



ul. Bartycka 18, 00-716 Warszawa  
tel: (22) 841 00 41, (22) 3296 100  
fax: (22) 841 00 46  
email: [camk@camk.edu.pl](mailto:camk@camk.edu.pl)  
<http://www.camk.edu.pl>

CENTRUM ASTRONOMICZNE IM. MIKOŁAJA KOPERNIKA PAN

Warszawa, 10 maja, 2024

Rada Dyscypliny  
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej  
Uniwersytet Łódzki  
ul. Pomorska 149/153  
90-236 Łódź

*Recenzja rozprawy doktorskiej pod tytułem:*

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

*autorstwa mgra Łukasza Klepczarka, napisana pod opieką*

*prof. dr hab. Andrzeja Niedźwieckiego oraz dra Michała Szaneckiego*

Rozprawa doktorska napisana przez mgra Łukasza Klepczarka prezentuje badania obiektów o bardzo złożonej morfologii jakimi są akreujące czarne dziury. Źródła te obserwujemy w różnych zakresach widma elektromagnetycznego – od fal radiowych do promieni gamma. W pierwszym przybliżeniu oznacza to, że występujące tam obszary materii znajdują w skrajnie różnych warunkach termodynamicznych i odmienne procesy promieniste są odpowiedzialne za ich chłodzenie (świecenie). Kanonicznym przykładem radiowo cichych akreujących czarnych dziur są dyski akrecyjne w aktywnych galaktykach (z ang. active galactic nuclei, AGN) i w galaktycznych układach podwójnych (z ang. galactic black hole binaries, GBHB). W obu przypadkach obiekty te ujawniają silne promieniste oddziaływanie dysku akrecyjnego z zewnętrznym źródłem rentgenowskim, pochodzącym z gorącej korony, obserwowanej w dziedzinie rentgenowskiej. W galaktykach Seyferta, standardowy dysk akrecyjny osiąga temperaturę rzędu kilka razy  $10^5$  K, a gorąca korona rozgrzana jest do temperatury o cztery rzędy wielkości większej. Dyski wokół gwiazdowych czarnych dziur są gorętsze, rzędu kilka razy  $10^7$  K, niemniej w ich sąsiedztwie też widać gorącą koronę o temperaturze rzędu  $10^9$  K.

Astrofizycy od kilku dziesięcioleci zbierają dane obserwacyjne pochodzące z dysków akrecyjnych, gdyż są to jedyne informacje, które docierają do nas z tak bliskiego sąsiedztwa czarnych dziur. W badaniach tych największe zastosowanie ma astrofizyka rentgenowska, która może być realizowana tylko za pomocą teleskopów satelitarnych, gdyż nasza atmosfera chroni życie ludzkie przed promieniami X. A Wszechświat świeci rentgenowsko we wszystkich kierunkach, przy czym największy wkład w tło rentgenowskie mają źródła punktowe jakimi są akreujące obiekty zwarte, w tym czarne dziury w aktywnych jądrach galaktyk. Dzięki temu, dyski akrecyjne są przedmiotem badań prawie każdego satelity

rentgenowskiego, niemniej badania te posiadają liczne komplikacje, właściwe tylko teleskopom rentgenowskim. Nadal naukowcy zobligowani są do analizy danych spektroskopowych przy pomocy metody dopasowania „w przód” (z ang. forward fitting method), kiedy to najpierw należy zgadnąć model, następnie spleść go z macierzą odpowiedzi instrumentu (charakterystyczna dla każdej misji macierz responsów) i dopiero taki model dopasować do danych, przy pomocy wybranej statystyki. Ostateczny kształt rzeczywistego promieniowania źródła, otrzymujemy „rozplatając” rezultat dopasowania z charakterystyki instrumentu (z ang. unconvolved spectrum), i jest on zawsze zależny od założonego przez nas modelu. Dlatego analiza danych rentgenowskich, pozornie koncepcyjnie prosta, jest jedną z najbardziej żmudnych czynności we współczesnej astrofizyce rentgenowskiej.

Mgr Łukasz Klepczarek podjął się tego zadania w swojej rozprawie doktorskiej, w której na poziomie największej szczegółowości przeanalizował dwa źródła: galaktyczny układ podwójny z czarną dziurą - Cyg X-1, oraz aktywną galaktykę 1H0707-495, należącą do klasy AGN-ów z mniejszą masą czarnej dziury, ale wykazującą dużą zmienność w widmie elektromagnetycznym. Oba obiekty są bardzo znane astrofizykom rentgenowskim, a wręcz należą do kanonicznych źródeł w swojej grupie. Można by zadać pytanie jaka była motywacja mgra Łukasza Klepczarka do ponownego zbadania tych obiektów? I właśnie już na etapie zaznajamiania się z celami rozprawy doktorskiej pana Klepczarka odniosłam wrażenie, że autor wysoko sobie postawił poprzeczkę. Bo nigdy nie wiemy czym zakończy się próba ponownego opracowania danych rentgenowskich z najlepszych obecnie działających satelitów. Czy znajdziemy odpowiedź na kontrowersyjne pytania, co właściwie widzimy w zakresie rentgenowskim: odbicie od chłodnego dysku czy absorpcję przez wiatr, jaka jest geometria dysku akrecyjnego i gorącej korony, czy korona jest zwarta, czy porusza się względem dysku, oraz czy możemy zbadać spin czarnej dziury z analizy widma ciągłego i profilu linii żelaza? Powyższe cele badawcze od lat uważane są za bardzo trudne do osiągnięcia, a uzyskane wyniki wielokrotnie dyskutowane i poddawane wątpliwościom. Sam fakt podjęcia się tej pracy świadczy o dużej odwadze autora oraz jego naukowej cierpliwości.

Rozprawa doktorska pana Klepczarka składa się z pięciu sekcji, z czego pierwsza jest obszernym wstępem przedstawiającym naturę badanych obiektów oraz dotychczasowy stan wiedzy w temacie publicznie dostępnych modeli stosowanych do analizy widm rentgenowskich akreujących czarnych dziur. Zgromadzona wiedza przedstawiana jest w sposób zwarty, przy czym można odnieść wrażenie, że mgr Klepczarek konsekwentnie zadbał o to, aby nie rozpisywać się zbytnio, gdyż jakiegokolwiek zbędne dygresje doprowadziłyby do znacznego zwiększenia objętości jego pracy doktorskiej. Z jednej strony widać olbrzymi wysiłek autora włożony w zachowanie zwartej postaci rozprawy, z drugiej strony zabrakło mi paru istotnych informacji. Należy jednak zaznaczyć, że stan wiedzy w temacie oddziaływania dysku z ciepłą koroną jest bardzo nieuporządkowany i wiele przedstawianych wyników jest wręcz sprzecznych. Dlatego trudno by było nie doszukać się pewnych niedociągnięć w pierwszej sekcji rozprawy, niemniej przytoczę tylko niektóre z nich:

1. Sekcja 1.1. Jednak uważam, że odkrycie kwazarów w 1963 roku (przytoczone przez pana Łukasza w dalszej części rozprawy) miało największe znaczenie w potwierdzeniu istnienia czarnych dziur w ogólności, a nie identyfikacja Cyg X-1.
2. Autor pisze: in all real accretion systems the accreting gas .... lead to the formation of an accretion disk. Zdanie powinno brzmieć: gdy istnieje mechanizm transportu niezerowego momentu pędu na zewnątrz to powstaje dysk akrecyjny. W innych wypadkach równie realistyczny jest swobodny spadek gazu na zwarty obiekt centralny.

3. Warto w jednym zdaniu napisać, dlaczego czarne dziury o masie pośredniej nie są tematem rozprawy (końcówka sekcji 1.1).
4. Sekcja 1.2 Rozbłyśki w zmiennych kataklizmicznych, spowodowane niestabilnością jonizacyjną wodoru w dysku akrecyjnym wokół białego karła były wytłumaczone przez prof. Smaka w 1984, łącznie z podaniem sposobu numerycznego policzenia krzywej zmian blasku zgadzającej się z obserwacjami. Prof. Smak za tę pracę zebrał wiele nagród międzynarodowych. Program napisany przez J.P. Lasotę w 2001 był już następnym z kolei.
5. Sekcja 1.4 Opisywane przez autora zjawisko adwekcji jest dwukrotnie przedstawione w tym samym reżimie, że generowana energia wcześniej spadnie na czarną dziurę, niż zostanie wypromieniowana. A drugi limit adwekcji występuje, gdy nie dojdzie do generacji energii wcale, gdyż materia za to odpowiedzialna spadnie wcześniej na czarną dziurę. O adwekcji masy autor już nie wspomina.
6. MRI ciągle nie jest obserwacyjnie potwierdzone.
7. Sekcja 1.5 brak referencji do korelacji pomiędzy strumieniem radiowym i rentgenowskim oraz do QPOs.
8. Ostatnie obserwacje przy pomocy satelity NuSTAR dostarczyły nam ograniczenia na geometrię korony. Ze zmienności promieniowania do 70 keV dowiedzieliśmy się, że korona jest zwarta i zajmuje centralne obszary dysku wewnątrz 20 promieni grawitacyjnych. Dużo też ostatnio mówi się o koronach grzanych magnetycznie.
9. Brak referencji do szerokiej linii żelaza, a jest napisane „objects often show”.
10. Sekcja 1.6 brakuje referencji do wciąż kontrowersyjnego stwierdzenia, że spektroskopia odbicia rentgenowskiego potrafi dostarczyć nam informacji o geometrii gorącej korony, o wartości wewnętrznego promienia dysku i o spinie czarnej dziury.
11. Brakuje ważnej informacji, że wraz ze wzrostem rozdzielczości energetycznej instrumentów pomiarowych linia żelaza zaczęła się zwężać, co podważa jej relatywistyczny charakter.
12. Japońska misja rentgenowska XRISM, której wyniesienie na orbitę nastąpiło w roku 2023, posiada mikro-kalorymetr (spectrometr rentgenowski o wysokiej rozdzielczości) i może przyczynić się do weryfikacji modeli odbicia. NewAthena od jesieni 2023 znowu jest flagową misją ESA, trudno więc pisać, że jest status jest niepewny.
13. Sekcja 1.6.1. Zdanie, że modele xillver i XSTAR zakładają rozpraszanie Thomsona jest nieprawdziwe. Xillver ma wbudowaną dyfuzję rozpraszania Comptona – równanie Kompaneetsa.
14. Parametr jonizacji we wszystkich znanych mi pracach definiuje się na gęstość wodoru, która przy zawartości pierwiastków ciężkich wcale nie jest równa gęstości elektronów. Nie rozumiem, dlaczego autor zmienił definicję tego bazowego parametru.
15. Fig. 3 Pomijanie rysowania poziomego twardego promieniowania z korony, które oprócz oświetlania dysku zmierza również do obserwatora jest

dość niefortunne. Ważne jest w jakim stopniu to promieniowanie przykrywa linię żelaza, bo może okazać się, że linia nie wystaje ponad pierwotne widmo ciągłe i ciężko wówczas obronić obecność linii.

16. Sekcja 1.6.2 W równaniach 4, 5 i 6 autor pisze o strumieniu, podczas gdy przedstawione wzory są na: photon numer intensity, niemniej to jest stary błąd wielokrotnie powielany przez astrofizyków.

17. Zależna od promienia dysku emisyjność jest w pewnym stopniu arbitralnie przyjęta z założonego modelu dysku. Brakuje referencji do tego modelu i wskazania co trzeba zrobić, aby uzyskać bardziej fizyczny opis emisyjności.

Wstęp zakończony jest sekcją, w której wymienione są główne cele rozprawy. Autor skoncentrował się na pracy z danymi i dopasowaniem do nich skomplikowanych modeli emisji dysku oświetlanego promieniowaniem z korony, przy czym rozważa wariant, iż korona może być w ruchu. Takie rozwiązanie było postulowane, ale nigdy nie zostało przetestowane obserwacyjnie. Nowatorska jest próba oszacowania rozmiaru gorącej korony jako obszaru rozciągniętego, w alternatywie do z reguły zakładanego źródła punktowego (z ang. lamp-post model). Efekty rotacji bądź oddalania się takiej korony od dysku z dużą prędkością mogą wpływać na kształt widma odbitego. Mgr Klepczarek użył zaawansowanych modeli pozwalających mu przetestować ich założenia na danych obserwacyjnych. Pokazał, że potrafi odróżnić sytuację, w której dysk jest oddalony od czarnej dziury, a wewnętrzna korona jest rozciągnięta, od sytuacji w której gorąca plazma jest wywiewana z górnych partii dysku. Mgr Klepczarek jest autorem jednej publikacji pierwszo-autorskiej w MNRAS Letters, oraz jednej wielo-autorskiej w A&A. Obydwie prace są częścią rozprawy doktorskiej autora.

Sekcja druga omawia szczegółowo modele użyte przez autora w procesie analizy danych rentgenowskich. W alternatywie do korony punktowej, mgr Klepczarek użył korony rozciągniętej `reflkerr_elp` oraz korony poruszającej się z prędkością bliską relatywistycznej `reflkerrV`, niemniej jak zrozumiałam, nie jest on jedynym twórcą tych modeli. Są one na tyle skomplikowane, że biorą pod uwagę wpływ spinu i masy czarnej dziury na drogę fotonów od korony do dysku i od dysku do obserwatora. Rozdział zawiera obszerne porównanie obydwu modeli między sobą oraz z modelami relatywistycznego odbicia publicznie dostępnymi w programie XSPEC (powszechnie używane oprogramowanie do analizy widm rentgenowskich). Należy zaznaczyć, że wszelkie oddziaływanie promieniowania z materią, które należy rozważyć w celu wyprodukowania ostatecznego, odbitego widma z dysku, mgr Klepczarek wyznacza przy pomocy ogólnie dostępnych tablic przygotowanych przez inne grupy badawcze (dostępne modele `xillver` lub `rellxill`).

W trzeciej sekcji autor przedstawia analizowany układ podwójny Cyg X-1 z czarną dziurą o masie 21 mas Słońca. Mgr Klepczarek opracował dane z satelitów NuSTAR i Suzaku co pozwoliło uzyskać widmo szerokopasmowe sięgające twardych rentgenów. Należy nadmienić, że przeważnie analizowane są dane do 10 keV ze względu na techniczne ograniczenia większości misji rentgenowskich. Dopasowanie modelu do danych, jak zwykle było możliwe przy połączeniu wielu modeli. W wyniku przeprowadzonej analizy pan Klepczarek potwierdził, że Cyg X-1 w stanie twardym może posiadać materię wywiewaną z prędkością  $\beta = 0.36$ . Wówczas dopasowane modele zgadzają się z otrzymaną obserwowaną ilością światła odbitego. W każdym przypadku dopasowania autor przeprowadził analizę prawdopodobieństwa MCMC (Markov Chain Monte Carlo) pokazującą korelację pomiędzy dopasowanymi parametrami i przedyskutował konsekwencje swoich wyników.

W sekcji czwartej autor analizuje dane aktywnej galaktyki 1H0707-495 dzieląc widma z satelity XMM-Newton na epoki w zależności od poziomu strumienia i kształtu obserwowanego widma. Jest to możliwe tylko dzięki bardzo długiej, trwającej 1.3 Mega

sekundy, obserwacji tego obiektu, co jest wyjątkowe w przypadku danych rentgenowskich. Niemniej źródło 1H0707-495 posiada najsilniej poszerzoną linię żelaza w widmie odbitym ze wszystkich AGN-ów, co pozwala sądzić iż emisja widma odbitego powstaje w bliskim sąsiedztwie czarnej dziury. Ponownie modele dopasowane przez pana Klepczarkę składają się z wielu komponentów, w tym wypadku z sześciu o łącznej liczbie wolnych parametrów powyżej dwudziestu. W każdym przypadku badanie jakości dopasowania modelu do danych oraz korelacji parametrów przeprowadzone jest na najwyższym możliwym poziomie. W niektórych epokach (stanach widmowych) widać silną absorpcję rentgenowską w widmie ciągłym, co autor dyskutuje dodając modele foto-absorpcji na ośrodku optycznie cienkim (modele warm26 lub photem26). I tutaj rezultaty dotyczące korony nie są jednoznaczne. Na pewno modele użyte przez mgra Klepczarkę nie wymagają modyfikacji zawartości słonecznej żelaza w gazie, oraz wskazują na Keplerowską rotację korony. Dość nieoczekiwanie bardziej faworyzowany jest model zakładający niższą gęstość gazu w dysku, choć wielkość ta nie jest wyznaczana z obserwacji. Jest to tylko parametr wejściowy do liczenia emisyjności i modele o dużej gęstości są całkowicie zdominowane przez odbicie i nie zgadzają się z obserwowaną zmiennością źródła. Najważniejszym wynikiem było potwierdzenie, że w każdym z modeli dysk sięga do orbity marginalnie stabilnej (nie jest rozerwany i zastąpiony wewnętrznym gorącym przepływem akrecyjnym).

Piąta część rozprawy stanowi podsumowanie badań mgra Klepczarkę. Autor podkreśla w niej najważniejsze wyniki otrzymane w przypadku dwóch kanonicznych obiektów akreujących czarnych dziur. Korona o rozmiarze promienia grawitacyjnego istnieje, gdy dysk sięga do marginalnie stabilnej orbity. Korona rozciągnięta pozwala otrzymać widmo odbite konsystentne z modelem, w którym dysk jest wewnątrznie rozerwany (stan twardy Cyg X-1). Anizotropia widma oświetlającego zmniejsza o czynnik kilka strumień odbity. Anizotropia ta może powstawać, gdy korona oddala się od dysku. Zwarta korona blisko czarnej dziury, powoduje, że modele zgadzają się z obserwowanym kształtem widma, razem z kształtem miękkiej nadwyżki rentgenowskiej. W przypadku odtworzenia znanej zależności: im bardziej miękkie widmo tym jaśniejszy obiekt, autor nie potrzebuje zmieniać geometrii układu dysk-korona i ten rezultat uważam za najciekawszy. Niemniej, jak sam autor pisze, wszystkie otrzymane wyniki należy sprawdzić w przypadku dokładniejszych danych i innych obiektów.

Podsumowując, praca mgra Klepczarkę stanowi istotny wkład w modelowanie danych spektroskopowych w dziedzinie rentgenowskiej z układu dysk/korona. Dzięki uwzględnieniu rozciągniętości i dynamiki korony oraz poprawek relatywistycznych na każdym etapie drogi fotonów, autor pomyślnie wytłumaczył obserwacje. Oczywiście nie osiągnął jeszcze całkowitej jednoznaczności w interpretacji widma, ale osobiście sądzę, że taka jednoznaczność jest nieosiągalna. Akreujące czarne dziury są bardzo skomplikowane, a na nowe satelity czeka się dekady (start nowej ATHENy przewidziany jest na rok 2037). Dla mnie najważniejsza jest wysoka staranność badań przeprowadzonych przez mgra Klepczarkę. Autor jest w pełni świadomy ograniczeń stosowanych modeli i tym samym konsekwencji wyciągniętych wniosków. Praca napisana jest zrozumiale, a rysunki są czytelne. Uważam że rozprawa doktorska magistra Łukasza Klepczarkę spełnia formalne i zwyczajowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim i na tej podstawie wnioskuję do Rady Dyscypliny Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Łódzkiego o dopuszczenie jej do dalszych kroków niezbędnych do nadania panu Łukaszowi Klepczarkowi tytułu doktora.

Z poważaniem



Prof. dr hab. Agata Różańska