



INSTYTUT MATEMATYCZNY POLSKIEJ AKADEMII NAUK

ul. Śniadeckich 8, 00-956 Warszawa, skrytka pocztowa Nr 21,
tel.: 48-22-522-81-00, fax: 48-22-629-39-97, e-mail: im@impan.pl, www.impan.pl

OBSERWATORIUM ASTRONOMICZNE UW

wpłynęło dnia 06.10.2014

Y. Udalski

Prof. dr hab. Andrzej Udalski
Dyrektor Obserwatorium UW
Al. Ujazdowskie 4,
00-478 Warszawa

Warszawa 3 października 2014r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

Mgr Michała Dominika

Estimating the coalescence rates of double compact objects – perspectives for gravitational wave detections

W swojej rozprawie doktorskiej mgr Dominik bada ewolucję zwartych układów podwójnych składających się z gwiazd neutronowych i czarnych dziur. W szczególności przeprowadza on dokładne obliczenia i symulacje numeryczne dotyczące liczby złań trzech typów takich układów podwójnych: dwie gwiazdy neutronowe (NS-NS), czarna dziura – gwiazda neutronowa (BH-NS) i dwie czarne dziury (BH-BH). Główną motywacją tej pracy są nadchodzące obserwacje z detektorów fal grawitacyjnych LIGO i Virgo. Zlewające się układy podwójne gwiazd neutronowych i czarnych dziur są najbardziej obiecującym źródłem fal grawitacyjnych, które te detektory mogą wykryć.

Praca zawiera cztery rozdziały wstępne. W pierwszym (*Introduction*) bardzo krótko przedstawiono gwiazdy neutronowe, czarne dziury, fale grawitacyjne i detektory fal grawitacyjnych. Rozdział ten wydaje się nieco zbyt skrótowy. W szczególności brak w nim dyskusji postaci sygnału fali grawitacyjnej ze zlewającego się układu podwójnego zwartych obiektów. W podrozdziale dotyczącym detektorów jest nieprecyzyjnie sformułowane zdanie: „Similar to Weber’s instruments, LIGO and VIRGO will operate in the High Frequency (VHF: 1 - 10⁶ Hz) band of the gravitational wave spectrum”. Detektory typu Webera są czułe w wąskim paśmie kilku herców wokół częstotliwości 1kHz, a detektory LIGO i Virgo działają w szerokim paśmie od 10Hz do 10kHz. W następnych dwóch rozdziałach w sposób zwięzły, ale bardzo wyczerpujący jest przedstawiona ewolucja gwiazd i ewolucja układów podwójnych gwiazd. W rozdziale czwartym przedstawione są podstawowe założenia modelowania ewolucji układów podwójnych używanych w kodzie syntezy populacji *StarTrack* rozwiniętym przez prof. Belczynskiego i współpracowników. Kod ten jest głównym narzędziem do otrzymania wyników przedstawionych w pracy.

Trzy dalsze rozdziały zawierają oryginalne wyniki mgr. Dominika dotyczące ewolucji układów podwójnych i oczekiwanej liczby ich złań, będących źródłem fal grawitacyjnych wykrywalnych przez detektory LIGO i Virgo. W Rozdziale 5 wyliczono liczbę złań w naszej Galaktyce trzech typów układów podwójnych. Oceny tej dokonano dla 16 różnych modeli w zależności od parametru λ wspólnej otoczki (CE), mechanizmu wybuchu supernowej, maksymalnej masy gwiazdy neutronowej i utraty masy w wyniku gwiazdnych wiatrów. Zbadano również zależność liczby złań od metaliczności materii tworzącej gwiazdy. Przedstawiono drogi ewolucji układów podwójnych. Wyliczono rozkłady tzw. masy „ćwierku” zlewających się układów podwójnych. Przedstawiono w sposób przekonujący z czego wynikają różnice w wynikach w porównaniu z kodem syntezy populacji innych autorów (tzw. SeBe). Oceniono również błędy statystyczne symulacji numerycznych. W Rozdziale 6 dokonano oceny liczby złań w zależności od etapu ewolucji Wszechświata mierzonego przesunięciem ku czerwieni z . Analizę przeprowadzono dla trzech typów układów podwójnych i czterech modeli, które zależą od szczegółów ewolucji układów podwójnych gwiazd zwartych takich jak przebieg wybuchu supernowej. W Rozdziale 7 oceniono liczbę detekcji sygnałów fal grawitacyjnych pochodzących ze złań układów podwójnych przez detektory LIGO i Virgo. Wyliczenia te opierają się na symulacjach otrzymanych w Rozdziałach 5 i 6. Zostały one wykonane dla trzech typów układów podwójnych i czterech modeli ewolucji rozważanych w Rozdziale 6. W wyliczeniach założono przewidywane krzywe czułości ulepszonych detektorów LIGO i Virgo, które zaczną działać w 2015 roku. W modelach sygnału fali grawitacyjnej z układu podwójnego, w przypadku układów zawierających czarną dziurę uwzględniono fazę złania się układu i fazę drgań normalnych obiektu powstałego w wyniku złania gwiazd. Przedstawiono również rozkład mas ćwierku wykrywalnych układów podwójnych. W Rozdziale 9 podsumowano wyniki przeprowadzonych symulacji numerycznych. Otrzymane przez mgr. Dominika wyniki prowadzą do niezwykle istotnych wniosków mających ogromne znaczenie dla poszukiwań fal grawitacyjnych przez projekty LIGO i Virgo. Otrzymane wyniki definiują przestrzeń parametrów układów podwójnych, którą należy przeszukiwać. Najważniejszym wnioskiem jest, że najlepiej wykrywalnymi będą układy podwójne czarnych dziur. Poza tym przewidywana liczba wykrywalnych sygnałów fal grawitacyjnych ze zlewających się układów podwójnych czarnych dziur jest tak duża w prawie każdym modelu ewolucji, że wykrycie promieniowania grawitacyjnego przez detektory LIGO i Virgo jest prawie pewne.

W pracy założono docelową krzywą czułości detektorów. Byłoby użyteczne aby przedstawić te wyniki uwzględniając dochodzenie do planowanej czułości, które jest zaprezentowane we wspólnej pracy projektów LIGO i Virgo - *Prospects for Localization of Gravitational Wave Transients by the Advanced LIGO and Advanced Virgo Observatories*, J. Aasi et al. (<http://arxiv.org/abs/1304.0670>).

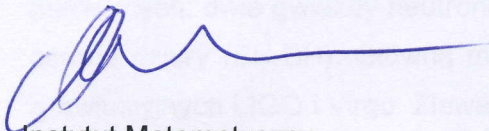
Praca jest zakończona dodatkiem. Praca byłaby bardziej czytelna gdyby w dodatku podano listę licznych akronimów używanych w rozprawie, jak np., CE czy RLOF. Mam również uwagę dotyczącą bibliografii. Dla prac, które nie zostały opublikowane, a które są dostępne w archiwum dobrze było podać dokładny adres internetowy, a nie tylko napisać „ArXiv e-prints”.

Uzyskane przez mgr. Dominika wyniki są znaczące i będą miały kluczowe znaczenie zarówno do poszukiwania fal grawitacyjnych w danych detektorów jak i astrofizycznych interpretacji tych danych. Prace, w których opublikowane są wyniki przedstawione w rozprawie doktorskiej Michała Dominika są już cytowane w tzw. *Białej Księdze* projektów LIGO i Virgo (<https://dcc.ligo.org/LIGO-T1400054/public>). W dokumencie tym znajdują się plany poszukiwań fal grawitacyjnych w danych z detektorów LIGO i Virgo. Jednym z planów jest poszukiwanie tych fal ze zlewających się układów podwójnych czarnych dziur gdzie rezultaty uzyskane przez mgr. Dominika są uwzględnione w astrofizycznej motywacji tych poszukiwań.

Wyniki otrzymane przez mgr. Dominika przedstawione w pracy doktorskiej zostały już opublikowane w dwóch pracach w *Astrophysical Journal*, a trzecia praca została złożona do tego czasopisma. We wszystkich trzech pracach Michał Dominik jest pierwszym autorem.

Podsumowując, praca mgr. Michała Dominika spełnia wymogi uzyskania stopnia naukowego doktora astronomii w zakresie astrofizyki teoretycznej. Ponadto ze względu na znaczenie otrzymanych wyników dla przyszłych obserwacji astronomicznych i dla potencjalnego bezpośredniego wykrycia promieniowania grawitacyjnego uważam, że praca doktorska mgr. Dominika zasługuje na szczególne wyróżnienie.

Prof. dr hab. Andrzej Królak



Instytut Matematyczny
Polska Akademia Nauk