

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Agnieszki Stępnik
Procesy hadronowe w dwutemperaturowych przepływach akrecyjnych

Przedmiotem rozprawy doktorskiej mgr Agnieszki Stępnik jest zbadanie własności promienistych optycznie cienkich oraz dwutemperaturowych przepływów z uwzględnieniem wpływu produktów rozpadu pionów.

Omawiana rozprawa składa się z 6 rozdziałów (z których Rozdział 1 stanowi wstęp, natomiast Rozdział 6 jest podsumowaniem rozprawy), dwóch Dodatków oraz Bibliografii (zawierającej 1604 pozycje). Liczy 111 stron, zawiera 37 rysunków i 2 tablice. Rozdział 1 rozprawy zawiera przegląd dotychczasowych badań, wprowadzenie do tematu z podziałem na podwójne układy rentgenowskie oraz galaktyki z aktywnymi jądrami, a także opis zbiorów danych obserwacyjnych użytych w rozprawie. W Rozdziale 2 Autorka prezentuje model stosowany do obliczeń i otrzymania wyników. W modelu rozważane są w pełni relatywistyczne wersje równań hydrodynamicznych, uwzględniając dodatkowo m.in. relatywistyczny transport promieniowania, absorpcję $\gamma\gamma$. Kod został stworzony przez promotora – dra Andrzeja Niedźwiedzkiego oraz dra Fu-Guo Xie (Chińska Akademia Nauk). Swoje obliczenia autorka prowadziła używając kilku wariantów, zawierających różne wkłady termicznych oraz nietermicznych protonów (modele T, N, H_η), w tym te zależne od promienia r (model hybrydowy H_{r15}). W rozdziale tym mgr Agnieszka Stępnik bada działanie powyżej wzmiankowanych modeli (ilustrują to rysunki 2.1, 2.2, 2.3), a dodatkowo otrzymane wyniki porównuje z wynikami działania symulacji compPS (pakietu XSPEC) oraz galprop (kod rozwijany przez Stanford University). Oryginalne wyniki naukowe rozprawy zawarte są w Rozdziałach 3-5. Rozdział 3 poświęcony jest analizie emisji gamma produkowanej w wyniku oddziaływań proton-proton, w tym rozpadów π^0 . Magister Agnieszka Stępnik stwierdziła w nim silną zależność jasności gamma (L_γ) od spinu czarnej dziury pod warunkiem, że produkcja zachodzi w obszarze do ok. 10 promieni grawitacyjnych (r_g). Wprowadzona absorpcja fotonów gamma – efekt pominięty w innych pracach – redukuje jasność L_γ . Na przykład w modelu z Maxwellowskim rozkładem protonów jasność jest niższa o czynnik rzędu 10 niż w modelu, który nie bierze pod uwagę tej absorpcji. Ciekawym wynikiem jest wniosek, że przepływy z produkcją jasności $L_{2-10 \text{ keV}} < 10^{-3} L_{\text{Edd}}$ powinny być w pełni przezroczyste dla fotonów gamma o energiach od 100 MeV do 10 GeV, natomiast dla większych jasności rentgenowskich fotony gamma mogą uciekać do obserwatora jedynie z obszarów o promieniach większych od 10 r_g . Tym samym mamy niemal całkowitą absorpcję. Dodatkowo modele N przewidują jasność gamma w zakresie 0.1-10 GeV rzędu 1/10 jasności rentgenowskiej z zakresu 2-10 keV. Informacja ta, a tym samym stwierdzenie, który model jest słuszny, może znaleźć praktyczne zastosowanie w obserwacjach detektorem LAT satelity *Fermi*. W Rozdziale 4 rozważana produkcja fotonów X oraz gamma, którego źródłem jest rozpraszanie Comptona fotonów termicznego

promieniowania synchrotronowego oraz promieniowania hamowania. W Rozdziale tym Autorka bada wpływ takich parametrów jak masa (M) oraz spin (a) czarnej dziury, tempo akrecji ($\dot{m}$), namagnesowanie plazmy (β_B), efektywność grzania elektronów (δ), parametr lepkości α czy wpływ na wyniki modelu (np. na indeks fotonowy Γ , moc promieniowania obiektu). Stwierdzono m.in. silną zależność temperatury elektronowej (T_e) od indukcji pola magnetycznego w plazmie przepływu akrecyjnego. Otrzymane wyniki magister Agnieszka Stępnik przyrównuje z danymi obserwacyjnymi wyselekcjonowanych rentgenowskich układów podwójnych (XRB) i galaktyk z aktywnym jądrem (AGN). Zgodność z korelacją Γ - λ_{2-10} (gdzie $\lambda_{2-10} \stackrel{\text{def}}{=} L_{2-10 \text{ keV}}/L_{\text{Edd}}$) widzianą w układach XRB w zakresie $\lambda_{2-10} < 0.001$ występuje w przypadku, gdy efektywność grzania elektronów jest mała (rzędu 10^{-3}), a ciśnienie pola magnetycznego silne (rzędu ciśnienia gazu). Jest to ważny wynik. Powyższe założenia nie tłumaczą jednak występowania obserwowanej korelacji wokół supermasywnych czarnych dziur. Tym samym autorka zauważa, że używany model musi zostać zrewidowany. Rozdział 5 stanowi swoistą kontynuację rozdziału poprzedniego z rozszerzeniem w postaci zaimplementowania do używanego modelu nietermicznych elektronów. Tym samym emisja synchrotronowa, a w efekcie rozpraszanie Comptona znacząco wzmacniają efektywność chłodzenia akreowanej plazmy. Uwzględnienie elektronów o nietermicznym rozkładzie jest zasadne i widoczne w wielu układach XRB. Przykładem jest mikrokwazar GRS 1915+105 i trudny do wymodelowania „ogon” kontinuum w zakresie promieniowania gamma, przy założeniu obecności tylko elektronów termicznych. Podstawowym źródłem nietermicznych elektronów są, w modelu Autorki, rozpady pionów naładowanych $\pi^\pm$. W Rozdziale tym mgr Agnieszka Stępnik bada tak jak i w poprzednim wpływ parametrów modelu takich jak masa, spin czarnej dziury, tempo akrecji, efektywność ogrzewania elektronów, rozkład energii protonów na poszczególne składowe modelu. Pozwala to na dopasowanie przewidywań modelu do obserwowanej w galaktykach aktywnych korelacji Γ - λ_{2-10} . Dobre uzgodnienie przewidywań modelu z obserwacjami pozwala autorce stwierdzić, że właśnie uwzględnienie nietermicznych elektronów produkowanych przez rozpady pionów tłumaczy nachylenie rentgenowskich kontinuumów galaktyk. Przykładem jest NGC 4151, NGC 5548, NGC 4258, Centaurus A. Brak dopasowania z modelem występuje w przypadku galaktyki Cygnus A, co jak sygnalizuje Autorka, może sygnalizować inne warunki fizyczne w tego typu radiogalaktykach. Przedstawione przez Autorkę rozprawy wyniki uważam za ważne, studia Autorki nad problemem za wnikliwe.

Wyniki przedstawione w Rozdziałach 3, 4, 5 rozprawy zawarte są w trzech opublikowanych artykułach (1) A. Niedźwiecki, F.-G. Xie, A. Stępnik, 2013, *Gamma-ray emission from proton-proton interactions in hot accretion flow*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 432, 1576, (2) A. Niedźwiecki, F.-G. Xie, A. Stępnik, 2014, *X-ray spectra of hot accretion flows*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 443, 1733, (3) A. Niedźwiecki & A. Stępnik, 2015, *On the role and origin of nonthermal electrons in hot accretion flows*, The Astrophysical Journal, 799, 217. Według bazy *Web of Science* trzy wyżej wymienione prace były łącznie cytowane 21 razy bez autocytowań (stan na dzień 11 kwietnia 2019). Mgr Agnieszka Stępnik jest również współautorką 6 doniesień konferencyjnych.

Moje krytyczne uwagi dotyczące rozprawy są przede wszystkim związane z formalną stroną pracy. Rozprawa zawiera kilka błędów drukarskich („literówek”).

W rozprawie można też znaleźć niejasno sformułowane wyrażenia i zdania. Kilka „literówek” to między innymi:

- 1) We wzorze (1.5), w liczniku jest $M_X \sin^3 i$. Powinno być $M_X^3 \sin^3 i$;
- 2) Na stronie 23 brakuje potęgi 2 przy definicji izotermicznej prędkości dźwięku (tzn. powinno być $c_s^2 = p/\rho$);
- 3) Rysunek 4.1 (panel a). Opis: czerwona ciągła linia oraz czarna kreskowana określają ten sam model a6;
- 4) Na stronie 51 Autorka pisze „Na rysunku 4.2(a) widać wzrost jasności oraz ztwardnienie widma”. Moim zdaniem jest wzrost widma oraz zmiękczenie widma.
- 5) Na stronie 54 rozprawy jest napisane „model v1 z $\alpha=0.3$ ” powinno być z $\alpha=0.1$; na stronie 58 jest angielski spójnik „and”; na stronie 62 jest słowo „mechanizmów”; na stronie 64 jest „dla gwiazdowych czarnych przewidyują” powinno być „dla gwiazdowych czarnych dziur przewidyują”; na stronie 67 jest „Linia anihilacyjnej jest”, powinno być „Linia anihilacyjna jest”.

Największymi, według mnie, dwiema usterkami, które zmniejszają czytelność rozprawy, lecz jej nie dyskwalifikują, jest a) zbyt pobieżne lub niekompletne wprowadzanie oznaczeń zmiennych fizycznych i parametrów modeli, b) nieczytelne zaprezentowanie relacji „wyniki modelu – model”. Ta ostatnia usterka wprowadza element chaosu, swoiste „zgubienie się” czytelnika w mnogości rozwiązań. Wróć do usterki a). Przykładowo, co to jest R (na stronie 24 rozprawy), Λ_{ie} (strona 28), η (strona 34)? Dobrym rozwiązaniem zastosowanym, ale tylko częściowo, jest zbiór Oznaczeń jakie występują w tekście. Szkoda, że Autorka nie rozbudowała tego zbioru (jaki znajduje się przed podrozdziałem 1.1) o kolejne pozycje. Ewentualnie, można by było zdefiniować zmienną fizyczną, powiedzieć co to jest, podczas jej pierwszego wystąpienia w tekście rozprawy, tak jak jest to uczynione w pracach (1)-(3).

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) Na stronie 10 i 27 dobrze byłoby podać jednostki parametru r_{tr} i r_{out} ;
- 2) Słuszniej byłoby doprecyzować zdanie na stronie 15, które teraz brzmi „Jasność bolometryczna sferycznego obiektu” i napisać np. „Jasność bolometryczna obiektu podczas akrecji sferycznej ...”;
- 3) Sądzę, że na rysunku 1.2 (strona 19) pracy dobrze byłoby podać w postaci linii antykorelację znaną przez Gu & Cao (2009), tak jak to widzimy później na rysunku 4.6 rozprawy. Wcześniejsze zaprezentowanie tej korelacji pomogłoby zobrazować „ogromne różnice” wspomniane przez Autorkę na stronie 18;
- 4) Na stronie 20 mgr Agnieszka Stępnik wspomina o „zmienności w zakresie rentgenowskim”. Moje pytanie czego dotyczy ta zmienność? Czy strumienia promieniowania czy zmian indeksu fotonowego w zakresie rentgenowskim w czasie?
- 5) W rozprawie jest napisane, że „tylko te [galaktyki] o małych wartościach M bywają obserwowane również z twardymi widmami z $\Gamma < 1.6$ ” (strona 21). Jako przykład podane są trzy galaktyki – NGC 4395, NGC 5273, NGC 6814 – każda o masie $< 5 \times 10^6 M_\odot$. Niemniej, jest jeszcze jedna wymieniona w rozprawie – NGC 4945

o masie $1.4 \times 10^6 M_{\odot}$. Posiada ona indeks Γ w zakresie 1.7-2.1. Ta galaktyka nie popiera spostrzeżenia Autorki. Lepiej nie używać słowa „tylko”.

- 6) Uważam, że byłoby dobrze, również w tekście, nie tylko w podpisie rysunku 2.1 (strona 29), podać informację, że Q oznacza tempo na jednostkę objętości scałkowane w kierunku poprzecznym;
- 7) Na stronie 28 Autorka pisze: „wkład ciśnienia promieniowania [w używanych modelach] jest zawsze pomijalny”. Co to oznacza liczbowo? Czy w trakcie symulacji Autorka sprawdza wartość tego parametru?
- 8) Co to oznacza, że „rozwiązania z $\delta = 0.5$ są łatwiejsze” (na stronie 30)? Do czego?
- 9) Mgr Agnieszka Stępnik nie wyjaśnia w rozprawie, dlaczego stosuje tylko określony, czasami wąski zakres wartości parametrów. Przykładowo parametr magnetyzacji przyjmuje przeważnie wartość 1 lub 9 (w 24 modelach na 28 zawartych w Tablicy 4.1). Jednocześnie na stronie 55 (patrz też Rysunek 4.4) Autorka zauważa, że w przypadku XTE 1550-564 ten parametr powinien być większy od 10. Dodatkowo moim zdaniem ten parametr powinien być mniejszy od 1 w przypadku obiektu XTE J1118+480. Dobrze byłoby to sprawdzić;

Czytając rozprawę mgr Agnieszki Stępnik odniosłem wrażenie, że doktorantka jest biegła w interpretacji wyników, wie co wpływa na takie, a nie inne zachowanie zmiennych fizycznych, jak te zmienne się ze sobą łączą. Uważam, że mgr Agnieszka Stępnik dobrze opanowała problematykę pracy. Duże wrażenie robi czytanie Autorki, ilość referencji (ponad 1600) użytych w rozprawie. W moim przekonaniu oryginalne rezultaty otrzymane w omawianej rozprawie stanowią istotny wkład w rozumieniu procesu akrecji gorącego składnika oraz procesów odpowiedzialnym za emisję promieniowania X oraz gamma. Niosą one ograniczenia obserwacyjne pomocne w wyborze adekwatnego modelu realizowanego przez naturę. Dowodem ważności otrzymanych wyników oraz zainteresowania środowiska jest ilość cytowań prac (1), (2), (3) osiągnięta w niedługim czasie po ich publikacjach w recenzowanych czasopismach. Uważam zatem, że rozprawa mgr Agnieszki Stępnik w pełni spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgr Agnieszki Stępnik do dalszych etapów przewodu doktorskiego i do publicznej obrony.

Marek Nikołajuk

Dr hab. Marek Nikołajuk, prof. UwB