

Olsztyn, 15 listopada 2023

dr hab. Marcin Hajduk, prof. UWM
Wydział Geoinżynierii
Instytut Geodezji i Budownictwa
Katedra Geodezji
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie
ul. Oczapowskiego 2, 10-719 Olsztyn

Recenzja pracy doktorskiej mgr Michała Durjasza

Poszukiwanie masywnych protogwiazd o zmiennej akrecji identyfikowanej przez wybuchy maserów metanolu

Celem pracy doktorskiej Pana mgra Michała Durjasza, przygotowanej pod opieką prof. Mariana Szymczaka oraz dr hab. Anny Bartkiewicz, prof. UMK, jest poszukiwanie i analiza zmian tempa akrecji masywnych protogwiazd. Praca dotyczy aktualnej i ważnej tematyki związanej z formowaniem się masywnych gwiazd ($M_* > 8 M_\odot$). Gdy masa protogwiazdy rośnie, rośnie również ciśnienie promieniowania, które stanowi barierę dla akrecji materii na protogwiazdę. W pokonaniu tej bariery pomaga formowanie się dysków akrecyjnych i zmienne tempo akrecji (krótkie okresy tzw. epizodycznej akrecji). Obserwacyjną weryfikację modeli formowania się gwiazd utrudnia nieprzezroczystość obłoku, który otacza gwiazdę, uniemożliwiająca śledzenie całego procesu w świetle widzialnym oraz stosunkowo małe rozmiary kątowe obiektów. Z pomocą przychodzą tutaj linie maserowe obserwowane na falach radiowych, dla których pyłowy obłok jest przezroczysty. Dzięki technice VLBI materię w sąsiedztwie protogwiazdy można śledzić z bardzo dużą rozdzielczością kątową.

Badania prowadzone nad procesem akrecji masywnych protogwiazd w ostatnich latach są niezwykle intensywne. Obserwowane nowe zjawiska kształtują nasze rozumienie formowania się masywnych gwiazd. Obserwacje wybuchów emisji maserowej (Fujisawa i in., 2015) dostarczyły dowodów potwierdzających poprawność modelu epizodycznej akrecji.

Po odkryciu pierwszych wybuchów maserowych powstał zespół monitorujący te zjawiska – Maser Monitoring Organization (M2O). Jednym z owoców tej współpracy stały się prace Burns i in. (2020) oraz Burns i in. (2023), ukazujące rozchodzenie się fali cieplnej w dysku akrecyjnym obiektu G358–MM1, uformowanym w cztery ramiona spiralne wokół protogwiazdy.

Rozprawa doktorska Pana mgra Michała Durjasza dotyczy tematyki akrecji masywnych protogwiazd. Rozprawę stanowi cykl opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych, opatrzonej autoreferatem. Trzy prace, składające się na rozprawę, ukazały się już na łamach czasopisma *Astronomy & Astrophysics*. W dwóch pracach Pan mgr. Michał Durjasz jest pierwszym autorem, a w jednej jest drugim autorem. W niniejszej recenzji będę posługiwał się oznaczeniami [1] dla pracy M. Durjasz, M. Szymczak, P. Wollak i A. Bartkiewicz pt. „Observations of 12.2 GHz methanol masers towards northern high-mass protostellar objects”, [2] dla pracy M. Durjasz, M. Szymczak, M. Olech i A. Bartkiewicz pt. „Discovery of recurrent flares of 6.7 GHz methanol maser emission in Cepheus A HW2” oraz [3] dla pracy M. Olech, M. Durjasz, M. Szymczak i A. Bartkiewicz pt. „Detection of periodic flares in 6.7 GHz methanol masers G45.804–0.356 and G49.043–1.079”.

W pierwszej części autoreferatu Autor rozprawy prezentuje tło naukowe swojej rozprawy. Wstęp opisuje rozwój modeli powstawania gwiazd rozwijających się na przestrzeni lat i ich obserwacyjną weryfikację. Autor zwraca szczególną uwagę na obserwacje wybuchów maserowych w odniesieniu do modeli epizodycznej akrecji. Obserwowane wybuchy stały się w okresie ostatnich kilku lat przedmiotem licznych prac obserwacyjnych oraz teoretycznych. Autor zwraca uwagę na różnorodność obserwowanych zjawisk, która wskazuje na różne ich przyczyny i fizyczne uwarunkowania. We wstępie znajduje się również opis zjawiska emisji maserowej.

Cel pracy oraz metody zostały opisane w sposób klarowny. Składają się na nie monitorowanie emisji maserowej w poszukiwaniu nadzwyczajnych wybuchów, zbadanie czy ich przyczyną może być wzrost akrecji oraz szczegółowe badanie wybranych obiektów metodami interferometrycznymi.

Głównym narzędziem do badania zmian tempa akrecji, wykorzystanym w pracy doktorskiej, jest radioteleskop RT4 znajdujący się w Instytucie Astronomii w Piwnicach. Zespół badawczy pod kierunkiem profesora Mariana Szymczaka prowadzi na nim od 2009 monitoring znanych maserów metanolu na częstotliwościach 12.2 GHz oraz 6.7 GHz. Obserwacje zawarte w pracy doktorskiej Pana mgr Michała Durjasza prowadzone w latach 2019-2023 stanowiły kontynuację monitoringu emisji maserowej. Oprócz tego w pracy doktorskiej zostały wykorzystane nowe obserwacje sieci EVN oraz archiwalne obserwacje VLA.

Przygotowana praca podejmuje zarówno badanie dużej statystycznie próbki wszystkich znanych maserów na półkuli północnej przez porównanie nowych obserwacji z archiwalnymi (praca [1]) oraz szczegółowe badania indywidualnych przypadków (prace [1], [2] i [3]). Wśród indywidualnych przypadków znajdują się masery z nowo odkrytą zmiennością oraz szczegółowa analiza wcześniej znanych zmienności z wykorzystaniem nowych obserwacji.

W pracy [1] Autor rozprawy dokonał przeglądu 153 źródeł, w których wcześniej wykryto emisję maserową 6.7 GHz. Przegląd został wykonany na częstotliwości 12.2 oraz 6.7 GHz. Praca [1] obejmuje po raz pierwszy jednoczesny przegląd wszystkich znanych źródeł tego typu na półkuli północnej. Problemem dla nisko położonych źródeł okazała się emisja radiowa satelitów na orbitach geostacjonarnych, jednak dłuższa integracja i odrzucenie najbardziej zakłóconych skanów pozwoliły na zmniejszenie wpływu tej emisji na badane widma.

Autor dokonał detekcji 36 źródeł na częstotliwości 12.2 GHz, w tym czterech wcześniej nieobserwowanych. Cztery nowe źródła to G50.035+0.582, G85.410+0.003, G107.298+6.639 oraz G183.348-0.575. Otrzymane przez Autora wyniki są w większości spójne z wcześniejszymi badaniami tego typu. W badanej próbce obiektów Autor zaobserwował większą zmienność emisji maserowej na 12.2 GHz w stosunku do 6.7 GHz w skali czasowej ok. 10 lat. Autor interpretuje to w ten sposób, że być może masery 12.2 GHz i 6.7 GHz nie znajdują się dokładnie w tym samym miejscu, zaś rozmiary obszarów maserowych mogą się różnić.

Obiekt G107.298+5.639 został opisany i zbadany szczegółowo. Jest to obiekt znany z naprzemiennych wybuchów emisji maserowych wody i metanolu (Szymczak i in., 2016).

W okresie 2019–2021 Autorowi udało się zaobserwować trzy maksima emisji maserowej na 6.7 oraz 12.2 GHz. Ciekawym wynikiem jest odkrycie zmienności stosunku gęstości strumienia obu linii maserowych $R_{6/12}$. Stosunek gęstości strumienia jest zmienny pomiędzy cyklami i podczas cyklu, przyjmując najmniejszą wartość w maksimum wybuchów. Linia maserowa na 12.2 GHz charakteryzuje się większą zmiennością. Analiza profili sugeruje, że emisja 12.2 GHz osiąga maksimum na 0.8 – 1 dzień przed emisją 6.7 GHz. Profile emisji 12.2 GHz mają również mniejszą szerokość. Zmienny stosunek strumieni $R_{6/12}$ Autor tłumaczy niewielkimi zmianami temperatury pyłu z około 130 do 170 K. Może on również wynikać ze zmian warunków fizycznych w obszarze formowania emisji maserowych.

Praca [2] została poświęcona protogwiazdce Cep A HW2. Badania tego obiektu wnoszą bardzo duży wkład do rozumienia procesów akrecji, dżetów i roli pól magnetycznych w formowaniu się gwiazd. Rodriguez i in. (1994) opublikowali mapę szybkiego wypływu w postaci radiowego, skolimowanego dżetu. Patel i in. (2005) odkryli dysk pyłowo-molekularny wokół centralnej protogwiazdy. Vlemmings i in. (2006) za pomocą maserów wody odtworzyli globalną strukturę pola magnetycznego wokół tegoż dysku. Ciekawym odkryciem było znalezienie sferycznie symetrycznego epizodycznego wybuchu (Torrelles i in., 2001).

Emisja maserowa Cep A HW2 została odkryta przez Mentena (1991). Szymczak i in. (2008) odkryli dwa wybuchy poczerwienionych cech w tym źródle. W pracy [2] Autor zajął się analizą poczerwienionych emisji o prędkościach radialnych $V_{\text{lsr}} > -1.4$ km/s. Na podstawie danych z 32 m radioteleskopu udało się oszacować okres występowania flarującej poczerwienionej emisji na około 5 lat. Dzięki obserwacjom EVN udało się ustalić, że poczerwieniony składnik znajduje się najbliżej gwiazdy centralnej względem pozostałych składników. Ponadto poczerwieniony maser jest mniej wysycony niż dalej położone masery, co ma wpływ na obserwowaną zmienność.

Autor krytycznie weryfikuje możliwe scenariusze przyczyny obserwowanej periodyczności, korzystając z nowej jakości, jaką oferują dane interferometryczne w stosunku do widm zebranych pojedynczym teleskopem. Odtwarza trójwymiarową strukturę emisji maserowej w otoczeniu protogwiazdy. Najbardziej prawdopodobnym wytłumaczeniem obserwowanej zmienności są niezbyt duże, periodyczne zmiany w jasności samego źródła kontynu-

um Cep A HW2, być może wywołane obecnością towarzysza. Zaproponowany scenariusz, w którym poczerwieniona emisja maserowa pochodzi nie ze środkowej części dysku, ale bliżej górnej i dolnej płaszczyzny zgadza się z obserwacjami.

Autor badał również poniebieszczoną emisję masrową obserwowaną w obiekcie ($V_{\text{lsr}} < -1.4 \text{ km/s}$). Zwiększa ona swoją amplitudę w okresie aktywności emisji poczerwienionej, jednak pokrywanie się z jaśniejszymi cechami widmowymi uniemożliwiało zaobserwowanie tego zjawiska pojedynczym teleskopem. Oddziaływanie promieniste między obłokami maserującymi stanowi elegancką interpretację synchronicznej i antyskorelowanej zmienności cech -4.7 km/s oraz -2.7 km/s , popartą informacjami na temat geometrii układu zdobytymi dzięki obserwacjom interferometrycznym (Cesaroni, 1990).

Autor zaobserwował dryf prędkości radialnej flarujących cech widmowych. Przyczyną okazały się być ruchy własne. Niezwykle szczegółowo można je wyznaczyć dzięki obserwacjom długobazowym. Ruchy własne potwierdzają sub-Keplerowski model dysku wokół obiektu (Sanna i in., 2017).

Praca [3] donosi o odkryciu dwóch periodycznych źródeł maserowych: G45.804–0.356 oraz G49.043–1.079. Dla obydwu źródeł zostały wyznaczone okresy na powyżej 400 dni. Dzięki pracy [3] liczba znanych periodycznych źródeł maserowych wzrosła z 26 do 28. Podczas dyskusji i interpretacji uzyskanych wyników autorzy pracy analizują możliwe scenariusze pod kątem uzyskanych obserwacji. Ważnymi obserwablami są m.in. opóźnienia między różnymi liniami czy nagłe wybuchy obserwowane w tych źródłach. Wykluczają one m.in. pulsacje protogwiazdy czy oddziaływanie wiatrów w układzie podwójnym jako przyczynę zmienności emisji maserowej. W przypadku G49.043–1.079 zmienność może być modulowana zmiennym tempem akrecji, na co wskazuje korelacja jasności podczerwonej NEOWISE ze gęstością strumienia linii maserowych. W Autoreferacie Autor uzupełnia opublikowane obserwacje widmami zebranymi po ukazaniu się pracy [3].

Autor analizuje również dostępne archiwalnych obserwacje VLA. Obserwacje Hu i in. wykonane były w okresie luty-kwiecień 2012, a więc zawierały się w okresie monitorowania obiektów przez radioteleskop w Piwnicach.

Autor rozprawy nie ustrzegł się kilku błędów edytorskich i gramatycznych. Kilka z nich

wymieniam poniżej:

- „Dokonane odkrycia sugerują, że poziom aktywności młodych, masywnych gwiazd ulega silnej fluktuacji nawet w krótkich skalach czasowych (< 1 rok), nierzadko mają one charakter periodyczny” na str. 5.
- Błędnie określona niepewność pozycjonowania anteny na stronie 16 (powinno być „25” do 2016 oraz 10” po 2016” zamiast odpowiednich wartości w minutach).
- Tablica 1.1 na str. 17 oprócz parametrów dla obserwacji spektralnych na 12.2 GHz powinna zawierać również parametry dla obserwacji na 6.7 GHz, które również były wykonywane do tego projektu.
- Tytuł rozdziału na str. 20 „Przegląd nieba północnego w linii 12.2 GHz masera CH_3OH ” może być mylący, Autor przeprowadził bowiem przegląd znanych źródeł emitujących na 6.7 GHz na północnym niebie.
- Każdy scenariusz wyjaśniający quasi-periodyczną emisję na stronie 24 powinien się zaczynać z nowego akapitu.
- „był wielokrotnie uzyskiwane” - str. 24
- Na stronie 8 w pracy [2] „we infer that the duty *cyctheir* Table ranges from 0.16 to 0.97”.
- W Bibliografii, str. 35 „Olech, M. and Durjasz, M. and Szymczak, M.”

Edytorskie nieścisłości w żaden sposób nie wpływają na wartość i znaczenie przedstawionych badań. Praca doktorska Autora wnosi wartościowy wkład do badania zmienności emisji maserowej w obszarach formowania się gwiazd. W swoich pracach Autor wykazał się szczegółowością i naukową dociekliwością. Badania zostały przeprowadzone i przedstawione w sposób rzetelny. Autor odnosi się do wcześniejszych wyników i korzysta z dostępnych obserwacji archiwalnych, aby wyjaśnić obserwowane zjawiska. Odnosi się również do istniejących modeli teoretycznych. Weryfikuje zaproponowane modele, korzystając z dostępnych obserwacji.

Oprócz trzech prac przedstawionych w niniejszej rozprawie Pan mgr. Michał Durjasz jest współautorem w kolejnych sześciu recenzowanych pracach. Współautorami prac są członkowie zespołu Instytutu Astronomii UMK zajmującego się badaniem obszarów formowania się masywnych gwiazd za pomocą emisji maserowej oraz ich współpracownicy, włączając to członków Maser Monitoring Organisation. W jednej z prac, poświęconej badaniom zmiennego masera w młodym, masywnym obiekcie gwiazdowym G111.256–0.770 Pan mgr. Michał Durjasz jest pierwszym autorem. Na szczególną uwagę zasługuje również współautorstwo we wspomnianej na wstępie pracy Burns i in. (2023), opublikowanej w *Nature Astronomy*. Pan Michał Durjasz jest również pierwszym autorem kilku wniosków obserwacyjnych na sieć EVN.

Pierwsze miejsce na liście autorów prac [1] i [2] i drugie miejsce na liście autorów pracy [3], stanowiących cykl, oraz rola PI we wnioskach obserwacyjnych na EVN świadczą o dominującym wkładzie Autora w większość zaprezentowanych wyników oraz o umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Zaprezentowany autoreferat oraz dyskusja wyników obserwacji w opublikowanych pracach nie pozostawiają wątpliwości o dogłębnym zrozumieniu poruszanej tematyki. Należy również docenić wkład Autora rozprawy przy rozwoju oprogramowania do opracowania danych. Stworzone oprogramowanie do redukcji i wizualizacji danych spektralnych z radioteleskopu RT4 oraz dashboard do archiwum maserowego w Obserwatorium poprawiają jakość uzyskanych widm i ułatwiają korzystanie z archiwalnych obserwacji.

W mojej ocenie przedstawiona rozprawa doktorska Pana mgra Michała Durjasza spełnia wszelkie wymogi formalne i zwyczajowe stawiane pracom doktorskim. W szczególności, spełnia wymagania przedstawione w uchwale Senatu UMK nr 38 z dnia 26 września 2023 r. w sprawie postępowania o nadanie stopnia doktora na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu oraz art. 187. ust. 1 i 2 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dn. 20 lipca 2018 r. (z późn. zm.). Tym samym wnioskuję o dopuszczenie kandydata do następnego etapu postępowania doktorskiego.

Wnioskuję również o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgra Michała Durjasza. Wyniki rozprawy mają dużą wagę naukową i zostały opublikowane w renomowanych cza-

sopismach. Na uwagę zasługuje bogaty warsztat naukowy, który Autor rozprawy dostosowuje do analizowanych zagadnień. Oprócz znajomości technik obserwacyjnych, procedur kalibracji i analizy danych Autor opanował m.in. analizę widm dynamicznych, analizę periodyczności czy narzędzia statystyczne. Wkład pracy Autora rozprawy nie ograniczał się do opracowania istniejących obserwacji, pozyskiwał on również nowe dane za pomocą interferometru EVN. Obserwacje interferometryczne pozwoliły na bardzo dokładną przestrzenną analizę obserwowanych cech widmowych w obiekcie Cep A HW2. Interferometryczne obserwacje poczerwienionych cech widmowych obserwowanych pozwalają lepiej zrozumieć ich naturę i odrzucić większość proponowanych modeli. Wrażenie robi analiza zmienności i ruchów własnych obszarów maserowych w Cep A HW2 za pomocą obserwacji EVN i archiwalnych obserwacji VLA dla 12 epok. Należy podkreślić, że podjętą tematyką zajmuje się wiele silnych ośrodków na świecie. Prace Autora nie odstają od konkurencji. Całościowy dorobek Autora jest bardzo znaczny jak na ten etap kariery i obejmuje współautorstwo w pracy, która ukazała się w Nature Astronomy.

Marek Hajduk