Ocena rozprawy doktorskiej mgr. Henryki Netzel
pt. „Badanie gwiazd klasycznego pasa niestabilności metodami asterosejsmologii"

Henryka Netzel przedstawiła dla obrony doktorskiej absolutnie pionierską pracę, dotyczącą badania znanych nam wszystkim grup klasycznych gwiazd pulsujących – gwiazd typu RR Lutni, klasycznych Cefeid i zmiennych typu Delta Scuti. Podziw czy nawet zachwyt budzi samo podejście – wykorzystać metody astrosejsmologii dla masowego modelowania mnóstwa gwiazd wspomnianych grup, przy czym samej odnaleźć to mnóstwo obiektów, samodzielnie (czy razem z promotorem Radosławem Smolcem) i szczegółowo analizując najbardziej współczesne dane obserwacyjne – przede wszystkim, z projektu OGLE.

Dla modelowania wewnętrznej struktury pulsującej gwiazdy astrosejsmologia potrzebuje dane o częstotliwościach pulsacji – im więcej tych częstotliwości, tym lepiej, tym bardziej dokładnymi będą ograniczenia na budowę gwiazdy i na procesy, zachodzące w gwiezdnym wnętrzu. Ale to tylko pod warunkiem, ze wyznaczymy nie tylko częstotliwość konkretnego drgania, ale za pośrednictwem wielobarwnej fotometrii i spektroskopii zidentyfikujemy ten mod, jego geometrie, i ustalimy, czy on jest własny, czy to jest mieszanka kilku modów, czy harmonika pewnego własnego modu i t.d. Tzn. las sygnałów w widmie częstotliwości wcale niekoniecznie jest lepszy od kilku wyraźnych i zidentyfikowanych pików.

Najbardziej dobrze znane i badane są pulsacje radialne, one są dobrze wykrywane w obserwacjach i ich łatwo porównywać z wynikami modelowania. Więc gwiazdy, pulsujące jednocześnie w kilku modach radialnych pulsacji – idealne obiekty dla modelowania wewnętrznej struktury. W swojej pracy Henryka Netzel skoncentrowała się właśnie na poszukiwaniu wielomodalnych radialnie pulsujących gwiazd, w bardzo starannej analizie ona kilkakrotnie zwiększyła ilość znanych obiektów tego typu, a przy okazji, jeśli można tak powiedzieć, odkryła albo bardzo znacząco zwiększyła ilość obiektów z charakterystycznymi częstotliwościami nieradialnych oscylacji – wyjaśnienie natury tych drgań stanowi pewne wezwanie w astrosejsmologii. Zaproponowane wyjaśnienia są bardzo nietrywialne – przede wszystkim, eleganckie wyjaśnienie przez Profesora Wojciecha Dziembowskiego (2016) kilku charakterystycznych pików nieradialnych oscylacji w gwiazdach typu RR Lutni.

Przedstawiona rozprawa składa się ze Streszczenia, krótkiego Wstępu (Rozdział 1), pięciu głównych rozdziałów (Rozdziały 2-6), Podsumowania (Rozdział 7), Bibliografii, obejmującej 209 prac, i trzech Dodatków: A) tablic z wykrytymi przez Henrykę Netzel gwiazdami typu RR Lutni z charakterystycznymi dodatkowymi częstotliwościami nieradialnych oscylacji (gwiazd RR_0.61 i RR_0.68), B) tablicy wyznaczonych przez Henrykę Netzel parametrów fizycznych gwiazd typu Delta Scuti, pulsujących co najmniej w trzech modach radialnych jednocześnie, oraz C) przykładowego pliku parametrów wejściowych dla ewolucyjnego kodu MESA. Ogólna objętość pracy wynosi 183 strony.

Według bazy danych ADS NASA na dzień 06.09.2021 Henryka Netzel jest współautorem 25 prac, opublikowanych w latach 2015-2021 w renomowanych wydawnictwach, przy czym w 11 z tych prac ona jest pierwszym autorem.

1) We Wstępie (**Rozdział 1**, 25 stron) zwięźle przedstawiono podstawowe cechy gwiezdnych pulsacji i mechanizm ich napędzania w klasycznym pasie niestabilności (tak zwany kappa-mechanizm, związany z modulacja strumienia energii, wychodzącej z wnętrza gwiazdy ku powierzchni). Przedstawiono również główne grupy gwiazd w klasycznym pasie niestabilności – gwiazdy RR Lutni, Cefeidy klasyczne i gwiazdy typu Delta Scuti, przy czym

podkreślono efektywność wykorzystania astrosejsmologii dla wyznaczenia parametrów fizycznych gwiazd w tych przypadkach, gdy obserwujemy wielomodalne radialne oscylacje, a bardzo często również charakterystyczne nieradialne oscylacje. Właśnie tym gwiazdom poświęcona jest praca doktorska.

2) **Rozdział 2** (33 strony) dotyczy poszukiwania gwiazd RR Lutni z modami nieradialnymi w fotometrycznych danych z projektu OGLE z 8 sezonów obserwacyjnych w polach zgrubienia centralnego Galaktyki. Badano gwiazdy dobrze znanych podtypów RRc (pulsujące w pierwszym owertonie radialnych oscylacji) i RRd (pulsujących jednocześnie w modzie fundamentalnym i w pierwszym owertonie). Właśnie w gwiazdach RRc i RRd kilka lat wcześniej – i przeważnie przez Henrykę Netzel ze współautorami w wyniku analizy danych OGLE-III - wykryto dodatkowe mody nieradialnych oscylacji z charakterystycznymi stosunkami 0.61 i 0.68 w porównaniu z częstotliwością pierwszego owertonu radialnych oscylacji.[1] Wybrany dla analizy zbiór gwiazd RRc wyniósł 11 i pół tysiąca gwiazd, więc Henryka Netzel rozwinęła odpowiedni automatyczny skrypt i w sumie wykryła 960 gwiazd RR_0.61 (949 – z podtypu RRc, i 11 – z podtypu RRd). To stanowi 95 % wszystkich znanych dziś gwiazd RR_0.61, a samo zjawisko „RR_0.61" wśród gwiazd RRc i RRd dzięki pracy Henryki Netzel zamienia się z dość egzotycznego na pewne i rozpowszechnione, obserwowane w ponad 8 % przypadków i wymagające wyjaśnienia. Na szczęście, nietrywialne, bardzo eleganckie i przekonywujące wyjaśnienie zaproponował 6 lat temu Prof. Wojciech Dziembowski na Konferencji RRLyr-2015 na Węgrzech. On zinterpretował te dodatkowe nieradialne mody ze stosunkiem okresu około 0.61 do okresu pierwszego radialnego owertonu jako harmoniki modów nieradialnych stopnia 8 i 9 (z dwa razy dłuższymi okresami od okresów harmonik), te mody są złapane w otoczce gwiazdy i wzbudzane za pośrednictwem zwykłego kappa-mechanizmu. Tym samym mamy wyjaśnienie zarówno natury dodatkowych oscylacji jak i faktu obserwowanej „nieegzotyczności" danego zjawiska. Na mnie to zrobiło ogromne wrażenie jako de facto piękne wspólne osiągniecie Wojciecha Dziembowskiego i jego uczniów Radka Smolca i Henryki Netzel.

Gwiazdy z charakterystycznym stosunkiem 0.68 okresu pierwszego radialnego owertonu do okresu dodatkowego słabego (ale wyraźnego i stabilnego) sygnału w widmie częstotliwości zostały wykryte właśnie przez Henrykę Netzel w grupie gwiazd RRc (jedna była znana z danych z satelity Kepler dzięki analizie Pawła Moskalika z kolegami). Obserwowany stosunek okresów jednoznacznie świadczy o tym, ze ten nieradialny sygnał ma okres dłuższy od okresu modu fundamentalnego, spodziewanego (ale nie obserwowanego w gwiazdach RRc) przy danym okresie pierwszego owertonu. W danych fotometrycznych z projektu OGLE-IV Henryka Netzel wykryła wśród gwiazd RRc 147 gwiazd RR_0.68, z nich tylko 19 bylo już wcześniej znanych i w większości wykrytych też przez doktorantkę. I ta wyraźnie zdefiniowana grupa gwiazd stanowi dziś poważny problem w astrosejsmologii – dodatkowy nieradialny mod zostaje niewyjaśnionym. Potencjalnie on może być modem dipolowym, ale tempo jego wzbudzania według istniejących teoretycznych ocen jest dwa-trzy rzędy wielkości mniejsze, niż dla modu radialnego fundamentalnego, który w ogóle nie jest obserwowany! Być może, te gwiazdy nie są gwiazdami RRc, a są małomasywnymi (około 0.2-0.3 masy Slonca) „resztkami" gwiazd, które straciły swoją otoczkę w układzie podwójnym, i wtedy obserwowany stosunek okresów może być stosunkiem okresów dwóch radialnych modów – pierwszego owertonu i fundamentalnego modu. Jednak cztery z wykrytych gwiazd RR_0.68

[1] Chciałbym zauważyć, że dla grup gwiazd RR_0.61 i RR_0.68 mowa idzie o bardzo różnych sygnałach w widmach częstotliwości: dodatkowe oscylacje w grupie RR_0.61 – to są krótkookresowe oscylacje ze stosunkiem okresów około 0.61-0.64 do okresu pierwszego radialnego owertonu, natomiast dodatkowe oscylacje w grupie RR_0.68 – to są długookresowe oscylacje (słaby, ale wyraźny i stabilny signał) ze stosunkami okresu pierwszego radialnego owertonu do okresu tego dodatkowego sygnału.

są jednocześnie gwiazdami RR_0.61, niewątpliwie należącymi do gwiazd RR Lutni z typowymi masami 0.6-0.8 masy Słońca.

3) **Rozdział 3** (21 strona) jest poświęcony badaniu możliwości wykrycia modów nieradialnych dość wysokiego stopnia (np. 7, 8, 9) w danych spektroskopowych dla klasycznych Cepheid, w których tez obserwowano dodatkowe mody oscylacji ze stosunkami okresów jak dla gwiazd RR Lutni. Jeśli one odpowiadają modom dość wysokiego stopnia, jako zaproponował Prof. Dziembowski, one potencjalnie mogą być wykrywane i odpowiednio identyfikowane w zmianach linii widmowych. Henryka Netzel za pośrednictwem wyrafinowanych symulacji syntetycznych profili linii widmowych dla typowej Cefeidy zademonstrowała, ze detekcja i identyfikacja modów wysokiego stopnia jest możliwa, jeśli mamy dużo widm wysokiej rozdzielczości i udaje się osiągnąć wysoki stosunek sygnału do szumu. Przyznam się, ze nie jestem znawca tematu i odbieram przedstawiony rozdział jako raczej metodologiczny, wyznaczający drogę czy kierunek przyszłej analizy rzeczywistych danych spektroskopowych w celu wykrycia i identyfikacji nieradialnych pulsacji.

4) **Rozdział 4** (25 stron) – to już bezpośrednia astrosejsmologia – modelowanie gwiazd RR Lutni z dodatkowymi obserwowanymi sygnałami nieradialnych pulsacji z charakterystycznymi stosunkami okresu dodatkowego sygnału i okresu pierwszego owertonu z przedziału 0.60-0.65 (gwiazdy RR_0.61). Henryka Netzel od razu zaznacza, ze to jest pierwsze takie modelowanie w literaturze. Zostały wybrane gwiazdy, pulsujące jednocześnie w trzech modach, a mianowicie, gwiazdy RRc (pierwszy owerton radialnych pulsacji) z dwoma dodatkowymi nieradialnymi sygnalami w widmie częstotliwości oraz gwiazdy RRd (fundamentalny mod i pierwszy owerton radialnych pulsacji) z dodatkowym nieradialnym sygnałem. Ogólna liczba wybranych gwiazd RR_0.61 jest następująca: 45 gwiazd RRc i 14 gwiazd RRd. Podkreślę, że większość z nich została wykryta przez Henrykę Netzel. Ze strony teoretycznej podstawą modelowania była już wspomniana hipoteza Prof. Dziembowskiego, że dodatkowe sygnały pochodzą od harmonik złapanych w otoczce gwiazdy modów stopnia 8 albo 9, więc Henryka Netzel policzyła ogromną siatkę (2 miliony!) modeli gwiazd typu RR Lyr roznej masy, efektywnej temperatury, jasności i metaliczności, i dla każdego modelu policzyła radialne i nieradialne pulsacje, porównując z charakterystycznym obserwowanymi sygnałami i tym samym wybierając odpowiednie modele. Dla 42 z 45 gwiazd RRc i dla 11 z 14 gwiazd RRd udało się z bardzo wysoka dokładnością osiągnąć dopasowanie okresów obserwowanych i teoretycznych pulsacji i tym samym wyznaczyć podstawowe parametry fizyczne tych gwiazd. Szczególnie ważnym jest wyznaczenie mas - faktycznie na podstawie obserwacji, dla gwiazd typu RR Lutni to zrobiono w ogóle po raz pierwszy! Dla kilku gwiazd nie udało się bardzo dokładnie dopasować modele, i Henryka Netzel starannie przedyskutowała i wyjaśniła wszystkie te przypadki.

Rozdział 4 zrobił na mnie największe wrażenie nie tylko z powodu ogromu i staranności pracy Henryki Netzel, ale również dlatego, ze te wyniki są faktycznie potwierdzeniem oryginalnej i, moim zdaniem, bardzo nietrywialnej hipotezy Prof. Dziembowskiego o naturze dodatkowych sygnałów w widmach częstotliwości - jako nieradialnych pulsacji dość wysokiego stopnia.

Jednocześnie, **moi uwagi dotyczą akurat tego rozdziału**. Kod komputerowy, który był wykorzystany przy modelowaniu gwiazd typu RR Lutni i ich pulsacji, to jest program modelowania otoczki (zewnętrznych warstw) gwiazdy i obliczenia radialnych i nieradialnych pulsacji gwiazdy z taką otoczka. O ile w tym kodzie nie ma żadnego zszycia modelu z

warunkami centralnymi w gwieździe i nie uwzględnione są reakcje jądrowe we wnętrzu oraz inny skład chemiczny w takich bardzo głębokich warstwach, to najbardziej wiarygodne dane o pulsacjach takiego modelu otrzymujemy dla pulsacji radialnych (dane zarówno o okresach jak i o wzbudzaniu radialnych modów) oraz dla modów nieradialnych, efektywnie złapanych w otoczce. I nawet w tych przypadkach przy bardzo dokładnym porównaniu wyników teoretycznych z danymi obserwacyjnymi trzeba być pewnym, ze teoretyczne wyniki są numerycznie stabilne w stosunku do warunków na dolnej granice policzonego modelu otoczki, tzn. policzona otoczka jest wystarczająco głęboka. Sadze, ze Henryka Netzel przetestowała co najmniej kilka swoich modeli pod tym kątem, ale w rozprawie nie ma o tym wzmianki. Inna niepewność wyników teoretycznych przy bardzo dokładnym porównaniu z danymi obserwacyjnymi polega na wyborze wartości głównego parametru teorii konwekcji – wielkości parametru tak zwanej drogi mieszania. Klasyczny pas pulsujących gwiazd na diagramie HR leży akurat w tym zakresie efektywnych temperatur, gdzie konwekcja w zewnętrznych warstwach gwiazd przechodzi od nieefektywnej w pobliżu niebieskiej granicy pasa do efektywnej w pobliżu czerwonej granicy pasa i ma wpływ na strukturę zewnętrznych warstw (a znaczy, i na oscylacje) faktycznie dla wszystkich gwiazd w pasie niestabilności. Henryka Netzel przyjęła wartość parametru drogi mieszania na podstawie kalibracji słonecznej. Ale gwiazdy RR Lutni są znacznie gorętsze od Słońca, efektywność konwekcji w nich jest inna, i warto sprawdzić czułość modelowania gwiazdy i jej oscylacji nie tylko ku samej temperaturze efektywnej (to się robi automatycznie, gdy przechodzimy od modelu do modelu), ale i ku wyboru wspomnianego parametru. Ten wybór może mieć znaczący wpływ zarówno na okresy oscylacji, jak i na ich wzbudzanie. Dla niektórych dobrze zbadanych gwiazd w pasie niestabilności te oceny istnieją – na przykład, w gwieździe FG Vir (typu Delta Scuti) konwekcja jest najprawdopodobniej zupełnie nieefektywna i może być opisana w ramach teorii drogi mieszania z parametrem bliskim zera, a nie 1.5-2, jak dla Słońca. Sadze, ze Henryka Netzel przy konstruowaniu jej niewiarygodnej ilości modeli nie robiła podobnych testów (w rozprawie nie ma informacji o tym), ale to trzeba mieć na uwadze w przyszłych badaniach poszczególnych gwiazd. Wcale nie wykluczam, ze wyjątkowo ciekawe ogólne wnioski Henryki Netzel – np. o tym, ze masy „jej" gwiazd są nieco wyższe, a jasności – nieco niższe, niż oszacowania na podstawie teorii ewolucji gwiazd – zostaną potwierdzone w przyszłych badaniach. I, być może, teoria gwiezdnej ewolucji będzie potrzebowała istotnych korekt, choćby dla mnóstwa gwiazd typu RR Lutni.

Rozdziały 5 (11 stron) i **6** (16 stron) poświęcone są wielomodalnym gwiazdom typu Delta Scuti, pulsującym jednocześnie w co najmniej dwóch modach radialnych. Znów, jak i przypadku gwiazd RR Lutni, Henryka Netzel wykorzystała dane fotometryczne OGLE dla zgrubienia centralnego Galaktyki. Z ponad 10 tysięcy gwiazd zmiennych, sklasyfikowanych w tych polach obserwacji jako gwiazdy typu Delta Scuti, Henryka Netzel za pośrednictwem swojego automatyzowanego podejścia wybrała około 3300 gwiazd, pulsujących w co najmniej dwóch modach i dla których dwie częstotliwości tworzą stosunek 0.75-0.82, odpowiadający dwom sąsiednim modom radialnym: modu fundamentalnemu i pierwszemu owertonu albo pierwszemu i drugiemu owertonom. Zatem za pośrednictwem diagramów Petersena dla każdej gwiazdy i w oparciu na istniejące wyniki Pawła Pietrukowicza i innych (dla znacznie mniej licznej grupy gwiazd z dysku galaktycznego) wybrano gwiazdy, odpowiadające ciągom stosunków okresów modów radialnych. I z grupy około 3000 gwiazd Henryka Netzel wstępnie wybrała dla modelowania 428 gwiazd, pulsujących jednocześnie minimum w trzech radialnych modach (414 – w trzech przy ich różnej kombinacji iż czterech niższych modów, i 14 – w czterech modach F+1O+2O+3O). Modele gwiazd byli policzone z pomocą najbardziej współczesnego i stale rozwijającego ewolucyjnego kodu MESA w wersji, jak podaje Henryka Netzel, *„do liczenia ewolucji gwiazd pojedynczych, które są*

małomasywne i znajdują się na ciągu głównym lub są krótko po odejściu od ciągu głównego". Oswojenie tego kodu i jego bardzo aktywne wykorzystanie odnoszę do jednego z wielu osiągnieć Henryki Netzel (przyznam się, ze osobiście do tej pory przy badaniu i modelowaniu gwiazd pulsujących opieram się na programach komputerowych, napisanych wiele lat temu przez Profesorów Bohdana Paczyńskiego i Wojciecha Dziembowskiego). Przyjmując bardzo mocne ograniczenie na dopasowanie obserwowanych i wyliczonych okresów pulsacji, Henryka Netzel skróciła liczbę zmodelowanych gwiazd z 428 do 175, i lista wyznaczonych parametrów fizycznych tych gwiazd została przedstawiona w rozprawie w Dodatku B. W przyszłych badaniach indywidualnych gwiazd z tej listy, tak samo jak w przypadku zmodelowanych gwiazd RR_0.61, dane Henryki Netzel będą bardzo przydatne przy konstruowaniu bardziej wyrafinowanych modeli.

Rozdział 7 (5 stron) – to zwięźle podsumowanie głównych wyników i wniosków pracy, (zresztą, napisane lepiej od mojego opisu rozprawy, przedstawionego powyżej).

Oprócz zaznaczonych powyżej uwag, dotyczących modelowania gwiazd RR_0.61, nie mam żadnych innych zastrzeżeń do przedstawionej rozprawy, która uważam za wyjątkowo dobrą zarówno pod katem wykonanej gigantycznej pracy, jak i bardzo ciekawych i przekonywujących wyników.

Jako zupełnie drobną uwagę podam fakt, ze Henryka Netzel, mówiąc o częstotliwościach pulsacji, prawie zawsze wykorzystuje słowo *„częstość"*, przy czym tuż obok to samo słowo może zostać wykorzystane w innym sensie – jako „wielokrotność". Przykład – co prawda, bardzo rzadki(!), na stronie 105: *„wprowadza dodatkowy szum do widm częstości"* w pierwszym akapicie rozdziału 5.1.1 i *„szeregi czasowe gwiazd różnią się częstością obserwacji"* w drugim akapicie. A zdąża się, że na tej samej stronie fizyczny termin istnieje zarówno jak *„częstość"* i *„częstotliwość"*. Oto na stronie 1: pierwszy akapit – *„częstość"*, trzeci akapit – *„częstotliwość"*. Ale to da się spotkać w tekście rozprawy bardzo rzadko, prawie wszędzie używanym fizycznym terminem jest *„częstość"* (u mnie w recenzji – *„częstotliwość"*: kto już do czego jest przyzwyczajony). Czasem w tekście (tez bardzo rzadko!) wykorzystywane są żargonizmy, na przykład, *„modelowanie fizyki we wnętrzach"* (strona 12), *„okresy pulsacji są liniowe"* (strona 13).

Jeśli zupełnie krótko, głównymi ogólnymi zaletami pracy Henryki Netzel są: 1) wykrycie mnóstwa nowych gwiazd znanych typów, przy tym z konkretnymi osobliwościami pulsacji, które wcześniej wydawały się rzadkimi albo nawet egzotycznymi, a okazały się bardzo rozpowszechnionymi i bardzo ważnymi dla astrosejsmologii, 2) automatyzacja badań, co zezwoliło nie tylko odkryć mnóstwo wspomnianych gwiazd pulsujących, ale i wyznaczyć ich parametry fizyczne metodami astrosejsmologii, 3) faktycznie, testowanie istniejącej teorii ewolucji gwiazd kilku typów na podstawie modelowania astrosejsmologicznego. Moim zdaniem, nikt wcześniej nie był w stanie zrobić podobne badania, dlatego charakteryzuję rozprawę doktorską Henryki Netzel jako pionierską.

Rozprawa doktorska Henryki Netzel z dużym nadmiarem spełnia wszystkie wymagania ustawowe i zwyczajowe i jak najbardziej zasługuje na wyróżnienie. Wnoszę o dopuszczenie Pani Henryki Netzel do publicznej obrony przedstawionej pracy.

Prof. dr hab. Aleksiej Pamiatnych
Centrum Astronomiczne im. M. Kopernika
Warszawa, 11 września 2021 r.