



ul. Bartycka 18, 00-716 Warszawa  
tel: (22)651-05-00, (22)841-00-41  
fax: (22)841-00-46  
email: camk@camk.edu.pl  
http://www.camk.edu.pl/

## CENTRUM ASTRONOMICZNE IM. MIKOŁAJA KOPERNIKA PAN

Andrzej A. Zdziarski, aaz@camk.edu.pl, +48 22 3296 110, mobile +48 664976684

Warszawa, 21.05.2016

### ***Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Grzegorza Wiktorowicza p.t. „X-RAY BINARIES AND ULTRALUMINOUS X-RAY SOURCES”***

Rozprawa doktorska mgr Grzegorza Wiktorowicza poświęcona jest badaniom rentgenowskich układów podwójnych, ze szczególnym uwzględnieniem układów charakteryzujących się bardzo dużą obserwowaną jasnością ('ultraluminous X-ray sources', w skrócie ULX).

Rozdziały 1 i 2 stanowią wstęp do tych zagadnień. Rozdział 3 poświęcony jest zagadnieniu wyjaśnienia braku obserwowanych czarnych dziur w zakresie powyżej maksymalnej możliwej masy gwiazdy neutronowej, zapewne ok.  $2,5 M_{\odot}$  (obecnie obserwowana maksymalna masa to  $2 M_{\odot}$ ), a poniżej ok.  $5 M_{\odot}$ . Rozdział ten stanowi praca w *The Astrophysical Journal*, 2012, Belczyński, Wiktorowicz, Fryer, Holz i Kalogera, do której wkład mgr Wiktorowicza wynosi 40%. Jest to znakomita praca, która osiągnęła w chwili obecnej 72 cytowania (wg NASA ADS, najpełniejszej bazy danych w astrofizyce). Autorzy tej pracy ustalili, że brak tych obiektów narzuca silne ograniczenie na mechanizmy wybuchu supernowej, mianowicie niestabilności poprzedzające eksplozję muszą narastać w krótkim czasie, ok. 10–20 ms. W świetle naszej ciągle dość ograniczonej wiedzy o wybuchach supernowych, jest to naukowo bardzo istotny wynik. Rozdział ten (oraz następujące rozdziały) używa symulacji ewolucji gwiazd przy użyciu programu do syntezy populacji StarTrack, opisanego w pracach Belczyński i in. (2002, 2008).

Rozdział 4 poświęcony jest zagadnieniu wspólnej otoczki, etapu ewolucji gwiazd w układach podwójnych, w czasie której obie gwiazdy poruszają się wewnątrz odrzuconej zewnętrznej warstwy jednej z gwiazd. Etap ten prowadzi do znacznego zacieśniania orbity. Rozdział ten stanowi praca Wiktorowicz, Belczyński i Maccarone, 2014, wydrukowana jako materiał konferencyjny. Wkład do niej mgr Wiktorowicza wynosi 80%. Autorzy stawiają sobie za cel wyjaśnienie obserwowanego rozkładu mas składników rentgenowskich układów podwójnych z donorami o małych masach ( $\lesssim 2 M_{\odot}$ ). Silne maksimum rozkładu masy donorów jest obserwowane na  $0,5\text{--}0,7 M_{\odot}$ , średnia obserwowana masa gwiazd neutronowych to ok.  $1,4 M_{\odot}$ , a średnia masa czarnych dziur w tych układach to ok.  $7 M_{\odot}$ . Aby odtworzyć te rozkłady autorzy badają szereg scenariuszy ewolucyjnych przy użyciu programu syntezy populacji StarTrack. Scenariusze te różnią się między sobą parametryzacją fazy wspólnej otoczki, w oparciu o wcześniejsze publikacje, oraz założeniami dotyczącymi prędkości transferu masy pomiędzy składnikami oraz maksymalnej masy gwiazdy neutronowej. Autorzy stwierdzają, że żaden z badanych scenariuszy nie jest w stanie odtworzyć obserwowanych rozkładów mas. Jest to wynik negatywny, ale naukowo bardzo ważny, bo dostarcza istotnego punktu odniesienia dla dalszych badań.

Rozdział 5 poświęcony jest próbie wyjaśnienia najbardziej jasnych ze źródeł typu ULX. Jest to praca w *The Astrophysical Journal*, 2015, Wiktorowicz, Sobolewska, Sądowski i Belczyński, do której wkład mgr Wiktorowicza wynosi 80%. Autorzy rozważają trzy modele zakładając przepływ przez powierzchnię Roche'a. W pierwszym zakładają, że 100% materii z donora spada na obiekt zwarty, argumentując, że to raczej nierealistyczne założenie daje górną granicę na jasność. W modelu drugim i trzecim uwzględniają wiatr z dysku akrecyjnego, zmniejszający akreowaną część materii, korzystając z rezultatów dwóch prac symulujących akrecję. W modelu trzecim przyjęty stopień tej redukcji jest niezależny od prędkości akrecji i równy 0.01, co jest raczej mało dokładnym przybliżeniem. We wszystkich trzech modelach autorzy zakładają, że wydajność promienista dla materii akreowanej na obiekt zwarty dla dowolnie dużych prędkości akrecji jest taka jak dla geometrycznie cienkiego dysku (z uwzględnieniem warstwy brzegowej w przypadku gwiazdy neutronowej), czyli maksymalna możliwa, co jest nierealistycznym założeniem. Używając programu StarTrack, liczą następnie przewidywaną ilość źródeł ULX wewnątrz danego promienia, rozkład mas gwiazd, ich ewolucję i maksymalne jasności rentgenowskie. Autorzy stwierdzają, że przy powyższych założeniach są oni w stanie otrzymać źródła o bardzo dużych jasnościach, ale dla najbardziej realistycznego z trzech przyjętych modeli, przewidywana ilość obserwowanych źródeł ULX jest bliska zeru, w sprzeczności z obserwacjami.

Rozdział 6 jest kontynuacją studium źródeł ULX. Autor kontynuuje rozważanie trzech modeli z rozdz. 5, ale dodatkowo rozważa czwarty model, w którym bierze pod uwagę redukcję wydajności promienistej dla dużych prędkości akrecji, zgodnie ze znanym wzorem, podanym pierwszy raz przez Shakurę i Sunyaeva w 1973. Dokładna zależność funkcjonalna tej redukcji pozostaje nadal nieznaną; wzór ten wydaje się on nieco zaniżać prawdziwą jasność, ale np. Sądowski i in. (2016) dyskutując wyniki swoich symulacji proponują jego użycie. W czwartym modelu wzięta jest też pod uwagę zależność stopnia geometrycznej kolimacji emisji od prędkości akrecji, używając wzoru z pracy King (2009). Używając programu StarTrack, liczone są następnie teoretyczne rozkłady ilości źródeł o danej obserwowanej (tzn. przy założeniu izotropowej emisji źródła) jasności rentgenowskiej ('X-ray luminosity function'). Rozkłady te są następnie porównywane z obserwacjami. Wyniki są bardzo interesujące. Dla pierwszych trzech modeli otrzymuje on nadwyżki bardzo jasnych źródeł względem obserwacji. Natomiast czwarty, najbardziej realistyczny model, daje znaczny niedobór źródeł ULX o dużych jasnościach.

Rozdział 6 poświęcony jest badaniom w toku, jego wyniki też są bardziej zaawansowanym i realistycznym studium źródeł ULX niż rozdział 5. Mam następujące uwagi do rozdziału 6. Kluczowy wzór (6.2) opisujący kolimację jest błędny, potęga  $\dot{m}$  powinna być  $-2$  a nie  $-1$ . Zakładam, że jest to błąd typograficzny; wartość tej potęgi ma bardzo duży wpływ na wyniki tego modelu. Wzory (6.1–6.2) z powyższą poprawką stosują się tylko dla dużych wartości  $\dot{m} \gtrsim 10$ ; autor nie podaje, jakiego wzoru używa dla mniejszych  $\dot{m}$ . Wzór (6.2) też implikuje, że emisja jest obserwowana tylko w kącie bryłowym odpowiadającym  $(1 - \cos \theta) \leq b$ . W tekście nie ma odpowiadającego opisu, zakładam, że efekt ten jest uwzględniony. Kluczową kwestią dla dalszych badań jest ustalenie jak najbardziej realistycznego związku pomiędzy jasnością rentgenowską a prędkością akrecji,  $\dot{m}$ , oraz ustalenie zależności kąta kolimacji od  $\dot{m}$ . Sugerowałbym tu współpracę w dr Aleksandrem Sądowskim z MIT, który obecnie te problemy bada. Bardzo interesujące by było również zbadanie, jaki fenomenologiczny związek  $L_X(\dot{m})$  odtwarza obserwowany rozkład  $L_X$ .

Praca niestety zawiera względnie dużą liczbę drobnych błędów oraz mało precyzyjnych stwierdzeń. Wymieniam poniżej niektóre z nich.

Rys. 1.1. Błędny wzór na odległość periastronu w legendzie, błędny wzór na  $b$  na rysunku.

Rys. 1.2. Stwierdzenie, że w potencjale Roche'a L1–5 wszystkie punkty Lagrange'a są metastabilne jest błędne. Tylko L4 i L5 są metastabilne (a ich stopień metastabilności zależy od masy cząstki w L4/5). L1–3 odpowiadają niestabilnej równowadze.

Wzór 1.2. Promień Schwarzschilda (horyzontu nierotującej czarnej dziury) to  $2GM/c^2$ , nie  $GM/c^2$ . Promień horyzontu zależy do spinu, horyzont jest na  $1GM/c^2$  tylko dla maksymalnie rotującej czarnej dziury. Jest to bardzo fundamentalna cecha czarnych dziur.

Rozdział 1.2.1 ma tytuł 'Mass transfer', implikujący opis efektu przepływu masy z jednego składnika na drugi. Przepływ taki może prowadzić zarówno do kurczenia i rozszerzania orbity. Rozszerzanie zachodzi np. przy stałym momencie pędu i transferze z gwiazdy mniej masywnej na bardziej masywną lub przy momencie pędu traconym poprzez emisję fal grawitacyjnych w układzie biały karzeł – gwiazda neutronowa. Ale autor podsumowuje swój opis jako 'orbital shrinking processes'.

Wzór 1.4 – nie zgadza się wymiar, zapewne wymienione wielkości są jakoś znormalizowane, co nie jest podane.

Rozdz. 1.2.2. Wydajność cienkiego dysku akrecyjnego w metryce Schwarzschilda nie wynosi 1/12 tylko  $1-(8/9)^{1/2}$ . Natomiast prawdziwa promienista wydajność dla dużych prędkości akrecji jest nadal słabo znana, i jej ustalenie jest skomplikowanym problemem, zob. np. Sądowski i in. (2015, 2016). Z drugiej strony, całkowita wydajność akrecji na gwiazdy neutronowe wydaje się być znacznie prostszym problemem, wbrew stwierdzeniu w tym rozdziale. Za wyjątkiem bardzo szybko rotujących gwiazd, wystarczy tu policzyć różnicę potencjałów grawitacyjnych na powierzchni gwiazdy i daleko od niej. Obecność pola magnetycznego ma tu jedynie wpływ na względny wkład emisji dysku akrecyjnego. Z kolei w rozdziale 5.1.1 autor pisze, że wydajność standardowego dysku akrecyjnego wokół gwiazdy neutronowej to ok. 0.2. Należy zauważyć, że jest to łączna wydajność dysku i warstwy brzegowej, z dominującym wkładem warstwy.

Rozdz. 1.3. 'XRBs spend most of the time in the quiescent state' – to dotyczy tylko LMXBs. Stwierdzenie, że temperatura jonizacji wodoru to 65000 K (podając dwie cyfry znaczące) jest nadmiernym uproszczeniem. Z równania Sahy wynika, że temperatura, przy której dana część wodoru jest zjonizowana zależy od gęstości. Np. epoka rekombinacji wodoru we wczesnym Wszechświecie odpowiadała temperaturze ok. 3000 K. Rząd wielkości temperatury typowo podawany w kontekście dysków akrecyjnych to  $10^4$  K.

Rozdz. 1.4.1. 'all known HMXB systems contain only NS accretors' – to stwierdzenie dotyczy tylko układów z gwiazdami Be (ale też z jednym wyjątkiem, niedawno odkrytym). Np. Cyg X-1 zawiera gwiazdę OB o dużej masie i czarną dziurę, też szereg układów HMXB w innych galaktykach zawiera czarne dziury (np. IC 10 X-1, M33 X-7).

Ostatni akapit rozdz. 1.4.1. Pierwsze zdanie tego akapitu pozostaje w sprzeczności z następnym.

Rozdz. 1.4.2. 'a LMXB must be a very close binary' – jest to raczej zbyt ogólne stwierdzenie, np. GRS 1915+105 ma okres ok. 34 dni i nie wydaje się być bardzo ciasnym układem.

Rozdz. 1.4.2. Dyskusja widm rentgenowskich zawiera stwierdzenie 'disk in LMXB have temperatures small enough for the outburst mechanism to operate'. Te niskie temperatury zachodzą w zewnętrznych częściach dysku i są różne od temperatury dyskutowanej tu termicznej składowej widma rentgenowskiego.

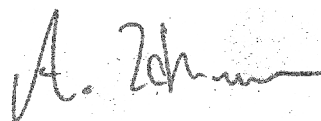
Rozdz. 1.5.2. Pierwsze zdanie wydaje się dotyczyć tylko układów HMXB z gwiazdami neutronowymi.

Rozdz. 4.1.1. Parametr  $\alpha$  to stosunek energii użytej na odrzucenie otoczki gwiazdy do różnicy energii wiązania układu po i przed fazie wspólnej otoczki, a nie do całkowitej energii wiązania.

Rozdz. 5.1.2 i 5.1.3. Autor definiuje tu dwie prędkości akrecji, krytyczną i Eddingtonowską. Należy zauważyć, że w obu przypadkach chodzi o tę samą wielkość, odpowiadającą granicy Eddingtona; w pierwszym przypadku jest to ona zdefiniowana dla składu kosmicznego materii, bez uwzględnienia wydajności promienistej akrecji i w jednostkach  $M_{\odot}/\text{rok}$ , a w drugim, dla wodoru, z uwzględnieniem wydajności w metryce Schwarzschilda i w jednostkach g/s. Ujednolicenie notacji by uczyniłoby te podrozdziały bardziej przejrzystymi.

Pomimo tych usterek, niniejsza rozprawa doktorska zawiera ważne wyniki naukowe. Bardzo ważny naukowo wynik, wyjaśniający obserwowany rozkład mas gwiazd neutronowych i czarnych dziur jest przedstawiony w rozdziale 3. Rozdział 4 bada bardzo trudny problem wspólnej otoczki i osiąga ważne wyniki, przybliżające nas do jego rozwiązania. Rozdziały 5 i 6 poświęcone są bardzo ważnemu naukowo problemowi fizycznego wyjaśnienia bardzo wysokich jasności obserwowanych ze źródeł ULX. Stanowią one ważny punkt wyjściowy dla dalszych badań.

Reasumując, stwierdzam, że rozprawa spełnia zwyczajowe i ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie do publicznej obrony.



Prof. dr hab. Andrzej A. Zdziarski