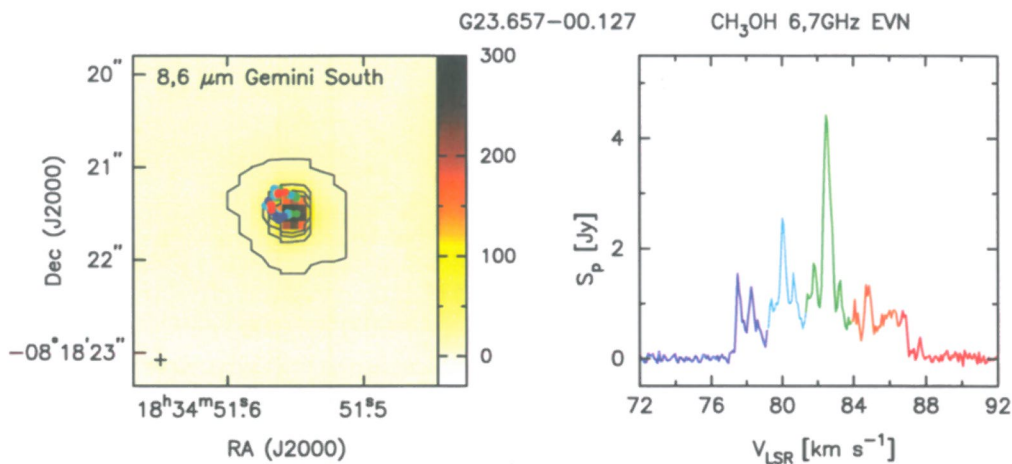
Ponadto zebrałam dane z publicznie dostępnych katalogów w zakresie  $1,25 \mu\text{m}$ – $100 \mu\text{m}$ , które umożliwiły dopasowanie rozkładu energii widmowej (tzw. SED) dla każdego z opisanych źródeł wg. procedury opisanej przez Robitaille i in. (2007). Okazał się on spójny z masywnym młodym obiektem, którego masa wynosiła powyżej  $8 M_{\odot}$ , jednak dopasowane dyski molekularne wykazały odmienne kąty nachylenia aniżeli sugerowała morfologia masera metanolu.

---

<sup>6</sup>Nazwą źródła są jego współrzędne galaktyczne uaktualnione na wyznaczoną pozycję z dokładnością kilku milisekund łuku.



Rysunek 2: **Po lewej:** szkic bipolarnych modeli wypływów dopasowanych do rozkładu emisji maserowej pary wodnej 22,2 GHz (kwadraty) w źródłach G31.581+00.077 (scenariusze O1 i O2) i G33.641-00.228. Oś x (przerywana linia) wskazuje kierunek wypływu rzutowany na płaszczyznę nieba, wierzchołek stożka (punkt przecięcia linii) wskazuje zaś na położenie centrum wzbudzającego wypływ (centralną gwiazdę). Linie kropkowane prezentują kąt rozwarcia wypływu rzutowany na płaszczyznę nieba. Kółka przedstawiają położenie emisji maserowej metanolu 6,7 GHz wraz z dopasowanymi elipsami do jej rozkładu. **Po prawej:** porównano zarejestrowane (czarne kwadraty) i dopasowane (czerwone symbole x) prędkości składowych maserowych (względem prędkości centralnej) względem odległości od osi x. Rysunki pochodzą z publikacji 2.



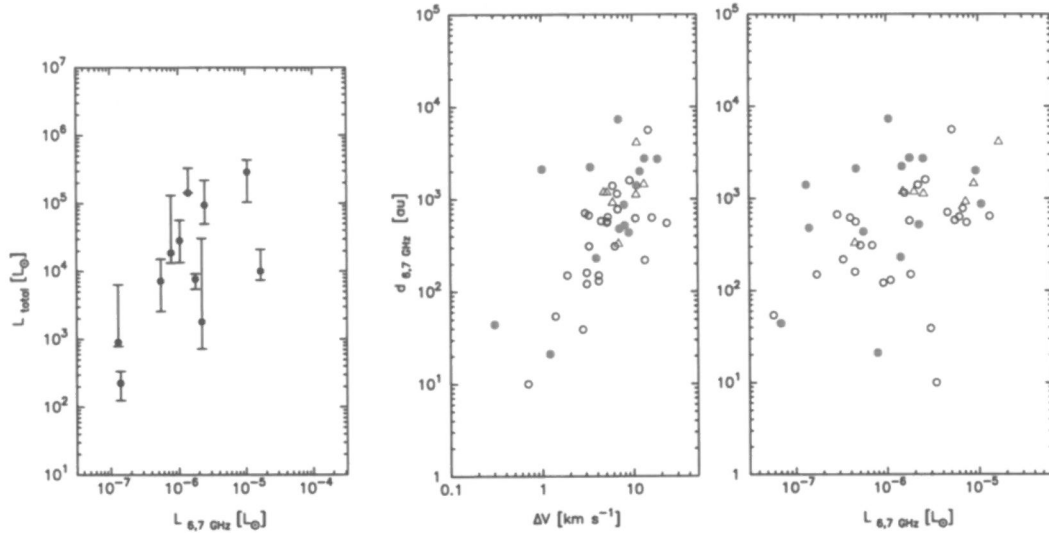
Rysunek 3: Na lewym panelu przedstawiono emisję w zakresie pośredniej podczerwieni ( $8,6 \mu\text{m}$ ) w pierścieniu metanolu G23.657–00.127. Kolorowe kółka korespondują z rozkładem plam maserowych 6,7 GHz na odpowiednich prędkościach względem LSR, jak przedstawiono to w widmie emisji maserowej na prawym panelu. Niepewność astrometryczna ( $1\sigma$ ) pomiaru emisji  $8,6 \mu\text{m}$  zaznaczona jest na dole po lewej. Niepewność astrometryczna pomiaru emisji maserowej metanolu wynosi poniżej 5 mas w RA i Dec i jest mniejsza niż rozmiar symboli.

### Poszukiwanie emisji maserowej metanolu 6,7 GHz w grupie masywnych młodych gwiazd

W 2010 roku przy użyciu sieci EVN wykonałam mapy kolejnych obszarów z emisją maserową 6,7 GHz (uzyskany czas obserwacyjny:  $2 \times 10$ h) i wraz ze współpracownikami zweryfikowałam ich związek z obiektami widocznymi w pośredniej podczerwieni (*publikacja 4*). Wybrane zostały źródła wykazujące złożone i szerokie widma wśród obiektów monitorowanych 32 m anteną CA UMK (Szymczak i in. 2012, cytowana 7 razy). Ponadto na podstawie danych z katalogu GLIMPSE ze Spitzera można było założyć, że istnieje cała grupa obiektów widoczna w podczerwieni w kierunku danego źródła maserowego. Główne cele projektu to: weryfikacja z jakimi obiektami widocznymi w podczerwieni wiąże się emisja maserowa 6,7 GHz, określenie jej położenia z dokładnością milisekund łuku oraz zbadanie jej morfologii. Dokładność wyznaczenia współrzędnych określonych na podstawie obserwacji 32 m anteną była rzędu  $20''$ – $30''$  (Szymczak i in. 2012, cytowana 7 razy).

W przypadku 15 obiektów uzyskałam mapy o najwyższej aktualnie dostępnej rozdzielczości kątowej i czułości. Przy zastosowaniu krótkiego czasu integracji możliwe było otrzymanie map o znacznym polu widzenia ( $2,1'$ ) i tym samym znalezienie emisji oraz wyznaczenie jej współrzędnych z dokładnością milisekund łuku. Okazało się, że emisja maserowa metanolu powiązana była z najjaśniejszym obiektem w danej grupie młodych gwiazd i występuje pewna zależność między jasnością emisji maserowej a jasnością centralnego obiektu (rys. 4). Jest to zgodne z hipotezą, że jaśniejsza gwiazda ma wpływ na większy obszar wokół niej i droga wzmocnienia masera jest dłuższa, a więc i emisja jest jaśniejsza. Nie zauważyłam natomiast różnic w położeniu na diagramie barwa–barwa ( $[4,5$ – $5,8] \mu\text{m}$  vs.  $[3,6$ – $4,5] \mu\text{m}$ ) między obiektami związanymi z emisją maserową a nie wykazującymi takiego powiązania. Ponadto porównałam liniowe rozmiary struktur maserowych<sup>7</sup> z szerokością profilu widmowego oraz z jasnością masera (przy założeniu emisji izotropowej) i wykazałam, że szerokość profilu jest skorelowana z rozmiarami struktur (rys. 4). Natomiast brak jest zależności między rozmiarem a jasnością (rys. 4). Zauwa-

<sup>7</sup>Odległości wyznaczone poprzez paralaksę trygonometryczną (dane literaturowe), bądź założone bliższe odległości kinematyczne wyliczone przy użyciu procedury Reid i in. (2009)



Rysunek 4: Na lewym panelu przedstawiono zależność między jasnością centralnej gwiazdy ( $L_{\text{total}}$ ) oraz jasnością emisji maserowej metanolu 6,7 GHz zarejestrowanej przy użyciu sieci EVN ( $L_{6,7 \text{ GHz}}$ ). Zakres wartości  $L_{\text{total}}$  dopasowanych modeli przedstawiony jest przez słupki błędów. Środkowy panel prezentuje zależność między rozmiarem emisji maserowej ( $d_{6,7 \text{ GHz}}$ ) a szerokością jej profilu widmowego ( $\Delta V$ ). Panel po prawej przedstawia zależność między rozmiarem emisji a jej jasnością ( $L_{6,7 \text{ GHz}}$ ). Dla lepszej weryfikacji ww. zależności dodano obiekty z publikacji Bartkiewicz i in. (2009) (białe kółka). Obiekty ze strukturą pierścieniową zostały zaznaczone trójkątami. Rysunki pochodzą z publikacji 4.

żyłam, że struktury pierścieniowe zaliczają się do większych obiektów maserowych metanolu (powyżej 330 au) z szerszą emisją – powyżej  $4,8 \text{ km s}^{-1}$  (rys. 4).

### Emisja maserowa metanolu 6,7 GHz widziana interferometrią wielkobazową

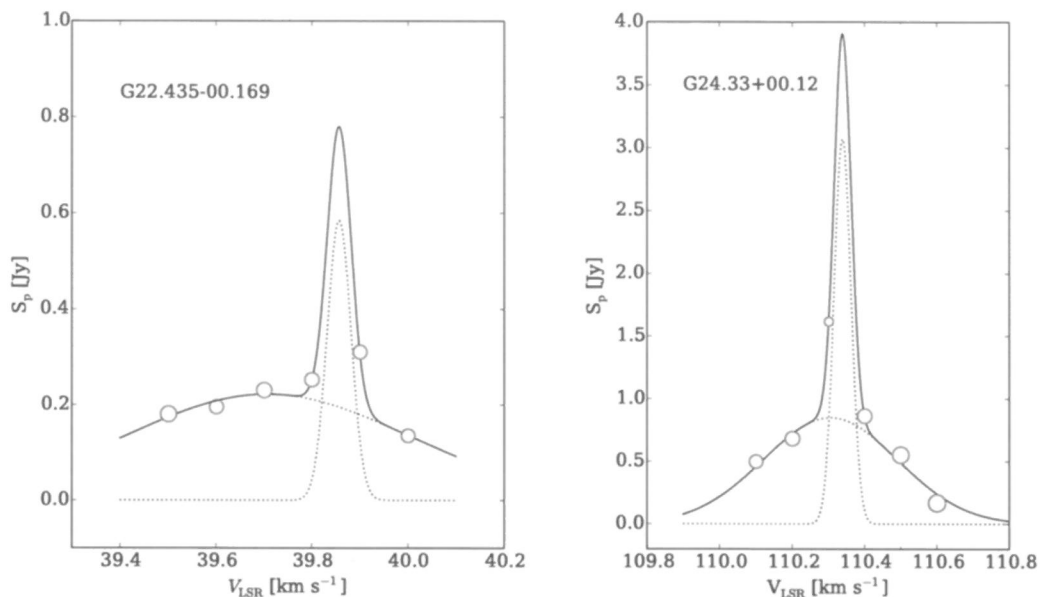
W latach 2009–2010 wraz ze współpracownikami uzyskałam 49 godzin czasu obserwacyjnego siecią EVN. Dzięki temu wykonałam mapy pozostałych 17 obiektów odkrytych w ramach przeglądu płaszczyzny Galaktyki, wykonanego przy pomocy toruńskiego 32 m radioteleskopu (Szymczak i in. 2002). Możliwe stało się przeanalizowanie map VLBI znacznej liczby źródeł, szczególnie ich morfologii: łącznie 63 (31 z Bartkiewicz i in. 2009, 15 z publikacji 4, 17 z publikacji 5). Struktura prosta wystąpiła jedynie w jednym obiekcie, liniowa w 13, pierścieniowa w 11, łukowa w pięciu, podwójna (para) w czterech i złożona w 29 przypadkach. Widma i rozkłady plam maserowych całej próbki zebrane są w katalogu dostępnym on-line: <http://paulo.astro.uni.torun.pl/~pw/mmcat/>

W kolejnym kroku zidentyfikowałam i przeanalizowałam podstawowe parametry chmur maserowych (utworzonych z plam maserowych widocznych na mapach kolejnych kanałów spektralnych) dla źródeł z publikacji 5. W sumie wyznaczyłam 242 chmur. Średni rozmiar w projekcji na niebie wyniósł  $17,4 \pm 1,2 \text{ au}$ , a średnia wartość szerokości połówkowej profilu widmowego:  $0,373 \pm 0,011 \text{ km s}^{-1}$ . W przypadku 171 chmur wyznaczyłam własny gradient prędkości, którego wartości leżą w przedziale od  $0,005$  do  $0,210 \text{ km s}^{-1} \text{ au}^{-1}$  z dwoma przypadkami o znacznie wyższych wartościach:  $0,434 \text{ km s}^{-1} \text{ au}^{-1}$  oraz  $0,529 \text{ km s}^{-1} \text{ au}^{-1}$ .

Dwie chmury maserowe wykazały nietypowy profil widmowy – każdy z nich można dopasować podwójną funkcją Gaussa (rys. 5). Charakterystycznym jest fakt, że jeden składnik widmowy jest znacznie węższy od drugiego (5 lub 7-krotnie). Szczegółowa analiza emisji na kolejnych mapach kanałów spektralnych wykazała, że emisja z obu składników pochodzi z tego samego obszaru. Może to być przypadek zjawiska wzmocnienia maserowego tzw. *amplification*–



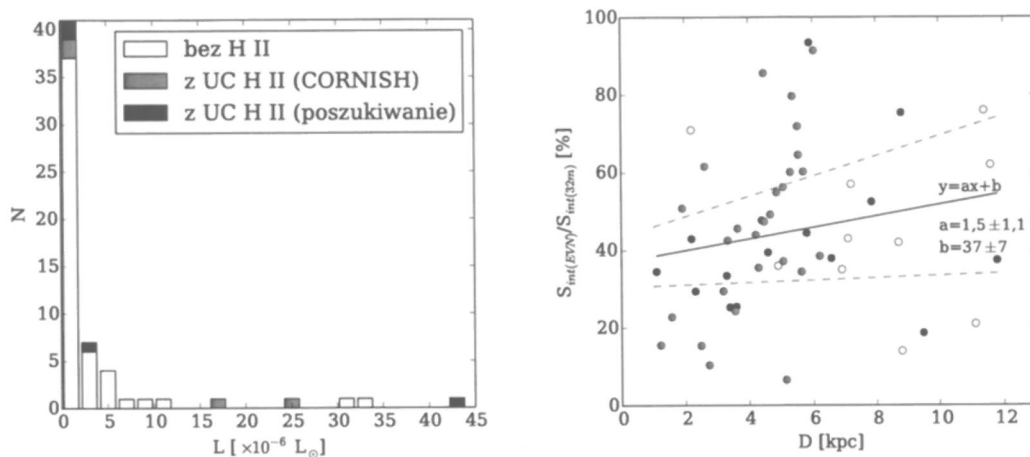
*bounded*, który ma związek z geometrią chmury maserowej, gdzie podłoże wzmocnienia polega na koherencji prędkości drobin (Elitzur i in. 1992). W przypadku źródła G24.33+00.12 wyraźnie widać odwrotną zależność między rozmiarem plamy maserowej a jej jasnością (rys. 5). Podobna charakterystyka widoczna była w przypadku emisji maserowej pary wodnej w gwiazdach AGB i zinterpretowana jako ww. zjawisko (Richards i in. 2011).



Rysunek 5: Profile widmowe dwóch chmur maserowych w obiektach G22.435–00.169 i G24.33+00.12. W nich prawdopodobnie zachodzi wzmocnienie maserowe (ang. *amplification-bounded maser*). Kropkowanymi liniami przedstawiono dopasowania dwóch funkcji Gaussa, a linią ciągłą ich sumę. Rozmiary kółek są proporcjonalne do rozmiarów plam maserowych. Rysunki pochodzą z publikacji 5.

Przetestowałam modele rotującego dysku i bipolarnego wypływu (Uscanga i in. 2008, Moscadelli i in. 2000, 2005), by odpowiedzieć na pytanie, gdzie tworzy się emisja maserowa metanolu 6,7 GHz. W większości przypadków otrzymane rozkłady plam maserowych nie odpowiadają proponowanym, prostym scenariuszom. Obiekty o morfologii pierścienia nie wykazują charakterystyki nachylonego względem obserwatora dysku, w którym najbardziej poczerwienione i poniebieszczone plamy maserowe występują na krańcach osi głównej dopasowanej elipsy. Zauważyłam, że dopasowany model wypływu w dziewięciu obiektach wykazywał znaczne rozmiary kąta szerokości wypływu (powyżej  $110^\circ$ ). Może to być cechą charakterystyczną dla wyselekcjonowanej próbki źródeł, kiedy to pojawia się już nieskolimowany wypływ od młodej gwiazdy (Shepherd 2005), bądź świadczyć o ograniczeniach modelu.

W dostępnych danych literaturowych (katalog CORNISH) poszukałam emisji radiowej na falach centymetrowych w kierunku badanej próbki 63 źródeł. Jedynie w przypadku ośmiu (13%) istnieje, bądź jest prawdopodobny, związek między linią maserową a zwartym obszarem H II. Zatem większość obiektów związana jest ze wcześniejszą fazą ewolucyjną gwiazdy centralnej, zanim obszar H II jest widoczny w zakresie fal cm. Zweryfikowałam zależność między jasnością emisji maserowej 6,7 GHz a jej związkiem z obszarem H II (rys. 6). Nie znalazłam potwierdzenia



Rysunek 6: Na panelu po lewej przedstawiono histogram jasności emisji maserowej 6,7 GHz w obiektach niezwiązanych bądź związanych z obszarami H II. Obszary te znalezione w ramach dedykowanych obserwacji poszukiwania kontinuum radiowego (Bartkiewicz i in. 2009, Sanna i in. 2010) oraz w katalogu CORNISH. Wykres po prawej stronie prezentuje poszukiwanie zależności między filtrowaniem gęstości strumienia przez interferometr wielkobazowy a odległością do źródła. Nie zauważyłam korelacji między tymi parametrami. Czarne kropki reprezentują dane z publikacji 5, szare z publikacji 4 oraz białe z Bartkiewicz i in. (2009). Prosta dopasowana metodą najmniejszych kwadratów wraz z obszarem niepewności dopasowania jest zaznaczona na wykresie. Rysunki pochodzą z publikacji 5.

nia postulatu Breen i in. (2010), iż jaśniejsze obiekty maserowe powiązane są z późniejszymi stadiami ewolucyjnymi młodych gwiazd. W przypadku prezentowanej próbki 63 obiektów z pięciu najjaśniejszych trzy posiadają odpowiedniki zwartych obszarów H II (UC H II), zaś dwa obiekty nie posiadają takich odpowiedników (rys. 6).

Porównanie widm otrzymanych interferometrem wielkobazowym EVN oraz 32 m radioteleskopem CA UMK wykazało, iż zazwyczaj 50–70% strumienia jest filtrowane (gubione) przez VLBI. Nie zauważyłam korelacji między zjawiskiem filtrowania strumienia a odległością obiektu (rys. 6) czy też jego morfologią. Porównanie morfologii niektórych źródeł obserwowanych instrumentami o mniejszej rozdzielczości kątowej, jak sieć VLA czy MERLIN (Cyganowski i in. 2009, Pandian i in. 2011) wskazuje, że struktura emisji, zarówno w rozmiarze jak i rozkładzie, jest porównywalna. Zatem plamy maserowe posiadają zwarte rdzenie oraz rozmyte i słabiej świecące otoczki tych plam (tzw. halo), które mogą być filtrowane (rozdzielone) przez teleskop VLBI. Widać zatem, iż mimo zjawiska filtrowania, interferometria wielkobazowa znajduje zastosowanie w poznawaniu morfologii emisji maserowej.

### Podsumowanie i dalsze badania

Odpowiedź na pytanie *gdzie powstaje linia 6,7 GHz emisji maserowej metanolu?* została częściowo uzyskana. Nie jest to jednoznacznie dysk czy torus wokół młodej gwiazdy, ale najprawdopodobniej strefa między nim a wypływem. Jest to zatem obszar, gdzie występują ruch rotacyjny od torusa molekularnego i radialny podchodzący od ekspansji lub akrecji. W kolejnych

krokach udało mi się scharakteryzować naturę znacznej próbki obiektów emisji maserowej metanolu 6,7 GHz, ich morfologię oraz parametry pojedynczych chmur maserowych, jak rozmiar i gradienty prędkości. Nowo odkryte pierścieniowe struktury masera metanolu w większości przypadków nie wykazują związku z maserami pary wodnej oraz obszarami H II. Zatem powiązane są z wcześniejszą fazą ewolucyjną centralnej gwiazdy, aniżeli pozostałe obiekty o innej strukturze. Dodatkowo w ich centrach nie widać przejawów istnienia młodych gwiazd, bo maksimum emisji w podczerwieni jest przesunięte względem środka pierścienia maserowego. Wskazuje to na fizyczny związek struktur pierścieniowych z wpływem bądź bąblem materii i rozchodzeniem się fal uderzeniowych.

Jednym z obecnie realizowanych projektów jest analiza ruchów własnych pojedynczych plam maserowych w obiektach pierścieniowych. Przy założeniu odległości do obiektu 2–4 kpc i prędkości własnej danej plamy maserowej kilku  $\text{km s}^{-1}$  można już po kilku latach oczekiwać przesunięć rzędu kilku milisekund łuku. Rejestracja takich ruchów jest możliwa przy wykorzystaniu interferometrii wielobazowej VLBI. Wstępna analiza danych z obiektu G23.657–00.127 (powtórzone obserwacje po 9 latach) wskazała, że emisja pierścieniowa wykazuje ruch własny złożony świadczący o występowaniu rotacji i ekspansji (Bartkiewicz i in. 2014b). Jest to odmienne niż w obiekcie AFGL 5142, gdzie Goddi i in. (2011) zarejestrował ruch radialny masera 6,7 GHz nakierowanego na gwiazdę, czyli opadającą otoczkę molekularną.

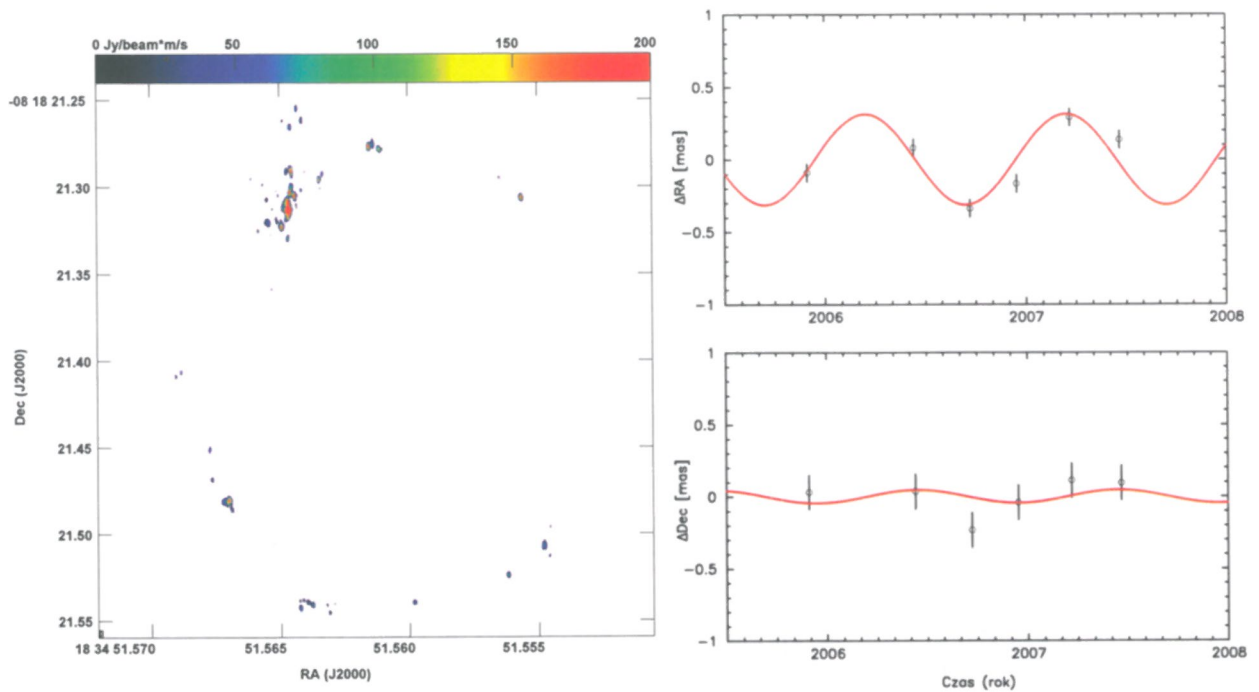
W międzynarodowym zespole, którego jestem członkiem, trwają też próby uzyskania czasu obserwacyjnego na instrumencie ALMA w kierunku wybranych źródeł o strukturze pierścienia, w których zarejestrowano termiczną emisję metanolu teleskopem JCMT (Torstenson i in. 2012). Celem jest detekcja wypływu materii w skali rzędu tysiąca au i bezpośrednia weryfikacja hipotezy związku emisji maserowej metanolu z wpływem.

#### 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych:

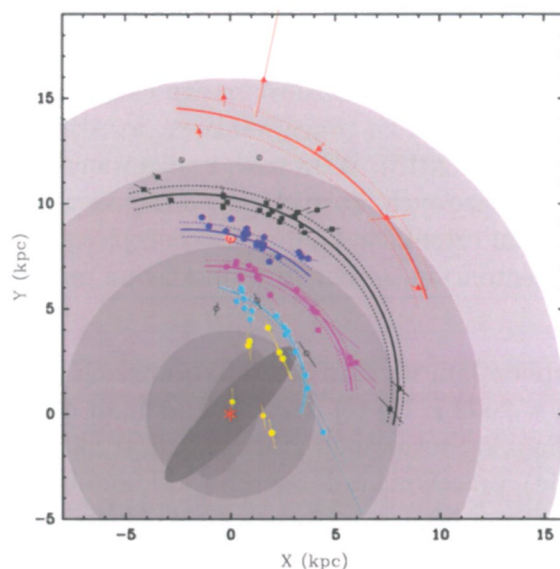
W okresie 2005–2007 współpracując głównie z dr. Andreasem Brunthalerem (MPIfR Bonn) uzyskałam czas obserwacyjny ( $6 \times 10\text{h}$ ) i wykonałam sześć obserwacji obiektu G23.657–00.127 przy użyciu amerykańskiej sieci wielobazowej *Very Long Baseline Array* (VLBA). Projekt dotyczył wyznaczenia odległości do tego źródła metodą paralaksy trygonometrycznej przy pomocy obserwacji linii maserowej metanolu na częstotliwości 12,2 GHz (ok. 2,5 cm). Zastosowanie najnowszych metod redukcji danych (geodezyjna korekcja fazy) połączone z bardzo dobrą czułością danych umożliwiło identyfikację 19 plam maserowych w kolejnych epokach obserwacyjnych i tym samym dopasowanie modelu ruchu związanego z paralaksą roczną oraz ruchem własnym obiektu. Wyznaczona paralaksa źródła wyniosła  $0,313 \pm 0,039$  mas, co odpowiada odległości  $3,19^{+0,46}_{-0,35}$  kpc (rys. 7). Zatem średni promień pierścienia to 405 au. Dodatkowo wyznaczone zostały prędkości galaktyczne obiektu:  $U=42,3 \pm 4,0$   $\text{km s}^{-1}$ ,  $V=222 \pm 11$   $\text{km s}^{-1}$ ,  $W=4,1 \pm 1,4$   $\text{km s}^{-1}$ . Wyniki zostały opisane w publikacji Bartkiewicz i in. (2008) (cytowana 24 razy).

#### Project BeSSeL

W związku z powyższym projektem zostałam zaproszona do międzynarodowej grupy wyznaczającej paralaksy trygonometryczne przy użyciu emisji maserowej pary wodnej (22,2 GHz) oraz metanolu (6,7 GHz oraz 12,2 GHz). W publikacji Reid i in. (2009) (cytowana 508 razy) na podstawie 18 pomiarów paralaks trygonometrycznych oraz ruchów własnych obszarów powstawania masywnych gwiazd dopasowano model Galaktyki. Wyznaczona odległość Słońca do centrum to  $R_0=8,4 \pm 0,6$  kpc, a prędkość rotacji Słońca po orbicie  $\Theta_0=254 \pm 16$   $\text{km s}^{-1}$ . Zauważono, że obszary gwiazdotwórcze wykazują prędkość o 15  $\text{km s}^{-1}$  wolniejszą niż przewidywana wartość dla odpowiednich orbit kołowych. Podano uaktualnioną procedurę wyliczania odległości kinematycznych uwzględniającą powyższe wyniki.



Rysunek 7: Na panelu po lewej przedstawiono rozkład emisji maserowej metanolu na częstotliwości 12,2 GHz w obiekcie G23.657–00.127 zarejestrowany przy użyciu interferometru VLBA. Wykresy po prawej stronie prezentują średnie przesunięcia w rektascencji (górny) i deklinacji (dolny panel) wynikające z efektu paralaksy rocznej poszczególnych plam maserowych występujących we wszystkich epokach obserwacyjnych w okresie listopad 2005 – czerwiec 2007. Linia czerwona zaznaczono dopasowany model paralaksy 0,313 mas (Bartkiewicz i in. 2008).



Rysunek 8: Schemat Drogi Mlecznej z zaznaczonymi obiektami z emisją maserową metanolu i pary wodnej, do których przy użyciu sieci VLBA, VERA, EVN wyznaczono paralaksy trygonometryczne i wymodelowano strukturę Galaktyki. Przypisanie maserów kolejnym ramionom spiralnym Galaktyki odbyło się w oparciu o związki z emisją CO i H I. Zaznaczono też położenie Centrum Galaktyki (czerwona gwiazdka) oraz Słońca (☉). Rysunek z Reid i in. (2014).

W 2009 roku powstał kluczowy projekt wykorzystujący interferometrię EVLA (*Expanded Very Large Array*) oraz VLBA pod nazwą *Bar and Spiral Structure Legacy survey (BeSSeL)* (Brunthaler i in. 2011, cytowana 74 razy). Brałam aktywny udział w redukcji danych kalibratorów fazy (Immer i in. 2011, cytowana 12 razy), poszukiwaniu odpowiednich źródeł maserowych oraz wyznaczaniu ich paralaks. Rezultaty są sukcesywnie prezentowane na stronie projektu: <http://bessel.vlbi-astrometry.org/>

W ostatniej pracy Reid i in. (2014) (cytowana 118 razy) podsumowującej pomiar ponad 100 paralaks (ich zakres:  $0,093 \text{ mas} - 2,41 \text{ mas}$ , rys. 8) podano uaktualnione podstawowe parametry Galaktyki:  $R_0 = 8,34 \pm 0,16 \text{ kpc}$ ,  $\Theta_0 = 240 \pm 8 \text{ km s}^{-1}$ . Przeanalizowano kształt krzywej rotacji Galaktyki w zakresie do 16 kpc. Obie prace Reid i in. (2009, 2014) zostały szybko zauważone w środowisku astrofizycznym. Nowe wartości stały się podstawą dyskusji o budowie Galaktyki, jak i weryfikacją poprawności poprzednich wyznaczeń (np. Bovy i in. 2009, McMillan & Binney 2010).

Prof. Marian Szymczak wraz z dr. Pawłem Wolakiem prowadzą monitoring źródeł metanolu 6,7 GHz przy użyciu 32 m anteny Centrum Astronomii UMK. Biorę udział w szczegółowym poznawaniu struktur wybranych obszarów, tj. składanie wniosków obserwacyjnych na sieć EVN, kalibracja danych i wykonywanie map źródeł. Pierwsze wyniki wieloletnich obserwacji ukazały się w trzech pracach naszej grupy: Szymczak i in. (2011 (cytowana 11 razy), 2014 (cytowana 2 razy), 2015 (cytowana 1 raz)). W powyższych pracach zaprezentowano krzywe blasku źródeł emisji maserowej metanolu, które charakteryzują się okresową zmiennością. Do tej pory nie jest zrozumiałym mechanizm takich zjawisk, czy jest to okresowe rozchodzenie się fal uderzeniowych od centralnej gwiazdy, czy też geometryczna zmiana wzmocnienia maserowego w dysku okołogwiazdowym. Taki typ źródeł maserowych odkryto niedawno (Goedhart i in. 2003), a liczba znalezionych przypadków to kilkanaście. Zatem ważny jest wkład (odkrycia kolejnych źródeł, jak i systematyczny monitoring ich zmian jasności) naszej grupy w tę tematykę współczesnej

astrofizyki.

W ostatnich latach kierowałam grantem Narodowego Centrum Nauki (OPUS 2, 2012–2015, kwota 541 540 zł). Jako wyróżnienie za pracę naukową uzyskałam stypendium dla młodych wybitnych naukowców (lata 2012–2015). W ramach realizowanych projektów regularnie korzystam z interferometrów wielkobazowych, których czas obserwacyjny przyznawany jest w drodze konkursu. Od 2012 roku jestem członkiem komitetu oceniającego wnioski obserwacyjne na sieć EVN, a od roku 2015 recenzentem zewnętrznym wniosków na radioteleskop w Nançay we Francji.

Pracę dydaktyczną rozpoczęłam na studiach doktoranckich po powrocie z 10 miesięcznego zagranicznego stypendium w 2002 r. Do tej pory prowadziłam różnorodne zajęcia na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej: pracownia fizyczna I, fizyka (ćwiczenia), matematyka elementarna (ćwiczenia), pracownia radioastrofizyki I, analiza matematyczna I (ćwiczenia), analiza matematyczna II (ćwiczenia), wstęp do astrofizyki II (ćwiczenia), podstawy teorii sygnałów (laboratorium), Wszechświat dla wszechstronnych (wykład). Po uzyskaniu stopnia doktora opiekowałam się też pracami licencjackimi (4+1 w trakcie) oraz magisterskimi (1+1 w trakcie).

## Bibliografia

- Bartkiewicz A.**, Szymczak M., van Langevelde H.J., Richards A.M.S., Pihlström Y.M. 2009, *A&A*, 502, 155
- Bartkiewicz A.**, Sanna A., Szymczak M., Moscadelli L. 2014b, *Proceedings of Science*, 12th European VLBI Network Symposium and Users Meeting, 039
- Bovy J., Hogg D.W., Rix H.W. 2009, *ApJ*, 704, 170
- Breen S.L., Ellingsen S.P., Caswell J.L., Lewis B.E. 2010, *MNRAS*, 401, 2219
- Breen S.L., Ellingsen S.P., Contreras Y. 2013, *MNRAS*, 435, 524
- Brunthaler A., Reid M.J., Menten K.M., Zheng X.W., **Bartkiewicz A.** i in. 2011, *AN*, 332, 461
- Cragg D.M., Sobolev A.M., Godfrey P.D. 2005, *MNRAS*, 360, 533
- Cyganowski C.J., Brogan C.L., Hunter T.R., Churchwell E. 2009, *ApJ*, 702, 1615
- Elitzur M., Hollenbach D.J., McKee C.F. 1989, *ApJ*, 346, 983
- Elitzur M., Hollenbach D.J., McKee C.F. 1992, *ApJ*, 394, 221
- Elitzur M. 1992, *ARA&A*, 30, 75
- Goddi C., Moscadelli L., Sanna A. 2011, *A&A*, 535, L8
- Goedhart S., Gaylard M.J., van der Walt D.J. 2003, *MNRAS*, 339, 33
- Immer K., Brunthaler A., Reid M.J., **Bartkiewicz A.** 2011, *ApJSS*, 194, 25
- McMillian P.J., Binney J.J. 2010, *MNRAS*, 402, 934
- Minier V., Booth R.S., Conway J.E. 2000, *A&A*, 362, 1093
- Moscadelli L., Cesaroni R., Rioja M.J. 2000, *A&A*, 360, 663
- Moscadelli L., Cesaroni R., Rioja M.J. 2005, *A&A*, 438, 889
- Norris R.P., Whiteoak J.B., Caswell J.L., Wieringa M.H., Goigh R.G. 1993, *APJ*, 412, 222
- Norris R.P., Byleveld S.E., Diamond P.J. i in. 1998, *ApJ*, 508, 275
- Pandian J.D., Momjian E., Xu Y., Menten K.M., Goldsmith P.F. 2011, *ApJ*, 730, 55
- Phillips C.J., Norris R.P., Ellingsen S.P., McCulloch P.M. 1998, *MNRAS*, 300, 1131
- Reid M.J., Menten K.M., Zheng X.W., Brunthaler A., Moscadelli L., Xu Y., Zhang B., Sato M., Honma M., Hirota T., Hachisuka K., Choi Y.K., Moellenbrock G.A., **Bartkiewicz A.** 2009, *ApJ*, 700, 137
- Reid M.J., Menten K.M., Brunthaler A., Zheng X.W., Dame T.M., Xu Y., Wu Y., Zhang B., Sanna A., Sato M., Hachisuka K., Choi Y.K., Immer K., Moscadelli L., Rygl K.L.J., **Bartkiewicz A.** 2014, *ApJ*, 783, 130
- Richards A.M.S., Elitzur M., Yates J.A. 2011, *A&A*, 525, A56
- Robitaille T.P., Whitney B.A., Indebetouw R., Wood. K. 2007, *ApJS*, 169, 328

- Sanna A., Moscadelli L., Cesaroni R., Tarchi A., Furuya R.S. & Goddi C. 2010, A&A, 517, A78  
Shepherd D. 2005, IAU Symposium 227, CUP, 237  
Szymczak M., Kus A.J., Hrynek G., Kepa A., Pazderski E. 2002, A&A, 392, 277  
Szymczak M., Wolak P., **Bartkiewicz A.**, van Langevelde H.J. 2011, A&A, 531, L3  
Szymczak M., Wolak P., **Bartkiewicz A.**, Borkowski K.M. 2012, AN, 333, 634  
Szymczak M., Wolak P., **Bartkiewicz A.** 2014, MNRAS, 439, 407  
Szymczak M., Wolak P., **Bartkiewicz A.** 2015, MNRAS, 448, 2284  
Torstensson K.J.E., van Langevelde H.J., van der Tak F.F.S., Vlemmings W.H.T., Kristensen L.E., Bourke S., **Bartkiewicz A.** 2012, IAU Symposium 287, CUP, 146  
Uscanga L., Gomez Y., Raga A.C., i in. 2008, MNRAS, 390, 112  
Walsh A.J., Burton M.G., Hyland A.R., Robinson G. 1998 MNRAS, 301, 640

*Anna Bartkiewicz*

