

## AUTOREFERAT

1. Imię i nazwisko: **Krzysztof Grzegorz Helminiak**
2. Posiadane tytuły zawodowe i stopnie naukowe:
  - Magister astronomii, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, 2006.  
Tytuł pracy: *Precyzyjna astrometria układów podwójnych za pomocą optyki adapttywnej*.  
Promotor pracy: prof. dr hab. Maciej Konacki.
  - Doktor nauk fizycznych w zakresie astronomii, Centrum Astronomiczne im. Mikołaja Kopernika PAN, 2010.  
Tytuł pracy: *Wyznaczanie podstawowych parametrów gwiazd późnych typów w układach podwójnych na podstawie precyzyjnej fotometrii, spektroskopii wysokiej rozdzielczości, obrazowania z wykorzystaniem optyki adapttywnej i interferometrii optycznej*.  
Promotor pracy: prof. dr hab. Maciej Konacki.
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych:
  - Pontificia Universidad Católica, Departamento de Astronomia y Astrofísica (Chile), stażysta po doktoracie, 2010-2013
  - National Astronomical Observatory of Japan, Subaru Telescope (USA), stażysta po doktoracie, 2013-2016
  - Centrum Astronomiczne im. M. Kopernika PAN, Zakład Astrofizyki w Toruniu, adiunkt, 2016-teraz
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. 2016 r. Poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. Poz. 1311.):
  - Tytuł Osiągnięcia naukowego:

### **Poszukiwanie i szczegółowe badanie rzadkich i nietypowych rozdzielonych podwójnych układów zaćmieniowych**

- Publikacje wchodzące w skład Osiągnięcia naukowego:

[H1] **Helminiak, K. G.**; Konacki, M.; Różyczka, M.; Kałużny, J.; Ratajczak, M.; Borkowski, J.; Sybilski, P.; Muterspaugh, M. W.; Reichart, D. E.; Ivarsen, K. M.; Haislip, J. B.; Crain, J. A.; Foster, A. C.; Nysewander, M. C.; LaCluyze, A. P., *Orbital and physical parameters of eclipsing binaries from the All-Sky Automated Survey catalogue - IV. A 0.61 + 0.45 M<sub>⊙</sub> binary in a multiple system*, 2012, MNRAS, 425, 1245.

[H2] **Helminiak, K. G.**; Brahm, R.; Ratajczak, M.; Espinoza, N.; Jordán, A.; Konacki, M.; Rabus, M., *Orbital and physical parameters of eclipsing binaries from the All-Sky Automated Survey catalogue. VI. AK Fornacis: a rare, bright K-type eclipsing binary*, 2014, A&A, 567, A64.

[H3] **Helminiak, K. G.**; Graczyk, D.; Konacki, M.; Pilecki, B.; Ratajczak, M.; Pietrzyński, G.; Sybilski, P.; Villanova, S.; Gieren, W.; Pojmański, G.; Konorski, P.; Suchomska, K.; Reichart, D. E.; Ivarsen, K. M.; Haislip, J. B.; LaCluyze, A. P., *Orbital and physical parameters of eclipsing binaries from the ASAS catalogue - VIII. The totally eclipsing double-giant system HD 187669*, 2015, MNRAS, 448, 1945.

[H4] **Helminiak, K. G.**; Ukita, N.; Kambe, E.; Konacki, M., *Absolute Stellar Parameters of KIC 09246715: A Double-giant Eclipsing System with a Solar-like Oscillator*, 2015, ApJL, 813, 25.

[H5] **Helminiak, K. G.**; Ukita, N.; Kambe, E.; Kozłowski, S. K.; Sybilski, P.; Ratajczak, M.; Maehara, H.; Konacki, M., *HIDES spectroscopy of bright detached eclipsing binaries from the Kepler field - I. Single-lined objects*, 2016, MNRAS, 461, 2896.

[H6] **Helminiak, K. G.**; Ukita, N.; Kambe, E.; Kozłowski, S. K.; Sybilski, P.; Maehara, H.; Ratajczak, M.; Konacki, M.; Pawłaszek, R. K., *HIDES spectroscopy of bright detached eclipsing binaries from the Kepler field - II. Double- and triple-lined objects*, 2017, MNRAS, 468, 1726.

[H7] **Helminiak, K. G.**; Ukita, N.; Kambe, E.; Kozłowski, S. K.; Pawłaszek, R.; Maehara, H.; Baranec, C.; Konacki, M., *KIC 4150611: a rare multi-eclipsing quintuple with a hybrid pulsator*, 2017, A&A, 602, A30.

[H8] **Helminiak, K. G.**; Tokovinin, A.; Niemczura, E.; Pawłaszek, R.; Yanagisawa, K.; Brahm, R.; Espinoza, N.; Ukita, N.; Kambe, E.; Ratajczak, M.; Hempel, M.; Jordán, A.; Konacki, M.; Sybilski, P.; Kozłowski, S. K.; Litwicki, M.; Tamura, M., *Orbital and physical parameters of eclipsing binaries from the All-Sky Automated Survey catalogue - X. Three high-contrast systems with secondaries detected with IR spectroscopy*, 2019, A&A, 622, A114.

[H9] **Helminiak, K. G.**; Konacki, M.; Maehara, H.; Kambe, E.; Ukita, N.; Ratajczak, M.; Pigulski, A.; Kozłowski, S. K., *HIDES spectroscopy of bright detached eclipsing binaries from the Kepler field – III. Spectral analysis, updated parameters, and new systems*, 2019, MNRAS, 484, 451.

A&A = Astronomy & Astrophysics

ApJL = The Astrophysical Journal Letters

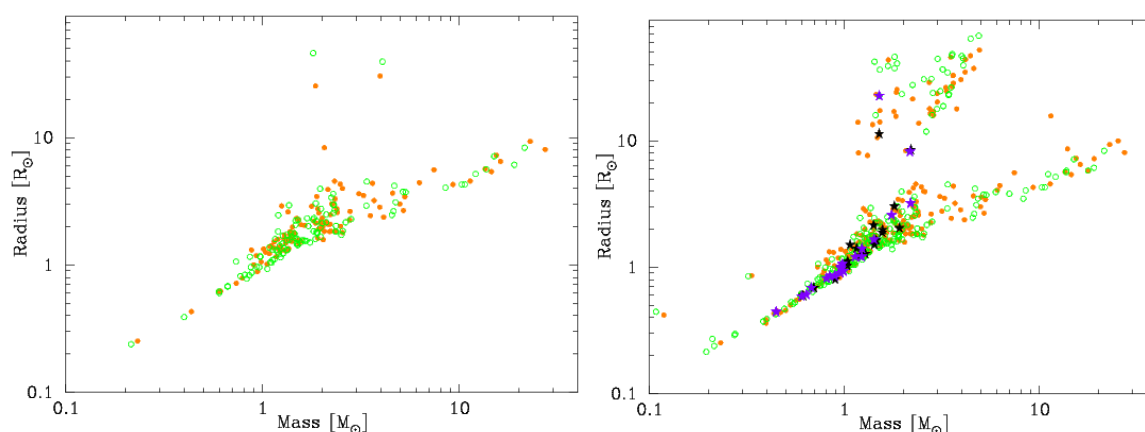
MNRAS = Monthly Notices of the Royal Astronomical Society

- Omówienie celu naukowego ww. pracy i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

## Wprowadzenie

Rozdzielone zaćmieniowe układy podwójne (ang.: *detached eclipsing binaries*, DEBs) są jednymi z najważniejszych obiektów w astronomii. Z kilkoma wyjątkami, ich składniki ewoluują niezależnie, mają ten sam skład chemiczny i wiek. Ich ustawienie i występowanie zaćmień pozwala na bezpośrednie wyznaczenie takich podstawowych parametrów jak masy, promienie i jasności, z których można potem uzyskać kolejne wielkości: przyspieszenia grawitacyjne, jasności bolometryczne i absolutne, odległość czy wiek. Możliwe jest także uzyskanie zawartości różnych pierwiastków, a przynajmniej wyznaczenie metaliczności. Uzyskanie takiego zestawu parametrów z wysoką precyzją jest bardzo trudne lub wręcz niemożliwe dla innych obiektów. Informacje uzyskane z analizy DEB-ów mają zastosowanie w wielu innych dziedzinach astronomii, np. w teorii budowy i ewolucji gwiazd, mechanice niebieskiej, astroseismologii, czy poszukiwaniu planet.

Pomimo, iż tysiące układów zaćmieniowych zostało odkrytych przez duże przeglądy fotometryczne, tylko mała część z nich została opisana na tyle dokładnie, aby mogły stanowić podstawę do wiarygodnych testów modeli ewolucyjnych, tzn. ich parametry (szczególnie masy i promienie) są wyznaczone ze względną precyzją rzędu 2-3% (Lastenet i Valls-Gabaud, 2002), oraz znana jest temperatura efektywna  $T_{\text{eff}}$ . Poziom błędów 2-3% pozwala na oszacowanie statusu ewolucyjnego, wieku i metaliczności, ale dwie ostatnie wielkości są ze sobą zdegenerowane (Lastenet i Valls-Gabaud, 2002). Kompletny zestaw informacji o danym układzie musi zawierać temperaturę efektywną  $T_{\text{eff}}$  oraz metaliczność  $[M/H]$ , żeby być przydatnym do dalszych badań. Katalog DEBCat<sup>1</sup> (Southworth 2015), będącym zbiorem najlepiej zbadanych rozdzielonych par zaćmieniowych, zawiera obecnie jedynie 218 układów, z czego tylko niecałe 100 (<45%) ma podane jakiegokolwiek informacje o metaliczności  $[M/H]$ , czy zawartości konkretnych pierwiastków. Metaliczność często jest brana z przynależności do gromady, a nie z bezpośrednich pomiarów.



**Rys. 1:** Obiekty z katalogu DEBCat na diagramie masa-promień ( $M-R$ ). Pomarańczowe punkty oznaczają składniki bardziej masywne danej pary, zaś zielone - mniej masywne. *Lewo:* Stan na koniec roku 2010. *Prawo:* Stan na chwilę obecną (14.02.2019). Na prawym panelu gwiazdkami zaznaczone zostały także obiekty uwzględnione w niniejszym Osiągnięciu (czarne - bardziej masywne, fioletowe - mniej masywne). Część z nich znajduje się obecnie w DEBCat.

W klasycznym już artykule przeglądowym z 2010 r. Torres, Andersen i Gimenez (2010) na nowo przeanalizowali istniejące podówczas dane dla około setki dobrze zbadanych układów podwójnych, skupiając się na precyzyjnych wyznaczeniach mas i promieni. Zwrócili uwagę na liczne obszary na diagramie masa-promień ( $M-R$ ), na których jest niedobór obiektów z dobrze wyznaczonymi parametrami, np. gwiazdy o masach mniejszych niż  $0.9 M_{\odot}$  lub większych niż  $3 M_{\odot}$ ,

<sup>1</sup> <http://www.astro.keele.ac.uk/~jkt/debcats>

gwiazdy przed ciągiem głównym, czy olbrzymy w różnych stadiach ewolucji (Rys. 1). Zwrócili także uwagę na inne cechy, niewidoczne na pierwszy rzut oka na diagramie  $M-R$ , takie jak przynależność do układu wielokrotnego lub gromady, czy występowanie pulsacji. Ponadto, zauważyli, że dla większość układów z ich próbki nie ma informacji o metaliczności, a ówczesne modele budowy i ewolucji gwiazd często nie odtwarzały poprawnie mierzonych wartości ze względu na niepoprawne uwzględnienie efektów konwekcji czy aktywności chromosferycznej. Zaistniała zatem potrzeba dostarczenia nowych przykładów dobrze zbadanych układów podwójnych, w szczególności ze składnikami wykazującymi rzadko występujące cechy, mogącymi zapełnić “białe plamy” na diagramie  $M-R$ .

Dodatkowo, do 2016 r. żadna z gwiazd z katalogu DEBCat nie miała błędów w masie mniejszych niż 0.1%, co jest poziomem niezbędnym do testowania nowej generacji modeli ewolucji gwiazd (Valle i in. 2017). Jest to także poziom pozwalający na zaobserwowanie wpływu takich czynników jak rotacja, przestrzeliwanie, czy zawartości pierwiastków cyklu  $\alpha$ . Wpływ ten nie jest wciąż do końca dobrze zrozumiany; potrzebne są dalsze badania teoretyczne wsparte wysokiej jakości danymi obserwacyjnymi. Obecnie opublikowane są jedynie dwa układy z tak dokładnymi masami.

W związku z powyższym, oraz biorąc pod uwagę postęp technologiczny w dziedzinie stabilności i efektywności spektrografów, pozwalający na uzyskanie większej liczby precyzyjnych pomiarów prędkości radialnych w krótszym czasie (a zatem wyznaczeń masy), zdecydowałem się na wykonanie systematycznych obserwacji pewnej liczby nowo odkrytych układów zaćmieniowych, w celu zidentyfikowania i dokładnego zbadania tych najbardziej interesujących przypadków.

## Metodologia

### Wybór celów

Większość badanych obiektów została pierwszy raz zidentyfikowana jako rozdzielone układy zaćmieniowe w przeglądzie All Sky Automated Survey (ASAS; Pojmański 2002) i zebrana w katalogu ASAS Catalog of Variable Stars (ACVS). Przegląd ASAS był głównym źródłem wyboru celów do obserwacji aż do 2013 roku. Pochodzą stąd układy opisane w pracach H1, H3, i H8. Opisany w pracy H2 układ AK For również widnieje na liście obiektów przeglądu ASAS, ale nie został rozpoznany jako gwiazda zmienna i nie znalazł się w ACVS. Drugim bardzo ważnym źródłem obiektów był *Kepler* Eclipsing Binaries Catalog (KEBC; Prša i in. 2011; Slawson i in. 2011; Kirk i in. 2017), z którego pochodzą układy opisane w pracach H4, H5, H6, H7 i H9. Celów tych jest więcej, gdyż była już dla nich dostępna niezwykle precyzyjna fotometria, więc nie trzeba było prowadzić dodatkowych obserwacji, przez co czas potrzebny na ich badanie był krótszy.

W przypadku obu katalogów ogólnymi kryteriami wyboru były:

- Kształt krzywej blasku wyraźnie wskazujący na konfigurację rozdzieloną (stosunkowo wąskie zaćmienia, niewielka modulacja elipsoidalna). W KEBC jest on opisany parametrem *morph*, przyjmującym zakres od 0 do 1, przy czym za układy rozdzielone uznawałem takie, gdzie *morph* < 0.6.
- Obserwowana jasność w paśmie  $V < 12.5$  mag, aby cel były w zasięgu teleskopu. W przypadku mniejszych teleskopów (np. Euler), granica ta była ustalona na 11.5 mag.
- Obserwowany wskaźnik barwy  $V - K > 1.1$  mag, lub katalogowa temperatura efektywna  $T_{\text{eff}} < 6700$  K, aby obserwować układy o późnych typach widmowych, w których widmach widać dużo linii metali, wykorzystywanych przy mierzeniu prędkości radialnych.

Ponadto, z próbki odrzucałem układy, których dokładna analiza została opublikowana przed rozpoczęciem programu, chyba że dostępne były nowe dane fotometryczne, o dużo lepszej precyzji.

Po uzyskaniu kilku pomiarów prędkości radialnych, wykonywane było wstępne modelowanie w celu oszacowania wartości parametrów gwiazdowych i sprawdzenia charakteru danego układu. Krok ten pozwalał na ustalenie położenia składników na diagramie  $M-R$ , a więc na określenie, czy dany układ jest potencjalnie interesujący i wart dalszych intensywnych obserwacji. Oprócz usytuowania na diagramie  $M-R$ , brane były pod uwagę inne cechy. Ostatecznie, do dalszych badań były brane obiekty wykazujące co najmniej jedną z następujących własności:

- Masa jednego lub obu składników  $< 0.9 M_{\odot}$ .
- Masa jednego lub obu składników  $> 3 M_{\odot}^2$ .
- Rozmiar jednego lub obu składników większy, niż przewidywany na ciągu głównym (olbrzymy, podolbrzymy, gwiazdy przed ciągiem głównym).
- Wielokrotność (trendy w prędkościach radialnych, więcej niż 2 zestawy linii w widmie, towarzyszy wizualny).
- Stosunek mas  $q < 0.8$ .
- Występowanie pulsacji lub oscylacji.
- Obecność zaćmienia całkowitego.
- Silne linie litu na długości fali 6708 Å (wskazujące na fazę przed ciągiem głównym)
- Odchylenie standardowe dopasowania krzywej prędkości radialnych  $< 100$  m/s (potencjalnie bardzo wysoka precyzja mas, lub możliwość poszukiwania planet okołopodwójnych).

Obiekty te trafiły do próbki projektu *Comprehensive Research with Échelles on the Most interesting Eclipsing binaries* (CRÉME). Warto wyjaśnić, że w sumie obserwowanych było  $>200$  układów z samego przeglądu ASAS, zaś za “interesujące” zostało uznanych około 100. Część została opublikowana w pracach nie wchodzących w skład niniejszego Osiągnięcia habilitacyjnego (Coronado i in. 2015, Ratajczak i in. 2013, 2016), a dla niektórych wciąż trwa zbieranie danych i ich analiza. Układy prezentowane w dedykowanych pracach H1, H2, H3 i H8 stanowią zatem część większej próbki, jednakże zostały specjalnie wybrane ze względu na swoje własności.

Obiekty z pola satelity *Kepler* są w większości opisane w zbiorowych publikacjach H5, H6 oraz H9. Wiele spośród nich rzeczywiście jest interesujących z punktu widzenia wcześniejszych kryteriów. Jednakże, ze względu na dostępność precyzyjnej fotometrii, oraz stosunkowo niewielką ilość obserwowanych celów ( $\sim 20$ ) analiza została przeprowadzona dla wszystkich, przy czym dwa specjalne przypadki zostały opisane w osobnych pracach H4 i H7.

## Obserwacje i źródła danych

Podstawą do wyznaczenia absolutnych mas składników układu spektroskopowo podwójnego, są pomiary prędkości radialnych gwiazd. Dokładne i precyzyjne pomiary prędkości otrzymuje się z widm wysokiej rozdzielczości ( $R > 40000$ ) uzyskanych ze stabilnych spektrografów échelle. W swojej pracy korzystałem w sumie z kilkunastu tego typu instrumentów, przy czym najwięcej danych zostało zebranych w latach 2011-2018 przez następujące spektrografy:

- CORALIE ( $R \sim 70000$ ) na 1.2-m teleskopie Eulera w La Silla, Chile.
- CHIRON ( $R \sim 90000$  w modzie  *slicer* lub  $\sim 28000$  w modzie  *fiber*) na 1.5-m teleskopie konsorcjum SMARTS w Cerro Tololo, Chile.
- FEROS ( $R \sim 48000$ ) na 2.2-m teleskopie MPG (dawniej MPG/ESO) w La Silla, Chile.
- HIDES ( $R \sim 48000$ ) na 1.88-m teleskopie w OAO-188 w Okayamie, Japonia.
- HARPS ( $R \sim 115000$ ) na 3.6-m teleskopie ESO w La Silla, Chile.

Dodatkowo, praca H1 opiera się o wcześniejsze (2006-2009) obserwacje przeprowadzone na 1.9-m teleskopie Radcliffe’a ze spektrografem GIRAFFE (SAAO), oraz 3.8-m teleskopie AAT ze spektrografem UCLES (AAO), uzupełnione o jedno widmo z 3.5-m teleskopu Shane’a i spektrografu Hamiltona (Obserwatorium Licka). Natomiast obiekty z pracy H8 były obserwowane w podczerwieni teleskopem Subaru z instrumentem IRCS (Maunakea), a jeden z nich także 3.5-m teleskopem TNG ze spektrografem HARPS-N (La Palma). Ponadto, w pracach H4 i H9 wykorzystano publiczne widma z archiwum przeglądu APOGEE, oraz teleskopu Tillinghast ze spektrografem TRES. Większość pomiarów prędkości została wykonana metodą korelacji krzyżowej TODCOR (Zucker i Mazeh, 1994), lub dopasowaniem widm rozplątanych (patrz: *Metody analizy danych*) do widma obserwowanego (Konacki i in. 2010). W jednym przypadku, ASAS J011328-3821.1 (praca H1), prędkości uzyskano również z położenia linii emisyjnych H $\alpha$ , zaś w innym, KIC 4150611 Aa (H7), z położenia linii absorpcyjnej H $\beta$ .

2 Pomimo kryterium wskaźnika barwy, kilka masywnych układów wczesnych typów trafiło na listę celów ze względu na silne poczerwienienie.

Szczególnym przypadkiem pomiarów prędkości radialnych, wykorzystanym w pracach H5 oraz H6, a także w dodatku do H9, są prędkości środka masy układu zaćmieniowego, przekształcone z pomiarów momentów zaćmień (chronometrażu). Dotyczą one niektórych celów z próbki *Keplera*, które okazały się być hierarchicznymi układami potrójnymi, gdzie para zaćmieniowa o orbicie krótkookresowej (kilka dni) jest okrążana przez trzecią gwiazdę na orbicie długookresowej (lata). Połączenie bezpośrednich pomiarów prędkości trzeciej gwiazdy wraz z pośrednimi, post-chronometrycznymi pomiarami prędkości środka masy pary zaćmieniowej, pozwoliło na wyznaczenie elementów zewnętrznej orbity, a nawet na oszacowanie absolutnych promieni składników pary zaćmieniowej (H5). Same pomiary chronometryczne również były wykorzystywane przy analizie części układów z próbki *Keplera* (H5, H6, H7). Wykonał je dr Stanisław Kozłowski, przy użyciu metody opisanej w pracy Kozłowski i in. (2011).

Pomiary jasności były brane w pierwszej kolejności z przeglądu ASAS (pasmo  $V$ ), jednak ich jakość nie była zadowalająca i nie pozwalała na uzyskanie parametrów gwiazd z oczekiwaną precyzją. Uzupełniane były zatem o dodatkowe obserwacje, na przykład publiczne dane z przeglądu SuperWASP (prace H2 i H3), które charakteryzują się podobnym rozrzutem jak ASAS, ale dużo gęstszym próbkowaniem, dzięki czemu uzyskane parametry mają mniejsze błędy. Jak się jednak okazało w przypadku AK For (H2), HD 187669 (H3), oraz układu wielokrotnego V1200 Cen (praca Coronado i in. 2015, oparta o fotometrię ASAS i SuperWASP), pomiary SuperWASP również nie gwarantują uzyskania zamierzonej precyzji. A zatem, aby rzeczywiście osiągnąć błędy wyznaczeń promieni na poziomie 2% i niższym, potrzebne były dodatkowe pomiary, pochodzące z instrumentów większych niż obiektywy fotograficzne, wykorzystywane w przeglądach ASAS i SuperWASP. W tym celu przeprowadzone zostały dedykowane obserwacje fotometryczne z wykorzystaniem następujących instrumentów:

- 1-m teleskop Elizabeth w SAAO, RPA, w filtrach  $V$  oraz  $I$  (praca H1).
- Sieć 0.5-m zrobotyzowanych teleskopów PROMPT w CTIO, Chile, w filtrach  $V$  oraz  $I$  (prace H1 i H3).
- 0.5-m zrobotyzowany teleskop MITSuME w Okayamie, Japonia, w filtrach  $g'$ ,  $R$  oraz  $I$  (praca H8).

Konieczność wykonania dedykowanej fotometrii jest głównym powodem, dla którego ilość prezentowanych układów z przeglądu ASAS nie jest zbyt duża, niemniej poświęcone im prace przedstawiają wyniki wnikliwych i długotrwałych analiz.

Dla obiektów z pola satelity *Kepler* precyzyjna fotometria jest oczywiście dostępna i została wykorzystana w pracach H4, H5, H6, H7 i H9. W pojedynczych przypadkach analizowane były także krzywe blasku z przeglądów TrES (Devor i in. 2008) i ASAS-North<sup>3</sup>, ale najczęściej nie wносиły dużo nowych istotnych informacji.

Oprócz pomiarów jasności i prędkości radialnych, w dwóch przypadkach - KIC 4150611 w pracy H7 oraz ASAS J052743-0359.7 w pracy H8 - wykonywane były również pomiary astrometryczne. Oba obiekty to układy wielokrotne, znane wcześniej jako wizualnie podwójne, dla których zebrano archiwalne względne pomiary astrometryczne w katalogu Washington Double Star Catalog (WDS). Nowe obserwacje układu KIC 4150611 pochodzą z teleskopu Keck II z kamerą NIRC2, pracującą z systemem optyki adaptatywnej. Natomiast astrometria ASAS J052743-0359.7 pochodzi z obserwacji teleskopem SOAR, wykonanych techniką interferometrii plamkowej (Tokovinin i in. 2015, 2018).

## Metody analizy danych

Krzywe prędkości radialnych były dopasowywane kodem V2Fit (Konacki i in. 2010). Jest to program wykorzystujący algorytm Levenberga-Marquardta do dopasowania orbity keplerowskiej dowolnego układu spektroskopowo podwójnego (jedno- lub dwuliniowego), opcjonalnie z trendami w prędkościach radialnych: liniowym, kwadratowym lub okresowym. W tym ostatnim przypadku wyznaczone są parametry zewnętrznej orbity trzeciego ciała, okrążającego parę spektroskopową. Kod uwzględnia również różnice między punktami zerowymi różnych spektrografów. Z dopasowania

<sup>3</sup> <https://asas-sn.osu.edu/>

krzywych prędkości radialnych otrzymujemy m.in. dolne ograniczenia masy i pól wielką orbity, zdegenerowane z inklinacją:  $M_{1,2} \sin^3(i)$  oraz  $a \sin(i)$ , a także ekscentryczność orbity  $e$ , oraz argument perycentrum  $\omega$ .

Krzywe blasku analizowane były jednym z dwóch popularnych kodów: PHOEBE v0.32 (Prša i Zwitter 2005) lub JKTEBOP v28/34 (Southworth i in. 2004a,b). Program PHOEBE opiera się o znany kod Wilsona-Devinneya (WD; Wilson i Devinney 1971) i możliwe jest w nim modelowanie kilku krzywych blasku jednocześnie, z uwzględnieniem występowania plam na powierzchni gwiazd. Z tych powodów był wykorzystany w pracach H1 oraz H8. Przy użyciu PHOEBE możliwe jest też dopasowanie krzywych prędkości radialnych, ale bez uwzględnienia niektórych efektów, które można dopasować w V2Fit.

Drugi z kodów do modelowania krzywych blasku - JKTEBOP - jest prostym i szybkim kodem geometrycznym, dostosowanym do analizy właśnie układów rozdzielonych. Może on pracować na tylko jednej krzywej na raz, ale, w przeciwieństwie do PHOEBE, dostępnych jest kilka różnych metod wiarygodnego szacowania niepewności uzyskanych parametrów. Nowsze wersje (od v31) pozwalają także na analizę krzywych prędkości, ale bez uwzględnienia wszystkich efektów. Kod JKTEBOP był stosowany w pracach H2 do H7 i H9. Uzyskiwane z niego wielkości to m.in. inklinacja  $i$ , oraz promienie cząstkowe  $r_{1,2} = R_{1,2}/a$ . W odróżnieniu od JKTEBOP, kod PHOEBE jest kodem fizycznym, stąd otrzymywane bezpośrednio z niego parametry to nie promienie cząstkowe a tzw. zmodyfikowane potencjały Kopala  $\Omega_{1,2}$ , które później można przetłumaczyć na  $r_{1,2}$ , wykorzystując stosunek mas  $q$ . Na podstawie krzywych blasku można także niezależnie określić  $e$  i  $\omega$ , jak również okres orbitalny  $P$  (krzywe blasku, szczególnie te z wieloletnich, ciągłych obserwacji, nadają się do tego lepiej niż krzywe prędkości radialnych). Łącząc parametry uzyskane z V2Fit z tymi z analizy krzywych blasku, otrzymujemy absolutne wartości mas i promieni składników (a co za tym idzie przyspieszeń grawitacyjnych  $\log(g_{1,2})$  i pól  $a$ ).

Kolejnym krokiem pełnego procesu analizy było rozplątywanie tomograficzne, którego celem było uzyskanie rozseparowanych widm każdego ze składników danego układu spektroskopowo podwójnego. Wykorzystana do tego była metoda opracowana przez prof. Macieja Konackiego (Konacki i in. 2010), bazująca na podejściu tomograficznym, przedstawionym przez Bagnuolo i Giesa (1991). Warunkiem koniecznym do jej wykorzystania było zebranie co najmniej 8 widm danego układu tym samym instrumentem, oraz występowanie tylko dwóch zestawów linii widmowych. W związku z tym nie wszystkie przedstawione obiekty przeszły ten etap analizy. Rozplątywanie, które wykonywał prof. Konacki, zostało wykorzystane w pracach H2, H3 i H9.

Jednym z głównych celów badań było uzyskanie jak najbardziej kompletnych informacji na temat studiowanych układów, a więc nie tylko mas i promieni. Jak zostało to wcześniej wspomniane, kluczowymi informacjami są także temperatury efektywne  $T_{\text{eff}}$  składników i metaliczności  $[M/H]$ . Informację o temperaturze można uzyskać np. z kalibracji temperatura-wskaźnik barwy, ze stosunków głębokości wybranych linii, lub z analizy widma danej gwiazdy, która daje także informację o metaliczności<sup>4</sup>. Pierwsze podejście zostało zastosowane w pracach H1, H2, H3 i H9. Drugą metodę wykorzystano w pracach H3 i H8, zaś analizę widmową w pracach H2, H3, H8 i H9. Ponadto, w pracach H5 i H7 wykorzystano dane literaturowe.

Analiza widmowa była wykonywana z wykorzystaniem kilku różnych kodów i na różnego rodzaju widmach. Program *Spectroscopy Made Easy* (SME; Valenti i Piskunov 1995) został użyty w H2 i H3 na widmach rozplątanych tomograficznie (analizę wykonała dr Milena Ratajczak), a w pracy H3 także na widmie zarejestrowanym podczas całkowitego zaćmienia. Widma rozplątane były analizowane także w H9 (przeze mnie) kodem iSpec (Blanco-Cuaresma i in. 2014). Natomiast w pracy H8 analizowane były przesunięte i zsumowane (ang. *shift-and-stack*) widma głównych składników dwóch z trzech badanych układów, poprawione na wpływ innych składników (wykonała dr Ewa Niemczura). W tym celu wykorzystana była metoda oparta o kod do syntezy widm SYNTH (Kurucz 1993). Jednocześnie, wyznaczone były obfitości ok. 30 różnych pierwiastków.

4 W zależności od użytego programu, może być to metaliczność  $[M/H]$  lub zawartość żelaza  $[Fe/H]$ , która z dobrym przybliżeniem jest równa  $[M/H]$ , co często jest przyjmowane w literaturze.



Znajomość mas, promieni, temperatur i/lub metaliczności pozwala na wiarygodne oszacowanie wieku i statusu ewolucyjnego danego układu, np. poprzez porównanie uzyskanych wartości z modelami i znalezienie najlepiej pasującej izochrony. Porównanie takie było wykonane w każdej z prac (z pewną modyfikacją w H5, gdzie opisywane były układy jednoliniowe), w oparciu o kilka uznanych i popularnych zestawów izochron: głównie Padova/PARSEC (Bressan i in. 2012; Marigo i in. 2017; prace H1, H3, H4, H5, H6, H7, H8), ale także Dartmouth (Dotter i in. 2007; prace H1 oraz H2), MESA (Paxton i in. 2011; Dotter 2016; praca H9), oraz Yonsei-Yale (Y2; Yi i in. 2001, Demarque i in. 2004; praca H1).

Ostatnim krokiem w analizie było niezależne oszacowanie odległości. W tym celu wykorzystywany był (we wszystkich pracach) prosty program JKTABSDIM<sup>5</sup>, który korzysta z wyznaczonych temperatur do wyznaczenia jasności bolometrycznych  $L$  i zestawu poprawek bolometrycznych do oszacowania jasności absolutnych w wybranych pasmach. Te są porównywane z jasnościami obserwowanymi, co pozwala obliczyć odległość (wymagane jest założenie jakiejś wartości ekstynkcji). JKTABSDIM szacuje też odległości na podstawie kilku relacji temperatura-jasność powierzchniowa.

Uzyskane odległości były porównywane, w miarę możliwości, z najlepszymi dostępnymi w danym czasie paralaksami geometrycznymi, z misji *Hipparcos* i *Gaia* (DR1 i DR2). Uzyskana zgodność była najczęściej dobra lub bardzo dobra, przy czym dla bardziej odległych układów błędy odległości z JKTABSDIM były mniejsze niż z paralaks.

## Wyniki

### Gwiazdy małowasywne

Pierwszą grupą interesujących obiektów, których dotyczyły moje badania, były karły późnych typów widmowych, dla których przyjąłem  $0.9 M_{\odot}$  jako górne ograniczenie masy. Są to obiekty ciekawe nie tylko ze względu na stosunkowo niewielką ilość znanych, dobrze zbadanych przykładów, ale także na istotne różnice między modelami i obserwacjami. Gwiazdy małowasywne w układach podwójnych często, choć nie zawsze, okazują się być większe i chłodniejsze niż przewidują to modele. Istnieje kilka interesujących wyjaśnień tego zjawiska, wszystkie uwzględniające wpływ pól magnetycznych i rotacji (mechanizm dynamo) na konwekcję, ale do dzisiaj żaden model nie wyjaśnia w zadowalający sposób wszystkich obserwowanych przykładów.

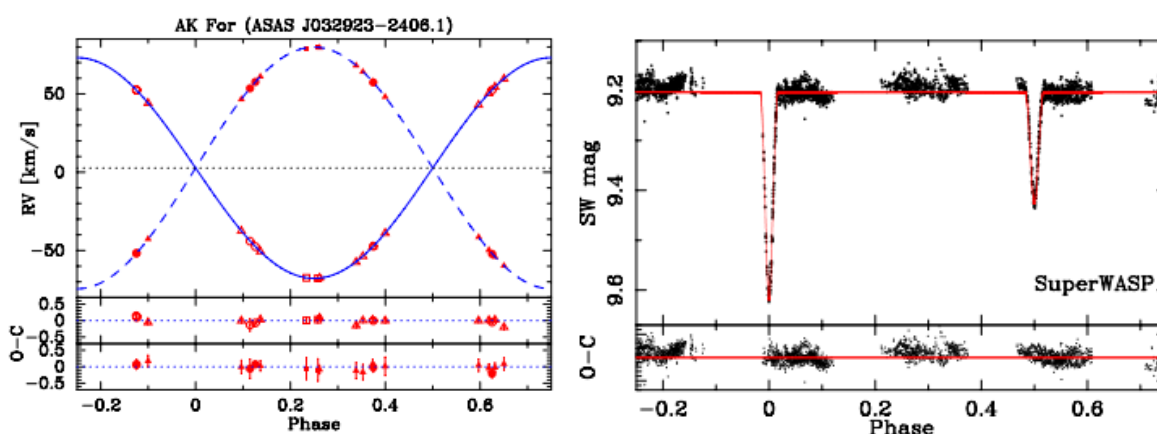
Wyznaczanie parametrów gwiazd późnego typu było tematem mojej rozprawy doktorskiej i z czasów jej przygotowania pochodzą obserwacje układu ASAS J011328-3821.1 (ASAS-011), opisanego w pracy H1. Publikacja ta nie uwzględnia jeszcze pełnej metodologii badań (brak jest np. analizy widmowej), a parametry fizyczne gwiazd nie zostały wyznaczone z pożądaną precyzją  $<3\%$ , ale ASAS-011 okazał się być interesujący z innych powodów. Jest to układ wielokrotny, typu widmowego M, ze składnikami pary zaćmieniowej  $A=A_a+A_b$  o masach  $0.612$  i  $0.445 M_{\odot}$ , i trzecim światłem B o jasności pośredniej między  $A_a$  i  $A_b$ , a więc także późnego typu widmowego. W trakcie analizy wyszły na jaw liczne przesłanki za tym, że składnik B sam jest układem podwójnym, składającym się z gwiazd o masach  $0.50$ - $0.55 M_{\odot}$ . Silna aktywność chromosferyczna objawiała się emisją w linii  $H\alpha$  z co najmniej trzech składników, oraz obecnością chłodnych plam, które wpływały na kształt krzywej blasku. Warto odnotowania jest, że sama krzywa blasku nie zmieniała się znacząco przez około rok, w przeciwieństwie do innych znanych wówczas układów małowasywnych<sup>6</sup>. Ponadto, mały stosunek mas pary zaćmieniowej ( $q = 0.73$ ) sprawia, że na diagramie  $M-R$  (i innych) składniki leżą stosunkowo daleko od siebie, co dodatkowo utrudnia znalezienie wspólnej izochrony. A zatem, pomimo nie osiągnięcia precyzji pomiarów lepszej niż  $3\%$ , analiza układu ASAS-011 okazała się być istotnym wkładem w badania gwiazd typów widmowych M.

<sup>5</sup> <http://www.astro.keele.ac.uk/jkt/codes/jktabsdim.html>

<sup>6</sup> Jak później pokazały obserwacje satelity *Kepler*, ustawienie plam i kształt krzywej blasku mogą się zmieniać w skali nawet pojedynczych tygodni, co zostało pośrednio wspomniane w pracach H6 i H9.



Kolejnym interesującym układem małowasywnym jest AK Fornacis (Rys. 2), opisany w pracy H2. Mimo iż wcześniej było wiadomo, że jest to para zaćmieniowa o typie widmowym K3 (Gray i in. 2006), do 2014 r. nie było opublikowanej żadnej analizy tego obiektu. Jest to najjaśniejszy do tej pory znany układ zaćmieniowy tak późnego typu ( $V = 9.14$  mag), oraz jeden z najlepiej wyznaczonych masami gwiazd w literaturze, z błędami na poziomie 0.14 i 0.11%. Precyzja w wyznaczeniu promieni była niestety znacznie gorsza: 2.9 i 2.6%. Niezwykle małe błędy mas były możliwe do uzyskania dzięki bardzo precyzyjnym pomiarom prędkości radialnych, z rozrzutem na poziomie 90 m/s, co potencjalnie wystarczyłoby do wykrycia masywnej planety okołopodwójnej. Taka dokładność prędkości była zaś możliwa dzięki małemu poszerzeniu rotacyjnemu, związanemu ze stosunkowo długim, jak na tego typu układy, okresem orbitalnym 3.98 dnia. Warty odnotowania jest fakt, że właściwości AK For są dobrze odwzorowane przez modele budowy i ewolucji gwiazd, pomimo iż jest to układ dosyć aktywny, z emisją w linii H $\alpha$  od obu składników i ewolucją chłodnych plam. Wysoki poziom aktywności nie może być jednak wyjaśniony mechanizmem dynamy, ze względu na powolną rotację.



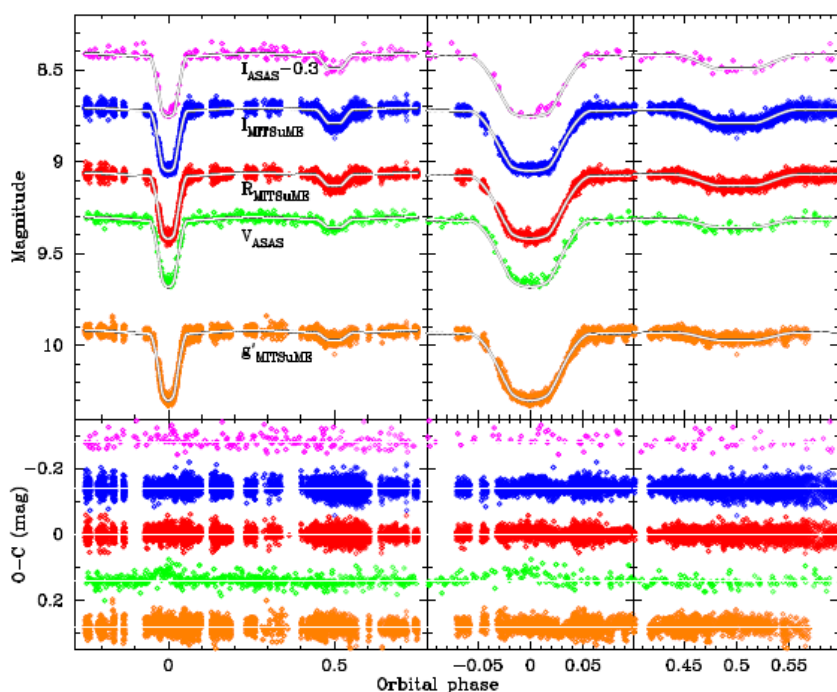
Rys. 2: Krzywa prędkości radialnych (lewo) oraz krzywa blasku z przeglądu SuperWASP (prawo) układu zaćmieniowego AK Fornacis. Ilustracje zaczerpnięte z pracy H2.

Oprócz par z dwoma składnikami małowasywnymi, opisanych zostało kilka układów z gwiazdami tego typu jako składnikami wtórnymi. Składnikami głównymi były zaś bardziej masywne i jaśniejsze gwiazdy wcześniejszych typów (F,G). Głównym problemem w badaniu tego typu układów jest różnica jasności między składnikami, powodująca, że gwiazda chłodniejsza często nie jest widoczna w widmach uzyskanych w zakresie widzialnym. Jednym ze sposobów na zmierzenie jej prędkości radialnych jest obserwacja w podczerwieni, gdzie kontrast między składnikami jest dużo mniejszy. Takie obserwacje trzech układów, ASAS J052743-0359.7 (ASAS-052), ASAS J065134-2211.5 (ASAS-065) i ASAS J073507-0905.7 (ASAS-073), wykonane zostały teleskopem Subaru ze spektrografem IRCS i opisane w pracy H8. Na podstawie widm optycznych ASAS-065 i -073 dało się oszacować prędkości składnika wtórnego, ale pomiary te nie były wiarygodne i dopiero analiza widm podczerwonych potwierdziła ich poprawność. Natomiast w przypadku ASAS-052 pomiary prędkości gwiazdy chłodnej pochodzą tylko z obserwacji IRCS. ASAS-065 i ASAS-073 znalazły się w katalogu DEBCat. Dopasowanie krzywej prędkości radialnych dla składnika głównego ASAS-065 dało bardzo mały rozrzut 19 m/s, pozwalający teoretycznie na detekcję masywnych planet okołopodwójnych.

Ponadto, w takich układach zaćmienia wtórne są w zakresie widzialnym bardzo płytkie, o głębokości często porównywalnej lub mniejszej niż rozrzut danych z przeglądów ASAS czy SuperWASP. Dopiero dedykowane obserwacje teleskopem MITSuME pozwoliły na wykonanie pełnej analizy krzywych blasku i uzyskanie precyzyjnych wyników dla wspomnianych trzech przypadków (Rys. 3). Dla ASAS-065 i ASAS-073 przeprowadzona została analiza widmowa, ale jedynie dla jaśniejszych składników, zaś ASAS-052 ma temperatury oszacowane jedynie na podstawie wskaźników barwy, a metaliczność z dopasowania izochron. Z opisywanych przypadków, tylko składnik wtórny ASAS-065 wykazywał istotne rozbieżności między parametrami uzyskanymi z modelowania a przewidywanymi przez izochrony. Należy również zaznaczyć, że w przypadku

ASAS-073 dopasowanie izochron wskazało na wiek 10-25 Myr, a więc na fazę ewolucji przed ciągiem głównym (*pre-main-sequence*, PMS). Obiekt ten, obok V1200 Cen (Coronado i in. 2015), jest najlepszym kandydatem na gwiazdy PMS w układzie zaćmieniowym, znalezionym w próbie ASAS, a dodatkowo jednym z najjaśniejszych znanych obiektów tego typu ( $V = 9.30$  mag).

Czwarty przypadek układu gwiazd typu G+K to KIC 11922782, opisany w pracach H6 (wyznaczenie mas i promieni) i H9 (analiza widmowa). W tym przypadku kontrast w zakresie widzialnym był na tyle mały, że możliwe było zmierzenie prędkości radialnych składnika typu K na podstawie widm optycznych, a krzywa blasku satelity *Kepler* pozwoliła na uzyskanie dobrej precyzji wyników, natomiast analiza widmowa mogła być przeprowadzona jedynie na wyplątym widmie składnika głównego.



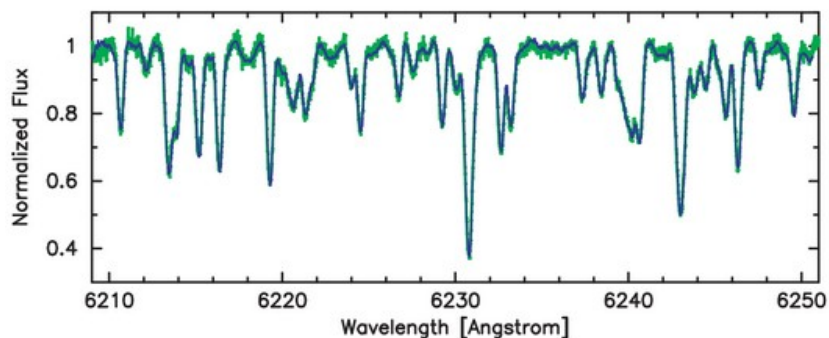
**Rys. 3:** Krzywe blasku układu ASAS-073 z przeglądu ASAS (pasma  $V$ ,  $I$ ), oraz z obserwacji teleskopem MITSuME (pasma  $g'$ ,  $R$ ,  $I$ ). Układ ten zawiera składnik małomasowy i jest dobrym kandydatem na obiekt PMS, który trafił do bazy DEBCat. Ilustracja zaczerpnięta z pracy H8.

## Olbrzymy

Drugą istotną grupą interesujących obiektów były układy zaćmieniowe z wyewoluowanymi składnikami - olbrzymami i podolbrzymami. W szczególności pary złożone z dwóch olbrzymów. Niniejsze Osiągnięcie zawiera dwa takie przypadki: HD 187669 (praca H3) oraz KIC 9246715 (pierwsze wyniki w pracy H4, poprawione w H9).

W momencie publikacji, HD 187669 był pierwszym przypadkiem zaćmieniowej pary olbrzymów w naszej Galaktyce z tak dobrze wyznaczonymi parametrami, oraz tematem noty prasowej<sup>7</sup>. Ponadto wykazuje całkowite zaćmienie główne, podczas którego uzyskano jedno z widm. Publikacja H3 jest wynikiem pracy dwóch niezależnych zespołów (drugi kierowany przez dr. Dariusza Graczyka), które różnymi metodami analizowały ten sam zestaw danych spektroskopowych i fotometrycznych. Takie podejście pozwoliło na wiarygodne oszacowanie błędów systematycznych i porównanie wyników z różnych metod, na przykład parametrów atmosferycznych uzyskanych z widm rozplątanych tomograficznie i uzyskanego podczas całkowitego zaćmienia (Rys. 4), czy stosunków jasności składników wyznaczonych na podstawie widm kodem TODCOR względem tych uzyskanych bezpośrednio z modelowania krzywych blasku. Warto podkreślić są: uzyskana precyzja prędkości radialnych, rzędu 30-50 m/s, precyzja wyznaczeń mas na poziomie 0.26%, mała niepewność oszacowania wieku układu, rzędu 150 Myr ( $\sim 6\%$ ), a także precyzja w wyznaczeniu odległości (3%) lepsza niż z paralaksy *Gaia* DR2 (3.6%).

<sup>7</sup> Np.: <http://www.national-geographic.pl/aktualnosci/polscy-astronomowie-zwazyli-olbrzymy>  
<http://naukawpolsce.pap.pl/aktualnosci/news%2C404327%2Cpolscy-astronomowie-dokladnie-zmierzyli-dwa-gwiazdowe-olbrzymy.html>



**Rys. 4:** Porównanie widma rozplątanego tomograficznie (linia niebieska) z widmem z obserwacji w całkowitym zaćmieniu (zielona) składnika wtórnego układu HD 187669. Ilustracja zaczerpnięta z pracy H3.

W tym samym roku (2015) ukazała się praca H4, pierwsza dotycząca układu KIC 9246715, który w momencie jej publikacji był trzecim przypadkiem dobrze zbadanego Galaktycznego układu zaćmieniowego dwóch olbrzymów. W pracy H4 prezentowanych jest tylko 8 pomiarów prędkości radialnych, co rzutowało na błędy w wyznaczeniach mas. Praca H9 zawiera ponowną analizę danych, opartą o 17 pomiarów prędkości, a także wyznaczenie temperatur efektywnych i metaliczności z widm obu składników rozplątanych tomograficznie. W obu pracach osiągnięta została wysoka precyzja w prędkościach radialnych (ok. 50 m/s), co w pracy H9 przełożyło się na jedną z najlepszych precyzji mas dostępnych w literaturze (~0.15%). Porównanie z izochronami pokazało, że bardziej masywny składnik tej pary jest obiektem na zagęszczeniu gałęzi olbrzymów, znanym jako *red clump*, i niedawno zainicjował palenie helu w jądrze, zaś składnik mniej masywny i mniej wyewoluowany znajduje się obecnie na gałęzi czerwonych olbrzymów i w szybkim tempie zwiększa swój rozmiar.

Zarówno HD 187669 jak i KIC 9246715 znajdują się obecnie w katalogu DEBCat (najwyżej usytuowane fioletowe i czarne punkty na prawym panelu Rys. 1). Poza analizą tych dwóch przypadków miałem duży wkład w prace nad innymi układami zaćmieniowymi z olbrzymami i podolbrzymami: ASAS J010538-8003.7, ASAS J182510-2435.5, V1980 Sgr (Ratajczak i in. 2013), ASAS J184949-1518.7, BQ Aqr i V1207 Cen (Ratajczak i in. 2016). Warto odnotować, że bardziej masywne składniki niektórych układów z pola *Keplera*, tzn. KIC 4851217, 8552540, 10031808, 10583181 i 11922782, są bardzo blisko końca swojej ewolucji na ciągu głównym (MS), wciąż jednak paląc wodór w jądrach. Kilka innych obserwowanych obiektów także zawiera olbrzymy, ale są układami spektroskopowo podwójnymi jednoliniowymi (opis w dalszych częściach).

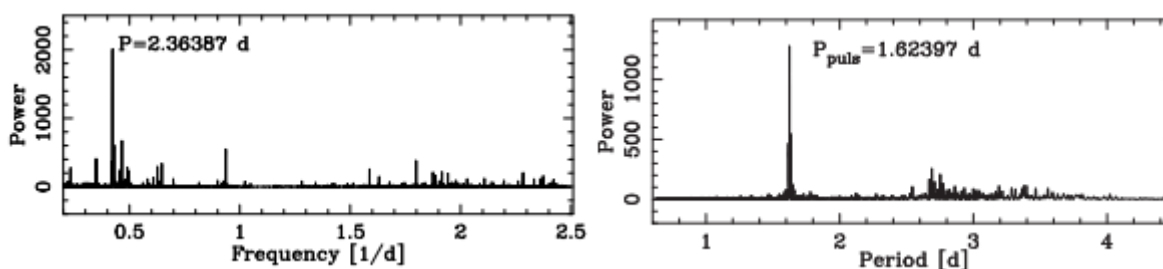
## Gwiazdy pulsujące

Ważną cechą wyróżniającą KIC 9246715 jest fakt wykrycia w jego krzywej blasku tzw. oscylacji typu słonecznego (ang. *solar-like oscillations*). Jest to rodzaj pulsacji, wzbudzanych, podobnie jak na Słońcu, przez ruchy konwektywne w zewnętrznych warstwach atmosfery gwiazdy. Częstość najsilniejszych oscylacji  $v_{\max}$ , oraz separacja między częstościami  $\Delta\nu$  zależą od temperatury efektywnej, przyspieszenia grawitacyjnego i średniej gęstości gwiazdy, a więc pozwalają na niezależne oszacowanie masy i promienia (Kjeldsen i Bedding, 1995; Kallinger i in. 2018). Jest to zatem zjawisko istotne dla astrofizyki gwiazdowej, zaś podwójnie cenne są układy zaćmieniowe z oscylującym składnikiem, takie jak KIC 9246715, które pozwalają na weryfikację i kalibrację astrosejsmologicznych relacji na masę i promień (Brogaard i in. 2018). W momencie opublikowania pracy H4, KIC 9246715 był zaledwie drugim takim przypadkiem z masami i promieniami składników dobrze wyznaczonymi z analizy “zaćmieniowej”. Niezależna od mojej pracy i równoległa analiza układu, opublikowana przez Rawls i in. (2016), pokazała, że oscylacje pochodzą z gwiazdy palącej hel w jądrze, prawdopodobnie składnika bardziej masywnego. Autorzy tej pracy nie osiągnęli jednak wystarczającej precyzji pomiarów, żeby jednoznacznie wskazać który składnik jest bardziej masywny, a wyznaczone przez nich promienie wydawały się być za małe na fazę *red clump*. Aby uzyskać zgodność swoich pomiarów z modelami *red clump*, założyli *ad-hoc* nietypowe parametry konwekcji. Wyniki z późniejszej pracy H9 okazały się być bardziej precyzyjne, a zgodność z modelami została osiągnięta bez dodatkowych założeń.

Oprócz KIC 9246715, w próbce układów z pola satelity *Kepler* znalazło się kilka innych obiektów wykazujących oscylacje typu słonecznego. Są to te same układy jednoliniowe, które zostały wspomniane pod koniec poprzedniej części, a które będą opisane w dalszych częściach tekstu, oraz jedna blenda układu zaćmieniowego z oscylującym olbrzymem (KIC 8718273).

Innym rodzajem pulsacji, występujących w układach z “mojej” próbki *Keplera*, były pulsacje typu  $\delta$  Scuti (dSct) i  $\gamma$  Doradus (gDor). Pierwsze to pulsacje w modach ciśnieniowych, o okresach rzędu godzin, zaś drugie to pulsacje w modach grawitacyjnych o okresach o rząd wielkości dłuższych (0.5 - kilka dni). Oba typy występują w podobnych gwiazdach - karłach typów widmowych A lub F, a nawet mogą pojawić się jednocześnie w tym samym obiekcie (pulsator hybrydowy). Obecnie niewiele jest znanych przypadków tego typu gwiazd w układach zaćmieniowych, a jeszcze mniej ma dokładnie zmierzone parametry gwiazdowe. DEBCat podaje dwa układy ze składnikami typu gDor, oraz jeden ze składnikiem typu dSct.

Układ KIC 4851217 z pracy H9 zawiera właśnie pulsator typu dSct. Pulsacje były znane wcześniej (Gies i in. 2012), ale nie był jednoznacznie określony ich charakter. Praca H9 również nie była pierwszą prezentującą prędkości radialne i oszacowanie mas, ale wcześniejsza analiza (Matson i in. 2017) była dużo mniej precyzyjna. Niestety, ze względu na spore poszerzenie rotacyjne linii widmowych (42 i 65 km/s) oraz dużą różnicę jasności składników, przedstawione w pracy H9 parametry mają błędy na poziomie dwukrotnie większym niż pożądany 2-3%. Niemniej, KIC 4851217 to istotny przypadek układu zaćmieniowego ze składnikiem pulsującym.



**Rys. 5:** Periodogramy Lomb-Scargle’a wykonane na rezyduach z dopasowania krzywych blasku do danych z satelity *Kepler* dla układów KIC 10031808 (lewo, z pracy H6) i KIC 10987439 (prawo, z pracy H9). Wykryte częstości wskazują na pulsacje typu gDor.

Dużo lepsza precyzja wyznaczeń parametrów gwiazdowych została osiągnięta dla układów KIC 10031808 i 10987439, opisywanych w pracach H6 (masy i promienie) i H9 (analiza widmowa). Oba układy zawierają składnik pulsujący typu gDor (Rys. 5) i w obu przypadkach pulsacje nie były rozpoznane wcześniej. KIC 10031808 jest jednym z najlepiej zbadanych obiektów z próbki *Keplera*, z dwoma widmami przeanalizowanymi kodem iSpec, z precyzyjnym wyznaczeniem wieku (niepewność  $\sim 40$  Myr), oraz wykazujący niemal idealną zgodność z modelami budowy i ewolucji gwiazd. Porównanie z izochronami sugeruje, że obecnie pulsuje składnik mniej masywny, ale w przeszłości mógł pulsować także ten drugi. KIC 10031808 jest zatem interesującym przypadkiem, który może pozwolić na lepsze zrozumienie mechanizmów podtrzymujących stabilne mody pulsacji w tego typu gwiazdach.

W układzie KIC 10987439 pulsuje składnik bardziej masywny. Zarówno masy jak i promienie obu gwiazd są wyznaczone z bardzo dobrą dokładnością, ale tylko jedno wyplątane tomograficznie widmo nadawało się do wiarygodnej analizy i bezpośredniego wyznaczenia  $T_{\text{eff}}$ . Ciekawostką jest bardzo mała amplituda pulsacji, 33 ppm, oraz fakt, że składnik pulsujący leży na obrzeżu obszaru na diagramie H-R zajmowanego przez gwiazdy typu gDor, od strony małych mas. Układ ten wraz z KIC 10031808 zwiększają dwukrotnie ilość znanych gwiazd typu gDor z precyzyjnie zmierzonymi masami i promieniami.

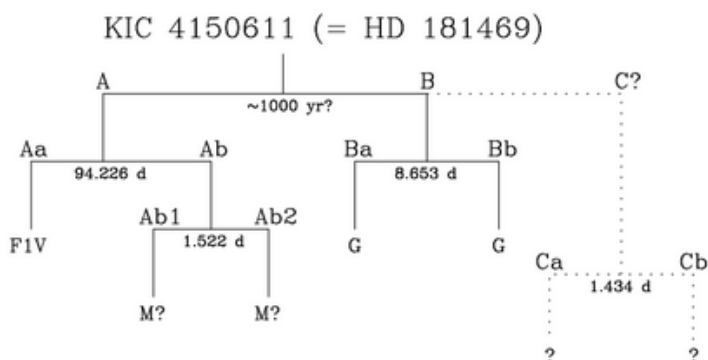
Wspomnieć w tym miejscu należy także system KIC 4150611, którego dominujący składnik jest pulsatorem hybrydowym dSct/gDor, jednak jest to tylko jedna z wielu interesujących własności tego niezwyklego układu.



## Pary zaćmieniowe w układach wielokrotnych

KIC 4150611 to system co najmniej pięciu gwiazd, któremu poświęcona jest praca H7. Niezwykłość tego obiektu polega m.in. na tym, że w jego krzywej blasku wykrywalne są aż cztery okresy zaćmień: 94.2, 8.65, 1.52 i 1.43 d. Na obrazach wykonanych z zastosowaniem AO widać trzy źródła światła, z czego dwa najjaśniejsze stanowią układ wizualnie podwójny ADS 12310 AB. Składnik wizualny A to układ potrójny, w skład którego wchodzi pulsator hybrydowy i obiegająca go co 94.2 dnia para gwiazd typu M, sama będąca w konfiguracji zaćmieniowej, z okresem 1.52 dnia. Składnik wizualny B stanowi para gwiazd typu widmowego G na zaćmieniowej, ekscentrycznej orbicie o okresie 8.65 d. Nie jest jasne pochodzenie ostatniego okresu, 1.43 d. Być może jest on związany z trzecim źródłem światła na obrazach, będącym prawdopodobnie gwiazdą tła. Skomplikowana konfiguracja układu jest podsumowana na Rys. 6. KIC 4150611 stał się tematem noty prasowej<sup>8</sup>.

Architektura układu została ostatecznie potwierdzona w pracy H7. Znajdują się tam też pierwsze pomiary prędkości radialnych pary typu G i pulsatora, pełne modelowanie pary typu G (z wyznaczeniem mas na poziomie 1.1% i promieni 5.5%), oraz oszacowanie wieku układu. Ponadto, przedstawione są przesłanki (głównie z precyzyjnych pomiarów astrometrycznych) ku temu, że wokół składnika wizualnego A krąży jeszcze jedno ciało, którego okres orbitalny jest rzędu lat. Wówczas KIC 4150611 byłby układem sześciokrotnym, a takich w Galaktyce znanych jest tylko kilka. Istnieje prawdopodobieństwo, że to dodatkowe ciało samo w sobie jest tym układem zaćmieniowym, którego okres wynosi 1.43 dnia. Wówczas KIC 4150611 byłby układem siedmiokrotnym - trzecim przypadkiem znanym do tej pory.



**Rys. 6:** Konfiguracja układu wielokrotnego KIC 4150611 (praca H7). Linie przerywane odpowiadają hipotetycznej sytuacji, kiedy widoczne na obrazach źródło C jest układem zaćmieniowym o okresie 1.43 d i jest grawitacyjnie związane z parą AB. Postulowane ciało, krążące wokół podsystemu A, nie zostało oznaczone.

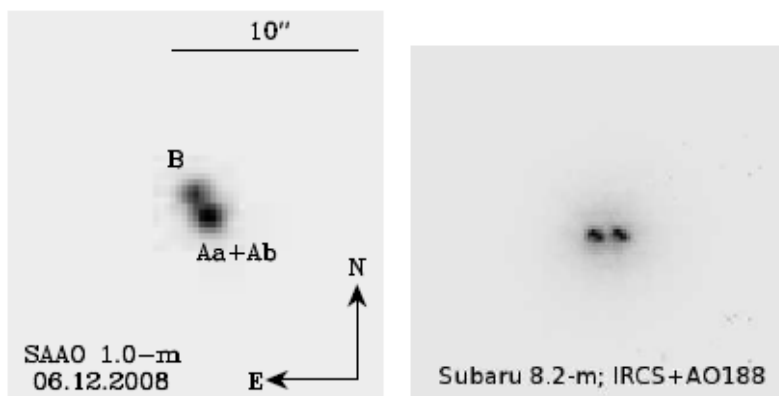
Wiele z układów zaćmieniowych opisywanych w pracach, składających się na niniejsze Osiągnięcie, jest tak naprawdę składnikami układów wielokrotnych. “Wielokrotność” można wydedukować na kilka sposobów, np.:

- układ zaćmieniowy jest jednym ze składników pary wizualnie podwójnej (ASAS-011, ASAS-052, ASAS-065, KIC 4150611, 5598639, KIC 10191056);
- układ zaćmieniowy wykazuje okresową zmienność pomiarów chronometrycznych (KIC 4758368, KIC 5598639, KIC 6525196, KIC 7821010, KIC 10991989, prawdopodobnie również KIC 4851217);
- układ zaćmieniowy wykazuje okresową zmienność prędkości systemowej (KIC 6525196, KIC 10583181);
- w widmie widać linie widmowe nie należące do układu zaćmieniowego (ASAS-011, ASAS-052, KIC 4150611, 4758368, KIC 6525196, KIC 10191056, KIC 10991989).

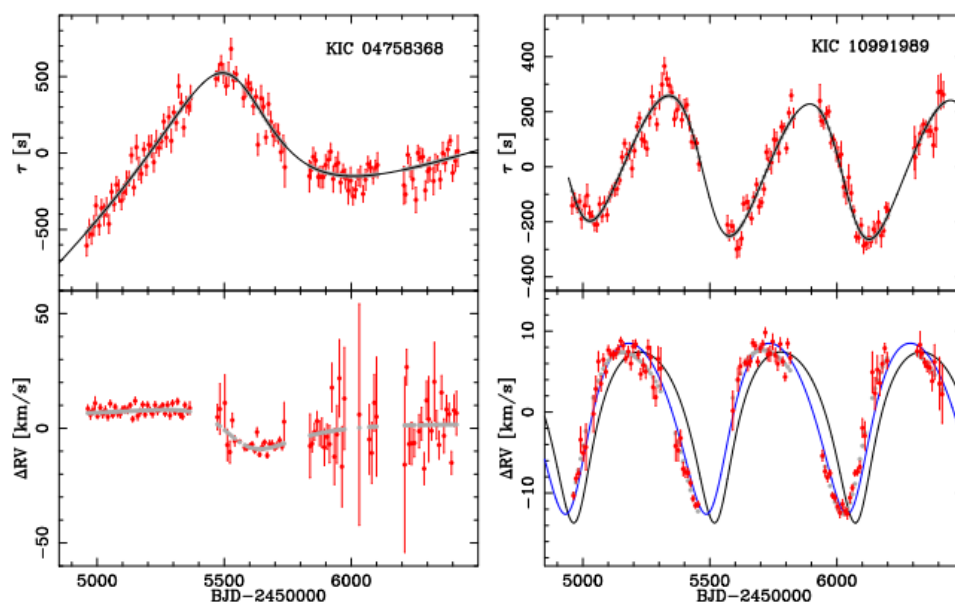
Opis wszystkich zająłby zdecydowanie za dużo miejsca, dlatego ograniczę się do najciekawszych przypadków.

Wspomniany wcześniej ASAS-052 (praca H8), gdzie składnikiem wtórnym pary zaćmieniowej jest gwiazda małowasywna, której prędkości udało się wyznaczyć jedynie na podstawie widm z podczerwieni, jest układem poczwórnym, składającym się z dwóch układów spektroskopowo podwójnych A=Aa+Ab i B=Ba+Bb, widocznych na niebie jako para wizualnie rozdzielona (Rys. 7).

<sup>8</sup> <https://phys.org/news/2017-03-astronomers-rare-multi-eclipsing-quintet-stars.html>



**Rys. 7:** Przykłady par układów zaćmieniowych jako składników wizualnych układów podwójnych. *Lewo:* ASAS-011 (H1) w obserwacjach z teleskopu Elizabeth w SAAO. Parą zaćmieniową jest jaśniejszy składnik, oznaczony Aa+Ab. *Prawo:* ASAS-052 w obserwacjach z teleskopu Subaru na Hawajach z kamerą IRCS i systemem optyki adaptatywnej AO188. Parą zaćmieniową jest składnik po prawej stronie. Składnik po lewej jest również układem spektroskopowo podwójnym. Ilustracja zaczerpnięta z publikacji konferencyjnej Hełminiak i in. (2015a).



**Rys. 8:** Pomiary chronometrażowe (górne panele) oraz wyznaczone na ich podstawie prędkości radialne środka masy pary zaćmieniowej (dolne panele) dla układów KIC 4758368 (lewo) i KIC 10991989 (prawo). Czarne linie na górnych panelach to dopasowany model zmian chronometrażowych, na podstawie którego wyznaczone są modelowe prędkości radialne (szare punkty na dolnych panelach). Linie ciągłe na dolnym panelu KIC 10991989 oznaczają zmienność prędkości systemowej przewidywaną przez dokładne rozwiązanie orbitalne z pracy Rappaport i in. (2013; czarna) i po uwzględnieniu niepewności okresu i momentu przejścia przez perycentrum (niebieska). Ilustracja zaczerpnięta z pracy H5.

Możliwe było wykonanie pomiarów prędkości radialnych wszystkich składników, a także wyznaczenie parametrów względnej orbity składników A i B, na podstawie archiwalnych i nowych pomiarów astrometrycznych.

W widmach KIC 4758368 i 10991989 (praca H5) widać tylko jeden składnik, czerwonego olbrzyma okrążającego parę zaćmieniową na długookresowej orbicie okołopodwójnej. Same pary zaćmieniowe w tych układach wykazują wyraźną zmienność pomiarów chronometrażowych. Pomiary te zostały przetłumaczone na prędkości radialne środka masy pary zaćmieniowej (Rys. 8), co w połączeniu z bezpośrednimi pomiarami prędkości trzeciej gwiazdy umożliwiło wyznaczenie parametrów orbity długookresowej. Przy znajomości masy trzeciej gwiazdy (olbrzym w KIC 10991989 wykazuje oscylacje typu słonecznego, więc jego masę można oszacować niezależnie), pozwala to na wyznaczenie całkowitej masy pary zaćmieniowej, inklinacji orbity długookresowej,

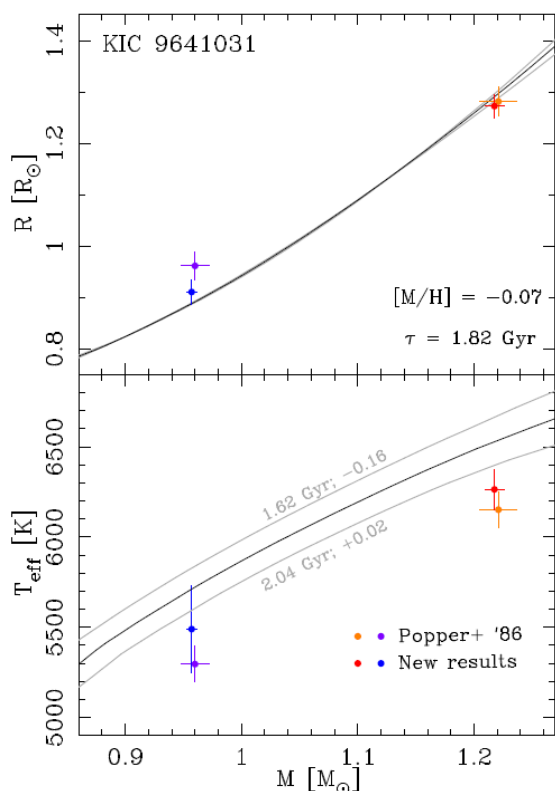
oraz absolutnych wartości promieni składników zaćmieniowych. Dla KIC 4758368 rozwiązanie orbitalne zostało uaktualnione w Dodatku do pracy H9.

Podobnym przypadkiem jest KIC 6525196 (praca H6), ale w jego widmie widać trzy zestawy linii, dzięki czemu masy trzech gwiazd mogły być wyznaczone z dużą dokładnością (0.5-1.5%) z dynamiki układu. Prędkość środka masy pary zaćmieniowej wykazuje wyraźną okresowość, zgodną z pomiarami chronometrycznymi.

W przypadku układu KIC 5598639 (praca H5), który także jest parą wizualnie rozdzieloną, ponownie w widmach nie widać linii składników zaćmieniowych  $A=A_a+A_b$ , a jedynie trzecią gwiazdę B. Jednakże, w tym przypadku nie można wyznaczyć parametrów jej długookresowej orbity wokół pary zaćmieniowej, gdyż jej okres jest zbyt długi, a prędkości radialne są stałe (na poziomie stabilności instrumentu). Natomiast wykryta została okresowa zmienność pomiarów chronometrycznych, o stosunkowo krótkim okresie 81.6 d, wskazująca na obecność jeszcze jednego ciała wokół pary A. Skala tych zmian wskazuje na małą masę tego (czwartego) ciała, z dolnym ograniczeniem wypadającym w obszarze mas brązowych karłów.

### Inne układy z małymi błędami parametrów

Oprócz opisanych do tej pory przykładów układów podwójnych zaćmieniowych, wykazujących ciekawe własności i reprezentujących słabo zbadane klasy gwiazd, w pracach H6 i H9 znajduje się kilka innych obiektów, dla których uzyskane zostały wysokiej jakości, kompletne wyniki (masy, promienie, temperatury efektywne, metaliczność, wiek i odległość). Są to KIC 9641031, KIC 7821010 (oba pojawiły się najpierw w pracy H6) oraz KIC 3439031 (tylko w H9).



**Rys. 9:** Porównanie wyników analizy układu FL Lyr (KIC 9641031) z modelami na diagramach  $M-R$  (góra) i  $M-T_{\text{eff}}$  (dół). Czerwone i niebieskie punkty to wyniki z pracy H9. Linia czarna to najlepiej pasująca do nich izochrona dla metaliczności uzyskanej z analizy rozplątanych widm obu składników. Linie szare to najlepiej pasujące izochrony dla metaliczności w granicach błędu pomiaru ( $\pm 0.09$  dex). Wyniki z pracy H9 są zgodne z modelami w granicach błędów. Punkty pomarańczowe i fioletowe to wyniki z pracy Popper i in. (1986), których nie da się odtworzyć jedną izochroną na diagramie  $M-R$ , zaś na  $M-T_{\text{eff}}$  należałoby założyć małą prawdopodobną, wysoką metaliczność.

KIC 9641031, znany bardziej jako FL Lyr, jest jedynym układem z próbki *Keplera*, który wcześniej miał dobrze wyznaczone własności (Popper i in. 1986) i znajduje się w bazie DEBCat. Trafił na listę celów do obserwacji gdyż spełniał główne kryteria wyboru, a zastosowanie fotometrii satelitarnej i bardziej stabilnego spektrografu dawało nadzieję na znaczące zmniejszenie niepewności parametrów. W istocie, masy składników podane w pracy H9 mają błędy 2-3 krotnie mniejsze niż w pracy Poppera i in. (1986), będąc obecnie na poziomie 0.4-0.6%. Błędy promieni w H9 są tylko nieznacznie niższe niż poprzednio (1.8 i 2.6 %) ze względu na obecność chłodnych, szybko



ewoluujących plam na powierzchni obu składników. Istotnym jest fakt, że same wartości promieni, w szczególności składnika wtórnego ( $0.900 R_{\odot}$ ), są znacząco różne od wyznaczeń podanych przez Poppera i in. ( $0.963 R_{\odot}$ ). Różnica wynika z innego podejścia do szacowania stosunku promieni składników, które w pracy Poppera i in. opierało się na przedawnionych i mało precyzyjnych kalibracjach temperatura- -wskaźnik barwy. Za poprawnością rozwiązania z pracy H9 przemawia lepsza zgodność z teoretycznymi modelami budowy i ewolucji gwiazd (Rys. 9). Przypadek FL Lyr jasno pokazuje, że wiele starszych wyników, uznawanych powszechnie za dobre, może wymagać zrewidowania i poprawienia przy wykorzystaniu współczesnych metod i nowoczesnych instrumentów.

Układ KIC 7821010 został już wspomniany w kontekście okresowych modulacji pomiarów chronometrycznych. Począwszy od roku 2013 był on przedstawiany na kilku konferencjach jako posiadający planetę okółpodwójną o okresie orbitalnym 994 d, wykrytą metodą chronometrażu zaćmień<sup>9</sup>. Doniesienie to zostało potwierdzone później w pracy Borkovits i in. (2016), ale do dziś nie ma właściwej publikacji prezentującej samo odkrycie i pełną analizę układu. Praca H9 jest na chwilę obecną najlepszym źródłem informacji dla tego interesującego obiektu, z precyzją parametrów na poziomie 0.9-1.5%. Warto zaznaczyć, że spodziewany sygnał w prędkościach radialnych, wywołany wpływem planety na układ podwójny, jest na poziomie 30-40 m/s, co jest na pograniczu stabilności spektrografu HIDES, i zdecydowanie w zasięgu bardziej precyzyjnych instrumentów.

KIC 3439031, opisany jedynie w pracy H9, to z kolei przykład gwiazd bliźniaków. Oba składniki mają niemal identyczne masy, promienie i temperatury efektywne (zgodność między składnikami na poziomie lepszym niż  $2\sigma$ ), na dodatek wyznaczone z małymi błędami (na poziomie nawet 0.2%). Układy takie pozwalają potencjalnie na empiryczne testowanie teorii Vogta-Russella, która mówi, że budowa i ewolucja gwiazdy będącej w równowadze hydrostatycznej i termicznej, jest jednoznacznie zdeterminowana przez jej masę i rozkład pierwiastków w jej wnętrzu. Teoria ta leży u podstaw astrofizyki gwiazdowej, chociaż nigdy nie została formalnie udowodniona.

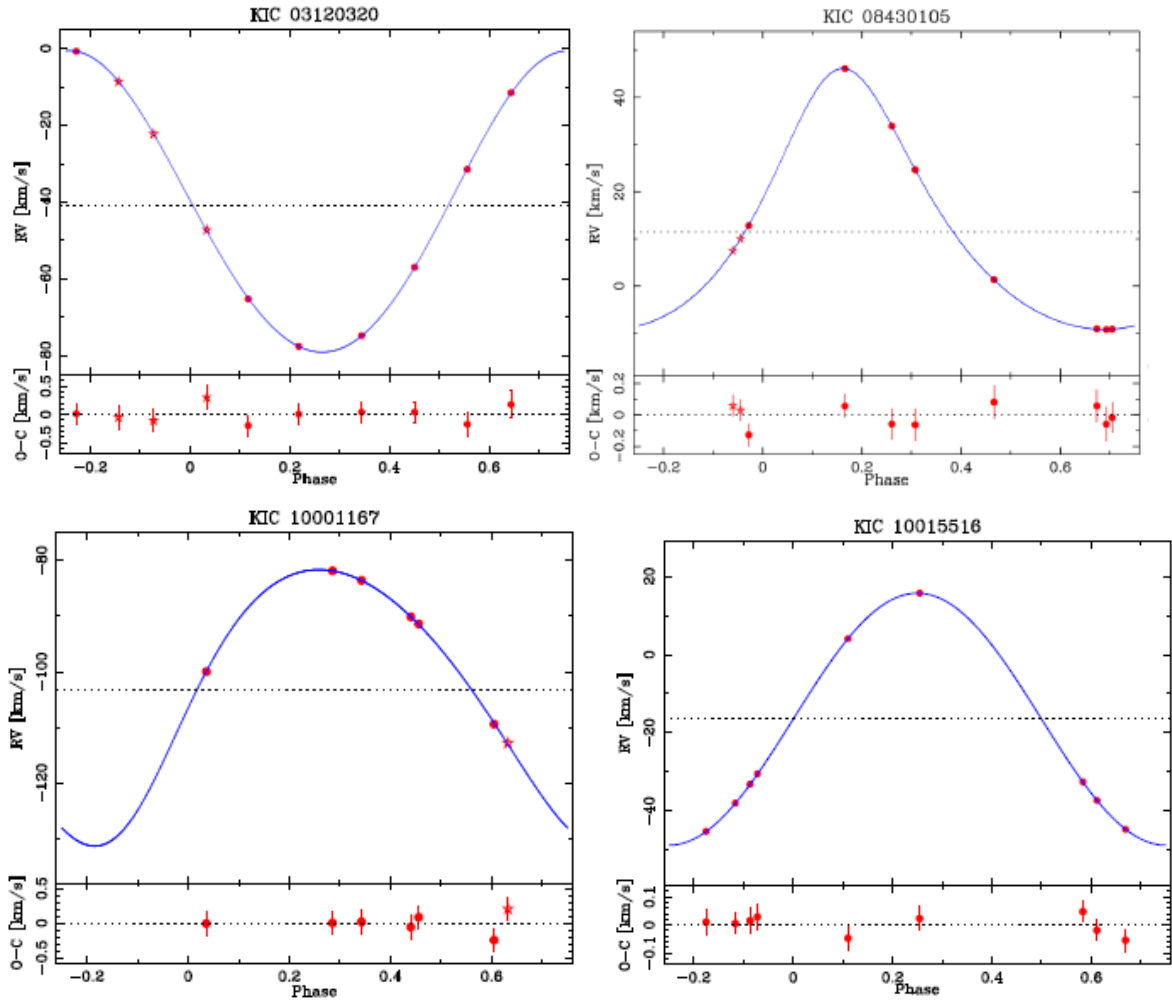
Na koniec chciałbym wspomnieć układ HD 149946 (EPIC 202674012), dla którego zebrałem 15 widm w latach 2012-2015, a który w roku 2014 był obserwowany przez satelitę *Kepler* w ramach kampanii C2 misji *K2*. Analizę zebranej wówczas, bardzo precyzyjnej krzywej blasku wykonali Maxted i Hutcheon (2018), podając również oszacowania temperatur efektywnych obu składników, ale wykorzystali tylko cztery pomiary prędkości radialnych. W nocy badawczej<sup>10</sup> Helminiak i in. (2018) wykorzystali ich cząstkowe wyniki analizy krzywej blasku i połączyłem z dopasowaniem krzywej prędkości radialnej do własnych pomiarów, dzięki czemu uzyskałem pełen zestaw absolutnych wartości parametrów gwiazdowych, z błędami na poziomie 0.8% dla mas i 0.3-0.5% dla promieni. Składnik główny tego układu znajduje się jeszcze na ciągu głównym, ale zbliża się do końca etapu palenia wodoru w jądrze.

## Układy podwójne zaćmienioowe typu SB1

Nietypową w kontekście całości badań jest praca H5, w której prezentowany był cały program obserwacji obiektów z pola *Keplera*. Analizowane w niej były różnego rodzaju obiekty z katalogu KEBC, które w widmach wykazywały tylko jeden zestaw linii. Kilka z nich, których prędkości radialne nie zmieniały się z okresem zaćmień, było już wspomnianych wcześniej (trzy układy wielokrotne, jedna blenda). Pięć pozostałych okazało się być jednoliniowymi układami spektroskopowo podwójnymi (SB1). Dla jednego z nich, KIC 10614012, poprawione zostało jedynie rozwiązanie orbitalne (podane wcześniej w pracy Beck i in. 2014), a dla czterech - KIC 3120320, 8430105, 10001167 i 10015516 - wykonane zostało modelowanie krzywej blasku i (po raz pierwszy) dopasowanie krzywej prędkości radialnych (Rys. 10). Ponieważ metaliczność układów została wcześniej oszacowana (i podana w katalogu KEBC), możliwa była próba oszacowania mas składników, wieku i odległości do danego układu, wykorzystując cząstkowe parametry z dopasowania krzywej blasku, obserwowane wskaźniki barwy (w szczególności  $g'-r'$ ), oraz wiedząc, który ze składników (widoczny w widmie, czy niewidoczny) jest gorętszy (na podstawie zachowania krzywej prędkości radialnych w momentach zaćmień).

9 Np. <http://www.astro.up.pt/investigacao/conferencias/toe2014/files/wwelsh.pdf>

10 Jest to krótka forma publikacji, która nie jest recenzowana, stąd praca ta nie została formalnie włączona do Osiągnięcia habilitacyjnego.



**Rys. 10:** Krzywe prędkości radialnych czterech układów typu SB1 z pracy H5, dla których wykonane zostało modelowanie krzywej blasku. Kropki oznaczają pomiary z widm HIDES, gwiazdki - z widm przeglądu APOGEE.

Porównanie to wykazało, że widoczne w widmach składniki układów KIC 8430105, 10001167 i 10015516 to wyewoluowane czerwone olbrzymy, zaś ich niewidoczni towarzysze to mniej masywne, ale gorętsze gwiazdy ciągu głównego, typów widmowych G lub F. Dwa pierwsze wykazują oscylacje typu słonecznego, a wartości mas i promieni oszacowane z izochron są w niezłej zgodności z wyznaczeniami astrosejsmologicznymi. Z kolei olbrzym w KIC 10015516 wydaje się być na ciekawym etapie ewolucyjnym: pod koniec fazy palenia helu w jądrze, tuż przed migracją na asymptotyczną gałąź olbrzymów. Ostatnia para, KIC 3120320, składa się z dwóch gwiazd ciągu głównego, o masach 1.02 (składnik widoczny w widmie) i 0.55  $M_{\odot}$ , czym przypomina parę zaćmieniową A w układzie wielokrotnym ASAS-052. Niestety w widmach podczerwonych (z przeglądu APOGEE) nie udało się jednoznacznie wykryć składnika wtórnego.

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Badania rozdzielonych układów zaćmieniowych, w szczególności z wykorzystaniem spektroskopii wysokiej rozdzielczości, to główny lecz nie jedyny temat moich zainteresowań naukowych. W trakcie pierwszego stażu doktorskiego, na Pontificia Universidad Católica de Chile, dołączyłem do dużego, międzynarodowego projektu badawczego *Vista Variables in Via lactea* (VVV), który był przeglądem fotometrycznym zgrubienia Galaktyki i części jej dysku, wykonywanym w kilku pasmach bliskiej podczerwieni (*Y,Z,J,H,K*) w celu m.in. identyfikacji dużej ilości nowych gwiazd zmiennych różnych klas i poznania dokładnej struktury obszarów Drogi Mlecznej w pobliżu jej centrum i za nim. Mój udział w projekcie polegał m.in. na pracy przy stworzeniu katalogu *VVV Data Release 1* (Saito i in. 2012), pracach grupy “VVV Templates” (Angeloni i in. 2014), oraz przy organizacji konferencji z serii “VVV Science Meeting”. Oprócz wspomnianych publikacji, jestem współautorem 6 publikacji konferencyjnych z lat 2011-2014.

Tematyką moich własnych badań w ramach VVV były ponownie rozdzielone układy zaćmieniowe, ale w kontekście wyznaczania odległości do nich i wykorzystania ich do badania struktury Galaktyki. Efektem była praca Hełminiak i in. (2013), w której przedstawiłem metodę wyznaczania odległości (wraz z parametrami gwiazdowymi) do dużej próbki układów zaćmieniowych w oparciu jedynie o dane fotometryczne (z przeglądów OGLE i VVV). Jednym z jej wyników była identyfikacja kilkunastu układów leżących za Centrum Galaktyki, w tym w satelitarnej galaktyce karłowatej w Strzelcu (*Sagittarius dwarf spheroidal*; Sgr dSph). Niestety, ze względu na trudności obserwacyjne (bardzo mała jasność, prawdopodobny wczesny typ widmowy, gęste pole), nie udało się do tej pory wykonać dla tych układów obserwacji spektroskopowych wystarczających do wykonania pełnych modeli.

Oprócz VVV, w trakcie pobytu w Chile zaangażowałem się także w projekt instrumentalny, mianowicie budowę i uruchomienie pierwszego skonstruowanego w tym kraju spektrografu PUCHEROS (Vanzi i in. 2012). Prowadziłem na nim jedne z pierwszych obserwacji, testowałem stabilność, oraz byłem recenzentem pierwszej pracy dyplomowej, opartej o dane z tego instrumentu, autorstwa Johannya Coronado Martinez. Publikacja Coronado i in. (2015) przedstawia właśnie wyniki z tego licencjatu. Poza wspomnianymi dwiema publikacjami recenzowanymi, mam swój udział w dwóch publikacjach konferencyjnych i dwóch telegramach, które wykorzystywały dane ze spektrografu PUCHEROS. Doświadczenie zebrane w testowaniu i uruchamianiu spektrografu wykorzystałem także później, pomagając przy testach instrumentu BACHES dla sieci *Solaris*, czy też modułu *astro-comb* (źródło referencyjne do wykonania precyzyjnego rozwiązania długości fali, bazujące na tzw. optycznym grzebieniu częstości) dla spektrografu HIDES.

Krótko po rozpoczęciu pracy dla Subaru Telescope na Hawajach, w roku 2013, dołączyłem do innego międzynarodowego projektu obserwacyjnego - *Strategic Exploration of Exoplanets and Disks with Subaru* (SEEDS). Był to projekt mający na celu poszukiwanie i badanie planet pozasłonecznych oraz dysków protoplanetarnych metodą obrazowania wspomaganego optyką adaptatywną (AO) i koronografią. Tematyką planet pozasłonecznych oraz obserwacji z AO interesowałem się od czasu swojej pracy magisterskiej, opartej właśnie o tego typu obserwacje, w której sprawdzałem możliwości wykrywania egzoplanet metodą astrometrii. W ramach SEEDS uczestniczyłem w pracach grupy “*Nearby stars*” i w obserwacjach dla projektu. Reprezentowałem także projekt na konferencjach międzynarodowych, prezentując np. przegląd wyników w Hełminiak i in. (2015b).

Tematem moich własnych badań w projekcie SEEDS były gwiazdy z obserwowaną modulacją prędkości radialnej. Celem była bezpośrednia detekcja ciała odpowiedzialnego za trend w prędkościach, a w dalszej perspektywie wyznaczenie elementów orbitalnych i dynamicznych mas składników. Udało się to w pełni dla układu V450 And (Hełminiak i in. 2016), w którym postulowana była obecność brązowego karła (Perrier i in. 2003). Ciałem odpowiedzialnym za zmiany prędkości okazał się być karzeł typu M, który czterokrotnie został wykryty bezpośrednio. Dzięki projektowi SEEDS udało się także zaobserwować kilka ciał odpowiedzialnych za długofalowe trendy w prędkościach radialnych olbrzymów, opisanych w pracy Ryu i in. (2016), której jestem

współautorem. Pokłosiem mojego uczestnictwa w projekcie był także referat zaproszony na XXXVIII zjeździe Polskiego Towarzystwa Astronomicznego w Zielonej Górze (Helminiak 2018). Obecnie kontynuuję pracę badawczą w temacie bezpośredniej detekcji kandydatów na planety i brązowe karły wykrytych innymi metodami, prowadząc przy współpracy z polskimi astronomami własny projekt obserwacyjny, skupiający się na ciałach orbitujących wokół układów podwójnych. Testowe obserwacje prowadzone były jeszcze na teleskopie Subaru, natomiast obecnie trwa kampania obserwacyjna na teleskopie VLT z instrumentem SPHERE.

W trakcie pracy nad układem V450 And zainteresowałem się ponadto tematem analizy widmowej i wyznaczania z widm parametrów atmosferycznych gwiazd. Zaowocowało to następnie udziałem w kolejnej publikacji grupy SEEDS (Rich i in. 2017), a także zainspirowało powstanie pracy H9, włączonej do Osiągnięcia habilitacyjnego.

W kontekście mojej pracy w obserwatorium Subaru wspomnieć także należy udział w grupie *Queue Mode Working Group* w latach 2015-2016. Była to grupa, która zaprojektowała, stworzyła, a następnie wdrożyła tryb obserwacji "kolejkowych" (ang. *queue mode*) na teleskopie Subaru, początkowo dla instrumentu Hyper-Suprime Cam. Nie była to działalność czysto naukowa, aczkolwiek zaowocowała współautorstwem dwóch publikacji: Aihara i in. (2018a,b).

W trakcie pobytu na Hawajach zainteresowałem się także innym, stosunkowo nowym typem obserwacji - precyzyjną fotometrią satelitarną. Początkowo w kontekście satelity *Kepler*, a później misji TESS i PLATO. Jest to kontynuacja moich zainteresowań związanych z wykrywaniem planet pozasłonecznych (metodami tranzytów i chronometrażu).

W roku 2013 dołączyłem do zespołu naukowego misji *Kepler*, stając się członkiem grupy roboczej odpowiedzialnej za rozpoznawanie zjawisk tranzytowych i odróżnianie ich od innego rodzaju zmienności (etapy "*Triage*" i "*Dispositioning*"). Bezpośrednimi wynikami pracy tej grupy były katalogi kandydatów z 36 (Rowe i in. 2015) i 47 miesięcy obserwacji (Mullaly i in. 2015), oraz stworzenie automatycznych algorytmów do klasyfikacji. Moje nazwisko widnieje na liście autorów obu publikacji. Zainteresowanie fotometrią pochodzącą z tej misji przerodziło się później w projekt obserwacji układów zaćmieniowych z oryginalnego pola *Keplera* oraz misji *K2*, który zaowocował pracami H4 do H7 i H9 Osiągnięcia Habilitacyjnego, oraz notą badawczą Helminiak i in. (2018).

Z "następcą" *Keplera*, misją *Transiting Exoplanet Survey Satellite* (TESS), jestem związany w dwojaki sposób. Po pierwsze, w roku 2017 dołączyłem do konsorcjum misji jako członek podgrupy roboczej SG1 programu *TESS Follow-up Observing Program* (TFOP). Podgrupa SG1 zajmuje się obrazowaniem i fotometrią naziemną wykrytych kandydatów na tranzyty, w celu weryfikacji ich prawdziwości lub identyfikacji zjawisk je udających. Jako członek tej grupy prowadzę obserwacje wybranych tranzytów siecią teleskopów *Solaris*. Pierwsze efekty tej pracy zostały już opublikowane (Quinn i in. 2019). Natomiast na potrzeby własnych badań nad układami zaćmieniowymi, zaproponowałem w ramach programu *Guest Investigator* (GI) obserwacje z próbkowaniem czasowym 2 min. ~200 wybranych celów, z czego na chwilę obecną zostało zaobserwowanych 61 (stan na 14.02.2019). Wraz z zebranymi do tej pory, własnymi pomiarami prędkości radialnych, dane te będą stanowić podstawę do bardzo precyzyjnego wyznaczenia parametrów gwiazdowych dla niespotykanej dotąd ilości obiektów jednocześnie.

W przyszłości mam zamiar kontynuować udział w tego typu misjach kosmicznych, w szczególności w *PLANetary Transits and Oscillations of stars* (PLATO). Do konsorcjum PLATO także dołączyłem w roku 2017 (grupa "*Photometric detection of circumbinary planets*" oraz program *PLATO Complementary Science*, PLATO-CS).

Wspomniana kilkakrotnie sieć automatycznych teleskopów *Solaris* to kolejny ważny projekt, w jaki byłem (i jestem do tej pory) zaangażowany. Jest to sieć autonomicznych obserwatoriów, opartych o 0.5-metrowe teleskopy dedykowane precyzyjnym pomiarom fotometrycznym, znajdujących się na półkuli południowej (RPA, Australia, Argentyna). Cechą szczególną sieci jest możliwość prowadzenia ciągłych obserwacji wybranego obiektu. Od czasu zainicjowania projektu, tzn. od roku 2010, uczestniczyłem w planowaniu i pracach przygotowawczych, ale ze względów logistycznych brałem bezpośredni udział w budowie i uruchomieniu tylko jednego z teleskopów: SLR4 w Argentynie (trzy wyjazdy instalacyjne do obserwatorium CASLEO w latach 2011 i 2013: przygotowanie miejsca, instalacja kopuły i kontenera, podłączenie kamery i pierwsze testy na niebie).

Oprócz tego, miałem swój udział w uruchomieniu i testach wspomnianego już spektrografu BACHES (Kozłowski i in. 2014, 2016), oraz reprezentowałem projekt na kilku konferencjach międzynarodowych. Sieć *Solaris* jest opisana w pracy Kozłowski i in. (2017). Od roku 2018 teleskopy *Solaris* wspierają także obserwacyjnie misję TESS (Quin i in. 2019).

W trakcie swojej kariery wielokrotnie wspomagałem innych badaczy swoim doświadczeniem obserwacyjnym i w zakresie pomiarów prędkości radialnych, oraz pomagałem uzyskać dostęp do teleskopów. Wykonane przeze mnie obserwacje różnego typu (spektroskopia, fotometria, czy nawet interferometria optyczna), były wykorzystane w takich publikacjach jak: Grellman i in. (2013), Leloudas i in. (2015), Kahraman Aliçavuş i in. (2017), czy Paunzen i in. (2018).

Toruń, 14.02.2019, *K. G. Kozłowski*..... *Helminiak*

#### LITERATURA

- Aihara H., Arimoto N., Armstrong R. i in. 2018a, PASJ, 70, 4  
Aihara H., Armstrong R., Bickerton S. i in. 2018b, PASJ, 70, 8  
Angeloni R., Contreras Ramos R., Catelan M. i in. 2014, A&A, 567, A100  
Bagnuolo W. G., Jr, Gies D. R., 1991, ApJ, 376, 266  
Beck P. G., Hambleton K., Vos J. i in. 2014, A&A, 564, A36  
Blanco-Cuaresma S., Soubiran C., Heiter U., Jofre P., 2014, A&A, 569, A111  
Borkovits T., Hajdu T., Sztakovics J. i in., 2016, MNRAS, 455, 4136  
Bressan A., Marigo P., Girardi L. i in., 2012, MNRAS, 427, 127  
Brogaard K., Hansen C. J., Miglio A. i in., 2018, MNRAS, 476, 3729  
Coronado J., Helminiak K. G., Vanzi L. i in., 2015, MNRAS, 448, 1937  
Demarque P., Woo J-H., Kim Y-C., Yi S. K., 2004, ApJS, 155, 667  
Devor J., Charbonneau D., O'Donovan F. T. i in., 2008, AJ, 135, 850  
Dotter A., Chaboyer B., Jevremovic D. i in., 2007, AJ, 134, 376  
Dotter A., 2016, ApJS, 222, 8  
Gies D. R., Williams S. J., Matson R. A. i in., 2012, AJ, 143, 137  
Gray R. O., Corbally C. J., Garrison R. F. i in., 2006, AJ, 132, 161  
Grellmann R., Preibisch T., Ratzka T. i in. 2013, A&A, 550, A82  
Helminiak K. G. 2018, PPAS, 7, 107  
Helminiak K. G., Devor J., Miniti D., Sybilski P. 2013, MNRAS, 432, 2895  
Helminiak K. G., Konacki M., Ratajczak M. i in., 2015a, ASPC, 496, 76  
Helminiak K. G., Kuzuhara M., Kudo T. i in., 2015b, w: van Belle G., Harris H. C., *Proceedings of the 18th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun*  
Helminiak K. G., Kuzuhara M., Mede K. i in. 2016, ApJ, 832, 33  
Helminiak K. G., Jordán, A., Espinoza, N. i in., 2018, RNAAS, 2, 226  
Kahraman Aliçavuş F., Niemczura E., Polińska M. i in. 2017, MNRAS, 470, 4408  
Kallinger T., Beck P. G., Stello D., Garcia R. A., 2018, A&A, 616, A104  
Kirk B., Conroy K., Prša A. i in., 2016, AJ, 151, 68  
Kjeldsen H., Bedding T. R., 1995, A&A, 293, 87  
Konacki M., Muterspaugh M. W., Kulkarni S. R., Helminiak K. G., 2010, ApJ, 719, 1293

Kozłowski S. K., Konacki M., Sybilski P., 2011, MNRAS, 416, 2020  
Kozłowski S. K., Konacki M., Ratajczak M. i in., 2014, MNRAS, 443, 158  
Kozłowski S. K., Konacki M., Sybilski P. i in., 2016, PASP, 128, 074201  
Kozłowski S. K., Sybilski P., Konacki M. i in., 2017, PASP, 129, 105001  
Kurucz R. L., 1993, ASPC, 44, 87  
Lastennet E., Valls-Gabaud D., 2002, A&A, 396, 551  
Leloudas G., Schulze S., Krühler T. i in. 2015, MNRAS, 449, 917  
Marigo P., Girardi L., Bressan A. i in. 2017, ApJ, 835, 77  
Matson R. A., Gies D. R., Guo Z., Williams S. J., 2017, AJ, 154, 216  
Maxted P. F. L., Hutcheon R. J., 2018, A&A, 616, A38  
Mullaly F., Coughlin J. L., Thompson S. E. i in. 2015, ApJS, 217, 31  
Paxton B., Bildsten L., Dotter A. i in., 2011, ApJS, 192, 3  
Paunzen E., Fedurco M., Hełminiak K. G. i in. 2018, A&A, 615, A36  
Perrier C., Sivan J.-P., Naef D. i in. 2003, A&A, 410, 1039  
Pojmański A., 2002, AcA, 52, 397  
Popper D. M., Lacy C. H. S., Frueh M. L., Turner A. E., 1986, AJ, 91, 383  
Prša A., Zwitter T., 2005, ApJ, 628, 426  
Prša A., Batalha N., Slawson R. W. i in., 2011, AJ, 141, 83  
Quinn S. N., Becker J. C., Rodriguez J. E. i in. 2019, arXiv:1901.09092  
Ratajczak M., Hełminiak K. G., Konacki M., Jordán, A., 2013, MNRAS, 433, 2357  
Ratajczak M., Hełminiak K. G., Konacki M. i in., 2016, MNRAS, 461, 2234  
Rawls M. L., Gaulme P., McKeever J. i in., 2016, ApJ, 818, 108  
Rich E. A., Wisniewski J. P., McElvain M. W. i in. 2017, MNRAS, 472, 1736  
Rowe J. F., Coughlin J. L., Antoci V. i in. 2015, ApJS, 217, 16  
Ryu T., Sato B., Kuzuhara M. i in. 2016, ApJ, 825, 127  
Saito R., Hempel M., Minniti D. i in. 2012, A&A, 537, A107  
Slawson R. W., Prša A., Welsch W. i in., 2011, AJ, 142, 160  
Southworth J. 2015, ASPC, 496, 164  
Southworth J., Maxted P. F. L., Smalley B., 2004a, MNRAS, 351, 1277  
Southworth J., Zucker S., Maxted P. F. L., Smalley B., 2004b, MNRAS, 355, 986  
Tokovinin A., Mason B. D., Hartkopf W. I. i in., 2015, AJ, 150, 50  
Tokovinin A., Mason B. D., Hartkopf W. I. i in., 2018, AJ, 155, 235  
Torres G., Andersen J., Gimenez A., 2010, A&AR, 18, 67  
Valenti J. A., Piskunov A., 1996, A&AS, 118, 595  
Valle G., Dell'Omodarme M., Prada Moroni P. G., Degl'Innocenti S., 2017, A&A, 600, A41  
Vanzi L., Chacon J., Hełminiak K. G. i in. 2012, MNRAS, 424, 2770  
Wilson R. E., Devinney E. J., 1971, ApJ, 166, 605  
Yi S. K., Demarque P., Kim Y.-C. i in., 2001, ApJS, 136, 417  
Zucker S., Mazeh T., 1994, ApJ, 420, 806