

Dr hab. Dorota Rosińska, prof. UW  
Obserwatorium Astronomiczne  
Uniwersytet Warszawski  
Aleje Ujazdowskie 4  
00-478 Warszawa

### ***Recenzja pracy doktorskiej mgr Łukasza Klepczarka***

#### ***pt. "Relativistic reflection from accretion discs in Seyfert galaxies and black-hole binaries: black hole spin and geometrical parameters of the X-ray source and the disk "***

Praca doktorska mgr Łukasza Klepczarka poświęcona jest badaniu wybranych źródeł rentgenowskich zawierających akreującą czarną dziurę. W szczególności przeprowadzona została dogłębna analiza promieniowania rentgenowskiego z Cyg X-1 oraz galaktyki Seyferta 1H0707-495 przy zastosowaniu nowego wewnętrznie konsystentnego modelu odbicia. Spektroskopia odbicia jest jednym z najskuteczniejszych narzędzi umożliwiających badanie najbliższego otoczenia akreującej czarnej dziury. Pozwala wyznaczyć spin czarnej dziury oraz narzucić ograniczenia na modele.

Dysertacja mgr Łukasza Klepczarka napisana w języku angielskim, składa się z pięciu rozdziałów, jednego dodatku, 5 tabel, 39 rysunków oraz obszernej bibliografii zawierającej ponad 130 pozycji. Rozdział pierwszy stanowi obszerny, klarownie napisany wstęp, podzielony na 9 podrozdziałów. Jest on przeglądem najważniejszych wyników dotyczących procesów czarnych dziur z położeniem nacisku na akreujące gwiazdowe czarne dziury lub supermasywne czarne dziury występujące w centrach galaktyk. Przedstawiony jest aktualny stan wiedzy na temat czarnych dziur i modelowania ich bliskiego otoczenia. Opis zawiera informacje na temat dysków akrecyjnych, geometrii korony, relatywistycznego odbicia, spinu czarnych dziur oraz obserwowanych stanów spektralnych w promieniowaniu X w układach zawierających akreującą czarną dziurę. Zamieszczone są poglądowe rysunki oraz podstawowe wzory matematyczne. Poruszony jest też problem spinów i mas czarnych dziur obserwowanych w promieniowaniu rentgenowskim i za pomocą interferometrycznych detektorów fal grawitacyjnych. Gwiazdowe czarne dziury obserwowane w rentgenowskich układach podwójnych mają masy poniżej 20 mas słońca, a te w falach grawitacyjnych są znacznie masywniejsze i w kilku przypadkach powstająca w wyniku koalescencji czarna dziura ma masę powyżej 100 mas Słońca. Z kolei spiny czarnych dziur obserwowanych w falach grawitacyjnych są bardzo małe podczas gdy niektóre modele opisujące rentgenowskie układy podwójne wymagają ekstremalnie wysokich spinów akreujących czarnych dziur. Ostatni podrozdział zawiera podsumowanie i główne założenia oraz cele rozprawy doktorskiej.

Rozdział drugi poświęcony jest spektroskopii odbicia przy uwzględnieniu skończonego rozmiaru korony, jej rotacji oraz wertykalnego wpływu. Badania rozszerzone są o nową analizę w stosunku do pracy Szanecki et al. 2020. Ciekawym wynikiem jest pokazanie, że założenie punktowego źródła promieniowania X (modele lamp-post) jest dobrym przybliżeniem nie tylko w przypadku małego rozmiaru korony, ale również z rozległą koroną, gdy dysk jest nieobcięty.

Główne wyniki pracy zawarte są w rozdziałach 3 i 4. Rozdział 3 poświęcony jest modelowaniu Cyg X-1 w stanie twardym przy użyciu danych z NuSTAR oraz Suzaku. Doktorant zastosował model odbicia z wpływem z korony w celu narzucenia ograniczeń na parametry źródła, dysku akrecyjnego oraz na spin czarnej dziury. Pokazał, że widmo Cyg X-1 jest konsystentne z dwoma różnymi modelami. Niezależnie od modelu nie udało się za pomocą spektroskopii odbicia wyznaczyć spinu czarnej dziury przy dostępnych danych obserwacyjnych.

Rozdział 4 zawiera wyniki analizy szybko-zmiennej galaktyki Seyferta 1H 0707-495 w całym zakresie detektora XMM, od 0.3 do 10 keV. Doktorant analizował 15 XMM obserwacji z okresu 2000-2011 w celu narzucenia ograniczeń na parametry źródła. Doktorant pokazał, że obserwowane widmo w promieniowaniu rentgenowskim może być dobrze wytłumaczone modelem w którym zwarta korona znajduje się w bliskiej odległości oświetlonego dysku i szybko rotującej czarnej dziury. Korona rotująca z prędkością Keplerską ISCO daje zgodną z obserwacjami ilość promieniowania odbicia. Z kolei model przy założeniu dysku o dużej gęstości, zaproponowany przez innych autorów jest mało prawdopodobny.

W ramach pracy nad rozprawą doktorską, mgr Klepczarek samodzielnie wykonał redukcję danych obserwacyjnych, następnie przeprowadził pełną analizę danych przy zastosowaniu wielu modeli z różnymi założeniami dotyczącymi parametrów źródeł rentgenowskich. Otrzymane przez doktoranta wyniki wymagały dużego doświadczenia, dociekliwości, skrupulatności oraz ogromnego nakładu pracy.

Rozprawa doktorska pokazuje, że mgr Klepczarek jest w pełni ukształtowanym, niezależnym, młodym naukowcem, dysponującym bardzo dobrym przygotowaniem zarówno w zakresie wiedzy teoretycznej jak i interpretacji i analizy danych obserwacyjnych. Mgr Klepczarek jest autorem dwóch publikacji w czasopismach renomowanych z czego pierwszym autorem pracy opublikowanej w MNRAS w 2023 "Lamb-post with an outflow and the hard state of Cyg X-1" w której zawarta jest część wyników przedstawionych w rozdziale 3 rozprawy doktorskiej.

Nie mam zastrzeżeń do merytorycznej części doktoratu. Opis otrzymanych wyników jest wyczerpujący i spójny. Przeprowadzona jest rzeczowa dyskusja wyników z podaniem problemów związanych z założeniami poszczególnych modeli. Praca napisana jest przystępnym językiem pomimo wielu technicznych sformułowań związanych z zastosowaniem różnych modeli. Mankamenty rozprawy są nieliczne i nie dotyczą spraw zasadniczych. Mam jedynie kilka uwag w tym technicznych. Rysunki są niejednorodne i różnią się stylem, w niektórych przypadkach zastosowano zbyt małe fonty co powoduje, że opisy osi oraz wartości na osiach są mało czytelne:

- podpis pod rysunkiem 22, odpowiednik rysunku 4 w publikacji doktoranta "Lamb-post with an outflow and the hard state of Cyg X-1" zajmuje dwa razy więcej miejsca niż sam rysunek składający się z 4 wykresów umieszczonych w jednym wierszu. Moja uwaga dotyczy wyłącznie wielkości fontów, a nie samych wykresów na których dobrze widoczne są wyniki poszczególnych modeli,
- zbyt małe fonty są również na rysunkach 25 i 31 pokazujących korelacje pomiędzy różnymi parametrami modeli otrzymanych przy zastosowaniu metody MCMC.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa "*Relativistic reflection from accretion discs in Seyfert galaxies and black-hole binaries: black hole spin and geometrical parameters of the X-ray source and the disk*" mgr Klepczarka zawiera oryginalne i ważne wyniki naukowe. Analiza danych, ich interpretacja oraz przeprowadzona dyskusja z odniesieniem do badań innych grup badawczych pokazują, że doktorant posiada szeroką wiedzę z zakresu astrofizyki, ma bardzo dobre zrozumienie procesów zachodzących w pobliżu czarnych dziur oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia badań. Przedstawiona mi do recenzji dysertacja spełnia wszelkie ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Wnioskuje zatem o przyjęcie rozprawy doktorskiej pana Łukasza Klepczarka i wnoszę o dopuszczenie go do dalszych etapów przewodu doktorskiego w tym do publicznej obrony.

Warszawa, 18.X. 2024

dr hab. Dorota Rosińska