



Warszawa 22.07.2023

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

***Ocena rozprawy doktorskiej mgr Aleksandry Olejak pt.
„The origin of binary black hole mergers.
Isolated binary evolution scenarios with and without a common
envelope phase”***

W swej rozprawie doktorskiej pani Aleksandra Olejak przedstawiła oryginalne wyniki badań dotyczących ścieżek ewolucyjnych mogących wyjaśniać pochodzenie układów podwójnych czarnych dziur (BH-BH) o parametrach mierzonych w obecnie trwających obserwacjach sieci detektorów interferometrycznych LIGO-Virgo-KAGRA. Już pierwsza historycznie detekcja zdarzenia GW150914 pokazała, że pochodziło ono z połączenia się dwóch czarnych dziur o masach 29 i 36 M_0 , czyli znacznie większych od szacowanych wcześniej mas czarnych dziur w rentgenowskich układach podwójnych. Tak więc, od samego początku obserwacyjnej astrofizyki fal grawitacyjnych, temat pochodzenia tak masywnych czarnych dziur skupił uwagę badaczy. Kolejne detekcje tylko wzmocniły to zainteresowanie, a zjawisko GW190814 dostarczając detekcji układu o największej, jak dotąd, dysproporcji mas: 23 M_0 i 2.6 M_0 wywołało dyskusję na temat dysproporcji mas w układach podwójnych zwartych obiektów oraz tzw. dolnej przerwy masowej sugerowanej przez wcześniejsze dane z obserwacji w dziedzinie fal elektromagnetycznych. Już kilka dekad wcześniej astrofizycy wypracowali kody ewolucyjne gwiazd w układach podwójnych. Ich zastosowania do badania ścieżek ewolucyjnych bardzo masywnych gwiazd $M_{ZAMS} \sim 20-100 M_0$ legły u podstaw kodów syntezy populacji intensywnie wykorzystywanych w aspekcie astrofizyki fal grawitacyjnych jeszcze przed pierwszą detekcją przez LIGO-Virgo. Jednym z pierwszych takich kodów, jest opracowany przez prof. Krzysztofa Belczyńskiego i prof. Tomasza Bulika kod *StarTrack* używany przez autorkę w swych badaniach. W dość dobrze poznanej i zrozumianej teorii ewolucji masywnych układów podwójnych, kilka ważnych szczegółów pozostaje słabo doprecyzowane. Są to na przykład: dokładne tempo reakcji $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ (jest to ważny brakujący element teorii ewolucji gwiazd w ogóle), rola fazy wspólnej otoczki (ogólnie szczegóły dynamiki transferu masy między składnikami), szczegóły wybuchu supernowej typu II – ożywienie stagnacji frontu fali uderzeniowej, anizotropia kolapsu jądra prowadząca do tzw. odrzutów przy narodzinach czarnej dziury (ang. *natal kicks*). Okazuje się, że rosnący materiał obserwacyjny w dziedzinie fal grawitacyjnych może posłużyć do zawężania przestrzeni



swobodnych parametrów opisujących słabo poznane szczegóły procesów ewolucyjnych gwiazd w układach podwójnych. Ten właśnie wątek jest przewodnim tematem rozprawy doktorskiej Pani mgr Olejak. Jest to zatem temat bardzo ważny dla astrofizyki i zarazem bardzo aktualny w świetle rosnącego materiału obserwacyjnego.

Przedstawiona mi do oceny rozprawa jest napisana w języku angielskim, obejmuje siedem rozdziałów poprzedzonych streszczeniem w języku angielskim i polskim, spisem dorobku publikacyjnego autorki (z linkami do prac) oraz spisem treści. Z opisu dorobku można się dowiedzieć, że Pani mgr Olejak jest współautorką 16 artykułów opublikowanych w renomowanych czasopismach: *The Astrophysical Journal* (ApJ), *ApJ Letters*, *MNRAS* oraz *Astronomy and Astrophysics*. W pięciu spośród nich jest ona pierwszą autorką. Prace te uzyskały do tej pory 707 cytowań. Jest to imponujący wynik jak na doktorantkę. Rozprawa doktorska oparta jest na 4 publikacjach, w których Pani mgr Olejak występowała w roli pierwszej autorki, wnosząc w ich powstanie dominujący wkład – na poziomie 65%-80%, jak wynika z załączonych oświadczeń doktorantki i współautorów.

Przechodząc do meritum – Rozdział 1 zawiera wprowadzenie w tematykę astrofizyki fal grawitacyjnych w zakresie zagadnień badanych w rozprawie. W oparciu o dane katalogu GWTC-3 zawierającego podsumowanie dotychczasowych detekcji fal grawitacyjnych pochodzących z ostatnich etapów ewolucji układów podwójnych zwartych obiektów, autorka omówiła uzyskane rozkłady mas i spinów zmierzonych w próbie 90 zdarzeń. W sposób zwięzły, lecz rzeczowy przedstawione zostały problemy dolnej i górnej przerwy masowej oraz procesy fizyczne mogące leżeć u ich podstaw, gdyby obie przerwy masowe okazały się ostatecznie realnością fizyczną. Podobna wyczerpująca dyskusja dotyczy spinów zlewających się czarnych dziur i konsekwencji rozkładu ich wartości dla scenariuszy powstawania układów BH-BH. Autorka przytoczyła też różne rozważane scenariusze, jak np. izolowane układy podwójne (do tej pory najczęściej badany scenariusz), dynamicznie tworzone układy BH-BH we wnętrzach gromad kulistych, gwiazdy populacji III czy pierwotne czarne dziury. Jest to bardzo dobrze napisany rozdział pokazujący kontekst prowadzonych przez doktorantkę badań oraz obrazujący jej bogatą wiedzę i zrozumienie tematu. Przytoczone ilustracje, zaczerpnięte z innych źródeł (z adekwatnym cytowaniem) są bardzo trafnie dobrane i świetnie spełniają swą rolę.

W rozdziale 2 syntetycznie przedstawiony został kod *StarTrack*, będący głównym narzędziem badań opisanych w rozprawie. Kolejne rozdziały przedstawiają cztery główne wyniki rozprawy. Autorka przyjęła tu konwencję, że po krótkim wprowadzeniu własnym do każdego rozdziału przytoczone są *in extenso* opublikowane artykuły składające się na rozprawę. I tak – rozdział 3 przedstawia pracę, opublikowaną w *The Astrophysical Journal*, napisaną w reakcji na zjawisko GW190412 zlania się dwóch czarnych dziur o dużej dysproporcji mas i znaczącym dodatnim spinie. Odkrycie to wywołało dyskusję na temat pochodzenia układu BH-BH. Pani mgr Olejak wraz ze współautorami, w oparciu o kod ewolucyjny *StarTrack*, zrekonstruowała ścieżkę ewolucyjną izolowanego układu podwójnego prowadzącą do końcowego układu BH-BH o podobnych własnościach.

Rozdział 4 dotyczy zrozumienia, słabo dotąd zbadanej obserwacyjnie, fazy wspólnej otoczki. Ta faza ewolucji układów podwójnych powstaje w wyniku przepełnienia się



powierzchni Roche'a masywniejszego donora, co z kolei prowadzi do transferu orbitalnej energii i momentu pędu do otoczki. W efekcie orbita ulega zacieśnieniu, co ma kapitalne znaczenie dla teoretycznego zrozumienia formowania się układów podwójnych zwartych obiektów (BH-BH, BH-NS, NS-NS) na tle ciasnych, aby mogły ulec koalescencji w czasie mniejszym od wieku Wszechświata. W swych badaniach Pani mgr Olejak wykorzystwała najnowszą wersję kodu *StarTrack* implementując zmodyfikowane scenariusze przepelniania powierzchni Roche'a. Głównym wynikiem pracy było wykazanie, że szczegóły ewolucyjnego etapu wspólnej otoczki (dynamiki przepływu przez powierzchnię Roche'a) są znaczące dla teoretycznych oszacowań tempa zlewania się zwartych układów podwójnych we Wszechświecie. Również funkcje rozkładu mas oraz stosunku mas zależą istotnie od zrozumienia tej fazy. Wyniki tych badań zostały opublikowane w *Astronomy and Astrophysics*.

Kolejny rozdział 5 omawia badania nad rozkładem spinów w populacji zwartych układów podwójnych BH-BH powstających w wyniku ewolucji układów izolowanych – w tzw. polu galaktycznym. Temat ten stał się aktualny po zgromadzeniu bogatego już materiału obserwacyjnego, w oparciu o który okazało się, że mimo iż większość rejestrowanych zdarzeń miała efektywny spin bliski zeru, jednak prawie 10% zjawisk posiadało znacząco dodatni, niezerowy spin efektywny. To z kolei, jak już było omawiane we wstępnym rozdziale rozprawy, skupiło uwagę badaczy nad rolą scenariuszy formowania się układów BH-BH alternatywnych do najczęściej dotąd rozważanego scenariusza ewolucji układów izolowanych. Posiadając już doświadczenia w zakresie roli fazy wspólnej otoczki, a w szczególności alternatywnej do niej fazy stabilnego transferu masy (oraz związanego z tym transferu momentu pędu) autorka wraz z promotorem podali scenariusze ewolucyjne prowadzące do formowania się układów o dużych dodatnich spinach efektywnych podczas koalescencji. Oznacza to, że dotychczasowe wyniki LVK nie dostarczają jeszcze silnych dowodów na odkrycie układów BH-BH powstałych kanałami innymi niż ewolucja układu izolowanego. Bardzo istotnym wynikiem było pokazanie, że ok. 2%-12% układów BH-BH może uzyskiwać spin bliski maksymalnego. Praca na ten temat ukazała się w *The Astrophysical Journal Letters*.

W rozdziale 6, natomiast, rozważane były konsekwencje pewnych szczegółów mechanizmu wybuchu supernowej na rozkład mas końcowych pozostałości tj. NS lub BH. Kluczowe znaczenie ma tu skala czasowa, wiodącego do eksplozji supernowej, ożywienia stagnacji frontu uderzeniowego powstałego po odbiciu się spadającej materii gwiazdy od sztywnego jądra (gwiazdy proto-neutronowej). Kod *StarTrack* został tu wzbogacony nowym opisem konwektywnej niestabilności ożywiającej stagnujący front. Opis ten został podany w jednej z innych prac doktorantki, w której była ona drugą autorką i nie włączyła jej w niniejszą rozprawę. Wyniki opublikowane w *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* pokazały, że rozkład mas pozostałości po wybuchu supernowej w istotny sposób zależy od skali czasowej konwekcji ożywiającej falę uderzeniową. W szczególności możliwe jest powstanie gwiazd neutronowych o masach 1.5-2.5 M_{\odot} , czyli częściowo wchodzących w obszar dolnej przerwy masowej. Również tempo powstawania układów NS-BH zależy istotnie od szczegółów mechanizmu eksplozji supernowej. Rozdział 7 podsumowuje krótko rozprawę i sygnalizuje oczekiwania odnośnie do przyszłych detektorów naziemnych kolejnej generacji.

Rozprawa jest napisana w sposób przejrzysty, czytelnie, dobrym językiem. W treści rozprawy nie znalazłem żadnych elementów, co do których mógłbym mieć jakiegokolwiek uwagi



krytyczne. Jedyne co zauważyłem, to oczywista literówka na stronie 3 w nazwie pierwszego historycznie zarejestrowanego zjawiska „GW1400915” zamiast GW140915. Oceniam rozprawę jako bardzo dobrą.

Reasumując, uzyskane przez doktorantkę, oryginalne wyniki zawarte w przedstawionej mi do oceny rozprawie oraz sposób ich prezentacji wskazujący na bardzo dobrą znajomość tematyki związanej z szeroko pojętą astrofizyką fal grawitacyjnych, teorią ewolucji gwiazd w układach podwójnych oraz metod numerycznych, a w szczególności metody syntezy populacji sprawiają, że rozprawa spełnia formalne, ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie pani mgr Aleksandry Olejak do dalszych etapów przewodu doktorskiego i do publicznej obrony. W moim przekonaniu rozprawa zasługuje na wyróżnienie.

Prof. dr hab. Marek Biesiada