

Kraków, 2 czerwca 2021 r.

Prof. dr hab. Krzysztof T. Chyży
Obserwatorium Astronomiczne
Uniwersytetu Jagiellońskiego
ul. Orla 171, 30-244 Kraków
e-mail: krzysztof.chyzy@uj.edu.pl



UNIwersYTET
JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Mateusza Olecha
pt. „Charakterystyka okresowych zmian gęstości strumienia linii 6,7 GHz metanolu”**

Obserwatorium

Astronomiczne

Przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska pana mgr Mateusza Olecha poświęcona jest okresowości zmian jasności maserów, głównie linii metanolu na częstotliwości 6,7 GHz. Praca została przygotowana w Instytucie Astronomii Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu pod kierunkiem prof. dr hab. Mariana Szymczaka.

Tematyka pracy związana jest z bardzo wczesnymi stadiami ewolucji masywnych gwiazd, które są jeszcze słabo zbadane. Wykorzystanie w diagnostyce tych obiektów przejścia maserowego metanolu odpowiadającemu linii 6,7 GHz jest szczególnie odpowiednie, gdyż jego wzbudzenie najprawdopodobniej jest wynikiem promieniowania w dalekiej podczerwieni, pochodzącego od ciepłego pyłu ($T > 100$ K) i przy dużej gęstości gazu ($n \sim 10^7 \text{ cm}^{-3}$) co identyfikowane jest z obszarami formowania się gwiazd o dużej masie. Masery metanolu ujawniają się zatem w otoczeniu wokółgwiazdowych dysków akrecyjnych i bipolarnych wypływów. Obserwowane zmiany strumienia masera mają skalę czasową od kilku miesięcy do kilku lat i są najprawdopodobniej odbiciem zmian zachodzących w procesach akrecji i tworzenia się struktur okołogwiazdowych w skali przestrzennej zaledwie rzędu dziesiątek i setek au. Dzięki maserom możemy badać materię, która jest niedostępna obserwacyjnie w innych dziedzinach widma. Badania takie są przez to niezwykle cenne, a ich ważność podkreśla np. powołanie w 2019 r. Maser Monitoring Organization (M2O), organizacji mającej na celu koordynację międzynarodowych kampanii obserwacji maserów w zjawiskach gwałtownych zmian akrecji protogwiazd. Wyniki takich badań budzą wielkie zainteresowanie astronomów, o czym świadczą niedawne prace w prestiżowym *Nature Astronomy* (Chen, X. et al., 2020, 4, 1170; Burns R. A. et al. 2020, 4, 506). Tematyka rozprawy doktorskiej mgr Mateusza Olech jest bliska tym zagadnieniom, również dotyczy zmienności maserów, ale koncentruje się na zagadkowych przypadkach zmienności okresowej, która jest znacznie rzadszym zjawiskiem.

Układ pracy.

Rozprawę stanowi spójny tematycznie zestaw czterech angielskojęzycznych artykułów naukowych oraz poprzedzający go 28-stronicowy tekst, napisany po polsku, który stanowi rodzaj „Przewodnika”. Artykuły, które będą tu oznaczać numerami od [1] do [4], według kolejności pojawienia się w rozprawie, zostały już opublikowane w renomowanych, zagranicznych czasopismach astronomicznych: pierwsze trzy w *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, a ostatnia praca w *Astronomy and Astrophysics*. Prace te gwarantują wysoki poziom wyników naukowych, potwierdzony procesem recenzenckim przeprowadzonym przez wydawnictwa. Sumaryczny, aktualny wskaźnik IF dla tych prac jest również wysoki i wynosi 21,7.

Publikacje są wieloautorские. Z dostarczonych oświadczeń współautorów wynika, że wkład mgr Mateusza Olecha w pracach [2] i [4], w których był pierwszym autorem był dominujący i wyniósł 75%, natomiast w pozostałych pracach [1] i [3], gdzie był drugim autorem wyniósł 40%. Wkład merytoryczny Autora w kolejnych publikacjach nie budzi zatem zastrzeżeń, a współautorstwo artykułów jest tutaj zrozumiałe, gdyż podstawę do przeprowadzonych badań stanowią długotrwałe projekty obserwacyjne, podejmowane na kilku instrumentach radioastronomicznych na świecie.

ul. Orla 171

PL 30-244 Kraków

tel. +48(12) 623-86-20

fax +48(12) 425-13-18

<http://www.oa.uj.edu.pl>



UNIWERSYTET
JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE

Obserwatorium

Astronomiczne

W „Przewodniku”, w pierwszym rozdziale pt. „Wprowadzenie” autor przedstawia w zwięzły, hasłowy sposób, rolę gwiazd masywnych w budowaniu chemicznej różnorodności materii międzygwiazdowej, tworzenie się asocjacji OB i obłoków gazowo-pyłowych protogwiazd. Dalej omawiany jest mechanizm emisji maserowej, w szczególności linii metanolu na częstotliwości 6,7 GHz i związek maserów z wczesnymi fazami procesów gwiazdotwórczych. W następnej części przedstawiono zjawisko obserwowanych pojaśnień (flar) maserów metanolu. Szczególnym zainteresowaniem mgr Mateusza Olecha pozostają zjawiska okresowych zmian jasności tych maserów, gdyż ich natura jest słabo poznana ze względu na bardzo nieliczną grupę tych obiektów. W postaci krótkich podrozdziałów przedstawiono w „Przewodniku” możliwe hipotezy tych okresowych zmian, są to: zmiany pola fotonowego pompującego masery, wywołane zderzającymi się wiatrami w układzie podwójnym gwiazd; zaburzenia w akreującej materii przez spiralne fale uderzeniowe prowadzące do zmian temperatury i promieniowania dysku okołobinarnego; okresowa modulacja akrecji związana z ruchem gwiazd po ekscentrycznych orbitach; oraz pulsacje fizyczne gwiazd. Przy każdej z tych hipotez Autor omawia argumenty za i przeciw nim, sugerując jakie badania są potrzebne by je zweryfikować.

Z tej części „Przewodnika” wyłania się w sposób naturalny następna jego część, w której opisany jest cel pracy. Kolejne rozdziały zawierają opisy najważniejszych rezultatów badań zawartych w publikacjach [1]-[4] oraz krótkie podsumowanie. „Przewodnik” kończy bibliografia zawierająca 40 pozycji oraz pełna lista publikacji Autora, zawierająca 12 prac recenzowanych i trzy konferencyjne. Dalsza część rozprawy zawiera wierne kopie publikacji [1]-[4].

„Przewodnik” jest dobrze przemyślany, przydatnym, merytorycznym wprowadzeniem w tematykę pracy. Zarówno „Przewodnik” jak i publikacje napisane są dobrym stylem, odpowiadającym standardom tekstu naukowego, jest on precyzyjny i zwięzły. Wszystkie publikacje rozprawy zawierają bogate bibliografie (np. praca [4] – 57 pozycji), która odzwierciedla świetne opanowanie przez Autora wiedzy o aktualnych zagadnieniach teoretycznych związanych z tematyką pracy oraz bardzo dobrą orientację w wynikach badań obserwacyjnych.

Cel pracy i zastosowane metody badawcze.

Za główny cel pracy, przedstawiony w „Przewodniku”, Autor postawił poszerzenie próbki obiektów z okresową zmiennością maserów metanolu oraz połączenie różnych danych obserwacyjnych w celu wyjaśnienia przyczyn występowania tej okresowości. Ponieważ zmiany jasności maserów ujawniają zmiany w parametrach fizycznych ewoluującej protogwiazdy takie badania są bardzo aktualne i ważne dla poznania wczesnych faz ewolucji gwiazd. Ponieważ materiał obserwacyjny jest jeszcze niewielki (obejmuje próbkę nieco ponad 20 obiektów) są to badania wręcz pożądane. Gwoli ścisłości zwracam uwagę, że cele pracy postawiono w „Przewodniku” nie wprost, ale przez wyliczenie czego w dotychczasowych badaniach maserów brakuje i podając raport z działań podjętych przez Doktoranta. Oczekiwałbym tutaj bardziej przejrzystego tekstu.

Przedstawiony cel pracy doktorskiej jest ambitny i trudny w realizacji, gdyż wymaga czasochłonnego monitoringu jasności maserów. Taką metodę obserwacji zastosowano wykorzystując 32m toruński radioteleskop (RT4). Dokonano na nim przede wszystkim monitoringu linii metanolu 6,7 GHz, ale również masera pary wodnej na częstotliwości 22 GHz ([3]). W podobny sposób wykorzystano też radioteleskop w Nancay do monitoringu masera OH ([4]). W celu dokładnego zbadania rozkładu maserów zastosowano metody interferometrii VLBI, korzystając z najpotężniejszych systemów na świecie: VLBA w USA i europejskiego EVN. Doktorant znakomicie poradził sobie dokonując samodzielnie redukcji danych ze wszystkich tych radioteleskopów. Dowiódł w ten sposób, że posiada niezbędną, rozległą wiedzę i zdobył duże doświadczenie w zakresie obsługi specjalistycznego oprogramowania i metod redukcji danych radioastronomicznych.

ul. Orła 171

PL 30-244 Kraków

tel. +48(12) 623-86-20

fax +48(12) 425-13-18

<http://www.aa.uj.edu.pl>



UNIWERSYTET
JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE

Obserwatorium

Astronomiczne

Do zbadania zmienności i periodyczności maserów zostały zastosowane różne metody, standardowo spotykane w tego typu analizach, jak: periodogram Lomb-Scargle'a, analiza falkowa, dyskretna funkcja korelacji. Do odtworzenia przestrzennej struktury maserów użyto modelowania opartego na zapóźnieniach pomiędzy składnikami widmowymi oraz ich precyzyjnych pozycjach na sferze niebieskiej, uzyskanych z danych interferometrycznych. Uważam, że zastosowane metody bardzo trafnie dobrano do zadań badawczych, a ich różnorodność zapewnia wiarygodność uzyskanych wyników.

Wyniki naukowe i ich ocena.

Każda z publikacji rozprawy zawiera szereg interesujących i znaczących wyników naukowych, te najważniejsze kolejno przedstawiam. W publikacji [1] dokonano analizy statystycznej obszernego materiału obserwacyjnego 166 maserów metanolu, związanych z masywnymi młodymi gwiazdami. Obserwacje pochodziły z radioteleskopu RT4 i obejmowały wieloletni monitoring od 2009 do 2013 roku. Pokazano, że prawie 80% źródeł maserowych jest zmiennych, z okresem od 120 do 416 dni. Dziewięć z 137 maserów z dobrze określoną zmiennością wykazało okresowość zmian, przy czym dla trzech z nich okresowość taką wykryto po raz pierwszy. Wykazano również odwrotną korelację mocy promieniowania składników maserowych i stopnia zmienności (tzw. indeksu zmienności) oraz dodatnią korelację mocy maserów i mocy promieniowania protogwiazdy w kontinuum. Praca ta dostarcza zatem przesłanki na radiacyjne (przez fotony w dalekiej podczerwieni) pompowanie maserów metanolu i została już w tym kontekście zacytowana np. przez Stecklum et al. (2021, A&A 646, A161).

W pracy [2] przedstawiono poszukiwania zmiennych maserów metanolu w próbie 86 źródeł, wykorzystując dane archiwalne z monitoringu prowadzonego radioteleskopem RT4 w latach 2009-2017. Doktorant przeprowadził samodzielnie redukcję tych danych i podobnie jak w pracy [1] poddał je analizie okresowości metodami periodogramu Lomb-Scargla i analizy falkowej. Odkryto w ten sposób dwa nowe oraz potwierdzono trzy inne masery okresowe, znacząco poszerzając w ten sposób grupę wszystkich znanych periodycznych źródeł maserowych do 25 obiektów. Dla pięciu maserów okresowych podjęto dalsze badania i ujawniono dużą różnorodność w zjawiskach zmienności, różne zapóźnienia pomiędzy różnymi częściami widm, różnice w profilach flar. Wykazano też antykorelację zmian jasności z bolometryczną mocą źródeł periodycznych. Bogate dane obserwacyjne dla źródła G59, w tym własne obserwacje Autora z dużą zdolnością rozdzielczą wykonane przy użyciu interferometru EVN, umożliwiły modelowanie rozkładu przestrzennego składników tego masera. Ujawniły one strukturę w postaci fragmentu dysku o promieniu od około 630 do 1200 au i grubości około 210 au. Innym interesującym wynikiem było znalezienie dla źródła G59 silnej korelacji zmienności w emisji maserowej i w podczerwieni oraz opóźnienia czasowego dla emisji masera o około 0,11 okresu zmian. Wskazuje to na pompowanie radiacyjne oraz nieciągłość akrecji na centralny obiekt gwiazdowy w układzie podwójnym lub na pulsacje protogwiazdy jako przyczynę zmienności tego masera.

Szczegółowe badania pojedynczego obiektu G107 przeprowadzono w pracy [3]. Na uwagę zasługuje szybkie podjęcie decyzji o obserwacji metanolu w tym źródle radioteleskopem RT4, po ujawnieniu w nim periodyczności przez Fujisawa et al. (2014). Dodatkowo w 2015 r. przeprowadzono obserwacje maserów pary wodnej dzięki nowemu odbiornikowi na teleskopie RT4, czułemu na to pasmo. Opracowany przez Autora program monitoringu obu maserów, dopasowany do faz aktywności obiektu, przyniósł zaskakujące wyniki. Dokonano pierwszego odkrycia antykorelacji czasowej maserów metanolu i pary wodnej. Jest to jeden z najciekawszych i najważniejszych wyników pracy doktorskiej. W celu wyjaśnienia tego zjawiska dokonano uzupełnienia danych o wysokie zdolności rozdzielcze, przeprowadzając obserwacje siecią interferometryczną EVN w trakcie flary masera metanolu. W wyniku porównania własności przestrzennych maserów metanolu i pary wodnej (z archiwalnych danych interferometru VERA) pokazano, że część składników obu

ul. Orła 171

PL 30-244 Kraków

tel. +48(12) 623-86-20

fax +48(12) 425-13-18

<http://www.oa.uj.edu.pl>



UNIWERSYTET
JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE

Obserwatorium

Astronomiczne

maserów jest położona blisko siebie (w odległości około 30 au), a więc przebywają w ośrodku o podobnych warunkach fizycznych. Na wyjaśnienie zaobserwowanej antykorelacji jasności maserów zaproponowano zatem ciekawe rozwiązanie: ogrzewanie gazu i pyłu prowadzi do silniejszego pompowania maserów metanolu tworząc rozbłysk, co skutkuje podgrzaniem pyłu do temperatury, która uniemożliwia efektywne pompowanie zderzeniowe maserów wodnych. W najnowszej pracy MacLeod et al. (2021: MNRAS 502, 5658–5667), przedstawiono pierwsze obserwacje skorelowanej zmienności masera OH i metanolu, cytując jednocześnie pracę [3] jako wciąż jedyny przypadek antykorelacji zmienności maserów pary wodnej i metanolu.

Ostatnia publikacja [4] stanowi rozszerzenie badań nad maserem G107 i ukazuje wielką docieklivość Autora w wyjaśnianiu natury tego obiektu. Wykorzystano w niej cały arsenał instrumentów radioastronomicznych (RT4, teleskop Nancay, interferometriy EVN i VLBA). Na uwagę zasługuje też rozszerzenie badań o obserwacje molekuly OH oraz precyzyjnie zaplanowany kompleksowy monitoring maserów w odpowiedniej fazie pojaśnienia. Przeprowadzona szeroka analiza danych pozwoliła uzyskać ważne rezultaty: ujawniono antykorelację w zmienności maserów OH i pary wodnej. Potwierdza to nieprzypadkowość we wcześniejszych doniesieniach o antykorelacji jasności maserów metanolu i pary wodnej w tym obiekcie (praca [3]). Ponadto, znalezione korelacje jasności maserów metanolu i emisji podczerwonej z projektu NEOWISE wskazują na promieniste pompowanie zarówno maserów metanolu jak i OH, a masery wodne byłyby zatem wymuszane procesem zderzeń. W tej koncepcji periodyczność zmian wiązałaby się z modulowaną akrecją w układzie dwóch protogwiazd. Udało się przy tym dokonać odtworzenia rozkładu przestrzennego masera metanolu na podstawie badań interferometrycznych, co doprowadziło do konkluzji o dość stabilnej czasowo, w skali kilku lat, strukturze masera oraz do wyznaczenia ruchów własnych jego składników. Pozwoliło to pokazać, że emisja maserowa pochodzi z dysku o promieniu 240 au i grubości 30 au, z wertykalnym wiatrem, unoszącym składniki maserowe.

Niedostatki pracy.

Przedstawione tutaj uwagi nie zmieniają opisanych powyżej wysokich walorów poznawczych wyników rozprawy. Pojawiające się w rozprawie błędy językowe i przeoczenia są rzadkością. Gwoli ścisłości i obowiązku recenzenckiego wymieniam je tutaj.

- „Przewodnik”, str. 8: niestylistyczne zdanie: „...różnice w wydajności pompowania obszarów maserowych spowodowaną procesami akrecyjnymi”.
- „Przewodnik”, str. 9: literówka: „...ukierunkowanych krawędzi do obserwatora”.
- „Przewodnik”, str. 11: literówka: „do opisu periodyczność w bardzo młodych obiektach”.
- „Przewodnik”, str. 15: niestylistyczne zdanie: Samodzielnie przeprowadziłem analizę numeryczną ...jak i analizie periodycznej”.
- „Przewodnik”, str. 17: żargon: „Samodzielnie wykonałem redukcję i kalibrację tego eksperymentu”.
- „Przewodnik”, str. 18: skrót myślowy? „może być wywołana okresowymi zmianami jasności akrecyjnej”.
- Praca [2]: Tabela A3 – pięć źródeł zaznaczono pogrubioną czcionką, ale nie podano dlaczego. W Tabeli A1 pogrubioną czcionką zaznaczono nowo odkryte źródła periodyczne, jednak w Tabeli A3 taka interpretacja byłaby błędna.
- [3]: Referencja Gray et al. 2016 jest błędnie cytowana (Gray et al. 2015) w rozdz. „Discussion”.
- [4]: W pierwszych 2 rozdziałach padają wielokrotnie powołania na cykl zmian masera, a nie ma informacji o choćby przybliżonej jego wartości. Jest on nieodzowny by ocenić sensowność planu obserwacyjnego do momentu przeczytania dalszych rozdziałów.

ul. Orła 171

PL 30-244 Kraków

tel. +48(12) 623-86-20

fax +48(12) 425-13-18

<http://www.aa.uj.edu.pl>



UNIWERSYTET
JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE

Obserwatorium

Astronomiczne

- [4] - Wyznaczona grubość dysku jest przedstawiona w rozdz. 4.3 jako 30.1 ± 37.4 au. Podawanie trzech miejsc znaczących niepewności jest niepoprawne statystycznie. Ponadto, w podsumowaniu i abstrakcie podawana jest wartość grubości dysku jako 30 au bez niepewności ani ostrzeżenia, że jest to bardzo przybliżone oszacowanie. Tymczasem błąd tej estymacji przekracza 100% wartości (o ile nie ma błędu drukarskiego w podanej niepewności).
- W pracach [3] i [4], na rysunkach oznaczonych numerem 4 zaznaczono gwiazdką pozycję źródła wzbudzania maserów. Pozycje na obu rysunkach znacząco odbiegają od siebie, ale ich położenie argumentowane jest tą samą pracą: Palau et al. (2013). Skąd pochodzą te różnice? Ponadto w cytowanej pracy Palau et al. pik emisji ma współrzędne: 22:21:26.753 63:51:37.90 (Tabela 2), które są znowu różne od tych podanych w opisie rys 4, w pracy [4].
- [4]: W rozdz. 4.1, w komentarzu do rys. 7 stwierdzono, że gęstości strumieni w liniach 1.665/1.667 GHz oraz 6.7 GHz są dobrze skorelowane. Z mojego oglądu tego rysunku wynika, że tylko strumienie w liniach 1.665 i 6.7 GHz są dobrze skorelowane, linie 1.667 i 6.7 GHz wykazują jedynie słabą korelację statystyczną. Ponadto widać, że zależności gęstości strumienia pomiędzy liniami maserowymi są nieliniowe (dla nielogarytmowanych wartości): co mogłoby być przyczyną tej nieliniowości?
- W „Przewodniku” sporo miejsca (str. 8-10) poświęconego jest związkom maserów z obszarami UCHII, natomiast w pracach [1]-[4] jest to aspekt pomijany. Chciałbym się więcej dowiedzieć, jak bardzo zasadne jest twierdzenie, że badane w rozprawie źródła periodyczne są na wcześniejszym etapie ewolucji niż faza występowania UCHII.

Podsumowanie i wnioski końcowe.

Podsumowując, przedstawiona rozprawa doktorska mgr Mateusza Olecha przedstawia oryginalne wyniki naukowe dotyczące badań własności maserów w środowisku młodych i masywnych gwiazd. Do najważniejszych z nich zaliczam poszerzenie bardzo nielicznej próbki maserów metanolu z periodycznymi zmianami jasności o pięć obiektów (prace [1] i [2]), odkrycie w obiekcie G107 antykorelacji zmienności maserów wodnych i metanolu (praca [3]) oraz podobnej zależności dla maserów wodnych i OH (w pracy [4]). W pracach [3] i [4], dzięki zastosowaniu technik interferometrycznych ujawniono trójwymiarowe struktury maserów metanolu, wody i OH. Razem z informacjami o promieniowaniu podczerwonym z satelity WISE umożliwiło to przeprowadzenie szerokiej analizy hipotez o pochodzeniu zmienności maserów i wskazanie na zmiany w akrecji w układzie podwójnym protogwiazd jako prowadzące do wzmocnienia promieniowania w dalekiej podczerwieni i zmian w wydajności maserów metanolu. Przeprowadzenie przez Doktoranta projektów obserwacyjnych na różnych instrumentach radioastronomicznych światowej klasy, szeroka analiza i rzetelna interpretacja wyników wykazują na umiejętność prowadzenia przez niego samodzielnej i twórczej pracy naukowej.

Wobec zauważonych jedynie niewielkich uchybień przedłożona mi do recenzji praca doktorska mgr Mateusza Olecha spełnia w moim przekonaniu wszelkie ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania doktorskiego.

Jednocześnie wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej. Wnosi ona bowiem ważne, nowe wyniki do problemu periodyczności emisji maserowej w obszarach powstawania masywnych protogwiazd oraz wyróżnia się dużym rozmachem analizy i interpretacji danych uzyskanych ze światowej klasy instrumentów radioastronomicznych.

Krzysztof Chyży