



Narodowe Centrum Badań Jądrowych
National Centre for Nuclear Research
ŚWIERK

Warszawa 18.08.2022

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

***Ocena rozprawy doktorskiej mgr Paolo Cremonese pt.
„Lensing of gravitational waves as a cosmological and astrophysical probe”***

W swej rozprawie doktorskiej mgr Paolo Cremonese przedstawił oryginalne wyniki swoich badań dotyczących potencjału naukowego zjawisk grawitacyjnego soczewkowania fal grawitacyjnych. Jest to bardzo aktualna tematyka w dobie rozwijającej się dynamicznie astrofizyki fal grawitacyjnych. Działająca obecnie sieć detektorów naziemnych LIGO-Virgo-KAGRA już dostarczyła ponad 50 detekcji sygnałów grawitacyjnych pochodzących ze zlewających się układów podwójnych: głównie czarnych dziur, z dodatkiem koalescencji gwiazd neutronowych, z których jednej towarzyszył sygnał elektromagnetyczny (promienie gamma, X, zakres optyczny i radiowy). W ten sposób astronomia wielozakresowa (ang. *multimessenger astronomy*) weszła w nowy jakościowo etap. Fale grawitacyjne propagując się po geodetykach zerowych, analogicznie jak fotony, mogą ulegać zjawisku soczewkowania grawitacyjnego. Wszelkie realistyczne oszacowania wskazują na nikłe statystycznie szanse rejestracji takiego zjawiska w obecnie działających detektorach, chociaż pewni badacze próbują argumentować, że soczewkowanie grawitacyjne może odpowiadać za niespodziewanie duże wartości mierzonych mas zlewających się czarnych dziur. Nie można również wykluczyć przypadkowej detekcji soczewkowanego sygnału grawitacyjnego w obecnie funkcjonujących detektorach. Z drugiej strony, przyszłej generacji detektorów naziemne (Teleskop Einsteina, Cosmic Explorer) lub satelitarne (LISA, DECIGO, TianQin) będą posiadały taki zasięg, że zjawiska soczewkowania sygnałów grawitacyjnych będą rejestrowane w tempie ok 50-100 rocznie.

Przedstawiona mi do oceny rozprawa jest napisana w języku angielskim, obejmuje pięć rozdziałów poprzedzonych streszczeniem w języku angielskim oraz spisem treści. Streszczenie w języku polskim umieszczono na końcu rozprawy. Rozdział 1 zawiera wprowadzenie w tematykę fal grawitacyjnych i soczewkowania grawitacyjnego. Idea takiego rozdziału i wybór zakresu prezentacji zagadnień są jak najbardziej uzasadnione. Rozdziały 2 – 4 zawierają wyniki oryginalnych badań doktoranta.

W Rozdziale 2 przedstawiony został pomysł pomiaru stałej Hubble’a H_0 na podstawie jednoczesnych obserwacji silnie soczewkowanego grawitacyjnie źródła w zakresach: grawitacyjnym i elektromagnetycznym. Pomysł polega na wykorzystaniu różnicy czasu przelotu sygnału elektromagnetycznego (EM) – podlegającego soczewkowaniu grawitacyjnego w reżimie optyki geometrycznej, oraz czasu przelotu sygnału grawitacyjnego (GW) – w reżimie

Adres:
ul. A. Soltana 7
05-400 Otwock

+48 22 273 10 01
+48 22 779 34 81
ncbj@ncbj.gov.pl

KRS: 0000171393
NIP: 532-010-01-25
www.ncbj.gov.pl



optyki falowej. Aby te założenia były spełnione dla galaktyki w roli soczewki grawitacyjnej, źródłem musi być układ podwójny supermasywnych czarnych dziur SMBH. Tego typu układy są przewidywane w hierarchicznym scenariuszu powstawania struktury wielkoskalowej jako wynik fuzji (ang. *merger*) galaktyk. Są one celem naukowym przyszłej misji satelitarnej LISA oraz toczących się obecnie skoordynowanych badań chronometrażu pulsarów IPTA. Doktorant wybrał scenariusz hipotetycznej detekcji soczewkowanego sygnału podwójnych SMBH w sieci IPTA. Dla dwóch modeli soczewki: osobliwej sfery izotermicznej (SIS) oraz profilu masy Navarro-Frenka-White'a (NFW) została przeprowadzona analiza czułości obserwabli (różnicy czasu przelotu GW vs. EM) ze względu na parametry modelu kosmologicznego: parametr gęstości, stałą Hubble'a oraz współczynnik równania stanu.

Koncepcja przedstawiona w Rozdziale 2 jest bardzo ciekawa i stała się przedmiotem publikacji w bardzo dobrym czasopiśmie *Physics of the Dark Universe*. Mam tu jednak pewne uwagi. Odnośnie metodyki: po pierwsze, nie jest jasno powiedziane (lub uszło mojej uwadze przy lekturze tekstu) w jaki sposób będą mierzone czasy przelotu sygnałów GW i EM. Oczywiście faza koalescencji dostarczyła by tu wyraźnego sygnału do tego typu pomiaru – przynajmniej dla sygnału GW. Czy będzie temu towarzyszyć równie wyraźny sygnał EM jest w przypadku koalescencji SMBH dyskusyjne. Inne fazy ewolucji układu SMBH albo nie dostarczą pomiaru czasu przelotu, albo będzie on obciążony niepewnością znacznie przekraczającą różnicę wynikającą z analizy czułości przeprowadzonej w doktoracie. Po drugie wykonana w rozprawie analiza czułości nie pozwala na wiarygodne oszacowanie niepewności wyznaczenia stałej Hubble'a. Zdaniem doktoranta może ona sięgnąć 1%. W mojej opinii jest to zbyt optymistyczny wynik. Bardziej wiarygodną metodą oceny niepewności byłoby wykonanie symulacji Monte Carlo odnoszącej się do realistycznej procedury naśladującej faktyczne przyszłe obserwacje, tzn. również odtworzenie profilu rozkładu masy (czy to w modelu SIS/SIE czy NFW) w oparciu o mierzalne wielkości – obrazy wielokrotne źródła: ich astrometrię, analizę zniekształceń, iloraz jasności (ang. *flux ratio*). W symulacji niepewności pomiarów i oszacowań pośrednich byłyby automatycznie propagowane, bez konieczności stosowania przybliżonej formuły propagacji niepewności. Spodziewałbym się co najmniej o rząd wielkości większej niepewności H_0 . Kolejna uwaga dotyczy założenia, że obserwacje fal grawitacyjnych zostaną przeprowadzone w ramach sieci chronometrażu pulsarów IPTA (lub na przyszłej generacji instrumentu SKA). Mimo podobnej w założeniach koncepcji pomiaru, technika ta nie pozwoli na tak dokładną detekcję sygnału grawitacyjnego (tzw. *wave strain*) jak detektory interferometryczne (naziemne lub statelitarne np. LISA). Na ile jest to problemem, nie jest dla mnie jasne w świetle mojej pierwszej uwagi powyżej.

Rozdział 3 dotyczy problemu zniesienia, znanej od dawna w teorii soczewek grawitacyjnych, degeneracji warstwy masy tzw. *mass-sheet degeneracy*. Polega on na tym, że równanie soczewki (otrzymane w reżimie optyki geometrycznej) jest niezmiennicze względem transformacji polegającej na przeskalowaniu konwergencji (siły skupiającej soczewki, zależnej od rozkładu masy) o pewien czynnik λ wraz z dodaniem składnika $(1 - \lambda)$ reprezentującego efektywną jednorodną warstwę masy. Przy takiej transformacji obserwabli soczewkowania: położenia obrazów, ich deformacje i ilorazy jasności pozostają niezmienione. Degeneracja warstwy masy jest podstawową trudnością uniemożliwiającą precyzyjne odtworzenie rozkładu masy soczewki z obserwacji. Powszechnie stosowaną metodą osłabienia tej degeneracji jest użycie niezależnych obserwacji kinematyki gwiazd w galaktyce soczewkującej, co jest



wymagającym zadaniem. W swej rozprawie doktorant przeanalizował problem degeneracji warstwy masy w zjawiskach soczewkowania fal grawitacyjnych. Uzyskane wyniki to: występowanie degeneracji w reżimie optyki geometrycznej i jej brak w reżimie falowym – czego można było się spodziewać – oraz możliwość zniesienia tej degeneracji w reżimie pośrednim, gdzie występują efekty interferencyjne sygnałów od wielokrotnych obrazów. Jest to istotnie nowy i bardzo ciekawy wynik. Jego dalsze badania przyniosą z pewnością ważne nowe rezultaty mogące znaleźć bogate zastosowania w przyszłości.

W Rozdziale 4 dyskutowane są dwa zagadnienia: czy można odróżnić sygnał grawitacyjny soczewkowany od niesoczewkowanego techniką dopasowanych macierzy sygnału (ang. *matched filtering*) oraz czy różne modele rozkładu masy soczewki (SIS oraz NFW) pozostawiają ślad w soczewkowanym sygnale pozwalający na ich rozróżnienie. Podobnie jak w poprzednich rozdziałach przyjętą techniką jest analiza czułości ze względu na różne modele rozkładu masy. Uzyskane wyniki są znów obiecujące, lecz w sensie otwarcia drogi dalszych badań raczej niż uzyskania konkluzyjnych odpowiedzi.

Rozdział 5 krótko podsumowuje rozprawę. Doktorant stwierdza tam również, że wyniki rozprawy są wkładem w początkową fazę rozwoju nowej specjalności – soczewkowania fal grawitacyjnych w reżimie optyki falowej. W pełni zgadzam się z tą opinią i mogę dodać, że w moim przekonaniu ta nowa specjalność będzie istotnym uzupełnieniem dotychczasowej wiedzy i praktyki w dziedzinie astronomii fal grawitacyjnych.

Rozprawa jest napisana w sposób przejrzysty, czytelnie, dobrym językiem. Z punktu widzenia merytoryki, oceniam rozprawę wysoko. Z punktu widzenia prezentacji i redakcji rozprawy – czuję pewien niedosyt. Rozdziały merytoryczne (Rozdz. 3 – 5) mają miejscami styl raportu z wykonanych obliczeń i symulacji. Czytelnik, który sam nie prowadzi podobnych badań może się czuć zagubiony w detalach. Ponadto, Autor nie ustrzegł się pomyłek drukarskich. Na przykład: na stronie 7, w równaniu (1.3) ostatnia równość powinna być znakiem „minus”; wybrane cechowanie (ang. *gauge*) nosi imię *Lorentza*, nie *Lorenza*; definicja operatora d'Alemberta występującego w równaniu (1.4) jest błędna – brakuje znaku „minus”. Na stronie 13, we wzorze (1.27), w kontekście kosmologicznym, występuje nie masa ćwierku (ang. *chirp mass*) lecz poczerwieniona masa ćwierku (ang. *redshifted chirp mass*). Na stronie 18 – symbolami rektascensji i deklinacji powinny być (RA i Dec) zamiast (*ra* i *dec*). Strona 22 – lepszą nazwą wielkości opisywanej wzorem (1.52) byłby „*time functional*” zamiast „*time-delay*”, choć faktycznie sensem jego jest opóźnienie czasowe liczone jednak względem nieobserwowalnego, hipotetycznego sygnału, który dotarłby przy nieobecności soczewki. Strona 28 – omawiając budżet materii we wszechświecie Autor użył sformułowania „*missing 5%*” bardziej adekwatnym było by „*remaining 5%*”. Na stronie 30 dowiadujemy się, że metoda standardowych syren (ang. *standard sirens*), „... is based on a sort of „*standard candles*” approach.” Jest to mylące stwierdzenie i będę oczekiwał, że podczas obrony doktorant przybliży istotę metody standardowych syren. Mam też następującą uwagę: w rozprawie pada stwierdzenie, iż czynnik wzmocnienia (ang. *amplification factor*) opisujący efekt soczewkowania w reżimie optyki falowej posiada rozwiązanie analityczne jedynie dla masy punktowej. Nie jest to prawdą, również model osobliwej sfery izotermicznej SIS posiada analityczne rozwiązanie poprzez funkcje hipergeometryczne.



Narodowe Centrum Badań Jądrowych
National Centre for Nuclear Research
ŚWIERK

W rozprawie nie jest to jawnie powiedziane, lecz Paolo Cremonese jest współautorem czterech publikacji, z których dwie są opublikowane w bardzo dobrych czasopismach: *Physical Review D* oraz *Physics of the Dark Universe*, a dwie pozostałe figurują w archiwum preprintów arXiv. Na przedstawionych tam wynikach opiera się oceniana przeze mnie rozprawa doktorska, którą pomimo przedstawionych powyżej pewnych uwag oceniam jako bardzo dobrą i wartościową.

Reasumując, uzyskane przez doktoranta, oryginalne wyniki zawarte w przedstawionej mi do oceny rozprawie oraz sposób ich prezentacji wskazujący na dobrą znajomość tematyki detekcji fal grawitacyjnych, soczewkowania grawitacyjnego – w szczególności w trudnym technicznie reżimie optyki falowej – oraz biegłość w metodach numerycznych sprawiają, że rozprawa spełnia formalne, ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie pana Paolo Cremonese do dalszych etapów przewodu doktorskiego i do publicznej obrony.

Prof. dr hab. Marek Biesiada

Adres:
ul. A. Sołtana 7
05-400 Otwock

+48 22 273 10 01
+48 22 779 34 81
ncbj@ncbj.gov.pl

KRS: 0000171393
NIP: 532-010-01-25
www.ncbj.gov.pl