

Center for Theoretical Physics

Polish Academy of Sciences

Aleja Lotników 32/46, 02-668 Warsaw

Tel. (+48 22) 847 09 20, Fax/Tel: (+48 22) 843 13 69

E-mail: cft@cft.edu.pl, NIP: 525-000-92-81, REGON: 000844815

Warszawa. 19 lipca 2024

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Dominiki Król

Rozprawa doktorska mgr Król *“Physics of Evolving Black Holes and Their Relativistic Jets: From Collapsing Massive Stars to Active Galactic Nuclei”* została przygotowana pod kierunkiem dr hab. Łukasza Stawarza, profesora UJ. Rozprawa jest poświęcona szeregowi ważnych, nierozwiązanych zagadnień związanych z procesem akrecji na czarne dziury. Zasadnicze wyniki rozprawy to cztery publikacje, w których mgr Król jest pierwszą autorką. Prace zostały uszeregowane według rosnącej odległości od samej czarnej dziury, zakres tych odległości to rzędy wielkości, a wraz z tą odległością zmieniają się procesy, które mają zasadniczy wpływ na zachodzące zjawisko. Oprócz czterech publikacji, w skład rozprawy wchodzi Wstęp oraz Podsumowanie, zawierające także potencjalne kierunki dalszego rozwoju. Rozprawa została przygotowana w języku angielskim. Rzuca się natychmiast w oczy perfekcyjna strona organizacyjna i estetyczna rozprawy, w tym lista rysunków i tabel. Wartość merytoryczną omawiam poniżej.

Introduction

Wstęp wprowadzający do rozprawy czyta się dobrze. Jest on faktycznie niezbędny, dzięki niemu przedstawione w dalszych rozdziałach prace zaczynają stanowić spójną całość. Poprowadzenie wstępu dobrze odpowiada zawartości rozprawy, rozpoczyna się on od rozwiązań opisujących czarne dziury w Ogólnej Teorii Względności, szybko wskazuje na rolę argumentów obserwacyjnych za istnieniem tych obiektów w naturze, a następnie kontynuuje w kierunku wzajemnego oddziaływania czarnej dziury i otoczenia. Podane są najważniejsze fakty pokazujące to wzajemne powiązanie małego (w proporcji do całej galaktyki) obiektu centralnego i galaktyki macierzystej jako całości, a mianowicie związek statystyczny pomiędzy masą centralnej czarnej dziury i własnościami globalnymi (dyspersja prędkości itp.), oraz związek ewolucyjny pomiędzy występowaniem zjawiska kwazara oraz maksimum aktywności gwiazdotwórczej. To oddziaływanie jest kluczowe dla opisu całej ewolucji galaktyk, a badania prowadzone w rozprawie częściowo stanowią kontrybucję do tego, jak takie oddziaływanie zachodzi. Autorka omawiając obserwowany zakres mas czarnych dziur bardzo słusznie nawiązuje także do wyznaczeń pochodzących z detekcji fal grawitacyjnych, oraz do implikacji najnowszych wyników z JWST.

Mam dwie drobne uwagi do tej części pracy. Pierwsza to taka, że byłoby bardziej elegancko cytować oryginalne pionierskie prace (po jednej na odkrycie), które nakreślały dalszy postęp. Na



Center for Theoretical Physics

Polish Academy of Sciences

Aleja Lotników 32/46, 02-668 Warsaw

Tel. (+48 22) 847 09 20, Fax/Tel: (+48 22) 843 13 69

E-mail: cft@cft.edu.pl, NIP: 525-000-92-81, REGON: 000844815

przykład, kwazar 3C 273 – pierwszy kwazar o stwierdzonej kosmologicznej odległości – został poprawnie zinterpretowany przez Maartena Schmidta (1963). Autorem no-hair theorem nie jest z pewnością Gurlebeck w roku 2015, a pierwsi, którzy pokazali praktycznie liniową współzależność masy centralnej czarnej dziury z całą galaktyką (konkretnie, w tym wypadku z masą jej zgrubienia centralnego) byli Magorrian i in. (1998). Ale trzeba przyznać, że szereg starszych referencji jest też uwzględniona, i oczywiście uzupełniona nowszymi pracami przeglądowymi.

Druga uwaga dotyczy mechanizmu Blanford-Payne jako mechanizmu decydującego o powstawaniu dżetu. Ten mechanizm nie został w ogóle wspomniany. Nie jestem przekonana, że argumenty z symulacji za mechanizmem Blandford-Znajek automatycznie negują tę drugą możliwość. Bardzo chętnie usłyszałabym wyjaśnienie tej sprawy w trakcie obrony.

Praca 1

Ta publikacja (tytuł: „*Accretion-induced Black Hole spin-up Revised by Numerical General Relativistic MHD*”) została przygotowana we współpracy z prof. Agnieszką Janiuk i adresuje problem powiązania warunków panujących w centralnych obszarach kolapsującej gwiazdy z masą i momentem pędu powstającej czarnej dziury. To ma znaczenie dla przebiegu (w szczególności czasu trwania) obserwowanego błysku gamma, który temu zjawisku towarzyszy. Zapadająca się gwiazda z pewnością ma znaczący moment pędu, ale może on być utracony przy odrzuceniu otoczki.

Obliczenia są trudne, wymagają uwzględnienia efektów Ogólnej Teorii Względności, i wykonane zostały przy użyciu kodu numerycznego HARM. Obliczenia zawierały ewolucję momentu pędu i masy czarnej dziury w tym procesie. To zostało wykonane po raz pierwszy, wcześniejsze obliczenia tego nie uwzględniały. Konieczne było jednak założenie małego momentu pędu przy opisie modelu początkowego, oraz prosty analityczny przepis na konfigurację pola magnetycznego. Autorka porównała modele bez pola magnetycznego i z polem magnetycznym. Rysunek 9 w sposób kompaktowy pokazuje cały zakres parametrów końcowych osiągniętych w symulacjach bez pola magnetycznego w zależności od wartości parametrów początkowych. Fale uderzeniowe i obecność pola magnetycznego modyfikują te wartości. W niektórych symulacjach obserwowano przejściowe formowanie się dysku akrecyjnego, i jego parametry zostały porównane z modelami dysków keplerowskich Shakury i Sunyaeva. Ewolucja czasowa spinu jest często niemonotoniczna, po początkowym wzroście wartość spinu spada, a wartości końcowe w większości symulacji są nie za duże. Jak można się było spodziewać, modele numeryczne i teoretyczne znacząco się różniły na większych odległościach od czarnej dziury.

W sumie autorka pokazuje, że o końcowej wartości spinu centralnej czarnej dziury uformowanej w trakcie kolapsu decyduje szereg czynników, nie tylko rotacja otoczki, jak można byłoby oczekiwać, ale także względna rola pola magnetycznego. W przedstawionych symulacjach

wartość końcowa spinu antykoreluje się z końcową wartością masy, co jest w interesującej zgodności z obserwacjami.

Praca II

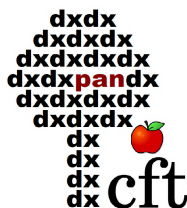
Publikacja „*Possible Gravitational Microlensing Events in the Optical Lightcurve of Active Galaxy S5 0716+714*” ma więcej współautorów (Stawarz, Krzesiński, Cheung) i wymagała pracy zarówno z danymi obserwacyjnymi, jak i modelowania w ramach zaproponowanego scenariusza. Praca dotyczy obiektu typu blazar, silnie zmiennego, w którym oprócz typowego sygnału stochastycznego pojawił się powtarzający się systematycznie kształt typowy dla zjawiska mikrosoczewkowania. Praca była zatem poświęcona testowaniu tej hipotezy.

Kształt minimum faktycznie został wymodelowany w ramach jednego modelu w przypadku sześciu epizodów, ale moje wątpliwości budzi fakt, że wyjście z minimum właściwie nigdy nie odpowiada modelowi. W pięciu na sześć epizodów po wyjściu z minimum jasność silnie rośnie, jedynie w ostatnim przypadku początkowo maleje, ale później znów rośnie, co nie zgadza się ze stochastyczną (poza momentem mikrosoczewkowania) zmiennością dżetu. Zmieniał się też znacząco czas trwania epizodu, ale pewne nieregularności wyjaśniane są złożonością kinematyki dżetu. Autorzy nie rozważają alternatywnych modeli, natomiast spodziewają się udowodnienia proponowanego mechanizmu poprzez dalszy rozciągnięty w czasie monitoring.

Obiekt jest niewątpliwie interesujący, tak jak i zastosowana hipoteza. Gdyby faktycznie blazar był mikrosoczewkowany przez masywny układ podwójny, byłby to niezwykle interesujący dowód istnienia takiego układu w postaci czarnej dziury o masie klasy 'intermediate mass black hole' (IMBH), lub nawet masywniejszej, ale nie znajdującej się w centrum galaktyki. Obie możliwości są bardzo interesujące, argumenty podawane w literaturze za istnieniem IMBH są nadal dość słabe, a masywne czarne dziury poza centrami galaktyk też rzadkie. W rozważanym przypadku towarzysz obiektu powinien być znacznie mniej masywny. Zatem pomimo swoich wątpliwości co do dowodu scenariusza (ale lepszego pomysłu nie mam), uważam pracę za bardzo ważną.

Praca III

Tu centralnym tematem, jak ujawnia tytuł: „*On the Origin of the X-ray Emission in Heavily Obscured Compact Radio Sources*” jest struktura aktywnego jądra w odległościach rzędu kilku do kilkudziesięciu parseków. Praca ma jeszcze więcej współautorów (Sobolewska, Stawarz, Siemiginowska, Miliori, Principe i Gurwell), co jest typowe w pracach obserwacyjnych. Wybrane trzy radioźródła, pomimo orientacji względem obserwatora raczej w kierunku osi symetrii, na co wskazuje morfologia CSO, wykazują znaczącą absorpcję w zakresie rentgenowskim. Praca zawiera analizę obrazów obszaru z satelity Chandra dla obiektu J1511+0518, który oprócz słabego jądra wskazuje na rozciąglą emisję z obszaru o rozmiarze ponad 2 kps. W ostatniej z trzech obserwacji obszar rozciąglą nie był widoczny, co mogło wynikać ze stopniowej degradacji



Center for Theoretical Physics

Polish Academy of Sciences

Aleja Lotników 32/46, 02-668 Warsaw

Tel. (+48 22) 847 09 20, Fax/Tel: (+48 22) 843 13 69

E-mail: cft@cft.edu.pl, NIP: 525-000-92-81, REGON: 000844815

satelity. Obserwacje rentgenowskie zostały uzupełnione dostępnymi obserwacjami archiwalnymi z wielu zakresów widmowych, co pozwoliło na wymodelowanie szerokopasmowych widm (SED) badanych obiektów. SEDs są zdominowane przez emisję w zakresie podczerwieni, co sugeruje przesłanianie centralnego dysku akrecyjnego emitującego UV przez torus pyłowy. Autorka przedstawia argumenty energetyczne za tym, że emisja rentgenowska w przypadku tych obiektów nie pochodzi bezpośrednio z centralnej korony, a ze zwartych radioobłoków (w wyniku odbicia Comptona) i wyjaśnia brak emisji w zakresie promieniowania gamma zjawiskiem absorpcji. (Prawdopodobnie) młode radioobłoki są na tyle małe, że mogą być wewnątrz pyłowo-molekularnego torusa. Autorka przedstawia interpretację ewolucyjną różnicy pomiędzy badanymi obiektami i innymi typowymi obiektami typu CSO. Zaproponowana interpretacja – radioobłoki wewnątrz torusa – stwarza możliwość znacznej roli odbicia promieniowania w tym ośrodku, a znaczna absorpcja w zakresie rentgenowskim sugeruje, że obiekt faktycznie widzimy przez torus pyłowy. Co mnie jednak dziwi, to fakt, że źródła CSO powinniśmy widzieć 'z góry', wzdłuż osi symetrii, a wtedy torus pyłowy nie powinien być na linii widzenia, o ile orientacja płaszczyzny dysku i płaszczyzny torusa są jednakowe. W przypadku tej publikacji odczuwam pewien niedosyt z powodu niepełnego wykorzystania informacji o obiekcie z optycznego zakresu widma. Obiekt w katalogu Veron-Cetty klasyfikowany jest jako Seyfert 1, pomimo znacznego poczerwienienia widma widzimy dobrze obszar szerokich linii emisyjnych, zatem przesłanianie nie jest tak silne, aby torus przesłonił centralne źródło rentgenowskie. Zaproponowana w pracy interpretacja pasowałaby lepiej, gdyby AGN był typu Seyfert 2. Zapewne źródło przesłaniania jest inne, wiele AGN wykazuje niezgodność pomiędzy absorpcją rentgenowską i optyczną/ultrafioletową (zazwyczaj interpretowane jako 'dust-free obscurer'), a wyselekcjonowany obiekt mógłby wskazać rozwiązanie problemu, czyli lepszą lokalizację materii przesłaniającej. A może obiekty są jednak widziane pod znaczącym kątem? Kiehlmann et al. (2024; <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ad0c56/pdf>) twierdzi, że tak się zdarza w przypadku niektórych obiektów, i wtedy ich klasyfikowanie jako CSO jest niepoprawne. W sumie niezwykle ciekawy projekt, wymagający dodatkowej pracy!

Praca IV

Publikacja „*Magnetization of Relativistic Current-carrying Jets with Radial Velocity Shear*” adreduje trudny i kontrowersyjny problem materialnej zawartości relatywistycznego dżetu. Ta praca ma również pięciu współautorów, w tym opiekuna rozpraw. Autorka skupia się tu na modelowaniu dżetu w większych odległościach od centralnej czarnej dziury, ponieważ bliżej panuje raczej zgodność, że tam energetycznie dominuje strumień Poyntinga. Wykorzystany model jest analityczny, opiera się o założenie, że dżet osiągnął już prędkość terminalną, a pole magnetyczne jest toroidalne. Ważnym kolejnym założeniem jest fakt, że dżet jest w równowadze magnetostatycznej. Założenia upraszczające są niezbędne do uzyskania rozwiązania analitycznego, ale wydają się uzasadnione w odniesieniu do dżetu w odległości większej niż $10^4 r_g$ dla obiektów o typowej masie $10^9 M_{\text{sun}}$. Dysypacja i produkcja promieniowania zazwyczaj zachodzi w tej właśnie odległości, dalsza ewolucja jest bardziej pasywna. Co więcej, podobne założenia sprawdzają się przy modelowaniu bardzo stabilnych struktur w koronie słonecznej.

Center for Theoretical Physics
Polish Academy of Sciences
Aleja Lotników 32/46, 02-668 Warsaw
Tel. (+48 22) 847 09 20, Fax/Tel: (+48 22) 843 13 69
E-mail: cft@cft.edu.pl, NIP: 525-000-92-81, REGON: 000844815

Przy przyjętych założeniach autorka pokazała, że dżet w tych odległościach jest już zdominowany materią. Znaczące odejście od tych założeń (znaczna stratyfikacja radialna, większa magnetyzacja) powinno prowadzić do silnych niejednorodności, powstawania fal uderzeniowych i zachodzenia rekoneksji pola magnetycznego. To powinno się przejawiać zdaniem autorki w silnej zależności własności dżetu od kąta widzenia. Być może także powinno ujawnić się w formie zmienności, choć może skale czasowe byłyby za długie. To nie jest dyskutowane w pracy.

Podsumowanie

Podsumowując, przygotowanie rozprawy wymagało od mgr Dominiki Król bardzo dużej wszechstronności, ponieważ wymagało koncepcji teoretycznych oraz pracy z danymi w szerokim zakresie widmowym, a praca teoretyczna to zarówno symulacje magnetohydrodynamiczne jak i modelowanie analityczne. Nic dziwnego, że praca wymagała pewnej pomocy ze strony współautorów publikacji, ale wkład mgr Król był zdecydowanie dominujący. Prace zostały wykonane z różnymi współautorami, co podkreśla umiejętność pracy i organizacji pracy w większym zespole przez autorkę. Uzyskane wyniki są potencjalnie ważne i frapujące. W szczególności obserwacyjne potwierdzenie istnienia IMBH (o ile natura zjawiska jako mikrosoczewkowanie się potwierdzi) jest niezwykle ważne, a selekcja obiektów i wyniki badań dla obiektów CSO z absorpcją mają dalszy jeszcze potencjał, aby wyjaśnić geometrię centralnych części AGN.

Konkluzja

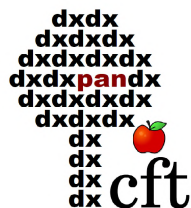
Stwierdzam zatem, że rozprawa doktorska mgr Dominiki Król jest wartościowa i prowadzi do lepszego zrozumienia procesów zachodzących tak w bezpośrednim otoczeniu czarnej dziury jak i w odległościach o kilka rzędów wielkości większych. Rozprawa spełnia wszelkie formalne i zwyczajowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę zatem o dopuszczenie mgr Dominiki Król do dalszych etapów postępowania doktorskiego. Jednocześnie, w uznaniu dwóch wyżej wspomnianych wyników za niezwykle ważne **zwracam się z wnioskiem o wyróżnienie rozprawy doktorskiej** mgr Dominiki Król. Moje krytyczne w pewnych miejscach uwagi wynikają wyłącznie z faktu, że świetna praca zawsze rozbudza dodatkowe oczekiwania.

Bożena

Jadwiga Czerny

prof. dr hab. Bożena Czerny

Digitally signed by
Bożena Jadwiga Czerny
Date: 2024.07.19
13:45:18 +02'00'



Center for Theoretical Physics

Polish Academy of Sciences

Aleja Lotników 32/46, 02-668 Warsaw

Tel. (+48 22) 847 09 20, Fax/Tel: (+48 22) 843 13 69

E-mail: cft@cft.edu.pl, NIP: 525-000-92-81, REGON: 000844815