

wpłynęło dnia 18.09.2013 gll

Dr hab. Piotr A. Jaranowski, prof. UwB
Zakład Astronomii i Astrofizyki
Wydział Fizyki
Uniwersytet w Białymstoku

Białystok, 16 września 2013 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Izabeli Kowalskiej-Leszczyńskiej
*Astrofizyczne zastosowania detekcji układów podwójnych obiektów zwartych
w falach grawitacyjnych*

Jednym z największych wyzwań podjętych wspólnie przez fizyków i astronomów jest usiłowanie bezpośredniego wykrycia fal grawitacyjnych za pomocą wielkoskalowych interferometrów laserowych. Instrumentami tego typu są detektory LIGO i Virgo, które w swojej pierwotnej konfiguracji zakończyły już zbieranie danych (i w tej konfiguracji detektory te nazywane są często detektorami I generacji). Obecnie są one przebudowywane, by stać się około 10-krotnie bardziej czułymi detektorami II generacji (o nazwach *advanced LIGO* i *advanced Virgo*). Rozwijane są też badania na rzecz detektorów III generacji, do których zalicza się europejski projekt *Einstein Telescope*. Rozważa się również umieszczenie detektorów interferometrycznych w przestrzeni kosmicznej m.in. w ramach projektu eLISA/NGO (będącego następcą zarzuconego już projektu LISA) i japońskiego projektu DECIGO (DECi-Hertz Interferometer Gravitational wave Observatory). Jednym ze standardowych astrofizycznych źródeł fal grawitacyjnych, które powinny być wykryte przez detektory II i III generacji oraz przez detektory kosmiczne, są zlewające się (w wyniku emisji fal grawitacyjnych) układy podwójne złożone z obiektów zwartych: gwiazd neutronowych bądź czarnych dziur. Przedmiotem rozprawy doktorskiej mgr Izabeli Kowalskiej-Leszczyńskiej są astrofizyczne i kosmologiczne zastosowania spodziewanej w najbliższej przyszłości detekcji fal grawitacyjnych emitowanych przez takie właśnie układy.

Omawiana rozprawa składa się z 7 rozdziałów (z których Rozdział I stanowi wstęp, natomiast Rozdział 7 jest podsumowaniem rozprawy), jednego Dodatku oraz Bibliografii (zawierającej 122 pozycje). Liczy 132 strony, zawiera 44 rysunki i 8 tablic. W Rozdziale 2 Autorka prezentuje zlinearyzowane równania Einsteina w cechowaniu Lorentza, wymienia istotne własności fal grawitacyjnych oraz krótko omawia najważniejsze astrofizyczne i kosmologiczne źródła fal grawitacyjnych. Dokładniej omawiane jest promieniowanie grawitacyjne emitowane przez układ dwóch punktów materialnych w przybliżeniu kwadrupolowym. Rozdział 3 poświęcony jest krótkiemu przeglądowi „ziemskich” (tzn. znajdujących się na powierzchni Ziemi) detektorów interferometrycznych I, II i III generacji oraz prezentacji detektorów kosmicznych DECIGO i LISA/eLISA/NGO.

Oryginalne wyniki naukowe rozprawy zawarte są w Rozdziałach 4–6. W Rozdziale 4 rozważany jest rozkład ekscentryczności układów podwójnych zwartych obiektów w momencie ich powstania oraz w czasie ich ewolucji wywołanej emisją fal grawitacyjnych. W szczególności analizowany jest rozkład ekscentryczności dla 3ch częstotliwości charakteryzujących (co do rzędu wielkości) minimalną częstotliwość fali grawitacyjnej, która będzie mogła zostać wykryta przez przyszłe detektory: *advanced LIGO/Virgo* (30 Hz), *Einstein Telescope* (3 Hz) oraz DECIGO (0.3 Hz). Częstotliwości te odpowiadają zatem chwili, w której promieniowanie grawitacyjne emitowane przez układ staje się wykrywalne przez dany detektor. Wykorzystana w badaniach populacja układów podwójnych zwartych obiektów została wygenerowana za pomocą programu *StarTrack* (ten sam program został wykorzystany do generowania populacji zwartych układów podwójnych analizowanych w Rozdziałach 5–6). W Rozdziale 4 (i w Rozdziałach 5–6) układy obiektów zwartych podzielone są na układy

złożone z dwóch gwiazd neutronowych, układy mieszane zawierające jedną gwiazdę neutronową i jedną czarną dziurę oraz podwójne czarne dziury. Zasadnicza konkluzja sformułowana przez Autorkę w Rozdziale 4 jest taka, że w analizie danych zbieranych przez detektory II generacji uwzględnienie ekscentryczności nie jest konieczne, ekscentryczność będzie miała znaczenie dopiero przy wykrywaniu sygnałów pochodzących od zlewających się układów podwójnych przez detektory III generacji i detektory kosmiczne.

Rozdział 5 poświęcony jest badaniu stochastycznego tła promieniowania grawitacyjnego wytwarzanego przez nakładające się na siebie fale grawitacyjne emitowane przez bardzo wiele zlewających się układów podwójnych zwartych obiektów znajdujących się w odległościach kosmologicznych. Zbadano wpływ na kształt tego widma metaliczności ośrodka, w którym układy podwójne się tworzyły, oraz innych szczegółów modeli ewolucji gwiazdowej. W Podrozdziale 5.1 rozważana jest wykrywalność tła emitowanego przez hipotetyczne zwarte układy podwójne powstałe z pozbawionych cięższych pierwiastków (czyli o zerowej metaliczności) gwiazd populacji III, natomiast w Podrozdziale 5.2 badana jest wykrywalność tła wytwarzanego przez układy podwójne zwartych obiektów będących końcowymi produktami ewolucji gwiazd populacji I bądź II. Tło pochodzące od układów populacji III będzie wykrywalne przez detektory III generacji, o ile dostatecznie dużo gwiazd tej populacji utworzyło układy podwójne. W większości rozważanych modeli tło pochodzące od układów gwiazd populacji I bądź II będzie wykrywalne już przez detektory II generacji, natomiast detektor Einstein Telescope powinien je wykryć z bardzo dużym stosunkiem sygnału do szumu.

Rozdział 6 zawiera wyniki symulacji ilustrujących interesującą ideę jak, mając do dyspozycji katalog zarejestrowanych przez detektor zdarzeń złania się zwartych układów podwójnych znajdujących się w odległościach kosmologicznych, oszacować parametry kosmologiczne Wszechświata bądź pewne wielkości parametryzujące tempo formacji gwiazd (wyrażone jako funkcję przesunięcia ku czerwieni z). Symulacje zostały przeprowadzone przy założeniu, że detektorem wykrywającym zdarzenia złania się układów podwójnych jest detektor Einstein Telescope. Rozważono dwie sytuacje: w pierwszej założono, że parametry kosmologiczne znane są dokładnie, szacowano zaś dwa współczynniki parametryzujące funkcję tempa formacji gwiazd, w drugiej natomiast postąpiono odwrotnie: przyjmując, że funkcja tempa formacji gwiazd jest w pełni znana, szacowano aktualną wartość parametru Hubble'a H_0 oraz współczynnika Ω_M określającego jaka część energii wypełniającej Wszechświat związana jest z materią (w obu symulacjach przyjęto, że Wszechświat jest płaski, tzn. że $\Omega_\Lambda + \Omega_M = 1$, gdzie Ω_Λ jest współczynnikiem związanym z energią próżni czyli ze stałą kosmologiczną). Autorka kończy Rozdział 6 konkluzją (na s. 113), że dokładność wyznaczenia parametrów kosmologicznych zaproponowaną tutaj metodą jest porównywalna z dokładnością osiąganą przez misje kosmiczne badające mikrofalowe promieniowanie tła (i wymienia wyniki pochodzące z misji Planck).

Rezultaty przedstawione w Rozdziałach 4 i 5 rozprawy zawarte są w dwóch opublikowanych artykułach oraz w jednym preprincie umieszczonym w repozytorium arXiv (informacji o tych trzech pracach Autorka nie umieściła w swojej rozprawie). I tak wyniki Rozdziału 4 opublikowane zostały w artykule I. Kowalska, T. Bulik, K. Belczynski, M. Dominik, and D. Gondek-Rosinska, *The eccentricity distribution of compact binaries*, *Astronomy & Astrophysics* **527**, A70 (2011); rezultaty Podrozdziału 5.1 są opublikowane w artykule I. Kowalska, T. Bulik, and K. Belczynski, *Gravitational wave background from Population III binaries*, *Astronomy & Astrophysics* **541**, A120 (2012); wreszcie rezultaty Podrozdziału 5.2 przedstawione są w preprincie I. Kowalska, T. Regimbau, T. Bulik, M. Dominik, and K. Belczynski, *Effect of metallicity on the gravitational-wave signal from the cosmological population of compact binary coalescences*, arXiv:1205.4621v3 [astro-ph.CO]. Według bazy inSPIRE trzy wyżej wymienione prace były łącznie cytowane 9 razy (stan na dzień

12.09.2013). Warto też zaznaczyć, że Autorka ocenianej rozprawy jest we wszystkich tych współautorskich pracach pierwszym autorem (i pierwszeństwo to nie wynika z kolejności alfabetycznej nazwisk autorów).

Moje krytyczne uwagi dotyczące rozprawy są przede wszystkim związane są z formalną stroną pracy. Rozprawa jest napisana mianowicie dość niestarannie. Zawiera sporo błędów drukarskich (w tym dużą liczbę „literówek”), w rozprawie można też znaleźć niedbale bądź niejasno sformułowane wyrażenia i zdania. Wymienię najważniejsze znalezione przeze mnie usterki tego rodzaju.

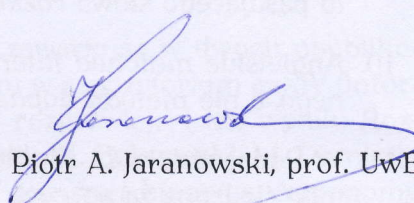
1. Zgodnie z zasadami interpunkcji na stronie tytułowej oraz na końcu nazw rozdziałów i podrozdziałów nie stawia się kropki.
2. W podpisie Rys. 2.1 na s. 16 znajduje się niejasne stwierdzenie, że „Fala porusza się w płaszczyźnie prostopadłej do rysunku.”
3. Rysunek 2.3 na stronie 22 jest poprawny tylko w sytuacji, gdy $M_1 = M_2$. Rozważania, które rysunek ten ilustruje, dotyczą układów o dowolnych (czyli niekoniecznie jednakowych) masach.
4. Na s. 27 Autorka wprowadza (i używa w dalszej części pracy) masę „chirp”. Nie widzę powodu, dlaczego by nie mówić tutaj po prostu o *masie ćwierku*.
5. W opisie detektora Webera na s. 31 „detektory fotoelektryczne” powinny zostać zastąpione przez „detektory piezoelektryczne”.
6. Wspomniany na s. 32 „szwajcarski” detektor EXPLORER jest w istocie detektorem włoskim znajdującym się na terenie ośrodka CERN w Szwajcarii.
7. W opisie Rys. 3.3 brakuje wyjaśnienia, jaka wielkość jest odłożona na osi pionowej.
8. Pod koniec opisu detektora LIGO/advLIGO (początek s. 40) Autorka stwierdza: „Docelowa czułość ma wzrosnąć 10-krotnie, co się przełoży na 1000-krotne zwiększenie zasięgu obserwacji.” Powiedziałbym, że 10-krotny wzrost czułości oznacza 10-krotny wzrost zasięgu obserwacji, natomiast $10^3 = 1000$ razy wzrośnie objętość przestrzeni zawierającej potencjalnie wykrywalne źródła. Tuż poniżej czytamy: „Planowane jest też uruchomienie trzeciego obserwatorium LIGO na półkuli południowej. Rozważane jest położenie w Australii [...] lub Indiach [...]” Indie leżą na półkuli północnej.
9. W całym Rozdziale 4 razi używanie słowa *dystrybucja* zamiast zdecydowanie bardziej tu pasującego słowa *rozkład* (w języku angielskim *distribution*).
10. Angielskie *matched filtering method* to w języku polskim *metoda filtru dopasowanego*, a nie *metoda dopasowywania filtrów* (s. 45).
11. W Podrozdziale 4.1 nie znalazłem informacji, ewolucja ilu układów podwójnych była tutaj śledzona za pomocą programu StarTrack.
12. Na s. 57 czytamy: „Dolna oś przedstawia logarytm ekscentryczności detektorów typu DECIGO.” Oczywiście ekscentryczność dotyczy orbit, a nie detektorów.
13. Na początku paragrafu 5.2.1 (s. 72) modele o słonecznej bądź mniejszej niż słoneczna metaliczności są oznaczone przez K/k , podczas gdy wszędzie indziej są one oznaczane symbolami Z/z .

14. We wzorach (6.10) i (6.11) na s. 88 brakuje informacji o jednostkach, w jakich mierzy się różne pojawiające się w tych wzorach wielkości symboliczne bądź liczbowe.
15. Postać wzoru (6.14) na s. 94 wydaje się być niezgodna z opisem znajdującym się tuż poniżej tego wzoru.

Chciałbym również zwrócić uwagę na to, czego w rozprawie nie ma, a co mogłoby, moim zdaniem, lepiej uzasadnić główne konkluzje rozprawy. Zanim wyłuszczę sprawę chciałbym wyraźnie zaznaczyć, że nie stawiam tutaj Autorce zarzutu, lecz wskazuję, że niewątpliwie oryginalne i interesujące wyniki zaprezentowane w rozprawie w naturalny sposób domagają się, w moim przekonaniu, uściślenia i dodatkowej weryfikacji poprzez powtórzenie niektórych obliczeń w sposób bardziej dokładny (co mogłoby być podstawą nowego projektu badawczego będącego kontynuacją badań zaprezentowanych w rozprawie).

Czego zatem nie ma w rozprawie, a co mogłoby lepiej uzasadnić główne tej rozprawy wyniki? W moim przekonaniu jest to brak jakiegokolwiek dyskusji wpływu efektów postnewtonowskich na omawiane w rozprawie zagadnienia. Autorka do opisu wywołanej emisją fal grawitacyjnych ewolucji zwartych układów podwójnych używa przybliżenia najniższego rzędu (czyli kwadrupolowego) dla wyrażeń określających prędkość utraty energii i momentu pędu przez zlewający się układ (a same wyrażenia opisujące energię i moment pędu są czysto newtonowskie). Autorka wykorzystuje również formułę na ostatnią stabilną orbitę kołową układu podwójnego w postaci wzoru (2.32). Otóż warto zaznaczyć, że formuła ta jest ściśle prawdziwa dla cząstki próbnej (tzn. o znikomą małą masie) orbitującej w czasoprzestrzeni Schwarzschilda (opisującej np. nierotująca masywną czarną dziurę). Ponieważ położenie ostatniej stabilnej orbity kołowej jest wyprowadzane na podstawie analizy czysto zachowawczej dynamiki układu (zaniedbuje się wpływ emisji promieniowania grawitacyjnego), więc ściśle rzecz biorąc w stosowanym przez Autorkę przybliżeniu, w którym — po zaniebaniu promieniowania grawitacyjnego — dynamika układu jest czysto newtonowska, ostatnia stabilna orbita kołowa nie istnieje (wszystkie orbity kołowe są stabilne). Dlatego wydaje mi się, że uwzględnienie przynajmniej 1szej, a jeszcze lepiej pierwszej i drugiej poprawki postnewtonowskiej, byłoby bardzo pożądane.

W moim przekonaniu oryginalne rezultaty otrzymane w omawianej rozprawie mają ważne konsekwencje dla przyszłej detekcji fal grawitacyjnych emitowanych przez zlewające się układy podwójne zwartych obiektów oraz stanowią interesujące propozycje wykorzystania samej detekcji w astrofizyce i kosmologii. Uważam zatem, że rozprawa mgr Izabeli Kowalskiej-Leszczyńskiej w pełni spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgr Izabeli Kowalskiej-Leszczyńskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego i do publicznej obrony.


Dr hab. Piotr A. Jaranowski, prof. UwB