

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Paolo Cremonese
Lensing of gravitational waves as a cosmological and astrophysical probe

Przedmiotem rozprawy doktorskiej mgra Paolo Cremonese *Lensing of gravitational waves as a cosmological and astrophysical probe* jest badanie możliwości wykorzystania zjawiska soczewkowania grawitacyjnego fal grawitacyjnych do mierzenia parametrów modeli kosmologicznych pretendujących do opisu naszego Wszechświata oraz do szacowania parametrów układów astrofizycznych będących soczewkami grawitacyjnymi.

Rozprawa oparta jest na trzech artykułach, których mgr P. Cremonese jest współautorem. Dwa z nich zostały opublikowane w latach 2020–21 w dobrych czasopismach fizycznych o zasięgu międzynarodowym (są to czasopisma 140-punktowe według wykazu czasopism MEiN), trzeci z nich został wysłany do publikacji i jest dostępny jako preprint w repozytorium arXiv. Dane bibliograficzne tych artykułów są następujące (przyporządkowuję tym i wszystkim innym cytowanym w niniejszej recenzji artykułom numery wzięte z Bibliografii omawianej rozprawy):

- [41] P. Cremonese and V. Salzano, *High accuracy on H_0 constraints from gravitational wave lensing events*, Phys. Dark Univ. **28**, 100517 (2020) [arXiv:1911.11786v1 [astro-ph.CO]];
- [42] P. Cremonese, J. M. Ezquiaga, and V. Salzano, *Breaking the mass-sheet degeneracy with gravitational wave interference in lensed events*, Phys. Rev. D **104**, 023503 (2021) [arXiv:2104.07055v1 [astro-ph.CO]];
- [43] P. Cremonese, D. F. Mota, and V. Salzano, *Characteristic features of gravitational wave lensing as probe of lens mass model*, arXiv:2111.01163v2 [astro-ph.CO].

Według bazy ADS cytowania tych artykułów są następujące (stan na dzień 16.08.2022 r.): [41] — 5 cytowań, [42] — 11 cytowań, [43] — jedno cytowanie (łącznie 17 cytowań).

Omawiana rozprawa składa się ze streszczenia, spisu treści, 5 rozdziałów (z których Rozdział 1 stanowi wstęp, natomiast Rozdział 5 zawiera wnioski i podsumowanie rozprawy) oraz obszernej Bibliografii (zawierającej 219 pozycji). Rozdziały 2, 3 i 4 zawierają opisy wyników otrzymanych odpowiednio w artykułach [41], [42] i [43] zacytowanych powyżej. Rozprawa liczy 130 stron, zawiera 34 rysunki (wiele z nich to rysunki wielopanelowe) i 5 tabel. W rozprawie brakuje spisu rysunków i tabel. Rozprawa napisana jest w języku angielskim.

Rozdział 2 jest, według mnie, najciekawszą częścią rozprawy. W rozdziale tym bada się, jak dokładnie da się oszacować obecną wartość H_0 stałej Hubble'a obserwując równoczesne soczewkowanie grawitacyjne fal grawitacyjnych i promieniowania elektromagnetycznego. Tym samym zadaje się pytanie, czy za pomocą takich obserwacji można będzie rozstrzygnąć aktualnie dyskutowany w kosmologii obserwacyjnej problem niezgodności wyników pomiarów H_0 otrzymywanych za pomocą różnych metod (*Hubble tension*). W Rozdziale 2 rozważana jest sytuacja, w której ustalone źródło astrofizyczne emituje równocześnie fale grawitacyjne i promieniowanie elektromagnetyczne, oba te rodzaje promieniowania są

soczewkowane przez jedną i tę samą soczewkę grawitacyjną. Badane jest, jak różnica wywołanych soczewkowaniem opóźnień w nadejściu sygnałów fali grawitacyjnej i elektromagnetycznego, zależy od parametrów kosmologicznych, w szczególności od H_0 . Rozważane są dwa modele kosmologiczne: standardowy model Λ CDM oraz model z ciemną energią nietożsamą ze stałą kosmologiczną (*quiescence model*). Źródłem obu sygnałów jest zlanie się układu podwójnego supermasywnych czarnych dziur, które wytwarza fale grawitacyjne o bardzo małej częstotliwości, rzędu 10^{-8} Hz. Takie fale grawitacyjne mogą być wykrywane za pomocą techniki jednoczesnego chronometrażu układu pulsarów (*pulsar timing array*). Zakładając rejestrację tylko jednego zdarzenia soczewkowania oraz przyjmując dokładność pomiarów zapewnianą przez aktualnie działające konsorcjum International Pulsar Timing Array, oszacowano, że typowy błąd wyznaczenia H_0 będzie równy kilka km/(s Mpc) w modelu Λ CDM oraz kilkanaście km/(s Mpc) w modelu z ciemną energią. Oszacowano również że, biorąc pod uwagę spodziewane dokładności pomiarów możliwe do osiągnięcia w budowanym obecnie obserwatorium Square Kilometer Array, pomiary H_0 dokonane przez to obserwatorium będą typowo obarczone około stukrotnie mniejszym błędem. Tak dokładne pomiary będą niezwykle istotne przy rozstrzygnięciu, jaka jest prawdziwa wartość stałej Hubble'a. Należy zaznaczyć, że przytoczone tutaj wartości błędów zostały oszacowane przy wykorzystaniu ograniczeń na możliwe wartości parametru kosmologicznego Ω_m wynikające z pomiarów dokonanych przez satelitę Planck.

Rozdział 3 poświęcony jest znanemu w soczewkowaniu grawitacyjnym promieniowana elektromagnetycznego problemowi degeneracji pomiędzy położeniem soczewki a jej masą (*mass-sheet degeneracy*). Ten sam problem dotyczy soczewkowania fal grawitacyjnych. Degeneracja ta ogranicza dokładność szacowania, na podstawie obserwacji sygnałów ulegających soczewkowaniu, parametrów samej soczewki oraz parametrów stosowanego modelu kosmologicznego. W Rozdziale 3 badano wpływ degeneracji na soczewkowanie fal grawitacyjnych w trzech reżimach optycznych: optyki geometrycznej, optyki falowej i pośredniego pomiędzy nimi reżimu „interferencyjnego”. Stwierdzono, że w reżimie interferencyjnym i częściowo w reżimie optyki falowej degeneracja może zostać złamana już na podstawie pojedynczej obserwacji. Przeprowadzono ilościową analizę zniesienia degeneracji posługując się pojęciami optymalnego i sub-optymalnego stosunku sygnał-szum. Obliczenia przeprowadzono zakładając, że detektorem fal grawitacyjnych jest znajdujący się na powierzchni Ziemi interferometr laserowy typu interferometrów LIGO/Virgo, zaś źródłem fal grawitacyjnych jest zlewający się układ dwóch czarnych dziur o masach gwiazdowych. Oszacowano, że w reżimie interferencyjnym degeneracja wciąż wprowadza kilkunastoprocentowy błąd na masę soczewki, dla sygnałów o stosunku sygnał-szum typowym dla sygnałów aktualnie obserwowanych przez LIGO/Virgo.

W Rozdziale 4 badano możliwość stwierdzenia czy zaobserwowana fala grawitacyjna uległa soczewkowaniu czy też nie, badano także wpływ szczegółów modelu rozkładu masy w soczewce na zaobserwowany sygnał oraz na ile taki ewentualny wpływ pozwoli rozróżnić pomiędzy różnymi modelami soczewek grawitacyjnych. W rozdziale tym założono, że fale grawitacyjne będą obserwowane przez planowany do umieszczenia w przestrzeni kosmicznej detektor LISA, zaś źródłem fal był zlewający się układ dwóch supermasywnych czarnych dziur. Rozważano pojedyncze zdarzenie soczewkowania. Stwierdzono, że w reżimie interferencyjnym da się stwierdzić, że obserwowany sygnał uległ soczewkowaniu i co więcej da się powiedzieć, który z rozważanych modeli soczewki najlepiej wyjaśnia obserwowany sygnał. W przypadku reżimu optyki falowej podobne konkluzje będą możliwe tylko dla znacząco wyższych niż typowe stosunków sygnał-szum i znacząco silniejszych niż typowe zjawisk soczewkowania. Powyższe konkluzje otrzymano analizując relacje pomiędzy optymalnym i sub-optymalnym stosunkiem sygnał-szum dla różnych sygnałów oraz badając wpływ fazy czynnika wzmacniającego soczewki (*amplification factor*) na modyfikację

sygnału fali grawitacyjnej.

Otrzymane w rozprawie wyniki będą użyteczne w analizie danych (oraz interpretacji jej wyników) zbieranych przez aktualnie działające i przyszłe detektory fal grawitacyjnych. Do tej pory nie zaobserwowano żadnego sygnału fali grawitacyjnej, który uległ soczewkowaniu grawitacyjnemu, ale można przypuszczać, że taki sygnał zostanie zarejestrowany już wkrótce.

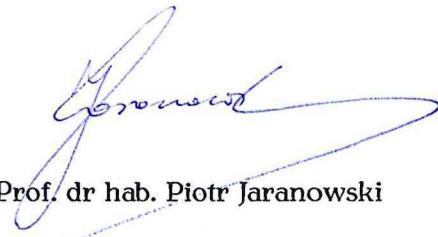
Moja najważniejsza uwaga krytyczna dotyczy przeprowadzonej w Rozdziałach 3 i 4 analizy wykorzystującej optymalne i sub-optymalne stosunki sygnał-szum obliczane dla różnych sygnałów fali grawitacyjnej. Po pierwsze, zawarte w rozprawie wyprowadzenie i uzasadnienie kluczowego dla tej analizy wzoru (3.14), nie jest według mnie całkiem jasne, wzór ten powinien być starannie uzasadniony. Dalej, w celu wykonania obliczeń stosunków sygnał-szum generowano rozmaite przebiegi czasowe związane z odpowiedzią różnych detektorów na fale grawitacyjne emitowane przez zlewające się dwie czarne dziury. Wykorzystano do tego pakiet PyCBC [112] i użyto przebiegów czasowych należących wyłącznie do rodziny tzw. fenomenologicznych wzorców sygnałów fali grawitacyjnej ze zlewających się czarnych dziur (w Rozdziale 3 użyto modelu IMRPhenomHM, natomiast w Rozdziale 4 IMRPhenomPv3). Istnieje i jest intensywnie wykorzystywana w analizie danych z detektorów fal grawitacyjnych jeszcze druga, niezależna rodzina przebiegów czasowych, oparta na tzw. efektywnym podejściu jednociłowym (*effective one-body approach*) do relatywistycznego problemu dwóch ciał (pakiet PyCBC pozwala na generowanie przebiegów czasowych należących również do tej rodziny). Ponieważ generowanie przebiegów czasowych należących do którejkolwiek z tych dwóch rodzin jest skomplikowane, zależy od wielu, różnych dla każdej z rodzin, założeń natury fizycznej i matematycznej, byłoby rzeczą bardzo pożądaną — i to jest po drugie — sprawdzenie, czy potencjalnie obserwowalne wyniki przeprowadzonych analiz nie zmieniają się, gdy zastąpimy sygnały wygenerowane w ramach jednej rodziny, sygnałami należącymi do drugiej rodziny.

Omawiana rozprawa zawiera również sporo błędów drukarskich i innych drobnych usterek. Rozdziały 2–5 rozprawy napisane są dość starannie, zawierają niezbyt liczne błędy drukarskie. Zdecydowanie gorzej wygląda wstępny Rozdział 1, napisany raczej niestarannie, z dużą ilością błędów drukarskich i innych uchybień. Wymienię, dla przykładu, kilka szczególnie rzucających się w oczy lub utrudniających zrozumienie tekstu usterek (wymieniam je w kolejności, w jakiej pojawiają się w rozprawie).

1. Zaczę od skrytykowania niezrozumiałego dla mnie zwyczaju Doktoranta, który dość konsekwentnie i w wielu miejscach, mówiąc o ostatnich odkryciach/analizach dotyczących astronomii fal grawitacyjnych, posługuje się wyłącznie nazwą amerykańskiego projektu LIGO, ignorując europejski projekt Virgo. I tak np. już na s. 1 rozprawy pisze: *Currently, 90 events are officially registered by LIGO [2] (...)*. Na s. 8 zaś czytamy: *(...) the LIGO event GW170917 [82] proved that GWs travel at the speed of light (...)* (tutaj Doktorant popełnia błąd w nazwie zdarzenia — jest to zdarzenie GW170817). Przypomnijmy zatem, że istnieją dwa niezależne konsorcja: LIGO Scientific Collaboration związane z amerykańskimi detektorami LIGO oraz Virgo Collaboration związane z europejskim detektorem Virgo. Od kilkunastu lat oba te konsorcja ściśle ze sobą współpracują, wspólnie analizują dane i wspólnie publikują wyniki swoich analiz, czego przykładem są np. publikacje [2] i [82] wspomniane w wyżej zacytowanych fragmentach. Można przy okazji dodać, że rola detektora Virgo była kluczowa dla precyzyjnej lokalizacji sygnału GW170817 na sferze niebieskiej, co umożliwiło odkrycie elektromagnetycznego odpowiednika źródła fali grawitacyjnej wyemitowanej przez zlewające się dwie gwiazdy neutronowe. Jest zatem oczywiste, że w przytoczonych wyżej przykładowych sformułowaniach, „LIGO” powinno być zastąpione przez np. „LIGO/Virgo”.

2. S. 7, w równaniu (1.3) drugi znak równości powinien być zastąpiony znakiem minus; w definicji operatora \square poniżej równania (1.4) brakuje znaku minus przed drugą pochodną czasową.
3. S. 13, przebieg czasowy podany w równaniu (1.27) może być w przybliżeniu stosowany tylko do początkowej fazy sygnału GW150914. Wykrycie tego sygnału wymagało zastosowania dużo bardziej skomplikowanego przebiegu czasowego, w którym faza sygnału jest bardziej złożoną funkcją czasu i jego amplituda zmienia się w czasie. Dodatkowo w analizie danych uwzględniono fazę zlewania się czarnych dziur i końcowy etap związany z oscylacjami wypadkowej czarnej dziury Kerra, opisane jeszcze innymi zależnościami czasowymi. Wypadałoby o tym wszystkim uprzedzić tutaj Czytelnika.
4. Ss. 20–21, definicja kąta $\vec{\alpha}$ zawarta w równaniu (1.41) nie zgadza się z tym, co wynika z równań (1.37)–(1.38). W równaniach (1.39) i (1.40) dzielić powinniśmy przez moduł wektora $\vec{\xi}_0$, a nie przez sam ten wektor (nie widać tutaj w ogóle potrzeby wprowadzenia wektora $\vec{\xi}_0$ zamiast po prostu skali ξ_0).
5. S. 23, tekst wokół równania (1.54) jest trudny do zrozumienia, jeśli ostatniego członu tego równania nie przyrówna się do zera. Bez tego równanie (1.54) jest raczej trywialną tożsamością.
6. S. 116, pozycje w bibliografii o nrach [84] i [85] wymagają uzupełnienia.

Moje krytyczne uwagi dotyczące rozprawy mają charakter drugorzędny. Oryginalne rezultaty opisane w rozprawie pozwalają mi stwierdzić, że rozprawa mgra Paolo Cremonese spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane pracom doktorskim. Wnoszę zatem o dopuszczenie mgra Paolo Cremonese do dalszych etapów przewodu doktorskiego i do publicznej obrony.



Prof. dr hab. Piotr Jaranowski