

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Łukasza Klepczarka
*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*

Przedmiotem rozprawy doktorskiej mgra Łukasza Klepczarka jest zrozumienie geometrii akrecji oraz wpływów materii dyskowej i koronalnej poprzez analizę widma promieniowania elektromagnetycznego produkowanego przez źródło rentgenowskie. Widmo to częściowo dociera od obserwatora niezaburzone jak i jest modulowane przez odbicie od dysku akrecyjnego oraz przejścia przez absorbujący gaz. Omawiana rozprawa składa się z pięciu rozdziałów (z których Rozdział 1 stanowi wstęp, natomiast Rozdział 5 jest podsumowaniem rozprawy), z jednego Dodatku oraz Bibliografii, zawierającej 139 pozycji. Rozprawa liczy 110 stron, z których dziesięć ostatnich stron stanowi bibliografia, zawiera 39 rysunków i 5 tablic.

Rozdział 1 to wprowadzenie do tematu, zawierające najważniejsze wiadomości i pojęcia dotyczące rozprawy. Znajdziemy tu krótki przegląd tematów dotyczących gwiazdowych czarnych dziur, galaktyk z aktywnymi jądrami, stanów widmowych, typów dysków akrecyjnych. Następnie czytelnik jest zaznajamiany z zagadnieniami spektroskopii widma odbitego od dysku (ang. reflection spectroscopy), używanymi modelami jakie można znaleźć w pakiecie XSPEC, wygenerować przy pomocy pakietu XSTAR, modelami publicznie dostępnymi. Znajdziemy tu założenia oraz ograniczenia używanych modeli, opisy rozważanej w rozprawie geometrii dysku akrecyjnego i źródeł promieniowania rentgenowskiego, pomiarami spinu czarnej dziury, przegląd dotychczasowych badań. Oryginalne wyniki naukowe rozprawy zawarte są w Rozdziałach 2-4. W rozważanej rozprawie doktorskiej mgr Klepczarek bada wpływ rozmiaru, rotacji wokół własnej osi, wertykalnego ruchu źródła rentgenowskiego na obserwowane widmo. Analizę tę znajdziemy m.in. w Rozdziale 2. Rozdział ten opiera się na wynikach pracy Szanecki, Niedźwiecki, Done, Klepczarek i in. (2020), w której Autor rozprawy ma swój udział w postaci wykonanej analizy danych. W tym rozdziale pan Klepczarek dodatkowo rozszerza tę analizę o swoje nowe wyniki. Uzyskane rezultaty pochodzą z dwóch modeli `reflkerr_elp` oraz `reflkerrV`, z których ten pierwszy był zaprezentowany w pracy Szanecki i in. (2020), natomiast drugi w pracy Klepczarek i in. (2023). Autor widzi, że dla względnie dużej korony (sięgającej do $r_{c,out} = 50r_g$) odbicie od dysku jest silnie zredukowane, a jedynie mała korona (z $r_{c,out} < 2r_g$) powstała przy czarnej dziurze, która posiada duży spin jest w stanie wyjaśnić obserwowane widma. Autor bada również możliwość istnienia rozciąglej korony przy jednoczesnym istnieniu uciętego dysku akrecyjnego, który nie sięga do ostatniej kołowej orbity marginalnie stabilnej (ISCO). Modeluje obserwacje galaktyki Seyferta 1H 0707-495 wykonane satelitą XMM-Newton modelem `reflkerr_elp`. Autor studiuje wpływ rotacji źródła rentgenowskiego na profil emisyjności oraz produkowane modelem widmo odbite. Wraz ze wzrostem prędkości kątowej produkowana emisyjność, a tym samym i strumień E_F się zwiększają. W rozdziale 2. pan Klepczarek bada również wpływ poruszającą się koronę/obszaru formułującego dżet na

produkowane widmo. Jak zauważa Autor, modele typu `reltrans`, `relxillpCp` pomijają efekt m.in. zmiany z promieniem profilu emisyjności i wprowadzają do rozwiązań pewną niespójność. Autor tworzy swój własny model `reflkerrV`, bazujący na kodzie `reflkerr` (Niedźwiecki i in. 2019). Jak można było się spodziewać, wzrost prędkości oddalającej się korony od dysku powoduje redukcję strumienia odbitego widma. Zrozumiałym jest również to, że strumień ten zależy od inklinacji. Autor napisał na stronie 46, że „(iii) decrease or increase [...] of the directly received [...] flux ...”. Jestem ciekaw dla jakich inklinacji następuje wzmocnienie strumienia. Na rysunku 16. mamy inklinacje $i = 20^\circ$. Mgr Klepczarek słusznie zauważa, opierając się na obserwacjach opóźnień czasowych, że modelowanie wpływow powinno opierać się na rozciągniętych, a nie na zwartych koronach. Otrzymane przez siebie wyniki porównuje również z wynikami z `relxillpCp` (używając najnowszych wersji 2.0 i 2.1) i zauważa różnice głównie w wielkości strumienia odbitego widma. Autor w modelu zakłada statyczność korony. Co by było, gdyby założyć turbulentność źródła X? Jaki miałyby to wpływ na obserwowane widmo? Rozdział 3 poświęcony jest analizie stanu twardego (ang. hard state) źródła Cyg X-1 wykonanego przy pomocy modelu `reflkerrV` (Klepczarek i in. 2023) oraz `reflkerrG_lp` (Niedźwiecki i in. 2019). Dane obserwacyjne zostały zebrane przez satelity NuSTAR oraz Suzaku. Na początku Autor wykonał procedurę *pipeline*, czyli przygotowania surowych danych pochodzących z danego satelity do dalszej swojej analizy. Modelowanie zakłada geometrię lamp-post z wypływem, a uzyskane wyniki zostały przyrównane do rezultatów zawartych w pracach Parker i in. (2015) oraz Basak i in. (2017). Ciekawym dla mnie wynikiem, który odnosi się do modelowania przy pomocy `reflkerrG_lp` jest ten, który mówi, że parametr δ_B jest większy od 50%. Parametr ten mówi jak duży jest wkład „dolnego” źródła rentgenowskiego, widocznego przez dziurę w uciętym dysku, a które widoczne jest przez obserwatora znajdującego się nad dyskiem. Czy parametr δ_B jest tym samym co parametr δ jaki znajdujemy w pracy Niedźwiecki, Szanecki, Zdziarski (2019)? W rozdziale tym, Autor słusznie konkluduje, że wyniki uzyskane modelami, które nie wprowadzają wewnętrznie spójnych opisów zjawisk fizycznych należy traktować z większą uwagą i ostrożnością. Autor zauważa, że używany model musi zostać w przyszłości zrewidowany po pojawieniu się modeli biorących pod uwagę wszystkie zjawiska związane z akrecją. Rozdział 4 dotyczy obserwacji galaktyki Seyferta 1H 0707-495, ukazującą silnie zmienną nadwyżkę miękkiego promieniowania rentgenowskiego (ang. soft excess) oraz stromsze niż w większości galaktyk twarde kontinuum rentgenowskie ($\Gamma \sim 2.5$ vs. $\Gamma_{\text{norm}} \leq 2$). Dane obserwacyjne użyte w rozprawie zostały wykonane przy pomocy satelity XMM-Newton i pokrywają stany b. niski (VL, o dł. obs. $t_{\text{obs}} \simeq 64$ ks), niski i pośredni (L i M, o $t_{\text{obs}} \simeq 315$ ks) oraz wysoki (H, $t_{\text{obs}} \simeq 238$ ks). Geometria korony jest tu badana przy pomocy modeli `reflionx` oraz `xillverD` (w tekście rozprawy oznaczone jako [r] oraz [x], które modelują składnik odbity widma), w połączeniu z `zxipcf` oraz stworzonym na potrzeby rozprawy `warm26`. Drugi z nich zakłada miękkie kontinuum ($\Gamma = 2.6$) oraz pozwala, aby obfitość żelaza (A_{Fe}) w materii dyskowej mogła być dowolna, a nie ustalona na słoneczną tak jak w `zxipcf`. Jest to zgodne z poprzednimi pracami sugerującymi supersłoneczną obfitość żelaza w aktywnym jądrze galaktyki. Modele te badają zjonizowaną absorpcję. Dodatkowo pojawia się wymóg modelowania emisji fotojonizowanego wiatru (model własny `photem26`), posiadającymi prędkości turbulentne rzędu 6000 km s^{-1} oraz indeks fotonowy $\Gamma = 2.6$. Przeprowadzona dogłębna analiza widma galaktyki 1H 0707-495 pozwoliła Autorowi na uzyskanie bardzo dobrego dopasowania, niejednokrotnie lepszego niż w innych pracach. Jakkolwiek mgr Klepczarek zauważa fakt, że nie tylko zwiększona obfitość żelaza, ale i zwiększona obfitość krzemu, i siarki w dysku mogłaby polepszyć dopasowanie. Podobnie jak

w przypadku Cyg X-1 (rozdział 3), tak i tutaj, dopasowanie wskazuje na istnienie zwartej korony, rozciągającej się do kilku promieni grawitacyjnych r_g . Ciekawą dla mnie rzeczą jest wynik prędkości absorbujących wiatrów w zakresie 48 oraz 36 tys. km s⁻¹ (dla modelu 2[r]) w przypadku mniej ($\log \xi = 3.5 - 3.6$) lub bardziej zjonizowanej ($\log \xi = 6.0$) materii w wietrze. Wynik 65000 km s⁻¹ uzyskany w przypadku modelu 2[x] (Tabela 5) nadal nie stoi w sprzeczności z rozkładem prędkości Ultra-Fast Outflows (UFOs). Jestem ciekaw czy absorbujące wiatry mogą być przykładem UFO wiejących z okolic supermasywnej czarnej dziury? Czy uzyskane inklinacje (wyznaczone ze zbyt małym błędem) oraz gęstości kolumnowe ($< 10^{22}$ cm⁻²) na to pozwalają? A może są to silnie wiejące ciepłe absorbery (ang. warm absorber)?

Wyniki przedstawione w drugim, trzecim i czwartym rozdziale rozprawy zawarte są w dwóch opublikowanych artykułach (1) Ł. Klepczarek, A. Niedźwiecki, M. Szanecki, 2023, *Lamp-post with an outflow and the hard state of Cyg X-1*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 519, L79, (2) M. Szanecki, A. Niedźwiecki, C. Done, Ł. Klepczarek, P. Lubiński, M. Mizumoto, 2020, *Geometry of the X-ray source 1H 0707-495*, Astronomy and Astrophysics, 641, A89. Jakkolwiek wyniki przedstawione w artykule (2) są poszerzone w rozprawie doktorskiej. Według bazy *Web of Science* te dwie prace były łącznie cytowane 14 razy bez autocytowań (stan na dzień 26 marca 2024).

Rozprawa zawiera kilka błędów drukarskich („literówek”). Te kilka „literówek” to między innymi:

- 1) Na stronie 23 wymieniona jest nazwa modelu (Zdziarski et al. 1996) jako nthcomp. Powinno być nthcomp. Podobnie na tej samej stronie 23 w nazwie modelu reflionxHD brakuje literki l. Powinna ona brzmieć reflionxHD.
- 2) Podobnie na stronie 59 jest nazwa relfkerrG_lp, a powinno być reflkerrG_lp ;
- 3) Na początku strony 25 znajduje się opis symboli występujących w równaniu (4). Pojawia się tam symbol E_e . Powinno być E_d .

Wymienię również niejasno sformułowane wyrażenia i zdania, które bym poprawił w celu zwiększenia czytelności pracy. Najważniejsze znalezione przeze mnie usterki tego rodzaju są następujące:

- 1) Strona 37, wiersz 1: Co to jest θ np. we wzorze $r_c = r \sin \theta$? Czy jest to kąt azymutalny dysku/korony czy parametr zmieniający się w zakresie 0-180, a ustalony dla rozważanego przypadku ?
- 2) Strona 47, rysunek 16: Jakie jest $\mathcal{R}$ na panelu (a) ? Podejrzewam, że $\mathcal{R} = 1$;
- 3) Strona 50, wiersz 16: W jakich jednostkach jest podana prędkość $v = 0.66$? Sądzę, że Autorowi chodziło o napisanie $\beta = 0.66$;
- 4) Tabela 2 i 3: Czym jest parametr z w modelu zxipcf ? Brak w opisie. Dobrze byłoby opisać raz pod Tabelą 2, występujące parametry modeli. W tekście możemy się domyśleć, że chodzi to o prędkość zjonizowanego absorbera. Czy wartość dodatnia tutaj reprezentuje oddalanie się absorbera od nas?
- 5) Strona 65, wiersz 5, strona 86, wiersz 2: Co to jest RGS np. w zdaniu „from the RGS data”? Dowiadujemy się o tym na stronie 90 „(RGS is the detector onboard XMM satellite [...])”. To zdanie wyjaśniające dobrze jest umieścić przy pierwszym wywołaniu akronimu, czyli na stronie 65;

- 6) Strona 97, Appendix A, rysunek 38: W opisie występuje określenie „More ionized”. Co to oznacza ilościowo? Dobrze byłoby podać przedział wartości względnie dopisać zdanie w rodzaju (with $z_{\text{H I}} \approx 0.5$, Table 3; black) oraz (with $w_{\text{H I}} \approx 0.5$, Table 5; red), gdzie uwidocznimy dolne indeksy modeli $z_{\text{H I}}$, $w_{\text{H I}}$ tj. 2). Inaczej czytelnik się pogubi nawet czytając główny tekst co jest czym w ilości parametrów i modeli wymienionych w rozprawie.

Rozprawa doktorska jest napisana dobrze, zgodnie z zasadami tworzenia prac naukowych. Czyta się ją bardzo dobrze na początku. Niemniej później jako czytelnik zaczynałem odczuwać lekki chaos. Uważam, że przy tej ilości parametrów odnoszących się do różnych modeli należy uważnie przemyśleć strategię ich zaprezentowania. Przecież nie o to chodzi by zgubić czytelnika.

Pomijając ten techniczny szczegół, przedstawione przez Autora rozprawy wyniki uważam za ważne, a studia Autora nad problem za wnikliwe i dogłębne. Autor ze szczegółami rozważa możliwe przypadki. Czytając rozprawę mgra Łukasza Klepczarka odniosłem wrażenie, że doktorant jest biegły w interpretacji wyników. Wie również co wpływa na takie, a nie inne zachowanie zmiennych fizycznych. Uważam, że mgr Klepczarkę dobrze opanował problematykę pracy. W moim przekonaniu oryginalne rezultaty otrzymane w omawianej rozprawie stanowią istotny wkład w rozumieniu procesu akrecji, powstawania widma odbitego, widma emitowanego oraz absorbowanego przez zjonizowany gaz. Badania pana Klepczarka niosą wartościowe ograniczenia pomocne w wyborze adekwatnego modelu realizowanego przez naturę. Dowodem ważności otrzymanych wyników oraz zainteresowania środowiska jest ilość cytowań prac (1), (2), osiągnięta w niedługim czasie po ich publikacjach w recenzowanych czasopismach. Autor posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Uważam zatem, że rozprawa magistra Łukasza Klepczarka w pełni spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgra Łukasza Klepczarka do dalszych etapów przewodu doktorskiego i do publicznej obrony.

Marek Nikolajuk

Dr hab. Marek Nikolajuk, prof. UwB