

## Autoreferat

1. Imię i Nazwisko **Dariusz Graczyk**

2. Stopnie naukowe.

**mgr astronomii, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Toruń, 1996**

***Metody uśredniania w mechanice nieba***

**dr nauk fizycznych w zakresie astronomii, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Toruń, 2003**

***Długookresowe układy podwójne zaćmieniowe***

3. Zatrudnienie w jednostkach naukowych.

**Instytut Astronomii, Zielona Góra, 2003**

**Departamento de Astronomía, Universidad de Concepción, Chile, 2009-2016**

**Centrum Astronomii im. Mikołaja Kopernika, PAN, Toruń, 2016-**

4. Wskazanie osiągnięcia:

a. tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego

**Gwiazdy podwójne zaćmieniowe jako unikalne narzędzie i laboratorium astrofizyczne.**

b. (autor/autorzy, tytuł publikacji, rok wydania, wydawnictwo)

H1. **Graczyk, D.**, Pietrzyński, G., Thompson, I. B., Gieren, W., Pilecki, B., Konorski, P., Udalski, A., Soszyński, I., Villanova, S., Górski, M., Suchomska, K., Karczmarek, P., Kudritzki, R.-P., Bresolin, F., Gallenne, A., 2014, ApJ, 780, 59

*The Araucaria Project. The Distance to the Small Magellanic Cloud from late-type eclipsing binaries*  
cytacje=80, impact factor=6,063

H2. Hełminiak, 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., 2015, MNRAS, 448, 1945, *Orbital and physical parameters of eclipsing binaries from the ASAS catalogue - VIII. The totally eclipsing double-giant system HD 187669*, cytacje=17, impact factor=4,729

H3. **Graczyk, D.**, Smolec, R., Pavlovski, K., Southworth, J., Pietrzyński, G., Maxted, P. F. L., Konorski, P., Gieren, W., Pilecki, B., Taormina, M., Suchomska, K., Karczmarek, P., Górski, M., Wielgórski, P., Anderson, R. I., 2016, A&A, 594, A92

*A solar twin in the eclipsing binary LL Aquarii*  
cytacje=4, impact factor=5,185

H4. **Graczyk, D.**, Konorski, P., Pietrzyński, G., Gieren, W., Storm, J., Nardetto, N., Gallenne, A., Maxted, P. F. L., Kervella, P., Kołaczkowski, Z., 2017, ApJ, 837, 7

*The Surface Brightness-color Relations Based on Eclipsing Binary Stars: Toward Precision Better than 1% in Angular Diameter Predictions*

cytacje=6, impact factor=5,533

c. Omówienie celu naukowego ww. prac, osiągniętych wyników i ich zastosowania.

Wszystkie wymienione wyżej prace, stanowiące moje dzieło habilitacyjne, łączy kwestia różnorodnych zastosowań gwiazd podwójnych zaćmieniowych w astrofizyce. Każda wymieniona praca dokumentuje unikalne odkrycie naukowe lub też analizę zagadnienia, które po raz pierwszy zostało sformułowane i w pełni przedstawione w pracy naukowej. Poszczególne prace opiszę bardziej szczegółowo w dalszej części Omówienia, natomiast w tym miejscu podam ich zwięzłą charakterystykę. I tak, praca **H1** przedstawia pierwsze wyznaczenie odległości do Małego Obłoku Magellana (SMC) z pomocą rozdzielonych gwiazd zaćmieniowych późnego typu oraz omawia różne aspekty i detale tej metody. Praca **H2** przedstawia pierwszą dokładną analizę układu zaćmieniowego w Drodze Mlecznej składającego się z dwóch olbrzymów. Praca **H3**

dokumentuje odkrycie pierwszej znanej gwiazdy tzw. słonecznego bliźniaka (ang. *solar twin*) w rozdzielonym układzie zaćmieniowym i pierwszą pełną charakterystykę parametrów fizycznych takiej gwiazdy w sposób niezależny od modeli ewolucji gwiazd. Wreszcie praca **H4** przedstawia pierwszą precyzyjną kalibrację jasności powierzchniowej gwiazd wykonaną tylko z pomocą gwiazd zaćmieniowych i ze szczegółami opisuje całą metodologię, jaką używa się w tego rodzaju kalibracji. Wszystkie te publikacje naukowe są pracami zespołowymi i powstały w ramach działań międzynarodowego projektu Araucaria. Jego głównym celem jest dokładna kalibracja lokalnej pozagalaktycznej skali odległości i precyzyjna charakterystyka wskaźników odległości używanych przy budowaniu tej skali. Mój udział w wymienionych pracach był albo bardzo istotny (**H2**) albo decydujący (**H1**, **H3** i **H4**).

Obłoki Magellana są bardzo ważnym szczeblem pozagalaktycznej skali odległości (np.: Freedman i in. 2001, Riess i in. 2016). Z uwagi na obecność w nich licznej populacji klasycznych cefeid oraz fakt, że metaliczność obu Obłoków jest niższa niż Drogi Mlecznej, są one wykorzystywane do kalibrowania punktu zerowego i nachylenia zależności okres-jasność dla cefeid. Szczególnie ważny pod tym względem jest LMC i odległość do niej (np.: Macri i in. 2015, Riess i in. 2016), ze względu na stosunkowo mało skomplikowaną geometrię tej galaktyki i jej małą grubość geometryczną w kierunku widzenia. Natomiast SMC jest galaktyką znacząco zniekształconą przez oddziaływania pływowe z LMC i Drogą Mleczną. Odległość do niej jest wykorzystywana głównie do sprawdzania uniwersalności zależności okres-jasność cefeid i zależności tych relacji od metaliczności (np.: Ngeow i in. 2015, Wielgórski i in. 2017), gdyż SMC ma znacząco niższą metaliczność niż LMC (np. Westerlund 1997). Również względna odległość pomiędzy obu Obłokami Magellana jest bardzo istotna, gdyż pozwala zweryfikować efekty populacyjne różnych wskaźników odległości (np. Górski i in. 2016, Wielgórski i in. 2017). Odległość do LMC przez wiele lat była przedmiotem dyskusji i jej wyznaczenia były znacząco rozbieżne (np. Gibson 2000), ale też podlegały efektom psychologii grupowej (Schaefer 2008). Praca Pietrzyński i in. (2013), w której powstaniu miałem bardzo istotny udział, pozwoliła na rozstrzygnięcie tego problemu poprzez zmierzenie odległości do LMC z dokładnością 2% za pomocą gwiazd zaćmieniowych zawierających olbrzymy późnego typu widmowego. Użycie tej samej metody, z drobnymi modyfikacjami, dla bardzo dokładnego wyznaczenia odległości do centralnej części SMC (precyzja 3%) było głównym moim celem w pracy **H1**.

Na czym polega ta metoda? Posługując się krzywymi blasku oraz krzywymi prędkości radialnych obu składników wyznaczone są z pomocą programu Wilsona-Devinney'a (1971, Wilson 1979, 1990) parametry absolutne układu, takie jak: separacja składników, ich masy i promienie. Następnie wyznaczone są odczerwione kolory V-K obu składników posługując się fotometrią podczerwoną i mapami ekstynkcji międzygwiazdowej. Kolory te w połączeniu z kalibracjami jasności powierzchniowej gwiazd (np. Kervella i in. 2004, di Benedetto 2005) pozwalają obliczyć rozmiary kątowe składników. Znając rozmiary liniowe i kątowe gwiazd układu, odległość do niego wynika z prostej geometrii. Odległość do SMC wyznaczona w pracy **H1** jest obciążona najmniejszym błędem systematycznym (2%) ze wszystkich użytych w tym celu metod (np.: de Grijs i Bono 2015). Od momentu opublikowania tej odległości stała się ona swego rodzaju standardem w literaturze, będąc często cytowana w parze z odległością do LMC wyznaczoną przez Pietrzyński i in. (2013).

Innym ważnym rezultatem pracy **H1** jest wyznaczenie przeze mnie parametrów fizycznych czterech unikalnych układów gwiazd zawierających olbrzymy późnego typu. W połączeniu z analizą innego układu zaćmieniowego w SMC (Graczyk i in. 2012) daje to zbiór dokładnych parametrów fizycznych, takich jak masy, promienie, temperatury i metaliczności dla 10 olbrzymów późnego typu w tej galaktyce. Są to jedyne tak dokładne wyznaczenia parametrów dla olbrzymów w SMC w literaturze. Wyniki te znalazły ważne zastosowanie w kalibrowaniu i testowaniu modeli ewolucji gwiazd po zejściu z ciągu głównego, szczególnie w obszarze małych metaliczności (np.: Claret i Torres 2016, Eggleton i Yakut 2016).

W kolejnej pracy dzieła habilitacyjnego **H2**, wraz z dr K. Hełminiakiem dokładnie określiliśmy kontrybucje efektów systematycznych przy analizie układów zaćmieniowych zawierających olbrzymy późnych typów widmowych. Wykorzystaliśmy w tym celu układ HD 187669 znajdujący się w kierunku zgrubienia centralnego Drogi Mlecznej odkryty przez projekt ASAS (Pojmański 2002). Jednym z ważnych celów pracy **H2** było wyznaczenie precyzyjnych parametrów gwiazd będących czerwonych olbrzymami (Red Giant Branch i Red Clump stars) w sposób niezależny od modeli ewolucyjnych lub innych dodatkowych założeń. Gwiazdy takie palą wodór w koncentrycznej warstwie wokół jądra (RGB) lub też rozpoczęły palenie helu w jądrze (RC). Obie gwiazdy tworzące układ HD 187669 znajdują się na początku swej ewolucji na gałęzi olbrzymów, a wiek układu wyznaczyliśmy na 2.2 mld lat. Wraz z opublikowaniem naszej pracy był to pierwszy układ zaćmieniowy w naszej galaktyce zawierający dwa olbrzymy, dla którego precyzyjnie wyznaczono rozmiary absolutne (masa, promień). Dla potrzeb tej pracy wykonałem specjalnie widmo tego układu w czasie trwania zaćmienia głównego za pomocą spektrografu HARPS. Pozwoliło to otrzymać czyste widmo chłodniejszego

składnika tego układu. Aby obiektywnie określić efekty systematyczne obserwacje fotometryczne i spektroskopowe były analizowane oddzielnie i niezależnie przez dwa zespoły, określone w pracy jako Grupa G (prowadzona przeze mnie) i Grupa H (prowadzone przez K. Hełminiaka). Co więcej, w praktyce na każdym etapie analizy używaliśmy innych narzędzi do obróbki danych i dopasowywania modeli. Oczywiście w czasie trwającej ponad pół roku pracy konsultowaliśmy niektóre wyniki częściowe, aby uniknąć ewentualnych błędów grubych. Z punktu widzenia projektu Araucaria praca ta ma ważne znaczenie, gdyż pozwoliła zbadać możliwe efekty systematyczne w metodzie jakiej użyliśmy na potrzeby analizy układów zaćmieniowych w LMC (Pietrzyński i in. 2013, Elgueta i in. 2016) i SMC (Graczyk i in. 2012, **H1**).

W ostatnim czasie zainteresowanie czerwonymi olbrzymami znacząco zwiększyło się poprzez nowe możliwości ich studiowania, jakie zaoferowała asterosejmologia (misje kosmiczne *CoRoT* i *Kepler*), jak i spektroskopia podczerwona (projekt Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment - *APOGEE*). Czerwone olbrzymy wykorzystuje się do zbadania struktury dynamicznej i ewolucji chemicznej naszej galaktyki poprzez analizowanie populacji jednorodnych wiekowo lub chemicznie gwiazd (np.: Mackereth et al. 2017, Anders et al. 2017) - również na samych obrzeżach galaktyki (np.: Mathur i in. 2016), wyznaczania rotacji galaktyki (np.: Lopez-Corredoira 2014, Huang et al. 2016), wyznaczania odległości do masywnych gwiazd w ramionach spiralnych (e.g. Suchomska i in. 2015), by wymienić tylko te ważniejsze obszary badań. Jednak prawie we wszystkich tych badaniach zakłada się pewne statystyczne własności czerwonych olbrzymów a indywidualne własności takie jak masa, promień, jasność wyprowadzane są z dokładnością nieprzekraczającą 4-5%. Wciąż, jedynie obserwacja tych gwiazd w układzie zaćmieniowym pozwala na wyznaczenie parametrów fizycznych z dokładnością 1-2%. Tutaj ciekawym przykładem zastosowania układów zaćmieniowych jest kalibracja relacji asterosejmologicznych wiążących podstawowe parametry fizyczne gwiazd z separacją częstotliwości  $\Delta\nu$  i częstotliwością maksimum mocy oscylacji  $\nu_{\max}$ , zwanymi relacjami skalującymi (np.: Kjeldsen & Bedding 1995). W pracy Gaulme i in. (2016) poddano analizie 10 układów zaćmieniowych znalezionych przez misję *Kepler*, składających się z czerwonego olbrzyma i gwiazdy ciągu głównego, co pozwoliło stwierdzić istnienie rozbieżności pomiędzy dynamicznie i asterosejmologicznie wyznaczanymi masami dochodzącymi do 15%.

Najważniejsze wnioski z pracy **H2** można podsumować następująco:

- 1) standardowe metody analizy gwiazd zaćmieniowych rzeczywistości dają precyzję osiągającą 1% w parametrach modeli układów zawierający olbrzymy, uwzględniając w tym efekty systematyczne;
- 2) widmo otrzymane w czasie zaćmienia całkowitego znakomicie odpowiada widmu otrzymanemu w wyniku procesu rozplątywania widm składników; uwierzytelnia to metodę rozplątywania widm, jakiej używaliśmy w pracach poświęconych układom zaćmieniowym w Obłokach Magellana
- 3) modele ewolucji gwiazd (PARSEC - Bressan i in. 2012) dobrze pasują do obserwowanych parametrów układu, jednak precyzja wyznaczonych parametrów, mimo że osiągnęła 1% wciąż nie wystarcza, aby wykalibrować precyzyjnie parametr konwektywnego przestrzelenia (overshooting), który wpływa na ewolucję gwiazd masywniejszych niż słońce.

Praca **H3** powstała w ramach prowadzonego przeze mnie projektu obserwacji pobliskich układów zaćmieniowych (Graczyk i in. 2015). Zamierzyłem w niej kilka celów: bardzo precyzyjne wyznaczenie parametrów układu zaćmieniowego LL Aqr, sprawdzenie czy chłodniejszy składnik LL Aqr jest słonecznym bliźniakiem oraz przetestowanie modeli ewolucji gwiazd typu słonecznego. Słoneczny bliźniak to gwiazda mająca parametry fizyczne, takie jak promień, temperatura i skład chemiczny bardzo zbliżone do Słońca. Fundamentalnymi zastosowaniami gwiazd bliźniaczych jest pośrednie wyznaczanie kolorów Słońca (np.: Casagrande i in. 2012), identyfikacja wszelkich osłabłości Słońca na ich tle (np.: Melendez i in. 2009) oraz poszukiwanie bliźniaczych do naszego układów planetarnych (np.: Ramirez i in. 2014). Chociaż znanych jest kilkadziesiąt gwiazd o parametrach bardzo zbliżonych do Słońca (np.: Porto de Mello i in. 2014) a niektóre z nich mają widma niemal identyczne ze Słońcem, jak na przykład HIP 56948 (Melendez i in. 2012), żadna z nich nie miała, jak do tej pory, bezpośrednio wyznaczonej masy, jak i dokładnego promienia. Parametry te dla słonecznych bliźniaków wyznaczone są pośrednio ze ścieżek ewolucji gwiazd, tym samym potencjalnie obciążone są dużymi niepewnościami systematycznymi, które jednak są trudne do dokładnego oszacowania. W przypadku LL Aqr wykorzystując wysokiej jakości widma ze spektrografów wysokiej rozdzielczości HARPS i CORALIE oraz bardzo dobrą krzywą blasku z SWASP (Polacco i in. 2006) mogłem wyznaczyć promienie obu gwiazd z precyzją 0,5% i ich masy z precyzją 0,07%. Dużą uwagę przyłożyłem do wyznaczenia temperatur obu gwiazd, które zostały obliczone za pomocą kilku niezależnych metod i dały zgodne ze sobą rezultaty. Składnik-kandydat na bliźniaka okazał się gwiazdą odrobinę bardziej masywną niż Słońce, jednocześnie jest od niego trochę chłodniejszy. Rozplątane widmo chłodniejszego składnika jest bardzo podobne do widma słonecznego a metaliczność obu składników LL Aqr jest taka jak Słońca. Również kolory bliźniaka

wyznaczone na podstawie wielopasmowej fotometrii są w doskonałej zgodności z kolorami Słońca. Wszystkie przeprowadzone przeze mnie testy potwierdziły, że chłodniejszy składnik jest w słonecznym bliźniaku.

Znakomita precyzja otrzymanych parametrów układu LL Aqr posłużyła do przetestowania modeli ewolucji gwiazd i określenia statusu ewolucyjnego układu. Ta część pracy została wykonana we współpracy z dr R. Smolcem i dr P. Maxted. Użyte modele to MESA (np.: Paxton i in. 2015) i GARSTEC (Bressan i in. 2012). W przypadku modeli MESA bardzo trudno było uzyskać zgodność obserwowanych parametrów fizycznych składników z przewidywaniami modelowymi. Dopiero użycie i dopasowanie dodatkowych parametrów, takich jak różnicowa skala mieszania oraz dyfuzja metali, pozwoliło na otrzymanie zadowalającej, w granicach  $1\sigma$ , zgodności. Wiek systemu został określony na około 2,5 miliarda lat, czyli obie gwiazdy są dopiero na początku swej ewolucji na ciągu głównym. Zwraca uwagę fakt, że używając standardowych ścieżek ewolucyjnych dopasowywanie obserwowanych parametrów obu składników LL Aqr (temperatura efektywna, przyspieszenie grawitacyjne na powierzchni gwiazdy oraz metaliczność) prowadzi do mas i promieni, które są różne od tych bezpośrednio wyznaczonych o około 5%. To pokazuje jak w pracach publikujących formalnie bardzo precyzyjne wyznaczenia mas i promieni gwiazd bliźniaczych oparte o dopasowywanie ewolucyjnych izochron (np.: Yana Galarza i in. 2016), wyznaczenia te obarczone są prawdopodobnie dużymi niepewnościami systematycznymi nieuwzględnianymi w budżecie błędów przez autorów tych prac. Jednakże, jak do tej pory praca **H3** nie doczekała się dyskusji w literaturze przedmiotu. Niektóre wyniki pracy **H3**, w szczególności precyzyjne parametry gwiazd, zostały użyte przy kalibracji jasności powierzchniowej gwiazd (praca **H4**) i przy testowaniu paralaks trygonometrycznych misji kosmicznej *Gaia* z pierwszej edycji danych DR1 (Stassun i Torres 2016a,b).

Istnienie ścisłej zależności pomiędzy jasnością powierzchniową gwiazd i ich kolorami zostało stwierdzone empirycznie na przełomie lat 60-tych i 70-tych ubiegłego wieku (np. Wesselink 1969, Barnes i Evans 1976). Jasność powierzchniowa gwiazdy jest indeksem fotometrycznym wyznaczanym z jej obserwowanego rozmiaru kąтового i jasności mierzonej w standardowym filtrze (np. Hindsley i Bell 1989). Rozmiary kątowe gwiazd są obecnie wyznaczone głównie z pomocą interferometrii długobazowej w zakresie optycznym lub bliskiej podczerwieni. Najważniejszym zastosowaniem zależności jasność powierzchniowa-kolor w astrofizyce jest obliczanie spodziewanych rozmiarów kątowych gwiazd na podstawie ich obserwowanych kolorów. W połączeniu z oceną rzeczywistych rozmiarów gwiazdy pozwala to uzyskać odległość do niej czy to metodą metody Baade-Wesselinka (np.: Fouque i Gieren 1997), czy też metodą gwiazd zaćmieniowych (np.: Graczyk i in. 2012, **H2**). Kalibracje dające najdokładniejsze oceny rozmiarów kątowych są skalibrowane w kolorach łączących filtr V lub B z podczerwonym filtrem K (np.: Kervella i in. 2004). W przypadku gwiazd późnych typów widmowych precyzja, z jaką takie kalibracje przewidują rozmiary kątowe wynosi 2% (np. di Benedetto 2005), jednakże dla gwiazd wczesnych typów widmowych dokładność najlepszych kalibracji wynosi tylko około 7% (np. Challouf i in. 2014).

W pracy **H4** postawiłem sobie kilka celów. Po pierwsze, wyprowadzenie dokładnych kalibracji dla gwiazd późnych typów widmowych tylko na podstawie rozmiarów kątowych gwiazd, uzyskanych z analizy wybranych rozdzielonych układów podwójnych zaćmieniowych (35 układów). Po drugie, sprawdzenie czy takie kalibracje są zgodne z kalibracjami otrzymywanymi z pomiarów interferometrycznych średnic gwiazd, i po trzecie, ocenę niezbędnych kroków, jakie należy podjąć, aby uzyskać precyzję kalibracji poniżej 1% używając gwiazd zaćmieniowych.

Wszystkie wymienione wyżej cele zostały osiągnięte w pracy **H4**. Rozmiary kątowe składników układów zaćmieniowych wyznaczone zostały z ich promieni otrzymanych z rozwiązania krzywych blasku i prędkości radialnych oraz geometrycznych odległości do układów. Odległości obliczone zostały w oparciu o paralaksy trygonometryczne z pierwszej wersji danych misji kosmicznej *Gaia* (2016, DRS1) lub z ponownej redukcji danych misji *Hipparcos* (van Leeuwen 2007). W pracy opisałem ze szczegółami zastosowaną metodę i przedstawiłem katalog użytych układów zaćmieniowych. Wyprowadzone kalibracje okazały się mieć dokładność porównywalną z najlepszymi kalibracjami opartymi o pomiary interferometryczne (około 3%). Wykazałem, że obie metody kalibrowania zależności jasność powierzchniowa-kolor są komplementarne i równoważne sobie, a co najważniejsze, otrzymane z ich pomocą kalibracje są w pełni zgodne ze sobą. Jest to najważniejszy wynik pracy **H4**. Ciekawym dodatkowym wynikiem jest potwierdzenie rezultatów pracy Stassun i Torres (2016b), że paralaksy trygonometryczne z *Gaia* DR1 są systematycznie zbyt małe o około 3%. Błąd ten, chociaż jest stosunkowo duży jak na oczekiwaną precyzję tej misji, to jego wielkość jest w granicach systematyki przewidywanej przez zespół *Gaia* (2016). Praca **H4** zaowocowała też ujednocnieniem opublikowanych w literaturze parametrów kilkudziesięciu układów zaćmieniowych. Dużo uwagi poświęciłem przygotowaniu drogowskazu dla uzyskania w przyszłości znacznie lepszej precyzji w przewidywaniu rozmiarów kątowych gwiazd. Najistotniejszymi punktami tego drogowskazu jest zwiększenie próbek

odpowiednich układów zaćmieniowych do około 100, uzyskanie dla nich wysokiej jakości jednorodnej fotometrii podczerwonej oraz, oczywiście, dostęp do końcowych, spodziewanych jako bardzo precyzyjne, paralaks z misji *Gaia*. Kolejnym ciekawym wynikiem pracy **H4** jest zauważenie, że dla gwiazd wcześniejszych typów widmowych kalibracje oparte o kolor B-K mają nieco mniejszą dyspersję niż dla koloru V-K i mniejszą czułość na niepewności związane z ekstynkcją międzygwiazdową. Kalibracje oparte o kolor B-K mogłyby być użyte w przyszłych precyzyjnych pomiarach odległości do układów zaćmieniowych w dużych galaktykach Grupy Lokalnej to jest M31 i M33.

#### 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych po doktoracie.

- pierwsza kompleksowa analiza gwiazd podwójnych zaćmieniowych w Małym Obłoku Magellana, wyznaczenie parametrów fizycznych gwiazd i wybranie układów zaćmieniowych odpowiednich do wyznaczania odległości (Graczyk 2003);
- pierwsze wyznaczenie odległości do Wielkiego Obłoku Magellana z pomocą gwiazdy zaćmieniowej późnego typu (Pietrzyński i in. 2009);
- opracowanie nowej metody identyfikacji gwiazd zaćmieniowych w fotometrycznych przeglądach nieba na podstawie statystycznych momentów krzywej blasku (Graczyk i Eyer 2010);
- współudział przy odkryciu i potwierdzeniu pierwszego układu zaćmieniowego zawierającego klasyczną cefeidę (Pietrzyński i in. 2010) co pozwoliło na otrzymanie precyzyjnej masy dynamicznej cefeidy;
- przygotowanie dużego katalogu gwiazd zaćmieniowych w Wielkim Obłoku Magellana w oparciu o fotometrię z trzeciej fazy projektu OGLE, w momencie opublikowania był to największy katalog gwiazd zaćmieniowych, charakteryzuje się on wysokim odsetkiem układów rozdzielonych i dużym stopniem kompletności (Graczyk i in. 2011);
- zbudowanie pełnych modeli pierwszych potwierdzonych układów zaćmieniowych zawierających radialnie pulsujący składnik: cefeidę klasyczną (Pietrzyński i in. 2010, 2012) oraz unikalną gwiazdę pulsującą jak gwiazda zmienna typu RR Lyr, ale mającą inny status ewolucyjny (Pietrzyński i in. 2012);
- bardzo duży udział w wyznaczeniu odległości do LMC z dokładnością 2% (Pietrzyński i in. 2013), praca ta jest obecnie standardem jako referencja odległości do tej galaktyki, wynik ten został potwierdzony w kierowanej przeze mnie pracy nad układem zaćmieniowym OGLE-LMC-ECL-25658 (Elgueta i in. 2016);
- współpraca nad przygotowaniem katalogu gwiazd zaćmieniowych w SMC opartym o fotometrię trzeciej fazy zespołu OGLE (Pawlak i in. 2013);
- bardzo istotny wkład w powstanie nowatorskiej pracy (Pilecki i in. 2013) poświęconej wyznaczeniu parametru geometrycznego *p-factor* (projection factor) dla cefeidy OGLE-LMC-CEP-0227; analiza przebiegu zaćmień i zmian prędkości radialnych pozwoliła na pierwsze wyznaczenie tego ważnego parametru w sposób niezależny od odległości; praca ta jest rozszerzeniem pracy Pietrzyński i in. (2010);
- współpraca przy wyznaczeniu nowej kalibracji jasność powierzchnia-kolor na podstawie pomiarów interferometrycznych średnic kątowych gwiazd i analizę danych z literatury (Challouf i in. 2014);
- wyznaczenie orbit spektroskopowych i analiza kontrybucji jasności składników w układach zaćmieniowych zawierających klasyczną cefeidę (Pilecki i in. 2015, Gieren i in. 2015);
- kierowanie badaniami układu zaćmieniowego złożonego z średnio masywnych olbrzymów późnego typu widnowego i znajdującego się w ramieniu Strzelca w Drodze Mlecznej (Suchomska i in. 2015);
- współpraca przy wyznaczeniu bardzo dokładnych mas i odległości do układu zaćmieniowego TZ For zawierającego dwa zaawansowane ewolucyjnie składniki: olbrzyma i podolbrzyma (Gallenne i in. 2016), w pracy tej przedstawiłem pierwszy, wstępny test istniejących kalibracji jasność powierzchnia-kolor, praca ta jest częścią większego projektu wyznaczenia paralaks orbitalnych dla pobliskich układów zaćmieniowych i testowania odległości z misji *Gaia*;
- wyznaczenie fundamentalnych parametrów fizycznych 40 olbrzymów późnego typu widmowego znajdujących się w Wielkim Obłoku Magellana i tworzących układy zaćmieniowe gwiazd (Graczyk i in. 2018); praca ta jest podstawą dla bardziej precyzyjnego wyznaczenia odległości do tej galaktyki z przełomową w historii astronomii precyzją 1% (Pietrzyński i in. 2018, praca wysłana do Nature).

#### Bibliografia:

Anders, F., Chiappini, C., Minchev, I., i in. 2017, A&A, 600, 70

Barnes, T. G., Evans, D. S. 1976, MNRAS, 174, 489

Bressan, A., Marigo, P., Girardi, L., Salasnich, B., i Dal Cero, C. 2012, MNRAS, 427, 127

Challouf, M., Nardetto, N., Mourard, D., i in. 2014, A&A, 570, 104

Claret, A., Torres, G. 2016, A&A, 592, 15  
 de Grijs, R., Bono, G. 2015, AJ, 149, 179  
 di Benedetto, G. P. 2005, MNRAS, 357, 174  
 Eggleton, P. P., Yakut, K. 2017, MNRAS, 468, 3533  
 Elgueta, S. S., Graczyk, D., Gieren, W., i in. 2016, AJ, 152, 29  
 Fouque, P., Gieren, W. 1997, A&A, 320, 799  
 Freedman, W. L., Madore, B. F., Gibson B. K., i in. 2001, ApJ, 553, 47  
 Gaia Collaboration, Brown, A. G. A., Vallenari, A., Prusti, T., i in. 2016, A&A, 595, 2  
 Gallenne, A., Pietrzyński, G., Graczyk, D., i in. 2016, A&A, 586, 35  
 Casagrande, L., Ramirez, I., Melendez, J., Asplund, M., 2012, ApJ, 761, 16  
 Gaulme, P., McKeever, J., Jackiewicz, J., i in. 2016, ApJ, 832, 121  
 Gibson, B. K. 2000, Mem. Soc. Astron. Ital., 71, 693  
 Gieren W., Pilecki, B., Pietrzyński, G., i in. 2015, ApJ, 815, 28  
 Górski, M., Pietrzyński, G., Gieren, W., i in. 2016, AJ, 151, 167  
 Graczyk, D. 2003, MNRAS, 342, 1334  
 Graczyk, D., Eyer, L., 2010, AcA, 60, 109  
 Graczyk, D., Maxted, P. F. L., Pietrzyński, G., i in. 2015, A&A, 581, 106  
 Graczyk, D., Pietrzyński, G., Thompson, I. B., i in. 2012, ApJ, 750, 144  
 Graczyk, D., Pietrzyński, G., Thompson, I. B., i in. 2018, ApJ, 860, 1  
 Graczyk, D., Soszyński, I., Poleski, R., i in. 2011, AcA, 61, 103  
 Hindsley, R. B., Bell, R. A. 1989, ApJ, 341, 1004  
 Huang, Y., Liu, X.-W., Yuan, H.-B., i in. 2016, MNRAS, 463, 2623  
 Kervella, P., Thevenin, F., Di Folco, E., i Segransan, D. 2004, A&A, 426, 297  
 Kjeldsen, H., i Bedding, T. R. 1995, A&A, 293, 87  
 Lopez-Corredoira, M. 2014, A&A, 563, 128  
 Mackereth, T. J., Bovy, J., Schiavon, R. P., i in. 2017, MNRAS, 471, 3057  
 Macri, L. M., Ngeow, Ch.-Ch., Kanbur, S. M. 2015, AJ, 149, 117  
 Mathur, S., Garcia, R. A., Huber, D., i in. 2016, ApJ, 827, 50  
 Melendez, J., Asplund, M., Gustafsson, B., Yong, D. 2009, ApJL, 704, 66  
 Melendez, J., Bergemann, M., Cohen, J. G. 2012, A&A, 543, 29  
 Ngeow, Ch.-Ch., Kanbur, S. M., Bhardwaj, A., Singh, H. P. 2015, ApJ, 808, 67  
 Paxton, B., Marchant, P., Schwab, J., i in. 2015, ApJSS, 220, 15  
 Pawlak, M., Graczyk, D., Soszyński, I., i in. 2013, AcA, 63, 323  
 Pietrzyński, G., Graczyk, D., Gieren, W., i in. 2013, Nature, 495, 76  
 Pietrzyński, G., Thompson, I. B., Gieren, W., i in. 2010, Nature, 468, 542  
 Pietrzyński, G., Thompson, I. B., Gieren, W., i in. 2012, Nature, 484, 75  
 Pietrzyński, G., Thompson, I. B., Graczyk, D., i in. 2009, ApJ, 697, 862  
 Pietrzyński, G., Thompson, I. B., Graczyk, D., i in. 2011, ApJ, 742, L20  
 Pilecki, B., Graczyk, D., Gieren, W., i in. 2015, ApJ, 806, 29  
 Pilecki, B., Graczyk, D., Pietrzyński, G., i in. 2013, MNRAS, 436, 953  
 Pojmański, G. 2002, AcA, 52, 397  
 Polacco, D., Skillen, I., Collier Cameron, A., i in. 2006, Ap&SS, 304, 253  
 Porto de Mello, G. F., da Silva, R., da Silva, L., de Nader, R. V. 2014, A&A, 563, 52  
 Ramirez, I., Melendez, J., Bean, J., i in. 2014, A&A, 572, 48  
 Riess, A. G., Macri, L. M., Hoffmann, S., L. i in. 2016, ApJ, 826, 56  
 Schaefer, B. E. 2008, AJ, 135, 112  
 Stassun, K. G., Torres, G. 2016a, AJ, 152, 180  
 Stassun, K. G., Torres, G. 2016b, ApJL, 831, 6  
 Suchomska, K., Graczyk, D., Smolec, R., i in. 2015, MNRAS, 451, 651  
 van Leeuwen, F. 2007, A&A, 474, 653  
 Westerlund, B. E. 1997, The Magellanic Clouds. Cambridge Univ. Press, Cambridge  
 Wielgórski, P., Pietrzyński, G., Gieren, W., i in. 2017, ApJ, 842, 116  
 Wilson, R. E. 1979, ApJ, 234, 1054  
 Wilson, R. E. 1990, ApJ, 356, 613  
 Wilson, R. E., & Devinnay, E. J. 1971, ApJ, 166, 605  
 Yana Galarza, J., Melendez, J., Ramirez, I., i in. 2016, A&A, 589, 17

*D. Graczyk*