

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Mohammada Hassana Naddafa
Simulation of the dynamics and geometry of broad line region in active galactic nuclei

Przedmiotem rozprawy doktorskiej mgr Mohammada Hassana Naddafa jest modelowanie dynamiki i geometrii obszaru produkcji szerokich linii emisyjnych oraz powstawania linii emisyjnych „Low Ionisation Lines” (LIL) w tym obszarze. Symulacje komputerowe jak i rachunki analityczne oparte są na modelu Failed Radiatively Accelerated Dusty Outflow (FRADO). W swojej pierwotnej analitycznej wersji 1D model FRADO został zaproponowany przez Czerny & Hryniewiczza w 2011 roku. Rozprawa mgra Naddaffa dotyczy rozwinięcia modelu do symulacji trójwymiarowych.

Omawiana rozprawa doktorska składa się z 6 rozdziałów. Rozdział 1 zawiera wprowadzenie do prezentowanych w rozprawie zagadnień. Przedstawiona jest tu struktura galaktyk z aktywnymi jądrami (ang. AGN), schemat unifikacyjny rónnych typów tych galaktyk, obszar produkcji szerokich linii emisyjnych (ang. BLR), rónne modele BLR w tym model oparty na obecności pyłu w tym rejonie. Model ten jest szeroko badany przez Autora i stanowi podstawę Jego rozprawy doktorskiej. W rozdziale pierwszym znajdziemy rónież przegląd dotychczasowych badań, a także ogólny zarys i budow rozprawy. Rozdział 2 to teoretyczne przedstawienie modelu i kodu 2.5D FRADO. Między innymi przedstawia on przyjęte w symulacjach załózenia (te są szczególowo opisane w rozdziałach 3-5) oraz przyjęte warunki graniczne. Znajdziemy tu definicje wielkości fizycznych oraz wyprowadzenie wzorów modelu. Wyjaśniony jest tu prosty model „ α -patch” symulujący efekt ekranowania/zasłaniania obszaru BLR przed silnym promieniowaniem dysku akrecyjnego. Drugi model („ β -patch”) jest wyjaśniony m.in. w rozdziale trzecim. Istnienie ekranowania jest wymagane do produkcji linii emisyjnych w BLR, a wynika to z modeli „radiatively-driven wind” (np. Murray i in. 1995, Proga 2000, Giustini i in. 2020). Rozprawa doktorska mgr Naddafa jest spójnym tematycznie zbiorem trzech artykułów opublikowanych w renomowanych czasopismach naukowych. Rozdziały 3 do 5 stanowi wydruk tych publikacji. Wspomniane artykuły to Naddaf M. H., Czerny B., Szczerba R., 2021, *The picture of BLR in 2.5 FRADO: dynamics and geometry*, The Astrophysical Journal, Vol. 920, id. 30 (artykuł I, rozdział 3 rozprawy), Naddaf M. H., Czerny B., Szczerba R., 2020, *BLR size in realistic FRADO model: The role of shielding effect*, Frontiers in Astronomy and Space Sciences, Vol. 7, id. 15 (artykuł II, rozdział 4), Naddaf M. H., Czerny B., 2022, *Radiation pressure on dust explaining the low ionized broad emission lines in AGNs. Dust as an important driver of line shape*, Astronomy and Astrophysics, Vol. 663, id. A77 (artykuł III, rozdział 5). Podsumowanie oraz przyszłe projekty wykorzystujące kod 2.5D FRADO znajdują się w rozdziale 6. Rozprawa posiada Bibliografi (zawierającą 176 pozycji) oraz Dodatek z oświadczeniami współautorów (tj. prof. Bożeny Czerny i prof. Ryszarda Szczerby) o ich wkłdach do projektów naukowych zaprezentowanych w rozdziałach 3-5. Rozprawa doktorska liczy 78 stron, zawiera 19 rysunków, w tym 13 wielopanelowych oraz 1 tablic.

Jak wspomniałem, oryginalne wyniki naukowe rozprawy zawarte są w rozdziałach 3-5. W rozdziale trzecim Autor bada dynamikę obłoków pyłu i gazu oraz geometrię obszaru BLR. Dynamika a tym samym geometria całego obszaru formowania się LIL są zależne m.in. od tempa akrecji (\dot{m}), masy supermasywnej czarnej dziury (M_{BH}), stosunku gęstości gazu do gęstości pyłu (Ψ), a jak się okaże z rozdziału 5, również od wartości metaliczności (Z) w badanym obszarze. Dla temp akrecji rzędu 0.01 model FRADO, który sam w sobie jest dynamiczny odtwarza przypadek statyczny rozważany przez Baskin & Laor (2018). Dla małych temp akrecji ruch pyłu jest prawie wertykalny. Dla temp większych, np. eddingtonowskich, ruch ten jest bardziej skomplikowany – z promieniem uderzenia pyłu w dysk akrecyjny większym od promienia startu tego pyłu z dysku. Dodatkowo, z rozdziału piątego dowiadujemy się, że zwiększenie metaliczności przy zmniejszeniu tempa akrecji również powoduje ten sam typ ruchu bardziej skomplikowanego. Jest to silna przesłanka za słusznością hipotezy, że w AGNach metaliczność aktywnego jądra jest większa od słonecznej (np. Śniegowska i in. 2021, Esparza-Arredondo i in. 2021). Autor rozpatruje zagadnienie stabilności i formowania się obłoków w BLR, a także efekt uderzenia opadającego pyłu w dysk akrecyjny. Przykładowo, impakt pyłu z dyskiem w rejonach, gdzie temperatura powierzchni dysku jest mniejsza od temperatury sublimacji, prowadzi do destrukcji pyłu. Mgr Naddaf szacuje skale czasowe chłodzenia chmur pyłu rozważając różne scenariusze. Dużym osiągnięciem modelu jest odtworzenie silnego strumienia (ang. fast outflow stream) jaki jest widoczny w obserwacjach (np. Elvis 2000). Istnienie tego szybkiego strumienia w obszarze HIL (High Ionisation Lines) BLR zostało pokazane w hydrodynamicznych symulacjach, bazujących na mechanizmie „radiatively line-driven outflow” (np. Proga & Kallman 2004, Nomura i in. 2010). Model 2.5D FRADO również odtwarza istnienie tego strumienia, również teraz w obszarze LIL BLR (znajdującego się ponad 10 razy dalej niż HIL BLR), a zdominowanym przez pył, nie przez promieniowanie. Kolejnym bardzo istotnym wynikiem autora jest odtworzenie empirycznej relacji jasność dysku akrecyjnego – promień BLR ($L_{\text{AD}}-R_{\text{BLR}}$; np. Bentz i in. 2009, 2013). Za istnienie obserwowanej dyspersji tej relacji odpowiedzialne byłyby, zgodnie z modelem, różne wartości temp akrecji w różnych galaktykach aktywnych. Autor porównuje uzyskane wyniki czasu pogłosu, τ , (ang. time-delays) oraz rozmiary BLR wynikłe z Jego modelu do obserwowanych wyznaczeń. Uzyskuje dobre zgodności (np. Mrk 817, Li i in 2016). Ciekawym wynikiem jest spostrzeżenie, że trajektorie orbit pyłu, który formuje BLR sięgają dalej aż do torusa molekularno-pyłowego. Tym samym torus może być formowany przez ten pył. Jest to przesłanka do hipotezy, że pyłowy torus jest jakby „następcą” rejonu BLR. Mgr Naddaf w rozdziale 3 szacuje także masę odlatującego pyłu, liczbę obłoków tworzących BLR oraz skale czasowe kolizji pyłowych obłoków pomiędzy sobą. Rozdział czwarty jest artykułem chronologicznie wcześniejszym od rozdziału trzeciego. Tym samym znajdziemy w tym artykule określenie relacji jasność-promień BLR czy wstępną dyskusję o kształcie BLR. Niemniej ten rozdział jest również ważny, gdyż koncentruje się na badaniu wpływu dwóch różnych modeli (Patch Model oraz Wall Model) częściowego zakrycia pyłu przed promieniowaniem dyskowym (tzw. „shielding effect”). Różna intensywność tego efektu, jak można było się spodziewać, wpływa na położenie obszaru sublimacji. Rola „shielding effect” rośnie ze wzrostem tempa akrecji, \dot{m} . Promień BLR_{in} od którego rozpoczyna się sublimacja rośnie. Wydłuża się zakres drogi, po których porusza się pył w swojej drodze nad dyskiem, H_{peak} . Analiza kształtu wyprodukowanych linii emisyjnych Mg II oraz H β przez model 2.5D FRADO znajduje się w rozdziale piątym. Pierwszym znaczącym wynikiem tego artykułu jest obecność asymetrii linii LIL oraz przesunięcie tych linii ku krótszym falom elektromagnetycznym (ang. blueshift). Taki blueshift oraz asymetrię

widzimy w wielu obiektach (np. Richards i in. 2011, Rivera i in. 2022). Są one silniejsze w przypadku HILs produkowanych bliżej fotojonizacyjnego kontinuum oraz czarnej dziury, niemniej występuje również dla produkowanych dalej LILs (np. Shen i in. 2016, rys. 2). Przykładowo widać, że linie LIL stają się węższe wraz ze wzrostem tempa akrecji oraz szersze wraz ze wzrostem masy centralnej czarnej dziury (np. Du i in. 2016). Te efekty są wynikiem dynamiki rejonu oraz procesów promienistych występujących w BLR. Jakkolwiek, obserwowane przyczyny są nadal niewyjaśnione. Autor rozprawy jest w stanie wyprodukować, za pomocą swojego modelu 2.5D FRADO, zarówno linie z pojedynczym maksimum (ang. single-peaked) jak i linie z podwójnym maksimum (double-peaked lines). W modelu tym profil linii emisyjnej jest zależny od tempa akrecji, metaliczności oraz kąta patrzenia. Dla małych temp akrecji (\dot{m} rzędu 10^{-2}), metaliczności słonecznej ($Z = Z_{\odot}$) oraz inklinacjach $\leq 45^{\circ}$ Autor uzyskuje profile double-peaked. Podobnie jest i dla temp akrecji rzędu 0.1 (oraz metaliczności słonecznej). Model FRADO również daje tutaj profile double-peaked. Stoi to w sprzeczności z wieloma obserwacjami. Linie emisyjne BLR zwykle mają pojedyncze maksimum, nawet dla małych temp akrecji, które są charakterystyczne dla słabo aktywnych AGN. Wiemy, że istnieje mała liczba galaktyk AGN pokazująca linie o podwójnych maksimach (np. Halpern 2003, Berg i in. 2019). Szczególnie to dotyczy źródeł o małych tempach akrecji rzędu 0.001 (Wu & Liu 2004). Jednakże Autor pokazuje, i jest to kolejny ważny wynik Jego rozprawy, że dla temp akrecji rzędu 0.1 model FRADO jest w stanie odtworzyć linie single-peaked, niemniej wymagana jest podwyższona metaliczności ośrodka (np. $Z = 5 \times Z_{\odot}$) oraz mas czarnych dziur $M_{BH} > 10^7 M_{\odot}$. Tym samym jest to silna przesłanka za obecnością większej niż słoneczna metaliczności rejonu BLR. Tutaj powstaje moje pytanie: Jaka jest najmniejsza metaliczność i masa czarnej dziury, dla której model FRADO jest w stanie wyprodukować profile single-peak? Rysunek 5 z rozdziału 5 pokazuje linię Mg II zaczerpniętą z obserwacji (uśrednione widmo kwazara) oraz bardzo dobre odtworzenie jej profilu przez kod 2.5D FRADO. Przyjęte parametry to: $M_{BH} = 9 \times 10^9 M_{\odot}$, $\dot{m} = 0.1$, $Z = 5Z_{\odot}$, $incl = 30^{\circ}$. Jest to kolejny istotny wynik. Dodatkowo, Autor wyznacza stosunki szerokości połówkowych linii (FWHM) do dyspersji linii (σ_{line}) (patrz Colin i in. 2006, Villafaña i in. 2023). Jest to metoda analiz kształtu linii widmowych. Konkluduje On, że galaktyki aktywne posiadające cięższe czarne dziury oraz większe tempa akrecji (~ 1), wykazują linie o profilu lorenzowskim bez względu na kąt patrzenia. Te o mniejszym tempie akrecji (≤ 0.1) i większej metaliczności posiadają linie o profilu bliższym gaussowskiemu.

W rozprawie doktorskiej (Dodatek) znajdują się oświadczenia współautorów, które świadczą o tym, że wkład mgra M. H. Naddafa w powstanie artykułów zawartych w rozdziałach 3-5 był dominujący (odpowiednio 80%, 90% i 90% Jego wkładu do artykułów I, II i III). O istotności uzyskanych wyników rozprawy i zainteresowaniu astronomów może świadczyć liczba cytowań bez autocytowań (włączając w obliczenia preprinty) artykułów przedstawionych w rozdziałach 3-5 rozprawy. Odpowiednie liczby to: Naddaf i in. (2021) – 16 cytowań, Naddaf i in. (2020) – 6, Naddaf & Czerny (2022) – 6 (według bazy NASA/Astrophysics Data System, stan na 24 maja 2023 roku). Dodatkowo mgr Naddaf jest również współautorem 10 innych artykułów naukowych, w tym w jednym z nich jest pierwszym autorem.

Moje uwagi dotyczące rozprawy, a związane z formalną stroną pracy. Rozprawa zawiera niewielką liczbę błędów drukarskich czy braku wyjaśnienia:

- 1) Strona 24, rozdział 2: Powinno być „... launching an efficient outflow is not possible if ...”,
- 2) Strona 59, rozdział 5: W podpisie rysunku 1. nie jest wyjaśnione czym jest rejon wypełniony czerwonym kolorem a znajdujący się nad czarną linią.

Moje uwagi odnoszące się do modelu 2.5D FRADO dotyczą m.in. przyjętych założeń:

- 1) W celu uproszczenia rachunków został przyjęty model nie wykorzystujący równań hydrodynamiki, zawierający prawie punktowe, optycznie cienkie obłoki, które nie wchodzi w kolizje ze sobą. Wpływ ośrodka BLR na te obłoki, jak i samograwitacja dysku akrecyjnego zostały pominięte. Jak wyglądałyby trajektorie obłoków z uwzględnioną samograwitacją dysku oraz uwzględnieniem tarcia obłoków z medium, w którym się poruszają?
- 2) Dysk akrecyjny przyjęty w modelu jest α -dyskiem (Shakura & Sunyaev 1973). Dla małych wartości temp akrecji słusznierzym jest przyjęcie dysku ADAF. Czy uzyskane wyniki w rozdziale 5 nie stoją w sprzeczności z małymi tempami i profilem linii? Innymi słowy, w obecnej formie model FRADO nie uwzględnia mechanizmu line-driven (który jest znaczący np. w HIL BLR). Czy Autor może wyjaśnić czy/jak uwzględnienie tego efektu w modelu 2.5D FRADO mogłoby zmienić trajektorie obłoków oraz profile linii dla małych temp akrecji?
- 3) Jak mogą się zmienić wartości BLR_{in} i BLR_{out} , τ , dla innych typów pyłu niż przyjęte w modelu krzemian i grafit, a tym samym dla różnych wartości temperatur sublimacji?

Uważam, że mgr Mohammad Hassan Naddaf bardzo dobrze opanował problematykę pracy i wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną w astronomii. Uzyskane wyniki na pewno stanowią oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. W moim przekonaniu oryginalne rezultaty otrzymane przez Autora w Jego rozprawie doktorskiej stanowią istotny wkład w rozumieniu dynamiki i geometrii obszaru LIL BLR, powstawania różnych profili linii emisyjnych LIL. Dowodem ważności otrzymanych wyników oraz zainteresowania środowiska jest ilość cytowań artykułów I, II, III osiągnięta w niedługim czasie po ich publikacjach w recenzowanych czasopismach. Czytając rozprawę mgr Naddafa odniosłem wrażenie, że doktorant jest biegły w interpretacji wyników, wie jakie zmiany wielkości fizycznych wpływają na zachowanie rejonu BLR. Autor posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Uważam zatem, że rozprawa mgr Mohammada Hassana Naddafa w pełni spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgr Mohammada Hassana Naddafa do dalszych etapów przewodu doktorskiego i do publicznej obrony.

Marek Nikolajuk

Dr hab. Marek Nikolajuk, prof. UwB