



Warszawa 22.06.2022

Prof. dr hab. Marek Biesiada
Narodowe Centrum Badań Jądrowych
Pasteura 7
02-093 Warszawa

***Ocena rozprawy doktorskiej mgr Krzysztofa Rybickiego pt.
„Mikrosoczewkowanie astrometryczne i jego zastosowania astrofizyczne w
dobie misji kosmicznych nowej generacji”***

W swej rozprawie doktorskiej pan mgr Krzysztof Rybicki przedstawił oryginalne wyniki badań dotyczące możliwości naukowych łącznych – astrometrycznych i fotometrycznych – obserwacji mikrosoczewkowania grawitacyjnego.

Mikrosoczewkowanie jest szczególnym rodzajem silnego soczewkowania grawitacyjnego, w którym separacja obrazów jest tak mała, że są one nierozdzielone – zatem rejestrowane światło źródła pochodzi od obu obrazów łącznie. Historycznie, owa znikoma separacja obrazów wielorotnych była powodem spectyctyzmu Einsteina odnośnie soczewkowania grawitacyjnego. Genialny pomysł Bohdana Paczyńskiego z 1986 roku polegał na zauważeniu, że względny ruch własny soczewki i źródła (równie znikomy jak separacja obrazów), może powodować charakterystyczny efekt fotometryczny, wzmocnienia opisywanego tzw. krzywą Paczyńskiego. Pionierska rola profesora Paczyńskiego: stworzenie podstaw teorii mikrosoczewkowania, idea poszukiwania tą techniką planet pozasłonecznych, jedno z pierwszych przewidywań sygnału astrometrycznego oraz zainicjowanie wraz z prof. Andrzejem Udalskim projektu OGLE powoduje, że mikrosoczewkowanie grawitacyjne (oraz ogólnie – soczewkowanie grawitacyjne) stało się przedmiotem badań silnej grupy polskich astronomów i wykształciła się (głównie w Obserwatorium Astronomicznym UW) polska szkoła soczewkowania grawitacyjnego. Doktorant jest świetnym przykładem kontynuacji tej tradycji w nowym pokoleniu uczonych. Co więcej, postęp technologiczny spowodował, że obecnie misja astrometryczna Gaia posiada precyzję umożliwiającą rejestrację astrometrycznego sygnału mikrosoczewkowania, a precyzja interferometrii ESO/VLTI sprawia, że możliwe staje się nawet rozdzielenie mikrosoczewkowanych obrazów i detekcja ich ruchów względnych podczas zjawiska mikrosoczewkowania. Rozprawa doktorska mgr Krzysztofa Rybickiego wychodzi więc na przeciw wyzwaniom przyszłości.

Przedstawiona mi do oceny rozprawa jest napisana w języku polskim, obejmuje pięć rozdziałów poprzedzonych streszczeniami w języku polskim i angielskim, podziękowaniami oraz spisami: treści, rysunków i tabel.

Rozdział I zawiera bardzo ładne, ilustrowane poglądowymi rysunkami, wprowadzenie w teorię mikrosoczewkowania grawitacyjnego. Omówiona jest oryginalna idea Paczyńskiego wiodąca do trójparametrowego opisu sygnału fotometrycznego. Autor wprowadza następnie, bardzo ważny z obserwacyjnego punktu widzenia, parametr blendingu. Klasyczna krzywa Paczyńskiego jest achromatyczna i symetryczna względem punktu maksymalnej jasności. Ponadto, zakładającą punktową soczewkę i punktowe źródło krzywa Paczyńskiego przewiduje



charakterystyczny ostry kształt okolicy maksimum blasku. Autor dyskutuje, występujące w praktyce, odstępstwa od tych cech: efekt skończonego rozmiaru źródła (wyplaszczający maksimum) oraz paralaksy (czyniący krzywą asymetryczną). Następnie omawia efekt astrometryczny mikrosoczewkowania polegający na charakterystycznych zmianach położenia centroidu światła podczas zjawiska. Drugą część rozdziału stanowi syntetyczne omówienie kosmicznej misji Gaia oraz (mającej w swych głównych celach naukowych obserwacje mikrosoczewkowania) przyszłej misji NGRST. Omówione także zostały naziemne projekty i sieci teleskopów w skoordynowany sposób badających zjawiska mikrosoczewkowania. Po lekturze Rozdziału 1 czytelnik uzyskuje dobre zrozumienie koncepcji mikrosoczewkowania, mierzalnych obserwacyjnie wielkości fizycznych układu soczewkującego, występujących tu degeneracji między ważnymi fizycznie wielkościami (masa soczewki, odległości do soczewki i źródła, względny ruch własny) oraz roli łącznych fotometryczno – astrometrycznych obserwacji w złamaniu tych degeneracji.

Rozdział 2 zawiera opis studium wykrywalności czarnych dziur technikami mikrosoczewkowania fotometrycznego w połączeniu z mikrosoczewkowaniem astrometrycznym. Obiektem modelowym jest tu zjawisko OGLE3-ULENS-PAR-02 odkryte w 2006 roku, za które prawdopodobnie odpowiedzialna jest czarna dziura o masie ok. $8 M_{\odot}$. Soczewka jest niewidoczna ani w obrazach przeglądu OGLE, ani innych przeglądów, stąd jej natura i lokalizacja w Dysku są hipotetyczne. Krzywa wzmocnienia jest wyraźnie asymetryczna, więc dopasowany do niej model jest 7-parametrowym modelem. Same dane fotometryczne nie wystarczają jednak do precyzyjnego wyznaczenia masy soczewki. Uzupełnienie ich danymi astrometrycznymi byłoby korzystne. Zatem Autor rozprawy, opierając się na znanych charakterystykach pomiarów satelity Gaia, wygenerował hipotetyczną trajektorię astrometryczną zjawiska PAR-02. Następnie, w oparciu o łączną analizę danych fotometrycznych i astrometrycznych, wyznaczył rozkłady prawdopodobieństwa parametrów modelu, w tym masy soczewki i odległości do niej. Precyzja wyznaczenia masy była na poziomie 30%, natomiast nie udało się usunąć degeneracji w postaci dwóch klas rozwiązań równie dobrze dopasowanych do danych. Godne podkreślenia jest profesjonalne podejście Autora do analizy niepewności. Studium uzupełnione zostało o oszacowania częstości występowania czarnych dziur w Dysku obserwowalnych w kierunku Zgrubienia Centralnego. Dokładność wyznaczenia masy techniką fotometryczno-astrometryczną dla zjawisk jaśniejszych niż PAR-02 oraz dla mas większych niż $20 M_{\odot}$ (czyli takich jakie są obecnie rutynowo obserwowane przez detektory fal grawitacyjnych) rośnie do poziomu poniżej 10%. Są to obiecujące wyniki.

Rozdział 3 omawia pomiar masy soczewki w zjawisku Gaia19bld. Zjawisko to zostało wykryte przez satelitę Gaia i po wysłaniu alertu zostało objęte szeroko zakrojonym monitoringiem fotometrycznym i spektroskopowym z wykorzystaniem sieci naziemnych teleskopów optycznych oraz Teleskopu Spitzera (w podczerwieni). Wyplaszczzone maksimum krzywej blasku mikrosoczewkowania dowodzi konieczności uwzględnienia skończonych rozmiarów źródła. Pomiar spektroskopowy dostarczyły cennej informacji fizycznych na temat źródła, w tym o jego odległości i rozmiarach. Natomiast obserwacje kosmicznego Teleskopu Spitzera pozwoliły oszacować paralaksę kosmiczną. Zatem w procesie dopasowywania modelu mikrosoczewkowania było możliwe ustalenie pewnych parametrów i uzyskanie dość precyzyjnego pomiaru masy soczewki jako ok. $1.12 M_{\odot}$ z dokładnością kilku procent. Natomiast jego natura – czy jest to gwiazda ciągu głównego, biały karzeł czy czarna dziura (wówczas prawdopodobnie tzw. pierwotna czarna dziura) pozostaje kwestią otwartą.



W Rozdziale 4 Autor przeprowadza analizę możliwości detekcji astrometrycznego sygnału mikrosoczewkowania w oparciu o jednowymiarową astrometrię będącą faktycznym produktem satelity Gaia. Problem polega na tym, że w rzeczywistości Gaia nie dostarcza pełnej dwuwymiarowej astrometrii, lecz jednowymiarową pozycję obiektu w kierunku skanowania. Po szczegółowym omówieniu modelu mikrosoczewkowania, z uwzględnieniem efektu paralaksy i blendingu przedstawione są wyniki symulacji astrometrii Gaia dla trzech zjawisk: Gaia18bmt, Gaia19bld oraz Gaia16aye. To ostatnie zjawisko jest szczególnie interesujące, gdyż soczewka ma naturę podwójną oraz istnieją zredukowane szeregi czasowe faktycznych danych z Gaia. Ogólną konkluzją rozdziału jest przydatność mikrosoczewkowania astrometrycznego do pomiaru promienia Einsteina, a zatem i masy soczewki.

Rozdział 5 poświęcony jest analizie możliwości przyszłej generacji teleskopu NGRST. Atutem jest tu wykorzystanie, nieopublikowanych symulacji syntetycznych obrazów wygenerowanych na podstawie parametrów technicznych misji. Wyszumowane zostały dane RST dla zjawisk soczewkowania przez czarną dziurę o masie $6 M_0$ oraz czerwonego karła o masie 10-krotnie mniejszej, obejmujące epoki monitoringu centrum galaktycznego. Okazało się, że nawet dla scenariusza czerwonego karła możliwy będzie pomiar promienia Einsteina oraz paralaksy czyli oszacowanie masy soczewki. Są to obiecujące przewidywania.

Rozprawa jest napisana w sposób przejrzysty, czytelnie, dobrym językiem. Z merytorycznego punktu widzenia oceniam rozprawę wysoko. Z punktu widzenia prezentacji i redakcji rozprawy byłaby również wzorowa, gdyby zawierała jeszcze szósty rozdział podsumowujący całość rozprawy. W przedstawionej mi wersji drukowanej strony 158 – 161 zostały spięte w sposób zmieniający kolejność stron. Kilka drobnych uwag. Prezentacja Rozdziału 1 byłaby kompletna, gdyby zawierała krótki opis możliwości łamania achromatyczności krzywej Paczyńskiego jako element efektu skończonego rozmiaru źródła. Jest to jednak nieistotne z punktu widzenia celów naukowych rozprawy. Tabele 2.1 i 2.2 są redagowane niezrozumiale dla czytelnika – nie jest jasne co oznaczają nazwy kolumn „12”, „13” itd. Podawane, w różnych miejscach rozprawy wartości chi-kwadrat same w sobie nie są informatywne – lepiej byłoby podawać chi-kwadrat na stopień swobody.

Reasumując, uzyskane przez doktoranta, oryginalne wyniki zawarte w przedstawionej mi do oceny rozprawie oraz sposób ich prezentacji wskazujący na dobrą znajomość tematyki mikrosoczewkowania grawitacyjnego w wymiarze fotometrycznym i astrometrycznym oraz metod numerycznych sprawiają, że rozprawa spełnia formalne, ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie pana Krzysztofa Rybickiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego i do publicznej obrony. W moim przekonaniu rozprawa zasługuje na wyróżnienie.

Prof. dr hab. Marek Biesiada