



ul. Bartycka 18, 00-716 Warszawa
tel: (22) 841 00 41, (22) 3296 100
fax: (22) 841 00 46
email: camk@camk.edu.pl
<http://www.camk.edu.pl>

CENTRUM ASTRONOMICZNE IM. MIKOŁAJA KOPERNIKA PAN

Warszawa, 06.09.2021 r.

Dr hab. Radosław Smolec, prof. CAMK PAN
Centrum Astronomiczne im. M. Kopernika PAN
ul. Bartycka 18
00-716 Warszawa
smolec@camk.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej magister Anny Jacyszyn-Dobrzeńckiej

Przedstawiona do recenzji rozprawa stanowi zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie czterech artykułów recenzowanych poprzedzonych omówieniem cyklu w języku angielskim. We wszystkich pracach recenzowanych Doktorantka jest pierwszym autorem. Zarówno Doktorantka jak i współautorzy przedstawili oświadczenia o wkładzie w przygotowanie artykułów umożliwiające ocenę wkładu Doktorantki. Dwie pierwsze prace, dalej I i II, zostały opublikowane w *Acta Astronomica* (tom 66, strony 149–196, 2016, oraz tom 67, strony 1–35, 2017, odpowiednio), dwie kolejne prace, dalej III i IV, w *Astrophysical Journal* (tom 889, artykuły 25 i 26 z 2020 r., odpowiednio).

Tematykę rozprawy stanowi badanie struktury Obłoków Magellana, Wielkiego (LMC) oraz Małego (SMC), oraz tzw. Mostu Magellana pomiędzy Obłokami, z wykorzystaniem klasycznych gwiazd pulsujących: Cefeid oraz gwiazd RR Lutni z kolekcji gwiazd zmiennych ostatniej, czwartej fazy projektu *Optical Gravitational Lensing Experiment* (OGLE). Jako świece standardowe, Cefeidy oraz gwiazdy RR Lutni są szeroko wykorzystywane do badania struktury Galaktyki i pobliskich układów gwiazdowych. Cefeidy odpowiadają relatywnie młodej populacji (~kilkadziesiąt – kilkaset milionów lat) zaś gwiazdy RR Lutni są znacząco starsze (~10 miliardów lat), zatem struktury układów gwiazdowych badane przy użyciu tych dwóch świec standardowych są zwykle różne i dają wgląd w ich ewolucję. W przypadku bliskiej pary Obłoków, pozwalają na prześledzenie i wnioskowanie o historii ich grawitacyjnego oddziaływania. Jest to ważna i aktualna tematyka podejmowana przez wielu autorów, również z wykorzystaniem klasycznych gwiazd pulsujących oraz danych z wcześniejszych faz projektu OGLE. Świadczy o tym bogata lista literatury we wstępach każdej z prac cyklu oraz spore fragmenty poświęcone dokładnemu porównaniu uzyskanych wyników z wcześniejszymi.

W pracach I oraz III struktura Obłoków została zbadana z wykorzystaniem młodych gwiazd, Cefeid klasycznych. W LMC szczegółowo zbadano dwie najbardziej wyróżniające się struktury: poprzeczkę oraz ramię północne. Ważnym wynikiem jest zredefiniowanie poprzeczki, poprzez rozszerzenie jej w kierunku zachodnim i pokazanie spójności nowo zdefiniowanej struktury. SMC jest zdecydowanie bardziej ubogi w strukturę; kształt opisano przy użyciu elipsoid

rozciągniętych wzdłuż linii widzenia. Obłoki łączy Most Magellana dobrze widoczny w obserwacjach neutralnego wodoru oraz w obserwacjach młodych populacji gwiazdowych. W pracy III pokazano, że położenie kilku Cefeid klasycznych koreluje z powyższymi strukturami. Ciekawym wynikiem jest tomografia wieku Cefeid: indywidualne wyznaczenie wieku gwiazd połączone z analizą ich przestrzennego położenia, dające wgląd w historię oddziaływań Obłoków i połączone z tym oddziaływaniem epizody formacji gwiazd. Wyznaczenie wieku oparte jest o relację okres pulsacji – wiek, która zależy przede wszystkim od czasu ewolucji gwiazdy, przyszłej Cefeidy, na ciągu głównym. Ten zaś zależy od procesów mieszania materii na granicy jądra konwektywnego, które mogą wynikać z przestrzeliwania konwektywnego lub rotacji. W pracy I tego zagadnienia nie przedyskutowano, natomiast w pracy III już tak wykorzystując relację okres – wiek dla modeli bez oraz z rotacją. Określenie wieku pozwoliło na stwierdzenie, że co najmniej kilka Cefeid powstało bezpośrednio w Moście, po minimalnym zbliżeniu obu galaktyk około 300 milionów lat temu. Analiza uaktualnionej próbki Cefeid z obszarów między Obłokami, nie dostarcza natomiast przekonujących argumentów na istnienie postulowanego przez modele przeciw-Mostu (*Counter Bridge*). Dane Gaia wykorzystano do zbadania dynamiki Cefeid z Mostu, pokazując ich zgodne ruchy własne wskazujące na oddalanie się gwiazd od obu Obłoków.

W pracach II oraz IV struktura Obłoków została zbadana z wykorzystaniem gwiazd znacznie starszych, RR Lutni. Oba Obłoki pozbawione są struktur widocznych w obserwacjach młodych gwiazd; rozkład przestrzenny został opisany z wykorzystaniem elipsoid trójosiowych. Wartościowym wynikiem jest zbadanie ewentualnego występowania poprzeczki w obserwacjach gwiazd RR Lutni, co postulowały prace wcześniejsze. Pokazano, choć raczej jakościowo, że obserwacje OGLE nie dostarczają argumentów za istnieniem takiej poprzeczki, a wcześniejsze twierdzenia najpewniej wynikały z silnych efektów blendowania w gęstych centralnych polach LMC. W pracy IV pokazano, że gwiazdy RR Lutni, w przeciwieństwie do Cefeid, nie tworzą Mostu. Choć gwiazdy te są obecne pomiędzy Obłokami, to ich lokalizacja jest w pełni zgodna z modelem nakładających się halo bliskich sobie galaktyk. Wynik ten jest sprzeczny z wynikiem z pracy Belokurov i in. (2017) w której, również wykorzystując dane OGLE oraz dane Gaia DR1, wskazano na istnienie struktury łączącej oba Obłoki odpowiadającej Mostowi widocznemu w obserwacjach młodszych populacji. Niezwykle cennym fragmentem pracy IV jest „detektywistyczna” praca pokazująca, że wynik ten nie jest wiarygodny. W przypadku Mostu tworzonego przez gwiazdy z kolekcji OGLE pokazano, że obecność struktury jest wynikiem użycia bardzo specyficznej wizualizacji. W przypadku danych Gaia DR1 natomiast, jest to wynik bardzo dużej kontaminacji próbki przez źródła niefizyczne.

Dane OGLE-IV dzięki wysokiej jakości fotometrii dwubarwnej, czystości i wysokiej kompletności kolekcji gwiazd pulsujących, stanowią unikalne źródło do badania struktury układu Obłoków Magellana. Nie mam wątpliwości, że źródło to zostało w pełni wykorzystane przez Doktorantkę. Jej prace ukazały najbardziej kompleksowy jak dotąd obraz struktury całego układu z wykorzystaniem gwiazd pulsujących, dostarczając wgląd w historię niedawnej interakcji Obłoków.

Poniżej przedstawiam kilka uwag, pytań oraz sugestii.

– W pracy I użyto zależności $P-L$ do wyznaczenia odległości względnych Cefeid. W konstrukcji punktu zerowego wykorzystano odległość do LMC, wyznaczoną na podstawie rozdzielonych układów zaćmieniowych późnego typu. Jak zauważono w pracy, w przypadku Cefeid z SMC nachylenie relacji dla $\log P < 0.4$ może być inne, zaś Cefeidy w LMC z $\log P < 0.4$ są znacząco mniej liczne. Mimo to, ostatecznie wykorzystano jedynie relację dla Cefeid z LMC. Choć przy badaniu struktury Obłoków z wykorzystaniem odległości względnych ma to drugorzędne

znaczenie, zabrakło mi dyskusji możliwego wpływu metaliczności na relację $P-L$. W przypadku Cefeid dwumodalnych wykorzystano mod oscylacji niższego rzędu, choć wykorzystanie dominującego modu oscylacji wydaje się lepszym rozwiązaniem. Przydałoby się dokładniejsze uzasadnienie wyborów podjętych przy konstrukcji odległości do Cefeid i ich ewentualnego wpływu na wyniki.

- Badając strukturę LMC i SMC w pracy I wydzielono kilka podstruktur (np. rysunki 7 i 16). Konstrukcja poszczególnych obszarów nie została jednak opisana na tyle dokładnie, by móc powtórzyć przeprowadzoną analizę.

- Przy wyznaczaniu odległości do gwiazd RR Lutni niezbędne jest wyznaczenie ich metaliczności, $[Fe/H]$. W tym celu, wykorzystano empiryczną relację pozwalającą oszacować $[Fe/H]$ na podstawie kształtu krzywej blasku. Moją wątpliwość budzi wykorzystanie relacji z pracy Nemec i in. (2013). Jej zastosowanie wymaga przejścia od pasma *Keplera* przez pasmo V, oraz od pasma V do pasma I. Transformacje współczynników Fouriera między różnymi zakresami długości fal zależą od metaliczności, czego nie uwzględniono (a co może mieć wpływ na metaliczności w skrzydłach rozkładu). Ten fakt, w połączeniu z wysokim rzędem oryginalnej formuły Nemec i in. sprawia, że trudno realistycznie oszacować błąd uzyskiwanych wartości $[Fe/H]$. Wydaje się, że lepszym rozwiązaniem byłoby wykorzystanie formuły wprost skalibrowanej dla filtra I (Smolec, 2005), choć i to rozwiązanie nie jest wolne od wad. Brakuje dyskusji wpływu wyznaczanych metaliczności na odległości do gwiazd RR Lutni.

- Jednym z intrygujących wyników (praca II, rozdziały 5.1, 7.2), potwierdzonym również w pracach innych autorów, jest mniejsza średnia odległość SMC wyznaczona dla gwiazd RR Lutni w porównaniu z odległością wyznaczoną przy pomocy zmiennych zaćmieniowych czy też przy pomocy Cefeid klasycznych. Czy jest możliwe, że różnica ta jest realna, czy jednak występuje gdzieś istotny systematyczny błąd w metodach wyznaczania odległości? Czy można oszacować ilościowo jak ewentualny błąd systematyczny wyznaczania metaliczności gwiazd RR Lutni, czy też ewentualnie różne punkty zerowe relacji $P-L$ dla Cefeid mogą przyczynić się do obserwowanej różnicy?

- Przy badaniu struktury układu Obłoków Magellana z wykorzystaniem gwiazd RR Lutni zrezygnowano, bez uzasadnienia, z gwiazd RRc. O ile w przypadku badania struktury samych Obłoków liczba gwiazd RRab jest z pewnością wystarczająca to w przypadku Mostu, gdzie gwiazd jest niewiele, każda gwiazda RR Lutni byłaby cenna. Czy w Moście występują gwiazdy RRc?

- Badania Mostu oparte są na niewielkiej liczbie obiektów. Stąd błąd grubo (błędna klasyfikacja zmienności/modu oscylacji) może mieć konsekwencje dla uzyskiwanych wyników. Prezentowany cykl prac to ilustruje: zmiana klasyfikacji trzech Cefeid z klasycznych na anomalne oraz modu oscylacji w kolejnej (fundamentalny na owertonowy) doprowadziła do zmiany części konkluzji z pracy I w pracy III. W pracach przydałaby się analiza możliwych do popełnienia błędów grubych i ich konsekwencji.

- W pracy II porównano znacząco różne struktury Obłoków widoczne w obserwacjach Cefeid oraz gwiazd RR Lutni. Nie przedyskutowano jednak, np. w kontekście modeli ewolucji galaktyk, z czego te różnice wynikają.

- Poza demonstracją wpływu różnych metod wizualizacji danych na obecność Mostu przy próbie odtworzenia wyników Belokurova i in. (praca IV), być może warto było powtórzyć metodę zastosowaną wcześniej przy własnej analizie danych OGLE – dopasowanie funkcji Gausa.

Prace w zasadzie wolne są od potknięć redakcyjnych czy językowych (trzeba zauważyć, że przeszły pełen proces edycji w czasopiśmie co powinno minimalizować ryzyko usterek). Mylący i niespełniający swojej roli jest spis treści – załączone publikacje siłą rzeczy zachowują oryginalną numerację, a dodatkowa ciągła nie została naniesiona. Same prace są napisane płynnie, prezentują metody i wyniki w sposób jasny i precyzyjnym językiem; czyta się je bardzo dobrze. Z drobnych uwag, część rysunków zyskałaby na czytelności przez opublikowanie ich większych wersji

(przykładowo rysunki 7, 8 11, 12 z pracy III czy rysunki 3 i 4 z pracy IV). Zastosowany schemat kolorów w powtarzających się we wszystkich pracach rysunkach ilustrujących gęstość występowania gwiazd (np. rys. 5 w pracy I) zwykle jest mało czytelny w druku (mało czytelne są rysowane na tych rysunkach izoliny). Przydałoby się również więcej precyzji w opisach tych rysunków, szczególnie w opisie położenia nieraz dość subtelnych struktur. Opisy takie jak „*The top of the heart also suggests the existence of an additional substructure...*” są mało precyzyjne i lepiej zastąpić je np. przez podanie współrzędnych.

Trzeba zauważyć, że w kilku istotnych fragmentach badań (np. statystyczna analiza odległości oraz wieku Cefeid w Obłokach w pracy I, wykonanie modeli dopasowania płaszczyzn czy elipsoid trójosiowych w pracach I i II) znaczący udział mieli współautorzy. Nie mam jednak wątpliwości, że wkład Doktorantki w powstanie każdej z prac oraz w przeprowadzone badania był dominujący i odnalazła się ona bardzo dobrze w pracy zespołowej. To niezwykle cenna umiejętność niezbędna w pracy naukowej. Jestem również pod wrażeniem obszerności przeprowadzonych badań. Prezentowane wyżej uwagi krytyczne w żaden sposób nie podważają wysokiej wartości rozprawy.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa mgr Anny Jacyszyn-Dobrzeńckiej stanowi oryginalne dzieło, wnoszące istotny wkład w zbadanie struktury układu Obłoków Magellana. Należy podkreślić bardzo dobry, szeroki odbiór międzynarodowy prac wchodzących w skład rozprawy: Prace I – IV łącznie cytowane były już ponad 150 razy (NASA ADS, 5 września 2021 r.), z czego liczba cytowań dwóch wcześniejszych prac cyklu przekroczyła 60 dla każdej. Doktorantka prezentowała wyniki swoich badań podczas licznych prezentacji na międzynarodowych konferencjach naukowych w tym w formie wykładu zaproszonego. Rozprawa spełnia ustawowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim dlatego wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Astronomii Uniwersytetu Warszawskiego o dopuszczenie pani magister Anny Jacyszyn-Dobrzeńckiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Z uwagi na wysoki poziom naukowy rozprawy, rekomenduję Radzie Naukowej jej wyróżnienie.

Radosław Smolec

Dr hab. Radosław Smolec