

Ocena rozprawy doktorskiej mgr Zuzanny Kostrzewy-Rutkowskiej pt.:

„Silne i słabe soczewkowanie grawitacyjne w zastosowaniach astrofizycznych i kosmologicznych”

W rozprawie doktorskiej Pani mgr Zuzanna Kostrzewa-Rutkowska przedstawiła oryginalne wyniki swoich badań nad zastosowaniami zjawiska soczewkowania grawitacyjnego w reżimie słabego i silnego soczewkowania.

Praca napisana jest w języku polskim, składa się na nią 6 rozdziałów i 3 dodatki, jest bogato ilustrowana – zawiera 58 rysunków. Rozdział 1 to wstęp, wprowadzający czytelnika w najistotniejsze zagadnienia z teorii soczewkowania grawitacyjnego: zasadnicze idee, podstawowe terminy, szczególne przypadki modeli soczewek (SIS, SIE, soczewki z zewnętrznym ścinaniem). Wstęp napisany jest w sposób zwięzły, z trafnym wyborem omawianych problemów – w zestawie niezbędnym do podążania za tokiem myśli w dalszej części pracy. W rozdziale 2 Autorka przedstawiła źródła danych, z których korzystała w swych badaniach. Rozdziały 3 – 5 stanowią właściwą, nowatorską treść rozprawy, a opisane w rozprawie wyniki zostały syntetycznie podsumowane w rozdziale 6.

W rozdziale 3 Autorka podejmuje się ambitnego – i ważnego dla wielu dalszych praktycznych zastosowań soczewkowania grawitacyjnego – zadania: oceny wpływu jaki na promienie świetlne propagujące się od źródła do obserwatora mają, leżące wzdłuż linii widzenia, struktury wielkoskalowe w reżimie słabego i silnego soczewkowania. Badania mają tu charakter symulacji numerycznych w oparciu o katalogi słynnej N-ciałowej symulacji tzw. *Millenium Simulation*. Jest to symulacja, która stała się już wzorcową, powszechnie wykorzystywaną przez licznych badaczy. W obecnej dobie staje się ona jednak przestarzała, gdyż zastosowano w niej wartości parametrów modelu kosmologicznego uzyskane po pierwszym roku działalności satelity WMAP podczas gdy obecnie dysponujemy już wynikami WMAP7 (w ostatnich dniach nawet z satelity PLANCK). Autorka jest tego świadoma, podkreślając ten fakt w pracy. Obecnie alternatywę dla symulacji *Millenium* stanowi symulacja *Bolshoi*. Nowatorstwo tej części rozprawy polega na zastosowaniu przybliżenia Borna (założenia o zaniedbywalności odchylenia promieni przechodzących przez cienkie warstwy materii). W ten sposób zastosowane podejście stanowi alternatywę wobec klasycznej techniki śledzenia promieni soczewkowanych przez kolejne warstwy materii wypracowanej na początku lat 90-tych XX w. Jakkolwiek przybliżenie cienkich warstw jest interesujące i numerycznie efektywniejsze to wydaje się, że klasyczne podejście lepiej odpowiada realiom symulacji *Millenium* (jej rozdzielczość jest zbyt mała aby faktycznie być przekonany o tym, że wybrane warstwy są rzeczywiście dość cienkie). Dobrze byłoby kiedyś dokonać konfrontacji tych dwóch metod na tym samym materiale. Nie śmiem tego spostrzeżenia podnosić do rangi uwagi, gdyż byłoby to zadanie bardzo wymagające pod względem czasu i mocy obliczeniowej. Uzyskane w rozdziale 3 wyniki są bardzo interesujące: analizując statystycznie zależność składowej transwersalnej ścinania dla soczewkujących struktur jako funkcję kątowej odległości źródła Pani mgr Kostrzewa-Rutkowska odkryła istnienie wtórnego maksimum ścinania na dużych separacjach kątowych (rzędu kilkunastu stopni) i wykazała, że za ten efekt odpowiedzialne są sąsiednie masywne halo występujące w roli soczewek wtórnych. Ważnym elementem tej części pracy jest także uzyskanie histogramów zewnętrznego ścinania dla źródeł o

różnych przesunięciach ku czerwieni (zastosowanych później w rozdziale 5 i z pewnością mogących być użytecznymi dla innych badaczy).

Kolejny rozdział pracy poświęcony jest ocenie wpływu silnego soczewkowania grawitacyjnego na detekcję supernowych o dużych przesunięciach ku czerwieni. Tu również wykorzystana została symulacja *Millenium*, tym razem służąc do wygenerowania populacji źródeł i leżących na linii widzenia soczewek. Soczewki zostały wylosowane z rozkładu prędkości wirialnych natomiast populacje źródeł (supernowych) wygenerowano splotem funkcji formowania się gwiazd i opóźnień czasowych (z różnymi wersjami tych funkcji zaczerpniętymi z literatury).

W tej części rozprawy brakuje mi trochę podania konkretnych wzorów na prawdopodobieństwo soczewkowania oraz na przewidywaną liczbę soczewkowanych i nie-soczewkowanych supernowych. Zostało to zrekompenrowane opisem, lecz dla niektórych czytelników brak formuł może stwarzać problem. Nie zauważyłem aby Autorka podała explicite parametry przyjętego modelu kosmologicznego (stałą Hubble'a, parametry gęstości materii etc.). Przypuszczam, że są one takie same jak w symulacji *Millenium*. Trochę dziwi mnie fakt, że spośród wysymulowanych układów soczewkujących jedynie 3% miało wielokrotne obrazy (str. 89) tym bardziej, że przyjętym modelem był SIE (nie SIS) i uwzględniono konwergencję oraz ścinanie tła, co powinno powiększać i poszerzać centralne kaustyki. Kolejna moja uwaga jest następująca: wkład do prawdopodobieństwa soczewkowania wnosi nie tylko dyspersja prędkości (tutaj prędkość wirialna – Rys. 28), ale także stosunek wzajemnych odległości w układzie optycznym (por. wzór (58)). To prawda, że dyspersja prędkości (czyli efektywnie masa soczewki) ma dominujące znaczenie, ale stosunek odległości jest też ważnym efektem selekcji widocznym w rzeczywistych przeglądach soczewek, np. dla SLACS jego mediana wynosi ok. 0.54 (czyli praktyczne jest to wartość maksymalizująca prawdopodobieństwo soczewkowania przy ustalonej masie soczewki). Bardzo ciekawa jest dyskusja zlewania się obrazów (*blending*) i ich opóźnień czasowych. Histogram rozkładu opóźnień czasowych (Rys. 42) z modą ok. 1 doby i przy separacjach kątowych rzędu 0.5 sekundy łuku *de facto* oznacza, iż krzywe blasku takich supernowych będą superpozycją 2 przesuniętych w czasie kopii (podobnie ich widma!). Bardzo interesujące byłoby dokładniejsze zbadanie spektrofotometrycznych przejawów takiego fenomenu, co oczywiście wykracza poza temat rozprawy. Podsumowując rozdział 5, jako zawierający ciekawe i inspirujące do dalszych badań wyniki, dodałbym tylko, że o ile efekt soczewkowania supernowych w kontekście diagramu Hubble'a jest raczej czynnikiem zakłócającym, o tyle odkrycie choć jednego przypadku silnie soczewkowanej supernowej o rozdzielonych obrazach miałyby kapitalne znaczenie: pozwoliłoby precyzyjnie określić opóźnienie czasowe (stąd – oszacować niezależnie stałą Hubble'a), porównać jasności obrazów z modelowymi wartościami wzmocnienia (stąd – zbadać ewentualne istnienie pod-struktur w soczewce), zbadać ekstynkcję różnicową w soczewkowanej galaktyce itp.

Wreszcie rozdział 5 zawiera wyniki badań modelowych 18 silnych soczewek grawitacyjnych pochodzących z katalogu przeglądu CASSOWARY, przy czym pięć z nich – jako dobrze znane z wcześniejszych wyników innych badaczy – posłużyło w roli testu zastosowanego algorytmu modelowania. Zastosowana została metoda parametryczna – opisana bardzo precyzyjnie przez Autorkę. Znowu brakuje mi tu stwierdzenia jakie parametry modelu kosmologicznego zostały przyjęte (tutaj już nie było potrzeby nawiązywania do konwencji symulacji *Millenium*). Mimo zachęcających wyników sprawdzenia zastosowanej procedury na obiektach testowych wyniki uzyskane na istotnie nowych układach zaskakują tym, że wymodelowane dla badanych soczewek spłaszczenie (stosunek osi) rozkładu masy (tzn. *de facto* bez-zderzeniowej ciemnej materii) jest mniejszy niż spłaszczenie rozkładu jasności. Jest to całkowicie wbrew intuicji i może być przejawem „rekompensaty” zaniedbania jakiegoś ważnego efektu systematycznego w statystycznej procedurze optymalizacji dopasowania modelu. Należy pamiętać, że przegląd CASSOWARY ze swej natury gromadzi układy „nietypowe” tzn. o dużych separacjach obrazów. Może warto byłoby spróbować podejścia nie-parametrycznego lub dodać wartości konwergencji i ścinania pochodzące

od tła (wyniki rozdziału 3). Podjęta w tym rozdziale próba scharakteryzowania populacji źródeł (rozkład promieni efektywnych Rys. 57 i indeksów Sersica – Rys. 58) jest w mojej ocenie pionierska, interesująca i godna kontynuacji.

Praca jest przejrzysta, napisana bardzo dobrym i profesjonalnym językiem, spójna, bez zbędnych powtórzeń lub dygresji. Jest też redakcyjnie staranna – zauważyłem jedynie kilka tzw. „literówek” na 140 stron tekstu. Wyniki prezentowane w rozprawie opublikowane zostały w renomowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym z tzw. listy filadelfijskiej, takich jak: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *Acta Astronomica*. Całkowity dorobek naukowy doktorantki obejmuje 4 publikacje, z których pierwsza ma już 19 zacytowań. Jest on, co prawda, nie związany tematycznie z rozprawą, a pozostałe – już związane – są na tyle świeże, że nie sposób uczciwie mówić tu o bibliometrii.

Pomimo pewnych, wypowiedzianych powyżej uwag, treść przedstawionej mi do oceny rozprawy dowodzi, iż Pani Zuzanna Kostrzewa-Rutkowska biegle opanowała zagadnienia związane z soczewkowaniem grawitacyjnym i kosmologią fizyczną. W szczególności wykazała się ona sporymi umiejętnościami w stosowaniu technik numerycznych.

W mojej opinii, rozprawa doktorska Pani mgr Zuzanny Kostrzewy-Rutkowskiej z naddatkiem spełnia formalne i zwyczajowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim. Oceniam ją jako bardzo dobrą, a nawet wyróżniającą się.



dr hab. Marek Biesiada, prof. UŚ