

dr hab. Marcin Kiraga,
Obserwatorium Astronomiczne
Uniwersytetu Warszawskiego,
Al. Ujazdowskie 4,
00-478, Warszawa
kiraga@astrouw.edu.pl

**Recenzja pracy doktorskiej mgr. Piotra Wielgórskiego pod tytułem
“ Cefeidy klasyczne i II typu jako kosmiczne wskaźniki odległości”**

Praca doktorska Pana mgr Piotra Wielgórskiego dotyczy zagadnień związanych z kalibracją drabiny odległości w oparciu o obserwacje cefeid klasycznych i cefeid II typu. Wiąże się ona ściśle z tematami badawczymi projektu naukowego “Araucaria”, którego Autor pracy jest aktywnym uczestnikiem. Jej głównymi wynikami naukowymi są analiza zależności jasności cefeid klasycznych od metaliczności, kalibracja zależności jasność - okres, dla cefeid II populacji i wyznaczenie parametru projekcji mierzonej prędkości radialnej dla dwóch pobliskich cefeid II typu. Są to zagadnienia ważne i prowadzą do poszerzenia zastosowania gwiazd pulsujących jako wskaźników odległości oraz zmniejszenia niepewności pomiarów odległości, kiedy z nich korzystamy.

Praca napisana jest po polsku i składa się z sześciu rozdziałów. Pierwsze dwa mają charakter wstępny, a główne wyniki naukowe pracy przedstawione są w rozdziałach 3, 4 i 5. Część z nich była już opublikowana w recenzowanych czasopismach naukowych.

Rozdział 3, “Wpływ metaliczności na jasności absolutne cefeid klasycznych” jest w dużej mierze oparty o pracę Wielgórski i inni 2017 (ApJ, 842, 116) “A Precision Determination of the Effect of Metallicity on Cepheid Absolute Magnitudes in VIJHK Bands from Magellanic Cloud Cepheids” i pracę Breuval i inni 2021 (ApJ, 913, 38) “The Influence of Metallicity on the Leavitt Law from Geometrical Distances of Milky Way and Magellanic Cloud Cepheids”.

Rozdział 4, “Zależność okres – jasność dla cefeid II typu” powstał w oparciu o pracę Wielgórski i inni 2022 (ApJ, 927, 89) “An Absolute Calibration of the Near-infrared Period–Luminosity Relations of Type II Cepheids in the Milky Way and in the Large Magellanic Cloud”.

Wyniki przedstawione w rozdziale 5 “Współczynnik projekcji dla cefeid II typu” nie były do tej pory opublikowane.

Praca zakończona jest podsumowaniem w rozdziale szóstym.

Wstęp dotyczy zagadnienia pomiaru odległości we Wszechświecie i rozbieżności pomiędzy wartością stałej Hubble’a otrzymaną metodą świec standardowych, a wartością otrzymaną na podstawie obserwacji mikrofalowego promieniowania tła i założenia poprawności standardowego modelu kosmologicznego Λ CDM (tzw. Hubble tension). Zrozumienie przyczyn tej rozbieżności jest ważne dla współczesnej astrofizyki, gdyż nie wiemy czy jej przyczyną jest nasz brak wiedzy o którejś z klas obiektów, z których korzystamy jako świec standardowych, czy też model Λ CDM nie opisuje w sposób wystarczająco dokładny ewolucji Wszechświata. Z tego powodu eliminacja błędów systematycznych, które towarzyszą pomiarom odległości za pomocą świec standardowych i znajomość różnych obiektów, które za takie mogą służyć jest bardzo istotna. Autor pokrótce przedstawił główne cele i osiągnięcia projektu “Araucaria” w tym bardzo precyzyjne wyznaczenie odległości do LMC i SMC, za pomocą analizy zaćmieniowych układów podwójnych, które może

stanowić podstawę do kalibracji innych metod. Autor postawił sobie za cel analizę własności obserwacyjnych cefeid klasycznych i cefeid II typu, która ma na celu zminimalizowanie niepewności dotyczących wyznaczania odległości za ich pomocą.

W rozdziale drugim Autor omawia zagadnienia związane z pomiarami odległości i przedstawia różne typy świec standardowych. Dość dokładnie omówiona jest misja astrometryczna Gaia, która pozwala na kalibrację różnych wskaźników odległości za pomocą pomiaru paralaksy heliocentrycznej. Omówione są pokrótce metody wyznaczania odległości za pomocą zaćmieniowych układów podwójnych, za pomocą metody Baadego-Wesselinka i różne typy świec standardowych dzięki którym dokonujemy pomiarów odległości.

W rozdziale 3 Autor podejmuje istotne zagadnienie zależności punktu zerowego relacji PL (okres - jasność) dla cefeid klasycznych od metaliczności. Do porównania służą mu gwiazdy z LMC, SMC i Galaktyki. Korzystając z zależności PL w różnych filtrach (V, I, J, H, K) i w indeksie *wesenheit* starał się zminimalizować wpływ ekstynkcji.

Wyniki dotyczące zależności jasności cefeid od metaliczności przedstawiane są stopniowo. Początkowo Autor prezentuje wyniki z pracy Wielgórski i inni 2017, gdzie porównywano cefeidy pulsujące w modzie podstawowym z LMC i SMC. W SMC ograniczono się do cefeid, których okresy pulsacji były większe od 2.5 doby, ze względu na załamanie zależności PL dla mniejszych okresów. Przyjmując różnicę modułów odległości do SMC i LMC otrzymaną na podstawie analizy zaćmieniowych układów podwójnych i średnie wartości metaliczności dla tych galaktyk otrzymał bardzo słabą zależność jasności cefeid od metaliczności we wszystkich badanych filtrach. Dodatkowa analiza uwzględniająca rozciągłość przestrzenną i geometrię zarówno LMC jak i SMC nie zmieniła wyników tej części pracy. Zostały one natomiast podważone w przedstawionej w następnym podrozdziale pracy Breuval i inni 2021. Do analizy zostały dodane cefeidy klasyczne z naszej Galaktyki, dla których można było określić wiarygodnie odległość na podstawie danych misji Gaia (EDR3). Przyjęto, że średnia metaliczność cefeid w Drodze Mlecznej jest bliska słonecznej (0.083 dex) i jej średnie wartości dla LMC i SMC wynoszą odpowiednio -0.35 dex i -0.75 dex. Paralaksy podane dla cefeid galaktycznych zostały poprawione na błędy systematyczne, a odległości do cefeid w LMC i SMC były poprawione o czynnik uwzględniający rozciągłość tych galaktyk i ich geometrię (co jest szczególnie istotne w przypadku SMC). Powtórzenie analizy wielokolorowej dla tego zestawu danych doprowadziło do stwierdzenia, że współczynnik zależności jasności od metaliczności zależy od długości fali. Jego wartość jest bliska 0 w filtrze V natomiast w podczerwieni i dla indeksów *wesenheit* ma wartości wyraźnie ujemne (od około -0.25 do -0.2 mag/dex). Jest to wynik wartościowy, ale na pewno nie można go jeszcze traktować jako ostateczny, o czym świadczy zebranie i porównanie przez Autora wartości tego współczynnika otrzymanego w innych pracach.

Rozdział czwarty przedstawia zależność okres - jasność dla cefeid II typu. Jak już wspomniałem wyniki przedstawione w tym rozdziale są już opublikowane (Wielgórski i inni 2022 ApJ 927, 89). Choć pod wieloma względami cefeidy II populacji są mniej atrakcyjne jako świece standardowe od cefeid klasycznych (mniejsza jasność, mniejsza regularność krzywych blasku, szczególnie przy większych okresach, niepewność co do statusu ewolucyjnego poszczególnych gwiazd tego typu), ale występują w wielu systemach gwiazdowych, w których nie ma cefeid klasycznych (gromady kuliste, galaktyki sferoidalne, czy galaktyki eliptyczne) i skalibrowanie zależności PL dla tych gwiazd umożliwia wykorzystanie ich jako niezależną świecę standardową. Autor wybrał 21 cefeid II typu, które były odpowiednio jasne do przeprowadzenia obserwacji w bliskiej podczerwieni i znajdujących się na tyle blisko Słońca aby ich paralaksy były odpowiednio duże w

EDR3 z misji Gaia. Poprawki punktu zerowego paralaks dla EDR3 były otrzymywane dwoma metodami i wyniki otrzymane za ich pomocą były porównane. Odrzucone zostały trzy gwiazdy dla których wyznaczniki jakości paralaks nie były wystarczająco dobre.

Poczerwienienie dla poszczególnych gwiazd było otrzymane z map całkowitej ekstynkcji i prostego modelu rozkładu przestrzennego pyłu. Precyzyjna fotometria w podczerwieni w filtrach J, H, K była wykonana dla większości tych gwiazd przez Autora pracy za pomocą teleskopu dedykowanego do projektu *Araucaria*. Zależności okres–jasność zostały określone dla poszczególnych filtrów jak i dla wskaźnika *wesenheit*. Gdy odrzucono osobliwe gwiazdy W Vir (które były wyraźnie jaśniejsze), jak i samą W Vir dyspersja dla pozostałych gwiazd liczona względem otrzymanej prostej była w granicach 0.04 - 0.06 magnitudy. Podobna zależność została otrzymana dla cefeid II typu z LMC w oparciu o dane przeglądów podczerwonych. Choć ta część pracy może się wydawać powtórzeniem pracy Matsuaga i inni 2009, dotyczącej zależności PL dla cefeid II typu w LMC w oparciu o dane przeglądu IRSF, to Doktorant wprowadził kilka istotnych poprawek. Wykorzystał dane z późniejszych wieloepokowych przeglądów w podczerwieni dla których porównał wartości średnie z wartościami IRSF, poprawki na ekstynkcję i poczerwienienie zostały wprowadzone o nowe mapy tych wielkości, wprowadził wskaźnik *wesenheit* w oparciu o kolory podczerwone J i K. Nachylenie zależności PL dla cefeid II typu w LMC okazało się zgodne z wyznaczonym w Galaktyce na poziomie 2σ , a porównanie położenia punktu zerowego dla tych zależności dało dobrą wartość modułu odległości (średnia dla trzech analizowanych filtrów i indeksu W_{JK_s}) do LMC ($\mu_0 = 18.477$ mag). Autor zbadał również wpływ metaliczności na jasności absolutne cefeid II typu. Spośród gwiazd użytych do kalibracji zależności PL w Galaktyce dla sześciu znane były metaliczności. Porównanie odchylek jasności tych gwiazd od zależności PL w podczerwieni (filtry J, H, K_s i indeks W_{JK_s}) dało trend rzędu -0.2 mag/dex, który co ciekawe jest podobny do otrzymanego w tej pracy dla cefeid klasycznych.

Rozdział 5 poświęcony jest wyznaczniku parametru projekcji dla prędkości radialnych w metodzie Baadego-Weselinka. Dla dwóch krótkookresowych cefeid II typu, V971 Aql i SW Tau, przeprowadzono obserwacje fotometryczne oraz spektroskopowe, które umożliwiły porównanie zmian promienia gwiazdy wynikających z obserwowanych zmian prędkości radialnych z promieniem określonym na podstawie zależności jasność powierzchniowa - kolor. Jeżeli znana jest odległość do tych gwiazd można określić zmianę ich rozmiarów fizycznych, a przez to wartość współczynnika projekcji. W oparciu o wykonane, w dużej mierze przez siebie, obserwacje Autor otrzymał wartości rozmiarów badanych gwiazd i współczynnika projekcji i przeprowadził dokładną analizę statystyczną niepewności otrzymanych wyników. Wartości współczynnika projekcji, okazały się bardzo podobne dla obu gwiazd i były rzędu 1.4, ale inne ich parametry takie jak okres pulsacji, średnia temperatura, czy średnie promienie były również bardzo zbliżone. Tu można się spytać, czy Autor celowo wybrał dwie gwiazdy tak do siebie podobne?

Nie mam żadnych krytycznych uwag co do metod badawczych zastosowanych w tej pracy. Składają się na nie obserwacje fotometryczne i spektroskopowe, analiza wykonanych obserwacji i danych archiwalnych, ocena czynników mogących mieć wpływ na otrzymane wyniki i analiza niepewności końcowych rezultatów. Są one standardowe ale ich wykonanie jest bardzo staranne.

Mam natomiast szereg uwag do niektórych sformułowań i do strony edytorskiej.

- str. 17: odnośnie misji Gaia: “Umieszczony on został w punkcie libracyjnym L2 układu Ziemia – Słońce – Księżyc w roku 2013 ..”, punkt libracyjny L2 występuje w ograniczonym zagadnieniu trzech ciał, w którym mamy tylko dwie istotne masy (Gaia została umieszczona na orbicie wokół punktu libracyjnego L2 układu Słońce-Ziemia).

- Str. 20. Mamy odniesienie do pracy Paczyński & Sasselov 1997 - autorem tej pracy jest tylko prof. Bohdan Paczyński.
- Str. 27. Na rysunku 2.11 przedstawione są zależności otrzymane w pracach Kervella i in. (2004c) i Kervella i in. (2004c) na podstawie pomiarów interferometrycznych cefeid ..- podpis do rysunku 2.11 informuje, że dane pochodzą z pracy Kervella i in. (2004a).
- Str. 30. W podpunkcie dotyczącym gwiazd węglowych. "Dla gwiazd o masach w przedziale $1.5 M_{\odot} - 5 M_{\odot}$ w trakcie ewolucji wzdłuż gałęzi asymptotycznej zachodzi transport produktu syntezy helu – węgla – z jądra do atmosfery. W gwiazdach o masach mniejszych od tego limitu nie zachodzi synteza helu, ..". Synteza helu zaczyna się dla gwiazd, których masa helowego jądra osiąga 0.45 masy Słońca, a więc spodziewamy się jej również dla gwiazd o masie mniejszej niż masa Słońca. Zapewne Autor miał na myśli możliwość transportu węgla do powierzchni gwiazdy.
- Str. 30. "odległość do galaktyki spiralnej NGC 6822" - nie spotkałem się jeszcze z klasyfikacją NGC 6822 jako galaktyki spiralnej.
- W tabelach 3.1, 3.2, 3.4, 3.5 wartości parametru β odpowiadają obserwowanej wielkości gwiazdowej a nie absolutnej.
- Tabela 3.5, podpis ".. wyznaczone z próbki cefeid ograniczonej do gwiazd leżących wewnątrz promieni 3° i 1° wokół środka galaktyki." W treści pracy i w tabeli są promienie 3 i 1.5 stopnia.
- Rysunek 3.6 - brak w opisie wyjaśnienia różnicy pomiędzy punktami czerwonymi a białymi.
- Tabela 3.6 dla SMC 0.4° stopnia wartości $\Delta\mu$ i $\Delta\mu_0$ (kolumna 5 i 6) są takie same.
- Wzór 3.9 powinien mieć postać $\mu = 5 \log \frac{1}{\omega} + 10$ (paralaksa wyrażona w milisekundach łuku) a nie $\mu = 5 \log \frac{1}{\omega} - 2$
- Rysunki 5.3 i 5.6 są obrócone pod kątem 90° do opisu
- Występują pojedyncze zaniedbania właściwych przedrostków do jednostek odległości np. *pc* zamiast *kpc* (str 19), czy miary kątowej np. $-0.029 \mu as$ zamiast $-0.029 mas$ (str. 59).
- Strona 101, występuje "półkółka północna": ".. na półkółki północnej brak jest instrumentu, .."
- Zarejestrowałem kilkanaście literówek
- Od strony językowej praca jest napisana dobrze, ale zdarzają się sformułowania niepoprawne lub niezręczne (np. często występujący w treści "obiekt naukowy" jako określenie obserwowanej gwiazdy).

Podsumowanie

Uważam, że chociaż wyniki otrzymane w tej pracy trudno określić jako przełomowe i jest ona kolejną, która zajmuje się tematami w niej poruszonymi, to stanowi ważne rozwinięcie dotychczasowych prac. Przy wyznaczeniu zależności jasności cefeid klasycznych od metaliczności

korzystano z ostatnich wyników misji Gaia (EDR3), nowych map poczerwienienia dla LMC i SMC i uwzględniono rozciągłość przestrzenną tych galaktyk.

W oparciu o dane EDR3 i wykonaną w ramach projektu "Araucaria" fotometrię podczerwoną określona została po raz pierwszy zależność okres - jasność dla cefeid II populacji w sąsiedztwie Słońca. Porównanie punktu zerowego zależności PL dla cefeid II populacji LMC i naszej Galaktyce dało moduł odległości bardzo bliski otrzymanemu za pomocą zaćmieniowych układów podwójnych i uważanemu za standardowy.

Współczynnik projekcji prędkości radialnej w metodzie Baadego - Weselinka był wyznaczony do tej pory dla trzech cefeid II populacji. Dzięki obserwacjom i analizie wykonanej w głównej mierze przez Autora tej pracy został on wyznaczony dla dwóch kolejnych gwiazd.

Praca ta spełnia wszystkie ustawowe i zwyczajowe kryteria stawiane pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie Pana Piotra Wielgórskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego, w tym do publicznej obrony pracy doktorskiej.

Z poważaniem

