

dr hab. Wojciech Lewandowski, prof. UZ
Instytut Astronomii im. prof. Janusza Gila,
Wydział Nauk Ścisłych i Przyrodniczych,
Uniwersytet Zielonogórski

Recenzja pracy doktorskiej mgr Agnieszki Kobak:

Deriving the nature of the methanol masers in high mass star-forming regions via multi-wavelength and polarimetric observations.

Przedstawiona mi do recenzji praca mgr. Agnieszki Kobak dotyczy przeprowadzonych przez nią badań maserów metanolu, hydroksylu (OH) oraz innych molekuł występujących wokół tworzących się lub nowo powstałych masywnych gwiazd. Efekt maserowy prowadzący do emisji linii widmowych zachodzi głównie w otoczeniach masywnych młodych obiektów gwiazdowych (HMYSO - high mass young stellar objects), w tym w akrecyjnych dyskach okołogwiazdowych oraz w dżetach wyrzucanych z okolic tych protogwiazd. Do emisji maserowej dochodzi tylko przy wystąpieniu odpowiednich warunków, związanych zazwyczaj z aktywnością samej protogwiazdy lub wewnętrznych obszarów dysku akrecyjnego wokół tejże. Głównym czynnikiem wpływającym na powstanie emisji maserowej jest promieniowanie podczerwone chłodnego lub zimnego pyłu (w zakresie temperatur od kilkudziesięciu do ok. 100 kelwinów), które powoduje „pompowanie” poziomów energetycznych w cząsteczkach, dzięki czemu elektrony znajdują się w stanach meta-stabilnych. Samo promieniowanie maserowe powstaje na skutek zjawiska emisji wymuszonej.

W przedłożonej pracy autorka przedstawiła wyniki swoich badań, które w dużej mierze dotyczą badania samej emisji maserowej, warunków w których ona powstaje (temperatura, gęstość, pole magnetyczne) a także związków w emisji maserowej różnych molekuł, co pozwala na precyzyjniejsze określenie właściwości fizycznych materii w której efekt maserowy powstaje. W swej analizie autorka posłużyła się danymi pochodzącymi z pojedynczych teleskopów, w tym m.in. 32-metrowego radioteleskopu Centrum Astronomii UMK w Piwnicach pod Toruniem, ale większość kluczowych danych uzyskana została dzięki obrazom interferometrycznym uzyskanym głównie za pomocą obserwacji z użyciem sieci VLBI, EVN, interferometru MERLIN, czy sieci LBA. W interpretacji danych często pomocne były również dane (archiwalne oraz nowo zebrane) w zakresie podczerwonym (WISE) oraz mikrofalowym (ALMA).

Stanowiące sedno przedstawionej rozprawy doktorskiej publikacje skupiają się na prezentacji wyników obserwacji, ich analizie statystycznej, analizie właściwości promieniujących maserowo obszarów (np. prędkości radialne, parametry polaryzacji promieniowania) oraz poszukiwaniu i wykorzystywaniu korelacji pomiędzy tymi wielkościami oszacowanymi z obserwacji widmowych, oraz korelacji tychże właściwości dla różnych obserwowanych molekuł z danego obiektu lub obszaru w danym obiekcie. Obserwacje interferometryczne pozwalają zlokalizować położenie emisji maserowej względem protogwiazdy i jej dysku akrecyjnego lub dżetu, co ma kluczowe znaczenie dla zrozumienia mechanizmów prowadzących do takiej emisji, oraz wyjaśnienia jej zmienności.

Przedłożona praca doktorska składa się z części opisowej, trzech publikacji, oraz rozdziału 5-go w którym autorka przedstawia nie opublikowane jeszcze wyniki kolejnego projektu badawczego. W Rozdziale 1 na 16 stronach autorka przedstawia bardzo zwięzły i konkretny wstęp teoretyczny do zagadnienia astrofizycznych maserów oraz obserwacji obiektów typu HMYSO. Rozdział ten stanowi być może nieco zdawkowe ale bardzo pożyteczne wprowadzenie do zagadnień związanych z obserwacjami promieniowania maserowego, jak i aktualnego stanu naszej wiedzy (lub też jak kto woli niewiedzy) na temat tworzenia się masywnych gwiazd. Jest to dziedzina astrofizyki, która w ostatnich latach mocno się rozwinęła, głównie dzięki kompleksowemu podejściu do obserwacji w różnych zakresach promieniowania - od fal radiowych (w tym promieniowania maserowego), przez mikrofałe do podczerwieni.

Następujące po tym wstępie rozdziały 2-4 stanowią krótkie, kilkustronicowe streszczenia zawartych w rozprawie publikacji:

- Publikacja 1) “Multi-frequency VLBI observations of maser lines during the 6.7 GHz maser flare in the high-mass young stellar object G24.33+0.14”, sygnowana przez A. Kobak, A. Bartkiewicz, M. Szymczak, M. Olech, M. Durjasz et al. (w sumie 16 współautorów) opublikowana została w *Astronomy & Astrophysics* vol. 671 w roku 2023. Impact factor dla A&A wynosi 6.1. Praca do tej pory cytowana była 18 razy.¹
- P2) praca “Physical conditions around high-mass young star-forming objects via simultaneous observations of excited OH and methanol masers” napisana przez Kobak, A., Bartkiewicz, A., Rygl, K. L. J., Richards, A. M. S., Szymczak, M., Wolak, P., która ukazała się w roku 2025 w *Astronomy & Astrophysics* vol. 695. Praca ta ma na chwilę obecną 1 autocytowanie.
- P3) praca “A search for the favored hyperfine transition of a 6.7 GHz methanol maser line”, sygnowana przez Kobak, A., Surcis, G., Bartkiewicz, A., Vlemmings, W. H. T., Szymczak, M. ukazała się w roku 2025 w czasopiśmie *Astronomy and Astrophysics*, (vol. 701). Do dnia dzisiejszego (19 stycznia 2026) praca nie doczekała się cytowań.

We wszystkich wymienionych publikacjach pani mgr. Agnieszka Kobak jest pierwszym autorem, co wyraźnie wskazuje na jego większościowy udział w powstaniu tych prac. Potwierdzają to również przedstawione oświadczenia doktorantki oraz współautorów. Wkład pani mgr. Kobak w przygotowanie poszczególnych publikacji wynosi odpowiednio 40%, 70% i 60%, przy czym nawet w wypadku publikacji P1 jest to największy wkład jednostkowy. Wszystkie wymienione prace opublikowane zostały w jednym z najbardziej cenionych czasopism jakim jest *Astronomy & Astrophysics*, które legitymuje się średnim Impact Factor 6.1 (stan na rok 2024). Gwarantuje to, że publikacje te zostały już sprawdzone i ocenione przez wysokiej klasy specjalistów w zakresie obserwacji maserów kosmicznych.

Spośród tych trzech publikacji jedynie praca P1 była cytowana przez innych autorów, co jest o tyle zrozumiałe że ukazała się ona w marcu 2023 roku. W tym świetle liczbę 18 cytowań w ciągu niecałych 3 lat należy uznać za solidny dowód na to, iż została ona zauważona. Pozostałe dwie prace ukazały się w 2025 roku (P2 w marcu zaś P3 we wrześniu), brak cytowań jest więc zrozumiały. Nie ulega dla mnie jednak wątpliwości że i te publikacje będą w przyszłości cytowane, gdyż zawierają znaczną ilość danych i wyników oraz ich interpretacji w stale rozwijającej się dziedzinie badań obiektów proto-gwiazdowych, w szczególności tych masywnych.

Publikacja P1 (Rozdział 2) opisuje wyniki analizy obserwacji obiektu G24.33+0.14 podczas jego rozbłysku w 2019 roku. Rozbłysk ten wykryty został m.in. w obserwacjach przeprowadzonych 32-metrowym radioteleskopem w Piwnicach, autorom publikacji udało się także bardzo szybko uzyskać czas obserwacyjny VLBA i przeprowadzić 3 sesje obserwacyjne. Dodatkowo obiekt ten obserwowany był także z użyciem sieci EVN oraz australijskiej sieci LBA. Analiza zebranych danych obserwacyjnych, w połączeniu z uzyskanymi wcześniej dla tego obiektu danymi w zakresie mikrofalowym (ALMA) pozwoliła na dokładniejsze określenie morfologii źródła, oraz mechanizmów inicjacji akcji maserowej w trakcie obserwowanego rozbłysku. Najprawdopodobniej zaobserwowany rozbłysk maserowy spowodowany był zdarzeniem nagłej akrecji na protogwiazdę, które zaowocowało wzrostem promieniowania podczerwonego koniecznego do “pompowania” molekuł metanolu do stanu umożliwiającego emisję maserową. Co ciekawe potencjalne wyjaśnienie obiektu w zakresie podczerwieni - co powinno być przyczyną inicjacji masera - nie zostało jednak zaobserwowane.

Publikacja P2 (Rozdział 3) opisuje wyniki badań 10 obiektów typu HMYSO, wykonanych z użyciem interferometru MERLIN. Analizowane były właściwości spektralne i morfologia tych obiektów z użyciem wieloczęstotliwościowych obserwacji interferometrycznych zjawiska maserowego dla metanolu (6.7 GHz) i wzbudzonej cząsteczki hydroksylowej (excited-OH, 6.035 GHz). Głównym celem badań była analiza koincydencji lokalizacji, lub jej braku dla maserów obu typów, które powinny się tworzyć w zbliżonych warunkach fizycznych w dyskach akrecyjnych młodych masywnych obiektów protogwiazdowych. W kilku wypadkach emisje obu maserów występują dość blisko siebie, w bardzo podobnych warunkach. Udało się także - badając rozszczepienie Zeemanowskie linii maserowej ex-OH - określić natężenie i kierunek pola magnetycznego w rejonach emisji maserowej. Autorzy przeprowadzili także badania porównawcze z rezultatami obserwacji

¹wszystkie wartości Impact Factor i liczby cytowań podawane są na podstawie serwisu *Web of Science*, stan na dzień 19 stycznia 2026 roku

tych obiektów uzyskanych w zakresie mikrofalowym z użyciem teleskopu ALMA, a także obserwacji w podczerwieni z teleskopów Spitzer i Herschel. Złożenie wszystkich rezultatów pozwoliło na określenie stopnia ewolucyjnego zaawansowania badanych obiektów oraz w wielu wypadkach ich geometrii i morfologii.

Publikacja P3 (Rozdział 4) zrodziła się na skutek bardzo ambitnego pomysłu - określenia które z przejść w strukturze nadsubtelnej molekuly metanolu odpowiedzialne jest za obserwowane linie maserowe. Pomimo kilkudziesięciu lat badań kosmicznych maserów metanolu, oraz równie długo trwających badań laboratoryjnych nie udało się do tej pory określić które z przejść ze stanów metastabilnych w tej molekule odpowiedzialne jest za linie emisyjne kosmicznych maserów, udało się jedynie ograniczyć liczbę potencjalnych możliwości do trzech. Aby rozstrzygnąć pomiędzy tymi możliwościami autorzy pracy P3 postanowili jednocześnie obserwować masery wzbudzonej cząsteczki OH, oraz znajdujące się w ich pobliżu masery metanolu. Cząsteczka ex-OH jest diamagnetyczna, co pozwala określić natężenie pola magnetycznego dzięki rozszczepieniu Zeemana. W założeniu molekuly metanolu powinny znajdować się pod wpływem tego samego pola i choć cząsteczka metanolu jest paramagnetyczna i rozszczepienie Zeemanowskie jest dużo mniejsze, to - ślad rozszczepienia powinien być wykrywalny. Wielkość tego rozszczepienia powinna pomóc w rozwiązaniu zagadki struktury nadsubtelnej - według teorii atomowo-molekularnej każde z potencjalnych przejść powinno wykazywać się innym rozszczepieniem, co oznacza że pomiar wielkości rozszczepienia mógłby wskazać właściwą odpowiedź.

Autorzy pracy wybrali dwa jasne źródła maserowe (ON1 i W75N) dla których wcześniej wykryto koincydencje maserów metanolu i ex-OH. Niestety analiza obserwacji wykonanych za pomocą interferometru MERLIN nie pozwoliła na jasne konkluzje, głównie ze względu na zupełnie odmienne właściwości polaryzacyjne dla obu rozpatrywanych cząsteczek, których rozszczepienie Zeemanowskie zależy od natężenia pola w kierunku do obserwatora (metanol) i w kierunku prostopadłym (ex-OH); jednocześnie określenie oby tych składowych okazało się bardzo utrudnione. Tym niemniej praca stanowi najbardziej dogłębną analizę własności polaryzacji promieniowania maserowego dla tych obiektów, jaka została do tej pory przeprowadzona.

Rozdział 5 przedstawia wyniki nie opublikowanego jeszcze projektu badawczego, w którym autorka analizuje dane dotyczące morfologii kilku źródeł maserowych, których struktura nosi znamiona organizacji, czyli tzw. pierścienie, które są najprawdopodobniej efektem tego, że do akcji maserowej dochodzi w dysku akrecyjnym wokół HMYSO. Autorka wybrała pięć maserów o pierścieniowej morfologii, wcześniej zbadanych w zakresie radiowym, dla których przeprowadziła obserwacje z użyciem teleskopu ALMA (składając projekt obserwacyjny na który uzyskała czas) w celu porównania morfologii maserów radiowych z promieniowaniem continuum pyłu w dysku akrecyjnym, oraz właściwości linii emisyjnych metanolu oraz innych molekuł obserwowanych w tym zakresie. Dość nieoczekiwanie tylko dla niektórych z tych źródeł geometria obserwowanego promieniowania mikrofalowego wykazuje podobny charakter, co może wskazywać że emisja maserowa pochodzić może nie tylko z dysku, ale np. ze sferycznych otoczek HMYSO.

Rozdział 6 stanowi krótkie i lakoniczne, pół-stronicowe podsumowanie rozprawy.

Ocena pracy i uwagi krytyczne

Na przedstawioną mi do recenzji pracę składa się cykl trzech publikacji, rozdział zawierający nie opublikowane jeszcze wyniki obserwacji prowadzonych z użyciem teleskopu ALMA oraz rozprawa je podsumowująca. Wszystkie 3 publikacje ukazały się w renomowanym czasopiśmie *Astronomy & Astrophysics*. Gwarantuję to moim zdaniem, że wszystkie te publikacje zostały już zrecenzowane przez specjalistów wyznaczonych przez edytorów *A&A*, nie jest więc moją rolą ich powtórne recenzowanie. Jak do tej pory (stan na 19 stycznia 2026) jedynie praca P1 została zauważona przez społeczność naukową (była cytowana już 18 razy), co jest o tyle zrozumiałe że dwie pozostałe publikacje ukazały się stosunkowo niedawno, tj odpowiednio w marcu i wrześniu 2025 roku.

Jestem pod ogromnym wrażeniem ilości pracy jaka musiała zostać wykonana przez doktorantkę oraz jej współautorów by przeanalizować przedstawione wyniki obserwacyjne i wyciągnąć z nich astrofizyczne wnioski. W mojej opinii obróbka danych wykonana została bardzo rzetelnie i szczegółowo, a zaprezentowanie wniosków są przemyślane i wyważone. Doktorantka i jej współautorzy unikają nadinterpretacji wyników, przedstawione w publikacjach dyskusje uzyskanych rezultatów wyraźnie wskazują, że autorzy są świadomi ograniczeń wynikających zarówno z obserwacyjnych aspektów analizowanych danych, jak i tych wynikających z obecnego stanu naszej wiedzy na temat fizyki zjawiska maserowego, czy mechanizmów tworzenia się

masywnych gwiazd. Pomimo iż nie wszystkie założone cele prowadzonych badań udało się zrealizować (czego przykładem jest choćby publikacja P3) wkład doktorantki (i pozostałych członków grupy badawczej, do której ona należy) w rozwój metodologii prowadzenia badań nad astrofizycznymi maserami i powiększenie naszego zasobu wiedzy w zakresie teorii powstawania i ewolucji obiektów HMYSO jest dla mnie niezaprzeczalny.

W związku z powyższym od strony merytorycznej rozprawę doktorską pani mgr. Agnieszki Kobak mogę ocenić wyłącznie jako bardzo dobrą. Przedstawione w rozprawie wyniki analizy danych obserwacyjnych oraz ich interpretacja znacznie przyczyniły się do rozwoju naszej wiedzy o badanych przez doktorantkę zjawiskach. Również od strony edytorskiej praca jest bez zarzutu. Znalazłem jedynie kilka literówek i drobne błędy gramatyczne, ale jest ich na tyle mało, że nie warto o nich tu wspominać, w żaden sposób nie utrudniając one bowiem odbioru pracy.

Jedyny poważniejszy zarzut jaki mam to brak szerszego spojrzenia na omawiane zagadnienia. Oczywiście w każdej z prac (włącznie z tą nieopublikowaną, stanowiącą Rozdział 5) znajduje się adekwatna dyskusja wyników i konkluzje, ale dotyczą one wyłącznie omawianego w danej pracy zagadnienia. Brakuje mi trochę jakiejś myśli przewodniej, opisu tego jak poszczególne podejmowane tematy wpisują się w całość badań nad tworzeniem się i ewolucją obiektów HMYSO i gwiazd w ogólności. Zarówno podrozdział 1.4 „Project goals”, jak i Rozdział 6 - podsumowanie (zawierające się jedynie w pół strony tekstu), nie zawierają praktycznie żadnych informacji w tym aspekcie; skupiają się jedynie na wynikach przedstawionych w stanowiących zasadniczą część rozprawy publikacjach, są powtórzeniem i skrótem ich konkluzji. Wspomniany Rozdział 6 jest przez to kompletnie bezużyteczny.

Podsumowanie oceny

W mojej opinii przedstawiona praca doktorska dowodzi, że pani mgr. Kobak opanowała w stopniu bardzo dobrym techniki obserwacji w różnych zakresach promieniowania elektromagnetycznego, od obserwacji radioastronomicznych przez mikrofalowe do podczerwieni. W stopniu więcej niż zadowalającym opanowała również metodologię analizy danych, szczególnie interferometrycznych, z kilku spośród najlepszych obecnie teleskopów na świecie: sieci VLBI, VLBA, MERLIN, LBA oraz ALMA. Rozprawa i składające się na nią publikacje dobitnie wykazują, że doktorantka posiada bardzo dobre umiejętności wykorzystywania źródeł literaturowych oraz danych archiwalnych. Przeprowadzona w publikacjach dyskusja wskazuje, że potrafi on wyciągać logiczne wnioski z uzyskanych rezultatów obserwacyjnych, a także iż potrafi uniknąć nadinterpretacji wyników. Tezy przedstawione w ramach dyskusji wyników i w podsumowaniach są zrównoważone i wskazują iż autorka/autorzy zdają sobie sprawę z ograniczeń dostępnych danych obserwacyjnych i często ich niejednoznaczności. Jedynie czego w rozprawie brakuje to troszeczkę szerszego spojrzenia na zagadnienia związane z powstawaniem i ewolucją gwiazd i tego jak prowadzone badania wpisują się w naszą wiedzę na ten temat. Na etapie kariery na którym znajduje się doktorantka jest to jeszcze stosunkowo zrozumiałe i niestety powszechne. Nie rzutuje to jednak znacząco na całokształt odbioru rozprawy.

Podsumowując uważam, że mgr. Agnieszka Kobak uzyskała i przedstawiła bardzo ciekawe i znaczące dla środowiska naukowego wyniki, które przyczyniają się lepszemu zrozumieniu mechanizmów powstawania zjawiska maserowego w otoczeniu młodych obiektów gwiazdowych. **Stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji praca spełnia ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane pracom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie mgr. Agnieszki Kobak do dalszych etapów postępowania doktorskiego.**

dr hab. Wojciech Lewandowski, prof. UZ

Zielona Góra, 20 stycznia 2026



Signed by /
Podpisano przez:

Wojciech Marian
Lewandowski

Date / Data: 2026-
01-21 11:53