

wpłynęło dnia 12.06.2019

Mszyński

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Przemysława Mroza
zatytułowanej

ASTROPHYSICAL APPLICATIONS OF GRAVITATIONAL MICROLENSING IN THE MILKY WAY

Mikrosoczewkowanie grawitacyjne stanowi podstawę szeroko stosowanej metody badania ciemnych obiektów astronomicznych, które w zakresie elektromagnetycznym są trudne lub wręcz niemożliwe do wykrycia. Jest także uznaną w świecie specjalnością działającego w OAUW zespołu OGLE. Jako członek OGLE, P. Mróz miał bezpośredni kontakt z najbardziej aktualnymi problemami atakowanymi przez tę dziedzinę astronomii i możliwość współpracy z wybitnymi specjalistami z wielu ośrodków naukowych. Że z powodzeniem ją wykorzystał, świadczy lista publikacji, której mógłby pozazdrościć niejeden habilitant: 13 pierwszoautorskich prac recenzowanych, które były łącznie cytowane blisko 200 razy (dwie z nich ukazały się w *Nature*), a ponadto prawie 120 recenzowanych prac powstałych w dużych zespołach.

Wcześniej rozbudzone zainteresowania p. Mroza (trzeba tu wspomnieć, że został zwycięzcą IV Międzynarodowej Olimpiady Astronomicznej) nie ograniczają się do mikrosoczewkowania i jego zastosowań. Działając w tzw. *time-domain astronomy* został współautorem prac poświęconych aktywnym jądom galaktyk, nowym karłowatym, nowym, supernowym, gwiazdom pulsującym, gwiazdom podwójnym zaćmieniowym, gromadom gwiazdowym, galaktykom karłowatym oraz jądra, strukturze i historii Drogi Mlecznej. Ten bogaty dorobek dowodzi, że p. Mróz dysponuje wszechstronną wiedzą astronomiczną i jest doświadczonym badaczem, w pełni zdolnym do samodzielnego formułowania i rozwiązywania problemów naukowych.

Jego praca doktorska dotyczy trzech zagadnień:

- częstości występowania należących do naszej Galaktyki planet swobodnych
- poszukiwania planetarnych mikrosoczewek o masie zbliżonej do masy Ziemi
- oraz badania rozmieszczenia gwiazd i obiektów ciemnych w centralnej części Galaktyki metodą wyznaczania głębokości optycznej i częstości zjawisk mikrosoczewkowania.

Dwa pierwsze tematy plasują się na ścisłym froncie nauki. Trzeci ma znaczenie użytkowe raczej niż poznawcze, co jednak nie umniejsza jego wagi.

Napisana w języku angielskim i licząca prawie 150 stron rozprawa p. Mroza składa się z pięciu rozdziałów oraz podsumowania, dwóch dodatków i bardzo obszernej (liczącej ok. 300 pozycji) bibliografii. Całość jest poprzedzona krótkim streszczeniem przedstawiającym osiągnięte wyniki. W rozdziale pierwszym autor wprowadza czytelnika w podstawy teorii soczewkowania grawitacyjnego, ilustrując je przykładowymi rozwiązaniami równania soczewki. Znajdziemy tu również przykłady zastosowania tych rozwiązań do analizy krzywych jasności wytworzonych przez różne rodzaje soczewek, w tym soczewkę z efektem paralaktycznym, soczewkę będącą parą karłów typu M, oraz soczewki planetarne. Całość dowodzi znakomitego rozeznania autora w teorii mikrosoczewkowania grawitacyjnego i w praktycznych aspektach tego zjawiska a także w aktualnym stanie badań, w których jest ono wykorzystywane. Rozdział drugi podaje najważniejsze informacje o programie OGLE, w którego ramach zostały zebrane dane analizowane w rozdziałach 3 i 5 oraz część danych analizowanych w rozdziale 4. Rozdziały 3, 4 i 5 stanowią zamknięte całości poświęcone trzem problemom atakowanym w rozprawie. Każdy z nich rozpoczyna się od wprowadzenia w dany problem i sprecyzowania celu badań. Same badania są szczegółowo relacjonowane w kolejnych podrozdziałach, zawierających opis danych oraz metod użytych do ich analizy, dyskusję błędów, opis wyników i wnioski końcowe.

Nie mam zastrzeżeń co do redakcyjnej strony rozprawy. W całym tekście znalazłem zaledwie kilka zdań, które moim zdaniem można by było sformułować nieco (ale tylko nieco) lepiej. Ich przykłady podaję na końcu recenzji. Wysoko oceniam zwięzły, lecz jasny styl p. Mroza i gratuluję mu swobody, z jaką włada językiem angielskim. Na osobną pochwałę zasługuje szata graficzna rozprawy: wszystkie ilustracje (a jest ich ponad 60) są dopracowane, czytelne i przejrzyste.

Rozdział 3 traktuje o częstości występowania planet swobodnych. W 2011 roku w oparciu o 474

przypadki mikrosoczewkowania Sumi et al. zbadali rozkład skali czasowej t_E tego zjawiska (nawiasem mówiąc, przy sprawdzaniu poprawności identyfikacji mikrosoczewek korzystali z danych OGLE-III). W zakresie $t_E < \sim 2d$ zaobserwowali „garb” sygnalizujący obecność jowiszopodobnych planet swobodnych (lub znajdujących się na orbitach o promieniu większym od 10 j.a.), które to obiekty miały być wg autorów prawie dwukrotnie liczniejsze od gwiazd ciągu głównego. Wynik ten wzbudził kontrowersje wśród specjalistów od ewolucji układów planetarnych i konieczność jego weryfikacji stała się oczywista.

P. Mróz zweryfikował pracę Sumi et al. w oparciu o ponadpięciokrotnie większą próbkę złożoną z mikrosoczewek wykrytych w dziewięciu najczęściej obserwowanych polach OGLE IV. Mikrosoczewki te zidentyfikował wśród ok. 50 mln krzywych blasku przy użyciu jasno przedstawionych kryteriów umożliwiających wiarygodne wyeliminowanie fałszywych detekcji (nowych karłowatych, gwiazd rozbłyskowych, gwiazd typu OSARG, asteroid, efektów instrumentalnych itp.). Kompletność detekcji zmierzył na próbce 8.6 mln mikrosoczewek wygenerowanych na poziomie obrazów CCD przy użyciu funkcji jasności bulge'u otrzymanej przez połączenie danych OGLE z danymi pochodzącymi z HST. Na tej samej próbce sprawdził również, że przyjęte kryteria selekcji gwarantują brak systematycznej różnicy między zmierzonymi i rzeczywistymi skalami czasowymi mikrosoczewek.

Ani obserwowany rozkład t_E ani uwzględniający niekompletność detekcji rozkład oczekiwany nie wykazały nadwyżki zaobserwowanej przez Sumi et al. Ten ważny wynik przywraca zgodność między statystyką mikrosoczewek a bezpośrednimi obserwacjami planet jowiszopodobnych i teorią ewolucji układów planetarnych. P. Mróz wymienia kilka możliwych przyczyn pojawienia się kontrowersyjnego „garbu”, m.in. spowodowane mniej dokładną fotometrią Sumi et al. błędy identyfikacji polegające na uznaniu sygnałów od ciasnych soczewek podwójnych za sygnały od pojedynczych soczewek o krótkim t_E . Ze swej strony chciałbym zauważyć, że żadna z trzech najkrótszych soczewek Sumi et al. ($t_E < 1$), które najsilniej ważą na własnościach „garbu”, nie ma potwierdzenia w obserwacjach OGLE-III.

Rozdział 3 kończy się zaanonsowaniem nowoodkrytych soczewek o krótkiej skali czasowej, które sugerują obecność licznej populacji swobodnych planet ziemopodobnych. Choć punktu widzenia teorii istnienie takiej populacji jest znacznie bardziej prawdopodobne niż istnienie analogicznej populacji planet jowiszopodobnych, p. Mróz traktuje swoje odkrycie z należytą rezerwą, wskazując, iż konieczne są dalsze badania.

Do rozdziału 3 mam dwie uwagi.

W podpisie pod Fig.3.6 „Solid (dotted) green lines mark the expected microlensing signal assuming 5M_⊕ planets **five (ten)** times more frequent than stars” jest błąd – powinno być „**ten (five)**”. Ponadto nie jest jasne, czy zielone linie na rys. 3.6 i 3.13 dotyczą planet o masie M_⊕, czy 5M_⊕ (na rysunku „earths per star”; w podpisie „5M_⊕ planets five (ten) times more frequent than stars”

Str. 58, par. 3, wiersz 8: If we assume that 5M_⊕-mass planets are **five times** more common than main-sequence stars, the expected number of ultrashort microlensing events is 2.2. For a more realistic mass function in which Earth-mass planets (Ma et al. 2016) are **five times** more common than main-sequence stars, the expected number of detections is 25% smaller.

Jeśli się nie mylę, w pierwszym zdaniu powinno być „ten times”.

Natura mikrosoczewek o ultrakrótkiej skali czasowej jest przedmiotem badań opisanych w rozdziale 4. W bazie danych OGLE IV p. Mróz odkrył trzy takie soczewki z wyraźnym efektem skończonych rozmiarów źródła, których dokładne wymodelowanie umożliwiły mu dodatkowe dane przekazane przez zespoły MOA, KMT-Net oraz Wise. Drobiazgowa analiza materiału obserwacyjnego pozwoliła wyznaczyć dla każdej z nich promień pierścienia Einsteina i oszacować masę soczewki, a ponadto podać charakterystykę źródła oraz – przy założeniu, że soczewka jest planetą związaną – dolne ograniczenie na promień jej orbity. Wyniki uzyskane przez p. Mroza dostarczają wyraźnej przesłanki przemawiającej za istnieniem licznej populacji swobodnych planet typu ziemia – superziemia. Trzeba też podkreślić, że skuteczna współpraca z trzema zespołami specjalizującymi się w tematyce mikrosoczewkowania jest dowodem ugruntowanej pozycji p. Mroza w tym środowisku naukowym. Do rozdziału 4 mam tylko jedną uwagę: wzór przedstawiający zależność masy soczewki od promienia pierścienia Einsteina i paralaksy powtarza się trzykrotnie (równania 4.1, 4.5 i 4.8); w dodatku za

pierwszym razem z błędem (promień pierścienia Einsteina powinien być w kwadracie).

Przez ćwierć wieku utrzymywała się rozbieżność między obserwowaną głębokością optyczną na mikrosoczewkowanie w kierunku centrum Galaktyki (τ) i głębokością optyczną wyliczoną z modeli Galaktyki. Podobna rozbieżność dotyczyła obserwowanej i przewidywanej częstości mikrosoczewkowania (Γ). Problem ten zaatakował p. Mróz w rozdziale 5 rozprawy, bazując na próbce złożonej z 8002 soczewek wykrytych w 121 polach OGLE-IV o łącznym obszarze ponad 160 stopni kwadratowych (w tym z większości opisanych w rozdziale trzecim soczewek wykrytych w dziewięciu najczęściej obserwowanych polach). Identyfikacja soczewek w 112 rzadziej obserwowanych polach wymagała przeanalizowania ok. 350 mln krzywych blasku. Podobnie jak w rozdziale 3, obserwowane w tych polach liczby soczewek należało poprawić na efekt selekcji. P. Mróz dokonał tego metodą generowania katalogowych krzywych blasku z uwzględnieniem blendingu, którą przetestował porównując w kilku polach jej wyniki z wynikami zastosowanej w rozdziale 3 metody generowania soczewek na poziomie poszczególnych obrazów CCD. Poprawki na efekt selekcji wymagały także zliczenia gwiazd w poszczególnych polach OGLE-IV. P. Mróz wyliczył ją dwiema metodami dającymi zbieżne, a zatem godne zaufania wyniki. Operując olbrzymimi zbiorami danych wykazał biegłą znajomość odpowiednich technik numerycznych i umiejętność dobrej organizacji badań. Wynikiem jego pracy są mapy τ i Γ , które posłużą m.in. do weryfikacji modeli Galaktyki oraz do przygotowania orbitalnego monitoringu zjawisk mikrosoczewkowania.

Otrzymał przez p. Mroza rozkład Γ w funkcji szerokości galaktycznej (b) znacznie różni się od analogicznego rozkładu otrzymanego w pracy Sumi et al. (2016). P. Mróz przekonująco tłumaczy to sięgającą nawet 50% niekompletnością zliczeń gwiazdowych Sumi et al., której konsekwencją są zawyżone wartości $\Gamma(b)$. Należy tu podkreślić, że funkcje τ i Γ p. Mroza wyznaczone dla soczewek o $|l| < 3^\circ$ zgadzają się w granicach błędu z przewidywaniami modelu Besançon, co niewątpliwie przybliża moment uzgodnienia teorii z obserwacjami. Mapy τ i Γ są jakościowo zgodne z modelem; różnią się jednak od niego wieloma szczegółami, co, jak przypuszcza p. Mróz, może być następstwem w niedostatecznym stopniu uwzględnionej ekstynkcji.

W rozdziale 5 natknąłem się na parę miejsc niezupełnie jasnych (przynajmniej dla mnie).

Na str. 108, w fragmencie odnoszącym się do Rys. 5.11, czytamy „Our simple model underpredicts the scatter of the brightest stars ($I < 15$)” Mam wrażenie, że rozrzut jest niedoszacowany także dla $I > 19$. Jeżeli jest ono poprawne, przydałby się jakiś komentarz.

Na str. 111, w fragmencie odnoszącym się do dolnego panelu Rys. 5.13, p. Mróz pisze „The timescale distribution appears broader than that presented in Figure 3.13” Rozkłady t_E narysowane w tej samej skali mówią jednak co innego: 3.15 jest nieco *węższy* od 3.13 (załączam ilustrację). Ponadto w obszarze $t_E < \sim 20$ d pojawia się systematyczna różnica ($3.13 - 5.13 > 0$), która sugeruje, że efektywność identyfikacji takich soczewek w rzadziej obserwowanych polach może być przeszacowana.

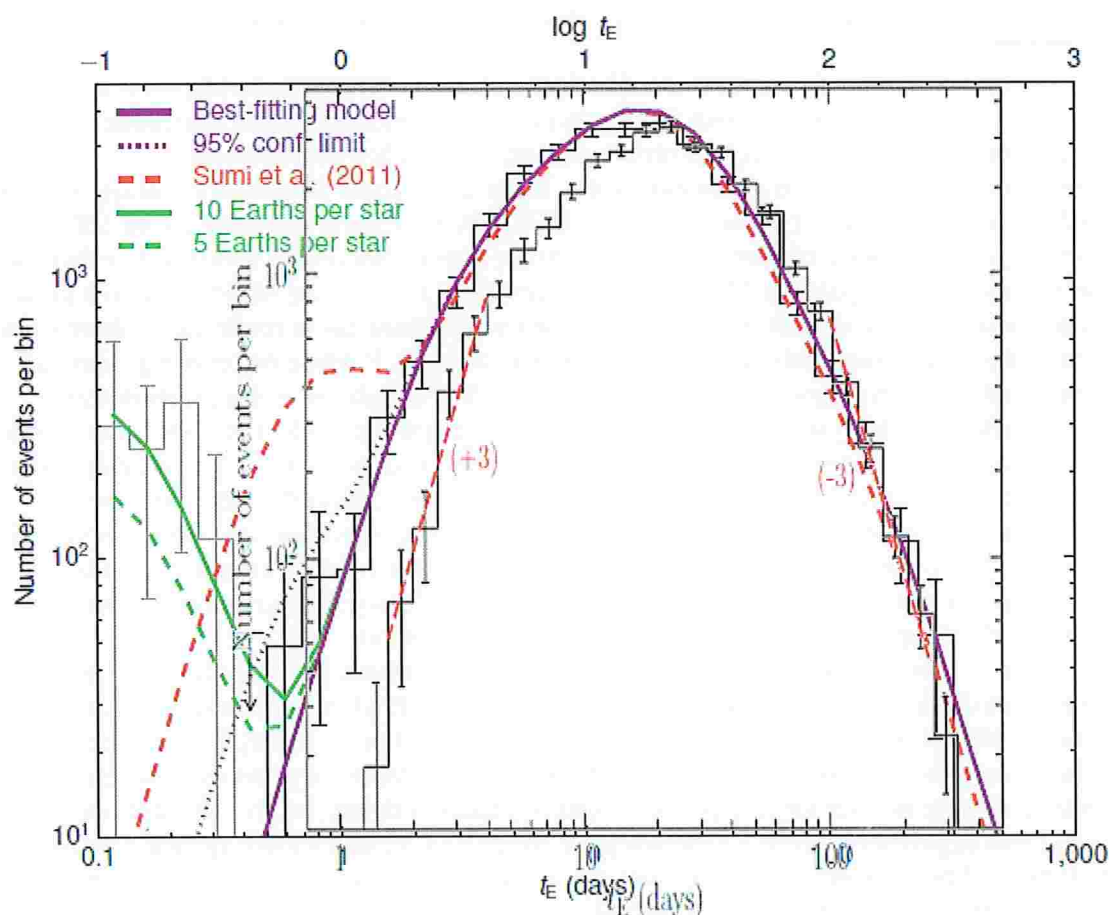
Na dolnym panelu Rys. 5.17 widać pięć odosobnionych „wysokich pików” τ ($|l| < \sim 1^\circ$, $b > \sim 3^\circ$ oraz $l = \sim -7^\circ$, $b = -4^\circ$). Czy jest to efekt silnych niejednorodności ekstynkcji? Jeśli tak, może warto byłoby o tym wspomnieć, a może nawet dałoby się wskazać obłoki odpowiedzialne za ich powstanie.

Powyższe uwagi w żadnym stopniu nie umniejszają bardzo dobrego wrażenia, jakie wywarła na mnie rozprawa p. Mroza, którą oceniam bardzo wysoko. Stwierdzam, iż spełnia ona wszystkie ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim, i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Wobec licznych zalet, które wymieniłem w tekście recenzji, a przede wszystkim ze względu na wyjątkową wartość merytoryczną wnoszę także o uznanie jej za wyróżniającą.

Warszawa, 10.06.2019

prof. dr hab. Michał Różyczka

Michał Różyczka



Uwagi redakcyjne (liczby n1,n2,n3 identyfikują stronę, akapit i wiersz)

VII,3,3 odkryłem trzy zjawiska wywołane prawdopodobnie przez planety swobodne i po raz pierwszy zmierzyłem ich rozmiar kątowy pierścienia Einsteina
 sugestia: *zmierzyłem rozmiary kątowe ich pierścieni Einsteina*

3,1,1 The angular Einstein radius of the lens depends on its mass M
 sugestia: *The angular Einstein radius depends on the mass of the lens*

33,2,8-11 Several mechanisms of free-floating planet production have been proposed (e.g., Veras & Raymond 2012), but none of them is capable of explaining the large number of Jupiter-mass free-floaters suggested by Sumi et al.

Te mechanimy zostały już wymienione i przedyskutowane na początku rozdziału 3.1. Sugestia: *In fact, none of the mechanisms of free-floating planet production mentioned above was found to be capable of explaining the large number of Jupiter-mass free-floaters suggested by Sumi et al. (e.g., Veras & Raymond 2012).*