

dr hab. Krzysztof Nalewajko
Centrum Astronomiczne im. Mikołaja Kopernika
Polskiej Akademii Nauk
ul. Bartycka 18, 00-716 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Dominiki Król
***“Physics of Evolving Black Holes and Their Relativistic Jets:
From Collapsing Massive Stars to Active Galactic Nuclei”***

Mgr Dominika Król przedstawiła rozprawę doktorską składającą się z czterech głównych rozdziałów (Rozdziały 2-5) stanowiących odrębne artykuły naukowe, każdy z nich został opublikowany w *the Astrophysical Journal* (ApJ). Każdy artykuł dotyczy zupełnie innego zagadnienia: Rozdział 2 – symulacje GRMHD kwazi-sferycznej akrecji na czarną dziurę o zmieniających się masie i spinie; Rozdział 3 – interpretacja zmienności optycznej blazara S5 0716+714 jako mikro-soczewkowanie grawitacyjne przez układ podwójny średnio-masywnych czarnych dziur; Rozdział 4 – modelowanie wielozakresowej (szczególnie rentgenowskiej) emisji z trzech zwartych radiogalaktyk (*compact symmetric objects*; CSO); Rozdział 5 – analityczne ograniczenia na magnetyzację relatywistycznych dżetów. Wszystkie artykuły są wieloautorskie, każdy z innymi (nie licząc promotora) doborowymi współautorami, trzy we współpracy międzynarodowej. Mgr Król jest pierwszą autorką każdego artykułu, a z oświadczeń współautorów wynika, że jej wkład do każdego artykułu był dominujący. Wymienione dotąd fakty o rozprawie mgr Król świadczą o nieprzeciętnym osiągnięciu. W dorobku mgr Król znajduje się jeszcze inna publikacja, która mogłyby wejść do rozprawy (artykuł w ApJ z 2020 r. o radiogalaktyce Cen A).

Rozdział 2 przedstawia wyniki symulacji numerycznych metodą GRMHD (magneto-hydrodynamika w ogólnej teorii względności) kwazi-sferycznej akrecji (typu Bondiego) na czarną dziurę, której masa oraz spin zmieniają się na skutek akrecji, do czego dostosowuje się natychmiastowo metryka Kerra. Kontekstem tego eksperymentu jest zapadanie się masywnych gwiazd tworzących błysk gamma (tzw. kolapsar). Symulacje są 2-wymiarowe (symetria osiowa), a badanymi parametrami są: normalizacja momentu pędu na jednostkę masy (S), początkowy spin czarnej dziury (A_o), początkowa magnetyzacja gwiazdy (β_o). Dla każdego parametru przyjęto po 3 wartości, co daje łącznie 27 zbadanych przypadków. Koncepcja projektu jest ciekawa, prezentacja wyników systematyczna i szczegółowa, a same wyniki całkiem zróżnicowane: uzyskane finalnie masy i spiny czarnych dziur są zupełnie inne od wartości początkowych. W szczególności, końcową wartość spinu (A_f) determinuje głównie parametr S .

Rozdział 3 przedstawia analizę zmienności optycznej blazara S5 0716+714 na podstawie danych z kosmicznego teleskopu TESS. Blazar ten jest znany z nieustannej zmienności.

Dane TESS charakteryzują się długimi seriami (~10 dni) nieprzerwanych obserwacji z kilku-minutowym próbkowaniem. Autorzy pracy wskazali 6 przykładów powtarzającego się wzoru („wulkanu”) z symetrycznym minimum w skali kilku godzin i zbadali hipotezę, że jest to rezultat mikro-soczewkowania blazara przez znajdujący się przed nim układ podwójny czarnych dziur, najprawdopodobniej średnio masywnych. Jest to ciekawa hipoteza, bardzo rzadko przywoływana w przypadku blazarów. Bardzo niejasne jest prawdopodobieństwo silnego soczewkowania blazara (blazarów tak jasnych jak S5 0716+714 nie jest wiele), tym bardziej przez obiekt tak enigmatyczny jak układ podwójny średnio-masywnych czarnych dziur. Przedstawiona analiza jest ciekawą demonstracją takiej możliwości, trudno ją jednak uznać za dowód, ponieważ pokazano kilka przykładów wybranych subiektywnie (a inne odrzucono). Tak masywna soczewka powinna oddziaływać permanentnie (autorzy argumentują, że przynajmniej 20 lat), a więc w całym zakresie danych TESS, także w stanie niskiej zmienności (trzeci panel Rys. 1). Dyskretne wzory soczewkowania implikują występowanie wzdłuż dżetu pojedynczych jasnych węzłów (*knots*) propagujących się nadświatlnie, mimo ogólnie niskiej amplitudy zmienności optycznej. Wyrażony tutaj sceptycyzm nie umniejsza wartości tej pracy – jest to śmiała idea, prowokująca do myślenia, warta dalszego badania.

Rozdział 4 przedstawia modelowanie wielozakresowych danych obserwacyjnych (milimetrowe – SMA, optyczne – archiwum NED, rentgenowskie – Chandra, gamma – Fermi/LAT (górne limity)) dla trzech młodych i zwartych radiogalaktyk typu „*compact symmetric objects*” (CSO). Z oświadczeń współautorów wynika, że mgr Król przeanalizowała dane rentgenowskie z kosmicznego teleskopu Chandra dla jednego obiektu („J1511” – stwierdzono brak rozciągłości), a także przeprowadziła modelowanie rozkładów widmowych. Zbadano hipotezę, że twarda emisja rentgenowska pochodzi z re-procesowania (komptonizacja oraz odbicie) promieniowania dysku akrecyjnego w zwartych płatach (*lobes*) radiowych, dla wszystkich obiektów uzyskano modele zgodne z danymi obserwacyjnymi.

Rozdział 5 przedstawia teoretyczne ograniczenia na magnetyzację relatywistycznych dżetów. Badana jest hipoteza, że dżety zawierające jedynie toroidalną składową pola magnetycznego równoważoną ciśnieniem plazmy (tzw. Z-pinch) są zdominowane energią plazmy, tzn. ich magnetyzacja (uśredniona po przekroju dżetu) $\sigma < 1$. Zagadnienie to sprowadzone jest praktycznie do lematu matematycznego. Struktura poprzeczna dżetu określona jest swobodnie dobranymi funkcjami, przy jednoczesnym założeniu ścisłej symetrii osiowej. Mam zasadniczą wątpliwość co do realistyczności takiego modelu dżetu, ponieważ konfiguracja Z-pinch oczekiwana jest na dużych odległościach (po zaniknięciu składowej poloidalnej), a jednocześnie jest silnie niestabilna (Begelman 1998, Ortuno-Macias et al. 2022), tym bardziej jeżeli maksimum ciśnienia (+napięcia) magnetycznego umieszczono akurat na brzegu dżetu (warstwy gdzie $\frac{dB_{\phi}}{dx} > 0$ są szczególnie niestabilne). Nie widzę możliwości, aby taki dżet zachował symetrię osiową. Sama hipoteza, że taki dżet powinien być zdominowany energią plazmy, nie jest zaskakująca – wiąże się z dobrze znanym problemem przejścia dżetu od stanu $\sigma \geq 1$ do stanu $\sigma \ll 1$.

Przedstawiony we wstępie argument z pracy Lyubarsky (2010) ogranicza się do dżetu stabilnego z uporządkowanymi polami magnetycznymi. Efektywna dyssypacja energii magnetycznej wymaga zniszczenia struktury pól magnetycznych poprzez niestabilności wewnętrzne lub brzegowe. Sama praca napisana jest całkiem elegancko, szczególnie Sekcje 2-3, aczkolwiek wprowadzenie szeregu nieintuicyjnych oznaczeń utrudnia np. odbiór prezentacji konferencyjnej. W Sekcji 4.1 wprowadzono uśrednianie parametrów warstwami – prostszym rozwiązaniem byłoby przedstawienie lokalnej magnetyzacji jako funkcji x .

Przedstawioną rozprawę oceniam jako bardzo dobrą. Zakres poruszonej tematyki oraz stosowanych metod (analiza danych obserwacyjnych, modelowanie wyników obserwacji, symulacje numeryczne, obliczenia analityczne) jest imponująco szeroki. Najwięcej (6) cytowań zebrał artykuł o symulacjach GRMHD przedstawiony w Rozdziale 2 (NASA/ADS, 17.07.2024), natomiast najlepiej napisany jest artykuł o zmienności blazara przedstawiony w Rozdziale 3. Poszczególne rozdziały rozprawy nie są bezpośrednio powiązane – w takim przypadku przydałby się bardziej rozbudowany rozdział wprowadzający (Rozdział 1).

Uwagi krytyczne.

Rozdział 1 (wprowadzenie).

1. Właściwym odnośnikiem do identyfikacji 3C 273 jako kwazara jest Schmidt (1963); praca Rees (1966) wprowadziła relatywistyczne wzmocnienie jasności.
2. Wzór na metrykę Kerr'a zawiera dwa błędy: w trzecim składniku po prawej stronie powinno być $d\phi$ zamiast $d\phi^2$, brakuje składnika $+\Sigma d\theta^2$; powinno być zaznaczone, że są to współrzędne Boyera-Lundquista.
3. „BZ mechanism ... GRMHD equations in the force-free limit ... technically valid only for slowly spinning BHs” – równania *force-free electrodynamics* są zasadniczo inne niż równania MHD (pole elektryczne jest równorzędne polu magnetycznemu (poprzez potencjał elektromagnetyczny A^μ), w MHD jest podrzędne); oryginalne rozwiązanie Blandforda-Znajka ogranicza się do składowych a^2 , technicznie metodę perturbacji można rozszerzyć do wyższych rzędów (np. Camilloni et al. 2022).
4. „BHs themselves do not emit electromagnetic radiation” – promieniowanie Hawkinga.
5. Relacje M_{BH} vs. L_B lub σ_B nie powinny być przedstawiane jako równania – są to dopasowania z istotnymi niepewnościami.
6. Sekcja 1.1, akapit 3: zapowiedź Rozdziału 3 w zdaniu 2 jest powtórzona w zdaniach 6-7.

Rozdział 2 (symulacje GRMHD).

7. Sekcja 3.2.1, Rysunek 10: wyniki dotyczące występowania fal uderzeniowych („szoków”) budzą wątpliwości – dlaczego szoki występują niekonsekwentnie, sporadycznie, na bardzo różnych promieniach? Zupełnie niejasne jest ich

- znaczenie. Przykładowo, dwukrotnie wspomniano, że dla $S = 1,4$ i $A_0 = 0,3$ znaleziono szok tylko w jednym kroku czasowym ($t = 0,857$ s). Czy taki szok nie jest artefaktem? Jak wyglądałby na Rys. 8 (gdzie niestety nie pokazano tego kroku czasowego), jaki zakres θ obejmuje?
8. Sekcja 3.3. Nie zdefiniowano liczby Macha, szczególnie w przypadku niezerowej magnetyzacji (a zwłaszcza dla $\beta = 1$), w którym rozróżnia się prędkości Alfvena oraz szybką i wolną magneto-soniczną. Ponieważ pojęcie „sonic surface” pojawia się nawet w Sekcji 3.3.2, odnoszę wrażenie, że używana jest liczba Macha oparta o zwykłą prędkość dźwięku, która dla $\beta = 1$ nie ma znaczenia.
 9. Sekcja 2.4, akapity 2-4: wpływ masy otoczki gwiazdowej (*envelope*) na metrykę wydaje się jednak istotny, skoro początkowa masa otoczki ($25 M_{\text{Sun}}$) jest znacznie większa od początkowej masy czarnej dziury ($3 M_{\text{Sun}}$) (Seksja 2.5). Używanie przy tym pojęcia „chmury” (*cloud*) sugeruje niesłusznie, że gęstość gwiazdy jest nieistotna. W Sekcji 4 (akapit 5) wspomniane są dodatkowe testy – domyślam się, że uwzględniające samo-grawitację, ale nie jest jasne dokładnie w jaki sposób (w świetle uwagi, że testy te nie uwzględniały „higher-order terms in metric evolution”).
 10. Sekcja 4, akapity 13-14, Rys. 18: porównywanie ograniczonych i przejściowych dysków z modelem Shakury-Sunyaeva jest niezasadne, ponieważ przejściowość oznacza brak równowagi, niska rozdzielczość pozwala jedynie na dyski grube i pod-Keplerowskie, brak właściwej lepkości (MRI), dyssypacji, promieniowania; porównanie jedynie radialnych profili gęstości jest niewystarczające (samo niezgodne nachylenie tych profili powinno wystarczyć do odrzucenia hipotezy).
 11. Tabela 1:
 - a) symulacje hydrodynamiczne (raczej niż „termiczne”) dla $S = 1.4$ powinny być prowadzone nieco dłużej niż $t_f \sim 1.4-1.5$, ponieważ nie osiągnięto saturacji dla M_{BH} (Rys. 4). Podpis tabeli stwierdza, że masa otoczki gwiazdowej dla t_f „was close to zero” – co to znaczy?
 - b) wprowadzono oznaczenia dla każdej symulacji – konsekwentne stosowanie ich w Sekcji 3 i na rysunkach znacznie uprościłoby opis wyników.
 12. Tabela 2: opis tabeli jest niewystarczający, nagłówek powtórzony po Tabeli 1.
 13. Rysunek 5: podpis stwierdza, że środkowe panele są powiększone do $100 r_g$ – jednak etykiety wartości r są takie same jak na innych panelach.
 14. Rysunek 9: Skąd pochodzą wyniki dla $A_0 = 0$?
 15. Sekcja 2 napisana jest dość chaotycznie, jest sporo powtórzeń i kilka usterek:
 - a) po wzorze 9: wymieniane są elementy metryki odwrotnej (kontra-wariantnej);
 - b) po wzorze 12: oznaczenie „u” jako gęstość energii wewnętrznej nie występuje w poprzedzających wzorach, a może być mylone z u^μ lub u_μ ;
 - c) Sekcja 2.3, ostatni akapit: powtórzone „h=1”, w jednym przypadku powinno być „h=0”.
 - d) Sekcja 2.4, akapit 1: „six nontrivial components of the Kerr metric”: $g_{\{t,r\}}$ oraz $g_{\{r,\phi\}}$ są niezerowe we współrzędnych K-S, w odróżnieniu od B-L.
 - e) wzór 14: czy potencjał A_ϕ zależy od r ?

- f) Sekcja 2.6, ostatnie zdanie: „*at the inner boundary of the grid*” – czy chodzi o $0.98 r_h$, wewnątrz horyzontu?

Rozdział 4 (CSO).

16. Rozdział 3.1: informacja o ilości obserwacji poszczególnych źródeł przez teleskopy SMA nie zgadza się z Tabelą A2.
17. Rozdział 3.2: w opisie analizy danych gamma z teleskopu Fermi/LAT, pojawiają się różne wartości parametrów, np. minimalna energia fotonu (najpierw 100 MeV, potem 300 MeV), maksymalny kąt zenitalny (najpierw 95 st., potem 85 st.).
18. Rozdział 5, akapit 2: indeks rozkładu elektronów $s_2 \sim 4.7 - 5.8$ jest zbyt miękki, aby uznać go za zgodny ze standardowym procesem DSA.
19. Rozdział 6, akapit 4: drugie zdanie „*Due to the high absorption ...*” jest niekompletne.
20. Rozdział 7, punkt (5): czy nazwa źródła J2021+624 jest prawidłowa?

Rozdział 5 (magnetyzacja dżetów).

21. Sekcja 1, akapit 2: „*logarithmically large distances*” może być mylące (zestawmy z „*exponentially large distances*”), brakuje też jednostki (R_g ?).

Podsumowując, rozprawa doktorska mgr Dominiki Król imponuje różnorodnością poruszanych zagadnień, stosowanych metod, a także współpracowników (w tym międzynarodowych). Rozprawa zawiera szereg ciekawych i oryginalnych wyników w zakresie procesów zachodzących wokół aktywnych czarnych dziur – akrecji oraz dżetów. Rozprawa ta spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim w ustawie „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”. Z pełnym przekonaniem wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Krzysztof Nalewajko

Dokument podpisany
przez Krzysztof
Nalewajko
Data: 2024.07.24
11:23:16 CEST