

## AUTOREFERAT

### 1. O habilitancie

Edukację rozpocząłem w 1984 roku w Szkole Podstawowej nr 1 w Choszczynie, gdzie w ostatnich latach (7 i 8 klasa) brałem udział w regionalnych etapach szkolnych olimpiad matematycznych i fizycznych, na których zdobywałem wyróżnione miejsca. W roku 1992 rozpocząłem edukację w Liceum Ogólnokształcącym im. Bolesława Krzywoustego w Choszczynie w klasie o profilu matematyczno-fizycznym. Brałem udział w centralnych etapach olimpiad geograficznej i astronomicznej oraz w Ogólnopolskim Seminarium Astronomiczno-Astronautycznym w Grudziądzu, gdzie w roku 1994 zdobyłem pierwszą nagrodę za zaprezentowanie interferometru radiowego do obserwacji Słońca. W latach 1992-1996 byłem członkiem ogólnopolskiego klubu astronomicznego "Almukantarat". W klasie III i IV byłem stypendystą Krajowego Funduszu na rzecz Dzieci oraz otrzymałem nagrodę Ministra Edukacji Narodowej. W roku 1995 zdobyłem wyróżnienie na Międzynarodowym Forum dot. Zastosowań Satelitów organizowanym przez Europejską Agencję Kosmiczną w Nordwijk w Holandii. W roku 1996 jako jedyny reprezentant Polski brałem udział w Międzynarodowym Forum Młodych Naukowców w Londynie.

Liceum ukończyłem egzaminem maturalnym w 1996 roku, po którym rozpocząłem studia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego na kierunku astronomia. Już na III roku studiów zaangażowałem się w pracę naukową pod kierunkiem Grzegorza Pietrzyńskiego i prowadziłem samodzielne obserwacje fotometryczne gromad otwartych za pomocą teleskopu w Stacji Obserwacyjnej UW w Ostrowiku. Praca ta zaowocowała moimi pierwszymi publikacjami (Pietrzyński i in. 2001, Wyrzykowski i in. 2002). Na IV roku studiów zostałem zaproszony do włączenia się w projekt *Optical Gravitational Lensing Experiment* (OGLE), działający przy Obserwatorium Astronomicznym UW. W ramach tego projektu zacząłem przeprowadzać samodzielne obserwacje dedykowanym teleskopem projektu OGLE w obserwatorium Las Campanas w Chile. Tytuł magistra uzyskałem pod opieką prof. Andrzeja Udalskiego w 2001 roku za pracę pt. "Odległości do galaktyk w Grupie Lokalnej", w której przeanalizowałem obserwacje galaktyki IC1613, znajdując w niej liczne cefeidy oraz wykazując, że zależność okres-jasność dla cefeid nie zależy od metaliczności (Udalski, Wyrzykowski i in. 2001).

W roku 2001 rozpocząłem studia doktoranckie w Obserwatorium Astronomicznym UW. W ciągu pierwszych dwóch lat studiów zajmowałem się przede wszystkim gwiazdami zmiennymi. Opublikowałem największe w tamtym czasie katalogi gwiazd zaćmieniowych z Dużego i Małego Obłoku Magellana z danych OGLE-II (Wyrzykowski i in. 2003a, Wyrzykowski i in. 2004), w których zastosowałem nowatorską metodę klasyfikacji gwiazd zmiennych za pomocą sieci neuronowych. Na badania te otrzymałem grant z Komitetu Badań Naukowych. Oprócz tego, również na podstawie danych OGLE, opublikowałem wyznaczenie opóźnienia czasowego w kwazarze HE1104-1805 soczewkowanym grawitacyjnie (Wyrzykowski i in. 2003b). W tym też czasie regularnie wyjeżdżałem na



obserwacje do obserwatorium w Las Campanas w Chile w ramach projektu OGLE (średnio dwa razy w roku po 2-3 tygodnie). Jako członek zespołu OGLE brałem czynny udział we wszystkich badaniach prowadzonych przez tę grupę i występowałem jako współautor licznych publikacji.

W latach 2003/2004 spędziłem 9 miesięcy na stażu przed-doktorskim na Uniwersytecie w Tel-Awivie w Izraelu. Współpracowałem tam z naukowcami zajmującymi się mikrosoczewkowaniem grawitacyjnym oraz gwiazdami zaćmieniowymi. W roku 2004 otrzymałem europejskie stypendium Marie Curie na staż przed-doktorski na Uniwersytecie w Manchesterze w Wielkiej Brytanii, gdzie pracowałem m.in. z prof. Shude Mao nad zagadnieniem mikrosoczewkowania grawitacyjnego w kierunku centrum Galaktyki. W lutym 2005 roku spędziłem miesiąc na Uniwersytecie w Princeton w USA, gdzie współpracowałem z prof. Bohdanem Paczyńskim, twórcą dziedziny mikrosoczewkowania grawitacyjnego.

W listopadzie 2005 roku w Obserwatorium Astronomicznym UW otrzymałem stopień doktora z wyróżnieniem za pracę doktorską pt. "Mikrosoczewkowanie w kierunku centrum Galaktyki". W pracy tej analizowałem pierwsze 5 lat danych obserwacyjnych projektu OGLE-III w kierunku centrum Galaktyki. Opracowałem metodę wyszukiwania zjawisk mikrosoczewkowania, za pomocą której wykryłem kilka tysięcy zjawisk. Wśród nich odkryłem i przeanalizowałem nieznanne do tej pory zjawiska ze zmiennością w krzywej bazowej, za pomocą której można otrzymać dodatkowe informacje o zjawisku (Wyrzykowski i in. 2006). Na podstawie zjawisk standardowych opracowałem jako pierwszy mapę głębokości optycznej na mikrosoczewkowanie w kierunku centrum Galaktyki, dzięki której można badać wewnętrzną strukturę Galaktyki.

W 2005 roku otrzymałem stypendium na staż po-doktorski na Uniwersytecie w Cambridge w Wielkiej Brytanii w ramach europejskiej sieci *ANGLES* finansowanej w ramach projektu Marie Curie Komisji Europejskiej. W ramach tego stażu prowadziłem badania z dziedziny mikrosoczewkowania oraz silnego soczewkowania grawitacyjnego oraz uczestniczyłem w licznych konferencjach naukowych w tej dziedzinie (np. w Nagoi w Japonii, czy Santa Barbara w USA). Współpraca z naukowcami z Cambridge zaowocowała współautorstwem w publikacjach, m.in. na temat poszukiwania i modelowania nowych soczewek grawitacyjnych z dużą separacją obrazów (Belokurov i in. 2007). Brałem również udział w przygotowaniu katalogu fotometryczno-astrometrycznego z danych SDSS (Bramich i in. 2008), który zawiera 4 miliony obiektów i pozwala na dogłębne badanie różnych aspektów zmienności. Na bazie tego katalogu zidentyfikowaliśmy jedną z największych dostępnych próbek około 1000 białych karłów z halo naszej Galaktyki (Vidrih i in. 2007). Współuczestniczyłem również w jednym z pierwszych odkryć struktur w halo Galaktyki na podstawie analizy zgrupowań gwiazd typu RR Lyrae (Watkins i in. 2009).

W styczniu 2008 w Cambridge zostałem członkiem projektu przygotowującego satelitę kosmicznego Gaia (start planowany na czerwiec 2013), najważniejszą misję astronomiczną Europejskiej Agencji Kosmicznej tej dekady. Jestem odpowiedzialny za zaprojektowanie i przygotowanie systemu wczesnego wykrywania astrofizycznych anomalii i obiektów tymczasowych, np. zjawisk mikrosoczewkowania czy supernowych. System ten będzie funkcjonował prawie w czasie rzeczywistym i będzie analizował dane z satelity w celu jak najszybszego wykrycia i klasyfikacji anomalii oraz poinformowania szerokiej rzeszy astronomów w przypadku interesujących zjawisk. Przygotowanie takiego systemu wymagało opanowania nie tylko znajomości budowy i funkcjonowania satelity Gaia i najnowszych technik analizy danych, ale także rozszerzenia wiedzy na temat wszelkich zjawisk tymczasowych, w tym supernowych, nowych, gwiazd Be, R CrB i innych



oraz przeprowadzania symulacji obserwacji tych obiektów. Do celów automatycznej klasyfikacji zjawisk zaprojektowałem system wykorzystujący nowatorskie metody klasyfikacji, oparty m.in. o sieci samoorganizujące (Wyrzykowski i Belokurov, 2008). W latach 2010 oraz 2011 zorganizowałem w Cambridge międzynarodowe konferencje na temat alertów z misji Gaia, które pozwoliły szerokiej społeczności astronomicznej zapoznać się z potencjałem misji oraz zarysowały podstawy do utworzenia dedykowanej sieci obserwatoriów śledzących alerty z satelity Gaia.

Pozostając aktywnym członkiem zespołu OGLE brałem udział w obserwacjach oraz w badaniach wykonywanych przez ten zespół. Uczestniczyłem w badaniach z zakresu dziedziny mikrosoczewkowania grawitacyjnego, które zaowocowały odkryciami planet pozasłonecznych (np. Bond i in. 2004, Udalski i in. 2005, Beaulieu i in. 2006, Gaudi i in. 2008), brałem udział w odkryciach planet za pomocą tranzytów (np. Udalski i in. 2002), oraz uczestniczyłem w licznych pracach nad katalogami gwiazd zmiennych, np. Soszyński i in. 2008, 2009, 2010, Poleski i in. 2010.

W ostatnich 3 latach moją pracę badawczą skoncentrowałem na zagadnieniu badania ciemnej materii za pomocą mikrosoczewkowania grawitacyjnego, na podstawie czego powstał materiał habilitacyjny, opisany szczegółowo w następnym rozdziale autoreferatu.


Podsumowując, w ciągu mojej kariery naukowej byłem autorem lub współautorem 112 prac opublikowanych w recenzowanych czasopismach astronomicznych o zasięgu światowym (lista filadelfijska) cytowanych łącznie 2909 razy (2513 bez autocytowań) oraz 15 cyrkularzy i doniesień konferencyjnych. Mój indeks Hirscha wynosi obecnie 30, a sumaryczny impact factor 593.102 (dane na 24 października 2011, wg. Web of Science).

## 2. Streszczenie rozprawy habilitacyjnej

Cykl publikacji pt. "Badania ciemnej materii w Galaktyce za pomocą mikrosoczewkowania grawitacyjnego", na który składają się:

1. "The OGLE view of microlensing towards the Magellanic Clouds - I. A trickle of events in the OGLE-II LMC data", Wyrzykowski i in., 2009, MNRAS 397, 1242
2. "The OGLE view of microlensing towards the Magellanic Clouds - II. OGLE-II Small Magellanic Cloud data", Wyrzykowski i in., 2010, MNRAS 407, 200
3. "The OGLE view of microlensing towards the Magellanic Clouds - III. Ruling out subsolar MACHOs with the OGLE-III LMC data", Wyrzykowski i in., 2011, MNRAS 413, 508
4. "The OGLE View of Microlensing towards the Magellanic Clouds. IV. OGLE-III SMC Data and Final Conclusions on MACHOs", Wyrzykowski i in., 2011, MNRAS, 416, 2961

powstał w oparciu o dane projektu OGLE z lat 1996-2009, którego jestem członkiem od 2000 roku. Głównym celem tych badań było sprawdzenie czy zjawiska mikrosoczewkowania grawitacyjnego obserwowane w kierunku Obłoków Magellana były wywołane przez hipotetyczne obiekty zwarte zbudowane z ciemnej materii, zwane MACHO.



Obecność ciemnej materii w halo galaktyk przejawia się przede wszystkim w płaskich krzywych prędkości radialnych oraz w układach silnie soczewkowanych grawitacyjnie. Jednakże do tej pory nie udało się ustalić czym ciemna materia w rzeczywistości jest. Jedną z hipotez, wysuniętą przez Bohdana Paczyńskiego (Paczyński, 1986), sugerowała, że może ona występować w dużych ilościach w formie niewidocznych obiektów gwiazdopodobnych, m.in. w postaci brązowych karłów czy czarnych dziur. Paczyński zasugerował również metodę sprawdzenia tej hipotezy za pomocą zjawiska mikrosoczewkowania, które jest czułe na masę obiektu soczewkującego, niezależnie od jego jasności.

W latach 90-tych XX wieku rozpoczęły działalność projekty obserwacyjne OGLE (Udalski i in. 1993), MACHO (Alcock i in. 1993), EROS (Aubourg i in. 1993) oraz MOA (Yock, 1998). Prowadziły one regularne, wieloletnie obserwacje gęstych obszarów nieba, co doprowadziło do wykrycia licznych zjawisk mikrosoczewkowania. Większość z tych zjawisk pochodziła z kierunku na centrum Galaktyki, a bardzo nieliczna część z kierunku na Obłoki Magellana. W roku 2000 grupa MACHO opublikowała analizę swoich danych (Alcock i in. 2000) i ogłosiła odkrycie nadwyżki zjawisk mikrosoczewkowania w kierunku Dużego Obłoku Magellana (LMC), sugerującą że około 20% masy halo Galaktyki zawarte jest w ciemnej materii w postaci obiektów MACHO o średniej masie około 0.5 masy Słońca. Wyznaczona przez grupę MACHO głębokość optyczna na mikrosoczewkowanie w kierunku LMC wyniosła  $\tau_{\text{LMC-MACHO}}=1.0 \times 10^{-7}$  (po odrzuceniu kilku kandydatów w pracy Bennet, 2005). Wynik ten został jednak zakwestionowany ze względu na duże zanieczyszczenie próbki zjawisk (Belokurov i in. 2004). Następnie, grupa EROS otrzymała skrajnie odmienny wynik (Tisserand i in. 2007), wg którego obiekty MACHO zupełnie nie muszą występować w halo (górny limit wyznaczono na 7% dla mas około 0.4 mas Słońca).

Dane zebrane przez projekt OGLE były więc idealnym niezależnym źródłem do wyjaśnienia tej kontrowersji. Obejmowały one lata 1996-2009 przez co były najdłuższym zestawem obserwacji, dodatkowo przewyższały one inne dane pod względem precyzji pomiarów. Algorytm wyszukiwania zjawisk mikrosoczewkowania polegał na zaaplikowaniu serii kryteriów do parametrów wyznaczonych dla wszystkich krzywych zmian blasku, w których wykryte zostało jakieś pojaśnienie. Na przykład, odrzuceni zostali wszyscy kandydaci, których pozycja na diagramie kolor ( $V-I$ ) - jasność ( $I$ ) znajdowała się w rejonie występowania gwiazd zwanych "Blue Bumpers", obiektów z rodziny aktywnych gwiazd Be wykazujących pojedyncze pojaśnienia podobne do tych wywołanych mikrosoczewkaniem. Jednym z ważniejszych kryteriów była też dokładność dopasowania modelu mikrosoczewki do krzywej zmian blasku, zarówno na całej krzywej jak i w centrum krzywej zjawiska. Parametry kryteriów były szczegółowo dopasowywane do badanego zestawu danych, np. maksymalna dozwolona jasność poza zjawiskiem wynosiła 20.4 mag dla LMC i 21.0 mag dla SMC, co było związane z różną głębokością przeglądu w tych galaktykach wynikającą głównie z różnej gęstości gwiazdowej.

W wyniku zaaplikowania zestawu kryteriów do danych OGLE-II w kierunku LMC znaleziono 2 kandydatów na zjawiska mikrosoczewkowania oraz 1 kandydata w kierunku na SMC. W danych LMC z fazy OGLE-III znaleziono 2 kandydatów oraz 2 dodatkowe potencjalnie zjawiska, natomiast w danych SMC znaleziono aż 3 silnych kandydatów. Część spośród wszystkich zjawisk była już znana, gdyż zostały one wykryte w czasie rzeczywistym przez system EWS (Udalski, 2003). Krzywa zmian blasku każdego z kandydatów została poddana dokładnej analizie mającej na celu określenie pochodzenia danego zjawiska. W większości przypadków najbardziej prawdopodobnym scenariuszem było soczewkowanie gwiazdy Obłoku przez inną gwiazdę Obłoku, tzw. self-lensing (ang). W przypadku zjawiska OGLE-SMC-02 dostępne były dodatkowe informacje, m.in. z satelity Spitzer, które pozwoliły całkowicie rozwiązać problem mikrosoczewki i stwierdzić,

że najprawdopodobniej zostało ono wywołane przez podwójny układ czarnych dziur o masach 3 i 7 mas Słońca, zlokalizowany w halo Galaktyki (Dong i in. 2007).

W celu wyznaczenia głębokości optycznej w kierunku LMC i SMC dla każdego zestawu danych należało najpierw wyznaczyć efektywność wykrywania zjawisk mikrosoczewkowania. W procedurze tej z wyjątkową starannością zadbano o uwzględnienie rzeczywistych rozkładów blendingu, co osiągnięto przy użyciu archiwalnych danych z Kosmicznego Teleskopu Hubble'a (HST). Dzięki połączeniu funkcji świecenia z danych OGLE i HST dla obszarów o różnej gęstości gwiazdowej możliwe było wyznaczenie rozkładów blendingu jako funkcji gęstości gwiazdowej, co z kolei zostało użyte w symulacjach zjawisk i wyznaczeniu efektywności detekcji.

Dla każdego zestawu danych wyznaczono głębokości optyczne:  $\tau_{LMC-O2}=0.43\pm 0.33\times 10^{-7}$ ,  $\tau_{LMC-O3}=0.16\pm 0.12\times 10^{-7}$ ,  $\tau_{SMC-O2}=1.55\pm 1.55\times 10^{-7}$ ,  $\tau_{SMC-O3}=1.30\pm 1.01\times 10^{-7}$ . Ze względu na bardzo małą liczbę znalezionych zjawisk obliczone głębokości optyczne obarczone są stosunkowo dużymi błędami pomiarowymi, jednakże ich wielkość jest we wszystkich wypadkach zgodna z oczekiwaniami w przypadku soczewkowania przez gwiazdy Obłoków, czyli self-lensing (Calchi-Novati i in. 2009). Na podstawie połączonych wyników z wszystkich czterech analiz otrzymano górne oszacowanie na zawartość ciemnej materii w postaci MACHO w halo Galaktyki, które wyniosło 4% dla mas mniejszych niż 0.1 mas Słońca, 6% w przedziale mas 0.1-0.4 mas Słońca oraz 20% dla mas około 20 mas Słońca. Są to najsilniejsze ograniczenia na obiekty MACHO otrzymane do tej pory.

Wyniki otrzymane na podstawie 13 lat obserwacji Obłoków Magellana w projekcie OGLE pozwalają na najdokładniejsze, jak do tej pory, zbadanie hipotezy obiektów MACHO i praktycznie wykluczają one możliwość występowania ciemnej materii barionowej w formie obiektów zwartych w znaczących ilościach w halo Galaktyki. Fakt wykrycia jednego obiektu będącego potencjalną czarną dziurą zgadza się z oczekiwanym wkładem czarnych dziur do masy Galaktyki.

## **Bibliografia:**

- Alcock C., i in. 1993, *Nature*, 365, 621
- Alcock C., i in. 2000, *Astrophysical Journal*, 542, 281
- Aubourg E., i in. 1993, *Nature*, 365, 623
- Beaulieu J.-P., i in. 2006, *Nature*, 439, 440
- Belokurov V. i in. 2004, *MNRAS*, 352, 233
- Belokurov V., i in. 2007, *Astrophysical Journal*, 671, L12
- Bennett D. P., 2005, *Astrophysical Journal*, 633, 906
- Bond I.A., i in. 2004, *Astrophysical Journal*, 606, L158
- Bramich D.M., i in. 2008, *MNRAS*, 386, 902
- Calchi Novati S., i in. 2009, *MNRAS*, 400, 1625
- Dong S., i in. 2007, *Astrophysical Journal*, 664, 862
- Gaudi B.S., i in. 2008, *Science*, 319, 927
- Paczyński B., 1986, *Astrophysical Journal*, 304, 1
- Pietrzyński G., i in. 2001, *Acta Astronomica*, 51, 74
- Poleski R., i in. 2010, *Acta Astronomica*, 60, 16
- Soszyński I., i in. 2008, *Acta Astronomica*, 58, 185
- Soszyński I., i in. 2009, *Acta Astronomica*, 59, 18
- Soszyński I., i in. 2010, *Acta Astronomica*, 60, 39
- Tisserand P., i in. 2007, *Astronomy & Astrophysics*, 469, 387
- Udalski A., i in. 1993, *Acta Astronomica*, 43, 289
- Udalski A., i in. 2001, *Acta Astronomica*, 51, 245
- Udalski A., i in. 2002, *Acta Astronomica* 52, 37
- Udalski A., 2003, *Acta Astronomica*, 53, 291
- Udalski A., i in. 2005, *Astrophysical Journal*, 628, L112

- Vidrih S., i in. 2007, MNRAS, 383, 525  
Watkins L.L., i in. 2009, MNRAS, 398, 1770  
Wyrzykowski Ł., i in. 2002, Acta Astronomica, 52, 114  
Wyrzykowski Ł., i in. 2003a, Acta Astronomica, 53, 25  
Wyrzykowski Ł., i in. 2003b, Acta Astronomica, 53, 240  
Wyrzykowski Ł., i in. 2004, Acta Astronomica, 54, 1  
Wyrzykowski Ł., i in. 2006, Acta Astronomica, 56, 169  
Wyrzykowski Ł., Belokurov V., 2008, AIPC, 1082, 206  
Yock P. C. M., 1998, Frontiers Science Series 23: Black Holes and High Energy Astrophysics, p. 375

*Zdzisław Wyrzykowski*