

AUTOREFERAT

1. Imię i Nazwisko: **Radosław Smolec**
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.
 - a) magister, specjalność astronomia, Uniwersytet Warszawski, 17.06.2004; praca pt. “*Metaliczność gwiazd RR Lutni a Efekt Błazki*”, promotor prof. dr hab. Paweł Moskalik
 - b) doktor nauk fizycznych w zakresie astronomii, Centrum Astronomiczne im. Mikołaja Kopernika PAN, Warszawa, 25.09.2009; praca pt. “*Nonlinear Modeling of Radial Stellar Pulsations*”, promotor prof. dr hab. Paweł Moskalik
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych.
 - a) Centrum Astronomiczne im. M. Kopernika PAN, Warszawa, 2012–teanure-track, 2015–staż podoktorski, 2012–2015
 - b) Institute of Astronomy, University of Vienna, Wiedeń, Austria staż podoktorski, 2009–2011
4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):
 - a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego

Zjawiska dynamiczne w modelach i obserwacjach klasycznych gwiazd pulsujących

- b) autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa,
 - **H1.** Smolec, R., Soszyński, I., Moskalik, P., Udalski, A., Szymański, M.K., Kubiak, M., Pietrzyński, G., Wyrzykowski, L., Ulaczyk, K., Poleski, R., Kozłowski, S., Pietrukowicz, P., *Discovery of period doubling in BL Herculis stars of the OGLE survey. Observations and theoretical models*, 2012, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **419**, 2407–2423
 - **H2.** Smolec, R., Moskalik, P., *Period doubling and Blazhko modulation in BL Herculis hydrodynamic models*, 2012, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **426**, 108–119
 - **H3.** Smolec, R., Moskalik, P., *Chaos in hydrodynamic BL Herculis models*, 2014, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **441**, 101–115
 - **H4.** Smolec, R., Soszyński, I., Udalski, A., Szymański, M.K., Pietrukowicz, P., Skowron, J., Kozłowski, S., Poleski, R., Skowron, D., Pietrzyński, G., Wyrzykowski, L., Ulaczyk, K., Mróz, P., et al. *Blazhko-type modulation in the double-mode RR Lyrae stars of the OGLE Galactic bulge collection*, 2015, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **447**, 3756–3774

- **H5.** Smolec, R., *Survey of non-linear hydrodynamic models of type-II Cepheids*, 2016, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **456**, 3475–3493
- **H6.** Smolec, R., Śniegowska, M., *Non-radial pulsation in first overtone Cepheids of the Small Magellanic Cloud*, 2016, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **458**, 3561–3577

c) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Wprowadzenie – klasyczne gwiazdy pulsujące

Klasyczne gwiazdy pulsujące są gwiazdami zmiennymi, w których okresowe zmiany jasności o dużej amplitudzie, są wynikiem oscylacji radialnych. Oscylacje są wzbudzone w warstwach częściowej jonizacji wodoru i helu w wyniku działania mechanizmu nieprzezroczystości (np. Cox, 1980). Na diagramie Hertzsprunga-Russella (HR), gwiazdy te znajdują się wewnątrz tzw. klasycznego pasa niestabilności. Do grupy zaliczamy

- Cefeidy klasyczne (I populacji) – młode, masywne i bogate w metale gwiazdy, które przecinają ścieżkę niestabilności albo po wypaleniu wodoru w jądrze, podczas szybkiej ewolucji w stronę gałęzi czerwonych olbrzymów, albo paląc w swym jądrze hel, zakreślając na diagramie HR tzw. niebieską pętlę.

- Gwiazdy RR Lutni, starsze, małowymienne i typowo ubogie w metale. Po zapaleniu helu w zdegenerowanym jądrze ewoluują powoli w pobliżu przecięcia gałęzi horyzontalnej wieku zerowego (ZAHB) i klasycznej ścieżki niestabilności.

- Cefeidy II populacji (także cefeidy II typu); parametry fizyczne podobne do gwiazd RR Lutni. Po zapaleniu helu w jądrze znajdują się jednak na niebieskiej części ZAHB i ewoluując przecinają klasyczny pas niestabilności przy wyższych jasnościach i dłuższych okresach. W zależności od okresu pulsacji i fazy ewolucyjnej dzielimy je na trzy podgrupy: gwiazdy BL Her ($1 \lesssim P \lesssim 4$ d), gwiazdy W Vir ($4 \lesssim P \lesssim 20$ d) i wykazujące charakterystyczne alternacje w krzywych blasku, tzw. podwojenie okresu, gwiazdy RV Tau ($P \gtrsim 20$ d).

Klasyczne gwiazdy pulsujące są gwiazdami o bardzo dużym astrofizycznym znaczeniu. Dzięki znanej jasności absolutnej, określanej na podstawie relacji okres–jasność ($P - L$), są powszechnie wykorzystywane jako świece standardowe. Cefeidy klasyczne stanowią jeden z najważniejszych szczebli tzw. kosmicznej drabiny odległości. Z uwagi na mniejszą jasność i gorzej zdefiniowaną relację $P - L$, cefeidy II populacji są wykorzystywane w mniejszym stopniu. Gwiazdy RR Lutni doskonale sprawdzają się w badaniu struktury, kinematyki i ewolucji pobliskich układów gwiazdowych.

Klasyczne gwiazdy pulsujące są niezwykle interesujące również z uwagi na bogactwo obserwowanych form pulsacji. Dominują oscylacje jednookresowe, w radialnym modzie oscylacji, fundamentalnym (F) lub w pierwszym owertonie (1O). Pulsacje wielomodalne nie są jednak rzadkie, przy czym obserwujemy zarówno pulsacje w modach radialnych, jak i w kombinacji mod radialny i nieradialny. Ciekawe są rezonanse pomiędzy modami oscylacji i efekty dynamiczne, do których mogą prowadzić, np. tzw. progresja garbu, podwojenie okresu, czy oscylacje wielomodalne. Zjawiskiem niezwykle interesującym, bo ciągle niewyjaśnionym, jest efekt Błażki – kwazi-okresowa modulacja amplitudy i/lub fazy oscylacji, którą obserwujemy w znaczącej części gwiazd RR Lutni. Zasygnalizowane zjawiska dynamiczne są w centrum moich zainteresowań i im poświęcona jest większość moich opublikowanych prac, od pierwszej, powstałej na bazie pracy magisterskiej, w której badano wpływ metaliczności na występowanie efektu Błażki (Smolec, 2005), po ostatnią pracę, wchodzącą w skład osiągnięcia habilitacyjnego, w której badano własności cefeid owertonowych z wzbudzonym dodatkowym modem nieradialnym (Smolec & Śniegowska, 2016).

Zrozumienie złożonych zjawisk dynamicznych zachodzących w klasycznych gwiazdach pulsujących wymaga obszernych i doskonałej jakości danych obserwacyjnych oraz ich wnikliwej analizy. Źródłem tych danych są masowe przeglądy nieba, szczególnie zaś działający

już niemal 25 lat projekt *Optical Gravitational Lensing Experiment* (OGLE, np. Udalski, Szymański & Szymański, 2015), a w ostatnich latach również dane dostarczane przez teleskopy kosmiczne, *Kepler* i *CoRoT*. Dokładne poznanie własności obserwacyjnych gwiazd wykazujących określone zachowania dynamiczne, stanowi podstawę do próby wyjaśnienia i zrozumienia mechanizmów leżących u podstaw tych zachowań. Praca **H4** jest przykładem dogłębnej analizy obserwacji OGLE dla grupy gwiazd wykazujących nowo odkryte zjawisko – efekt Błażki w dwumodalnych gwiazdach RR Lutni. Praca **H6** to badanie własności cefeid klasycznych obserwowanych przez projekt OGLE wykazujących inny efekt dynamiczny: pulsacje dwumodalne z wzbudzonymi modami nieradialnymi. Wykonana analiza fotometrii tych gwiazd dostarcza silnych argumentów na poparcie nowego modelu identyfikującego dodatkowe mody. Pozostałe prace w zgłoszonym osiągnięciu mają jednak naturę teoretyczną. Praca **H1** przedstawia wyniki modelowania pierwszej gwiazdy typu BL Her z podwojeniem okresu, odkrytej w obserwacjach OGLE. Kolejne dwie prace to badanie intrygujących zjawisk dynamicznych wykrytych w modelach gwiazd typu BL Her: modulacji pulsacji, jakościowo przypominającej efekt Błażki znany z jednomodalnych gwiazd RR Lutni (praca **H2**) oraz deterministycznego chaosu (praca **H3**). Praca **H5** stanowi natomiast szeroki przegląd modeli cefeid II populacji i wskazuje na możliwość występowania nowych zjawisk dynamicznych w tych gwiazdach.

W czterech pracach podstawowym narzędziem badań są kody pulsacyjne. Używane były kody w znaczącej części napisane przeze mnie, w trakcie studiów doktoranckich. Dlatego następny punkt poświęcony jest nieco szerszemu przedstawieniu tych programów i ich aspektów istotnych dla omawianych w dalszej części prac.

Narzędzia do modelowania pulsacji gwiazd

W 2004 roku rozpocząłem studia doktoranckie w Centrum Astronomicznym im. M. Kopernika w Warszawie, pod kierunkiem prof. dr hab. Pawła Moskalika. Celem zaproponowanego projektu było nieliniowe modelowanie dwumodalnych cefeid poprzedzone rozwojem niezbędnych narzędzi czyli kodów pulsacyjnych.

Pierwsze nieliniowe kody pulsacyjne, umożliwiające modelowanie krzywych blasku i prędkości radialnych, powstały w latach sześćdziesiątych (np. Christy, 1966). Na kody składają się zwykle dwa (lub trzy) odrębne programy/procedury. Pierwszy program konstruuje statyczny model gwiazdy, zaś kolejny przeprowadza liniową, nieadiabaticzną analizę stabilności. Wynikiem analizy liniowej są okresy oscylacji modów i ich tempa narastania określające, czy dany mod jest samowzbudzony, czy też tłumiony. Ostatnim programem jest kod nieliniowy, w którym model statyczny zaburzamy; następnie równania hydrodynamiki są całkowane w czasie aż do osiągnięcia ustalonej formy pulsacji, np. jednookresowego cyklu granicznego, pulsacji dwumodalnych, pulsacji modulowanych czy chaotycznych.

Opisywane kody są jednowymiarowe, umożliwiają więc modelowanie wyłącznie oscylacji radialnych. Pierwsze kody były promieniste; zaniedbywały transport energii na drodze konwekcji. Kod promienisty najszerszej wykorzystywany w badaniu klasycznych gwiazd pulsujących napisał Stellingwerf (1975). Przy użyciu kodów promienistych nie udało się jednak uzyskać pulsacji dwumodalnych. Pierwszy prosty model pozwalający uwzględnić transport konwektywny w nieliniowych kodach pulsacyjnych zaproponował Stellingwerf (1982). Jest on podstawą kodu współcześnie używanego przez grupę włoską (np. Bono

& Stellingwerf, 1994). Niestety, ten model również nie pozwala na modelowanie pulsacji dwumodalnych. Nieco inny model konwekcji zaproponowano w pracy Kuhfuß (1986). Włączenie tego modelu do kodu znanego w literaturze jako kod Florida-Budapest, przyniosło oczekiwany sukces – uzyskano stabilne pulsacje dwumodalne zarówno w modelach cefeid jak i gwiazd RR Lutni (np. Kolláth et al., 2002). Naturalnym więc było wykorzystanie modelu Kuhfußa w nowych kodach, które zostały napisane na bazie promienistych kodów Stellingwerfa. Implementacja konwekcji w praktyce wymusiła niemal całkowite przepisanie kodu liniowego oraz znaczące modyfikacje kodu nieliniowego (Smolec & Moskalik, 2008a). Niestety, z pomocą nowego kodu nie uzyskano oscylacji dwumodalnych. Wyjaśnienie przyczyny jest, obok napisania nowych konwektywnych kodów pulsacyjnych, głównym wynikiem doktoratu¹ (Smolec & Moskalik, 2008b). Pokazałem, że w kodzie Florida-Budapest zmodyfikowano model Kuhfußa przez zaniedbanie siły wyporu w obszarach konwektywnie stabilnych. Ogranicza to trudności numeryczne w modelu (strome gradienty energii turbulentnej), jednak prowadzi do znacznego zwiększenia obszaru przestrzeliwania konwektywnego i jest przyczyną dwumodalności. Poprawne traktowanie siły wyporu sprawia, że pulsacji dwumodalnych (nieresonansowych) nie uzyskujemy, podobnie jak to ma miejsce przy implementacji modelu Stellingwerfa w kodzie włoskim.

Pomimo braku możliwości modelowania oscylacji dwumodalnych cefeid i gwiazd RR Lutni, możliwości kodów pulsacyjnych trudno przecenić. Doskonale nadają się do modelowania gwiazd jednookresowych, zjawisk rezonansowych (progresja garbu, podwojenie okresu, rezonansowe pulsacje wielomodalne) i innych zjawisk dynamicznych (oscylacje modulowane, chaos deterministyczny).

Model Kuhfußa jest modelem prostym, jednowymiarowym, w którym generację energii turbulentnej opisuje jedno równanie. Taka forma modelu umożliwia jego praktyczne zastosowanie w kodach nieliniowych; jej uzyskanie wymaga jednak poczynienia uproszczających założeń, w wyniku których wielkości typu strumień konwektywny, strumień turbulentny, ciśnienie turbulentne, itp. są określone z dokładnością do parametru skalującego. Model Kuhfußa zawiera osiem takich parametrów. Tak zwane wartości standardowe tych parametrów wynikają z porównania modelu ze standardową teorią drogi mieszania. W praktyce, są to wolne parametry, których wartości wpływają na własności modeli. Staramy się je tak dobierać, by odtworzyć obserwowane zjawiska. Nie jest jednak możliwa uniwersalna kalibracja modelu; własności konwekcji mogą być różne w różnych grupach gwiazd, a nawet zmieniać się wewnątrz konkretnej grupy. Model jest też prosty i jedynie w przybliżony sposób opisuje niezwykle skomplikowany, zachodzący w trzech wymiarach i wielu skalach czasowych i przestrzennych proces turbulentnej konwekcji. Dlatego ważne są badania parametryczne, w których badane są efekty zmiany konkretnego parametru modelu. Badania pokazują, że największy wpływ na dynamikę modeli ma parametr określający lepkość turbulentną (*eddy-viscosity*), α_m , fakt również znany z modelowania promienistego, w którym podobną rolę pełni tzw. sztuczna lepkość (np. Kovács & Buchler, 1988a).

¹Rozprawa doktorska jest dostępna na stronie http://users.camk.edu.pl/smolec/phd_smolec.pdf.

Zjawiska dynamiczne w modelach i obserwacjach klasycznych gwiazd pulsujących

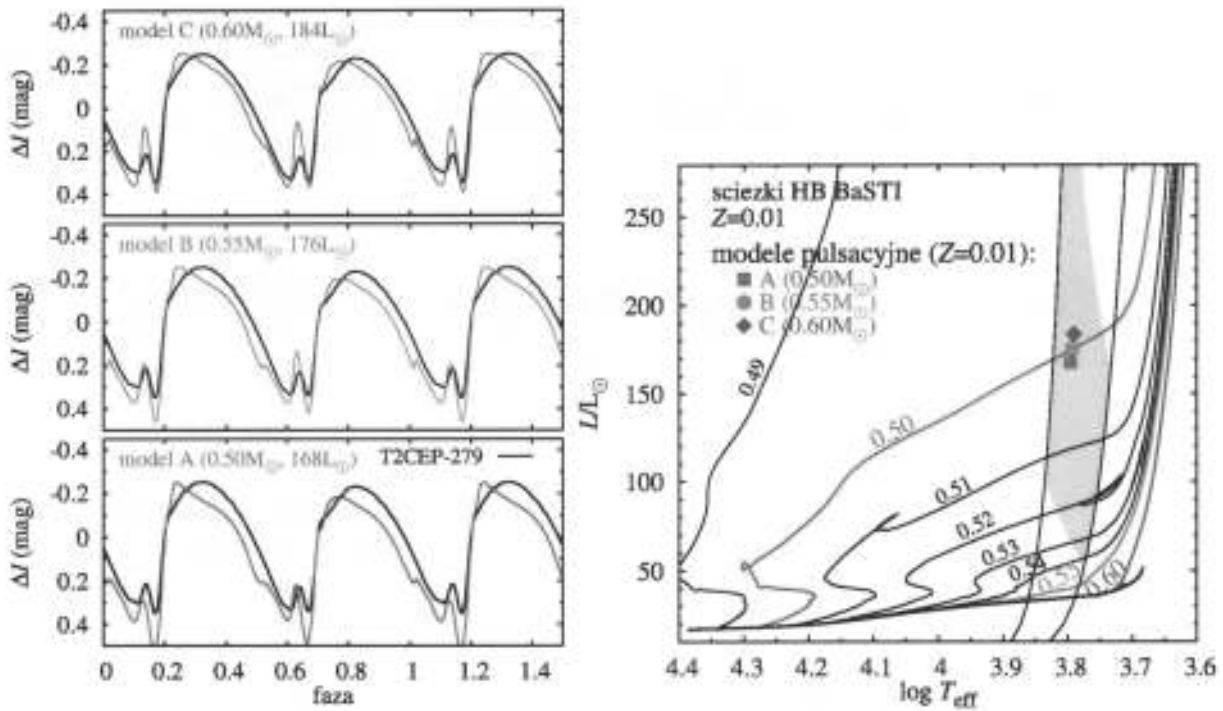
Modele hydrodynamiczne gwiazd pulsujących czasami wykazują zachowania nieoczekiwane – nieznanne z obserwacji tych gwiazd. W 1992 roku Buchler i Moskalik policzyli serię promienistych modeli hydrodynamicznych odpowiadających gwiazdom typu BL Her (Buchler & Moskalik, 1992). W modelach o okresach pulsacji $2 < P < 2.6$ d zaobserwowali zjawisko podwojenia okresu, doskonale znane z obserwacji gwiazd RV Tau o okresach znacznie dłuższych. Przyczyną podwojenia okresu jest rezonans połówkowy pomiędzy radialnymi modami pulsacji, co pokazali Moskalik & Buchler (1990). Dla gwiazd RV Tau jest to rezonans typu 5:2, $5\nu_F = 2\nu_{20}$, zaś dla modeli BL Her rachunki promieniste wskazywały na kluczową rolę rezonansu 3:2, $3\nu_F = 2\nu_{10}$. Zjawisko podwojenia okresu pojawiło się w kilku ciągach modeli BL Her, a jego obecność nie była uzależniona od szczegółów numerycznych, takich jak rozmiar siatki czy długość kroku czasowego. Dlatego Buchler i Moskalik stwierdzili, że zjawisko powinno również występować w gwiazdach. W tym czasie obserwacje cefeid II populacji były skąpe i nie najlepszej jakości. Sytuacja zmieniła się wraz z regularnym monitorowaniem rozległych obszarów nieba przez projekt OGLE. Wśród 156 gwiazd typu BL Her zidentyfikowanych w zgrubieniu centralnym Galaktyki, w jednym obiekcie, OGLE-BLG-T2CEP-279 (dalej T2CEP-279), o okresie pulsacji $P \approx 2.4$ d, podwojenie okresu jest bardzo wyraźne (Soszyński et al., 2011b, słabszy efekt jest prawdopodobnie obecny w jeszcze jednej gwiazdzie). Szczegółowa analiza gwiazdy T2CEP-279² została wykonana w pracy Smolec et al. (2012), H1. W pracy tej prof. dr hab. Paweł Moskalik wykonał analizę obserwacji, natomiast ja wykonałem modelowanie jedynej jak dotąd gwiazdy BL Her z podwojeniem okresu. Celem modelowania było: (i) odtworzenie zjawiska przy użyciu współczesnego kodu pulsacyjnego, z wykorzystaniem nowych tablic nieprzezroczystości³ oraz uwzględniającego transport energii na drodze konwekcji; (ii) sprawdzenie, czy także w przypadku modeli konwektywnych rola rezonansu 3:2 jest kluczowa; (iii) jak najlepsze wymodelowanie krzywej blasku T2CEP-279, tym samym próba oszacowania astrofizycznych parametrów gwiazdy.

Modelowanie przeprowadzono dla siatki modeli o różnych masach ($M = 0.50, 0.55, 0.60, 0.65 M_{\odot}$) oraz różnej metaliczności ($Z = 0.01, 0.001, 0.0001$). Modele liczone wzdłuż linii na diagramie HR odpowiadającej okresowi oscylacji T2CEP-279, $P \approx 2.4$ d, ze stałym krokiem w jasności absolutnej, $2 L_{\odot}$. Dla każdej kombinacji M/Z modele w pewnym zakresie jasności absolutnej wykazywały zjawisko podwojenia okresu o różnych amplitudach alternacji. Dla każdego modelu, dzięki liniowej analizie stabilności, znamy okresy różnych modów radialnych, możemy więc sprawdzić jak daleko od centrum konkretnego rezonansu połówkowego znajduje się dany model. Analiza wskazuje, że podobnie jak w modelach promienistych, kluczowa jest rola rezonansu 3:2 z pierwszym owertonem.

Policzone modele wykazują szeroki zakres amplitudy pulsacji oraz amplitudy alternacji. Porównanie z amplitudami obserwowanymi doprowadziło do wyboru trzech modeli najlepiej odtwarzających obserwowaną krzywą blasku. Modelowe krzywe blasku i ich porównanie z obserwacjami przedstawione są na lewym panelu rys. 1. Trzy modele mają

²Praca H1 powstawała równocześnie z pracą Soszyński et al. (2011b) stanowiącą XIV część katalogu OGLE. W chwili jej pisania, ostateczna, katalogowa nazwa gwiazdy nie była znana i w pracy używany jest identyfikator BLG184.7 133264.

³Na początku lat dziewięćdziesiątych nastąpiła znacząca rewizja tabli nieprzezroczystości (Iglesias & Rogers, 1991) skutkująca znaczącą zmianą własności pulsacyjnych modeli.

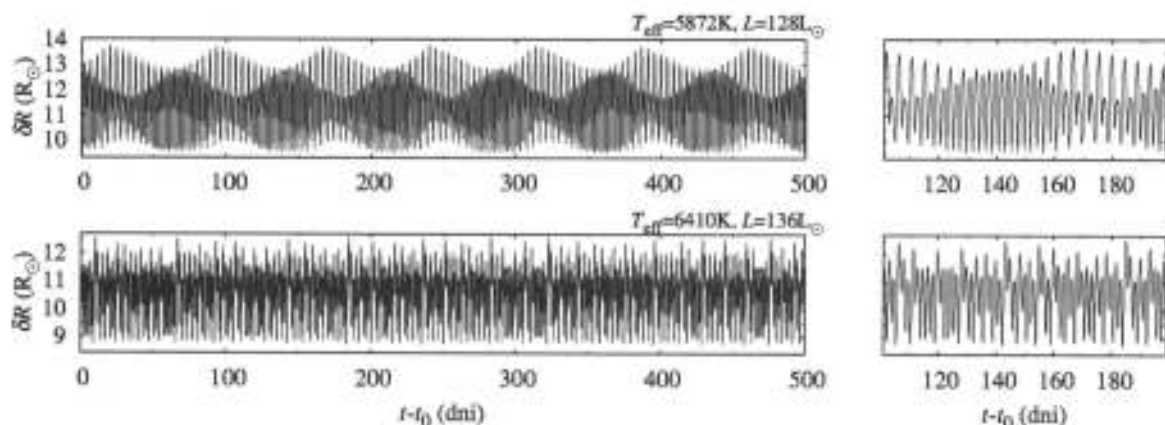


Rysunek 1: Wyniki modelowania dla gwiazdy T2CEP-279. Lewe panele pokazują trzy najlepsze modelowe krzywe blasku i ich porównanie z obserwowaną krzywą (czarna ciągła linia). Prawy panel pokazuje lokalizację modeli na diagramie HR i porównanie ze ścieżkami ewolucyjnymi BaSTI (Pietrinferni et al., 2006). Przy każdej ścieżce podano odpowiadającą jej masę modelu. Zaciemniony obszar wewnątrz ścieżki niestabilności odpowiada obszarowi zajmowanemu przez gwiazdy typu BL Her.

tę samą, wysoką metaliczność, $Z = 0.01$, ale różne masy. Na diagramie HR znajdują się w niemal identycznym miejscu. Dlatego dalsze ograniczenie parametrów modelu jest możliwe dzięki porównaniu ze ścieżkami ewolucyjnymi, których przebieg jest silnie zależny od masy. Ilustruje to prawy panel rys. 1, z którego jasno wynika, że z modelami ewolucyjnym zgodny jest jedynie najmniej masywny model.

Analizę przeprowadzoną w pracy H1 można nazwać nieliniowym, asterosejsmicznym modelowaniem gwiazdy. Rezonans powodujący podwojenie okresu sprawia, że gwiazda jest w istocie dwumodalna. Rezultatem jest charakterystyczny kształt krzywej blasku, modelowanie którego doprowadziło do oszacowania parametrów fizycznych gwiazdy. Praca H1 pokazuje również dobitnie znaczenie i celność predykcji dokonywanych na podstawie nieliniowej teorii pulsacji. Obecność zjawiska w modelu przy jego braku w dostępnych obserwacjach, nie musi świadczyć o niepoprawności modelu bądź jego parametrów. Z tą myślą pisane były dwie kolejne prace.

Podczas sprawdzania jaki wpływ na uzyskane krzywe blasku i istnienie zjawiska podwojenia okresu mają parametry modelu konwektywnego, odkryto dwie niezwykle interesujące klasy modeli. Przy znaczącej redukcji lepkości turbulentnej w modelu, w zależności od jego parametrów fizycznych, zaobserwowano dwa zjawiska: okresową modulację oscylacji oraz chaos deterministyczny. Te dwa zjawiska, do tej pory niezobserwowane w gwiazdach typu BL Her, zostały szczegółowo przeanalizowane w pracach H2 oraz H3.



Rysunek 2: Przykładowe krzywe zmienności promienia dla modeli (*górny panel*): wykazującego modulację pulsacji i podwojenie okresu (praca **H2**) oraz (*dolny panel*): wykazującego chaos deterministyczny (praca **H3**). Prawe panele pokazują wycinek zmienności pokazanej w lewych panelach.

W pracy **Smolec & Moskalik (2012)**, **H2**, analizowano kilka ciągów modeli wykazujących kwazi-okresową modulację oscylacji oraz zjawisko podwojenia okresu. Modele tworzą horyzontalny ciąg na diagramie HR, mają różne jasności absolutne (120 – 160 L_{\odot}) i tę samą masę ($0.55 M_{\odot}$) oraz skład chemiczny ($X = 0.76$, $Z = 0.0001$). Przykładowy przebieg zmiany promienia w modelu ilustruje górny panel rys. 2. Dokładna analiza tzw. map powrotnych wykazała, że w niektórych modelach modulacja ma charakter chaotyczny, ale jest to efekt drugorzędny (dominującą zmienność możemy opisywać jako kwazi-okresową).

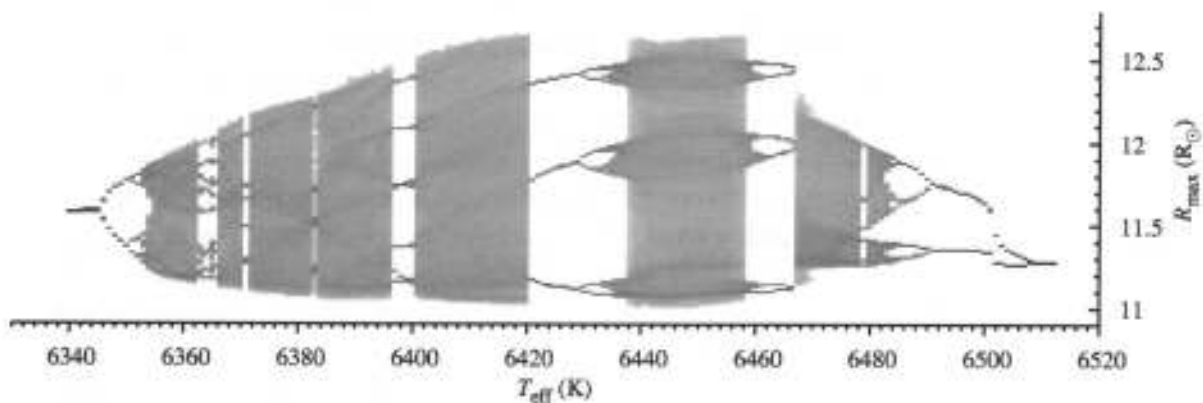
Zachowanie dynamiczne analizowanych modeli przypomina jakościowo efekt Błażki w gwiazdach RR Lutni pulsujących w modzie fundamentalnym. Zjawisko podwojenia okresu wykryto w tych gwiazdach stosunkowo niedawno, dzięki obserwacjom teleskopu kosmicznego *Kepler* (Kolenberg et al., 2010). Ponieważ podwojenie okresu wykryto wyłącznie w gwiazdach z efektem Błażki, Buchler & Kolláth (2011) zaproponowali model wiążący oba efekty. Według tego modelu, przyczyną podwojenia okresu jest rezonans połówkowy 9:2 między modem fundamentalnym a dziewiątym owertonem, $9\nu_F = 2\nu_{90}$ (90 jest tzw. modem złapanym, jego amplituda jest duża jedynie w powierzchniowych warstwach gwiazdy, nad obszarem częściowej jonizacji wodoru). Analizując równania amplitudowe, Buchler i Kolláth pokazali, że ten sam rezonans może również powodować okresową lub chaotyczną modulację oscylacji, czyli być przyczyną efektu Błażki. Słabym punktem modelu jest oparcie się wyłącznie na równaniach amplitudowych. Forma rozwiązania zależy od przyjętych wartości współczynników wysycania oraz współczynników sprzężenia rezonansowego. Tych wartości nie znamy, ich policzenie bądź określenie na podstawie rachunków hydrodynamicznych jest bardzo trudne, czy w przypadku rezonansowym wręcz niemożliwe. Używa się wartości *ad hoc*. Wyniki Buchler & Kolláth (2011) pokazują jedynie, że jednym z rozwiązań równań amplitudowych jest modulacja z podwojeniem okresu, ale nie dowodzą, że jest to proces, który istotnie jest możliwy w gwiazdach. Znacznie mocniejszym dowodem na to byłyby rachunki hydrodynamiczne. Te jednak, w przypadku modeli gwiazd RR Lutni, nie dają pożądanego rozwiązania – udaje się wprawdzie odtworzyć podwojenie okresu, ale w modelach nie wykazujących

modulacji (Kolláth, Molnár & Szabó, 2011; Smolec, 2015). Powodem może być problem z modelowaniem modu złapanego, który jest modem owertonowym wysokiego rzędu. W tym kontekście ukazuje się ważność pracy **H2**. Pokazuje ona, że mechanizm zaproponowany przez Buchlera i Kollátha może działać w hydrodynamicznych modelach gwiazd BL Her, które są bliskimi kuzynkami gwiazd RR Lutni; mają wyższe od nich jasności i dłuższe okresy pulsacji. W pracy pokazano, że obserwowana w modelach modulacja, jest powodowana przez inny rezonans połówkowy, 3:2 z pierwszym owertonem (czyli ten sam rezonans, który jest przyczyną podwojenia okresu w T2CEP-279). Wyniki modelowania hydrodynamicznego jakościowo udało się odtworzyć przy pomocy równań amplitudowych odpowiednich dla rozważanego rezonansu.

Okresowa modulacja oscylacji jak dotąd nie została odkryta w gwiazdach BL Her. Modele i równania amplitudowe jasno wskazują, że taka forma oscylacji jest możliwa, może natomiast, podobnie jak podwojenie okresu, być rzadka. Mam nadzieję, że podobnie jak podwojenie okresu, modulacja oscylacji w gwiazdach BL Her zostanie wkrótce potwierdzona obserwacyjnie.

Nieregularne oscylacje są typowe dla cefeid II populacji o dłuższych okresach oraz dla gwiazd typu Miry czy półregularnych gwiazdach zmiennych. Przypuszcza się, że u podstaw takiej zmienności leży chaos deterministyczny. Wykazanie tego jest jednak niezwykle trudne gdyż wymaga długiego, regularnego i precyzyjnego monitorowania jasności tych gwiazd. Silne dowody istnieją w przypadku kilku gwiazd (zob. np. Buchler, Kolláth & Serre, 1996; Kolláth et al., 1998). Kovács & Buchler (1988b) pokazali również, że zachowania chaotyczne pojawiają się w modelach cefeid II populacji (typu W Vir i RV Tau), albo na drodze podwojenia okresu, albo w wyniku tzw. bifurkacji stycznej. W pracy **Smolec & Moskalik (2014), H3**, pokazano i przeanalizowano zachowania chaotyczne w modelach gwiazd typu BL Her, o obniżonej lepkości turbulentnej. Co więcej, po raz pierwszy pokazano, że w modelach hydrodynamicznych gwiazd pulsujących możliwe jest całe spektrum zachowań dynamicznych, dotąd nieznanych w kontekście gwiazd zmiennych, natomiast obserwowanych w wielu innych układach dynamicznych, np. w modelu Lorenza, Rosslera, czy choćby w iteracjach prostego odwzorowania logistycznego.

Analiza modeli chaotycznych wymaga policzenia dostatecznie dużej ilości cykli pulsacji (kilkanaście tysięcy), tak aby w pełni zmapować przestrzeń fazową zajmowaną przez atraktor chaotyczny. W pracy **H3** policzono jeden tylko ciąg modeli o ustalonej masie ($0.55 M_{\odot}$), składzie chemicznym ($X = 0.76$, $Z = 0.0001$) i jasności absolutnej ($136 L_{\odot}$). Temperatura efektywna stanowiła parametr kontrolny w ciągu modeli; kolejne modele, z uwagi na dużą czułość formy pulsacji na wartość temperatury, liczone w odstępach co najwyżej 1 K, niekiedy zaś tylko 0.1 K. Dynamika charakterystyczna dla chaosu deterministycznego zachodzi w pasie o szerokości około 170 K, po gorącej stronie obszaru w którym w pracy **H2** wykryto modulację oscylacji. Typowy przebieg zmian promienia ilustruje dolny panel rys. 2, natomiast rys. 3 ukazuje diagram bifurkacyjny dla rozważanego ciągu modeli. Na diagramie przedstawiono możliwe wartości maksymalnego promienia w trakcie oscylacji w funkcji parametru kontrolnego. Skala odcieni szarości odpowiada częstości z jaką maksymalny promień wpada do ustalonego arbitralnie, małego przedziału wartości. Diagram wykazuje uderzające podobieństwo do diagramów bifurkacyjnych klasycznych układów dynamicznych wykazujących chaos, np. układu Lorenza, czy iteracji odwzorowania logistycznego. Ukazuje też bogactwo możliwych zjawisk dynamicznych



Rysunek 3: Diagram bifurkacyjny dla ciągu modeli rozważanych w pracy **H3**. Możliwe wartości maksymalnego promienia w modelu w funkcji parametru kontrolnego – temperatury efektywnej.

i form oscylacji, większość z nich wcześniej nie wykrytych w modelach hydrodynamicznych gwiazd pulsujących. Te zjawiska i formy oscylacji omówione są w punktach poniżej.

- Kaskady podwojenia okresu jako droga do chaosu. Zjawisko znane już z wcześniejszych modeli, np. Kovács & Buchler (1988b). Na obu krańcach diagramu przedstawionego na rys. 3 widzimy, że możliwa jest tylko jedna wartość maksymalnego promienia (najprostsze, jednookresowe oscylacje w modzie fundamentalnym). W miarę zmiany parametru kontrolnego obserwujemy podwojenie okresu (dwie wartości maksymalnego promienia), pulsacje z okresem powielanym czterokrotnie, ośmiokrotnie itd., aż do chaosu deterministycznego. Zakres wartości parametru kontrolnego, w którym obserwujemy oscylacje powtarzające się z coraz to dłuższym okresem, skraca się zgodnie z wartością stałej Feigenbauma, uniwersalnej dla różnych systemów chaotycznych.

- Wstęgi chaosu deterministycznego. Szare wstęgi (pasy) na rys. 3. Nie oznaczają losowości; trajektoria modelu w przestrzeni fazowej zbiega do atraktora chaotycznego, który można badać np. przy pomocy map powrotnych.

- Okresowe okna wewnątrz wstęgi chaotycznej. Charakterystyczną cechą wielu układów chaotycznych jest występowanie okien wewnątrz wstęgi chaotycznej, w których obserwujemy oscylacje okresowe. Okna występują dla określonych wartości parametru kontrolnego; w policzonym ciągu modeli takich okien jest siedem. W oknach nie obserwujemy jednak oscylacji z okresem modu fundamentalnego, ale oscylacje z okresem dłuższym – stanowiącym jego wielokrotność. Największe okno okresowe widoczne na rys. 3 odpowiada oscylacjom z okresem powielanym trzykrotnie.

- Intermitencja typu I. Zjawisko obserwujemy gdy zmiana parametru kontrolnego prowadzi do chaosu nie na drodze kaskady podwojenia okresu, ale w wyniku bifurkacji stycznej. Zachodzi to np. przy chłodnej granicy okna z okresem powielanym trzykrotnie. W zmienności konkretnego modelu dostrzegamy oscylacje chaotyczne przeplatane oscylacjami prawie regularnymi z okresem powielanym trzykrotnie.

- Kryzys i intermitencja wywołana kryzysem. Kryzys jest bifurkacją, w której objętość atraktora w przestrzeni fazowej ulega naglej zmianie. Obserwujemy ją np. na gorącej granicy okna z okresem powielanym trzykrotnie, gdzie trzy wstęgi chaotyczne, powstałe w wyniku kaskady podwojenia okresu, łączą się w jedną. Bezpośrednio po wystąpieniu kryzysu, obserwujemy intermitencję wywołaną kryzysem. W zachowaniu konkretnego mo-

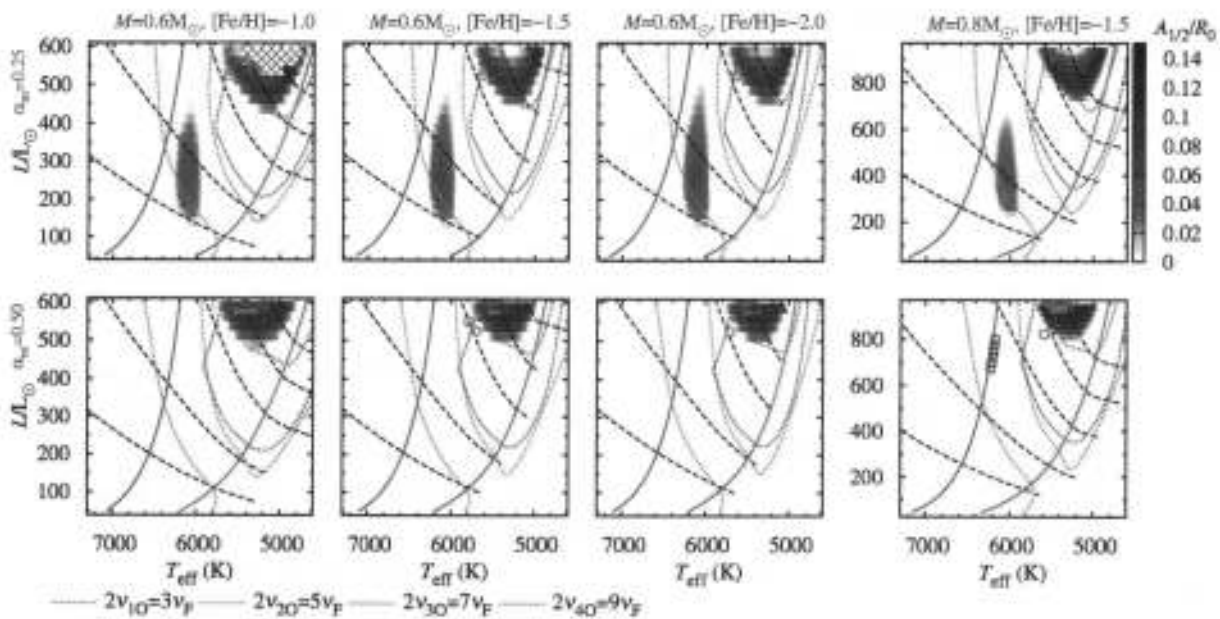
delu w czasie obserwujemy, że trajektorie wciąż są ograniczone do trzech obszarów przestrzeni fazowej, zajmowanych przez atraktor przed wystąpieniem kryzysu, by co jakiś czas zajmować wspólną, większą przestrzeń.

- Intermitencja typu III. Jest wynikiem subkrytycznej bifurkacji podwojenia okresu i polega na nieregularnym przełączaniu się pomiędzy pulsacjami z okresem podwojonym i okresem niepodwojonym.

Zachowań chaotycznych jak dotąd w gwiazdach BL Her nie zaobserwowano. O ile zachowania chaotyczne prowadzące do zmian jasności o dużej amplitudzie zdają się być wykluczone na gruncie obserwacyjnym (lub niezwykle rzadkie), to ewentualna zmienność o mniejszej amplitudzie wykluczona być nie może. Warto wspomnieć, że precyzyjne obserwacje teleskopów kosmicznych wskazują na niestacjonarność (na poziomie milimagnitud) krzywych blasku cefeid klasycznych (np. Derekas et al., 2012; Evans et al., 2015). Obserwacje i modele wskazują, że dynamika chaotyczna może leżeć u podstaw zmienności cefeid II populacji o dłuższych okresach czy też w półregularnych gwiazdach zmiennych. Z różnych powodów (zob. niżej) realistyczne modele tych gwiazd są trudne do policzenia. Rachunki z pracy **H3** ilustrują, że całe spektrum zachowań dynamicznych znanych z innych układów chaotycznych, może być także oczekiwane w gwiazdach. Ich wykrycie wymaga jednak długiego, regularnego oraz precyzyjnego monitorowania jasności gwiazd. Dlatego z nadzieją oczekujemy na wyniki obserwacji czwartej fazy projektu OGLE dla cefeid II populacji.

W pracach **H2** i **H3** rachunki dotyczyły bardzo niewielkich wycinków diagramu HR. Modele liczone przy obniżonej lepkości turbulentnej. Pozwoliło to na uzyskanie interesujących zachowań dynamicznych o ważnych implikacjach astrofizycznych. Modele te nie mogą być jednak traktowane jako reprezentatywne dla ogółu cefeid II populacji. W literaturze nie ma szerokiego przeglądu modeli tych gwiazd policzonego współczesnym, konwektywnym kodem pulsacyjnym. Nie licząc przeglądu modeli konwektywnych dla gwiazd BL Her (Di Criscienzo et al., 2007), ostatni przegląd modeli o szerokim zakresie parametrów typu masa/jasność/metaliczność wykonany był kodem promienistym i z wykorzystaniem starych tablic nieprzezroczystości, niemal 30 lat temu (Kovács & Buchler, 1988b). Tę lukę zapełnia praca **Smolec (2016a), H5**. Podstawowy zestaw parametrów konwektywnych przyjęty w modelach był ten sam, przy którym bardzo dobrze udało się odtworzyć obserwowaną krzywą blasku T2CEP-279 w pracy **H1**. Dodatkowo rozważono zestaw parametrów o podwyższonej lepkości turbulentnej. Na przegląd składają się modele o różnych masach i metalicznosciach: $0.6 M_{\odot}$ ($[Fe/H] = -2.0, -1.5, -1.0$) oraz $0.8 M_{\odot}$ ($[Fe/H] = -1.5$), oraz o dwóch wspomnianych zestawach parametrów konwektywnych. Modele liczone z krokiem $25 K$ i $25 L_{\odot}$ w temperaturze efektywnej i jasności absolutnej, odpowiednio. Łącznie daje to kilkanaście tysięcy modeli. Siatkę policzonych modeli ilustruje rys. 4.

Niestety, okazało się, że przegląd musi być ograniczony w jasności absolutnej do ok. $600 L_{\odot}$ dla $M = 0.6 M_{\odot}$ lub do ok. $1000 L_{\odot}$ dla $M = 0.8 M_{\odot}$. Tym samym ograniczone są uzyskiwane okresy pulsacji; jedynie przy czerwonej granicy pasa niestabilności i dla najwyższych jasności, okresy przewyższają 20 dni (domena gwiazd RV Tau). Jest to konsekwencja niestabilności dynamicznej wykrytej w modelach. Dla wyższych jasności, w wyniku silnych fal uderzeniowych tworzących się w modelu, zewnętrzna warstwa ma tendencję do odrywania się. W pracy Kovács & Buchler (1988b) również nie liczone



Rysunek 4: Możliwe formy pulsacji dla modeli cefeid II populacji o różnych masach, metalicznościach i parametrach konwektywnych (górne panele $\alpha_m = 0.25$; dolne panele $\alpha_m = 0.5$) na diagramie HR. W zaciemnionych obszarach występuje zjawisko podwojenia okresu. Wypełnione romby to modele w których wykryto pulsacje z okresem powielanym czterokrotnie. W modelach oznaczonych otwartymi kółkami obserwujemy okresową modulację pulsacji, zaś modele zaznaczone kwadratami wykazują pulsacje dwumodalne w modzie fundamentalnym i czwartym overtone. Czarne przerywane linie to linie stałego okresu modu fundamentalnego, od dołu do góry: 2, 4, 8, 12 i 16 dni. Centra kilku rezonansów połówkowych zaznaczono różnymi kropkowanymi liniami, opisanymi w dolnej części rysunku.

modeli jaśniejszych od przytoczonych wyżej jasności granicznych; wspomniano jedynie o trudności z stabilnością zewnętrznych warstw, bez żadnej analizy. Praca **H5** jest pierwszą która efekt dyskutuje dokładniej. Przy użyciu różnych technik numerycznych starano się – bezskutecznie – zapobiec odrywaniu się zewnętrznych warstw. Efekt jest więc najpewniej fizyczny i może odpowiadać zjawisku utraty masy napędzanej przez pulsacje. Modelowanie utraty masy nie jest możliwe bez całkowitego przepisania używanych kodów pulsacyjnych, stąd ograniczenie przeglądu.

W pracy **H5** badano możliwe formy pulsacji i ich przyczyny, nieliniowe zmiany okresów, kształty krzywych zmian promienia i ich ewentualną korelację z rezonansami. Rys. 4 podsumowuje formy pulsacji jakie wykazują modele. Poniżej są one przedyskutowane dokładniej.

- Pulsacje jednookresowe w modzie fundamentalnym; białe obszary na rys. 4 (w granicach pasa niestabilności). Analiza kształtu krzywych zmian promienia potwierdziła rolę dwóch rezonansów w kształtowaniu morfologii krzywych zmienności: 2:1 z drugim overtone (dla modeli typu BL Her) oraz 2:1 z pierwszym overtone (dla modeli typu W Vir). W drugim przypadku, jest to pierwsze potwierdzenie roli tego rezonansu na drodze rachunków nieliniowych.

- Pulsacje z podwojonym okresem; zaciemnione na szaro obszary na rys. 4. Skala odcieni szarości odpowiada amplitudzie alternacji. Na rys. 4 widoczne są dwa obszary podwoje-

nia okresu. Obszar zlokalizowany dla niższych jasności rozciąga się na granicy obszarów odpowiadających gwiazdom BL Her i W Vir. Niepodwojone okresy oscylacji są w zakresie 2 – 6.5 d. W tym obszarze zlokalizowany jest najlepszy model odtwarzający krzywą blasku T2CEP-279 diskutowany w pracy **H1**. Przyczyną podwojenia okresu jest rezonans 3:2 z pierwszym owertonem. Zwiększenie parametru turbulენტnej lepkości prowadzi do zaniku tego obszaru podwojenia okresu (dolny panel rys. 4). Obszar podwojenia okresu o wyższych jasnościach rozciąga się dla okresów $P \gtrsim 9.5$ d, w obszarze gwiazd W Vir i RV Tau.

- Pulsacje z okresem powielanym czterokrotnie; modele zaznaczone rombami na rys. 4. Obszary takich pulsacji występują wewnątrz obszarów podwojenia okresu. Najpewniej widzimy tu początek kaskady podwojenia okresu, która w modelach o obniżonej lepkości turbulენტnej (praca **H3**) prowadzi do chaosu. W modelach diskutowanych w pracy **H5** chaosu nie wykryto.

- Okresowa modulacja oscylacji; modele zaznaczone otwartymi kółkami na rys. 4. Ta forma pulsacji występuje jedynie w bardzo małych obszarach diagramu HR, w obszarze odpowiadającym gwiazdom W Vir.

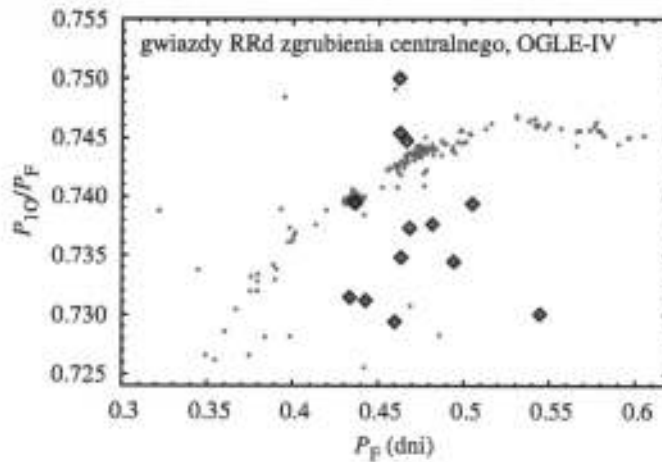
- Pulsacje dwumodalne w modzie fundamentalnym i czwartym owertonie; modele zaznaczone kwadratami na rys. 4. Są to niezwykle interesujące modele, znalezione jedynie dla $M = 0.8 M_{\odot}$ przy niebieskiej granicy pasa niestabilności. Poza modem fundamentalnym wzbudzony jest czwarty owerton, który jest modem złapanym. Są to pierwsze modele wykazujące nierezonansowe oscylacje dwumodalne z wzbudzonym modem złapanym.

W pracy **H5** przeanalizowano również nieliniowe zmiany okresu. Mogą one sięgać nawet kilkunastu procent, przy czym modele wykazują zarówno wydłużanie jak i skracanie okresu w porównaniu z wartością liniową. Efekt nie jest jednak na tyle duży by znacząco wpłynąć na relację okres–jasność dla cefeid II populacji.

Dyskutowane prace modelowe przewidują, że podwojenie okresu powinno być powszechnym efektem w gwiazdach typu BL Her i W Vir. Tymczasem obserwacje pokazują, że efekt, choć faktycznie występuje w tych gwiazdach, to jest rzadki. Powszechny staje się dopiero przy $P \gtrsim 20$ d (gwiazdy RV Tau). Kompleksowa analiza modeli cefeid II populacji pokazuje również ograniczenia współczesnych kodów pulsacyjnych. Niezbędne jest lepsze, trójwymiarowe modelowanie konwekcji, procesu bardzo istotnego w oscylacjach tych gwiazd, lepsze traktowanie transportu promieniowania i odejście od schematu lagranżowskiego.

Kolejna praca wchodząca w skład osiągnięcia habilitacyjnego jest związana z inną grupą gwiazd pulsujących II populacji, z gwiazdami RR Lutni. Inna jest też natura tej pracy; nie są to rachunki modelowe, ale wnikliwa analiza nowo odkrytego zjawiska, efektu Błażki w gwiazdach RRd – dwumodalnych gwiazdach RR Lutni pulsujących równocześnie w modzie fundamentalnym i pierwszym owertonowym. Odkrycia dokonano podczas przygotowywania katalogu gwiazd RR Lutni obserwowanych w zgrubieniu centralnym Galaktyki w ramach czwartej fazy projektu OGLE (Soszyński et al., 2014). Efekt znaleziono w siedmiu gwiazdach RRd, jednak nie zrobiono dla nich żadnej szczegółowej analizy. Dzięki współpracy z grupą OGLE uzyskałem dostęp do jeszcze nieopublikowanych danych i rozpocząłem szczegółową analizę zjawiska – wyniki zawiera praca **Smolec et al. (2015a)**, **H4**.

Dla gwiazd wielomodalnych stosunki okresów prezentuje się na diagramie Petersena



Rysunek 5: Diagram Petersena (stosunek okresów wzbudzonych modów w funkcji dłuższego okresu) dla gwiazd RRd ze zgrubienia centralnego Galaktyki. Gwiazdy modulowane zaznaczono rombami.

– rys. 5. Większość gwiazd RRd układa się wzdłuż dobrze zdefiniowanego ciągu. Okazało się, że siedem gwiazd modulowanych wskazanych w pracy Soszyński et al. (2014) ma nietypowe, przy danym okresie modu fundamentalnego, stosunki okresów: albo zbyt niskie, albo zbyt wysokie, w porównaniu z gwiazdami tworzącymi główny ciąg. Po tej obserwacji, sprawdzono pozostałe gwiazdy o nietypowych stosunkach okresów co doprowadziło do odkrycia nowych obiektów modulowanych. Łącznie w pracy H4 analizowanych jest 15 gwiazd.

Całość analiz wykonana została przy użyciu oprogramowania napisanego przeze mnie. Analiza oparta jest o standardową technikę sukcesywnego *prewhiteningu*. Okresowości obecne w danych identyfikowane są przy pomocy transformaty Fouriera; zmienność o znalezionych częstotliwościach dopasowywana jest do danych w postaci szeregu funkcji sinus o amplitudach, fazach i częstotliwościach dopasowywanych na drodze nieliniowej metody najmniejszych kwadratów. Dane rezydualne są następnie analizowane celem detekcji dodatkowych okresowości o niższych amplitudach. W niektórych gwiazdach liczba zidentyfikowanych w ten sposób częstotliwości znacząco przekracza 20. Składają się na nie częstotliwości modów fundamentalnego i owertonowego, ich harmoniki i liniowe kombinacje, oraz centrowane na tych częstotliwościach równoodstępne multiplety, stanowiące obraz modulacji w widmie częstotliwości. W wielu przypadkach udało się zidentyfikować dwie lub nawet trzy rodziny multipletów o różnych separacjach – świadczy to o modulacji wielookresowej. Obserwowane pulsacje są nieregularne. Zmienność w czasie badano przy użyciu zależnej od czasu analizy fourierowskiej połączonej z zależnym od czasu *prewhiteningiem* (Moskalik et al., 2015). Poniżej przedstawiono najważniejsze własności gwiazd modulowanych.

- Stosunek okresów wzbudzonych modów radialnych jest nietypowy, zwykle niższy niż dla większości gwiazd RRd o podobnym okresie modu fundamentalnego.
- Stosunkowo częsta jest modulacja dwu- lub trzyokresowa; okresy modulacji wynoszą od 20 do 300 dni; amplituda modulacji jest w zakresie od kilku do niemal 100 procent amplitudy modów radialnych.
- Niekiedy oba mody radialne są modulowane ze wspólnym okresem; częściej jednak

modulacja dominująca dla modu fundamentalnego ma inny okres niż modulacja dominująca dla modu owertonowego; modulacja tylko jednego modu radialnego jest również obserwowana.

- Amplituda i okres modów radialnych zmieniają się nieregularnie w skali czasowej od kilkuset do tysiąca dni; obserwowane modulacje również nie są ściśle okresowe.

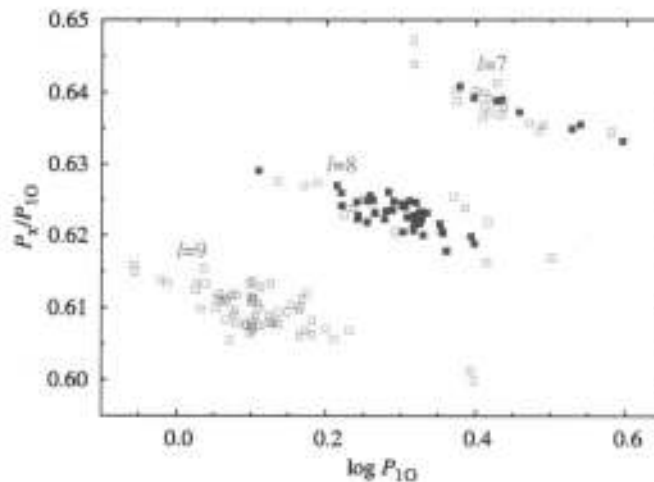
W chwili wysyłania pracy **H4** do publikacji, ukazała się praca Jurcsik et al. (2014), w której autorzy donoszą o odkryciu 4 modulowanych gwiazd RRd w gromadzie kulistej M3. Własności tych gwiazd są jakościowo zgodne z własnościami gwiazd ze zgrubienia centralnego Galaktyki.

Podobnie jak w przypadku efektu Błazki w gwiazdach jednomodalnych, nie znamy mechanizmu prowadzącego do modulacji w gwiazdach RRd. W jednej z gwiazd zaobserwowano przełączenie modów pulsacji. Gwiazda jednookresowa pulsująca w modzie fundamentalnym (RRab) stała się gwiazdą RRd (Soszyński et al., 2014). Mod fundamentalny był modulowany zarówno przed, jak i po przełączeniu modów. W pracy **H4** zasugerowano więc, że te dwa efekty – modulacja w gwiazdach RRd i przełączanie modów pulsacji – mogą być powiązane. Jest to jednak hipoteza trudna do obserwacyjnej weryfikacji. Przełączanie modów jest zjawiskiem niezwykle rzadkim, a jego uchwycenie wymaga regularnego monitorowania gwiazd przez dziesiątki lat. Nietypowe stosunki okresów obserwowane w gwiazdach modulowanych nie są trudne do odtworzenia przy pomocy rachunków pulsacyjnych (zob. Smolec, 2016b), zbyt niskie wymagają zwiększenia metaliczności. Gwiazdy RR Lutni o dużej metaliczności nie są rzadkością w zgrubieniu centralnym Galaktyki. Gwiazdy modulowane mają jednak okresy dłuższe od niemodulowanych gwiazd RRd o dużej metaliczności, zajmujących krótkookresowy kraniec głównego ciągu widocznego na rys. 5 (Soszyński et al., 2011a).

Ostatnia praca wchodząca w skład osiągnięcia habilitacyjnego jest związana z cefeidami klasycznymi. W pracy Smolec & Śniegowska (2016), **H6**, analizowane są obserwacje cefeid z Małego Obłoku Magellana, w których, obok dominującej zmienności związanej z radialnym pierwszym owertonem, wykryto dodatkową zmienność o krótszym okresie i niskiej amplitudzie. Stosunek dwóch okresowości ma charakterystyczną wartość, w zakresie $P_x/P_{1O} \in (0.60, 0.65)$. Pierwsze cefeidy tego typu zostały odkryte w Wielkim Obłoku Magellana (Soszyński et al., 2008; Moskalik & Kołaczkowski, 2009). Największą ilość, 138 gwiazd, znaleziono jednak w Małym Obłoku Magellana (Soszyński et al., 2010). Praca Soszyński et al. (2010) nie zawiera żadnej szczegółowej analizy tych gwiazd. W pliku dostępnym w archiwum ftp grupy OGLE możemy jedynie znaleźć wartość okresu dodatkowej zmienności⁴. Dane fotometryczne dla tych właśnie gwiazd analizowane są w pracy **H6**. Na diagramie Petersena gwiazdy tworzą trzy wyraźne, dobrze rozdzielone ciągi, rys. 6. Dodatkowa zmienność nie może odpowiadać wzbudzeniu modu radialnego (Dziembowski & Smolec, 2009).

Podobna forma pulsacji znana jest w gwiazdach RR Lutni pulsujących w pierwszym owertonie (gwiazdy RRc lub RRd). Stosunek dwóch okresowości jest podobny, dla większości gwiazd wynosi około 0.61. Własności gwiazd RR Lutni są doskonale poznane, także dzięki pracom z moim udziałem (np. Moskalik et al., 2015; Netzel, Smolec & Moskalik, 2015b). W szczególności, w widmie częstotliwości wielu gwiazd zidentyfikowano subharmonik dodatkowej zmienności, tzn. sygnał o częstotliwości $\nu_{sh} = 1/2\nu_x$, gdzie $\nu_x = 1/P_x$.

⁴<ftp://astrow.edu.pl/ogle3/OIII-CVS/smc/cep/remarks.txt>



Rysunek 6: Diagram Petersena dla cefeid z dodatkową okresowością z Małego Obłoku Magellana. Wypełnione symbole odpowiadają gwiazdom, w których wykryto subharmoniki dodatkowej zmienności. Przy każdym ciągu podano odpowiadający mu stopień modu według modelu Dziembowskiego.

To ważny wynik: najnowszy model wyjaśniający naturę dodatkowej zmienności, zaproponowany w pracy Dziembowski (2016), właśnie ten sygnał interpretuje jako odpowiadający nieradialnemu modowi oscylacji o stopniach z zakresu $\ell = 7-9$ (tzw. mody silnie złapane, niestabilne). Zmienność o częstotliwości ν_x odpowiada harmonikowi modu nieradialnego, $\nu_x = 2\nu_\ell$. Mody nieradialne o wysokim stopniu trudno wykryć. Ich spodziewana obserwowana amplituda jest niska w wyniku efektu uśredniania geometrycznego, zależnego od stopnia modu. Tymczasem, dzięki efektom nieliniowym i geometrycznym, łatwiejsze jest wykrycie harmonika modu nieradialnego (zmienności z częstotliwością $2\nu_\ell$).

W pracy **H6** przedstawiono pierwszą szczegółową analizę pulsacji dla cefeid z wzbudzoną dodatkową okresowością. Analiza fotometrii przebiegała w sposób standardowy, podobnie jak to opisano powyżej dla pracy **H4**. Całość analiz wykonano przy pomocy oprogramowania napisanego przeze mnie. Najważniejszym wynikiem pracy jest detekcja subharmoników dodatkowej zmienności w 35 procentach analizowanych gwiazd. Co najważniejsze, gwiazdy, w których wykryto subharmoniki nie są rozmieszczone dowolnie na diagramie Petersena. Ilustruje to rys. 6, na którym wypełnione symbole odpowiadają gwiazdom, w których wykryto subharmoniki. Znalaziono je w 74 procentach gwiazd tworzących środkowy ciąg na diagramie Petersena oraz w 31 procentach gwiazd tworzących ciąg górny. Dla gwiazd z dolnego ciągu subharmoników nie wykryto. Jest to w pełni zgodnie z modelem zaproponowanym w pracy Dziembowski (2016), w którym subharmoniki odpowiadają modom nieradialnym o stopniach 7 (górny ciąg), 8 (środkowy ciąg) i 9 (dolny ciąg). Efekty uśredniania geometrycznego są mniejsze dla modów o parzystym stopniu. Dla $\ell = 8$ są mniejsze niż dla $\ell = 7$ oraz $\ell = 9$. Dodatkowo efekty uśredniania są nieco mniejsze dla $\ell = 7$ niż dla $\ell = 9$. Dlatego największą szansę na bezpośrednią detekcję modu nieradialnego (subharmonika) mamy w przypadku gwiazd środkowego ciągu, następnie zaś dla gwiazd z górnego ciągu. Obserwowana amplituda modu nieradialnego dla gwiazd z dolnego ciągu jest najmniejsza. W przypadku obserwacji OGLE musi być poniżej progu detekcji – stąd brak subharmoników w gwiazdach z ciągu dolnego.

W pracy **H6** szczegółowo przeanalizowano własności cefeid z wzbudzonym modem

nieradialnym. Oprócz analizy występowania subharmonek, opisanej wyżej, stwierdzono:

- Amplituda dodatkowej zmienności jest zawsze niska; typowo od 2 do 4 procent amplitudy pierwszego owertonu (2 – 5mmag).
- W widmie częstotliwości sygnały odpowiadające dodatkowej zmienności, jak i wykrytym subharmonekom, są niestacjonarne. Amplituda i faza sygnałów silnie zmienia się w czasie. Sygnały odpowiadające subharmonekom są typowo szersze niż sygnały obserwowane przy ν_x . Jest to jakościowo zgodne z modelem Dziembowskiego.
- Własności modu radialnego w gwiazdach z dodatkową zmiennością są takie same jak w gwiazdach bez dodatkowej zmienności.
- Własności analizowanych gwiazd są jakościowo takie same jak własności gwiazd RRc z dodatkową zmiennością. Dlatego ten sam mechanizm musi odpowiadać za wzbudzenie dodatkowej zmienności.

W pracy **H6** sprawdzono i przedyskutowano też dokładnie jaki wpływ na uzyskane wyniki mają efekty selekcji obserwacyjnej.

Krótkie podsumowanie

Prace **H1**, **H2**, **H3** oraz **H5** stanowią pierwsze kompleksowe modelowanie pulsacji cefeid II populacji, przy użyciu jednego z trzech używanych na świecie konwektywnych kodów pulsacyjnych. Podobne rachunki wykonane w przeszłości oparte były o model czysto promienisty, zaś liczba modeli była mocno ograniczona. Cykl zaczął się od modelowania konkretnej gwiazdy typu BL Her, pierwszej wykazującej podwojenie okresu, zgodnie z predykcją wykonaną 20 lat wcześniej w oparciu o promieniste rachunki modelowe (Buchler & Moskalik, 1992). Kolejne prace to badanie niezwykle interesujących zjawisk wykrytych w modelach, ale w dużej mierze jeszcze nie znanych z obserwacji tych gwiazd. Coraz lepszej jakości dane spływające zarówno z naziemnych przeglądów nieba, jak i z obserwacji kosmicznych, pozwalają mieć nadzieję na odkrycie nowych efektów dynamicznych w pulsacji tych gwiazd. Najlepszym przykładem jest świeże odkrycie efektu Błazki w dwumodalnych gwiazdach RR Lutni, w danych z czwartej fazy projektu OGLE (Soszyński et al., 2014). Dogłębną analizę zjawiska zawiera praca **H4**. Pod koniec roku spodziewamy się upublicznienia obserwacji OGLE dla cefeid II populacji ze zgrubienia centralnego Galaktyki, a następnie z Obłoków Magellana. Analiza tych danych pod kątem poszukiwania zjawisk wykrytych w modelach jest wśród moich najważniejszych naukowych planów na przyszłość. Ostatnia praca, **H6**, przedstawia szczegółową analizę innego efektu dynamicznego: dwumodalnych pulsacji z wzbudzonymi modami radialnym i nieradialnym, w klasycznych cefeidach z Małego Obłoku Magellana. Uzyskane wyniki stanowią bardzo silny argument na poparcie nowego modelu identyfikującego wzbudzone mody nieradialne i wyjaśniającego mechanizm ich wzbudzania (Dziembowski, 2016).

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych (artystycznych).

Krótki opis pozostałych realizowanych projektów

Od 2010 roku uczestniczę w analizie obserwacji teleskopu kosmicznego *Kepler* (obecnie misja *K2*), w ramach tzw. *Kepler Asteroseismic Science Consortium* (KASC). Efektem współpracy w ramach KASC jest dziewięć prac recenzowanych, których jestem współautorem. Mój największy wkład dotyczy prac o gwiazdach wykazujących efekt Błażki; RR Lyr (Kolenberg et al., 2011, szczegółowa analiza zmian krzywej blasku w trakcie kolejnych cykli modulacji; analiza obserwacji) oraz V445 Lyr (Guggenberger et al., 2012, policzenie modeli i interpretacja dodatkowych okresowości odnalezionych w gwiazdzie). W pracy Nemeč et al. (2011), dotyczącej niemodulowanych gwiazd RR Lutni obserwowanych przez teleskop *Keplera*, policzyłem szereg nieliniowych modeli hydrodynamicznych wspomagających interpretację obserwacji. Analiza obserwacji dla gwiazdy RR Lyr wykorzystana została w pracy Smolec et al. (2011), w której na drodze rachunków hydrodynamicznych i ich porównania z obserwacjami, wykazaliśmy słabe punkty jednego z modeli zaproponowanych by wyjaśnić efekt Błażki – tzw. modelu Stothersa (Stothers, 2006).

Jestem członkiem projektu *Araucaria*, w ramach którego zajmuję się analizą pulsacji i ewolucji gwiazd wchodzących w skład zaćmieniowych układów podwójnych. Mój największy wkład to szczegółowa analiza modeli pulsacyjnych dla gwiazdy pulsującej nowego typu, OGLE-BLG-RRLYR-02792, o własnościach pulsacyjnych podobnych do gwiazd RR Lutni, ale o zdecydowanie mniejszej masie, tzw. *Binary Evolution Pulsators* (Pietrzyński et al., 2012). W pracy Smolec et al. (2013) wykonaliśmy bardzo udane modelowanie krzywych blasku i prędkości radialnej dla tej gwiazdy oraz zrobiliśmy szeroki przegląd modeli hydrodynamicznych o niskich masach by lepiej poznać własności spodziewanej, nowej klasy gwiazd i cechy pomagające odróżnić je od zwykłych gwiazd RR Lutni. W ramach projektu *Araucaria* zajmuję się również modelowaniem ewolucji olbrzymów z układów zaćmieniowych, do czego wykorzystuję kod MESA (Paxton et al., 2015). Największy jak dotąd wkład dotyczy modelowania ewolucji układu ASAS J180057-2333.8, dla którego przeanalizowałem wpływ przestrzeliwania konwektywnego na ścieżki ewolucyjne (Suchomska et al., 2015).

Analiza i interpretacja obserwacji klasycznych gwiazd pulsujących, obserwowanych przez projekt OGLE, jest jednym z głównych kierunków moich badań. Przykładem są prace Pani Henryki Netzel, studentki Uniwersytetu Warszawskiego, wykonane pod moim kierunkiem. W pracy Netzel, Smolec & Dziembowski (2015) donosimy o odkryciu nowej grupy dwuokresowych gwiazd RR Lutni, w których dominującym modem oscylacji jest radialny pierwszy owerton. Dodatkowo, w gwiazdach obecna jest zmienność o dłuższym okresie; dłuższym niż spodziewany okres modu fundamentalnego. Jest to zupełnie nowa i niewyjaśniona jeszcze forma pulsacji. W pracach Netzel, Smolec & Moskalik (2015a,b) szukamy i analizujemy inną osobliwą formę pulsacji gwiazd RR Lutni, w których oprócz dominującego pierwszego owertonu, obserwujemy zmienność o okresie krótszym, P_x , tak, że stosunek okresów wynosi, $P_x/P_{10} \in (0.60, 0.64)$. Dzięki tym dwóm pracom ilość znanych gwiazd tego typu zwiększyła się niemal dziesięciokrotnie. Badanie podobnej formy oscylacji występującej w cefeidach klasycznych pulsujących w pierwszym owertonie przedstawiono w pracy **H6**. Analizy wykonane w tych pracach jasno wskazują, że zarówno w gwiazdach RR Lutni, jak i w cefeidach, natura dodatkowej zmienności i mechanizm jej wzbudzenia musi być identyczny. Nasze analizy są silnym argumentem na poparcie

modelu zaproponowanego w pracy Dziembowski (2016), w którym dodatkowa zmienność (czy raczej zmienność z okresem dwukrotnie dłuższym) jest wynikiem wzbudzenia tzw. silnie złapanych modów nieradialnych. Dane OGLE analizuję również we współpracy z grupą z Masaryk University w Brnie. Student z tej grupy, Zdenek Prudil, niedawno odbył dwutygodniowy staż w CAMK pod moją opieką. W przygotowaniu są dwie wspólne prace recenzowane o nowej formie pulsacji gwiazd typu RR Lutni, którą odkryliśmy w obserwacjach OGLE.

Dogłębne analizy obserwacji wykonane przeze mnie np. w pracach H4, H6, czy Smolec et al. (2015b), oraz w projektach realizowanych wspólnie z Panią Netzel (np. Netzel, Smolec & Moskalik, 2015b) są możliwe dzięki zaawansowanemu oprogramowaniu do analizy szeregów czasowych mojego autorstwa. Kod programu liczy już niemal 15 tysięcy linii. Użytkownikowi oferuje ponad 90 poleceń wpisywanych w terminalu (podobnie jak w programie IRAF) czy możliwość pracy automatycznej przy pomocy specjalnych skryptów. Wyniki są wizualizowane graficznie, możliwa jest ich interaktywna analiza. W niedalekiej przyszłości planuję upublicznienie tych programów.

Łącznie jestem współautorem 34 recenzowanych prac opublikowanych w języku angielskim (w tym 28 opublikowanych po uzyskaniu stopnia doktora). W czternastu pracach jestem pierwszym autorem (w tym 10 opublikowanych po doktoracie). Jestem też współautorem 28 publikacji konferencyjnych (w 19 jako pierwszy autor). Wszystkie moje prace były łącznie cytowane 801 razy. Mój indeks Hirscha wynosi 16 (wg. bazy NASA/ADS, stan na 30 marca 2016).

Uzyskane wyniki prezentowałem na szeregu konferencji o zasięgu międzynarodowym w kraju i za granicą. Łącznie wygłosiłem 6 referatów zaproszonych, 11 referatów zwykłych (tzw. *contributed talk*) oraz prezentowałem 12 posterów. Byłem członkiem *Scientific Organizing Committee* konferencji *RRL2015: High-precision studies RR Lyrae Stars*, która odbyła się w październiku 2015 roku w Wyszehradzie na Węgrzech. Jestem autorem pomysłu, by konferencja dedykowana badaniu gwiazd RR Lutni stała się cykliczna. Na konferencji w Wyszehradzie zadeklarowałem, że kolejna odbędzie się w Polsce, w roku 2017; będę jej głównym organizatorem.

Z powodzeniem zdobywam granty na swoje badania. W roku 2012 uzyskałem grant Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego *Inventus+* (IP2012 036572, projekt pt. *Podwojenie okresu i chaos w hydrodynamicznych modelach cefeid II populacji*, realizacja 06.2013–11.2015, przyznane środki 114 540 PLN). Jestem także kierownikiem 2 grantów OPUS przyznanych przez Narodowe Centrum Nauki w trzeciej edycji konkursu (2012/05/B/ST9/03932, projekt pt. *Wielomodalne, nieradialne i modulowane oscylacje gwiazd RR Lutni i cefeid*, realizacja 01.2013–08.2016, przyznane środki 419 600 PLN) oraz w dziewiątej edycji konkursu (2015/17/B/ST9/03421, projekt pt. *Klasyczne gwiazdy pulsujące w systemach gwiazdowych. Wpływ dominującego modu na formę i stabilność pulsacji*, realizacja 02.2016–02.2019, przyznane środki 419 580 PLN). W latach 2016–2018 realizowany będzie wspólny projekt badawczy pt. *Probing cosmic standard candles in the space age* w ramach współpracy pomiędzy Polską Akademią Nauk oraz Funduszem Badań Naukowych Flandrii. Razem z Dr Katrien Kolenberg jestem koordynatorem tego projektu. Jestem również wykonawcą w grantach Narodowego Centrum Nauki przyznawanych na realizację projektów grupy *Araucaria*, kierowanych przez prof. Grzegorza Pietrzyńskiego.

W roku 2015 zostałem laureatem prestiżowego, trzyletniego stypendium dla wybitnie zdolnych młodych naukowców przyznawanego przez Ministra Nauki i Szkolnictwa

Wyższego.

Jestem zapraszany do recenzowania publikacji naukowych. Regularnie recenzuję dla czasopism *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* i *Astrophysical Journal*. Recenzowałem także dla *Astronomy & Astrophysics*, *Astronomical Journal*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific (PASP)* i *Acta Astronomica*.

Literatura

- Bono G., Stellingwerf R.F., 1994, *ApJ Suppl. Ser.*, 93, 233
Buchler J.R., Kolláth Z., 2011, *ApJ*, 731, L24
Buchler J.R., Moskalik P., 1992, *ApJ*, 391, 736
Buchler J.R., Kolláth Z., Serre T., 1996, *ApJ*, 462, 489
Christy, R.F., 1966, *ApJ*, 144, 108
Cox, J.P., *Theory of stellar pulsation*, Princeton University Press
Derekas A., et al. (z udziałem habilitanta), 2012, *MNRAS*, 425, 1312
Di Criscienzo M., Caputo F., Marconi M., Cassisi S., 2007, *A&A*, 471, 893
Dziembowski W., Smolec R., 2009, *AIP Conf. Proc.*, 1170, 83
Dziembowski W., 2016, *Comm. Konkoly Obs.*, vol. 105, w druku, arXiv:1512.03708
Evans N.R., et al., 2015, *MNRAS*, 446, 4008
Guggenberger E., et al. (z udziałem habilitanta), 2012, *MNRAS*, 424, 649
Iglesias C.A., Rogers F.J., 1991, *ApJ*, 371, L73
Jurcsik J., et al., 2014, *ApJ* 797, L3
Kolenberg K., et al., 2010, *ApJ*, 713, L198
Kolenberg K., et al. (z udziałem habilitanta), 2011, *MNRAS*, 411, 878
Kolláth Z., Molnár L., Szabó R., 2011, *MNRAS*, 414, 1111
Kolláth Z., Buchler J.R., Serre T., Mattei J., 1998, *A&A*, 329, 147
Kolláth Z., et al., 2002, *A&A*, 385, 2002
Kuhfuß R., 1986, *A&A*, 160, 116
Kovács G., Buchler J.R., 1988a, *ApJ*, 324, 1026
Kovács G., Buchler J.R., 1988b, *ApJ*, 334, 971
Moskalik P., Buchler J.R., 1990, *ApJ*, 355, 590
Moskalik P., Kołaczowski Z., 2009, *MNRAS*, 394, 1649
Moskalik P., Smolec R., Kolenberg K., et al., 2015, *MNRAS*, 447, 2348
Nemec, J.M., Smolec R., Benkő J.M., et al., 2011, *MNRAS*, 417, 1022
Netzel H., Smolec R., Moskalik P., 2015a, *MNRAS*, 447, 1173
Netzel H., Smolec R., Moskalik P., 2015b, *MNRAS*, 453, 2022
Netzel H., Smolec R., Dziembowski W., 2015, *MNRAS Lett.*, 451, L25
Paxton B., et al., *ApJ Suppl. Ser.*, 220, 15
Pietrinferni A., Cassisi S., Salaris M., Castelli F., 2006, *ApJ*, 642, 797
Pietrzyński G., et al., 2012, *Nature*, 484, 75
Smolec R., 2005, *Acta Astron.*, 55, 59
Smolec R., 2015, *EPJ Web of Conferences*, 101, 06059
Smolec R., 2016a, *MNRAS*, 456, 3475, (H5)
Smolec R., 2016b, *Comm. Konkoly Obs.*, 105, w druku, arXiv:1512.08420
Smolec R., Moskalik P., 2008a, *Acta Astron.*, 58, 193

Smolec R., Moskalik P., 2008b, *Acta Astron.*, 58, 233
Smolec R., Moskalik P., 2012, *MNRAS*, 426, 108, **(H2)**
Smolec R., Moskalik P., 2014, *MNRAS*, 441, 101, **(H3)**
Smolec R., Śniegowska M., 2016, *MNRAS*, 458, 3561, **(H6)**
Smolec R., Moskalik P., Kolenberg, K., et al., 2011, *MNRAS*, 414, 2950
Smolec R., Soszyński I., Moskalik P., et al., 2012, *MNRAS*, 419, 2407, **(H1)**
Smolec R., Pietrzyński G., Graczyk D., et al., 2013, *MNRAS*, 428, 3034
Smolec R., Soszyński I., Udalski A., et al., 2015a, *MNRAS*, 447, 3756, **(H4)**
Smolec R., Soszyński I., Udalski A., et al., 2015b, *MNRAS*, 447, 3873
Suchomska K., Graczyk D., Smolec R., et al., 2015, *MNRAS*, 451, 5170
Soszyński I., et al., 2008, *Acta Astron.*, 58, 163
Soszyński I., et al., 2010, *Acta Astron.*, 60, 17
Soszyński I., et al., 2011a, *Acta Astron.*, 61, 1
Soszyński I., et al., 2011b, *Acta Astron.*, 61, 285
Soszyński I., et al., 2014, *Acta Astron.*, 64, 177
Stellingwerf R.F., 1975, *ApJ*, 195, 441
Stellingwerf R.F., 1982, *ApJ*, 262, 330
Stothers R.B., 2006, *ApJ*, 652, 643
Udalski A., Szymański M.K., Szymański G., 2015, *Acta Astron.*, 65, 1

Warszawa, 5.04.2016

Radosław Smolec

Smolec