

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Pauliny Karczmarek
„Wpływ ewolucji w układach podwójnych na własności gwiazd pulsujących na
przykładzie cefeid oraz gwiazd typu RR Lutni”**

Przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska mgr Pauliny Karczmarek to efekt realizacji trzech dość niezależnych projektów powiązanych z tematyką gwiazd pulsujących i układami podwójnymi. Wszystkie te projekty łączy idea użycia gwiazd pulsujących i podwójnych jako świec standardowych służących do wyznaczania odległości do galaktyk Grupy Lokalnej. Jest to więc tematyka niezmiernie ważna, a w kontekście kalibracji metod wyznaczania odległości do galaktyk i stałej Hubble’a, mogąca mieć znaczenie także dla kosmologii. Pierwszy z projektów (Rozdz. 2) jest obserwacyjny, pozostałe dwa wykorzystują symulacje i syntezę populacji. Jest to więc bardzo ciekawe połączenie obserwacji i symulacji. Wszystkie trzy projekty uważam za ciekawe, dobrze wykonane i ważne z punktu widzenia celów, które Pani Karczmarek postawiła sobie w Rozdz. 1.4.

Na początek uwaga dotycząca podwójności gwiazd. Podwójność gwiazd pulsujących jest okolicznością szczęśliwą w sytuacji gdy chcemy wyznaczyć parametry składników, w szczególności ich masy i promienie (dla układu zaćmieniowego). Bez podwójności, nie byłoby możliwe odkrycie BEP-a (Pietrzyński i in. 2012). Z drugiej jednak strony, podwójność powoduje komplikacje badań gwiazd pulsujących związane choćby z kontaminacją, co najlepiej ilustruje Rozdz. 4. Obydwa aspekty obecności towarzysza gwiazdy pulsującej zostały w pracy Pani Karczmarek dobrze zaakcentowane.

Przejdę teraz do uwag merytorycznych dotyczących wspomnianych trzech projektów oraz Wstępu (Rozdz. 1) i Podsumowania (Rozdz. 5).

Wstęp (Rozdz. 1) zawiera krótkie, ale wystarczające wprowadzenie do tematyki gwiazd pulsujących, skali odległości i podwójności gwiazd, które to zagadnienia dotyczą trzech realizowanych projektów. Kończy go jasne przedstawienie zależności pomiędzy projektami i motywacji do ich podjęcia. Jedyna uwaga merytoryczna, którą mam do zawartych tam treści jest taka, że w ogólności mechanizm κ działa nie tylko w strefach jonizacji i w dużo szerszym przedziale temperatur niż 10 – 40 tys. K (str. 5). Dla przykładu, dla pulsacji typu β Cephei i SPB mechanizm ten działa w warstwie o temperaturze około 200 tys. K i nie jest związany z jonizacją.

Rozdział 2 opisuje wyniki projektu wyznaczenia odległości do dwóch sferoidalnych galaktyk karłowatych, Carina i Fornax. Do tego celu wykorzystane zostały jednoepokowe (najczęściej) obserwacje w podczerwieni dużej próbki gwiazd typu RR Lutni w obydwu galaktykach. Rezultatem są jedne z najdokładniejszych wyznaczeń modułu odległości do tych galaktyk (Tabele 2.5 i 2.6). Na marginesie: przydał by się rysunek ilustrujący moduły w tych tabelach. Za szczególnie cenne uważam bardzo dokładne przedyskutowanie wkładów poszczególnych czynników do końcowych błędów modułów odległości. Fakt iż błędy systematyczne znacznie przewyższają błędy statystyczne pokazuje, w którą stronę powinny pójść przyszłe starania w projektach mających na celu dokładniejsze wyznaczenie odległości do tych galaktyk (np. dokładne wyznaczenie metaliczności). Pani Karczmarek podała też przekonujące argumenty za tym, dlaczego w tego typu wyznaczeniach powinno się używać obserwacji w podczerwieni. Jeśli tylko dysponuje się dostatecznie liczną próbką gwiazd, można sobie pozwolić nawet na jednoepokowe obserwacje w podczerwieni, gdyż i tak nie wpływa to znacząco na końcowy wynik. W komentarzu do tych wyników chciałbym tylko napisać, że można by spróbować poprawić jed-

noepokowe jasności w podczerwieni gdyby dysponować równoczesnymi obserwacjami w obszarze widzialnym, np. paśmie V , dobrą znajomością okresu (może być wyznaczona z takich obserwacji) i wyznaczonym dla dowolnej gwiazdy stosunkiem amplitud w V i pasmach podczerwonych. Mój drugi komentarz odnosi się do punktów zerowych. Podczas regresji liniowej zależności typu $M = A + B \log P$ błąd punktu zerowego A jest tym większy, im dalej od zera rozkładają się punkty, do których dopasowujemy tę zależność. Zakres $\log P$ na Rys. 2.4 nie obejmuje zera, dla galaktyki Fornax można nawet powiedzieć, że jest dość daleko od zera. Czy nie lepiej by było zatem dopasowywać te zależności używając jako zmiennej niezależnej nie $\log P$, ale $\log P - \langle \log P \rangle$, gdzie ta druga wielkość to średnia z $\log P$ dla wszystkich gwiazd? Być może tak jest, ale w tekście tego nie znalazłem.

Rozdział 3 podejmuje bardzo ciekawy temat pochodzenia i liczebności gwiazd zwanych BEP-ami, których niecodzienne własności (mała masa, pulsacje podobne do gwiazd RR Lutni) tłumaczone są ewolucją w układzie podwójnym, w którym doszło wcześniej do wymiany masy między składnikami. Próba wyjaśnienia skąd się biorą i ile jest takich gwiazd zrealizowana została przez Panią Kaczmarek poprzez syntezę populacji przy wykorzystaniu programu StarTrack. Tego typu analiza ma dość oczywiste ograniczenia związane z uproszczeniami (zwłaszcza dotyczącymi ewolucji układów podwójnych) i przyjętymi założeniami, których jest sporo. Bardzo trudno więc odpowiedzieć jest na pytanie, na ile otrzymany wynik jest wiarygodny i czy można go traktować jako ilościowy czy tylko jakościowy. Zależność wyników od przyjętych założeń (choćby tych wymienionych na str. 63) nie została zbadana, ale wcale mnie to nie dziwi wobec ogromu pracy jaki musiałby być związany z takim sprawdzeniem.

Tak czy inaczej, zrealizowany przez Panią Kaczmarek projekt jest dużym krokiem naprzód w stosunku do istniejących obliczeń i wydaje się, że pokazanie licznych kanałów ewolucji, które prowadzą do powstania BEP-ów oraz oszacowanie ich liczebności i własności, to bardzo ważny wkład w badanie tych ciekawych obiektów. Tym bardziej, że jego wyniki mogą zostać użyte do przygotowania strategii, którą należy zastosować aby więcej takich obiektów odkryć.

I jeszcze kilka drobnych uwag: Wydaje mi się, że w omówieniu możliwości wykrywania BEP-ów (Rozdz. 3.4.4) powinno się znaleźć omówienie efektu LTTE, który może dla tych w końcu dość krótkookresowych gwiazd dać wiele detekcji podwójności. Na początku Rozdz. 3 wspomniana jest wprowadzić strona Liški i Skarki oraz praca Hajdu i in. (2015), ale metoda LTTE w kontekście możliwości detekcji BEP-ów nie jest omawiana. Dalej, nie jest dla mnie jasne jaki jest rozkład mimośrodków orbit układów w fazie kiedy jeden ze składników jest BEP-em – może to mieć znaczenie przy planowaniu detekcji takich układów. Czy orbity są cyrkularyzowane na wcześniejszym etapie ewolucji czy nie?

Rozdział 4 opisuje trzeci ze zrealizowanych projektów, w którym wykorzystuje się ten sam program do symulacji, co w Rozdz. 3 (StarTrack), ale tym razem zastosowany do cefeid i problemu wpływu podwójności na wyznaczane zależności PL/PLC w zależności od metaliczności. W pracy rozważane są – z oczywistych względów – metaliczności typowe dla młodej populacji w Galaktyce i Obłokach Magellana. Wyniki tych symulacji mają te same ograniczenia, które dotyczyły poprzedniego projektu. W szczególności spora rozbieżność między liczbą cefeid w SMC otrzymaną z syntezy populacji a obserwowaną (Tabela 4.6) wskazuje na to, że któreś z założeń (błędne SFH?) nie jest spełnione. Do wyników tych symulacji należy więc podchodzić z ostrożnością, co nie znaczy, że nie dają one wartościowych wniosków. Na przykład pokazanie, że – zgodnie z obserwacjami – spora część towarzyszy cefeid to gwiazdy typów B i A, to według mnie bardzo ciekawy wynik, który uwiarygadnia te symulacje. Bardzo ważne jest ilościowe oszacowanie wpływu podwójności na wyznaczane zależności PL oraz pokazanie, że po-

dwójność ma marginalny wpływ na wyznaczane zależności. Także i w tym wypadku pokazano jasno, że opłaca się robić obserwacje w podczerwieni.

Rozdział 5 w zwięzły sposób podsumowuje uzyskane wyniki i wynikające z nich wnioski. Jest napisany dobrze, choć być może przydałaby się dyskusja tego, w jaki sposób zrealizowane projekty mogą zostać w przyszłości rozwinięte lub wykorzystane.

Redakcyjna strona pracy

Praca napisana jest starannie i bardzo dobrym językiem. To jedna z najlepiej napisanych prac doktorskich, które miałem okazję recenzować. Literówki można policzyć na palcach, a autorka przykładą dużą wagę do tego, aby nie używać kalek z języka angielskiego, co nie jest łatwe w astronomii. Rysunki są w większości przejrzyste, choć niektóre prosiłyby się o trochę barwniejszą paletę kolorów niż żółto-zielono-niebieska. Nie bardzo widać różnice w rozmiarach punktów (np. na Rys. 4.7 czy 4.18). Cytowania do literatury są obszerne i zamieszczone w sposób wygodny dla czytelnika. Kilka drobnych uwag dotyczących redakcyjnej strony pracy wymieniam poniżej:

- Tytuł Rozdziału 3 jest dość nieszczęśliwy. Gdybym nie czytał jego treści, pomyślałbym, że chodzi o pulsacje wzbudzone pływowo (ang. *tidally excited oscillations*, TEO).
- Trochę razi w niektórych momentach nadużywanie skrótowców, na przykład w dyskusji w Rozdz. 3.3, tym bardziej, że pochodzą z języka angielskiego (IS, MT i CE).
- O ile dobrze rozumiem to, co jest napisane w słownikach języka polskiego, „małomasywny” należałoby pisać razem.
- Zdarzają się dość nieszczęśliwe wyrażenia. Na przykład „do wyznaczania odległości z bogatą historią” (str. 8), „parowanie gwiazd RRL z ich towarzyszami” (str. 59).
- W polskiej literaturze zwykle mówimy o „błyskach γ ” (ang. *burst*), str. 11/12. „Rozbłysk” (ang. *flare*) zarezerwowany jest do aktywnych zjawisk zachodzących na powierzchni Słońca czy innych chłodnych gwiazd.
- Stała Hubble’a (przypis 9, str. 12) to nie to samo co parametr Hubble’a – stała Hubble’a to obecna wartość parametru Hubble’a.
- „Indeks barwy” (str. 18) jest kalką. Po polsku mówimy o „wskaźniku barwy”. Wolę „mimośród” od „ekscentryczności”, która ma wiele znaczeń. „Bias obserwacyjny” (np. str. 98) też można było zamienić na coś innego.
- Na str. 71 (ostatni akapit) z opisu wynika, że różnica temperatur jest zdefiniowana odwrotnie niż pokazana na Rys. 3.4.
- Nie za bardzo podoba mi się użycie słowa „cenzus” w tym kontekście (Rozdz. 4).
- Zamiast „studzenia” (str. 95, przypis 4), lepiej chyba byłoby użyć „stygnięcia” czy „chłodzenia”.
- Nie wiem, co to są „ruchy radiacyjne” (przypis 8, str. 100).
- Nie jest jasne co to znaczy, że „przypadki [...] nie spełniają warunku stabilności pulsacji” (str. 104). Stabilność w odniesieniu do pulsacji oznacza, że gwiazda nie pulsuje.
- Nie wszystkie punkty na Rys. 4.8 (np. na lewym i prawym panelu) znajdują się pod diagonalą jak napisano na str. 113.
- „Czarną” nie „czerwoną” obwódką (str. 135, dotyczy Rys. 4.18).
- Jeśli układ jest mocno ekscentryczny, zaćmienia też mogą być oddzielone w fazie o 0,5 i nie muszą być blisko siebie. To zależy od długości peryastronu (str. 136).

Końcowa konkluzja

Podsumowując, uważam, że rozprawa doktorska mgr Pauliny Karczmarek zawiera bardzo wartościowe wyniki naukowe. Pozwala mi to z prawdziwą przyjemnością uznać rozprawę za **spełniającą formalne warunki stawiane rozprawom doktorskim** i wnioskować o dopuszczenie mgr Pauliny Karczmarek do dalszych etapów postępowania, w tym publicznej obrony rozprawy doktorskiej. Ze względu na wagę otrzymanych wyników wnioskuję także o **uznanie tej rozprawy za wyróżniającą**.

Z poważaniem,

