

Warszawa, 7 maja 2016

Recenzja z pracy doktorskiej mgr Grzegorza Wiktorowicza,
pt. "X-ray Binaries and Ultraluminous X-ray Sources".

Praca doktorska pana magistra Grzegorza Wiktorowicza liczy sześć rozdziałów, poprzedzonych krótkim wstępem i użyteczną listą skrótów i zakończonych podsumowaniem, listą ilustracji i bibliografią. Do pracy załączony są trzy krótkie aneksy dotyczące metod numerycznych użytych w omawianej pracy. Całość pracy, napisanej w języku angielskim, liczy 130 stron.

Rozprawa mgr Wiktorowicza poświęcona jest kilku nierozwiązanym problemom ewolucji ciasnych układów podwójnych zawierających czarne dziury lub gwiazdy neutronowe i wnosi istotny wkład do ich zrozumienia, choć ich nie rozwiązuje. Wyniki pracy mgr Wiktorowicza podają kilka obiecujących tropów, wskazujących na kierunki, którymi powinny podążać dalsze badania nad pochodzeniem i ewolucją ciasnych układów podwójnych zawierających zwarte ciała niebieskie. Jak można się dowiedzieć z posumowania pracy, jej autor rozpoczął już badania zmierzające do tego celu.

Praca poświęcona jest trzem podstawowym problemom na jakie napotykamy porównując modele ewolucyjne ciasnych układów rentgenowskim z obserwacjami: 1. Istnienie przerwy w rozkładzie mas między masami gwiazd neutronowych (ograniczonych z góry przez maksymalną masę około $3M_{\odot}$, a masami czarnych dziur, które zgodnie z obserwacjami rozpoczynają od 5-6 M_{\odot} , mimo braku teoretycznej dolnej granicy na masę tych obiektów; 2. Niezgodność między obserwowanymi a obliczonymi w rachunkach ewolucyjnych, wartościami mas składników ciasnych układów podwójnych zawierającymi czarne dziury; i wreszcie 3. Pytanie: czy, jeśli ultrajasne źródła rentgenowskie zwane ULXami różnią się od "zwykłych" rentgenowskich tempem akrecji a nie masą czarnej dziury, można odtworzyć ich obserwowaną populację używając znanych schematów ewolucji tych układów? We wszystkich trzech przypadkach rachunki numeryczne są przeprowadzane przy pomocy kodu StarTrack autorstwa promotora recenzowanej pracy, profesora Krzysztofa Belczyńskiego. Wyniki badań nad problemem 1. zostały przedstawione w artykule opublikowanym w 2012, w *Astrophysical Journal* - mgr Wiktorowicz jest jego drugim autorem i, zgodnie ze swoim oświadczeniem, jego wkład do pracy wynosił 40%. Wyniki osiągnięte badając problem 2. zostały zamieszczone w aktach konferencji na temat ewolucji układów, która odbyła się w 2014 roku w Ulan Bator, w Mongolii. Wreszcie, rezultaty badań nad punktem 3. zostały opublikowane w roku 2015 w *Astrophysical Journal*. W tych dwóch ostatnich przypadkach, mgr Wiktorowicz jest pierwszym autorem prac a jego wkład do nich był 80 procentowy.

Pierwszy Rozdział pracy doktorskiej poświęcony jest przeglądowi własności podwójnych układów rentgenowskich i zawiera definicje podstawowych pojęć, które będą w pracy użyte. Omówione są w tym rozdziale zarówno własności obserwacyjne jak i teoretyczne modele powstawania i ewolucji ciasnych układów podwójnych zawierających czarne dziury albo gwiazdy neutronowe. Przegląd jest dość starannie napisany i zawiera większość informacji potrzebnych do zrozumienia rozdziałów zawierających wyniki badań będących podstawą recenzowanej pracy doktorskiej. Zdaniem niniejszego recenzenta, zbyt dużo miejsca poświęcone jest tzw. stanom widmowym i QPO, a niedostatecznie omówione są wybuchy dysków i ich przyczyny. Rozumiem chęć pełnego omówienia własności obiektów badanych w tej pracy, ale ani stany spektralne ani QPO nie mają wielkiego znaczenia w badaniach ewolucji podwójnych układów rentgenowskich, podczas gdy fakt, nie wymieniony (o ile się nie mylę) w pracy, że wszystkie mało-masywne układy zawierające czarne dziury są przejściowe (może z jednym wyjątkiem), a wśród układów zawierających gwiazdy neutronowe, tylko niektóre zaliczają się do tej klasy obiektów, jest jednym z głównych nierozwiązanych problemów ewolucji ciasnych układów podwójnych i wymagałby głębszego omówienia wybuchów dyskowych. Rozdział pierwszy zawiera pewne nieścisłości i błędy, co jest nieuniknione w tego rodzaju przeglądach, pisanych niejako z konieczności i nie będę o nich wspominać w recenzji bo nie mają wpływu ani na treść ani na wyniki pracy doktorskiej, ale o jednym błędzie muszę jednak wspomnieć, bo jest poważny, choć też, na szczęście, bez dalszych skutków dla recenzowanej pracy. Na stronie 16 autor utrzymuje, że "promień horyzontu (...) widziany jako umowny promień CD [czarnej dziury]" jest równy (i tu autor, na swoje nieszczęście cytuje Schwarzschilda 1916) $R_{BH}=R_s=GM/c^2$. Jest oczywiste, że autor padł ofiarą nieporozumienia wywołanego (zbyt) częstym użyciem w literaturze jako jednostki długości, tzw. "promienia grawitacyjnego", który równy jest połowie promienia Schwarzschilda, a więc połowie promienia nierotującej czarnej dziury. Spuśćmy jednak litościwie zasłonę milczenia na ten nieszkodliwy, ale ambarasujący błąd w pracy doktorskiej z fizyki.

Następny rozdział omawia ultrajasne źródła rentgenowskie, zwane od angielskiego skrótu "ULX". Temat kontrowersyjny, choć mniej niż kilka lat temu gdy zwolennicy czarnych dziur o masach pośrednich byli bardzo słyszalni. Teraz uwiesili się ostatniej gałęzi ratunku, którą, jak im się wydaje, są HLX-1 w galaktyce ESO 243-49 i ULX X-1 w galaktyce M82. Autor pracy przedstawia raczej obiektywny obraz sytuacji i podaje rzetelnie fakty obserwacyjne dotyczące ULXów. Jeśli chodzi o aspekty teoretyczne, to myślę że niedostateczny nacisk położono na podstawowy fakt, że Eddingtonowskie tempo akrecji nie jest, w przypadku czarnych dziur, żadnym tempem granicznym, co powinno być powszechnie wiadome od 1974 roku, gdy zostało to wykazane w pracy doktorskiej Mitcha Begelmana, a niestety nie jest. Niniejszy recenzent przeczytał z pewną przykrością, że jego model ekscentrycznego układu podwójnego dla HLX-w ESO 243-49 opublikowany w *Astrophysical Journal* w 2011 roku, został przypisany Sorii (2013).

Rozdział trzeci rozpoczyna część pracy poświęconą wynikom naukowym otrzymanym przez jej autora. Chodzi o wytłumaczenie przerwy w rozkładzie mas zwartych pozostałości po masywnych gwiazdach, które zakończyły swoją ewolucję termojądrową. Przerwa ta oddziela masy gwiazd neutronowych od mas czarnych dziur mimo, że a priori ten rozkład mógłby być ciągły i nie

jest oczywiste dlaczego miałyby nim nie być. Mgr Wiktorowicz i jego współpracownicy wykazali, że istnienie przerwy w rozkładzie masy może zależeć od mechanizmu wyrzucającego, podczas wybuchu supernowej, otoczkę masywnej gwiazdy będącej przodkiem ciała zwartego, a ściślej rzecz biorąc od szybkości, czy też raczej nagłości tego procesu. W przypadku gdy wyrzut jest szybki, w wyniku ewolucji otrzymuje się przerwę w rozkładzie masy powstałych ciał zwartych, podczas gdy w przypadku mechanizmu "opóźnionego", rozkład tych mas jest ciągły. Wynik ten był znany w przypadku ewolucji gwiazd pojedynczych, ale była to informacja interesująca tylko częściowo, wzięwszy pod uwagę fakt, że masy ciał zwartych znamy tylko w układach podwójnych, których ewolucja często modyfikuje stosunek mas składników. Wynik przedstawiony w pracy jest więc bardzo interesujący i znaczący jako, że być może, "brakujące" czarne dziury o małych masach odsłaniają mechanizm wybuchu supernowych typu "core-collapse". "Być może" dlatego, że istnieją jeszcze różne inne wyjaśnienia, które dokładnie i uczciwie są przez autora rozprawy przedstawione i przedyskutowane. Nie tylko nie zmienia to ważności wyniku ale raczej dodaje mu to wartości.

W następnym rozdziale pracy, mgr Wiktorowicz zabrał się za problem niezgodności standardowego modelu ewolucji ciasnych układów podwójnych z obserwowanym rozkładem mas gwiazdowych towarzyszy czarnych dziur w mało-masywnych rentgenowskich układach podwójnych - "mało-masywność" dotyczy towarzysza, będącego darczyńcą materii spadającej na czarna dziurę. Problem jest prosty: obserwacje pokazują, że rozkład mas gwiazd-darczyńców skoncentrowany jest wokół wartości $0.6 M_{\odot}$, podczas gdy zgodnie z modelami ewolucyjnymi masy te są skupione wokół $1 M_{\odot}$. Zazwyczaj podejrzany o spowodowanie konfliktu między faktami a modelami są ewolucyjna faza wspólnej otoczki i magnetyczny mechanizm utraty orbitalnego momentu pędu, napędzającego ewolucję w pewnych jej fazach. Używając kodu StarTrack, autor pracy zbadał różne wersje opisu fazy wspólnej otoczki i doszedł do wniosku, że nie w niej należy szukać ratunku przed niewłaściwym rozkładem mas gwiazdowych składników rentgenowskich układów podwójnych zawierających czarne dziury. Żadne z mniej lub bardziej rozsądnych zmodyfikowanych mechanizmów wyrzutu wspólnej otoczki nie daje oczekiwanych wyników. Autor stwierdza, że problem jest głębszy niż to się wydawało uprzednio, co odzwierciedla raczej jego młodzieńczy optymizm, niż rzeczywisty stan rzeczy, ale nie można go za to, rzecz jasna, winić. Próby modyfikacji mechanizmu magnetycznego hamowania ruchu orbitalnego są, zdaniem autora, bardziej obiecujące, ale nigdy nie są całkowicie zadowolające. Przy okazji, autor poddaje krytycznej próbie wyłączenie mechanizmu magnetycznego hamowania, zaproponowane przez Lwa Jungelzona i niżej podpisanego i dochodzi do wniosku, że nie tędy droga, gdyż mimo, że rozkład mas składników gwiazdowych może być mniej więcej zgodny z obserwacjami, rozkład mas czarnych dziur z obserwacjami nie wydaje się mieć nic wspólnego. Wydaje mi się, że wniosek ten jest zbyt pochopny, gdyż nie można wykluczyć istnienia populacji bardzo krótko-okresowych, ze skrajnie małymi stosunkami mas, w których akrecja mogłaby być niemożliwa, a w każdym razie niestandardowa, a w której to populacji znajdowałyby się czarne dziury o "nieodpowiednich" masach, ale nie czynię autorowi z tego powodu wyrzutów. Za to, jego wiara w wyniki obserwacji mających świadczyć nie tylko o istnieniu magnetycznego hamowania w krótko-okresowych rentgenowskich układach podwójnych, ale o wydajności magnetycznego hamowania znacznie

przewyższającej standardową, wydaje mi się przykładem, typowego dla teoretyków, zbyt dużego zaufania do wyników obserwacji, nawet gdy ich konsekwencje są absurdalne. Te uwagi nie zmieniają mojej zgody z wnioskiem autora pracy, że niemożność odtworzenia obserwowanej populacji mało-masywnych układów rentgenowskich przez standardowe lub zmodyfikowane schematy ewolucyjne, świadczy o głębokim problemie, jaki mamy ze zrozumieniem i opisem jakiegoś podstawowego procesu fizycznego z tą ewolucją związanym. Jest to wartościowy wynik a informacja o tym, że nie chodzi o fazę wspólnej otoczki jest bardzo cenna.

Następny rozdział poświęcony jest możliwym kanałom ewolucyjnym ULXów traktowanych jako układy podwójne zawierające czarne dziury o masach gwiazdowych. Rachunki ewolucyjno-populacyjne przeprowadzone przy pomocy Star-Tracka pokazują, że obserwowana populacja ULX może zawierać czarne dziury o masach gwiazdowych, gdyż w ramach ewolucji takich układów występuje faza o bardzo wysokim przepływie masy. Wynikiem, który bardzo zainteresował niżej podpisanego, jest konkluzja, że połowa "ekstremalnych" ULX zawiera gwiazdy neutronowe, gdyż jest to wniosek, do którego doszedł na innej drodze w swojej niedawnej pracy z Andrew Kingiem. Choć autor doktoratu tę pracę cytuje, wydaje się być zakłopotany swoim wynikiem odnosząc się do rzekomego konsensusu na temat tego, że takie ULXy zawierają wyłącznie czarne dziury. Konsensus w nauce o niczym nie świadczy i zamiast się tłumaczyć ze swego ważnego wyniku, autor powinien był szukać argumentów na jego potwierdzenie. Ale rozumiem, że pisząc doktorat niełatwo się na to zdobyć i nie robię mu z tego zarzutu. Jego wyniki w tej dziedzinie są bardzo ważne i obiecujące i dobrze jest, że kontynuuje on badania w tej dziedzinie.

W konkluzji stwierdzam, że praca doktorska mgr Grzegorza Wiktorowicza zawiera szereg ważnych wyników naukowych o pierwszorzędym znaczeniu dla zrozumienia podstawowego procesu jakim jest ewolucja ciasnych układów podwójnych.

Warto też dodać, że pracę złożoną w tradycyjnej formie, a nawet w twardej okładce, czyta się przyjemnie, choć dodatkowe jej przeczytanie i poprawienie drobnych błędów, nie przyniosłoby jej szkody.

Przedłożona do oceny rozprawa spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Ze względu na wartość naukową otrzymanych w niej wyników wnoszę również o jej wyróżnienie.



Jean-Pierre Lasota-Hirszowicz