

## 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, 2002**

**Universidad de Concepción, Chile, 2009-chwila obecna**

4. Wskazanie osiągnięcia:

a. tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego

**Gwiazdy podwójne zaćmieniowe jako wskaźniki odległości**

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

H1. **Graczyk, D.**, 2003, MNRAS, 342, 1334

*Light-curve solutions for bright detached eclipsing binaries in the Small Magellanic Cloud: absolute dimensions and distance indicators*

Impact factor = 4,99 liczba cytowań: 13

H2. **Graczyk, D.**, Eyer, L., 2010, Aca, 60, 109

*The Light Curve Statistical Moments Analysis: The Identification of Eclipsing Binaries*

Impact factor = 3,49 liczba cytowań: 4

H3. **Graczyk, D.**, Soszyński, I., Poleski, R., Pietrzyński, G., Udalski, A., Szymański, M. K., Kubiak, M., Wyrzykowski, Ł., Ulaczyk, K., 2011, 61, 103

*The Optical Gravitational Lensing Experiment. The OGLE-III Catalog of Variable Stars. XII. Eclipsing Binary Stars in the Large Magellanic Cloud*

Impact factor = 1,68 liczba cytowań: 21

H4. **Graczyk, D.**, Pietrzyński, G., Thompson, I. B., Gieren, W., Pilecki, B., Udalski, A., Soszyński, I., Kołaczkowski, Z., Kudritzki, R.-P., Bresolin, F., Konorski, P., Mennickent, R., Minniti, D., Storm, J., Nardetto, N., Karczmarek, P., 2012, ApJ, 750, 144

*The Araucaria Project: An Accurate Distance to the Late-type Double-lined Eclipsing Binary OGLE SMC113.3 4007 in the Small Magellanic Cloud*

Impact factor = 6,73 liczba cytowań: 10

H5. Pietrzyński, G., **Graczyk, D.**, Gieren, W., Thompson, I. B., Pilecki, B., Udalski, A., Soszyński, I., Kozłowski, S., Konorski, P., Suchomska, K., Bono, G., Prada Moroni, P. G., Villanova, S., Nardetto, N., Bresolin, F., Kudritzki, R.-P., Storm, J., Gallenne, A., Smolec, R., Minniti, D., Kubiak, M., Szymański, M. K., Poleski, R., Wyrzykowski, Ł., Ulaczyk, K., Pietrukowicz, P., Górski, M., Karczmarek, P., 2013, Nature, 495, 76

*An eclipsing-binary distance to the Large Magellanic Cloud accurate to two per cent*

Impact factor = 38,60 liczba cytowań: 30

5. **Rys autobiograficzny.**

Astronomią interesuję się od dzieciństwa. Mój dziadek wychodził wieczorami ze mną na spacer, pokazywał mi gwiazdy i planety, objaśniał to, co się dzieje na niebie. Mieszkaliśmy w niewielkiej wiosce i nocami na niebie wspaniale lśniły setki i tysiące gwiazd. Myślę, że ten widok był i jest dla mnie inspiracją

w mojej pracy. W czasie gdy chodziłem do Szkoły Podstawowej nr 1 w Koninie a potem do I Liceum Ogólnokształcącego w Koninie, prowadziłem amatorskie obserwacje nieba wykorzystując różne dostępne mi przyrządy optyczne: lornetkę, małą lunetę keplerowską i różne teleskopy zwierciadlane. Startowałem trzykrotnie w ogólnopolskiej Olimpiadzie Astronomicznej i dwukrotnie dotarłem do finału.

Studia magisterskie na kierunku astronomii podjąłem w Toruniu na uniwersytecie im. Mikołaja Kopernika (UMK). Pracę magisterską, dotyczącą jednego z problemów mechaniki nieba, napisałem pod kierunkiem dr hab. Andrzeja Maciejewskiego.

Studia doktoranckie na UMK rozpocząłem w 1996 roku. Moim promotorem był dr hab. Andrzej Maciejewski a opiekunem naukowym dr Maciej Mikołajewski. Rozprawę doktorską poświęciłem gwiazdom zaćmieniowym o bardzo długich okresach orbitalnych takim jak VV Cephei i EE Cephei. Ważnym momentem moich studiów doktoranckich był udział w konferencji poświęconej asteroseismologii i gwiazdom zaćmieniowym, która miała miejsce w Turcji w 1998 roku. Na konferencji dr Edward Guinan zaprezentował świeże wyniki analizy jednego z układów zaćmieniowych w Wielkim Obłoku Magellana. Zostały precyzyjnie obliczone nie tylko parametry astrofizyczne składników układu HV2274, ale przede wszystkim określono dokładna odległość do tego układu a przez to i do samej galaktyki. Pamiętam, że ta prezentacja skierowała moje zainteresowania na zupełnie nowe tory.

Po zakończeniu studiów doktoranckich w 2002 roku przez pół roku byłem zatrudniony na stanowisku asystenta w Instytucie Astronomii w Zielonej Górze. Po obronie doktoratu w Toruniu w 2003 roku podjąłem pracę w IV Liceum Ogólnokształcącym w Toruniu jako nauczyciel fizyki. Rok 2003 jest również ważny z tego powodu, że nawiązałem wtedy korespondencję z prof. Bohdanem Paczyńskim. To on właśnie zainteresował mnie empiryczną zależnością pomiędzy jasnością powierzchniową gwiazdy a jej indeksem barwy. Według niego była ona kluczem do prawidłowego wykorzystania gwiazd zaćmieniowych jako znakomitej metody mierzenia odległości do pobliskich galaktyk. Wtedy znalazłem sposób jak wykorzystać tę ideę do zmierzenia odległości do Wielkiego Obłoku Magellana. Po prostu należało użyć układów zaćmieniowych o długich okresach orbitalnych zawierających olbrzymy późnych typów widmowych G i K, dla których zależność jasność-kolor jest dobrze określona empirycznie. Myślę, że łatwiej mi było wpaść na ten pomysł niż innym z uwagi na temat mojego doktoratu, który w naturalny sposób kierował moją uwagę na takie gwiazdy. W 2004 roku odbyłem miesięczny staż podoktorancki w Princeton, USA.

W czasie mojej pracy w szkole zajmowałem się popularyzacją astronomii, napisałem cykl artykułów do Postępów Astronomii dotyczący jasnych i ciekawych obiektów z katalogu NGC Dreyera, prowadziłem koła astronomiczne dla młodzieży w IV LO im. T. Kościuszki oraz w Gimnazjum i Liceum Akademickim w Toruniu. Kilku moich uczniów zostało finalistami i laureatami ogólnopolskiej Olimpiady Astronomicznej a jeden z nich - Damian Puchalski - ku mojej radości olimpiadę tę wygrał. Kontynuowałem również pracę nad projektem wyznaczania odległości do Obłoków Magellana w oparciu o gwiazdy zaćmieniowe, a efektem tego było nawiązanie współpracy z dr hab. Grzegorzem Pietrzyńskim.

W 2009 roku przerwałem pracę w szkole i rozpocząłem staż podoktorancki na Universidad de Concepción w Chile, który trwa do chwili obecnej. Był to też moment mojego przyłączenia się do projektu Araucaria, prowadzonego przez prof. Wolfganga Gierena i dr hab. Grzegorza Pietrzyńskiego. Wspólna praca zaowocowała wieloma publikacjami dotyczącymi astrofizyki układów podwójnych gwiazd, pierwszym dokładnym wyznaczeniem masy dynamicznej klasycznej cefeidy i dokończeniem projektu precyzyjnego wyznaczenia odległości do Wielkiego Obłoku Magellana za pomocą gwiazd zaćmieniowych. Wielokrotnie prezentowałem wyniki mojej pracy na międzynarodowych konferencjach a w roku 2013 miałem zaproszony wykład na konferencji "Setting a new standard in the analysis of binary stars" w Leuven, Belgia.

W podsumowaniu, do tej pory jestem autorem i współautorem 26 prac naukowych opublikowanych w pismach z listy filadelfijskiej, cytowanych łącznie 284 razy (253 bez autocytacji) a także 11 doniesień konferencyjnych i krótkich prac opublikowanych w innych pismach. Mój indeks Hirscha wynosi obecnie 10 (stan na 9 grudnia 2013 roku według bazy danych NASA ADS).

DG.

## 6. Tło naukowe.

Gwiazdy podwójne zaćmieniowe definiuje się jako podklasę grawitacyjnie związanych układów podwójnych gwiazd, w których możemy obserwować wzajemne zakrywanie się składników - zaćmienia. W ciągu ostatnich 15 lat nastąpił prawdziwy przełom jeśli chodzi o użycie gwiazd zaćmieniowych jako wskaźnika odległości w Lokalnej Grupie Galaktyk. Metoda oparta o takie gwiazdy ma potencjał do osiągnięcia dokładności na poziomie 1%, czyli limitu związanego z systematyczną niepewnością absolutnej kalibracji używanych obecnie systemów fotometrycznych. Wyznaczanie odległości do układów podwójnych zaćmieniowych gwiazd łączy ze sobą podejście geometryczne z podejściem opartym na skalowaniu obserwowanego strumienia światła. Część geometryczna jest wspólna dla większości implementacji tej metody i polega na wyznaczeniu absolutnych rozmiarów układu z analizy orbitalnych prędkości radialnych obu składników. W połączeniu z informacją o względnych rozmiarach składników układu, wynikającą z analizy krzywych blasku, dostajemy absolutne rozmiary gwiazd, czyli ich promienie. Ta część metody jest najlepiej rozumiana i podlega najmniejszym efektom systematycznym, przynajmniej tak długo, jak długo mamy do czynienia z układami o dobrze rozseparowanych składnikach, gdzie efekty związane z odkształceniem powierzchni gwiazdy, powodowanym przez siły pływowe towarzysza, są znikome. Dysponując odpowiedniej jakości krzywymi blasku i krzywymi prędkości radialnych możemy spodziewać się wyznaczenia promieni gwiazd z dokładnością na poziomie 1% (Anderson 1991).

Drugim etapem metody jest oszacowanie strumienia emitowanego przez składniki układu podwójnego w wybranych zakresach widma elektromagnetycznego i porównanie go ze strumieniem obserwowanym na Ziemi. Proste prawo izotropowego rozchodzenia się światła w przestrzeni daje nam natychmiast odległość do danego układu zaćmieniowego, o ile właściwie uwzględnimy wpływ ekstynkcji materii międzygwiazdowej pomiędzy nami i układem. Pojawiają się więc dwa problemy: 1) jak oszacować strumień emitowany przez gwiazdy *in situ* oraz 2) jak oszacować ekstynkcję?

Rozpatrując gwiazdy zaćmieniowe jako wskaźniki odległości do pobliskich galaktyk możemy spodziewać się znalezienia tam dwóch użytecznych typów układów: tych zawierających gorące i masywne składniki ciągu głównego typu O lub wczesne B oraz takich, które posiadają średniomasywne olbrzymy późnego typu G lub K. Takie układy są dostatecznie jasne, aby zebrać odpowiedniej jakości fotometrię i spektroskopię. Z uwagi na problem 1) metoda bifurkuje. Inaczej postępujemy w przypadku układów z gorącymi składnikami, niż w przypadku układów zawierających chłodne gwiazdy. Dla gwiazd gorących strumień *in situ* szacowany jest z modeli atmosfer, poprzez porównanie ich z spektrofotometrią lub rozseparowanymi widmami gwiazd układu (Guinan i in. 1998, Bonanos i in. 2011), w oparciu o kalibracje kolor-temperatura (Ribas i in. 2005), czy też kalibracje typ widmowy-temperatura (Hilditch i in. 2005). Kalibracje temperatury są dla gorących gwiazd mało dokładne i opierając się na nich nie można uzyskać dokładności wyznaczenia strumienia na poziomie lepszym niż 10% (5% błędu w odległości). Nadzieję pokładano w użyciu modeli atmosfer, jednak problem polega na niemożności wykalibrowania absolutnych strumieni przewidywanych przez te modele. Przyczyna jest bardzo prosta: na razie nie ma gwiazd o najwcześniejszych typach, które mają zmierzone paralaksy geometryczne z dokładnością lepszą niż 3% i mogłyby posłużyć za odpowiednio precyzyjne kalibratory modeli.

Jeżeli natomiast składniki układu są chłodne (typ widmowy późniejszy niż A5) to pojawia się dodatkowa, poza opisanymi uprzednio, możliwość wykorzystania empirycznej zależności pomiędzy jasnością powierzchniową gwiazdy w wybranym filtrze a jej właściwym indeksem barwy. Metoda ta została zastosowana po raz pierwszy niezależnie przez Popper (1974) i Lacy (1977), gdzie wykorzystano odpowiednio indeksy barwy (V-B) i (V-R). Wspomniana zależność zazwyczaj wyprowadzana jest z interferometrycznych pomiarów średnic kątowych gwiazd (na przykład: Kervella i in. 2004, di Benedetto 2005). Wybierając filtr V Johnsona i odczerwieniony indeks barwy (V-K)<sub>0</sub>, mamy dodatkową zaletę, jaką jest równoległość takiej zależności do linii poczerwienienia międzygwiazdowego na diagramie jasność powierzchniowa - kolor. To powoduje, że ta metoda jest mało czuła na niepewność wyznaczenia ekstynkcji. Takie usprawnienie zaprezentowali Thompson i in. (2001) wyznaczając odległość do gromady kulistej  $\omega$  Centauri. Po raz pierwszy takie podejście zostało zastosowane dla obiektu pozagalaktycznego w pracy Pietrzyński i in. (2009).

Dg.

Drugi problem, standardowy w obecnej astronomii, doczekał się wielu bardziej lub mniej udanych rozwiązań. Jednak nawet przy optymistycznych założeniach, błąd wyznaczenia ekstynkcji dla pozagalaktycznych gwiazd, jest nie mniejszy niż 0,03 mag (sumując niepewność statystyczną i systematyczną). W przypadku gwiazd gorących przekłada się to na przyczynek do niepewności wyznaczenia odległości na poziomie minimum 2,0%. W przypadku gwiazd chłodnych, gdzie używamy kalibracji jasności powierzchniowych, jest to zaledwie 0,5%.

Zainteresowanie gwiazdami zaćmieniowymi jako wskaźnikami odległości wynika z kilku przyczyn:

- a. istotna część analizy polega na wyznaczeniu geometrii układu zaćmieniowego i w dużej mierze jest ona wolna od założeń i uproszczeń; dzięki temu niepewność systematyczna, która jest plagą innych metod wyznaczania pozagalaktycznych odległości, jest dość mocno ograniczona;
- b. dla danego układu zaćmieniowego można z reguły zastosować *kilka* różnych implementacji metody i przez to dokonać sprawdzenia konsystencji otrzymanego modelu;
- c. precyzja metody umożliwi wyznaczenie dokładnych odległości do najbliższych galaktyk (na poziomie 3% lub lepszym) i skalibrowanie ważnych standardowych świec takich, jak cefeidy, gwiazdy RR Lyr czy szczyt gałęzi czerwonych olbrzymów (TRGB).

Do tej pory gwiazdy zaćmieniowe posłużyły do określenia odległości do najważniejszych członków Lokalnej Grupy Galaktyk. Używając układów zawierających gwiazdy gorące wyznaczono lub oszacowano odległość do Wielkiego Obłoku Magellana (seria prac zespołu kierowanego przez Edwarda Guinana: Guinan i in. 1998, Fitzpatrick i in. 2002, Ribas i in. 2002, Fitzpatrick i in. 2003), Małego Obłoku Magellana (Hilditch i in. 2005, North i in. 2010), galaktyki M33 (Bonanos i in. 2006), galaktyki M31 (Ribas i in. 2005). Wreszcie, z pomocą gwiazd zaćmieniowych późnego typu, wyznaczono odległości do obu Obłoków Magellana (prace: H4, Graczyk i in. 2013, H5).

Przez ostatnie 20 lat odległość do Wielkiego Obłoku Magellana (LMC) była przedmiotem debaty, w której posłużono się wynikami otrzymanymi z pomocą dużej ilości różnych metod i ich implementacji (Gibson 2000, Scheaffer 2008, Walker 2012 oraz referencje zamieszczone w tych pracach). Jej konkluzją było, że praktycznie każda dotychczasowa metoda wyznaczania pozagalaktycznych odległości jest zdominowana przez trudny do precyzyjnego oszacowania błąd systematyczny. Ponad to oszacowana wartość odległości do LMC z dużym prawdopodobieństwem mieści się w zakresie pomiędzy 47.9 kps a 50.6 kps. Niepewność odległości do LMC była do tej pory jednym z najważniejszych źródeł niepewności wyznaczenia parametru Hubble'a  $H_0$  (Freedman i in. 2001, Riess i in. 2011). Praca H5 pozwoliła zmniejszyć tę niepewność do zaledwie 2% tak, że przestała ona być dominującym przyczynkiem do błędu wyznaczania  $H_0$ .

## 7. Streszczenie rozprawy habilitacyjnej.

Prace zawarte w rozprawie koncentrują się na identyfikacji i analizie gwiazd podwójnych zaćmieniowych oraz użycia ich do mierzenia odległości, w oparciu o autorsko usprawnione metody. Analizy wykonywane są jednym z najlepszych publicznie dostępnych narzędzi, jakim jest kod Wilsona-Devinney'a (Wilson i Devinney 1971, Wilson 1979, Wilson 1993, van Hamme i Wilson 2007) - w skrócie WD. Identyfikacja gwiazd zaćmieniowych dokonana jest w oparciu o fotometrię Optical Gravitational Lensing Experiment (OGLE) z drugiej, trzeciej i czwartej fazy trwania projektu (Udalski i in. 1997, Udalski 2003, Soszyński i in. 2012). Polem zainteresowania są Obłoki Magellana, które stanowią istotny szczebel w pozagalaktycznej skali odległości.

- I. Pierwszym etapem metody jest oczywiście nauka zasad analizowania gwiazd zaćmieniowych. Wymaga to zrozumienia fizyki układów podwójnych gwiazd, jak i opanowania jakiegoś narzędzia do modelowania krzywych blasku i prędkości radialnych. Kod WD należy do najbardziej rozbudowanych i najlepiej sprawdzonych programów do analizy gwiazd zaćmieniowych. W pracy H1 przedstawiłem analizę wykonaną tym kodem dla kilkunastu gwiazd z Małego Obłoku Magellana (SMC) znalezionych przez Udalski i in. (1998). Postawiłem sobie trzy ważne cele:
  - a. nabranie biegłości w operowaniu kodem WD i poznanie przynajmniej części jego licznych niuansów;
  - b. wyznaczenie przybliżonych parametrów astrofizycznych dla próbki gorących i masywnych gwiazd w SMC; miałem nadzieję, że będzie to pierwsza praca z wyznaczeniami absolutnych

D.G.

parametrów dla większej grupy gwiazd w tej galaktyce, ale o włoś uprzedzili mnie w tym Harries i in. (2003);

- c. wybranie z analizowanej próbki układów najlepiej nadających się do wyznaczenia odległości, według pewnych ściśle określonych kryteriów.

Praca **H1** była poświęcona niemal wyłącznie układom zawierającym gwiazdy wczesnych typów z jednego powodu. Był nim cykl prac pod kierunkiem Edwarda Guinana sugerujący, że takie układy oferują precyzyjne wyznaczenia odległości, i pod którego wrażeniem wówczas znajdowałem się. Kontakt z prof. Bohdanem Paczyńskim zmienił moje nastawienie i zacząłem szukać innych implementacji metody, co naprowadziło mnie na trop wykorzystania rozdzielonych układów, zawierających olbrzymy późnego typu. W oparciu o katalog gwiazd zaćmieniowych w LMC (Wyrzykowski i in. 2003) przygotowałem wtedy krótką listę długookresowych układów podwójnych zawierających olbrzymy późnego typu odpowiednich do wyznaczenia odległości. Po kilku latach we współpracy z dr hab. Grzegorzem Pietrzyńskim wyznaczona została dokładna odległość do pierwszego układu z tej listy OGLE-051019.64-685812.3 (Pietrzyński i in. 2009).

- II. W pracy **H2** przedstawiony został nowy sposób identyfikacji gwiazd zaćmieniowych w dużych przeglądach nieba takich, jak OGLE. Metoda ta kładzie nacisk na znajdowanie układów rozdzielonych, gdyż właśnie takie układy są optymalne do wyznaczeń odległości (Paczyński 1997). Wykorzystuje się w niej pewne statystyczne własności krzywych blasku gwiazd takie jak skośność oraz kurtoza rozkładu jasności danego obiektu. Wcześniej używane metody, z reguły oparte o fourierowskie wyznaczenie okresu orbitalnego, były najbardziej skuteczne przy wykrywaniu ciasnych układów podwójnych o krótkich okresach wzajemnego obiegu rzędu dnia. Test metody na bazie fotometrycznej OGLE-II wypadł pozytywnie: znalezione zostały wszystkie gwiazdy z katalogu Wyrzykowski i in. (2003) oraz dodatkowo około 25% więcej układów zaćmieniowych, głównie o ekscentrycznych orbitach i/lub długich okresach.
- III. Metoda zaprezentowana przez **H2** została z sukcesem użyta do identyfikacji gwiazd zaćmieniowych w Wielkim Obłoku Magellana (LMC) korzystając z utworzonej bazy danych fotometrycznych trzeciej fazy projektu OGLE. Efektem jest największy, opublikowany do tej pory, katalog gwiazd zaćmieniowych zawierający 26162 pozycje. Sposób jego utworzenia i opis pewnych jego statystycznych własności znajduje się w pracy **H3**. Największą grupą znalezionych gwiazd zaćmieniowych są układy rozdzielone i stanowią one aż 62% wszystkich układów. Liczba ta jest prawie identyczna z częstością występowania układów rozdzielonych, obliczoną w oparciu o katalog gwiazd zaćmieniowych, wykrytych w ramach misji kosmicznej *Kepler* (Prsa i in. 2011, Stetson i in. 2011). Ciekawym rezultatem jest identyfikacja całej grupy gwiazd o pojawiających się i zanikających zaćmieniach, co jest najprawdopodobniej spowodowane precesją ich płaszczyzn orbitalnych, zaburzanych obecnością trzeciej gwiazdy w układzie. Ważnym osiągnięciem jest też identyfikacja sporej liczby jasnych, rozdzielonych i długookresowych układów zaćmieniowych, zawierających chłodne olbrzymy - układów, które posłużyły do wyznaczenia odległości do LMC (praca **H5**). Dodam, że ta metoda identyfikacji jest jedną z dwóch podstawowych metod użytych do opracowania nowego katalogu gwiazd zaćmieniowych w Małym Obłoku Magellana (Pawlak i in. 2013).
- IV. Układ OGLE SMC113.3 4007 analizowany w pracy **H4** znajduje się w Małym Obłoku Magellana. Można go uznać za prawie idealny do mierzenia odległości i został przeze mnie wybrany, jako swego rodzaju, "flagowy" obiekt dla zaprezentowania metody. Na czym polega jego idealność? Oto kilka cech układu zaćmieniowego, które są ważne, aby dokładnie, czyli z małą niepewnością systematyczną, wyznaczyć do niego odległość:
  - a. układ jest podwójny spektroskopowo, co pozwala na uzyskanie prawidłowej skali układu,
  - b. stosunkowo jasny układ ( $V < 17$  mag) dzięki czemu otrzymuje się dobrej jakości fotometrię i spektroskopię,
  - c. układ z oddalonymi od siebie składnikami, gwiazdy są w dobrym przybliżeniu sferyczne,
  - d. składniki spokojne fotometrycznie (brak dużych plam, efektu O'Connella, rozbłysków, itd.),
  - e. głębokie zaćmienia umożliwiają precyzyjnie określić geometrię układu,
  - f. składniki mają podobną temperaturę efektywną, dzięki czemu zminimalizowana zostaje systematyka związana z użyciem modeli atmosfer gwiazdowych.

Wszystkie wyżej wymienione cechy posiada układ analizowany w pracy **H4**. Odnośnie punktu f) należy się pewne wyjaśnienie: modele atmosfer używane są do ekstrapolacji stosunku jasności składników z zakresu optycznego (gdzie dysponujemy krzywymi blasku w zakresach V i I) do

dg.

zakresu bliskiej podczerwieni w K. Następnie uzyskany stosunek jasności używany jest do obliczenia indeksu barwy (V-K) obu składników. Indeks ten służy do wyznaczenia jasności powierzchniowej gwiazd i obliczenia odległości do każdego składnika układu oddzielnie, używając do tego kalibracji di Benedetto (2005). Ekstrapolacja, wynika z braku krzywych blasku w filtrze podczerwonym K. Posiadając odpowiedniej jakości krzywą - pokrywającą oba zaćmienia - stosunek jasności w K można obliczyć wprost z rozwiązania fotometrycznego.

- V. Praca H5 stanowi podsumowanie i ukoronowanie wieloletniego wysiłku, jaki został włożony w dokładne określenie odległości do Wielkiego Obłoku Magellana. Zaprezentowany wynik równy 49,7 kps +/- 1,1 kps jest nie tylko najdokładniejszym do tej pory wyznaczeniem odległości do obiektu pozagalaktycznego, ale ma ponad to wyczerpująco przedyskutowaną niepewność systematyczną. Z tego powodu, stanowi istotny punkt odniesienia przy kalibracji pozagalaktycznej skali odległości, wyznaczeniu parametru Hubble'a  $H_0$ , jak i ewentualnych porównań z przyszłymi wyznaczeniami, w szczególności z odległością jaka wyniknie z obserwacji gwiazd w LMC przez satelitę GAIA. W uzupełnieniu H5 (Supplementary Information) znajduje się prezentacja szczegółów metody wyznaczania odległości do poszczególnych gwiazd. Zaproponowałem tutaj dwa istotne usprawnienia metody, w porównaniu z zaprezentowaną w pracy H4. Pierwszym jest analiza parametrów atmosferycznych na podstawie rozplątanych widm obu składników. Pozwala ona niezależnie określić temperaturę efektywną i metaliczność [Fe/H] składników, co jest ważne z dwóch powodów: 1) aby otrzymać konsystentną ekstrapolację stosunku jasności składników w K oraz 2) uzyskać dodatkową informację o ekstynkcji międzygwiazdowej w danym kierunku, poprzez wykorzystanie kalibracji temperatura - indeks barwy i porównanie z obserwowanymi indeksami barwy. Drugim usprawnieniem jest szacowanie błędów modelu WD z pomocą symulacji Monte Carlo, która jednocześnie pozwala upewnić się, czy rzeczywiście znaleziony model jest najlepszy globalnie. Rezultatem tej pracy jest nie tylko poprawa skali odległości, poprzez rozwiązanie kwestii odległości do LMC, ale również opublikowanie po raz pierwszy w historii bardzo precyzyjnych parametrów (masy, promienie, temperatury efektywne, metaliczność) dla większej grupy olbrzymów późnego typu. Można mieć nadzieję, że dokładność wyznaczonych parametrów pozwoli w przyszłości na określenie ważnego i wciąż słabo określonego parametru modeli ewolucyjnych gwiazd jakim jest overshooting.

#### 8. Pozostałe ważne osiągnięcia naukowo - badawcze po doktoracie.

- zbudowanie modelu i wyznaczenie parametrów astrofizycznych układu zaćmieniowego zawierającego klasyczną cefeidę pulsującą w modzie fundamentalnym OGLE-LMC-CEP-0227 (Pietrzyński i in. 2010); jest to pierwsze precyzyjne (lepsze niż 2%) wyznaczenie masy dynamicznej cefeidy w historii;
- zbudowanie modelu i wyznaczenie parametrów astrofizycznych układu zaćmieniowego OGLE-BLG-RRLYR-02792 (Pietrzyński i in. 2012), który zawiera unikalną gwiazdę pulsującą identycznie jak gwiazdy typu RR Lyr, ale mającą prawdopodobnie zupełnie inne pochodzenie ewolucyjne;
- opracowanie nowej metody analizy gwiazd zaćmieniowych w których jeden ze składników pulsuje radialnie, zastosowanie jej w przypadku układu z cefeidą OGLE-LMC-CEP-0227 (Pilecki i in. 2013) i wyznaczenia czynnika geometrycznego (ang. p-factor); p-factor odgrywa zasadniczą rolę w wyznaczaniu odległości do cefeid metodą Baade-Wesselinka i jego nieznanomość ogranicza dokładność tej metody.

#### Bibliografia:

- Andersen, J. 1991, A&ARv, 3, 91  
Bonanos, A. Z., Stanek, K. Z., Kudritzki, R. P., i in. 2006, ApJ, 652, 313  
Bonanos, A. Z., Castro, N., Macri, L. M., & Kudritzki, R. P. 2011, ApJ, 729, L9  
di Benedetto, G. P. 2005, MNRAS, 357, 174  
Fitzpatrick, E. L., Guinan, E. F., DeWarf, L. E., Maloney, F. P., & Massa, D. 2002, ApJ, 564, 260  
Fitzpatrick, E. L., Ribas, I., Guinan, E. F., Maloney, F. P., & Claret, A. 2003, ApJ, 587, 685  
Freedman, W. L., i in. 2001, ApJ, 553, 47  
Gibson, B. K. 2000, Mem. Soc. Astron. Ital., 71, 693

DG.

- Graczyk, D., Pietrzyński, G., Thompson, I. B., Gieren, W., i in. 2013, Advancing the Physics of Cosmic Distances, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, 289, 222
- Guinan, E. F., Fitzpatrick, E. L., Dewarf, L. E., Maloney, F., i in. 1998, ApJ, 509, L21
- Hilditch, R. W., Howarth, I. D., & Harries, T. J. 2005, MNRAS, 357, 304
- Kervella, P., Thevenin, F., Di Folco, E., & Segransan, D. 2004, A&A, 426, 297
- Lacy, C. H. 1977, ApJ, 213, 458
- Paczyński, B. 1997, Conference Paper Space Telescope Science Institute Series, The Extragalactic Distance Scale, ed. M. Livio (Cambridge: Cambridge Univ. Press), 273
- Pawlak, M., Graczyk, D., Soszyński, I., Pietrukowicz, P., i in. 2013, AcA, 63, 323
- Pietrzyński, G., Thompson, I. B., Graczyk, D., Gieren, W., i in. 2009, ApJ, 697, 862
- Pietrzyński, G., Thompson, I. B., Gieren, W., Graczyk, D. i in. 2010, Nature, 468, 542
- Pietrzyński, G., Thompson, I. B., Gieren, W., Graczyk, D. i in. 2012, Nature, 484, 75
- Pilecki, B., Graczyk, D., Pietrzyński, G., Gieren, W., i in. 2013, MNRAS, 436, 953
- Popper, D. M. 1974, ApJ, 188, 559
- Prsa, A., Batalha, N., Slawson, R. W., i in. 2011, AJ, 141, 83
- Ribas, I., Fitzpatrick, E. L., Maloney, F. P., Guinan, E. F., & Udalski, A. 2002, ApJ, 574, 771
- Ribas, I., Jordi, C., Vilardell, F., Fitzpatrick, E. L., i in. 2005, ApJ, 635, L37
- Riess, A. G., Macri, L., Casertano, S., i in. 2011, ApJ, 730, 119
- Schaefer, B. E. 2008, AJ, 135, 112
- Slawson, R. W., Prsa, A., Welsh, W. F., i in. 2011, AJ, 142, 160
- Soszynski, I., Udalski, A., Poleski, R., i in. 2012, AcA, 62, 219
- Thompson, I. B., Kaluzny, J., Pych, W., Burley, G., i in. 2001, AJ, 121, 3089
- Udalski, A., Kubiak, M., & Szymanski, M. 1997, Acta Astron., 53, 291
- Udalski, A. 2003, Acta Astron., 53, 291
- van Hamme, W., & Wilson, R. E. 2007, ApJ, 661, 1129
- Walker, A. R. 2012, Ap&SS, 341, 43
- Wilson, R. E., & Devinney, E. J. 1971, ApJ, 166, 605
- Wilson, R. E. 1979, ApJ, 234, 1054
- Wilson, R. E. 1990, ApJ, 356, 613
- Wyrzykowski, Ł., Udalski, A., Kubiak, M., Szymański, M., i in. 2003, AcA, 53, 1

*Dariusz Graczyk*