

AUTOREFERAT

1. Imię i nazwisko: **Paweł Pietrukowicz**

2. Posiadane dyplomy:

- **magistra** (w zakresie astronomii) uzyskany dnia 19 czerwca 2002 r. na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, promotor: prof. dr hab. Janusz Kałużny,
- **doktora** (w zakresie astronomii) uzyskany dnia 30 marca 2007 r. w Centrum Astronomicznym im. M. Kopernika PAN w Warszawie po obronieniu pracy pod tytułem *Poszukiwanie nowych karłowatych w wybranych gromadach kulistych projektu CASE*, promotor: prof. dr hab. Janusz Kałużny.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych:

- 1.10.2002 – 30.03.2007: doktorant w Centrum Astronomicznym im. Mikołaja Kopernika PAN w Warszawie
- 1.04.2007 – 30.09.2007: programista w Centrum Astronomicznym im. Mikołaja Kopernika PAN w Warszawie
- 1.10.2007 – 30.09.2009: stażysta po doktoracie (postdoc) w Departamento de Astronomía y Astrofísica, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile
- 1.10.2007 – 30.09.2010: adiunkt w Centrum Astronomicznym im. Mikołaja Kopernika PAN w Warszawie
(w okresie pobytu za granicą 1.10.2007 – 30.09.2009 na urlopie bezpłatnym)
- 1.10.2010 – obecnie: adiunkt naukowy w Obserwatorium Astronomicznym Uniwersytetu Warszawskiego

4. Wskazanie osiągnięcia naukowego wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 4 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (DZ. U. nr 65, poz 595 ze zm.).

a) Tytuł osiągnięcia naukowego:

Gwiazdy zmienne pulsujące w badaniach struktury i ewolucji Drogi Mlecznej

b) Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego:

- P1:** **Pietrukowicz P.**, Udalski A., Soszyński I., Nataf D. M., Wyrzykowski Ł., Poleski R., Kozłowski S., Szymański M. K., Kubiak M., Pietrzyński G., Ulaczyk K., *The Optical Gravitational Lensing Experiment: Analysis of the Bulge RR Lyrae Population from the OGLE-III Data*, The Astrophysical Journal, 2012, 750, 169;

Paweł Pietrukowicz

- P2:** Pietrukowicz P., Kozłowski S., Skowron J., Soszyński I., Udalski A., Poleski R., Wyrzykowski Ł., Szymański M. K., Pietrzyński G., Ulaczyk K., Mróz P., Skowron D. M., Kubiak M., *Deciphering the 3D Structure of the Old Galactic Bulge from the OGLE RR Lyrae Stars*, The Astrophysical Journal, 2015, 811, 113;
- P3:** Pietrukowicz P., Dziembowski W. A., Mróz P., Soszyński I., Udalski A., Poleski R., Szymański M. K., Kubiak M., Pietrzyński G., Wyrzykowski Ł., Ulaczyk K., Kozłowski S., Skowron J., *Large Variety of New Pulsating Stars in the OGLE-III Galactic Disk Fields*, Acta Astronomica, 2013, 63, 379;
- P4:** Pietrukowicz P., Latour M., Angeloni R., di Mille F., Soszyński I., Udalski A., Germanà C., *A Low-Resolution Spectroscopic Exploration of Puzzling OGLE Variable Stars*, Acta Astronomica, 2015, 65, 39.

c) Omówienie celu naukowego.

Nasza Galaktyka, Droga Mleczna, stanowi zbiorowisko miliardów gwiazd, gazu, pyłu i ciemnej materii. Gwiazdy, choć stanowią tylko niewielką część masy całej Drogi Mlecznej, dzięki temu, że są dobrze widoczne, pomagają zbadać strukturę oraz historię formowania się Galaktyki. Niestety badania Drogi Mlecznej są znacząco utrudnione z powodu obecności dużych ilości pyłu w płaszczyźnie Galaktyki oraz położenia Słońca bardzo blisko tej płaszczyzny. Dopiero teraz, w dobie wielkoskalowych naziemnych przeglądów nieba, takich jak OGLE (ang. *Optical Gravitational Lensing Experiment*), a także specjalnie dedykowanej kosmicznej misji astrometrycznej *Gaia* zaczyna być realne całościowe spojrzenie na Drogę Mleczną pod kątem jej budowy i ewolucji, dzięki obserwacjom setek milionów gwiazd do niej przynależących oraz gwiazd tworzących pobliskie mniejsze galaktyki.

Do lat 90-tych XX wieku naszą Galaktykę przedstawiano w dość dużym uproszczeniu. Wiadomo było, że jest dyskową galaktyką spiralną z centralnym wybrzuszeniem, w którym dominują – liczące sobie miliardy lat – czerwone olbrzymy. Na podstawie rozkładu znanych, nieodległych gromad otwartych oraz cefeid klasycznych wiedzano, że młode obiekty (liczące od kilku do kilkuset milionów lat) występują w cienkim dysku galaktycznym i generalnie grupują się wzdłuż łuków – domniemanych ramion spiralnych Galaktyki. Bardziej wyraźna struktura spiralna dysku wyłoniła się z radiowych obserwacji wodoru neutralnego obserwowanego na linii 21 cm (van de Hulst i in. 1954). Wiedzano, że zarówno dysk jak i zgrubienie centralne (ang. *bulge*) są zanurzone w olbrzymim, prawdopodobnie sferycznym halo, w którym znajdują się stare (liczące kilkanaście miliardów lat) gromady kuliste i stare gwiazdy o niskiej zawartości metali, czyli pierwiastków cięższych niż hel. Ponadto, już od kilkudziesięciu lat wiadomo było, że krzywa rotacji dysku galaktycznego jest w zasadzie płaska (co świadczyło o obecności dużych ilości ciemnej materii) oraz że radioźródło Sagittarius A* to centralna czarna dziura o masie rzędu milionów mas Słońca (Wollman i in. 1977). Odległość do Centrum Galaktyki R_0 do tej pory jest trudna do wyznaczenia. Uśredniając wartości uzyskane na podstawie różnych metod pomiarowych Genzel i in. (2010) otrzymali $R_0 = 8,23 \pm 0,20_{\text{stat}} \pm 0,19_{\text{sys}}$ kpc. Przez długi czas obowiązywał kanoniczny model formowania się naszej Galaktyki – poprzez szybki, trwający około stu milionów lat kolaps radialny prastarego obłoku materii, który w krótkim czasie utworzył dysk i dał początek gwiazdom, a ich gładki rozkład – jak sądzono – obecnie obserwujemy (Eggen i in. 1962).

Taki prosty obraz Drogi Mlecznej został zmacony w latach 90-tych XX wieku, kiedy odkryto rozrywaną pływowo galaktykę karłowatą w Strzelcu (Ibata i in. 1994), a później inne strumienie gwiazd i zgęszczenia w halo naszej Galaktyki. Co więcej, gromady kuliste okazały się obiektami bardziej złożonymi niż myślano – w niektórych przypadkach to konglomeraty gwiazd różnych populacji i najprawdopodobniej obdarzone z wielu gwiazd centra jakichś dawnych galaktyk karłowatych

(np. omega Centauri, Lee i in. 1999). Nowe obserwacje obiektów halo galaktycznego, a także innych galaktyk, zdecydowanie zaczęły faworyzować hierarchiczny scenariusz formowania się struktur we wczesnym Wszechświecie, w którym większe obiekty powstają wskutek łączenia się mniejszych fragmentów (Searle i Zinn 1978). Na podstawie obserwacji gwiazd w otoczeniu Słońca pokazano, że dysk galaktyczny wyraźnie dzieli się na dwie składowe: dysk cienki i dysk gruby (Chiba i Beers 2000). Wreszcie coraz więcej przesłanek wskazywało na obecność poprzeczki w Centrum naszej Galaktyki.

Lata 90-te XX wieku to początek epoki wielkoskalowych przeglądów nieba, takich jak projekty OGLE i MACHO w zakresie optycznym oraz 2MASS w zakresie bliskiej podczerwieni. Nieoceniony wkład również wniósł satelita COBE zaopatrzony w wielopasmową podczerwoną kamerę DIRBE przeznaczoną do sporządzenia mapy całego nieba pod kątem emisji przez pył międzygwiazdowy zalegający w naszej Galaktyce. Opracowana wówczas mapa ekstynkcji (Schlegel i in. 1998) jest do dziś wykorzystywana w badaniach różnych obiektów położonych na szerokościach powyżej 10° od równika galaktycznego. Bliżej równika wyniki powinny być traktowane z wielką ostrożnością, ponieważ rzeczywisty rozkład pyłu wciąż nie jest znany.

Projekt OGLE rozpoczął się w 1992 roku, mając na celu wykrywanie zjawisk mikrosoczewkowania grawitacyjnego i podjęcie próby wyjaśnienia tym sposobem natury ciemnej materii (Udalski i in. 1992). Obecnie jest to wielkoskalowy fotometryczny przegląd zmienności bogatych w gwiazdy obszarów Drogi Mlecznej, jak zgrubienie centralne i dysk galaktyczny, a także odrębnego rejonu Obłoków Magellana. Mimo, iż okazało się, że ciemna materia nie występuje w formie masywnych zwartych obiektów halo Galaktyki (ang. *MACHO*, *MAssive Compact Halo Objects*), to bogate dane fotometryczne OGLE mają wielorakie zastosowania w badaniach zarówno wybranych pojedynczych obiektów jak i w analizie całych populacji budujących systemy gwiazdowe, jak nasza Galaktyka, Obłoki Magellana, czy gromady gwiazdowe. Obserwacje są prowadzone z Obserwatorium Las Campanas, ulokowanego na chilijskiej Pustyni Atakama. W latach 1992–1995 były one wykonywane przez kilka miesięcy w roku przy użyciu 1,0-metrowego teleskopu Swope. Od 1996 roku dane fotometryczne zbierane są każdej pogodnej nocy za pomocą specjalnie dedykowanego dla projektu OGLE 1,3-metrowego Teleskopu Warszawskiego. Od marca 2010 roku projekt jest w czwartej fazie realizacji (OGLE-IV, Udalski i in. 2015), monitorując w sumie ponad 1,3 miliarda gwiazd na obszarze około 3500 stopni kwadratowych nieba. Wcześniejsze fazy OGLE miały miejsce w latach 1992–1995 (OGLE-I), 1997–2000 (OGLE-II) i 2001–2009 (OGLE-III). Start każdego nowego etapu wiązał się z instalacją nowej kamery o coraz większym polu widzenia, co umożliwiło monitoring coraz większego obszaru na niebie. Większość obserwacji (około 90%) jest wykonywana w filtrze *I* (o centralnej długości fali 8000 Å i szerokości połowkowej 1480 Å), zaś pozostałe – w filtrze *V* (5370 Å, 950 Å). Stosowane filtry posiadają charakterystyki bardzo zbliżone do filtrów standardowych systemu *BVI*, dzięki czemu obserwacje OGLE mają zastosowanie do wszelkich badań z zakresu astrofizyki gwiazdowej, a także pozagalaktycznej.

Projekt OGLE, ponieważ od samego początku badał bogate w gwiazdy rejony zgrubienia centralnego, znacząco przyczynił się do poszerzenia wiedzy właśnie na temat tego składnika Drogi Mlecznej. Wyższa niż przewidywana dla kulistego zgrubienia liczba odkrywanych zjawisk mikrosoczewkowania grawitacyjnego sugerowała jego wydłużony kształt (Kiraga i Paczyński 1994). Analiza obserwowanego rozkładu jasności gwiazd typu *red clump* w trzech wybranych polach OGLE-I, rozmieszczonych w odstępach co około 5° w długości galaktycznej, wykonana przez Stanka i in. (1994), ostatecznie dowiodła obecności centralnej poprzeczki, nachylonej pod kątem mniejszym niż 45° do linii Słońce–(Centrum Galaktyki) z bliższym końcem po stronie dodatnich długości galaktycznych. W tym miejscu warto wyjaśnić, że gwiazdy typu *red clump* to czerwone olbrzymy świecące stałym blaskiem, liczące kilka miliardów lat i będące na etapie spalania helu w jądrze. Dzięki temu, że licznie występują w zgrubieniu centralnym, są jasne i charakteryzują się małym rozrzutem jasności, są traktowane jako świece standardowe. Wykorzystując tego samego typu gwiazdy, ale

obserwowane już podczas drugiej fazy projektu (OGLE-II), Rattenbury i in. (2007) oszacowali proporcje poprzeczki na 10:3,5:2,6, kąt nachylenia na 24° – 27° do linii Słońce–Centrum Galaktyki, a długość na 3,1–3,5 kpc. Trochę wcześniej López-Corredoira i in. (2005), opierając na danych z przeglądu 2MASS, zauważyli, że zamiast o elipsoidalnym należy raczej mówić o pudełkowatym kształcie galaktycznego zgrubienia centralnego (ang. *boxy bulge*), podobnie jak to się obserwuje w niektórych innych galaktykach spiralnych. Na podstawie obejmujących jeszcze większy obszar zgrubienia centralnego danych OGLE-III, Nataf i in. (2010) odkryli, że zgrupowanie gwiazd typu *red clump* na diagramach barwa–jasność dla zgrubienia centralnego wyraźnie rozdwa się, osiągając różnicę jasności sięgającą 0,5 mag w paśmie *I* na szerokości galaktycznej $5,7^{\circ}$, zarówno południowej jak i północnej. Wyjaśnia się to w ten sposób, że nachylona do nas galaktyczna poprzeczka ma w przekroju bocznym kształt litery „X”, przy czym przecięcie wypada w samej płaszczyźnie Galaktyki (McWilliam i Zoccali 2010).

Wyżej opisany obraz zgrubienia centralnego dotyczy populacji średniego wieku, która dominuje pod względem masy i obserwowanej jasności, w postaci czerwonych olbrzymów typu *red clump*. Wiek tej populacji, a zatem i wiek poprzeczki szacuje się na 10 miliardów lat na podstawie dopasowania izochron na bardzo głębokim (sięgającym 29 mag w paśmie *V*) diagramie barwa–jasność skonstruowanym dla gwiazd w polu przeglądu SWEEPS, które obserwowano Kosmicznym Teleskopem Hubble'a (Sahu i in. 2006). Przypuszcza się, że poprzeczka centralna Drogi Mlecznej powstała w procesie trwającym nie dłużej niż miliard lat (Minniti i Zoccali 2008). Moment ten pokrywa się z okresem najwyższego tempa formowania się gwiazd we Wszechświecie, odpowiadający wartości przesunięcia ku czerwieni $z=2$. Należy w tym miejscu wspomnieć, że w zgrubieniu centralnym występują również – co prawda bardzo nielicznie – obiekty młode, jak pozostałości po niedawnych supernowych czy cefeidy klasyczne (Matsunaga i in. 2011, Dékány i in. 2015), natomiast w samym Centrum rezyduje się licząca zaledwie kilka milionów lat gromada nuklearna.

Zupełnie inaczej musiała wyglądać nasza Galaktyka na jeszcze wcześniejszym etapie ewolucji. Jak się przypuszcza – gwiazdy, które jako pierwsze zaświeciły po Wielkim Wybuchu, składały się praktycznie wyłącznie z wodoru i helu, były bardzo masywne (rzędu setek mas Słońca) i wobec tego żyły krótko. Gwiazd pierwszej generacji lub inaczej gwiazd populacji III jak dotąd nie udało się nigdzie zaobserwować. Ale gwiazdy o niskiej zawartości metali (co najmniej kilka razy mniejszej niż w przypadku Słońca) już powszechnie występują w naszej Galaktyce i jej sąsiedztwie i to właśnie one stanowią klucz do poznania i zrozumienia procesu formowania się struktur we Wszechświecie. Gwiazdy o niskiej metaliczności zaliczane są do populacji II. Takie gwiazdy występują praktycznie w całej Galaktyce – tworzą galaktyczne halo, które przenika przez dysk, a także gromady kuliste rozsiane po całym halo. Gwiazdy populacji II są bardzo stare – mogły powstać już kilkaset milionów lat po Wielkim Wybuchu. Zależnie od masy początkowej obecnie są na różnym etapie ewolucji. Są wśród nich gwiazdy ciągu głównego (podkarły), olbrzymy oraz stygnące białe karły. Podkarły i olbrzymy populacji II nie mogą mieć mas większych niż około $0,85 M_{\odot}$, ponieważ przy obecnym wieku Wszechświata (13,8 miliarda lat) już by wypaliły swoje paliwo jądrowe i nie świeciły jasno. Jako gwiazdy halo galaktycznego łatwo je odróżnić od pozostałych gwiazd w sąsiedztwie Słońca tym, że mają wyraźnie różną prędkość względem Słońca i obiegają Centrum Galaktyki zazwyczaj po orbitach mocno wydłużonych. Gwiazdy młode (populacji I, tj. w wieku do kilkuset milionów lat) oraz gwiazdy w średnim wieku (populacji I skrajnej, liczące kilka miliardów lat, np. Słońce) okrążają Centrum po orbitach z grubsza kołowych i położonych praktycznie w płaszczyźnie dysku galaktycznego.

Badania starej populacji w odległościach rzędu kiloparseków są możliwe dzięki gwiazdom zmiennym pulsującym typu RR Lyrae. Są to czerwone olbrzymy będące na etapie spalania helu w jądrze (są na gałęzi horyzontalnej na diagramie Hertzsprunga-Russella), które akurat przechodzą przez pas niestabilności pulsacyjnej. Generalnie gwiazdy RR Lyrae pulsują w modzie fundamentalnym (są to gwiazdy typu RRAb) lub pierwszym owertonie (typu RRC), lub obu jednocześnie (typu RRd).

Okresy pulsacji zawierają się pomiędzy 0,2 a 1,0 doby, zaś amplitudy w paśmie I mogą sięgać 1,0 mag. Krzywe zmian blasku gwiazd pulsujących w modzie fundamentalnym mają bardzo charakterystyczny trójkątny kształt ze stromą częścią wznoszącą, natomiast krzywe pulsujących w pierwszym owertonie – zbliżony do sinusoidy. Jak dotąd nie udało się dokładnie zmierzyć masy żadnej tego typu gwiazdy, ale na podstawie modeli teoretycznych uważa się, że masy gwiazd RR Lyrae zawierają się w przedziale 0,55–0,85 $M_{\odot}$. Ponieważ są to olbrzymy o dość dobrze określonej jasności absolutnej (M_V między +0.3 a +0.9 mag – zależnie od metaliczności [Fe/H]), znakomicie nadają się do mierzenia odległości oraz badania struktur w naszej Galaktyce i galaktykach Grupy Lokalnej. Niestety nie jest możliwe precyzyjniejsze ustalenie wieku danej gwiazdy typu RR Lyrae poza tym, że ma więcej niż 10 miliardów lat (Marconi 2015). Jest tak, ponieważ nie wiadomo, ile masy dana gwiazda utraciła poprzez wiatr gwiazdowy na wcześniejszych etapach życia.

Pierwsze zmienne typu RR Lyrae w kierunku zgrubienia centralnego odkryto w latach 30-tych XX wieku. Niedługo później Walter Baade zauważył, że obserwowane gwiazdy tego typu koncentrują się w stronę środka naszej Galaktyki, co faktycznie świadczyło o obecności populacji II w zgrubieniu centralnym (Baade 1946). Do lat 90-tych XX wieku odkryto około tysiąca tego typu obiektów w obszarze zgrubienia centralnego. Późniejsze lawinowe odkrycia to zasadniczo zasługa przeglądu OGLE: 215 gwiazd w polach OGLE-I (Udalski i in. 1997), 2713 w polach OGLE-II (Mizerski 2003), 16836 w polach OGLE-III (Soszyński i in. 2011) i wreszcie 38257 w polach OGLE-IV (Soszyński i in. 2014). Jednak pierwsze próby ilościowego zbadania populacji gwiazd RR Lyrae zgrubienia centralnego zostały przeprowadzone na zbiorze około 1700 zmiennych zaobserwowanych w ramach mikrosoczewkowego projektu MACHO, który był realizowany w latach 1992–1999 w obserwatorium na górze Mount Stromlo w Australii. Minniti i in. (1998) zauważyli, że rozkład przestrzenny tych gwiazd można by opisać funkcją potęgową o wykładniku około -3 , a rozkład powierzchniowy na niebie wygląda na spłaszczony w proporcji 10:7 wzdłuż płaszczyzny Galaktyki. W innej pracy zespołu MACHO, Alcock i in. (1998) zwrócili uwagę, że w części wewnętrznej zgrubienia centralnego gwiazdy RR Lyrae zdają się układać wzdłuż poprzeczki uformowanej przez gwiazdy typu *red clump*. Nie było to wcale takie oczywiste, bowiem powyższe wnioski oparto o obserwacje zaledwie około 12 stopni kwadratowych z grubsza w rejonie okna Baadego, czyli o relatywnie niskiej ekstynkcji.

Dalsze badania nad populacją II w obszarach centralnych Drogi Mlecznej wymagały znacznie większego pokrycia w tym kierunku nieba i większej liczby obiektów. Takie dane uzyskali Polacy w projekcie OGLE. Ściśle: 16836 zmiennych typu RR Lyrae zostało zarejestrowanych na obszarze 69 stopni kwadratowych OGLE-III (Soszyński i in. 2011), a 38257 – na obszarze 182 stopni kwadratowych OGLE-IV (Soszyński i in. 2014). Gdy tylko pojawiły się nowe zbiory zmiennych z OGLE, niezwłocznie przystąpiłem do ich analizy. Wyniki opublikowałem w ciągu kilku miesięcy po ukazaniu się wymienionych kolejnych kolekcji nowych zmiennych – odpowiednio w postaci pracy **P1**, a później pracy **P2** w amerykańskim *The Astrophysical Journal*.

Analiza właściwej populacji gwiazd RR Lyrae zgrubienia centralnego musiała zostać poprzedzona oczyszczeniem zbiorów znalezionych zmiennych, oczywiście zarówno w przypadku danych OGLE-III jak i później OGLE-IV. Ponieważ stare gwiazdy halo występują we wszystkich obserwowanych kierunkach, to również w polach zgrubienia galaktycznego znajdują się gwiazdy RR Lyrae z tła – przed i za bulgą. Aby je poprawnie usunąć, potrzebna jest nie tylko informacja o jasności (np. w paśmie I), ale także o obserwowanej barwie (np. $V-I$), gdyż w różnych kierunkach ekstynkcja jest diametralnie różna. Selekcji dokonałem na diagramie barwa–jasność (I w funkcji $V-I$), na którym zmienne ze zgrubienia układają się w ciąg wzdłuż wektora poczerwienienia. Osobno zrobiłem to dla gwiazd RRab, RRc i RRd. Poza tym w polach widzenia OGLE znalazły się liczne gromady kuliste. Mimo, iż gromady zgrubienia centralnego nie są bardzo ubogie w metale i nie spodziewamy się w nich dużo pulsujących gwiazd RR Lyrae, to i tak kilkadziesiąt zmiennych musiało zostać usuniętych z list do dalszej analizy.

Istotny problem, jaki trzeba pokonać w badaniach nad strukturą i własnościami zgrubienia

centralnego, a także wszelkich obiektów położonych w dysku Drogi Mlecznej lub poza nim, to uwzględnienie efektu znaczącego pochłaniania światła gwiazd przez pył międzygwiazdowy, czyli problem odczerwienienia. Wiadomo, że pył w dużych ilościach występuje w cienkim dysku Galaktyki, którego skalę wysokości (albo grubość ponad płaszczyznę galaktyczną) szacuje się na 270 parseków (Jurić i in. 2008). Pył zasadniczo rezyduje w ramionach spiralnych, gdzie rodzą się nowe gwiazdy. Niestety dokładne jego rozmieszczenie nie jest znane. Nie wiadomo, jak dużo pyłu zalega w samym zgrubieniu centralnym. Obecność młodych obiektów w zgrubieniu – co prawda niezbyt licznych – wskazuje, że blisko płaszczyzny mogą się znajdować jakieś obłoki gazu i pyłu. W dziedzinie optycznej obserwacje obiektów zgrubienia centralnego na szerokościach galaktycznych do około 1° są praktycznie niemożliwe z powodu ogromnej ekstynkcji sięgającej 30 mag lub nawet więcej w paśmie V . Powyżej tej szerokości zaczyna się wyłaniać coraz więcej gwiazd. Im dalej od płaszczyzny obserwujemy, tym poczerwienienie jest mniejsze i zasadniczo jest ono spowodowane obecnością obłoków pyłu bliżej nas niż odległej gwiazdy. Jest wysoce prawdopodobne, że pył który przesłania zaobserwowane w zakresie optycznym przez OGLE gwiazdy RR Lyrae znajduje się wyłącznie w dysku galaktycznym. Na etapie analizy zbioru zmiennych z fazy trzeciej OGLE nie istniała żadna mapa ekstynkcji w kierunku zgrubienia centralnego. Pierwsze mapy powstały dopiero później na podstawie gwiazd typu *red clump*. Jedynym dobrym rozwiązaniem było wtedy przyjęcie założenia, że pył posiada takie same własności we wszystkich badanych polach OGLE-III, czyli że wektor poczerwienienia jest wszędzie jednakowy. Badanie ekstynkcji na wydzielanych obszarach nie przynosiło dobrych wyników. Wartość średnią współczynnika absorpcji całkowitej do selektywnej $R_{I,V-I} = 1,080 \pm 0,007$ zastosowałem do każdej gwiazdy z osobna. Otrzymana wartość $R_{I,V-I}$ była zgodna z wynikiem z OGLE-II ($R_{I,V-I} = 1,1$, Udalski 2003), co potwierdziło wyraźnie niestandardową ekstynkcję w kierunku zgrubienia centralnego w porównaniu z wartością uzyskaną z map z satelity COBE ($R_{I,V-I} = 1,4$, Schlegel i in. 1998) dla dużo mniej zapyłonych rejonów poza dyskiem galaktycznym.

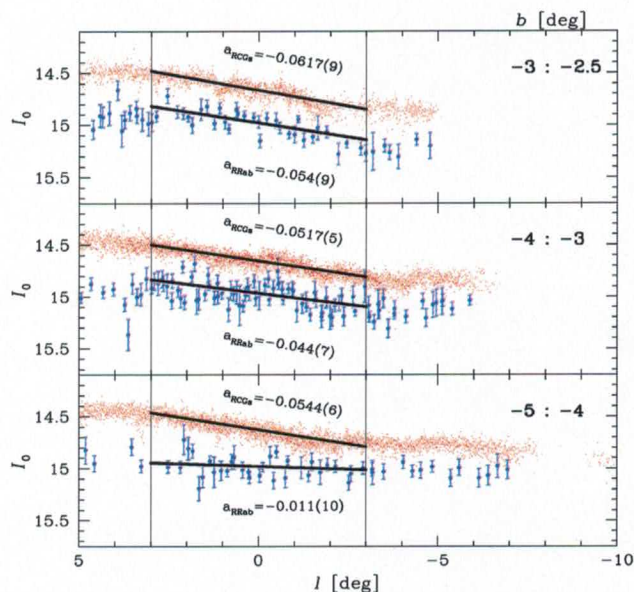
W tym miejscu warto wspomnieć krótko o zaletach zmiennych typu RRab nad RRc w badaniach dotyczących struktury Galaktyki. (Zmienne typu RRd stanowią mniej niż jeden procent znanych galaktycznych RRab, więc w ogóle nie były brane pod uwagę.) Gwiazdy RR Lyrae pulsujące w modzie fundamentalnym (czyli typu RRab) mają charakterystyczne, trójkątne (albo piłokształtne) krzywe blasku, przez co przy swoich okresach rzędu 0,3–1,0 doby, są unikalne; praktycznie nie da się ich pomylić z innymi zmiennymi, a kompletność poszukiwań jest bardzo wysoka. Krzywe zmiennych typu RRc są zbliżone do sinusoidy, a ich amplitudy niższe niż RRab. Słabe gwiazdy RRc często trudno odróżnić od zmiennych zaplamionych lub elipsoidalnych. Ponadto zmienne typu RRab występują częściej i są przeciętnie jaśniejsze niż gwiazdy RRc w paśmie I . Wreszcie jest jeszcze jedna bardzo istotna zaleta gwiazd RRab. Mianowicie Kovács i Zsoldos (1995) zauważyli, że metaliczność gwiazd RRab można dość dobrze oszacować na podstawie znajomości ich specyficznie wyglądających krzywych blasku. Jurcsik i Kovács (1996) zaproponowali prostą relację pomiędzy metalicznością gwiazdy $[Fe/H]$ a okresem pulsacji P i kombinacją współczynników Fouriera $\phi_{31} = \phi_3 - 3\phi_1$ wyznaczonych dla krzywej w paśmie V . W przypadku danych OGLE, zbieranych zasadniczo w filtrze I , wykorzystałem relację z pracy Smolec (2005).

Analiza rozkładu metaliczności 10259 gwiazd RRab z OGLE-III pokazała, że stara populacja zgrubienia centralnego jest bardzo jednorodna lub też dobrze wymieszana. Rozkład jest symetryczny z maksimum na $[Fe/H]_{95} = -1,02 \pm 0,18$ dex i dyspersją 0,25 dex w skali metaliczności zaproponowanej w pracy Jurcsik (1995). Średnie metaliczności gwiazd RR Lyrae są bardzo podobne we wszystkich kierunkach na zgrubienie centralne.

Dzięki temu, że gwiazdy typu RR Lyrae są świecami standardowymi o dobrze znanych własnościach, wykorzystując relacje okres–(jasność absolutna)–metaliczność w pasmach V oraz I (z modeli Catelana i in. 2004) i zakładając wyżej wspomniany współczynnik poczerwienienia, mogłem wyznaczyć jasność odczerwioną (lub inaczej prawdziwą) I_0 oraz oczywiście odległość d do każdej

gwiazdy RRab z osobna. W przypadku gwiazd RRc ta procedura jest mniej pewna z powodu braku informacji o metaliczności. Uzyskanie poprawnego rozkładu odległości do gwiazd RRab wymagało jeszcze uwzględnienia dwóch poprawek geometrycznych: (1) na szerokość galaktyczną oraz (2) efekt stożka – w tym samym kącie bryłowym obserwuje się więcej gwiazd na dalszych odległościach. Jak się okazało, uzyskany rozkład odległości jest bardzo symetryczny – co świadczy o wysokiej kompletności próbki i może być opisany prostym profilem Kinga (1962), często używanym w opisie rozkładu gwiazd w gromadach. Maksymalna wartość rozkładu wyznaczyła odległość do Centrum Galaktyki R_0 . Na podstawie danych OGLE-III otrzymałem $R_0 = 8,54 \pm 0,42$ kpc – w zgodności z wcześniejszymi, wykonanymi przez innych astronomów pomiarami w oparciu o gwiazdy RR Lyrae (np. Collinge i in. 2010: $R_0 = 8,3 \pm 0,7$ kpc), a także przeprowadzonymi innymi metodami (np. ruchów gwiazd obserwowanych w sąsiedztwie centralnej czarnej dziury przez Gillessena i in. 2009: $R_0 = 8,28 \pm 0,15_{\text{stat}} \pm 0,29_{\text{sys}}$ kpc).

Bardzo istotny wynik przedstawiony w pracy **P1** dotyczył porównania odczerwionych jasności I_0 zmiennych typu RR Lyrae z jasnościami gwiazd typu *red clump*. Ewidentnie okazało się, że w obszarach wewnętrznych zgrubienia centralnego, a ściślej w rejonach o współrzędnych galaktycznych ($|l| < 3^\circ$, $|b| < 4^\circ$) zmiennie typu RR Lyrae (stara populacja) układa się wzdłuż średniowiekowej poprzeczki, którą tworzą gwiazdy typu *red clump*, czyli że jasności prawdziwe jednych i drugich rosną tam tak samo wraz z rosnącą długością galaktyczną. Widać to na Rysunku 1, wziętym z pracy **P1**. Poza obszarami wewnętrznymi, jasności zmiennych typu RR Lyrae zdają się być z grubsza na stałym poziomie $I_0 \approx 15,0$ mag. Można rozumieć to w ten sposób, że w dalszych odległościach od Centrum populacja II jest symetryczna w funkcji długości galaktycznej.



Rys. 1. Porównanie jasności gwiazd RRab (zaznaczonych na niebiesko) z gwiazdami typu *red clump* (zaznaczonymi na czerwono) w trzech pasach wzdłuż płaszczyzny galaktycznej. W obszarach bliżej Centrum Galaktyki zmiennie RR Lyrae wyraźnie układają się wzdłuż poprzeczki uformowanej przez gwiazdy typu *red clump*.

Publikacja **P1** jest moją najbardziej dotychczas cytowaną pracą, w której jestem pierwszym autorem. Do dnia 16 lutego 2016 roku została zacytowana 38 razy według bazy danych ADS (SAO/NASA Astrophysics Data System). Rok później zmiennie RRab z OGLE-III zostały wykorzystane w pracy Dékány i in. (2013) w celu niezależnego zbadania ich rozkładu przy użyciu średnich jasności w paśmie I z OGLE oraz w paśmie podczerwonym K_s (maksimum na $2,2 \mu\text{m}$) z 4-

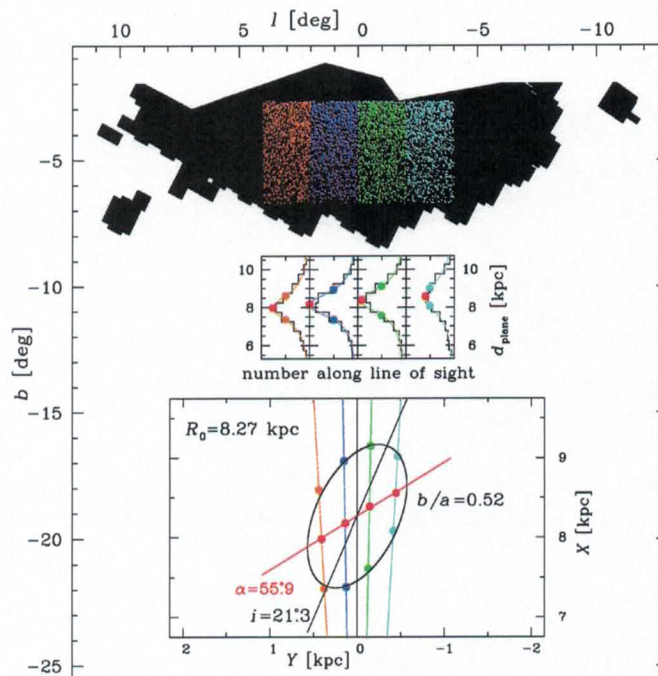
metrowego teleskopu VISTA w ramach przeglądu VVV. Zaletą obserwacji w podczerwieni jest to, że wraz z długością fali relacje okres–jasność są węższe, mniej zależne od metaliczności, a mierzone wartości jasności mniej obciążone efektem ekstynkcji przez ośrodek międzygwiazdowy. Według Dékány'ego i in. (2013) zmienne RR Lyrae nie układają się wzdłuż poprzeczki, jak gwiazdy typu *red clump*. Jedynie w małej wewnętrznej części być może tworzą strukturę trochę wydłużoną pod kątem zaledwie około $12,5^\circ$ do linii Słońce–Centrum Galaktyki. Nowe, większe zbiory gwiazd, obejmujące jeszcze większe obszary zgrubienia centralnego mogły przynieść rozstrzygnięcie, jak jest naprawdę.

Gdy tylko pojawiły się dane z czwartej fazy OGLE i zostały rozpoznane gwiazdy typu RR Lyrae, przystąpiłem do ich analizy, czego wynikiem jest praca **P2**. Od samego początku było dla mnie oczywiste, że tym razem do badań nad geometrią i własnościami starej populacji będą się nadawały jedynie zmienne typu RRab, ponieważ ich kolekcję – z wcześniej wymienionych powodów – cechuje bardzo wysoka kompletność detekcji. Kolekcja ta liczy 27258 obiektów. Na wstępnym etapie analizy odrzuciłem obiekty tła i wytyczyłem obszary zgrubienia centralnego, w kierunku których ekstynkcja nie osłabia za bardzo światła gwiazd RR Lyrae w dziedzinie optycznej – wytyczyłem obszary „kompletne”. Inaczej mówiąc, są to obszary, w których zakładam, że obserwujemy wszystkie gwiazdy RR Lyrae zgrubienia centralnego. Oczywiście mogą istnieć gwiazdy, które zostały przeoczone na etapie poszukiwań, ale ich odsetek jest tak znikomy, że nie wpływa na wyniki mojej analizy.

Istotnym krokiem naprzód w kwestii lepszego uwzględnienia ekstynkcji międzygwiazdowej okazała się praca Natafa i in. (2013). W pracy tej autorzy badali prawo poczerwienienia używając pomiarów w dziedzinie optycznej z danych OGLE-III oraz w dziedzinie podczerwonej z projektów 2MASS i VVV dla gwiazd typu *red clump* zgrubienia centralnego. W pracy **P2** w celu oszacowania ekstynkcji A_I zastosowałem sporządzoną trzy lata wcześniej, także na bazie gwiazd *red clump*, mapę poczerwienienia $E(J-K_s)$ autorstwa Gonzaleza i in. (2011) w oparciu o fotometrię z VVV oraz wykorzystałem lepiej wyznaczone jasności średnie $V-I$ gwiazd RR Lyrae dzięki częstszemu pokryciu krzywych blasku w filtrze V w fazie OGLE-IV. Nowe podejście przyniosło wyraźnie lepsze dopasowanie profilu gęstości Kinga (1962) dla całej populacji oraz wartość odległości do Centrum Galaktyki $R_0 = 8,27 \pm 0,01_{\text{stat}} \pm 0,40_{\text{sys}}$ kpc – wyjątkowo zgodną ze świeżymi wynikami pomiarów z innych metod, np. $R_0 = 8,34 \pm 0,16$ kpc z trygonometrycznych pomiarów położenia maserów radiowych (Reid i in. 2014) czy $R_0 = 8,27 \pm 0,09_{\text{stat}} \pm 0,1_{\text{sys}}$ kpc z dynamiki gwiazd gromady nuklearnej (Chatzopoulos i in. 2015). Oszacowany mały błąd statystyczny wynika z bardzo licznej próbki zmiennych RRab, natomiast dość duży błąd systematyczny wiąże się przede wszystkim z niedokładną znajomością jasności absolutnej gwiazd RR Lyrae, sięgającą 0,1 mag w paśmie V , na którym po części oparta jest moja analiza.

Przy tak dużej próbce gwiazd RRab, jaka jest dostępna z OGLE-IV, mogłem podjąć się dokładniejszego niż w przypadku gwiazd z OGLE-III określenia kształtu przestrzennego starej populacji zgrubienia centralnego. Dokonałem tego w dwóch krokach – w pierwszym badając obserwowany rozkład na niebie, a następnie rozkład w projekcji na płaszczyznę Drogi Mlecznej. Dopasowania linii stałej gęstości powierzchniowej do obserwowanego na niebie rozkładu gwiazd RR Lyrae dobitnie pokazują, że w odległościach 3° – 8° od Centrum populacja ma kształt spłaszczonej elipsy wzdłuż płaszczyzny Galaktyki, przy czym spłaszczenie wynosi 0,33. Już to oznacza, że stara populacja na pewno nie jest sferycznie symetryczna. Jednakże najciekawsze jest zbadanie, jak naprawdę ona wygląda w przestrzeni 3D. Rozkłady gęstości gwiazd RRab wzdłuż równomiernie wybranych linii widzenia pokazują, że maksima tych rozkładów zbliżają się do nas wraz z rosnącą długością galaktyczną. Zatem istnieje oś nachylona pod kątem do linii Słońce–Centrum Galaktyki położona w płaszczyźnie Drogi Mlecznej (Rysunek 2), a stara populacja w obserwowanych obszarach zgrubienia centralnego ma kształt elipsoidy trójosiowej. Przekroje eliptyczne wyraźnie zarysowują się w rozkładzie linii stałej gęstości zrzutowanych na płaszczyznę Galaktyki, czyli w jej obrazie od strony bieguna. Kąt nachylenia osi głównej (zawartej w płaszczyźnie dysku) wyniósł $20^\circ \pm 3^\circ$, a proporcje osi całej elipsoidy 1:0,49:0,39 z błędem 2%. Otrzymany przeze mnie wynik ewidentnie pokazuje, że mniej

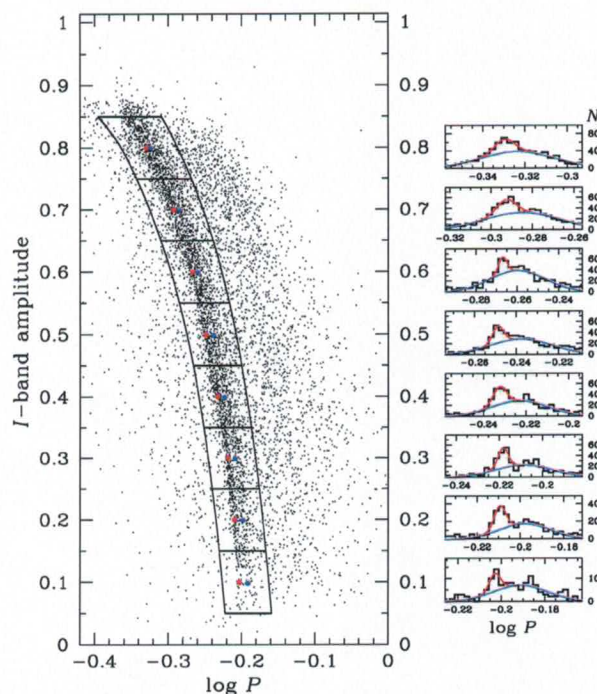
liczne gwiazdy populacji II w rejonach wewnętrznych układają się wzdłuż galaktycznej poprzeczki utworzonej z gwiazd średniego wieku. Najprawdopodobniej jest to rezultat oddziaływań grawitacyjnych ze strony masywnej poprzeczki. Przy okazji dość nieoczekiwanie okazało się, że na całym badanym obszarze zgrubienia centralnego przestrzenny rozkład gęstości gwiazd typu RRab (po jego przeskalowaniu do najkrótszej osi elipsoidy, czyli po usferycznieniu) można opisać jedną funkcją potęgową o wykładniku $-2,96 \pm 0,03$. Większa próbka gwiazd w porównaniu do OGLE-III potwierdziła bardzo jednorodny metalicznie charakter populacji RR Lyrae o lekko ujemnym gradiencie radialnym. Kolejny istotny wynik dotyczy rozkładu odczerwienionych jasności gwiazd RR Lyrae na szerokościach galaktycznych wyższych niż 5° . Jest on jednomodalny i symetryczny, co oznacza, że stara populacja z całą pewnością nie tworzy w przekroju struktury w kształcie litery „X”.



Rysunek 2. Wyniki badania rozkładu gęstości gwiazd RRab wzdłuż czterech linii widzenia, oznaczonych czterema różnymi kolorami. Gwiazdy zostały wzięte z obszarów zaznaczonych na mapie (u góry). Maksima rozkładów ich gęstości (na wykresach w środku) wyraźnie zbliżają się do nas wraz z rosnącą długością galaktyczną (z prawa na lewo). Punkty stałej gęstości (zaznaczone parami) tworzą elipsę w płaszczyźnie galaktycznej (na dole).

Wreszcie największe zaskoczenie – i moim zdaniem – najciekawszy wynik pracy **P2**, to obecność licznych starych populacji. Zauważyłem, że na diagramie okres–amplituda (diagramie Baileya) gwiazdy RRab układają się generalnie w dwa równoległe, położone bardzo blisko siebie ciągi. Widać to jeszcze wyraźniej, jeśli pozostawi się jedynie zmienne o małym rozrzucie punktów w krzywej blasku (Rysunek 3), czyli gwiazdy RR Lyrae wolne od efektu Błażki – efektu charakteryzującego się modulacją okresu i amplitudy. Obecność dwóch równoległych ciągów na diagramie Baileya oznacza, że tak naprawdę obserwujemy dwie populacje różniące się metalicznością. Populacje te mogą się różnić wiekiem, ale według aktualnej wiedzy uważa się, że przesunięcie wzdłuż osi okresu wynika z różnej zawartości metali. Niewielka separacja między dwoma ciągami oznacza niewielką różnicę w metaliczności, trudną tutaj do określenia z powodu dużego rozrzutu punktów. Dokładna analiza diagramu okres–amplituda dla gwiazd RRab pokazała, że populację o przeciętnie wyższej zawartości metali (oznaczoną przeze mnie jako populacja A) buduje około 12% wszystkich zmiennych, podczas gdy populację o niższej zawartości metali (oznaczoną jako B) – około 48%. Oprócz dwóch głównych

ciągów, wiele gwiazd jest rozsianych na większym obszarze diagramu, co wskazuje na obecność jeszcze innych starych populacji o niższej metaliczności. Obecność w zgrubieniu centralnym wielu starych populacji o względnie wysokiej liczebności świadczy o tym, że nasza Galaktyka na wczesnym etapie uformowała się w procesie zderzeń mniejszych fragmentów, a na pewno nie wskutek kolapsu jednego obłoku pierwotnej materii. Jest to potwierdzenie teorii o hierarchicznym formowaniu się struktur i pierwszy taki wynik dotyczący obszarów centralnych naszej Galaktyki. Publikacja **P2** do dnia 16 lutego 2016 roku uzyskała już 15 cytowań według bazy ADS.



Rysunek 3. Diagram okres–amplituda dla gwiazd RRab. Gwiazdy układają się w dwa blisko siebie położone ciągi. Po prawej przedstawione są dopasowania dwóch rozkładów Gaussa do uzyskanych histogramów w ośmiu zakresach amplitudy.

Moja praca w ostatnich latach nie dotyczyła wyłącznie gwiazd zmiennych pulsujących obserwowanych w kierunku zgrubienia centralnego Drogi Mlecznej. Zajmowałem się także poszukiwaniem i analizą tego typu zmiennych w dysku galaktycznym. Pas Drogi Mlecznej, z powodu ogromnego obszaru jaki zajmuje na niebie, praktycznie nie został jeszcze zbadany pod kątem obiektów zmiennych słabszych niż $V \sim 13$ mag. Jaśniejsze obiekty można znaleźć w katalogach GCVS (ang. *General Catalogue of Variable Stars*, Samus i in. 2013) oraz ASAS (ang. *All Sky Automated Survey*, Pojmański 2002), choć należy zaznaczyć, że te katalogi z pewnością nie są kompletne. Obserwacje pasa galaktycznego do jasności $I \sim 19,5$ mag widocznego z Obserwatorium Las Campanas, obejmującego blisko 2/3 jego długości, są w trakcie realizacji w ramach projektu OGLE-IV. Podczas fazy trzeciej, to jest w latach 2001–2009, projekt OGLE obserwował 21 wybranych pól w pobliżu równika galaktycznego odległych o 52° – 73° w kierunku ujemnych długości galaktycznych – łącznie 7,12 stopnia kwadratowego. Zależnie od pola, zebrano między 800 a 2700 obrazów prawie wyłącznie w filtrze I z częstością sięgającą najmniej 15 minut. Monitoring gęstych pól w dysku galaktycznym miał zasadniczo na celu poszukiwanie tranzytów planetarnych, co ostatecznie doprowadziło do odkrycia i potwierdzenia pięciu planet pozasłonecznych, np. OGLE-TR-111 (Udalski i in. 2002). Zbadaniem tych danych pod kątem obecności obiektów zmiennych, a przede wszystkim cennych gwiazd pulsujących zająłem się osobiście. Ze względu na nierównomierne rozłożenie pomiarów

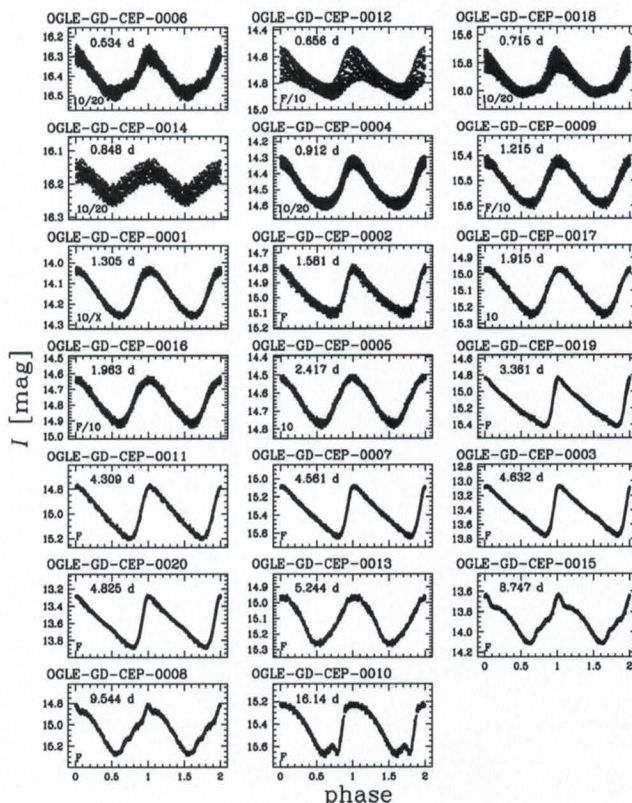
w czasie i wysoko prawdopodobną obecność licznych obiektów przejściowych (czyli obiektów o nieprzewidywalnym zachowaniu, takich jak gwiazdy nowe karłowate, gwiazdy typu Be, typu T Tauri czy gwiazdy rozbłyskowe) uznałem, że najlepiej będzie dokonać wizualnej inspekcji krzywych blasku wszystkich detekcji, dla których sygnał zmienności był wyraźny ($S/N > 10$). Obejrzanych zostało 345000 detekcji. Blisko jedną czwartą tej próbki niezależnie ode mnie przejrzał student pierwszego stopnia Przemysław Mróz, który później pod moją opieką napisał pracę licencjacką oraz artykuł informujący o odkryciu czterdziestu nowych karłowatych.

Badany obszar na niebie to była trochę *terra incognita*, ponieważ w rejonach bliskich płaszczyzny Galaktyki można oczekiwać gwiazd różnych populacji. Ponadto obserwowany kierunek był w przybliżeniu styczny do galaktycznego ramienia Tarczy–Centaury. Wobec tego spodziewałem się, że zostały zarejestrowane gwiazdy różnych klas jasności, położone w różnych i praktycznie niemożliwych do określenia z samej fotometrii odległościach, przy kompletnie nieznannej ekstynkcji. Klasyfikacja gwiazd zmiennych wymaga dobrej znajomości ich rozlicznych typów oraz fotometrycznych własności. Ostateczna lista gwiazd zmiennych musiała zostać oczyszczona z artefaktów, czyli detekcji które naśladują zmiany jasności pobliskich rzeczywistych gwiazd zmiennych.

Poszukiwania obiektów zmiennych w polach dyskowych OGLE-III doprowadziły do odkrycia 214 gwiazd pulsujących (publikacja **P3**), 11589 układów zaćmieniowych (Pietrukowicz i in. 2013), 40 nowych karłowatych (Mróz, Pietrukowicz i in. 2013) oraz 16000 nieopublikowanych jeszcze zmiennych różnych innych typów, w tym głównie gwiazd zaplamionych. Bogactwo znalezionych gwiazd pulsujących, mimo przecież niezbyt dużego ich zbioru, jest wręcz ogromne. Praca **P3** informuje o znalezieniu 20 cefeid klasycznych (Rysunek 4), 45 gwiazd typu RR Lyrae (w tym 36 RRab i 9 RRC), 31 zmiennych długookresowych (18 mir i 13 zmiennych półregularnych), jednym pulsującym białym karle (najprawdopodobniej typu ZZ Ceti) i 58 bardzo prawdopodobnych gwiazdach typu delta Scuti. Wszystkie te obiekty, poza jedną cefeidą klasyczną, to są nowe odkrycia. Ponadto artykuł donosi o odkryciu 6 zmiennych, które mogą być cefeidami drugiego typu oraz 60 krótkookresowych ($< 0,23$ d) obiektach pulsujących wykazujących istnienie wielu modów. Obecność wielu krótkich okresowości o amplitudach rzędu setnych magnitudo w gwieździe wskazuje w zasadzie tylko na dwie możliwości jako obiekty pulsujące: gwiazdy typu beta Cephei (gorące i masywne gwiazdy typów widmowych O9–B5 i klas jasności od I do V) albo typu delta Scuti (średniomasywne, gorętsze od Słońca gwiazdy typów widmowych A0–F9 i klas jasności III–V). Przy braku informacji o odległości do gwiazdy oraz wartości ekstynkcji międzygwiazdowej nie ma możliwości rozróżnienia pomiędzy wymienionymi typami gwiazd pulsujących wyłącznie na bazie fotometrii w filtrach *I* oraz *V*. Aby móc jednoznacznie sklasyfikować te obiekty pulsujące, a także wybrane inne zmienne znalezione w danych OGLE, wykonałem specjalnie dedykowane obserwacje spektroskopowe, o których piszę w dalszej części. W przypadku wcześniej wymienionych wysoko prawdopodobnych 58 zmiennych typu delta Scuti, niepewność tak naprawdę dotyczyła tylko obiektu OGLE-GD-DSCT-0058, charakteryzującego się wyjątkowo wysoką amplitudą (0,24 mag w paśmie *I*) przy ekstremalnie krótkim okresie (0,0196 d), który teraz wiadomo, że jest zbyt gorący jak na gwiazdę tego typu. Pozostałe 57 zmiennych to wysokoamplitudowe gwiazdy delta Scuti, w tym pulsujące z jednym okresem (zazwyczaj w radialnym modzie fundamentalnym) oraz pulsujące z wieloma okresami, których proporcje przyjmują charakterystyczne wartości. Niezwykle pomocnym narzędziem w klasyfikacji jest diagram Petersena (proporcja krótszego okresu do dłuższego okresu w funkcji tego drugiego), na którym wielookresowe gwiazdy pulsujące w modach radialnych tworzą w przybliżeniu horyzontalne ciągi.

U sześciu odkrytych gwiazd delta Scuti udało mi się wyodrębnić trzy mody radialne, a u jeszcze innej gwiazdy – nawet cztery takie mody. Być może te i inne gwiazdy pulsują jeszcze w innych, wyższych modach, ale zbadanie tego wymagałoby jeszcze dłuższych ciągów obserwacyjnych lub raczej wyższej dokładności pomiarów z przestrzeni kosmicznej (jak ma to miejsce w przypadku danych z satelitów Kepler, CoRoT, MOST, czy konstelacji BRITE). Dla tych siedmiu gwiazd delta Scuti z OGLE-III, tylko na podstawie dokładnych wartości okresów trzech modów radialnych,

możliwe było teoretyczne określenie ich parametrów fizycznych jak masa, metaliczność, wiek i temperatura powierzchniowa. Dodatkowa informacja o obserwowanej jasności umożliwiła wyznaczenie modułu odległości i poczerwienienia. Jak się okazało, pięć z tych gwiazd to obiekty relatywnie młode, w wieku 0,5–1,5 miliarda lat, będące w fazie ciągu głównego lub tuż po niej, natomiast dwa pozostałe mają dużo niższe zawartości metali i są dużo starsze – według modeli 4–6 miliardów lat. Wyznaczone odległości mieszczą się w zakresie 2,5–6,2 kpc.



Rysunek 4. Krzywe zmian blasku w paśmie I dla 20 znalezionych cefeid klasycznych w polach OGLE-III w dysku galaktycznym. Podane są oznaczenia zmiennych oraz okresy, z którymi krzywe te zostały złożone.

Jak widać, w gwiazdach typu delta Scuti, wykazujących co najmniej trzy mody radialne, drzemie ogromny potencjał do wykorzystania ich w celu badania struktury naszej Galaktyki oraz mechanizmów pulsacji gwiazd. Takich obiektów są z pewnością w Drodze Mlecznej tysiące, reprezentują różne populacje. Uzyskane odległości do tego typu zmiennych w niedalekiej przyszłości będzie można skonfrontować z pomiarami trygonometrycznymi wykonywanymi w ramach misji kosmicznej Gaia w celu weryfikacji teorii pulsacji i budowy wewnętrznej gwiazd.

Oczywiście największe możliwości zbadania struktury i historii formowania się dysku oraz halo naszej Galaktyki za pomocą gwiazd pulsujących wiąże się z cefeidami klasycznymi (populacja I) i gwiazdami typu RR Lyrae (populacja II). Jedne i drugie to bardzo dobre świece standardowe, są widoczne z odległości kiloparseków, nawet za dość grubymi obłokami pyłu. Cefeidy klasyczne słyną z tego, że spełniają zależność okres–jasność (Leavitt 1908). Im bardziej masywna gwiazda, tym ma większą moc promieniowania i dłuższy okres pulsacji. O ile w przypadku gwiazd RR Lyrae nie można ściśle określić wieku – poza tym, że mają więcej niż 10 miliardów lat – o tyle cefeidy klasyczne spełniają w naturalny sposób dobrze określoną zależność okres–wiek (Bono i in. 2005). Dzięki temu można by stworzyć nie tylko mapę obecnych ich położenia, ale także mapę historii ich powstawania.

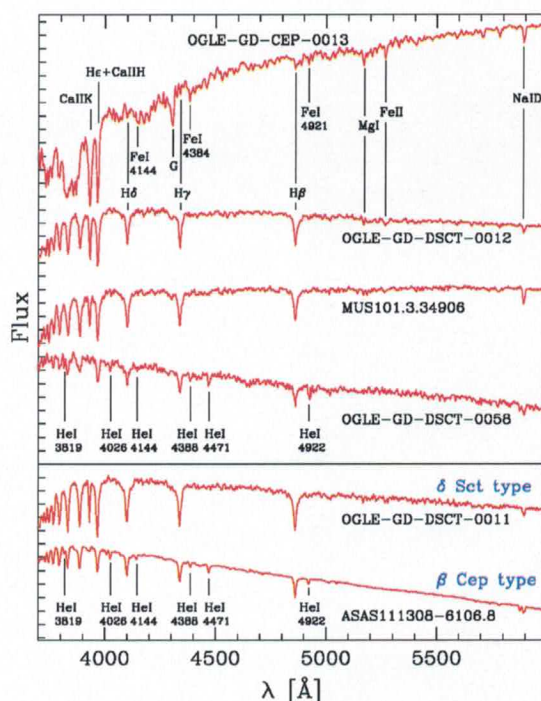
Ponieważ cefeidy klasyczne to obiekty młode (liczące sobie do kilkuset milionów lat), rezydujące generalnie w cienkim dysku, bardzo dobrze nadają się do zbadania struktury spiralnej naszej Galaktyki. Wystarczająco liczna, dobrze zmierzona próbka cefeid klasycznych powinna dać nam niezależne odpowiedzi na kilka nurtujących pytań dotyczących dysku galaktycznego, np. ile jest ramion spiralnych, jaki jest kąt rozwarcia struktury spiralnej, ile wynosi prędkość kątowna wzoru spiralnego i wreszcie jak zmieniał się tempo powstawania nowych gwiazd. Takie próby dotychczas podejmowano (ostatnio np. Mel'nik i in. 2015), ale znane cefeidy klasyczne, do których oszacowano odległości, nie tworzą za bardzo jednoznacznego obrazu – wyraźnie grupują się jedynie wzdłuż pobliskiego ramienia Strzelca. W ramach pracy **P3** sporządziłem możliwie najbardziej kompletną listę znanych galaktycznych cefeid klasycznych, która w przyszłości posłuży do stworzenia takiej mapy. Znane obiekty z katalogu GCVS zweryfikowałem i wzbogaciłem około 200 gwiazd z przeglądu ASAS, a także innych źródeł, w tym wyników przeglądu OGLE-III. Listę na bieżąco uaktualniam, gdy tylko pojawiają się doniesienia o kolejnych odkryciach. Aktualnie (do dnia 16 lutego 2016 roku) liczy ona 883 pozycje. Jest dostępna pod internetowym adresem <ftp://ftp.astrouw.edu.pl/ogle/ogle3/OIII-CVS/gd/cep/GalCep.list>. W sąsiednich katalogach można znaleźć szczegółowe informacje dotyczące pozostałych gwiazd zmiennych odkrytych w polach dyskowych OGLE-III oraz innych zmiennych zaobserwowanych w polach projektu OGLE.

Praca **P3** oparta o głębokie dane z OGLE-III stanowi swego rodzaju test, jakiego typu i z grubsza jak wiele gwiazd pulsujących (przede wszystkim cefeid klasycznych) można się spodziewać w całym dostępnym z Obserwatorium Las Campanas pasie Drogi Mlecznej, którego monitoring jest prowadzony w ramach płytkiego przeglądu OGLE-IV. Poszukiwania cefeid klasycznych w danych OGLE-III, obejmujących obszar zaledwie 7,12 stopnia kwadratowego dysku galaktycznego, pozwoliły na detekcję 20 obiektów. Wszystkie są jaśniejsze niż 16,5 mag w paśmie *I*. Ponadto w obserwowanych polach znanych było wcześniej 9 innych cefeid klasycznych, ale są one zbyt jasne, aby ich jasności mogły zostać zmierzone w danych z kampanii OGLE-III. Gdyby te małe liczby przeskalować do całego obserwowanego dysku, to możemy się spodziewać istnienia około 3000 cefeid klasycznych. W rzeczywistości nie wiemy, ile zmiennych jest ukrytych za obłokami pyłu, których jest coraz więcej na długościach galaktycznych coraz bliższych Centrum Galaktyki.

Wydawać by się mogło, że w próbce 214 różnorakich gwiazd zmiennych pulsujących znalezionych na obszarze zaledwie 7,12 stopnia kwadratowego dysku galaktycznego nie uda się zauważyć żadnych istotnych informacji związanych ze strukturą całej Drogi Mlecznej. Okazało się jednak, że rozkład metaliczności wyznaczonej na podstawie krzywych zmian blasku dla 36 gwiazd RRab ma dwa wyraźne maksima na około $-1,3$ dex i $-0,4$ dex, a wartość rozgraniczająca wynosi około $-0,7$ dex w skali Jurcsik (1995). W skali metaliczności Zinna i Westa (1984) daje to wartość około $-0,95$ dex, czyli bardzo zbliżoną do wartości, która – jak się uważa (np. Ivezić i in. 2008) – rozdziela gwiazdy populacji grubego dysku od populacji halo galaktycznego, wynoszącej -1.0 dex. Oczywiście większa próbka zmiennych RR Lyrae z rejonów dysku pomogła by uzyskać dokładniejsze rozkłady metaliczności tych gwiazd i lepiej określić własności tych dwóch składników budujących naszą Galaktykę. Praca **P3** do dnia 16 lutego 2016 roku została zacytowana 10 razy (według ADS).

Poszukiwanie obiektów zmiennych w polach dyskowych OGLE-III doprowadziły do odkrycia i sklasyfikowania licznych gwiazd. Jednak z samej fotometrii *VI* nie można było określić, czym dokładnie są niektóre obiekty. Z powodu nieznanego odległości oraz nieznanego ekstynkcji międzygwiazdowej nie można było na przykład rozróżnić pomiędzy wspomnianymi gwiazdami typu beta Cephei i delta Scuti. W tym przypadku prawdopodobnie pomogłyby obserwacje w filtrach *UBV* i zlokalizowanie interesujących gwiazd na diagramie dwubarwym (*U-B* w funkcji *B-V*). Miałem także wątpliwości co do obiektów oznaczonych OGLE-GD-DSCT-0058 i OGLE-GD-CEP-0013 oraz innych zmiennych o niestandardowych krzywych blasku. Uznałem, że specjalnie dedykowane obserwacje spektroskopowe niskiej rozdzielczości przyniosą jednoznaczne wyniki. W październiku 2013 roku wraz ze współpracownikami z Chile przygotowałem wniosek obserwacyjny na 2,5-metrowy teleskop

du Pont, stojący nieopodal teleskopu OGLE w Obserwatorium Las Campanas. W grudniu 2013 roku przyszła dobra wiadomość o przyznaniu dwóch nocy z końcem kwietnia 2014 roku. Dopisała pogoda i zebrałem widma ponad 30 gwiazd. Parę tygodni później dokonałem redukcji danych oraz klasyfikacji widmowej obserwowanych obiektów. Wyniki analizy zostały zaprezentowane w pracy **P4**. Przykładowe widma są pokazane na Rysunku 5. Jak się okazało, wszystkie 12 (spośród 60 opublikowanych w pracy **P3**) niejednoznacznych krótkookresowych obiektów wielomodalnych posiada w swoich widmach głębokie linie wodorowe, charakterystyczne dla typu widmowego A. Zatem są to zmienne typu delta Scuti. Zmienną tego samego typu okazała się jeszcze inna gwiazda o dość dziwnie pofalowanej krzywej blasku – OGLE-MUS101.3.34906. Praktycznie prysła nadzieja na znalezienie w polach OGLE-III gwiazdy typu beta Cephei, skoro wszystkie wytypowane gwiazdy, dla których wykonałem widma, okazały się być typu delta Scuti. Z drugiej strony moje badania pokazują, jak wiele zmiennych typu delta Scuti musi występować w dysku galaktycznym, ale nie zostały one jeszcze odkryte.



Rysunek 5. Widma spektroskopowe wybranych obiektów z dysku galaktycznego. Dwa najniższe to widma gwiazd znanych typów, które posłużyły do porównania.

Potwierdziłem, że gwiazda OGLE-GD-CEP-0013 – pomimo dość nietypowej krzywej blasku – jest cefeidą klasyczną. Widmo tego obiektu ma typ zbliżony do G0 i jest bogate w linie żelaza. Natomiast widmo obiektu OGLE-GD-DSCT-0058 od razu okazało się podejrzane. Kontinuum stromo rosnące ku części niebieskiej oraz obecność obok linii Balmera także linii neutralnego helu wyraźnie wskazywały na wysoką temperaturę efektywną obiektu. Otrzymane w wyniku dopasowania do widma modelowej atmosfery dla podkarłów wartość temperatury $T_{\text{eff}} \approx 33000$ K (odpowiadająca typowi widmowemu O9) oraz wartość przyspieszenia grawitacyjnego $\log g \approx 5,3$ (w jednostkach cm/s^2) jednoznacznie pokazały, że to nie może być gwiazda delta Scuti. Uzyskany przeze mnie czas obserwacyjny w roku 2016 na 1,0-metrowym teleskopie Swope w celu zebrania fotometrii *UBVI* tego obiektu oraz na 8,2-metrowym teleskopie Gemini South w celu wykonania widm kilku podobnym obiektom powinny pomóc odpowiedzieć, czym w rzeczywistości jest gwiazda dotychczas oznaczona

jako OGLE-GD-DSCT-0058.

W najbliższych latach będę kontynuował badania struktury i ewolucji naszej Galaktyki. Poszukiwanie nowych cefeid klasycznych jest jednym z zasadniczych celów przeglądu zmienności gwiazdowej w pasie Drogi Mlecznej widocznym z Obserwatorium Las Campanas, realizowanego w ramach projektu OGLE-IV. Jest to bardzo czasochłonne przedsięwzięcie, bowiem przegląd obejmuje obszar około 1400 stopni kwadratowych wzdłuż równika galaktycznego.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych.

Urodziłem się 23 listopada 1978 roku w Gorzowie Wielkopolskim. Astronomią interesowałem się od najmłodszych lat. W wieku szkolnym pasję tę rozwijałem we własnym zakresie, bowiem w 120 tys. Gorzowie nie znałem żadnych osób zainteresowanych niebem, a najbliższy oddział towarzystwa miłośników astronomii wciąż jest odległy o około 100 km. W okresie liceum brałem udział w seminariach na referat z zakresu astronomii i astronautyki, dwukrotnie występując w ogólnopolskich zawodach w Grudziądzu. Byłem uczestnikiem Olimpiady Astronomicznej, w 1996 roku uzyskując tytuł finalisty, a rok później – laureata. Bez wahania podjąłem decyzję o studiach astronomicznych. Odbylem je na Uniwersytecie Warszawskim w latach 1997–2002.

W zasadzie w całej mojej dotychczasowej karierze naukowej zajmowałem się obserwacjami fotometrycznymi, także spektroskopowymi, poszukiwaniem i analizą gwiazd zmiennych różnych typów (gwiazd pulsujących, układów zaćmieniowych, układów kataklizmicznych), badaniem gromad gwiazdowych (zarówno otwartych jak i kulistych) i w ostatnich latach – badaniem struktury naszej Galaktyki na podstawie danych projektu OGLE, w którym intensywnie uczestniczę. Pierwsze moje artykuły naukowe napisałem będąc jeszcze na studiach magisterskich. Cykl trzech prac jednoautorskich (Pietrukowicz 2001, 2002, 2003) dotyczył wiekowych zmian okresów pulsacji u cefeid klasycznych z Obłoków Magellana i naszej Galaktyki. W przygotowaniu publikacji, a w szczególności pierwszej z nich, bardzo pomógł mi profesor Bohdan Paczyński, u którego w Princeton odbyłem miesięczny staż letni w 2001 roku. Moje badania pokazały, że modele ewolucyjne w przypadku długookresowych cefeid (tj. powyżej 10 dni) przewidują dużo wyższe tempa zmian okresów niż to się obserwuje. Według bazy danych ADS moje trzy pierwsze prace do dnia 16 lutego 2016 roku zostały zacytowane w sumie 33 razy. W ramach mojej pracy magisterskiej poszukiwałem gwiazd zmiennych na archiwalnych obrazach centrum gromady kulistej M22 z teleskopu kosmicznego Hubble'a, znajdując jedenaście nowych obiektów, w tym jeden o do dziś nieodgadnionej naturze (Pietrukowicz i Kaluzny 2003). Tematem mojej pracy doktorskiej, napisanej w Centrum Astronomicznym im. Mikołaja Kopernika Polskiej Akademii Nauk pod kierunkiem profesora Janusza Kałużnego i obronionej w marcu 2007 roku, było poszukiwanie układów kataklizmicznych wybuchających jako nowe karłowate w wybranych gromadach kulistych projektu CASE (ang. *Cluster AgeS Experiment*) – wieloletniego przeglądu fotometrycznego prowadzonego przez profesora. Jak się okazuje, tego typu obiekty występują bardzo rzadko. Dzięki zastosowaniu wówczas nowatorskiej metody odejmowania obrazów, znakomicie sprawdzającej się w gęstych polach gwiazdowych, w wyniku poszukiwań odkryłem dwie nowe karłowate (jedną w gromadzie M22 i jedną w M55), zwiększając liczbę znanych wówczas tego typu obiektów w gromadach kulistych z dziewięciu do jedenastu (Pietrukowicz i in. 2008). Uzyskane przeze mnie rezultaty wskazują, że najprawdopodobniej cechy fizyczne układów kataklizmicznych w gromadach kulistych są inne niż układów znajdujących się w rzadkim polu galaktycznym. Jedna z hipotez powiada, że być może z powodu ogólnie dużo wyższej gęstości gwiazd w gromadach i częstych zbliżeń pomiędzy gwiazdami-członkiniami białe karły współtworzące układy kataklizmiczne wirują szybciej i są obdarzone wyższym polem magnetycznym, które przycina lub nawet uniemożliwia tworzenie się dysków akrecyjnych. Według innej hipotezy tempa akrecji materii z towarzysza na białego karła w układach kataklizmicznych z gromad są dużo niższe, przez co wybuchy nowych

karłowatych zachodzą dużo rzadziej. Przy okazji wyszukiwania jaśniejących obiektów w gromadach CASE, przypadkowo namierzyłem przelatującą, odkrytą zaledwie kilka lat wcześniej, planetoidę (35690) 1999 CT₂₁, dla której teraz było możliwe uściślenie orbity i wyznaczenie okresu rotacji (Pietrukowicz i in. 2006). Jednak największą niespodzianką analizy danych dla gromad kulistych było odkrycie zjawiska mikrosoczewkowania w polu gromady M22, które miało miejsce w 2000 roku (Pietrukowicz i in. 2005). Obserwacje przy zastosowaniu optyki adaptatywnej, które wykonałem jedenaście lat później na teleskopie VLT (ang. *Very Large Telescope*) Europejskiego Obserwatorium Południowego (ang. *European Southern Observatory*, ESO), pokazały jednoznacznie, że obiekty biorące udział w tym zjawisku przemieściły się na niebie w kierunku i tempie zgodnym ze względnym ruchem gromady na tle gwiazd trzy razy bardziej odległego zgrubienia centralnego naszej Galaktyki (Pietrukowicz i in. 2012). Oznaczało to, że soczewką była małowasywna gwiazda gromady, a źródłem – gwiazda zgrubienia centralnego. To jest wciąż jedyny potwierdzony przypadek zjawiska mikrosoczewkowania grawitacyjnego przez obiekt z gromady kulistej.

Pragnę wspomnieć, że w okresie studiów doktoranckich podejmowałem jeszcze pewne trudne zadanie o charakterze obserwacyjnym, którego – przede wszystkim z powodu trudności technicznych – nadal nie udało się nikomu zrealizować. Chodzi o poszukiwanie kwazarów za zgrubieniem centralnym Galaktyki, które przydałyby się jako punkty odniesienia do zbadania dynamiki zgrubienia. Z powodu dużych ilości pyłu międzygwiazdowego zalegającego w dysku Drogi Mlecznej światło od odległych gwiazd oraz źródeł pozagalaktycznych, takich jak kwazary, jest silnie osłabione i poczerwienione. Jest to bardzo trudne zadanie nawet w kierunku okna Baadego – rejonu w stronę Centrum Galaktyki, w którym ekstynkcja międzygwiazdowa jest względnie niska. Kwazarów próbowałem szukać podczas letniego pobytu w siedzibie głównej ESO w Garching koło Monachium w 2005 roku w danych spektroskopowych uzyskanych przez doktora Adama Dobrzyckiego na teleskopie VLT dla ponad półtora tysiąca obiektów wytypowanych z obserwacji przeglądu OGLE-II. Rok później weryfikowałem kandydatów na kwazary bezpośrednio po uzyskaniu widm na 3,6-metrowym teleskopie w obserwatorium ESO na górze La Silla w Chile. Były to moje pierwsze obserwacje wykonywane osobiście na dużym, światowej klasy teleskopie optycznym. Szkoda, że nie dopisała za bardzo pogoda, a wynik poszukiwań okazał się kolejny raz całkowicie negatywny.

W latach 2007–2009 odbyłem staż podoktorski na wydziale astronomii i astrofizyki Pontificia Universidad Católica w Santiago de Chile. Wówczas pomagałem przy starcie publicznego przeglądu ESO o nazwie *VISTA Variables in the Via Lactea* (VVV, Minniti, ..., Pietrukowicz i in. 2010), który w latach 2010–2015 był realizowany na 4-metrowym teleskopie VISTA nieopodal VLT na górze Paranal w Chile. Jest to przegląd zmienności w bliskiej podczerwieni praktycznie całego widocznego zgrubienia centralnego oraz fragmentu dysku naszej Galaktyki. Moimi współpracownikami byli znani profesorowie Dante Minniti (kierownik projektu VVV) oraz Marcio Catelan. W oczekiwaniu na start przeglądu VVV analizowałem dane archiwalne ESO (np. poszukiwałem tranzytów planetarnych w pracy Pietrukowicz i in. 2010), a także wielokrotnie występowałem o czas obserwacyjny i wykonywałem obserwacje obiektów pola galaktycznego oraz gromad kulistych. Wówczas zebrałem ogromne doświadczenie obserwacyjne na różnych, często bardzo wyrafinowanych instrumentach podłączonych do najwyższej światowej klasy teleskopów. Część obserwacji, głównie na teleskopach ESO, została wykonana w modzie serwisowym (przez personel przy teleskopie), co wiązało się z wcześniejszym bezbłędnym przygotowaniem tzw. bloków obserwacyjnych.

Gdybym miał dokonać podsumowania moich doświadczeń obserwacyjnych zebranych do końca 2015 roku, uwzględniając obserwacje w ramach projektu OGLE, to wyglądałoby to następująco. W sumie spędziłem 306 nocy na teleskopach klasy 1–2 m (w tym 230 na 1,3-metrowym teleskopie OGLE), 5 nocy na teleskopach o średnicy lustra rzędu 4 m oraz 4 noce na 6,5-metrowych teleskopach Magellana – wszystkie na chilijskiej Atakamie. W modzie serwisowym zostało zrealizowane 38 godzin przygotowanych przeze mnie obserwacji, z czego prawie połowa na 8,2-metrowych teleskopach VLT. Wykonałem lub przygotowałem obserwacje na 13 różnych teleskopach, wykorzystując w sumie 16

różnorodnych instrumentów – spektrografy jedno- i wieloobiektywowe oraz kamery obrazujące w zakresie widzialnym i podczerwonym, w tym z użyciem wspomnianej wyżej optyki adaptatywnej.

W trakcie pobytu na stażu podoktorskim w Chile poznałem wielu astronomów – nie tylko pracujących w lokalnych instytucjach astronomicznych, ale przede wszystkim osoby z różnych stron świata, które przyleciały w celu realizacji swoich programów obserwacyjnych. Przez rok prowadziłem seminarium wydziałowe zapraszając prelegentów. Również moje obecne wyjazdy na obserwacje do Obserwatorium Las Campanas w ramach projektu OGLE bardzo sprzyjają utrzymywaniu starych i nawiązywaniu nowych kontaktów, zwłaszcza z astronomami z USA i Chile.

Niewątpliwie najlepszymi okazjami do promowania osiągnięć własnych oraz grupy badawczej są wystąpienia na zagranicznych konferencjach naukowych. Do końca 2015 roku uczestniczyłem w czternastu konferencjach międzynarodowych, przy czym na dziewięciu z nich prezentowałem swoje wyniki w formie wystąpień ustnych, na czterech – w postaci plakatów. Dwukrotnie uczestniczyłem w zjazdach Międzynarodowej Unii Astronomicznej. Na ostatnim, XXIX Zjeździe Unii w Honolulu wygłosiłem referat i wywiesiłem plakat – na zupełnie niezależne tematy. Z końcem 2015 roku – po raz pierwszy w karierze – otrzymałem zaproszenie do wygłoszenia wykładu na międzynarodowej konferencji organizowanej w maju 2016 roku w Pekinie i poświęconej wyznaczaniu odległości na różnych skalach astronomicznych. W ostatnich latach wielokrotnie byłem prelegentem na seminariach w różnych polskich instytucjach astronomicznych, a także na jednym ze zjazdów Polskiego Towarzystwa Astronomicznego.

W październiku 2010 roku zostałem zatrudniony na stanowisku adiunkta naukowego w Obserwatorium Astronomicznym Uniwersytetu Warszawskiego jako wykonawca grantu European Research Council (ERC Advanced Grant) przyznanego prof. dr. hab. Andrzejowi Udalskiemu na lata 2010–2014. Od 2015 roku jestem finansowany z grantu MAESTRO, który profesor Udalski otrzymał z Narodowego Centrum Nauki (NCN) na lata 2015–2019. Celem obu grantów jest kontynuacja wieloletniego projektu OGLE prowadzonego przez profesora. Jestem aktywnym członkiem zespołu. Regularnie wykonuję obserwacje fotometryczne, dokonuję redukcji i analizy danych pod kątem zagadnień mnie interesujących, ale także aktywnie uczestniczę w dyskusjach na tematy podejmowane przez innych członków zespołu. Dane OGLE to ogromny materiał obserwacyjny do studiów nad różnymi zagadnieniami z zakresu astrofizyki gwiazdowej oraz pozagalaktycznej, a także w badaniach małych ciał Układu Słonecznego. Tematyka prac zespołu OGLE, których jestem współautorem, obejmuje między innymi: poszukiwanie i badanie własności gwiazd zmiennych, poszukiwanie zjawisk mikrosoczewkowania grawitacyjnego, poszukiwanie planet w tego typu zjawiskach, poszukiwanie gwiazd supernowych poza Obłokami Magellana oraz innych zjawisk tymczasowych (np. nowych klasycznych czy nowych karłowatych), pomiary jasności wybranych źródeł pozagalaktycznych (badania zmienności aktywnych jąder galaktyk), badanie struktury i populacji gwiazdowych w obszarze Obłoków Magellana, pomiary astrometryczne, poszukiwanie i uściślanie parametrów orbit planetoid pasa Kuipera. Poza wykonywaniem obserwacji i analizą danych w ramach przeglądu OGLE z własnej inicjatywy od czasu do czasu realizuję obserwacyjne projekty uzupełniające. Jestem autorem 109 prac naukowych opublikowanych w recenzowanych anglojęzycznych czasopismach o zasięgu międzynarodowym. W przypadku 21 z nich jestem pierwszym autorem. Według bazy SAO/NASA Astrophysics Data System (ADS) do dnia 16 lutego 2016 roku moje prace zostały zacytowane w sumie 1423 razy, a indeks Hirscha wynosi 19.

Paweł Pietrukowicz

LITERATURA

- Alcock C., Allsman R. A., Alves D. i in., 1998, ApJ, 492, 190
Baade, W., 1946, PASP, 58, 249
Bono G., Marconi M., Cassisi S. i in., 2005, ApJ, 621, 966

Catelan M., Pritzl B. J., Smith H. A., 2004, *ApJS*, 154, 633
 Chatzopoulos S., Fritz T. K., Gerhard O. i in., 2015, *MNRAS*, 447, 948
 Chiba M., Beers T. C., 2000, *AJ*, 119, 2843
 Collinge, M. J., Sumi T., Fabrycky D., 2006, *ApJ*, 651, 197
 Dékány I., Minniti D., Catelan M. i in., 2013, *ApJL*, 776, L19
 Dékány I., Minniti D., Majaess D. i in., 2015, *ApJ*, 812, L29
 Eggen O. J., Lynden-Bell D., Sandage A. R., 1962, *ApJ*, 136, 748
 Genzel R., Eisenhauer F., Gillessen S., 2010, *Reviews of Modern Physics*, 82, 3121
 Gillessen S., Eisenhauer, F., Fritz T. K., 2009, *ApJL*, 707, L114
 Gonzalez O. A., Rejkuba M., Zoccali M. i in., 2011, *A&A*, 534, A3
 van de Hulst H. C., Muller, C. A., Oort J. H., 1954, *Bull. of the Astr. Inst. of the Netherlands*, 12, 117
 Ibata R. A., Gilmore G., Irwin M. J., 1994, *Nature*, 370, 194
 Ivezić Ž., Sesar B., Jurić M. i in., 2008, *ApJ*, 684, 287
 Jurcsik J., Kovács G., 1996, *A&A*, 312, 111
 Jurić M., Ivezić Ž., Brooks A. i in., 2008, *ApJ*, 673, 864
 King I., 1962, *AJ*, 67, 471
 Kiraga M., Paczynski B., 1994, *ApJL*, 430, L101
 Kovács G., Zsoldos E., 1995, *A&A*, 293, L57
 Leavitt H. S., 1908, *Annals of Harvard College Observatory*, 60, 87
 Lee Y.-W., Joo J.-M., Sohn Y.-J. i in., 1999, *Nature*, 402, 55
 López-Corredoira M., Cabrera-Lavers A., Gerhard O. E., 2005, *A&A*, 439, 107
 Marconi M., 2015, *Memorie della Societa Astronomica Italiana*, 86, 190
 Matsunaga N., Kawadu T., Nishiyama S. i in., 2011, *Nature*, 477, 188
 McWilliam A., Zoccali M., 2010, *ApJ*, 724, 1491
 Mel'nik A. M., Rautiainen P., Berdnikov L. N. i in. 2015, *Astronomische Nachrichten*, 336, 70
 Minniti D., Alcock C., Alves D. i in., 1998, *Proceedings of the IAU Symposium* 184, 123
 Minniti D., Zoccali M., 2008, *Proceedings of the IAU Symposium* 245, 323
 Minniti D., Lucas P. W., Emerson J. P., ..., Pietrukowicz P. i in., 2010, *New Astronomy*, 15, 433
 Mizerski T., 2003, *Acta Astronomica*, 53, 307
 Mróz P., Pietrukowicz P., Poleski R. i in., 2013, *Acta Astronomica*, 63, 135
 Nataf D. M., Udalski A., Gould A. i in., 2010, *ApJL*, 721, L28
 Nataf D. M., Gould A., Fouqué P. i in., 2013, *ApJ*, 769, 88
 Pietrukowicz P., 2001, *Acta Astronomica*, 51, 247
 Pietrukowicz P., 2002, *Acta Astronomica*, 52, 177
 Pietrukowicz P., 2003, *Acta Astronomica*, 53, 63
 Pietrukowicz P., Kaluzny J., 2003, *Acta Astronomica*, 53, 371
 Pietrukowicz P., Kaluzny J., Thompson I. B. i in., 2005, *Acta Astronomica*, 55, 261
 Pietrukowicz P., Michałowski T., Pych W. i in., 2006, *The Minor Planet Bulletin*, 33, 80
 Pietrukowicz P., Kaluzny J., Schwarzenberg-Czerny A. i in., 2008, *MNRAS*, 388, 1111
 Pietrukowicz P., Minniti D., Díaz R. F. i in., 2010, *A&A*, 509, A4
 Pietrukowicz P., Minniti D., Jetzer Ph. i in., 2012, *ApJL*, 744, L18
 Pietrukowicz P., Mróz P., Soszyński I. i in., 2013, 63, 115
 Pojmański G., 2002, *Acta Astronomica*, 52, 397
 Rattenbury N. J., Mao S., Sumi T., Smith M., 2007, *MNRAS*, 378, 1064
 Reid M. J., Menten K. M., Brunthaler A. i in., 2014, *ApJ*, 783, 130
 Sahu K. C., Casertano S., Bond H. E. i in., 2006, *Nature*, 443, 534
 Samus N. N. i in., 2013, *General Catalogue of Variable Stars*, Version: Apr 2013
 Schlegel D. J., Finkbeiner D. P., Davis M., 1998, *ApJ*, 500, 525
 Searle L., Zinn R., 1978, *ApJ*, 225, 357

Smolec R., 2005, *Acta Astronomica*, 55, 59
Soszyński I., Dziembowski W. A., Udalski A., ..., Pietrukowicz P., 2011, *Acta Astronomica*, 61, 1
Soszyński I., Udalski A., Szymański M. K., Pietrukowicz P. i in., 2014, *Acta Astronomica*, 64, 177
Stanek K. Z., Mateo M., Udalski A. i in., 1994, *ApJL*, 429, L73
Udalski A., Szymański M., Kaluzny J. i in., 1992, *Acta Astronomica*, 42, 253
Udalski A., Olech A., Szymański M. i in., 1997, *Acta Astronomica*, 47, 1
Udalski A., Paczyński B., Żebruń K. i in., 2002, *Acta Astronomica*, 52, 1
Udalski A., 2003, *ApJ*, 590, 284
Udalski A., Szymański M. K., Szymański G., 2015, *Acta Astronomica*, 65, 1
Wollman E. R., Geballe T. R., Lacy J. H. i in., 1977, *ApJL*, 218, L103
Zinn R., West M. J., 1984, *ApJS*, 55, 45