Autoreferat

1. Imię i Nazwisko **Andrzej Baran**
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.
   mgr astronomii, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, 2001
   Efekt odbicia a parametry układów podwójnych
   dr nauk fizycznych w dyscyplinie astronomia, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Toruń, 2007
   Wielobarwna fotometria pulsujących podkarłów typu B
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych.
   Uniwersytet Pedagogiczny im. Komisji Edukacji Narodowej w Krakowie, od 2001
   Missouri State University, USA, 2011-2013
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

   Identyfikacja modów pulsacji gorących podkarłów typu B z wykorzystaniem danych satelitarnych.

   b) (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa)

   H1. Reed M.D., Kawaler S.D., Østensen R.H., Bloemen S., **Baran A.**, Telting J.H., Silvotti R., Charpinet S., Quint A.C., Handler G., Gilliland R.L., Borucki W.J., Koch D.G., Kjeldsen H., Christensen-Dalsgaard J.
   2010, MNRAS, 409, 1496
   First Kepler results on compact pulsators - III. Subdwarf B stars with V1093 Her and hybrid (DW Lyn) type pulsations

   H2. **Baran A.S.**, Kawaler S.D., Reed M.D., Quint A.C., O'Toole S.J., Østensen R.H., Telting J.H., Silvotti R., Charpinet S., Christensen-Dalsgaard J., Still M., Hall J.R., Uddin K.
   2011, MNRAS, 414, 2871
   First Kepler results on compact pulsators - VII. Pulsating subdwarf B stars detected in the second half of the survey phase

   H3. Reed M.D., **Baran A.**, Quint A.C., Kawaler S.D., O'Toole S.J., Telting J., Charpinet S., Rodriguez-Lopez C., Østensen R.H., Provencal J.L., Johnson E.S., Thompson S.E., Allen C., Middour C.K., Kjeldsen H., Christensen-Dalsgaard J.
   2011, MNRAS, 414, 2885
   First Kepler results on compact pulsators - VIII. Mode identifications via period spacings in g-mode pulsating subdwarf B stars

   H4. **Baran A.S.**
   2012, AcA, 62, 179
   Mode Identification in the Pulsating Subdwarf B Star KIC 2697388

H5. Telting J.H., Østensen R.H., **Baran A.S.**, Bloemen S., Reed M.D., Oreiro R., Farris L., Ottosen T.A., Aerts C., Kawaler S.D., Heber U., Prins S., Green E.M., Kalomeni B., O'Toole S.J., Mullally F., Sanderfer D.T., Smith J.C., Kjeldsen H.
2012, A&A, 544, 1
Three ways to solve the orbit of KIC 11558725: a 10-day beaming sdB+WD binary with a pulsating subdwarf

H6. **Baran A.S.**, Reed M.D., Stello D., Østensen R.H., Telting J.H., Pakstiene E., O'Toole S.J., Silvotti R., Degroote P., Bloemen S., Hu H., Van Grootel V., Clarke B.D., Van Cleve J., Thompson S.E., Kawaler S.D.
2012, MNRAS, 424, 2686
A pulsation zoo in the hot subdwarf B star KIC 10139564 observed by Kepler

H7. **Baran A.S.**, Winans A.
2012, AcA, 62, 343
Mode identification of the three pulsating subdwarf B stars via multiplets and period spacing

H8. Reed M.D., **Baran A.**, Østensen R.H., Telting J.H., O'Toole S.J.
2012, MNRAS, 427, 1245
The discovery of two pulsating subdwarf B stars in NGC 6791 using Kepler data

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

TŁO NAUKOWE

1. Przedmiot badań

Przedmiotem moich badań są gorące podkarły typu widmowego B (sdB). Obecnie uważa się, że prekursorzy tych gwiazd na ciągu głównym, mają masę około jednej masy Słońca. Po wypaleniu wodoru w jądrze, ewolucja tych gwiazd w kierunku gałęzi czerwonych olbrzymów jest podobna do ewolucji Słońca. Różnicą jest jednak odrzucenie wodorowej otoczki, tuż przed, lub w czasie błysku helowego, które to powoduje, że gwiazda ląduje w niebieskiej części gałęzi horyzontalnej stając się gorącym podkarłem. Masy gwiazd sdB wynoszą około 0.5 masy Słońca, przy czym masa wodorowej otoczki jest w nich mniejsza niż 0.01 masy Słońca. Typowe temperatury efektywne oraz logarytm przyspieszenia siły ciężkości na powierzchni zawierają się odpowiednio w przedziałach: 20000-40000 K oraz 5.0-6.0 dex. Zgodnie z modelami ewolucyjnymi, w jądrach gwiazd sdB następuje fuzja helu w węgiel. Ze względu na znikomą masę wodorowej otoczki, po wypaleniu helu w jądrze, obiekty sdB podążają bezpośrednio w kierunku ścieżki stygnięcia białych karłów, bez wchodzenia na tzw. gałąź asymptotyczną. Szczegóły ewolucji tych gwiazd zostały dość szeroko opisane w publikacji Hebera (2009).

2. Historia badań gwiazd sdB

Pierwsze gwiazdy sdB zostały przypadkowo odkryte przez Humasona i Zwicky'ego (1947), choć nie potrafili oni opisać ich natury. Dopiero Greenstein (1952) poprawnie zidentyfikował je jako gorące podkarły. Początkowe badania tych gwiazd prowadzone były w celu wyznaczenia podstawowych parametrów takich jak temperatury efektywne, przyspieszenia siły ciężkości na powierzchni czy skład chemiczny. Badania te opierały się na wielobarwnej fotometrii oraz spektroskopii, a także obserwacjach satelitarnych w ultrafiolecie. Przykładem takich badań jest seria 11 publikacji pod wspólnym tytułem "*Studies of hot B subdwarfs*", z których pierwsza

opublikowana została przez Bergeron i in. (1984). Po odkryciu gwiazd sdB w układach podwójnych, możliwe było niezależne wyznaczenie parametrów tych gwiazd poprzez modelowanie krzywych zmian blasku i prędkości radialnych.

W 1997 roku pojawiły się pierwsze wyniki obliczeń modelowych, z których wynikało, że gwiazdy sdB mogą pulsować (Charpinet i in. 1997). Autorzy ci wskazali, iż mechanizm κ działający w podfotosferycznej warstwie o podwyższonej metaliczności jest w stanie wzbudzić oscylacje w modach ciśnieniowych. Istnienie takiej podfotosferycznej warstwy o podwyższonej metaliczności jest możliwe dzięki dwóm zjawiskom, promienistej lewitacji oraz grawitacyjnemu osiadaniu. Przewidywane okresy pulsacji były rzędu minut.

Niemal w tym samym czasie, Kilkenny i in. (1997) odkryli pierwszą pulsującą gwiazdę sdB (dalej sdBV). W kolejnych latach opublikowano serię kilkunastu publikacji, w których donoszono o odkrywaniu kolejnych gwiazd typu, np. Koen i in. (1997, 1998, 1999). Wszystkie odkrywane gwiazdy sdBV miały okresy pulsacji rzędu minut oraz obserwowane amplitudy rzędu 1% (od kilku do kilkudziesięciu części na tysiąc, dalej ppt - ang. *parts per thousand*). Kilka lat później, Green i in. (2003) odkryli, że gwiazdy sdB pulsują także w modach grawitacyjnych o okresach od 30 minut do 2 godzin z obserwowanymi amplitudami znacząco poniżej 1% (typowo 1 ppt). Obliczenia teoretyczne (Fontaine i in. 2003) wskazywały, że za niestabilność modów grawitacyjnych jest odpowiedzialny ten sam mechanizm κ co w przypadku modów ciśnieniowych. Obserwacje wskazują, że gorętsze i z silniejszą grawitacją na powierzchni gwiazdy sdBV pulsują w modach ciśnieniowych (p), podczas gdy chłodniejsze i o mniejszej grawitacji na powierzchni pulsują w modach grawitacyjnych (g). Te dwie klasy pulsujących gorących podkarłów określa się obecnie jako gwiazdy typu V361 Hya (pulsujące w modach p) i gwiazdy typu V1093 Her (pulsujące w modach g). Obszary występowania tych dwóch typów pulsujących gwiazd sdB nakładają się częściowo na siebie na wykresie H-R, jest więc możliwe istnienie gwiazd hybrydowych, w których wzbudzone są obydwa rodzaje modów. Pierwszą taką gwiazdę odkryli Schuh i in. (2006), choć obserwowany był w niej tylko jeden mod grawitacyjny. Niezależnie, Baran i in. (2005) odkryli obecność wielu modów obu typów w gwieździe Balloon 090100001. Hybrydowe pulsujące gorące podkarły określa się mianem gwiazd typu DW Lyncis.

Do niedawna, dzięki obserwacjom naziemnym, znanych było ponad 50 obiektów pulsujących w modach ciśnieniowych oraz ponad 20 obiektów pulsujących w modach grawitacyjnych. Ze względu na charakterystykę obserwowanych pulsacji (amplitudy i okresy pulsacji), mody ciśnieniowe są łatwiejsze do wykrycia z użyciem obserwacji naziemnych niż mody grawitacyjne, a więc powyższa dysproporcja liczby obiektów jest po części wynikiem efektu selekcji obserwacyjnej.

3. Asterosejsmologia

Odkrycie pulsacji w gwiazdach sdB otwarło możliwość zastosowania *asterosejsmologii* do badania wnętrz tych gwiazd, a tym samym do testowania dla nich modeli ewolucyjnych. Jest to bardzo ważne z uwagi na to, że kanały ewolucyjne, które prowadzą do powstania gwiazd sdB, nie są dobrze poznane. Asterosejsmologia (modelowanie sejsmiczne) to narzędzie, dzięki któremu, poprzez porównanie obserwowanego widma pulsacji z teoretycznym, można testować modele budowy wewnętrznej gwiazd. W szczególności można także wyznaczyć parametry globalne tych gwiazd takie jak masa czy promień. Z punktu widzenia mechanizmu wzbudzania pulsacji gwiazd sdBV ważniejsze jest to, że dzięki asterosejsmologii można będzie oszacować masę wodorowej otoczki czy sprawdzić efektywność promienistej lewitacji i grawitacyjnego osiadania, które

zmieniają skład chemiczny warstw podpowierzchniowych.

Aby móc porównać obserowowane widmo częstości z widmem wyliczonym dla danego modelu, musimy wiedzieć jakie mody (w sensie ich geometrii) odpowiadają obserwowanym częstościom. Problem identyfikacji modów omówiony jest poniżej. Warto jednakże wspomnieć, że czasami w modelowaniu obserwowanego widma częstości stosuje się takie podejście, w którym w pierwszym przybliżeniu nie korzysta się z żadnej identyfikacji. Procedura polega na tym, że za miarę dobroci modelu uznaje się odpowiednio ważoną sumę różnic (lub ich kwadratów) między obserwowanymi częstościami, a najbliższymi im częstościami modelowymi (np. Brassard i in. 2001). W podejściu tym siatka modeli musi być bardzo gęsta w przestrzeni parametrów gwiazdowych. Niestety, podejście to nie gwarantuje, że uzyskane jako wynik najlepszego dopasowania identyfikacja modów i model są poprawne.

W modelowaniu sejsmicznym duże znaczenie ma dobra znajomość globalnych parametrów gwiazdy, gdyż to pozwala znacznie zawęzić siatkę badanych modeli. Dlatego jeśli gwiazda należy do układu podwójnego, można wykorzystać ten fakt do dokładnego wyznaczenia parametrów składników układu poprzez analizę krzywej blasku (jeśli gwiazda jest składnikiem układu zaćmieniowego) i/lub prędkości radialnych.

4. Identyfikacja modów pulsacji

Identyfikacja modów pulsacji byłaby stosunkowo prosta, gdybyśmy mogli obserwować dysk gwiazdy z dobrą rozdzielczością. Niestety, ze względu na olbrzymie odległości gwiazd jest to obecnie możliwe tylko dla najbliższej gwiazdy — Słońca. Dla gwiazd efekt pulsacji mierzy się (fotometrycznie) uśredniony po widocznej tarczy, co w praktyce ogranicza obserwowane mody do modów niskich stopni ℓ. Mody nieco wyższych stopni można obserwować w profilach linii widmowych, zwłaszcza w gwiazdach rotujących szybko. Geometrię modów opisuje się za pomocą harmonik sferycznych identyfikowanych za pomocą trzech liczb kwantowych: stopnia modu ℓ, rzędu modu m i rzędu radialnego n. Obecnie stosuje się kilka grup metod identyfikacji modów, które znajdują zastosowanie dla różnych typów gwiazd pulsujących. Należą do nich:

1. *Metody wykorzystujące relacje asymptotyczne.* Mody p wysokich rzędów radialnych mają częstości równoodstępne dla modów o tym samym ℓ i kolejnych wartości n. Podobną równoodstępność, tym razem w okresie, obserwuje się dla modów g wysokich rzędów radialnych. Równoodstępność relacji asymptotycznych może być zakłócona np. poprzez pułapkowanie modów.

2. *Metody wykorzystujące rozszczepienia rotacyjne.* Mody o tych samych wartościach ℓ i n są $2\ell+1$-krotnie zdegenerowane i mają te same częstości pulsacji. Degenerację może znieść rotacja i wtedy mody mają różne częstości zależne od rzędu m, do którego rozszczepienie rotacyjne jest proporcjonalne. Równoodstępność rozszczepionych rotacyjnie multipletów może być zakłócona np. efektami szybkiej rotacji; zależy też od wewnętrznej budowy gwiazdy. Obserwacje rozszczepień rotacyjnych dają więc potencjalnie duże możliwości badania wewnętrznej struktury gwiazdy.

3. *Metoda wykorzystująca określone stosunki okresów pulsacji.* Metoda ta wykorzystywana jest w praktyce głównie do gwiazd z dominującymi modami radialnymi, jeśli obserwuje się więcej niż jeden mod radialny. Chodzi głównie o wielomodalne klasyczne gwiazdy pulsujące: cefeidy, gwiazdy RR Lyrae i HADS-y (gwiazdy typu δ Scuti o dużych amplitudach).

4. *Metody wykorzystujące diagnostyczne diagramy fotometryczne i/lub spektroskopowe.* To bardzo szeroka klasa metod, w której najczęściej wykorzystuje się amplitudy i fazy zmian blasku (obserwacje wielobarwne) i/lub prędkości radialnych lub zmiany profili linii widmowych.

Warto zwrócić uwagę, że o ile ostatnia klasa metod wymaga wykonania wielobarwnych obserwacji fotometrycznych i/lub spektroskopowych, metody klas 1, 2 i 3 używają jedynie częstości obserwowanych modów, a zatem do ich wykorzystania wystarczają jednobarwne obserwacje fotometryczne. Oczywiście możliwe jest łączne, bądź niezależne stosowanie różnych metod jeśli tylko dysponuje się odpowiednimi obserwacjami.

W badaniach gwiazd sdBV, na podstawie obserwacji naziemnych, próbowano wykorzystać wszystkie wymienione wyżej metody. Wiarygodną identyfikację modów zdołano uzyskać jednak tylko dla kilku gwiazd. Nie udało się na przykład zastosować metody 1 gdyż w żadnej gwieździe sdBV nie wykryto wystarczającej liczby modów grawitacyjnych, aby możliwe było wskazanie sekwencji równodstępnej w okresach. Metodę 2 zastosowano w gwieździe Balloon 090100001 dzięki temu, że wykryto dla niej dwa pełne multiplety (triplet i kwintuplet), które pozwoliły na niezależne określenie zarówno stopni modów ℓ jak i ich rzędów azymutalnych m (Baran i in. 2005, 2009). Metodę 2 rzadko dało się jednak zastosować, gdyż w niewielu gwiazdach obserwowano multiplety, a jeśli już, to raczej niepełne. Dla Balloona 090100001 można też było zastosować metodę 4 (Baran i in. 2008) dzięki temu, że istniała dla tej gwiazdy dobra fotometria wielobarwna i spektroskopia. W ten sposób jednoznacznie lub prawie jednoznacznie zostało zidentyfikowanych kilka modów o największych amplitudach. Ponieważ dominujący mod w Balloon 090100001 jest radialny, można było także wykorzystać stosunki okresów do dyskusji jego rzędu radialnego (metoda 3, Baran i in. 2005). Innym obiektem, dla którego zastosowano metodę 4 to QQ Vir (Baran i in. 2010). Natomiast w gwieździe RAT 0455+1305 (Baran i in. 2011a) wykorzystano stosunek okresu radialnych modów ciśnieniowych do wyznaczenia ich rzędów radialnych.

Dla ogromnej większości gwiazd sdBV, wstępna identyfikacja modów, która mogłaby być zastosowana do konstruowania modeli teoretycznych, nie została jednak przeprowadzona. Jest to głównie spowodowane tym, że gwiazdy sdB są obiektami niezbyt jasnymi, przez co uzyskanie danych o odpowiedniej precyzji, zwłaszcza obserwacji spektroskopowych, nie jest w ich przypadku łatwe. Tym bardziej, że okresy pulsacji są krótkie, a więc ekspozycje też muszą być względnie krótkie. Dlatego dużą nadzieję na postęp w badaniu gwiazd sdBV wiązano — jak się okazało słusznie — z misją *Kepler*. Podstawowymi zaletami obserwacji sondy *Kepler* w porównaniu z obserwacjami naziemnymi jest bowiem ich: (i) bardzo dobre pokrycie w czasie sięgające 95%, co eliminuje problem aliasów w widmie fourierowskim, (ii) długi czas obserwacji, co zapewnia dobrą rozdzielczość w częstości, (iii) doskonała precyzja pomiarów, co daje bardzo niski poziom detekcji.

5. Misja *Keplera*

W 2009 roku, wraz z umieszczeniem na orbicie okołosłonecznej sondy *Kepler* (Borucki i in. 2010), nastąpił znaczny postęp w badaniu gwiazd pulsujących. Głównym zadaniem tej sondy jest wykrywanie tranzytów planet typu ziemskiego wokół chłodnych gwiazd. Jednak ze względu na specyfikę prowadzonych obserwacji, jest ona także idealna do obserwacji gwiazd pulsujących.

Do wyznaczania okresów i amplitud pulsacji wykorzystuje się analizę fourierowską. Precyzja wyznaczenia tych dwóch wielkości jest tym lepsza, im prowadzone obserwacje są dłuższe i dokładniejsze oraz im mniej jest przerw w obserwacjach. Oczywistym jest, że obserwacje naziemne, nawet w przypadku kampanii, w których obserwuje kilka teleskopów, nie pozwalają uzyskać takiego pokrycia czasowego jakie możliwe jest z orbity. Sonda *Kepler* prowadzi obserwacje wybranego fragmentu nieba (około 100 stopni kwadratowych w gwiazdozbiorach Łabędzia, Lutni i Smoka) nieprzerwanie od 2009 roku, a jej misja została niedawno przedłużona o kilka lat. Jedyne przerwy w danych spowodowane są przez zaplanowane przesyłanie zebranych obserwacji w odstępach miesięcznych, a także niezaplanowane krótkie przejścia sondy w tryb awaryjny, podczas których obserwacje nie są prowadzone.

Sonda *Kepler* prowadzi pomiary w dwóch kadencjach. Czas ekspozycji krótkiej kadencji wynosi 58.85 sekund (kadencja minutowa), natomiast długiej kadencji to 1765.8 sekundy (kadencja 30-minutowa). W przypadku gwiazd sdBV, których typowe okresy pulsacji w modach p wynoszą kilka minut (4-8 mHz), tylko dane w krótkich kadencjach zapewniają właściwe próbkowanie zmian jasności. Wykrywane częstości modów są wówczas mniejsze od częstości Nyquista, która dla krótkiej kadencji wynosi 8.496 mHz. Dla obserwacji w długiej kadencji częstotliwość Nyquista wynosi 0.283 μHz, co oznacza, że po pierwsze amplitudy modów p są znacznie zredukowane w stosunku do rzeczywistych, a po drugie nie można jednoznacznie określić ich częstości. Sytuacja jest nieco lepsza dla modów g, choć dla nich ten problem jest również częściowo istotny.

Jednym "mankamentem" obserwacji sondy *Kepler* jest to, że prowadzi ona obserwacje tylko w jednym szerokim paśmie widmowym. Ma to oczywiście wpływ na możliwości stosowania metod identyfikacji modów i dlatego też metoda 4, w której wykorzystuje się diagramy diagnostyczne i która okazała się być skuteczna dla gwiazd sdBV, nie może być zastosowana dla wyników otrzymanych z użyciem danych z sondy *Kepler*, chyba że zostanie uzupełniona o odpowiednie dane naziemne.

OMÓWIENIE WYNIKÓW PRAC WCHODZĄCYCH W SKŁAD ROZPRAWY

Wszystkie prace włączone do niniejszej rozprawy habilitacyjnej (oraz część prac spoza rozprawy) zawierają wyniki uzyskane na bazie danych z sondy *Kepler* (prace **H1-H8**) oraz satelity *CoRoT* (tylko praca **H3**). Tematycznie koncentrują się one na identyfikacji modów za pomocą metod, które można użyć dysponując bardzo dokładnymi obserwacjami fotometrycznymi w jednym paśmie, czyli metod 1, 2 i 3, omówionych powyżej.

I. Odkrycie nowych zmiennych typu sdBV

Jak już zostało wspomniane, w przypadku gwiazd sdBV tylko krótkie kadencje zapewniały odpowiednie próbkowanie zmian jasności i wykrycie ewentualnych pulsacji. Chociaż elektronika sondy *Kepler* została przygotowana na rejestrację jasności około 150 000 gwiazd, z uwagi na ograniczenia telemetrii tylko 512 z nich mogło być monitorowanych w krótkiej kadencji. Z tego powodu wprowadzono ograniczenia na liczbę gwiazd podejrzewanych o dany typ zmieności, które mogły być rejestrowane we wspomnianej kadencji. W pierwszym roku funkcjonowania sondy *Kepler*, podczas tzw. fazy przeglądowej (*survey phase*), obserwowane obiekty można było zmieniać co miesiąc. W ciągu tego pierwszego roku obserwowano w sumie 61 gorących podkarłów

typów sdO i sdB. Wynikiem tego etapu obserwacji *Keplera* było odkrycie pulsacji **w 14 gwiazdach sdB**. Zostały one przedstawione w pracach Østensena i in. (2010a, 2011a). Z pierwszej analizy wynikało, że ze wspomnianej próbki tylko jedna gwiazda jest gwiazdą typu V361 Hya, 12 to gwiazdy typu V1093 Her, a jedna jest gwiazdą hybrydową. W miarę jak przybywało danych z sondy *Kepler* obraz zmienności dla tych gwiazd zmienił się dzięki odkrywaniu modów o coraz mniejszych amplitudach. Nieco później pulsacje odkryto też jeszcze w trzech innych gwiazdach obserwowanych przez *Keplera*, a należących do starej gromady otwartej NGC 6791 (Pablo i in. 2012, **H8**), co zwiekszyło próbkę gwiazd sdBV obserwowanych przez *Keplera* do 17.

W próbce tej jest tylko jedna gwiazda (KIC 10139564), której widmo fourierowskie jest zdominowane przez mody p. Pierwsza analiza obserwacji tej gwiazdy została wykonana przez Kawalera i in. (2010a). Poza modami p wykryto w niej również pojedynczy mod o częstości w obszarze modów g. W jej widmie fourierowskim nie wykryto multipletów. Nie stwierdzono też, aby obiekt ten był składnikiem układu podwójnego. Obserwacje tej gwiazdy były ponownie analizowane w pracy **H6**. Szczegółowe wyniki tych analiz zostaną przedstawione poniżej. Warto tylko wspomnieć, że w gwieździe tej znalezione zostały mody g; jest to więc gwiazda hybrydowa.

Pozostałe 16 gwiazd sdBV to gwiazdy, w których dominują mody g, choć w ponad połowie z nich znaleziono mody p o bardzo małych amplitudach. Są to więc także gwiazdy hybrydowe. Dziesięć gwiazd sdBV, które pulsują głównie w modach g zostało przeanalizowanych w pracach **H1** oraz **H2**. Poza modami g, dla większości tych gwiazd wykryto również sygnał w rejonie modów p. Ze względu na niewielkie amplitudy tego sygnału, nie można było na początku jednoznacznie stwierdzić, czy są to mody p, czy też artefakty mające swoje źródło w aparaturze sondy. Kolejne dwie gwiazdy sdBV, w których widmach fourierowskich wykryto tylko mody g, zostały przedstawione przez Kawalera i in. (2010b). Analiza pokazała, że obie gwiazdy mają podobne widma fourierowskie z niewielką liczbą wykrytych pulsacji, a ponadto znajdują się w układach podwójnych z białymi karłami o okresach orbitalnych równych około 10 godzin. Pablo i in. (2011) opublikowali odkrycie kolejnej gwiazdy, która jest składnikiem układu podwójnego o zbliżonym okresie orbitalnym. Wspomniana gwiazda sdBV oraz dwie inne wykryte w gromadzie NGC 6791 (**H8**) to także gwiazdy pulsujące w modach g. Ze względu na niewielką jasność tych gwiazd oraz jednomiesięczne obserwacje, które dla nich wykonano, udało się wykryć w ich fotometrii zaledwie kilka modów.

Ostatnia gwiazda sdBV z dominującymi modami g to KIC 9472174. Jest ona o tyle ciekawa, że jest składnikiem zaćmieniowego układu podwójnego. Jej krzywa zmian blasku wykazuje bardzo silny efekt odbicia oraz płytkie zaćmienia. Można ją więc zaliczyć do bardzo małej grupy rozdzielonych zaćmieniowych układów podwójnych typu HW Vir złożonych z gorącego podkarła i karła późnego typu M lub brązowego karła. Grupa ta liczy obecnie tylko 12 układów (Zorotovic i Schreiber 2013). Obok NY Vir = PG 1336-018 (Kilkenny i in. 1998), KIC 9472174 jest jedynym znanym układem tego typu z pulsującym podkarłem. Krzywą blasku tej gwiazdy otrzymaną z sondy *Kepler* przeanalizowali Østensen i in. (2010b). Po usunięciu zmian jasności związanej z efektami bliskości i zaćmieniem okazało się, że gwiazda ta wykazuje także pulsacje, zarówno w modach p jak i g. Niestety, ze względu na trudność w idealnym usunięciu trendu orbitalnego, wiarygodna analiza fourierowska nie była możliwa.

Z powyższego opisu widać, że wszystkie gwiazdy sdBV wykryte w polu sondy *Kepler* pulsują w modach g, które dominują w 15 gwiazdach. Tylko jedna gwiazda wykazuje dominację modów p, natomiast większość gwiazd ma naturę hybrydową. Jest to obraz pulsacji znacząco inny od tego, jaki uzyskaliśmy na podstawie obserwacji naziemnych, przed rozpoczęciem obserwacji

przez *Keplera*. W większości przypadków, w danych z sondy *Kepler* wykryto dużą liczbę częstości w rejonie modów g, podczas gdy w obserwacjach naziemnych wykrywano ich zaledwie kilka. Jest to efekt wysokiej precyzji danych oraz ciągłości obserwacji, które przekładają się na znacznie niższy poziom szumu w widmie pulsacyjnym. Próbka z *Keplera* nie jest jeszcze statystycznie duża, niemniej można się już chyba pokusić o wniosek, że gwiazdy sdBV pulsujące w modach grawitacyjnych są powszechniejsze niż te, które pulsują w modach p. To, że z obserwacji naziemnych znaliśmy mniej tych pierwszych, jest zapewne wynikiem selekcji obserwacyjnej oraz faktu, że w ogromnej większości mody g mają bardzo małe amplitudy.

Warto zwrócić tu jeszcze uwagę na dwa dość ciekawe obiekty, KIC 10670103 oraz KIC 5807616. Pierwszy z nich jest gwiazdą sdBV o najniższej temperaturze efektywnej. Okresy pulsacji są względnie długie (krótsze niż 4,5 godziny), co bardzo utrudnia ich wykrycie w ewentualnych danych zebranych z Ziemi. Obecne modele teoretyczne nie przewidują wzbudzenia modów pulsacji w tak chłodnych gwiazdach sdB. W przypadku KIC 5807616, kilkumiesięczne dane pozwoliły na odkrycie dwóch prawdopodobnych planet o rozmiarach Ziemi krążących wokół wspomnianej gwiazdy (Charpinet i in. 2011). Dwie częstości w widmie fourierowskim nie mogły zostać wytłumaczone jako mody pulsacji, ponieważ ich okresy były zbyt długie, a dokładna analiza potwierdziła, że amplitudy tych częstości można wytłumaczyć efektem odbicia występującym na powierzchniach tych planet.

II. Identyfikacja modów na podstawie relacji asymptotyczności

W publikacji **H1**, po raz pierwszy wskazano na możliwość wykrycia relacji asymptotyczności w gwiazdach sdB. Relacja ta została wcześniej odkryta dla np. białych karłów (Brassard i in. 1992) i okazała się być bardzo użyteczna do identyfikacji stopni modów grawitacyjnych. Zgodnie z tą relacją, gdy spełniony jest warunek $n \gg \ell$, okresy pulsacji dla kolejnych owertonów są równoodstępne, co dość łatwo można wykryć analizując okresy wykrytych modów. W ten sposób można łatwo zidentyfikować stopień modu (zob. omówienie metody 1 w punkcie 4 powyżej). Jak pokazali Charpinet i in. (2000), odległość w okresie pomiędzy kolejnymi owertonami stopnia $\ell = 1$ powinna wynosić około 200 sekund. I rzeczywiście, dla KIC 10670103 udało się wykryć taką relację. Okres pomiędzy kolejnymi owertonami stopnia $\ell = 1$ wynosi dla tej gwiazdy około 250 sekund. Niespodziewanie, wykryto również sekwencję owertonów stopnia $\ell = 2$ dla których, przewidywany przez relację asymptotyczności, równoodstępny okres wynosi 145 sekund ($= 250/\sqrt{3}$). Spośród 28 wykrytych częstości, dla 27 zidentyfikowano stopień modu, a także arbitralnie określono rząd radialny.

Tego typu własności gwiazd sdBV nie udało się odkryć w danych zebranych z teleskopów naziemnych, co jest oczywiście związane z ograniczeniami tych obserwacji. Wykryta relacja asymptotyczności dla jednego obiektu pokazała podobieństwo gwiazd sdB do białych karłów, a także potwierdziła teoretyczne przewidywania Charpineta i in. (2000). Otworzyło to możliwość wykorzystania tej relacji do identyfikacji modów pulsacji w innych gwiazdach i do konstruowania wiarygodnych modeli teoretycznych tych gwiazd oraz asterosejsmologii.

Relację asymptotyczności dla modów $\ell = 1$ oraz 2 zaobserwowano także dla dwóch gwiazd analizowanych przez Kawalera i in. (2010b), pięciu gwiazd przedstawionych w publikacji **H2**, a także trzech gwiazd wykrytych w gromadzie otwartej NGC 6791 (Pablo i in. 2011, **H8**). Niestety, relacja asymptotyczności nie umożliwia jednoznacznego zidentyfikowania rzędu radialnego, jednak wiedząc, że są to kolejne owertony, określenie absolutnych wartości rzędu

radialnego powinno być dość łatwe, pod warunkiem zbudowania wiarygodnego modelu gwiazdy.

Wyniki identyfikacji stopnia modów pulsacji z wykorzystaniem relacji asymptotycznych dla wszystkich gwiazd sdBV pulsujących w modach grawitacyjnych i obserwowanych przez jeden miesiąc przez sondę *Kepler* oraz jednej gwiazdy obserwowanej przez satelitę *CoRoT* przedstawiono w publikacji **H3**. Dla wszystkich analizowanych obiektów otrzymano równoodstępność w okresie zawierającą się w przedziale 230-270 sekund dla owertonów stopnia $\ell = 1$ oraz 133-157 sekund dla owertonów stopnia $\ell = 2$. Pozwoliło to na identyfikację większości wykrytych modów w każdym z przedstawionych obiektów. Ponieważ niektóre z obserwowanych modów nie pasowały do sekwencji modów stopnia $\ell = 1$ lub 2 wywnioskowano, że mogą być to mody wyższych stopni. Niestety, nie udało się jednoznacznie zidentyfikować żadnego z tych modów.

Wyznaczone odstępstwa od równoodstępności okazały się dużo mniejsze niż się spodziewano, co sugeruje, że pułapkowanie modów nie jest tak znaczące jak wskazywały na to modele teoretyczne. Oznacza to, że chemiczna stratyfikacja tych gwiazd również nie jest znacząca. To z kolei sugeruje, że rejony, w których następuje silna zmiana składu chemicznego, są rozmyte. Wyniki analizy przedstawionej w **H3** w dość wyraźny sposób pokazały, że obecne modele teoretyczne nie potrafią dokładnie odtworzyć obserwowanego widma pulsacji. Także wbrew tym modelom, nie stwierdzono obserwacyjnie istnienia zależności równoodstępności w okresach od temperatury efektywnej lub przyspieszenia siły ciężkości na powierzchni gwiazdy.

Wyniki pierwszej identyfikacji modów pulsacji z użyciem relacji asymptotyczności dla gwiazdy KIC 11558725 obserwowanej przez 15 miesięcy zostały przedstawione w publikacji **H5**. Dzięki tak długiemu szeregowi czasowemu wykryto ponad 160 modów; dla dość dużej ich liczby udało się zidentyfikować stopień modu. Jej widmo pulsacyjne jest na tyle gęste i skomplikowane, że dwie sekwencje modów dla $\ell = 1$ i 2 nie tłumaczą wszystkich wykrytych modów. Może to oznaczać, że pozostałe mody są wyższych stopni. Niestety, sekwencje modów dla $\ell > 2$ nie zostały jednoznacznie zidentyfikowane. Diagram echelle wyznaczony dla modów stopnia $\ell = 1$ wykazuje cechę, która została przewidziana teoretycznie i jest związana z pułapkowaniem modów. Opisuje ona odstępstwo od liniowej relacji asymptotyczności. Wielkość tej odchyłki nie zgadza się jednak z teorią; ta obserwowana jest mniejsza zarówno w szerokości jak i głębokości, co potwierdza wnioski wyciągnięte w publikacji **H3**, a dotyczące nieefektywnego pułapkowania modów.

KIC 11558725 to także układ podwójny składający się z gwiazdy sdBV oraz białego karła. Okres orbitalny tego układu wynosi około 10 dni. W analizie danych dla tej gwiazdy konieczne było uwzględnienie tzw. opóźnienia Rømera. Opóźnienie to usuwa wpływ skończonej prędkości światła i jest odpowiednikiem poprawki barycentrycznej w Układzie Słonecznym, którą stosuje się aby uwzględnić ruch orbitalny sondy na orbicie okołosłonecznej. Opóźnienie Rømera powoduje pojawianie się dodatkowych częstości rozmieszczonych symetrycznie wokół głównej częstości i odległych o częstość orbitalną. Częstości te tworzą więc równoodstępne struktury, które można mylnie zintepretować jako rotacyjnie rozszczepione multiplety.

III. Identyfikacja modów z wykorzystaniem rozszczepień rotacyjnych

Jak wspomniano wyżej (metoda 2) do identyfikacji modów można wykorzystać fakt rozszczepienia rotacyjnego modów. Każdy mod stopnia $\ell > 0$ jest $(2\ell + 1)$-krotnie zdegenerowany. Degenerację tą może znieść rotacja gwiazdy. W takim wypadku rozszczepione rotacyjnie powinny być wszystkie mody stopnia $\ell > 0$. Wykrycie takich multipletów jest bardzo skutecznym sposobem identyfikacji modów. Po liczbie rozszczepionych częstości możemy łatwo odgadnąć stopień modu,

a sekwencja ich częstości umożliwia też zidentyfikowanie rzędów azymutalnych m. Metoda ta nie wymaga ani skomplikowanych obliczeń ani innych założeń i bazuje jedynie na liczbie rozszczepionych modów. Ponadto, skoro rotacja wpływa na zniesienie degeneracji, to mierząc wielkość rozszczepienia pomiędzy kolejnymi składnikami multipletów i zakładając wartość stałej Ledoux z modeli, możemy dokładnie wyliczyć okres rotacji gwiazdy. Z kolei odchyłki od równoodstępności dają np. możliwość badania wewnętrznej rotacji i/lub stratyfikacji pierwiastków we wnętrzu. Jedyny problem związany z tą metodą jest taki, że w sytuacji kiedy obserwowany jest niepełny multiplet, możemy zaniżyć wartość stopnia ℓ.

Dotychczas, dla obserwacji z Ziemi, tylko dla obiektu Balloon 090100001 udało się jednoznacznie zidentyfikować mody za pomocą tej metody, gdyż w gwieździe tej widoczne są dwa multiplety (Baran i in. 2009). Pozwoliło to na łatwe i pewne zidentyfikowanie 8 częstości, a także oszacowanie okresu rotacji gwiazdy, który jest rzędu 7 dni. Dla pozostałych gwiazd sdBV nie wykryto przekonywujących multipletów.

Do uzyskania wiarygodnej detekcji rozszczepionych modów w gwiazdach sdBV obserwowanych przez *Keplera* konieczne było poczekanie aż szeregi czasowe będą dostatecznie długie. Przykładem jest gwiazda KIC 10139564, jedyna z dominującymi modami ciśnieniowymi. Mimo, że jednomiesięczna krzywa blasku tej gwiazdy analizowana była przez Kawalera i in. (2010a), dopiero analiza przedstawiona w pracy **H6** pozwoliła wykryć rotacyjnie rozszczepione mody. Analiza ta została przeprowadzona na danych z 15 miesięcy. Dla tak długich obserwacji otrzymano bardzo dużą rozdzielczość częstości w widmie pulsacyjnym oraz niski próg detekcji równy 33 ppt. Widmo pulsacyjne tego obiektu zawiera wiele własności, które łącznie nie były dotąd obserwowane w jednym obiekcie: mody grawitacyjne, mody ciśnieniowe oraz niezidentyfikowane mody o okresach porównywalnych z ciśnieniowymi, ale charakteryzujące się bardzo dużą zmiennością amplitud i/lub częstości, silne zagęszczenie modów ciśnieniowych oraz rozszczepienia rotacyjne niemal wszystkich modów. KIC 10139564 jest więc pierwszą gwiazdą, w której multiplety są powszechne. Rozszczepienie rotacyjne modów grawitacyjnych i ciśnieniowych nie jest identyczne, co jest odzwierciedleniem różnej wartości stałej Ledoux, a relacja pomiędzy tymi rozszczepieniami zgadza się z teorią. W analizie przedstawionej w pracy **H6** wykryto 57 modów, spośród których dla 47 — dzięki przypisaniu do rotacyjnie rozszczepionych multipletów — znane są wartości ℓ oraz m. Pomimo tego, że metoda 1 (relacje asymptotyczne) nie działa dla modów ciśnieniowych, wykorzystując metodę 2 udało się przeprowadzić identyfikację większości modów obserwowanych w tej gwieździe.

Wśród modów zidentyfikowanych w KIC 10139564 wykryto potencjalnych kandydatów na mody wyższych stopni, $\ell = 3$ oraz 4. Ze względu na efekt uśredniania (Dziembowski 1977), mody wyższych stopni ($\ell > 2$) powinny mieć niewielkie obserwowane amplitudy, zatem ich wykrycie w obserwacjach naziemnych jest dość trudne. Dane z sondy *Kepler* pozwalają wykrywać mody o amplitudach do kilku ppm, zatem można spodziewać się, że mody wyższych stopni mogą dać się zidentyfikować.

Zgodnie z modelami teoretycznymi (Charpinet i in. 2000), odstęp pomiędzy kolejnymi radialnymi owertonami modów ciśnieniowych powinien być rzędu 800 μHz. W przypadku KIC 10139564, niemal wszystkie mody ciśnieniowe zostały wykryte w przedziale niewiele większym niż 1000 μHz. Oznaczać to może, że wiele z wykrytych modów jest stopni $\ell > 2$. W widmie pulsacyjnym wykryto również mody, które charakteryzują się bardzo dużą zmiennością amplitudy i/lub częstości. Ich stochastyczna natura nie została potwierdzona i jak na razie nie wytłumaczono dlaczego mody w jednym obiekcie sdB różnią się stabilnością tak drastycznie. Podejmując próbę

wytłumaczenia tych niestabilności wykryto pewną techniczną własność, polegającą na tym, że z uwagi na poprawki barycentryczne do czasu dla równoodstępnych pomiarów, analizowane szeregi czasowe nie są idealnie równoodstępne w czasie. Efektem tego jest to, że maksima odpowiadające prawdziwej częstości f poniżej częstości Nyquista f_N oraz jej odbiciu $2f_N - f$, mają różne profile. Jeśli ten pierwszy jest symetryczny, ten drugi będzie rozmyty wskutek drobnych zmian częstości Nyquista, co może dawać obraz podobny do modu ze zmienną amplitudą/fazą. Poprawka barycentryczna działa więc jak filtr jednoznacznie wskazując, która częstość jest prawdziwa, a która jest odbiciem. Stwarza to możliwość jednoznacznej detekcji częstości wyższych od częstości Nyquista dla obserwacji *Keplera* w krótkiej kadencji, a takie mogą się zdarzać w gwiazdach sdB, czy pulsujących białych karłach. Dla obserwacji w długiej kadencji będzie to jednak miało znaczenie dla znacznie większej grupy gwiazd okresowych. Murphy i in. (2012) podali pełen formalizm filtrowania z użyciem poprawki barycentrycznej. Dla KIC 10139564 efekt ten pozwolił na wytłumaczenie dwóch rejonów występowania sygnału o skomplikowanej strukturze w widmie pulsacyjnym gwiazdy.

Rozszczepione mody, które posłużyły do identyfikacji modów wykorzystano także do wyznaczenia okresu rotacji gwiazdy, który oszacowano na około 25 dni. Tak długi okres potwierdza przypuszczenie, że gwiazdy sdB rotują powoli. Zbliżone okresy rotacji otrzymano także w przypadku trzech gwiazd przedstawionych przez Pablo i in. (2011, 2012). Obiekty te są składnikami układów podwójnych i przy założeniu, że siły pływowe zrównują okres rotacji z okresem orbitalnym, można było przewidzieć wielkość rotacyjnego rozszczepienia. Okazało się jednak, że multiplety z tak wyznaczonymi rozszczepieniami nie istnieją w widmach fourierowskich tych gwiazd. Wykryto jednak wiele multipletów o dość jednorodnym, ale znacznie mniejszym rozszczepieniu. Wskazywałoby to na asynchroniczność rotacji, gdyż wyznaczone okresy rotacji w przypadku tych trzech gwiazd były rzędu kilkudziesięciu dni, a nie 10 godzin, bo tyle wynoszą okresy orbitalne. Jest to dość niespodziewane odkrycie, ponieważ do tej pory sądzono, że siły pływowe w tak niewielkich gwiazdach jak sdB powinny dość szybko zsynchronizować okres rotacji z orbitalnym. Podobne wnioski wyciągnięto z analizy danych gwiazdy KIC 11558725 (**H5**). Jak już było wspomniane, gwiazda ta jest częścią układu podwójnego o okresie orbitalnym 10 dni. Na podstawie wykrytych multipletów w widmie fourierowskim wyznaczono okres rotacji tej gwiazdy na 18 dni.

IV. Identyfikacja modów z wykorzystaniem relacji asymptotyczności oraz rotacyjnych rozszczepień

Identyfikacja modów pulsacji może być znaczniej efektywniejsza jeżeli użyjemy równocześnie zarówno sekwencje równoodstępnych owertonów jak i rotacyjnie rozszczepione multiplety. Jest to możliwe w gwiazdach sdBV ze wzbudzonymi modami g. Jak do tej pory, udało się wykryć co najmniej cztery gwiazdy sdBV w polu sondy *Kepler*, w których obie te cechy występują jednocześnie.

W publikacji **H4** przedstawiono analizę obiektu pulsującego głównie w modach grawitacyjnych, KIC 2697388. Dla danych 9-miesięcznych wykryto 148 częstości, z których 122 to mody grawitacyjne. W odróżnieniu od identyfikacji modów tego obiektu przedstawionej w publikacji **H3**, opartej na miesięcznych obserwacjach, relacja asymptotyczności została wykorzystana równocześnie z multipletami, których około 10 udało się zidentyfikować. W tym przypadku, identyfikacja modów okazała się być bardziej wydajna niż np. dla KIC 11558725

(publikacja **H5**). Obie te własności uzupełniają się nawzajem. Np. multiplety ułatwiają analizę, gdy w pewnych rejonach częstości sekwencje równoodstępnych owertonów nie są kompletne, a dodatkowo występuje zagęszczenie modów. Natomiast relacja asymptotyczności działa wydajniej wśród modów, które nie zostały zidentyfikowane jako multiplety, ale tworzą kompletną sekwencję. W ramach przeprowadzonej analizy zidentyfikowano 89 modów, którym przypisano stopnie $\ell = 1$ lub 2, co stanowi 60% ogólnej liczby wykrytych częstości. Wyznaczone rozszczepienie rotacyjne multipletów wskazuje na okres rotacji równy około 45 dni.

Dla trzech gwiazd przedstawionych w publikacji **H7**, dla których istniały co najmniej jednoroczne dane, udało się wykryć multiplety oraz równoodstępne owertony modów grawitacyjnych, dzięki czemu identyfikacja modów pulsacji, tak jak w publikacji **H4**, okazała się być bardzo efektywna. Wyniosła ona 90% dla KIC 11179657 oraz 95% dla pozostałych dwóch gwiazd. Dla analizowanych obiektów utworzono też diagramy echelle. Okazało się, że wspomniana odchyłka od relacji asymptotyczności, wcześniej opisana dla KIC 11558725 (**H5**), jest charakterystyczna dla dwóch analizowanych tu gwiazd. Ponadto, gwiazda KIC 2697388 (**H4**) również wykazuje taką cechę. Oznacza to, że kolejne obiekty potwierdzają nasze wcześniejsze wnioski dotyczące mniej efektywnego pułapkowania modów, a tym samym chemicznej stratyfikacji gwiazd sdB, aniżeli było to przewidziane przez modele teoretyczne.

V. Podsumowanie

Analiza, która została przeprowadzona dla gwiazd sdBV obserwowanych przez sondę *Kepler*, przyczyniła się do znacznie lepszego poznania pulsacyjnej natury gwiazd sdBV, a w szczególności do:

— wykrycia 17 wcześniej nieznanych gwiazd sdBV,

— wykrycia relacji asymptotyczności, dzięki czemu identyfikacja modów pulsacji stała się bardzo efektywna,

— wykrycia multipletów, co ułatwiło identyfikację modów, a także pozwoliło na wyznaczenie okresów rotacji niektórych gwiazd,

— wykrycie asynchroniczności rotacji gwiazd sdB,

— zaobserwowania efektu rozszczepienia rotacyjnego dla prawie wszystkich wykrytych modów (KIC 10139564),

— wniosku iż pułapkowanie modów, a tym samym chemiczna stratyfikacja gwiazd sdB nie jest taka jak wynika to z obecnych modeli teoretycznych tych gwiazd, co oznacza, że obecne modele gwiazd sdB wymagają jeszcze dopracowania,

— identyfikacji większości wykrywanych modów, co z chwilą wyliczenia poprawnych modeli pozwoli zapewne na lepsze zrozumienie mechanizmu utraty wodorowej otoczki podczas ewolucji do fazy gorącego podkarła.

Prace wchodzące w skład tej rozprawy dały znaczący przyczynek do większości powyższych wyników.

Pionierska analiza gwiazd sdBV, w których obserwuje się głównie mody grawitacyjne, przyczyniła się do przełomu w badaniach tych gwiazd. W takim przypadku dane zbierane z Ziemi nie były wystarczająco precyzyjne, aby zaobserwować tak liczne widmo modów grawitacyjnych oraz te własności, które przyczyniły się do poprawnej identyfikacji modów. Badania prowadzone z

użyciem sondy *Kepler* są zatem doskonałym uzupełnieniem do badań gwiazd sdBV prowadzonych z Ziemi, w których z reguły wykrywano częstości w rejonie modów p. Obecność w wielu gwiazdach zarówno modów grawitacyjnych jak i ciśnieniowych daje możliwość badania całego wnętrza gwiazd sdBV.

Wyniki analiz jednomiesięcznych danych zebranych przez sondę *Kepler* pokazały, jak niezbędne jest prowadzenie ciągłych obserwacji. Duża liczba wykrytych modów grawitacyjnych umożliwiła zastosowanie relacji asymptotyczności, dzięki której nastąpił przełom w badaniu gwiazd sdB. Dodatkowe obserwacje prowadzone przez kolejne miesiące, umożliwiły odkrycie wielu rotacyjnych multipletów, co z kolei pozwoliło na wykorzystanie dwóch własności widm pulsacyjnych w domenie modów grawitacyjnych. Relacja asymptotyczności wraz z multipletami umożliwiły identyfikację większości wykrytych modów, dzięki czemu konstruowane modele powinny być wiarygodniejsze, przyczyniając się do wytłumaczenia ewolucji gwiazd na gałęzi czerwonych olbrzymów, a dokładnie nieznanego mechanizmu, który prowadzi do usunięcia wodorowej otoczki.

Bazując na danych jednomiesięcznych przeprowadzono analizę sejsmiczną tylko dla dwóch gwiazd sdBV obserwowanych przez sondę *Kepler*. Van Grootel i in. (2010) uzyskali teoretyczny model dla gwiazdy KIC 5807616, natomiast Charpinet i in. (2011) przedstawili wyniki modelowania dla gwiazdy KIC 2697388. W obu przypadkach nie przeprowadzono wstępnej identyfikacji modów, lecz wykorzystano wspomnianą wyżej metodę, w której identyfikacja modów powstaje poprzez wybranie takiego modelu, w którym dopasowanie wykrytych częstości jest najlepsze. W przypadku KIC 2697388 otrzymano rodzinę modeli, a więc różne zestawy parametrów opisujących gwiazdę. Ponadto, identyfikacja modów nie jest do końca zgodna z wynikami przedstawionym w publikacji **H4**. Dla KIC 5807616 nie przeprowadzono jeszcze identyfikacji modów z użyciem kilkuletnich danych, niemożliwe jest zatem porównanie z wynikiem przedstawionym przez van Grootel i in. (2010).

Jak do tej pory szczegółową identyfikację modów pulsacji przeprowadzono dla pięciu gwiazd sdBV wykrytych w polu sondy *Kepler*. Identyfikacja ta jest na tyle efektywna, iż modelowanie sejsmiczne nie powinno być problemem pod warunkiem, że do modelowania zostaną użyte wiarygodne modele tych gwiazd. Niestety, warto tutaj zwrócić uwagę na to, że dane zebrane przez sondę *Kepler* pokazują jeszcze dobitniej, iż obecne modele teoretyczne dla gwiazd sdB są jeszcze dalekie od rzeczywistości. Nie przewidują one tych własności, które wykryto w obserwacjach satelitarnych. Są to między innymi:

— hybrydowość gwiazd o temperaturach powyżej 30 000 K i $\log g > 5.5$,
— duże zgęszczenie modów w niewielkim zakresie częstości,
— nieefektywne pułapkowanie modów.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych (artystycznych)

Już w czasie studiów magisterskich, które odbyłem na Uniwersytecie Jagiellońskim, prowadziłem obserwacje astronomiczne z Obserwatorium Fort Skała w Krakowie. Od czwartego roku studiów stacjonarnych, uzyskałem możliwość prowadzenia obserwacji astronomicznych w Obserwatorium na Suhorze, które należy do obecnego Uniwersytetu Pedagogicznego w Krakowie, a na którym zostałem zatrudniony od 1.10.2001 roku na stanowisku asystenta. W ramach moich obowiązków służbowych prowadziłem zajęcia dydaktyczne oraz obserwacje astronomiczne w Obserwatorium na Suhorze. Zajęcia dydaktyczne obejmowały przedmioty zarówno informatyczne jak i astronomiczne. Przez pierwsze lata pracy moja praca naukowa skupiła się na uczestnictwie w projekcie naukowym, finansowanym przez KBN, a dotyczącym układów kontaktowych gwiazd typu W UMa. Moim zadaniem było gromadzenie danych obserwacyjnych, ich analiza oraz modelowanie układów z użyciem programu Wisona-Devinney'a. Oprócz wspomnianych obserwatoriów, dane obserwacyjne zebrałem także w Norwegii (Skibotn Observatory) oraz Republice Południowej Afryki (SAAO). Przykładowe publikacje zawierające mój wkład do projektu to prace Kreinera i in. (2003), Barana i in. (2004), Zoły i in. (2004) oraz Gazeasa i in. (2005).

Po odbyciu jednorocznego stażu na Uniwersytecie Pedagogicznym w Krakowie zostałem skierowany na studia doktoranckie na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika (UMK) w Toruniu. Przedmiotem moich badań w ramach pracy doktorskiej była analiza pulsujących podkarłów typu B. Pracę tę prowadziłem pod opieką prof. A. Pigulskiego z Uniwersytetu Wrocławskiego. W czasie studiów doktoranckich uczęszczałem na wykłady organizowane przez różne instytucje naukowe w Polsce, w tym CAMK oraz Uniwersytety: Warszawski, Wrocławski oraz Jagielloński. Obowiązki dydaktyczne wypełniałem poprzez opiekę nad studentami UMK odbywających praktyki w Obserwatorium na Suhorze. W marcu 2007 roku obroniłem rozprawę doktorską pt. "*Wielobarwna fotometria pulsujących podkarłów typu B*" uzyskując stopień doktora nauk fizycznych w dyscyplinie astronomia.

W ramach pracy doktorskiej przeprowadziłem wielobarwne obserwacje kilku wybranych gwiazd sdBV. Celem tych obserwacji była próba oszacowania stopni modów pulsacji wykrytych w tych gwiazdach. Z trzech gwiazd, najlepsze obserwacje udało mi się zebrać dla obiektu Balloon 09010001, który okazał się być doskonałym obiektem do testowania modeli pulsacyjnych tych gwiazd. W roku 2004 zebrałem kilkutygodniowe obserwacje, głównie prowadzone w Obserwatorium na Suhorze, ale także w Loiano Observatory we Włoszech. Zachęcony otrzymanymi wynikami, zorganizowałem w 2005 roku kampanię obserwacyjną tego obiektu z użyciem teleskopów położonych na różnych długościach geograficznych, samemu prowadząc obserwacje zarówno z Obserwatorium na Suhorze jak i Obserwatorium na Hawajach. Dzięki temu udało mi się znacząco zmniejszyć dobowe aliasy, poprawiając jednoznaczność częstości wykrywanych modów. W 2005 roku otrzymałem grant promotorski na kontynuację badań tego obiektu. Obserwacje z 2004 pozwoliły na ograniczenie stopni niektórych modów (Baran i in. 2008), natomiast dane z 2004 i 2005 roku przyczyniły się do uzyskania trzech bardzo ważnych wyników (Baran i in. 2009). Pierwszym z nich było wykrycie rozszczepień rotacyjnych, które to ułatwiają identyfikację modów, a także oszacowanie szybkości rotacji gwiazdy. Był to jeden z pierwszych takich wyników w dziedzinie gwiazd sdB. Kolejnym wynikiem było wykrycie nierównoodstępności pomiędzy składnikami kwintupletu $\ell = 1$ oraz 2, które to zinterpretowałem jako rotację różnicową gwiazdy zależną od kąta biegunowego. Trzecim i ostatnim spektakularnym wynikiem było wykrycie zmian rozszczepień rotacyjnych, które jak dotąd nie zostało

zaobserwowane w żadnej innej gwieździe pulsującej. Ten ostatni wynik został określony przez jednego z recenzentów mojej rozprawy doktorskiej jako "*fakt obserwacyjny, który jeszcze długo pozostanie wyzwaniem dla teoretyków*". Za całokształt badań nad gorącymi podkarłami, a w szczególności za odkrycie zmian rozszczepień rotacyjnych, otrzymałem w 2009 roku prestiżową Nagrodę Młodych przyznawaną przez Polskie Towarzystwo Astronomiczne. W ciągu kolejnych lat prowadziłem monitoring zmian rozszczepień rotacyjnych, w celu określenia charakteru tych zmian oraz próby ich wytłumaczenia. W 2007 roku otrzymałem indywidualny grant finansowany przez MNiSW na przeprowadzenie obserwacji spektropolarymetrycznych obiektu Balloon 09010001 w celu zmierzenia pola magnetycznego, któro to mogło być odpowiedzialne za zmiany rozszczepień. Uzyskane wyniki nie były jednak roztrzygające.

Po uzyskaniu stopnia doktora, zostałem zatrudniony na stanowisku adiunkta. Praca dydaktyczna obejmowała wykłady i ćwiczenia z astronomii oraz informatyki. W ramach opieki nad studentami pełniłem rolę promotora pracy magisterskiej jednego magistranta. Praca naukowa w dalszych latach mojej pracy skupiała się wokół pulsacji gwiazdowych: kontynuowałem badania nad pulsującymi gorącymi podkarłami, ale podejmowałem także próby badań innych typów gwiazd. Przykładowe publikacje z tego okresu to Baran i in. (2011a,b). W 2009 roku otrzymałem grant MNiSW, w ramach którego testowałem modele teoretyczne chłodnych gwiazd ciągu głównego (karły typu M), zgodnie z którymi obiekty te powinny pulsować w fundamentalnym modzie radialnym. Wykryte pulsacje byłyby niezastąpionym narzędziem do badania tych gwiazd i pomogłyby zrozumieć ewolucję chłodnych gwiazd ciągu głównego. Obecne obserwacje naziemne nie potwierdzają istnienia pulsacji o amplitudach większych niż 1 ppt. Oznacza to, że albo modele nie są poprawne albo pulsacje te mają o wiele niższe amplitudy niż się spodziewaliśmy. Ta druga możliwość może zostać wkrótce zweryfikowana poprzez analizę danych z sondy *Kepler*. Wstępne wyniki zawarte w publikacji przedstawiającej analizę fotometrii sześciu karłów typu M obserwowanych sondą *Kepler* (Baran i in. 2011c) wskazują, że nie widać w tych gwiazdach pulsacji z amplitudami wiekszymi niż kilka ppm. Ubocznym wynikiem tego projektu jest natomiast odkrycie nowych gwiazd zmiennych. Przykładowe publikacje związane z realizacją tego grantu to Baran i in. (2011d), Fox Machado i in. (2012) i Krzesiński i in. (2012).

W 2009 roku, zostałem beneficjentem programu MNiSW "*Wsparcie międzynarodowej mobilności naukowców*". Projekt ten realizowałem na Uniwersytecie w Iowa (USA) w latach 2009-2011. Głównym celem badań była identyfikacja modów pulsacji z wykorzystaniem danych z sondy *Kepler*. Wyniki badań pulsujących podkarłów obserwowanych sondą *Kepler* są integralną częścią mojej rozprawy habilitacyjnej i zostały omówione w punkcie 4 autoreferatu. Uzupełnieniem mojej pracy nad danymi gwiazd kompaktowych obserwowanych przez sondę *Kepler* są następujące publikacje: Silvotti i in. (2012): analiza układu podwójnego składającego się z niezwykle małomasywnej gwiazdy sdB oraz białego karła; Pablo i in. (2012): odkrycie asynchronicznej rotacji gorących podkarłów w dwóch układach podwójnych; Charpinet i in. (2011a): odkrycie dwóch planet wokół gorącego podkarła przy wykorzystanie techniki fourierowskiej; Fontaine i in. (2011): odkrycie obiektu typu AM CVn.

W tym samym czasie nadal prowadziłem naziemne obserwacje pulsujących gorących podkarłów, przyczyniając się do odkrycia kolejnych gwiazd hybrydowych, a także wcześniej nieznanych pulsujących gorących podkarłów (Baran i in. 2011a,b oraz Østensen i in. 2011b).

Obecnie przebywam na urlopie naukowym, będąc jednocześnie zatrudniony na stanowisku "*postdoctoral research associate*" na Uniwersytecie w Missouri (USA). Do moich obowiązków należy prowadzenie badań w ramach przyznanego grantu przez *National Science*

Foundation "Asteroseismology of pulsating subdwarf B stars via observational mode identification and modeling", a także sprawowanie opieki nad stypendystami grantów NASA (*NASA Missouri Space Grants*). Moim głównym zadaniem w ramach grantu NSF jest analiza danych zebranych trójkanałowym fotometrem CCD, w celu identyfikacji modów pulsacji gwiazd sdBV o stopniach $\ell > 2$. Na potrzeby tego grantu, zbudowaliśmy instrument składający się z trzech kamer CCD, które z wykorzystaniem filtrów dichroicznych mogą zbierać równoczesne dane w trzech filtrach. Taka konfiguracja zapewnia nam jednoczesność danych niezbędnych do właściwej identyfikacji modów z wykorzystaniem ich amplitud. Niezbędne obserwacje prowadzimy w Obserwatorium Kitt Peak w Arizonie. Do tej pory udało nam się zebrać dane dla pięciu gwiazd sdBV. Obecnie prowadzimy analizę niedawno zebranych danych, z zamiarem opublikowania wyników na początku 2013 roku.

Równocześnie do prac wykonywanych w wyżej wymienionym projekcie, kontynuuję analizę, którą prowadziłem na Uniwersytecie w Iowa, a która dotyczy analizy gwiazd sdBV w polu sondy *Kepler*. Badania te prowadzę w nawiązaniu do projektu NCN, którego obecnie jestem kierownikiem. Celem projektu jest sprawdzenie czy rotacyjne rozszczepienia w gwiazdach sdBV (prawie w ogóle nie obserwowane z Ziemi) oraz, na podobieństwo układu V391 Peg (Silvotti i in. 2007), układy planetarne są naturalną cechą tych gwiazd. Projekt ten jest realizowany w latach 2012-2015.

Od 2010 roku jestem zarejestrowanym recenzentem czasopism ApJ, a od 2012 roku także PASP. Do tej pory zostałem poproszony o recenzje kilku artykułów złożonych do tych czasopism, a także materiałów konferencyjnych.

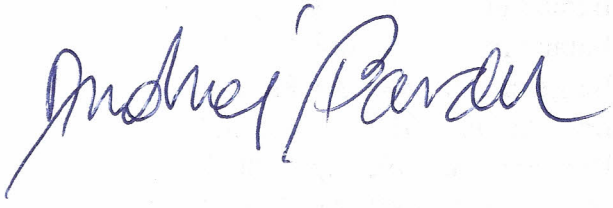
W okresie mojej dotychczasowej działalności naukowo-dydaktyczno-popularyzatorskiej prowadziłem obserwacje z wielu obserwatoriów na Ziemi (lista obserwacji zamieszczona poniżej), uczestniczyłem w wielu konferencjach prezentując plakaty oraz referaty. Wygłosiłem również referaty na polskich i zagranicznych uczelniach, opublikowałem artykuły popularno-naukowe, otrzymałem wyróżnienia w postaci nagród zarówno za popularyzację wiedzy jak i osiągnięcia naukowe. W ramach współpracy międzynarodowej prowadziłem obserwacje astronomiczne dla zagranicznych współpracowników, a także organizowałem własne kampanie. W latach 2002-2009 prowadziłem obserwacje, a także byłem członkiem centrali w ramach kampanii obserwacyjnych Teleskopu Globalnego (WET). Przykładowe publikacje ze współpracy w Teleskopie Globalnym to: Vučković i in. (2006) oraz Silvotti i in. (2007), w której przedstawiono spektakularne odkrycie pierwszej planety wokół gorącego podkarła, a także Provencal i in. (2009) oraz Reed i in. (2011).

Od 2009 współpracuję z naukowcami na całym świecie w ramach badań nad pulsującymi podkarłami typu B obserwowanymi sondą *Kepler,* czego efektem są przede wszystkim prace włączone do niniejszej rozprawy. Przyczyniłem się też m.in. do lepszego poznania efektów instrumentalnych sondy *Kepler*, które mają wpływ na zbierane dane. Efekty te pojawiają się w analizie, którą prowadzę, jako dodatkowy sygnał na wielu częstościach w widmach pulsacyjnych. Lista tych częstotliwości została znacząco uaktualniona w *Data Release Notes 12*. Ich znajomość pomaga osobom, analizującym dane z sondy *Kepler* na wyeliminowanie tych efektów, co ułatwia wyciąganie poprawnych konkluzji z ich badań.

Lista przeprowadzonych obserwacji:

od 1999, stały obserwator w Obserwatorium na Suhorze, Polska
2002, Skibotn Observatory, Norwegia
2003, Skibotn Observatory, Norwegia
2003, SAAO, Republika Południowej Afryki, 2 dwutygodniowe wyjazdy
2004, Loiano Observatory, Włochy
2005, SAAO, Republika Południowej Afryki
2005, Mauna Kea Observatory, Hawaje, USA
2006, Mauna Kea Observatory, Hawaje, USA
2008, Nordic Optical Telescope, La Palma, Hiszpania
2009, SAAO, Republika Południowej Afryki
2009, KPNO, USA
2010, CTIO, Chile
2010, SAAO, Republika Południowej Afryki
2011, CTIO, Chile
2011, SAAO, Republika Południowej Afryki
2012, KPNO, USA, 4 jednotygodniowe wyjazdy

Dodatkowa bibliografia (pozycje przedstawione są w formie skróconej)

Baran i in., 2004, AcA, 54, 195
Baran i in., 2005, MNRAS, 360, 737
Baran i in., 2008, MNRAS, 385, 255
Baran i in., 2009, MNRAS, 392, 1092
Baran i in., 2010, Ap&SS, 329, 199
Baran i in., 2011a, MNRAS, 411, 776
Baran i in., 2011b, MNRAS, 413, 2838
Baran i in., 2011c, AcA, 61, 325
Baran i in., 2011d, AcA, 61, 37
Bergeron i in.,1984, AJ, 89, 374
Borucki i in., 2010, Science, 327, 977
Brassard i in., 1992, ApJS, 80, 369
Brassard i in., 2001, ApJ 563, 1013
Charpinet i in., 1997, ApJ, 483, L123
Charpinet i in., 2000, ApJS, 131, 223
Charpinet i in., 2011a, Nature, 480, 496
Charpinet i in., 2011b, A&A, 530, 3
Dziembowski W., 1977, AcA, 27, 203
Fontaine i in., 2003, ApJ, 597, 518
Fontaine i in., 2011, ApJ, 726, 92
Fox Machado i in., 2012, NewA, 17, 65
Gazeas i in., 2005, AcA, 55, 123
Greenstein J., 1952, PASP, 64, 256
Green i in., 2003, ApJ, 583, L31
Heber U., 2009, ARA&A, 47, 211

Humason M.S. i Zwicky F., 1947, ApJ, 105, 85
Kawaler i in., 2010a, MNRAS, 409, 1487
Kawaler i in., 2010b, MNRAS, 409, 1509
Kilkenny i in., 1997, MNRAS, 285, 640
Kilkenny i in., 1998, MNRAS, 296, 329
Koen i in., 1997, MNRAS, 285, 645
Koen i in., 1998, MNRAS, 296, 317
Koen i in., 1999, MNRAS, 306, 213
Kreiner i in., 2003, A&A, 412, 465
Krzesiński i in., 2012, AcA, 62, 201
Østensen i in., 2010a, MNRAS, 409, 1470
Østensen i in., 2010b, MNRAS, 408, L51
Østensen i in., 2011a, MNRAS, 414, 2860
Østensen i in., 2011b, ApJ, 731, L13
Pablo i in., 2011, ApJ, 740, 47
Pablo i in., 2012, MNRAS, 422, 1343
Provencal i in., 2009, ApJ, 693, 564
Reed i in., 2011, MNRAS, 412, 371
Schuh i in., 2006, A&A, 445, 31
Silvotti i in., 2007, Nature, 449, 189
Silvotti i in., 2012, MNRAS, 424, 1752
van Grootel i in., 2010, ApJL, 718, 97
Vučković i in., 2006, ApJ, 646, 1230
Zoła i in., 2004, AcA, 54, 299
Zorotovic M., Schreiber M.R., 2013, A&A, 549, A95