



Obserwatorium Astronomiczne Uniwersytetu Warszawskiego

Prof. dr hab. Tomek Bulik
Obserwatorium Astronomiczne
Uniwersytet Warszawski

Warszawa, 20 lipca 2022

Recenzja pracy doktorskiej pod tytułem „Lensing of gravitational waves as a cosmological and astrophysical probe” napisanej przez Paolo Cremonese

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska przedstawia rozwiązania trzech zagadnień związanych z astrofizyką fal grawitacyjnych oraz efektami soczewkowania grawitacyjnego. Dwa z tych zagadnień – rozdziały drugi i trzeci – to wyniki już opublikowanych prac autora, zaś trzecie – rozdział czwarty – jest opublikowane jako reprint na arxiv.org w czasie pisania tej recenzji. Autor rozprawy doktorskiej jest pierwszym autorem w każdej z tych publikacji, a zatem jego wiodąca rola nie budzi wątpliwości.

Astronomia fal grawitacyjnych jest bardzo szybko rozwijającą się dziedziną astronomii, a zatem tematyka jest bardzo ważna i na czasie. Liczba źródeł fal grawitacyjnych rośnie szybko a zatem rosną też szanse na obserwacje soczewkowania fal grawitacyjnych. Przygotowanie to tego typu odkryć jest zatem ważne i potrzebne.

Rozprawa rozpoczyna się od krótkiego wstępu w którym przedstawione są podstawy emisji fal grawitacyjnych, oraz ich wykrywania, a następnie wprowadzony jest krótki opis zjawiska soczewkowania grawitacyjnego. Wstęp i kolejne rozdziały czasami trudno się czyta – praca byłaby klarowniejsza gdyby autor dodał spis symboli i oznaczeń używanych w pracy. Na przykład nie zdefiniowany jest symbol δ użyty w równaniu 1.6 i pod równanie 1.5 w tekście. Kolejna uwaga do wstępu to prawie całkowite pominięcie VIRGO przy dyskusji o detektorach i ich przyszłej czułości. Podobnie wspominając o Teleskopie Einsteina warto było też wspomnieć o projekcie budowy Cosmic Explorer. Wprowadzenie wzoru na amplitudę fali grawitacyjnej w przybliżeniu słabych pól pomija wprowadzenia prostopadłego bezśladowego tensora momentu bezwładności – a zatem wzory na emisję z układu podwójnego 1.25 nie zawierają czynnika kąтового. Jakkolwiek wzór 1.28 jest prawdziwy to dobór wielkości charakterystycznych (okres, odległość) odpowiada zapewne układom białych karłów wykrywalnych przez obserwatorium LISA, a nie obecnie wykrywanym układom czarnych dziur. Ocena wielkości przesunięcia wykrywanego przez LIGO i VIRGO nie bierze pod uwagę faktu, że efektywna długość ramion to około 300-400km ze względu na że światło lasera przechodzi długość interferometru około 100 razy przed detekcją.

Wprowadzenie soczewkowania grawitacyjnego byłoby znacznie klarowniejsze gdyby autor zamieścił wyjaśnienia wielkości, na przykład jak zdefiniowane są wektory θ pojawiające się w równaniu 1.37 i później. Ta uwaga dotyczy całego wprowadzenia soczewkowania. Czy „diameter distance” to jest a „angular size distance” – to jest dopiero zdefiniowane w równaniu 1.66 po koniec wstępu... To powinno być zdefiniowane przed

użyciem tej wielkości. Niemniej przy pewnym wysiłku po przeczytaniu wstępu można spokojnie mieć dobre odniesienie do wielkości, z których autor korzysta w dalszej części rozprawy.

Nie jest w pełni prawdą stwierdzenie, że fale grawitacyjne nie niosą żadnej informacji o odległości do źródła – istnieją oceny odległości źródeł odkrytych przez LIGO i Virgo dla których nie było odpowiedników elektromagnetycznych. Dotychczasowe wykorzystanie fal grawitacyjnych do badań kosmologicznych jest we wstępie praktycznie pominięte za to pojawia się w rozdziale 2.

Rozdział drugi dotyczy wyznaczenia stałej Hubble'a za pomocą obserwacji soczewkowanych fal grawitacyjnych. Wyniki są już opublikowane i stanowią rozwiązanie ważnego zagadnienia w astronomii teoretycznej. Moja główna uwaga do tej części pracy jest następująca. Wybór typu źródła – połączenie super-masywnych czarnych dziur które byłoby soczewkowane. Taka detekcja może jedynie dokonana za pomocą PTA czy podobnych eksperymentów. Jak dotychczas nie wykryto nawet jednego takiego wydarzenia, a sądzę że wykrycie wydarzenia soczewkowanego wymagać będzie wykrycia wielu połączeń niesoczewkowanych. Analiza lub ocena potencjalnej liczby takich wydarzeń w PTA i przyszłych eksperymentach pulsarowych byłaby bardzo przydatna. Można tego dokonać na podstawie prostej analizy obrazów optycznych galaktyk – jak na przykład ostatnio opublikowanych zdjęć z JWST, na których widzimy pewną liczbę galaktyk soczewkowanych.

Rozdział trzeci dotyczy zagadnienia rozwikłania degeneracji parametrów soczewkowania jeśli już takie soczewkowanie zostanie wykryte. Dotyczy to uwikłania parametrów położenia źródła oraz dodatkowej masy rozłożonej równomiernie w płaszczyźnie soczewki. Wyniki te są opublikowane w Phys Rev D i w momencie pisania tej recenzji mają już 13 cytowań, co znaczy, że wynik ten znalazł oddźwięk w środowisku naukowym i jest ważny. W tym przypadku, podobnie jak wyżej, zastanawiam się nad realizmem założeń astrofizycznych. W rozdziale 3.2.1 wprowadzone jest przykłady gdzie soczewka ma masę 10 tysięcy mas Słońca. Czy to jest masa punktowa? Jaki astrofizyczny obiekt ma takie właściwości? Podobnie w przypadku wprowadzenia przypadku optyki falowej gdzie soczewką jest masa punktowa wielkości 500 mas Słońca. Jak na razie nie mamy dowodów istnienia takich soczewek. Marginalna uwaga stylistyczna do tego rozdziału jest taka, że na stronie 66 na samym dole autor odnosi się do lewego panelu na rysunku 3.6, który to takiego lewego panelu nie ma. Moim zdaniem ten rozdział miałby większe znaczenie astrofizyczne gdyby odniósł się do bardzo realistycznych mas soczewek - obecnie wiemy że jest wiele soczewek o znacznie mniejszych masach – patrz na przykład wyniki OGLE, gdzie masy są rzędu jednej masy Słońca.

Rozdział czwarty poświęcony jest analizie wykorzystania soczewkowania do badania rozkładu masy w soczewce. Dotyczy do bardzo masywnych soczewek, które mogą być zaobserwowane przez obserwatorium LISA, czy też PTA. Wynik jest ciekawy i pokazuje że analiza fal grawitacyjnych może przynieść dodatkowe ograniczenie na model rozkładu masy w soczewce a zatem na ocenę ilości i rozkładu ciemnej materii w soczewce. Jeśli wykrycie takiego soczewkowania byłoby związane z identyfikacją soczewki – to wówczas obserwacje w falach grawitacyjnych byłyby ważnym uzupełnieniem do obserwacji w zakresie elektromagnetycznym i ulepszyłyby znacznie wyznaczenie masy i rozkładu ciemnej materii. Jest to ciekawy wynik.

Podsumowując przedstawiona rozprawa doktorska zawiera interesujące rozważania dotyczące soczewkowania fal grawitacyjnych i zastosowań astrofizycznych tego zjawiska. Jest to praca typu „high risk – high gain”, gdyż moim zdaniem w najbliższej dekadzie mamy małe szanse na obserwację soczewkowania, które mogłoby być wykorzystane w sposób przedstawiony w rozprawie, jednakże mam nadzieję, że myślę się w mojej ocenie.

Zagadnienie, które nie zostało przedyskutowane w pracy to sama identyfikacja soczewkowania w sygnale połączenia czarnych dziur. Samo połączenie, z uwzględnieniem spinów, czy eliptyczności jest bardzo skomplikowane. A zatem ważne jest pytanie, czy wzorce sygnału z soczewkowaniem w reżimie optyki falowej są na tyle różne od wzorców bez soczewkowania, za to z uwzględnieniem powyższych efektów. Ta uwaga może być traktowana jako sugestia przyszłego kierunku badań.

Uważam, że wynik przedstawione w pracy są ciekawe, stanowią rozwiązanie zwanych problemów w astrofizyce, i został już zauważone przez środowisko naukowe. A zatem moim zdaniem rozprawa spełnia zwyczajowe i ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim a zatem wnoszę o dopuszczenie do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Janusz Baliś