

**Ocena rozprawy doktorskiej mgr. Dawida Moździerskiego  
pt. „Astroseismologia zespołowa młodych gromad otwartych”**

Praca Dawida Moździerskiego dotyczy poszukiwania i detekcji gwiazd pulsujących w czterech młodych gromadach otwartych (NGC 457, IC 4996, IC 1805, NGC 6910) i kompleksowej (tak zwanej zespołowej) sejsmologicznej analizy dziewięciu gwiazd w jednej z tych gromad – NGC 6910.

Uważam ten temat za wyjątkowo aktualny i potencjalnie bardzo obiecujący zarówno dla wyznaczenia wieku i innych parametrów gwiazdnych gromad jak i dla lepszego zrozumienia ewolucji gwiazd i procesów fizycznych w ich głębokich wnętrzach. Całkiem logiczną jest sugestia, że gwiazdy wybranej młodej gromady otwartej mają jednakowy wiek i skład chemiczny oraz znajdują się w jednakowej odległości od obserwatora. To znacznie ogranicza możliwości manipulowania globalnymi charakterystykami gwiazd, kiedy staramy się uzgodnić spowodowane pulsacjami obserwowane częstotliwości zmian blasku i innych parametrów z teoretycznymi wartościami dla odpowiednich modeli. I jeśli dla różnych pulsujących gwiazd w gromadzie mamy systematyczną rozbieżność między teorią a obserwacjami (np. nie możemy z teorii wzbudzić oscylacje w pewnym zakresie częstotliwości, które jednak pokazują się w obserwacjach), to oznacza, że coś jest nie uwzględniono w naszych modelach, np. w procesach transferu energii z centrum ku powierzchni gwiazdy czy w procesach mieszania materii. Właśnie astroseismologia daje możliwość sondowania wnętrza gwiazd, tak samo, jak sejsmolodzy sondują wnętrza Ziemi na podstawie pomiarów częstotliwości fal, rozchodzących się w skorupie ziemskiej po jej trzęsieniach.

Przedstawiona rozprawa składa się z czterech rozdziałów, z których pierwszy i ostatni są odpowiednio wprowadzeniem w temat i podsumowaniem wyników. Bardzo obszerna bibliografia obejmuje 253 prace, a ogólna objętość pracy wynosi 132 strony.

**Rozdział 2** (39 stron, 24 wykresy) poświęcony jest poszukiwaniu gwiazd zmiennych w gromadach NGC 457, IC 4996 i IC 1805. Imponujące są osiągnięcia autora: w polu gromady NGC 457 wykryto 79 gwiazd zmiennych, w tym 66 wcześniej nieznanych, w IC 4996 – 82, w tym 73 wcześniej nieznanych, w IC 1805 – 61, w tym 57 wcześniej nieznanych. To znaczy, w tych trzech młodych gromadach liczba znanych na dzień dzisiejszy gwiazd zmiennych dzięki badaniom autora zwiększyła się ponad ośmiokrotnie (z 26 do 222)! Z tymi danymi już pojawia się możliwość wyznaczenia empirycznych obszarów niestabilności na diagramach HR i na innych diagramach dla odpowiedniego składu chemicznego.

Fotometria gromady **NGC 457** została przeprowadzona w trzech seriach obserwacji na 60-cm teleskopach z kamerami CCD w obserwatoriach w Ostrowiku i Białkowie. Łącznie uzyskano ponad 4500 obrazów przeważnie centralnej części gromady z 2940 gwiazd w obserwowanym polu i w trzech filtrach B, V i I\_C systemu Johnson-Kron-Cousins. Dla redukcji obserwacji (wyznaczenia jasności wszystkich gwiazd na każdym z CCD-obrazów) autor wykorzystał pakiet DAOPHOT II. Nie jestem znawcą obserwacji, dlatego niektóre stwierdzenia autora wydają się mi niezbyt zrozumiałymi, warto byłoby ich uzasadnić jawnie albo dać konkretne referencje – na pewno, wszystko się znajdzie w obszernej bibliografii rozprawy albo nawet w podręcznikach. Np. dlaczego jasność nierozdzielonych układów podwójnych jest „większa o ok. 0.753 mag względem pojedynczych gwiazd jednakowej masy” (str. 22) – sądzę, że po prostu z powodu podwojenia jasności, ale ja bym napisał to jawnie. Dalej na wspomnianej

stronie 22 podane są wartości  $[Fe/H] = -0.46$  i  $[M/H] = -0.43$ , co spowodowało wykorzystanie „izochron o dwóch metalicznościach: słonecznej  $Z = 0.017$  i  $Z = 0.006$ ”. Warto byłoby wskazać źródło tej słonecznej wartości oraz wartości  $[Fe/H]$  i  $[M/H]$ , w których też występują wyznaczenia dla Słońca (czy one odpowiadają  $Z = 0.017$ ?), i również wskazać sposób transformacji między  $[Fe/H]$  a  $Z$ . Mi się wydaje, że na dzień dzisiejszy wartość  $Z$  dla Słońca jest około 0.012, a nie 0.017. To nic nie zmieni w wynikach jakościowo, ale jednak ilościowo nieco zmieni wiek i odległość gromady.

Oprócz tak szczegółowej fotometrii gromady NGC 457 autor (być może, z kimś z kolegów) przeprowadził obserwacje spektroskopowe w ciągu dwóch nocy na 3.5-metrowym teleskopie Apache Point Observatory w stanie New Mexico w USA. Dla kilku gwiazd udało się wyznaczyć efektywne temperatury i prędkości rotacji  $V \cdot \sin(i)$ .

W podrozdziale 2.1.4 autor szczegółowo omówił tryb przeglądu i analizy poszukiwanej zmienności gwiazd. W rezultacie udało się wykryć, jak już wspomniano wyżej, 79 gwiazd zmiennych i w różnym stopniu pewności sklasyfikować ich na podstawie okresowości, położenia na fotometrycznych diagramach, kształtu krzywych blasku i t.d. Największy interes dla przyszłej asterosejstologii tej gromady tworzą, moim zdaniem, wielookresowe zmienne pulsujące typu B - gwiazdy typu Beta Cep (wykryto jedną) i SPB których wykryto ponad 20 – prawdopodobnie, najwięcej wśród gwiazd tego typu w jednej gromadzie!

Przedstawione wyniki badania gromady NGC 457 zostały opublikowane w obszernym artykule w Acta Astronomica, przy czym Dawid Moździerski jest pierwszym z pięciu współautorów. Chciałbym podkreślić, że w specjalnym odsyłaczu w rozprawie on konkretyzuje swój udział w tej pracy (i ten udział jest wiodący).

Analogicznie temu jak wykonano poszukiwanie gwiazd pulsujących w NGC 457, autor na podstawie własnych obserwacji fotometrycznych (prawdopodobnie, we współpracy z kolegami) przeprowadził badania młodych gromad IC 4996 i IC 1805. Wszystkie obserwacje wykonano w Białkowie.

W obserwowanym polu gromady **IC 4996** zarejestrowano 7281 gwiazd, w każdym z trzech filtrów otrzymano około 2500 obrazów. Wykryto zmienność 82 gwiazd, w tym dwie nowe gwiazdy pulsujące typu Beta Cep i 7 gwiazd typu SPB (wszystkie one są wielookresowe, przy czym w jednej z gwiazd wykryto dwie częstotliwości około 5 c/d, ta częstotliwość leży między charakterystycznymi bardziej wysokimi częstotliwościami typu Beta Cep i niższymi charakterystycznymi częstotliwościami typu SPB), oraz 8 gwiazd typu Delta Sct. Dla wielu innych jednookresowych gwiazd ich zmienność spowodowana jest najprawdopodobniej plamami na powierzchni.

W obserwowanym przez dwa sezony polu gromady **IC 1805** zarejestrowano 1511 gwiazd, wśród nich wykryto 61 zmiennych, w tym dwie pulsujące gwiazdy typu Beta Cep (jedna z nich demonstruje również długookresowe pulsacje typu SPB, tzn. należy do hybrydów Beta Cep/SPB) i trzy gwiazdy typu Delta Sct. Wiele gwiazd charakteryzuje się nieregularnymi zmianami blasku.

**Rozdział 3** (52 strony, 41 wykresów) jest głównym w pracy i jest poświęcony rzeczywiście asterosejstologii zespołowej, jak podano w tytule rozprawy. Na początku rozdziału przedstawiono wyniki międzynarodowej kampanii obserwacyjnej z lat 2005-2007, przeprowadzonej na 14 obserwatoriach, w tym w Białkowie. Zostało wykryto 9

wielookresowych gwiazd typu Beta Cep (kilka z nich najprawdopodobniej są hybrydami Beta Cep/SPB). W roku 2013 autor (być może, przy udziale kolegów, z tekstu podrozdziału 3.2.2 tego się nie dowiedziałem) wykonał nowe obserwacje gromady w Białkowie oraz spektroskopowe obserwacje jednej gwiazdy pulsującej, NGC6910-18, w Apache Point Observatory w New Mexico w celu uzyskania zmian prędkości radialnej, co jest bardzo ważne dla identyfikacji modów pulsacji. Nowe obserwacje potwierdziły istnienie niektórych częstotliwości, wykrytych w bardziej szczegółowej kampanii 2005-2007 oraz wykryły znaczącą zmianę amplitud pulsacji dwóch gwiazd.

**Podrozdział 3.3** jest poświęcony obserwacjom spektroskopowym pięciu z dziewięciu badanych gwiazd pulsujących i wyznaczeniu parametrów atmosferycznych (temperatury efektywnej i przyspieszenia grawitacyjnego) wszystkich dziewięciu gwiazd (przy czym dla czterech gwiazd, dla których nie ma danych spektroskopowych, wyniki otrzymano z kalibracji fotometrycznych). Dane spektroskopowe pochodzą z trzech obserwatoriów – w USA, na Wyspach Kanaryjskich i we Francji. Z tekstu i z tabeli obserwacji wnioskuję, że autor uczestniczył w obserwacjach amerykańskich w 2013 roku, a dane Kanaryjskie i francuskie pochodzą z kampanii 2005-2007.

Bezpośrednio asterosejsmologii zespołowej gwiazd typu Beta Cep w gromadzie NGC 6910 poświęcony jest **Podrozdział 3.4** (34 strony, 30 wykresów). Autor wykorzystuje następujące podejście, krok po kroku: 1) identyfikacja modów z fotometrii i spektroskopii, 2) konstruowanie modeli gwiazd z identyfikowanymi modami pulsacji w obszarze „pudełka błędów” temperatury efektywnej i przyspieszenia grawitacyjnego tych gwiazd, 3) wyznaczenie wieku gromady z pomocą izochron, policzonych dla różnych wartości tak zwanego przestrzeliwania konwektywnego, 4) wyznaczenie czy uściślenie globalnych parametrów gwiazd z ustalonym poprzednio wiekiem (to może być wybór wśród wielu już policzonych ewolucyjnych modeli).

Dużo miejsca w rozprawie (22 z 34 stron całego podrozdziału!) autor poświęcił identyfikacji modów obserwowanych pulsacji w dziewięciu gwiazdach na podstawie danych fotometrii i spektroskopii i przy wykorzystaniu ewolucyjnych modeli gwiazd i modeli atmosfer gwiazdowych. Modele gwiazd i ich pulsacje zostały policzone autorem na podstawie odpowiednich kodów komputerowych (zmodyfikowane kody Prof. Bogdana Paczyńskiego i Prof. Wojciecha Dziembowskiego), stale używanych wśród badaczy gwiazd pulsujących w Warszawie i we Wrocławiu. Dla wszystkich badanych gwiazd autor wybrał jednakową początkową zawartość wodoru,  $X = 0.72$ , oraz jednakową zawartość pierwiastków cięższych od helu,  $Z = 0.014$ , z proporcjami kilkunastu poszczególnych ciężkich pierwiastków według Asplund et al. (2009). We wszystkich obliczeniach wykorzystano tablice nieprzezroczystości OPAL z Lawrence Livermore National Laboratory w USA. I dla wszystkich gwiazd przyjęto jednakową prędkość rotacji 170 km/s. Jedyнным zmiennym parametrem z tych wielkości, które wprowadzamy na początku obliczeń, autor wybrał parametr efektywności tak zwanego przestrzeliwania z konwektywnego jądra gwiazdy, co powoduje dodatkowe mieszanie materii we wnętrzu. Wybór tego parametru prawie nie wpływa na identyfikację modów, ale może znacząco zmienić ocenę wieku gromady. Jako modele atmosfer autor wykorzystał NLTE-modele Lanza i Hubenego (2007) dla słonecznej metaliczności (warto byłoby podać, jakiej konkretnie wartości, ponieważ ta standardowa wartość kilka razy się zmieniła na przestrzeni ostatnich 15-25 lat).

Od razu powiem, że przyjęte wartości wspomnianych globalnych parametrów czy dane fizyki atomowej ( $X$ ,  $Z$ , prędkość rotacji, dane o nieprzezroczystości) też mają znaczący wpływ na

wyniki analizy asterosejsmicznej i na ograniczenia, na przykład, wieku gromad. Efekt dopuszczalnych zmian tych wartości może być porównywalny albo nawet większy od efektu zmian parametru przestrzeliwania konwektywnego. Z powodów zrozumiałych (ogrom pracy!) autor zademonstrował efekt zmian tylko jednego parametru, i dlatego otrzymane wyniki i ilościowe ograniczenia wieku gromady NGC 6910 są raczej **demonstracją potencjału asterosejsmologii** w badaniu gwiazd gromad otwartych i w wyznaczeniu parametrów samych gromad. To jest jeden z pierwszych poważnych kroków w prawdziwym sejsmicznym sondowaniu wnętrza gwiazd.

Wyniki fotometrycznej i spektroskopowej identyfikacji modów autor przedstawił na wielu rysunkach i posumował w tablicy 3.5, z której wyraźnie widać, że z 42 obserwowanych częstotliwości dla 9 gwiazd definitywną identyfikację uzyskano zaledwie w kilku przypadkach. Być może, ten niezbyt optymistyczny wynik jest spowodowany brakiem danych spektroskopii o prędkościach radialnych, aby ich wykorzystać razem z danymi dwu- albo wielobarwnej fotometrii. Bardzo znaczące ulepszenie identyfikacji stopnia sferycznego modu przy wykorzystaniu danych o prędkościach radialnych zademonstrowaliśmy w pracy Daszyńskiej-Daszkiewicz, Dziembowskiego i Pamyatnykh z 2005 roku na przykładzie pulsującej gwiazdy Delta Cep - monoperiodycznej zmiennej typu Beta Cep. Dawid Możdziński w podobny sposób wykorzystał dane o prędkości radialnej razem z danymi fotometrii dla trzech głównych modów w gwiazdzie NGC6910-18 (Rys. 3.30), ale ta identyfikacja wygląda nawet gorzej niż identyfikacja z samej fotometrii (Rys. 3.16), ja tego nie rozumiem. Można byłoby również wyznaczyć z modelu gwiazdy rotacyjne rozszczepienie modu kwadrupolowego z częstotliwością około 6 c/d i porównać to rozszczepienie z różnicą między częstotliwościami  $f_2$  i  $f_3$ , zidentyfikowanymi jako odpowiadającymi właśnie modom kwadrupolowym.

Poszukiwanie modeli pulsacyjnych dla 9 gwiazd jako zespołu przeprowadzono w podrozdziale 3.4.4 z pomocą diagramów  $\log g - \log \text{Teff}$ . Naturalnie, punktem wyjściowym wybrano gwiazdę NGC6910-18 z pewną identyfikacją modu radialnego z częstotliwością 6.155 c/d. Ten mod niewątpliwie jest modem fundamentalnym, jak wynika z diagramu  $\log g - \log \text{Teff}$  na Rys. 3.33. Mam jednak kilka uwag co do samej metody.

Przedstawione podejście do uzyskania asterosejsmicznych ograniczeń na globalne parametry pulsujących gwiazd w gromadach i ograniczeń na główne charakterystyki samych gromad (przede wszystkim, chodzi o wiek gromady) nie jest jedynie możliwym i wyczerpującym. Wielką zaletą gwiazd gromady dla naszych badań jest to, że znana jest odległość obiektów, tym samym ich jasność – i dla porównania z modelami można wykorzystywać diagram HR dla danego składu chemicznego i innych zafiksowanych parametrów. Przyspieszenie grawitacyjne dla konkretnej gwiazdy wyznaczamy, szczególnie z kalibracji fotometrycznych (jeśli nie ma danych spektroskopowych), znacznie mniej dokładnie, niż jasność, oszacowaną ze znanej odległości. Przy czym na obydwóch diagramach (HR i  $\log g - \log \text{Teff}$ ) nasz model pulsacyjny dla modu radialnego z obserwowaną częstotliwością będzie przedstawiony kropką, a nie linią jak na Rys. 3.33. Dlatego nie rozumiem takich sformułowań jak na stronie 100: *„Modele pulsacyjne dla fl mieszczące się w pudełku błędów NGC6910-18 pozwalają ograniczyć wiek gromady na od 10.1 do 16 mln lat.”* Dodatkowe mocne ograniczenie wieku otrzymano dla gwiazdy NGC6910-14, i potem te ograniczenia wieku nałożono na pozostałe gwiazdy pulsujące z ich pudełkami błędów w  $\log g$  i  $\log \text{Teff}$ .

W rezultacie, na podstawie zespołowego podejścia bardzo dokładnie wyznaczono wiek gromady, istotnie sprecyzowano identyfikacje wielu modów i wyznaczono globalne

parametry wszystkich dziewięciu gwiazd. Te wyniki przedstawiono na wspólnym dla wszystkich dziewięciu gwiazd diagramie  $\log g - \log T_{\text{eff}}$  (Rys.3.41) i w dwóch tabelach (Tabele 3.6 i 3.7). Warto było by pokazać położenie tych modeli z Tablicy 3.7 na, być może, dodatkowym zmodyfikowanym Rysunku 3.41 – albo na nim bezpośrednio zamiast nieco innych modeli pulsacyjnych, wykreślonych tam kolorowymi kropkami.

Nie wykluczam, że przy danym wyborze parametrów składu chemicznego, rotacji i nieprzezroczystości materii gwiazdowej otrzymalibyśmy podobne wyniki przy wykorzystaniu diagramów HR zamiast diagramów  $\log g - \log T_{\text{eff}}$ , ale to wymaga dodatkowej dość czasochłonnej analizy. W następnych badaniach trzeba również oszacować wpływ dopuszczalnych zmian parametrów składu chemicznego, rotacji i nieprzezroczystości na oceny wieku gromad i na globalne parametry poszczególnych gwiazd pulsujących w takim zespołowym jednolitym podejściu. To da pewność w dalszych asterosejsmicznych badaniach, dotyczących skomplikowanych procesów fizycznych wewnątrz gwiazd.

Moim zdaniem, na przedstawioną pracę można patrzeć jako na jeden z pierwszych kroków w asterosejsmologii zespołowej gromad otwartych. W zbadanych przez autora gromadach wykryto mnóstwo nowych gwiazd zmiennych, wśród nich dużo wielookresowych pulsujących gwiazd, tym samym powstaje solidne uzasadnienie dla przeprowadzenia ich spektroskopowych badań w celu lepszego wyznaczenia globalnych parametrów oraz dla identyfikacji modów obserwowanych pulsacji.

[Uwaga niezbyt na serio: To będzie brzmiało mniej naukowo, być może trochę literacko, ale ja bym nazwał przedstawioną rozprawę nie „Asterosejsmologia zespołowa młodych gromad otwartych”, a „Na drodze ku asterosejsmologii zespołowej młodych gromad otwartych”. Zresztą, artykuł Saesen et al. z roku 2010 w *Astronomische Nachrichten* nosi tytuł „Towards ensemble asteroseismology...”. ]

Kompleksowe modelowanie pulsacji bardzo jednorodnej grupy gwiazd, należących do wybranej gromady, i porównanie z obserwacjami zarówno poszczególnych gwiazd jak i całej grupy (np. porównanie obserwowanych i teoretycznych obszarów niestabilności pulsacyjnej na różnych diagramach) zezwoli przetestować dane fizyki atomowej o nieprzezroczystości materii gwiazdowej czy reakcjach jądrowych oraz skomplikowane makroskopiczne procesy niejednorodnej rotacji i mieszania materii. Tylko asterosejsmologia daje możliwość prawdziwego sondowania gwiazdnych wnętrz. Co do samej wybranej gromady, to asterosejsmologia zespołowa, jak przykładowo zademonstrowano w pracy, zezwala istotnie polepszyć dokładność wyznaczenia głównych charakterystyk gromady, przede wszystkim jej wieku – tym samym mamy wzajemny wpływ globalnych danych o gromadzie (wiek, odległość, skład chemiczny) i asterosejsmicznych danych o należących do tej gromady gwiazdach pulsujących.

Z rozprawy wynika, że Dawid Moździerski pomimo niewątpliwie solidnego doświadczenia jako obserwatora opanował rozmaite metody i środki obróbki danych oraz skomplikowanych obliczeń komputerowych, wymienię tylko niektóre z nich: pakiety DAOPHOT II i IRAF dla redukcji obserwacji, zmodyfikowane kody dla obliczeń ewolucji gwiazd (B.Paczyński) i pulsacji gwiazd (W.Dziembowski), pakiet FAMIAS dla analizy częstotliwości i identyfikacji modów w danych spektroskopowych (W.Zima).

Oprócz mniej lub więcej merytorycznych uwag, porzucanych w danej recenzji, dodam kilka drobnych uwag, mających raczej redakcyjny charakter.

W pracach z nauk ścisłych przy napisaniu liczb z częścią dziesiętną stosuje się kropka, a nie przecinek, jak to zrobiono wszędzie w danej rozprawie – zarówno w tekście jak i w tabelach (patrz np. str. 109).

Obszerna bibliografia przygotowana jest bardzo starannie, znalazłem tylko kilka drobnych nieścisłości: w referencji Guetter and Vrba (1989) nie ma nazwy wydawnictwa (ma być „Astron. J.”), w referencji Zdravkov and Pamyatnykh (2008) pominięto stronę artykułu (ma być „012079, 1”, a nie „1”). Niekompletne są również referencje Handler (2013) i Movlavi et al. (2016).

Moim zdaniem, cała praca napisana jest bardzo starannie, jasnym językiem - i dlatego łatwo się czyta. W niej praktycznie nie ma błędów gramatycznych czy nawet literówek. Ilustracje z punktu widzenia graficznego przygotowane są po prostu idealnie, co robi jeszcze większe wrażenie podczas czytania odpowiednich fragmentów tekstu.

Co do listy publikacji Dawida Moździerskiego, ona wygląda dość skromnie. Według bazy danych ADS, Dawid Moździerski jest współautorem 5 prac, we wszystkich jest pierwszym autorem (w jednej pracy jest jedynym autorem). Jedną pracę wydrukowano w renomowanym czasopiśmie Acta Astronomica, jedną – w Astronomische Nachrichten, ale de facto to jest doniesienie konferencyjne jak i trzy inne publikacje. Nie wiem, jaki jest w tej chwili los głównej części rozprawy, dotyczącej asterosejsmologii gwiazd w NGC 6910.

Uważam, że rozprawa doktorska magistra Dawida Moździerskiego spełnia wymagania ustawowe i zwyczajowe i dlatego wnoszę o dopuszczenie magistra Dawida Moździerskiego do publicznej obrony przedstawionej pracy.



Prof. dr hab. Aleksiej Pamiatnykh  
Centrum Astronomiczne im. M. Kopernika PAN  
Warszawa, 30 listopada 2016 r.