

## Recenzja rozprawy doktorskiej

Autor rozprawy: *mgr Mikołaj Grzędzielski*

Tytuł rozprawy: *“Models of accretion disks thermal oscillations in application to systems with black holes”*

*”Modele termicznych oscylacji dysków akrecyjnych w zastosowaniu do układów z czarnymi dziurami”*

Tematem rozprawy jest modelowanie oscylacji strumienia promieniowania emitowanego w dziedzinie rentgenowskiej przez dyski akrecyjne wokół czarnych dziur o różnych masach. Celem tych badań jest weryfikacja hipotezy badawczej, zgodnie z którą obserwowane oscylacje są przejawem niestabilności termicznej w dysku wywołanej ciśnieniem promieniowania. Problem istnienia takiej niestabilności w realistycznych warunkach fizycznych jest otwarty, stanowi obecnie przedmiot intensywnych studiów, a jego rozwiązanie jest niezbędne do zrozumienia procesów akrecyjnych zachodzących w rentgenowskich układach podwójnych, ultra-intensywnych źródłach rentgenowskich oraz aktywnych jądrach galaktyk. Tematyka pracy doktorskiej jest więc aktualna i ważna.

Rozprawa doktorska liczy 103 strony, składa się z siedmiu rozdziałów w tym krótkiego podsumowania. Praca rozpoczyna się bardzo ogólnym wstępem do problematyki dysków akrecyjnych, zaczynając od równań Maxwella, a na klasyfikacji rentgenowskich układów podwójnych kończąc. Właściwym wprowadzeniem do tematu rozprawy jest dopiero rozdział drugi, gdzie zawarte są równania opisujące strukturę, ewolucję i stabilność standardowego dysku akrecyjnego. W trzecim rozdziale autor rozprawy przedstawia opis kodu numerycznego użytego w symulacjach, szczegóły przeprowadzonych obliczeń oraz oryginalne wyniki dotyczące modelowania oscylacji obserwowanych w mikrokwazarze IGR J17091-3624. Wyniki te zostały opublikowane w 2015 roku w *Astronomy and Astrophysics* w pracy napisanej przez Agnieszkę Janiuk, Mikołaja Grzędzielskiego, Fiammę Capitanio i Stefano Bianchi zatytułowanej “Interplay between heartbeat oscillations and wind outflow in microquasar IGR J17091-3624”. Rozdział czwarty poświęcony jest modelowi dysku ze zmodyfikowanym przepisem na lepkość i jego możliwym zastosowaniem do opisu regularnej zmienności mikrokwazarów, ultraintensywnych źródeł rentgenowskich i aktywnych galaktyk. Przedstawione w nim wyniki ukazały się drukiem również w *Astronomy and Astrophysics* w roku 2017 w pracy, której pierwszym autorem jest autor rozprawy. Jest to pierwszy i właściwie jedyny rozdział, w którym wkład autora rozprawy do oryginalnych wyników jest wyraźnie i jasno podkreślony. Policzenie siatki modeli teoretycznych dla oscylacji wywołanych ciśnieniem promieniowania w

szerokim zakresie parametrów i porównanie wyników modelowych z obserwacjami pozwoliło na określenie masy i tempa akrecji dla nowo odkrytego układu HLX-1, obiektu należącego do klasy źródeł świecących na koszt energii wyzwolonej w procesie akrecji materii na czarne dziury o masie rzędu  $10^3 - 10^6$  mas Słońca. Jak można było tego dokonać wyjaśniono w rozdziale piątym. W rozdziale szóstym przebadano wpływ nieprzezroczystości na rozwój niestabilności termicznej w aktywnych jądrach galaktyk. Wyniki te zostały opublikowane w *Astrophysical Journal* w roku 2017 we współpracy z Agnieszką Janiuk i Bożeną Czerny. Rozdział siódmy i ostatni to podsumowanie, w którym przedstawione zostały główne wyniki rozprawy. Ostatnie 7 stron to bibliografia składająca się z trzech podręczników i z ponad 100 artykułów.

Rozprawa opiera się na czterech opublikowanych artykułach, dwa z nich ukazały się w czasopiśmie *Astronomy and Astrophysics* (jeden w 2015 roku, a drugi w 2017), natomiast dwa kolejne w *Astrophysical Journal* w latach 2016 i 2017. O trzech pracach była już mowa, czas więc na czwartą, ogłoszoną w *Astrophysical Journal* w 2016 roku autorstwa Qingwen Wu, Bożeny Czerny, Mikołaja Grzędzielskiego, Agnieszki Janiuk i innych, której tytuł "The Universal Heartbeat Oscillations in Black Hole Systems Across the Mass-scale" doskonale podsumowuje to co w pracy jest najbardziej cenne.

Moim zdaniem bowiem, głównym osiągnięciem pracy jest pokazanie, że przyjęcie hipotezy o istnieniu niestabilności termicznej w dyskach akrecyjnych pozwala na interpretację oscylacji promieniowania rentgenowskiego emitowanego przez obiekty świecące na koszt energii wyzwolonej w procesie akrecji na czarne dziury, bez względu na to czy są to czarne dziury o masach rzędu  $10$ ,  $10^5$  czy  $10^8$  mas Słońca. W przypadku pierwszym (czarne dziury o masach rzędu  $10$  mas Słońca) na przykładzie mikrokwazara IGR J17091-3624 udało się, po uwzględnieniu wypływu materii w formie wiatru, uzyskać dobre dopasowanie do obserwowanej krzywej blasku oraz co jest jeszcze bardziej istotne, jednocześnie, ilościową zgodność z oszacowanym tempem utraty masy z dysku w postaci wiatru. W przypadku drugim (czarne dziury o masach rzędu  $10^3 - 10^6$ ) powodzeniem zakończyło się odtworzenie czasu trwania, okresu i amplitudy powtarzających się pojaśnień w nowo odkrytym źródle HLX-1. Co więcej znaleziono uniwersalną korelację pomiędzy czasem trwania pojaśnień i jasnością bolometryczną źródła zawierającego akreującą czarną dziurę w szerokim zakresie mas od rentgenowskich układów podwójnych do aktywnych jąder galaktyk. Takiej relacji należałoby się spodziewać jeśli mechanizmem odpowiedzialnym za zmienność promieniowania byłaby właśnie niestabilność termiczna w dysku akrecyjnym wywołana ciśnieniem promieniowania. W trzecim przypadku, który obejmuje akreujące supermasywne czarne dziury (czarne dziury o masach rzędu  $10^6 - 10^{10}$  mas Słońca), przebadano wpływ nieprzezroczystości materii na pojawienie się i rozwój niestabilności. Temperatura gazu w dyskach akrecyjnych wokół supermasywnych czarnych dziur jest znacząco niższa niż  $10^7$  K, co wymaga szczegółowego uwzględnienia procesów atomowych w modelowaniu nieprzezroczystości. W efekcie otrzymano oscylacje o mniejszych okresach i amplitudach, ale pełna stabilizacja dysku nie nastąpiła. Wyniki przedstawione w rozprawie stanowią cenne argumenty za istnieniem niestabilności termicznej wywołanej ciśnieniem promieniowania w dyskach akrecyjnych wokół czarnych dziur, i tym samym wnoszą olbrzymi wkład w zrozumienie fizyki procesów akrecyjnych.

Potwierdzenie interpretacji obserwowanych oscylacji jako efekt ewolucji niestabilności termicznej wywołanej ciśnieniem promieniowania będzie niewątpliwie triumfem prostych modeli teoretycznych opierających się na dogłębnym zrozumieniu procesów fizycznych.

Bardzo ciekawe i znaczące wyniki zawarte w pracy doktorskiej zasłużyły sobie na trochę lepszą jej prezentację. Abstrakt pracy koncentruje się bardziej na ogólnym wprowadzeniu do tematu, niż na podsumowaniu wyników i w konsekwencji nie spełnia w pełni swojej roli. Podobnie wstęp do rozprawy jest zbyt szeroki, nie przedstawia w sposób wyczerpujący stanu wiedzy w problematyce bezpośrednio związanej z badaniami przeprowadzonymi w rozprawie. Mając na uwadze fakt, że praca jest właściwie o niestabilności termicznej wywołanej ciśnieniem promieniowania przydałaby się obszerniejsza dyskusja na ten temat. Dotyczy to zarówno literatury, która przecierała drogę do zrozumienia stabilności termicznej dysków akrecyjnych wokół czarnych dziur jak i tej najnowszej. W ostatnim czasie ukazały się bowiem liczne prace, które sprawiają, że temat rozprawy znajduje się znowu (po pewnej przerwie) w centrum zainteresowania środowiska naukowego, dostarczając argumentów za tym że niestabilność, o której mowa w rozprawie niekoniecznie musi być konsekwencją naszych założeń modelowych. Szkoda więc, że rozprawa nie zawiera szerszej dyskusji na ten temat. Zwłaszcza, że zawiera ona na przykład ryciny przedstawiające satelity rentgenowskie Rossi X-Ray Time Explorer i SWIFT, do których nie znalazłam nawet odnośników w tekście. Przykład ten wskazuje na nie najlepszy dobór materiału przedstawionego w pracy.

Zabrakło mi również pewnego spojrzenia w przyszłość, czego powinniśmy spodziewać się w tym temacie w najbliższym czasie. Jakie są dalsze perspektywy poszukiwań przejawów tej niestabilności w obserwowanych źródłach astrofizycznych. Jaka jest szansa, że zaawansowane wielkoskalowe symulacje dysków potwierdzą wyniki przedstawione w pracy. Czy w akrecyjnych gwiazdach neutronowych możemy spodziewać się podobnych przejawów niestabilności termicznej? Czy nie przydałoby się chociażby krótko przedyskutować przypadku MXB 1730-335 i krzywych blasku tego źródła? Taka dyskusja z pewnością sprawiłaby, że bardzo silne stwierdzenia pojawiające się w pracy nigdy by się w niej nie znalazły. W szczególności mam na myśli stwierdzenie z abstraktu: "The true underlying mechanism was identified later on as the magnetorotational instability ..." lub zdanie otwierające rozdział szósty: "As concluded from the previous Chapter, the radiation pressure instability in accretion disks is a powerful, universal phenomenon driving the limit-cycle oscillations at all scales ...".

Struktura pracy jest nietypowa. Materiał podzielony jest na dużą liczbę podrozdziałów i podpodrozdziałów. Niektóre z podpodrozdziałów przypominają formę hasła z encyklopedii, które nie zawsze udaje się połączyć w uporządkowany tok rozumowania. Z jednej strony taki układ pracy ułatwia szybkie orientowanie się w tekście i powrót do konkretnych haseł jeśli zachodzi taka potrzeba. Z drugiej zaś strony sprawia, że na istotną informację trzeba czasami poczekać do kolejnych rozdziałów, porzucane komentarze po różnych podpodrozdziałach trzeba samemu składać w jedną całość i trudno uniknąć zbędnych powtórzeń. Jako przykład może posłużyć wyprowadzenie granicznej jasności Eddingtona w podpodrozdziale 1.1.1. Kluczowe założenie przy którym ta wielkość została wyprowadzona pojawia się w jawny sposób

dopiero w podpodrozdziale 1.1.3.

Uchybień dotyczących samej redakcji pracy jest dużo. Nie podejmę się wypisania ich wszystkich. Wspomniałam już, że niektóre rysunki nie mają żadnego odnośnika w tekście. Dotyczy to na przykład rysunków 1.2, 1.4, 1.6, 1.7, 1.9. Rysunek 1.10 cytowany jest jako 1.11, a rysunek 1.11 jest cytowany po raz pierwszy dopiero w rozdziale 3.8.1. Równanie 3.3 nie jest poprawne. W wykazie literatury niektóre pozycje książkowe nie mają pełnej informacji bibliograficznej, w niektórych pozycjach na liście artykułów brakuje nazwy czasopisma, w innych znowu są podani tylko autorzy. Niektóre niefortunne sformułowania, jak na przykład w 1.1.4 “ ... white dwarfs, being a final stage of the evolution of main-sequence stars ...”, wynikają pewnie z nieuwagi i z trudności językowych, chociaż trzeba przyznać, że autor rozprawy zupełnie dobrze poradził sobie z przedstawieniem pracy w języku angielskim.

Pomimo licznych niedociągnięć, które tutaj zasygnalizowałam rozprawę oceniam bardzo dobrze. Uważam, że przedstawiona praca spełnia wszelkie ustawowe oraz zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim i dlatego z pełnym przekonaniem wnoszę o dopuszczenie mgr Mikołaja Grzędzielskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Szczecin, 4 lutego 2018 roku

prof. dr hab. Ewa Szuszkiewicz

*Ewa Szuszkiewicz*