

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

**Recenzja pracy doktorskiej mgr. Henryki Netzel pod tytułem
“Badanie gwiazd klasycznego pasa niestabilności metodami asterosejstologii”**

Praca doktorska Pani mgr Henryki Netzel dotyczy zagadnień związanych z poszukiwaniem i identyfikacją modów nieradialnych w klasycznych gwiazdach pulsujących typu RR Lutni i cefeidach, poszukiwaniem wielomodalnych gwiazd typu delta Scuti, a także badaniem parametrów opisujących te gwiazdy za pomocą danych asterosejstologicznych. Zawartość pracy jest w pełni zgodna z jej tytułem.

Praca składa się z siedmiu rozdziałów, o których treści krótko napiszę poniżej.

We wstępie przedstawione są podstawowe informacje dotyczące pulsacji gwiazdowych, główne typy gwiazd będące przedmiotem rozprawy (wielomodalne gwiazdy typu RR Lutni, cefeidy i gwiazdy typu delta Scuti) oraz cel pracy. Stanowi on bardzo dobre wprowadzenie do części, w której zawarte są wyniki naukowe.

Rozdział drugi “Poszukiwanie gwiazd RR Lutni z modami nieradialnymi” stanowi rozwinięcie trzech prac Doktorantki z 2015 roku (Netzel i inni 2015a, MNRAS 451, L25; Netzel i inni 2015b, MNRAS 447, 1173; Netzel i inni 2015c, MNRAS 453, 2022) i główne wyniki w nim zawarte zostały opublikowane w pracy Netzel i Smolec 2019 (MNRAS 487, 5584). Systematyczna analiza krzywych zmian blasku gwiazd typu RRc i RRd obserwowanych w kierunku zgrubienia centralnego Galaktyki (11415 gwiazd RRc i 148 RRd) opublikowanych przez zespół OGLE w 2014 (Soszyński i inni 2014, AcA 64, 177), doprowadziła do bardzo istotnego zwiększenia liczby gwiazd w których zarejestrowano dodatkowe pulsacje o małych amplitudach. Autorka korzystała z iteracyjnej metody znajdowania sygnałów o określonej częstotliwości, amplitudzie i fazie, a następnie odejmowania ich od danych obserwacyjnych dopóki w otrzymanych rezyduach nie będzie już sygnału o amplitudzie większej niż czterokrotna wartość szumu (*consecutive prewhitening*). Doktorantka uzupełniła ją o analizę segmentów danych, aby zobaczyć jak podstawowe parametry (amplituda i faza) zmieniają się w czasie, co było konieczne do zarejestrowania niestacjonarnych sygnałów o małej amplitudzie. Dodatkowo analiza krzywych blasku gwiazd RRc, ze względu na dużą ich liczbę została zautomatyzowana. Dla 949 gwiazd typu RRc i 11 gwiazd RRd znaleziono sygnał o okresie około 0.61 okresu pierwszego owertonu. Tak duża liczba gwiazd pozwoliła na dokładne zbadanie własności tej grupy na diagramie Petersena i zidentyfikowanie trzech podciągów odpowiadających okresom 0.61, 0.62 i 0.63 okresu pierwszego owertonu. Autorka przedyskutowała prawdopodobieństwo zarejestrowania dodatkowych sygnałów, które jest zależne od jakości i liczby danych fotometrycznych (100% dla danych Kepler, 75% w przypadku Kepler 2, 65% dla TESS i silnie zależną od liczby obserwacji dla danych OGLE od 2.9% do 27% przy średniej 8.3%). Jako najbardziej prawdopodobną przyczynę występowania sygnału 0.61 podała propozycję profesora Dziembowskiego, według której jest on harmoniką nieradialnych pulsacji o horyzontalnej liczbie falowej $l = 8$ (podciąg 0.63 P_{10}) i $l = 9$ (podciąg 0.61 P_{10}).

Hipotezę tę potwierdza znalezienie w krzywych zmian blasku 114 gwiazd subharmonik o okresie 2 razy większym, które odpowiadałyby modom nieradialnym i fakt, że częściej są odnajdywane dla podciągu $0.63 P_{10}$ (a więc dla modu $l = 8$, który powinien być łatwiej obserwowany niż $l = 9$).

Nie ma natomiast obecnie zadowalającego wyjaśnienia dla występowania sygnału o częstotliwości $0.68 f_{10}$ w gwiazdach, które są w pracy określone jako $RR_{0.68}$. Autorka stwierdziła istnienie 147 takich gwiazd z których wcześniej było znanych tylko 19.

Tą część pracy oceniam bardzo wysoko. Doktorantka ma istotny wkład poznawanie pulsacji nieradialnych w gwiazdach typu RR Lutni. Przedstawiona przez nią analiza potwierdza hipotezę profesora Dziembowskiego dotyczącą identyfikacji modów o okresie $0.61 P_{10}$.

W rozdziale "Spektroskopowa detekcja modów nieradialnych w Cefeidach klasycznych" Autorka sprawdza, czy dla tych gwiazd możliwa jest detekcja modów o horyzontalnej liczbie falowej $l = 7, 8, 9$ za pomocą obserwacji spektroskopowych i jaki byłby optymalny sposób jej uzyskania. Korzysta przy tym z modelowania linii widmowych za pomocą programu FAMIAS. Przy założeniu sferycznej symetrii przeprowadzono symulacje zmian kształtu linii widmowych przy pulsacjach w pierwszym owertonie i towarzyszącym mu jednym modzie nieradialnym. Dla modu nieradialnego zakładana była horyzontalna liczba falowa $l = 7, 8$ lub 9 i azymutalne liczby falowe m przybierające wartości pomiędzy $-l$ a l . Wyniki podane zostały również w zależności od kąta nachylenia obserwatora do bieguna gwiazdy (rozpatrzono trzy przypadki). Choć ta część wydawała mi się trochę szkolna, to Doktorantka uzyskała szereg ciekawych rezultatów. W oparciu o założoną fotometryczną amplitudę modu równą 2 mmag najniższe prędkości oscylacji otrzymuje się dla $l = 8$ (4.75 km/s), podczas gdy dla $l = 7$ i 9 prędkości te są wyraźnie wyższe (odpowiednio 10.2 i 15.2 km/s). W związku z niższą amplitudą prędkości szanse na spektroskopowe potwierdzenie modu $l=8$ są niższe niż gdyby pulsacje były w modach o $l = 7$ i 9 . Ciekawa jest zależność od azymutalnej liczby falowej m . Stosunkowo najłatwiej powinno się stwierdzić mody o $m = 0$ lub 1 . Najmniejsze amplitudy będą obserwowane dla m bliskich $-l$. W przypadku $l=8$ najłatwiej będzie zarejestrować zmiany odpowiadające okresowi pulsacji, a w przypadku $l = 7$ i 9 harmonice o okresie dwukrotnie mniejszym niż okres modu. Dodatkowo na przykładzie modu o $l=7, m = 0$ porównano różne metody detekcji pulsacji nieradialnych. Okazało się, że dla detekcji modu bardzo użyteczna może być analiza okresowych zmian pierwszego momentu profilu linii, natomiast do stwierdzenia harmoniki o okresie dwukrotnie mniejszym dobre wyniki daje badanie okresowości drugiego momentu.

W sytuacji, gdy do syntetycznych danych opisujących profile linii widmowej wprowadzane jest zaszumienie opisane rozkładem Gaussa i wprowadzane są ograniczenia związane z liczbą i rozkładem obserwacji detekcja modów jest dużo trudniejsza. Aby była możliwa, stosunek sygnału do szumu powinien być większy od 100 przy dużej liczbie widm. Analiza możliwości spektroskopowego potwierdzenia pulsacji nieradialnych przeprowadzona przez Doktorantkę w tej części pracy mimo wielu uproszczeń była bardzo rozbudowana i na pewno warto ją uwzględnić przy planowaniu obserwacji, które taki cel miałyby osiągnąć.

W rozdziale 4 Autorka przeprowadziła modelowanie gwiazd RR Lutni dla których były stwierdzone co najmniej trzy mody: w przypadku gwiazd RRc pierwszy owerton i dwa mody nieradialne, a w przypadku gwiazd RRd zazwyczaj dwa mody radialne i jeden nieradialny, choć wśród gwiazd RRd były dwie czteromodalne. Do analizy wykorzystany został otoczkowy kod pulsacyjny w którym parametrami wejściowymi są masa gwiazdy, jasność, temperatura efektywna oraz skład chemiczny opisany przez zawartość metali Z i zawartość wodoru X (w modelach liczonych w tej pracy X jest związane liniowo z Z). Doktorantka policzyła sieć modeli o określonym kroku w masie, logarytmie jasności, logarytmie temperatury efektywnej i logarytmie zawartości metali. Do

porównania z gwiazdami RRc były brane modele w których niestabilny był pierwszy owerton i mody nieradialne o $l = 8$ i 9 , a przypadku gwiazd RRd mod fundamentalny, pierwszy owerton i mod nieradialny o $l = 8$ lub $l = 9$ (zestawy takich modeli traktowane były niezależnie). Do porównania zostało wytypowanych 32 trojmodalnych gwiazd typu RRc i 11 gwiazd typu RRd pochodzących z danych OGLE i dodatkowo 13 gwiazd RRc i 7 gwiazd RRd dla których dane pochodziły z literatury. Dla wszystkich gwiazd RRc amplituda dodatkowych sygnałów była co najmniej pięciokrotnie wyższa od poziomu szumu. Porównanie modeli z gwiazdami odbywało się na podstawie minimalizowania wartości sumy kwadratów względnych różnic okresów, bądź stosunków okresów modów otrzymanych z kodu pulsacyjnego i obserwowanych w gwiazdach. Dla 42 gwiazd typu RRc i 11 gwiazd typu RRd udało się otrzymać zadawalającą zgodność okresów pulsacji i otrzymane parametry fizyczne zostały przedstawione i poddane analizie. Dla większości gwiazd otrzymana masa była w granicach 0.65 - 0.75 masy Słońca, co odpowiadałoby najczęściej przyjmowanym masom gwiazd typu RR Lutni. Pełen zakres otrzymanych wartości zawiera się jednak w zakresie od 0.53 do 0.89 masy Słońca, co w przypadku gwiazd o największej masie wydaje się przewyższać przewidywania otrzymywane z modeli ewolucyjnych. Wartości masy i metaliczności nie są ze sobą skorelowane. Gwiazdy na diagramie temperatura efektywna - jasność odsunięte były od niebieskiej granicy ścieżki niestabilności, co potwierdza że mody nieradialne nie są wzbudzone przy wyższych temperaturach efektywnych. Przy braku możliwości wyznaczenia masy gwiazdy typu RR Lutni na podstawie trzeciego prawa Keplera, ze względu na to, że nie znamy na razie żadnej gwiazdy tego typu w układzie podwójnym, przeprowadzona przez Doktorantkę dla nich niezależna ocena masy jest szczególnie cenna. Część wartości parametrów otrzymanych przez Aurtorkę dla gwiazd typu RR Lutni, takich jak jasności, czy metaliczność będzie mogła zostać sprawdzona obserwacyjnie, niestety trudno się będzie tego spodziewać w przypadku mas.

Omówione w rozdziale piątym poszukiwanie wielomodalnych gwiazd typu delta Scuti zostało przeprowadzone metodą podobną do poszukiwania nieradialnie pulsujących gwiazd typu RR Lutni, z tym, że uwzględniono dane fotometryczne z krótszego przedziału czasu (lata 2010-2015) i nie dzielono ich na segmenty. Badano krzywe blasku 10092 gwiazd typu delta Scuti odkrytych przez zespół OGLE w kierunku centralnego zgrubienia Galaktyki. Dodatkowe okresowości stwierdzono dla 7220 gwiazd, a dla 32 liczba niezależnych sygnałów była większa niż 10. Spośród gwiazd pulsujących radialnie co najmniej w trzech modach (co może pozwolić na analizę astrosejsmologiczną) szczególnie liczne są te pulsujące w modzie fundamentalnym, pierwszym i trzecim owertonie (221 gwiazd). W ich przypadku pojawia się wyraźnie problem selekcji modów i pytanie czemu nie jest w nich wzbudzany drugi owerton? Autorka dokonała krótkiej analizy możliwości rozróżnienia gwiazd delta Sct pulsujących w modzie fundamentalnym i w pierwszym owertonie na podstawie krzywych zmian blasku. Wyboru dokonała dla gwiazd dwumodalnych na podstawie diagramów Petersena. Okazało się, że oprócz statystycznie większej amplitudy gwiazd pulsujących w modzie fundamentalnym parametry fourierowskie opisujące krzywą zmian blasku nie pozwalają nam rozseparować tych dwóch grup.

Rozdział szósty dotyczy modelowania gwiazd typu delta Scuti. Autorka wybrała kilkuset gwiazd, dla których mogły być zidentyfikowane co najmniej trzy mody pulsacji aby przeprowadzić dla nich porównanie z modelami ewolucyjnymi otrzymanymi kodem MESA. W tym celu Doktorantka policzyła siatkę modeli w parametrach masy (od 0.8 do 2.5 masy Słońca co $0.05 M_{\odot}$, logarytmu metaliczności ($[Fe/H]$ od -2.0 do +0.5 co 0.125) i dla trzech wartości przestrzeliwania powyżej konwektywnego jądra. Szukana była masa, metaliczność i wiek modelu przy którym minimalizowana była wartości sumy kwadratów względnych różnic okresów bądź stosunków okre-

sów modów otrzymanych dla danego modelu gwiazdy w kodzie pulsacyjnym i obserwowanych w gwiazdach (podobnie jak dla gwiazd RR Lutni). Zadowolającą zgodność otrzymano dla 175 gwiazd spośród 428, które wybrano do analizy. Ze względu na trudności w ocenie błędów wyznaczenia parametrów dla pojedynczych gwiazd (czego ilustracją jest prawy panel na rys. 6.2), Autorka analizowała statystyczne własności tej grupy gwiazd. Okazała się ona dość różnorodna. Zarówno masy jak i metaliczności obejmowały cały zakres przyjmowany dla siatki obliczeń. Widać jednak zależność pomiędzy masą a metalicznością. Zgodnie z intuicją, najmniej masywne i najstarsze gwiazdy mają najmniejszą metaliczność, a dla tych o największej masie (i co za tym idzie dość młodych) metaliczność jest największa. Gwiazdy o najmniejszej masie i metaliczności prawdopodobnie należy zakwalifikować do grupy gwiazd SX Phe, ale w przypadku gwiazd pola nie ma dobrego kryterium na rozgraniczenie pomiędzy tymi dwoma typami. Badanie własności kinematycznych w oparciu o dane z GAIA EDR3 nie przyniosło rezultatu ze względu na duże błędy wyznaczenia odległości (widoczne na rys. 6.9), których przyczyną jest prawdopodobnie duża gęstość gwiazd w kierunku zgrubienia centralnego.

Najważniejsze wyniki pracy zostały zebrane w rozdziale siódmym - podsumowaniu.

Doktorantka stosowała w swojej pracy klasyczne metody analizy danych fotometrycznych mających na celu odnalezienie możliwie wielu okresowości (*consecutive prewhitening* i *time dependent prewhitening*) i poszukiwania parametrów gwiazd (obliczenia na siatce modeli i poszukiwanie minimalnej wartości odchyłek pomiędzy modelem i obserwacjami), ale były one według mnie adekwatne do postawionego celu, którym była identyfikacja wielu modów dla bardzo dużej próbki gwiazd i modelowanie dużej liczby gwiazd w oparciu o dane astrosejsmologiczne.

Wyniki przedstawione przez Doktorantkę stanowią istotny postęp zarówno w poszukiwaniu gwiazd wielomodalnych wśród gwiazd pulsujących głównego pasa niestabilności, jak i identyfikacji obserwowanych modów. Zostały też przeprowadzone pierwsze dla tak licznej próbki gwiazd oszacowania ich parametrów na podstawie zgodności pomiędzy okresami zidentyfikowanych modów otrzymanych z obserwacji i na podstawie modeli. Ta praca z pewnością jest bardzo ważna i będzie stanowiła punkt wyjściowy dla bardziej precyzyjnych wyznaczeń.

Rozdział poświęcony cefeidom z mojego punktu widzenia trochę narusza kompozycję pracy, która gdyby ograniczyć się do gwiazd typu RR Lutni i delta Scuti charakteryzowałaby się dużą prostotą (poszukiwanie gwiazd wielomodalnych, identyfikacja modów, które umożliwią porównanie z modeli z obserwacjami i następnie oszacowanie parametrów gwiazd). Tym niemniej przedstawione w nim wyniki dotyczące warunków obserwacyjnej detekcji modów nieradialnych w cefeidach metodami spektroskopowymi uważam za istotne i potrzebne.

Co do wyników merytorycznych uzyskanych przez Doktorantkę nie mam żadnych uwag krytycznych. Poniżej zamieszczam swoje pytania dotyczące zastosowanych metod, uwagi dotyczące sposobu prezentacji wyników, korektę niektórych błędów edytorskich formalnie mogących mieć wpływ na uzyskane wyniki i nieścisłości opisu niektórych zagadnień.

Pytania dotyczące metod analizy danych i parametrów symulacji:

- Jaki jest rząd radialny modów nieradialnych, które były przedmiotem analizy dla gwiazd typu RR Lutni i cefeid?
- Rozdział 2.1.2. Liczba danych fotometrycznych dla poszczególnych gwiazd typu RR Lutni zawierała się pomiędzy 35 a 15010. Od jakiej liczby punktów obserwacyjnych stosowano podział danych na segmenty i TDP (time dependent prewhitening)?

- Jaka część masy i promienia gwiazdy obejmowana jest przez otoczkowy kod pulsacyjny w przypadku gwiazd RR Lutni?
- Str 117: Wartości które przyporządkowano parametrowi przestrzeliwania powyżej konwektywnego jądra ($f_H = 0.01, 0.02, 0.03$) są o rząd wielkości mniejsze od zazwyczaj przyjmowanych w literaturze (0.1, 0.2, 0.3). Co przemawiało za takim wyborem wartości tego parametru? Czy różnice pomiędzy modelami o np. $f_H = 0.01$ i $f_H = 0.03$ są zauważalne?

Poprawki do wzorów:

- Wzór 1.2 - powinien tam być kwadrat prędkości dźwięku lub pierwiastek wielkości po prawej stronie.
- Wzór 4.3 (str 83): jest $Y = Y_p - \frac{\Delta Y}{\Delta Z} Z$, powinno być $Y = Y_p + \frac{\Delta Y}{\Delta Z} Z$

Drobne uwagi:

- Wstęp, str 1. "Fale w gwieździe mogą rozchodzić się jedynie z określonymi częstościami odpowiadającymi warunkom fizycznym panującym wewnątrz gwiazdy."
Jest szereg procesów (np. konwekcja), w wyniku których powstają fale o widmie ciągłym, które następnie rozchodzą się w warstwie stabilnej. Może lepiej powiedzieć, że obserwowane przez nas częstości fal są określone przez warunki fizyczne panujące wewnątrz gwiazdy.
- str. 17 "Szczególnie warte wspomnienia jest zastosowanie Cefeid do wyznaczenia odległości przez Hubble (1929) do galaktyk w Grupie Lokalnej, gdzie zauważono zależność pomiędzy prędkością ucieczki a odległością"
W Grupie Lokalnej nie ma możliwości potwierdzenia zależności, będącej treścią prawa Hubble'a, pomiędzy prędkością ucieczki a odległością.
- Rozdział 2.1, str 26 Jako główne źródło danych fotometrycznych dla gwiazd RR Lutni podana jest praca Soszyński i inni 2014 (AcA 64, 177), w której mamy 10 825 RRc i 174 RRd, natomiast w pracy Autorka analizuje 11415 gwiazd RRc i 148 RRd. Skąd pochodziły dane dla dodatkowych gwiazd RRc?
- Opis wzoru 3.4 str 61 ".. θ to kątowa odległość od bieguna, a a_k to k-ty współczynnik prawa pociemnienia brzegowego (Claret 2000)."
Może raczej θ to odległość kątowa pomiędzy zenitem a obserwatorem (jest mowa o pociemnieniu brzegowym a nie grawitacyjnym i w tym wypadku $\theta = 0$ to najczęściej środek tarczy gwiazdy)?
- Rozdział 3.1.4, str. 62, przedostatnie zdanie: "Przyjęto jej szerokość równoważną 10 km/s, a szerokość linii, bez efektów poszerzenia takich jak np. rotacja lub pulsacje, na 10 km/s."
Niezbym ten opis zrozumiałem. Może przydałby się rysunek na którym określona byłaby szerokość linii?

- Rys. 3.7 i 3.8: opis rysunków jest dobry, ale oznaczenia na rysunkach zapewne miały być odpowiednio f_8 i f_9 zamiast f_7 .
- Rys. 3.10: podpis pod rysunkiem podaje trzy przyjęte wartości inklinacji 0, 45 i 90 stopni, podczas gdy w treści pracy i na rysunku mamy 5, 45 i 85 stopni.
- Rys. 4.2: według legendy kropkowana linia oznacza niebieską granicę ścieżki niestabilności dla $Z=0.001$, a powinno być dla $Z=0.01$ (opis rysunku jest dobry).
- Rys. 4.10: kodowanie mas kolorem nie jest dla mnie czytelne, zwłaszcza dla pokazanych tam ścieżek ewolucyjnych, które nie są tak liczne i mogłyby być im przypisana masa w bardziej bezpośredni sposób.
- Rozdział 4.5.3, str. 102 : ".. podczas, gdy najwyższa otrzymana w modelowaniu wartość $[Fe/H]$ w badanej próbce wynosi -0.25 . " na rysunku 4.14 i w tabelach 4.4 (gwiazdy RRc) i 4.5 (gwiazdy RRd) największa wartość metaliczności wynosi -0.4 .
- Rys. 5.4 przypomina trochę łamigłówkę. O ile panel A nie budzi wątpliwości, to przydałaby się informacja, interpretować oznaczenia f_1 , f_2 , itd. w przypadku większej ilości modów (np. na panelu D). Czy są one może uszeregowane według malejącej amplitudy?
- Rysunek 5.8 - dlaczego tak mało pulsacji w pierwszym owertonie ma wyznaczoną wartość R_{31} i Φ_{31} ?

Drobne poprawki językowe:

- Str. 54 3 i 4 linijka tekstu "Jego częstość jest krótsza od częstości pierwszego owertonu i dłuższa od częstości sygnału $f_{0.68}$." W przypadku częstości chyba lepiej mówić "mniejsza", "większa" niż "krótsza", "dłuższa".
- Str. 62 przed 3.1.4 ".. została ustalona na stałą wartość." może "jej wartość została ustalona"

Powyższa lista drobnych poprawek i uwag w żaden sposób nie zmienia mojej wysokiej oceny wartości naukowej wyników przedstawionych w pracy doktorskiej Pani mgr Henryki Netzel. Część z nich została już opublikowana i spotkała się z dużym zainteresowaniem społeczności astronomicznej. Uważam, że przedstawiona rozprawa w pełni wypełnia wymagania stawiane pracownikom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie Pani mgr Henryki Netzel do dalszych etapów postępowania, w tym publicznej obrony pracy doktorskiej. Składam również wniosek do Rady Naukowej o wyróżnienie tej rozprawy.

Z poważaniem


dr hab. Marcin Kiraga