



Toruń, 9.06.2022

Prof. dr hab. Michał Hanasz  
Instytut Astronomii UMK  
ul. Gagarina 11  
87-100 Toruń

**Recenzja rozprawy Doktorskiej Mgr. Davida Anthony Abarca**  
*p.t. "Numerical simulations of accretion onto neutron stars"*

Rozprawa doktorska Davida Abarca dotyczy akrecji materii tworzącej dyski wokół gwiazd neutronowych zachodzącej w ekstremalnych warunkach fizycznych silnej grawitacji, silnych pól magnetycznych oraz bardzo wysokich temperatur i prędkości przepływów. Praca dotyczy ultra-jasných źródeł emisji rentgenowskiej (ULX, PULX), zachodzącej w warunkach super-Edingtonowskiej akrecji. Zjawiska te zostały przedstawione w języku ogólnorelatywistycznej magnetohydrodynamiki uwzględniającej transport promieniowania (GRRMHD) w silnych polach grawitacyjnych gwiazdy neutronowej oraz czarnej dziury Schwarzschilda.

Rozprawa zawiera obszerny wstęp (rozdz. 1) oraz trzy recenzowane artykuły (rozdz. 2.-4.) opublikowane w renomowanych czasopismach astrofizycznych: dwie prace w Monthly Notices of the Royal Astronomical Observatory oraz jedną pracę w The Astrophysical Journal Letters.

Zgodnie z oświadczeniami promotora prof. Włodzimierza Kluźniaka oraz współautorów publikacji, dr. Aleksandra Sądowskiego i prof. Kyle'a Pathfrefya, udział kandydata do stopnia doktora był dominujący. Oprócz publikacji zawartych w rozprawie doktorskiej, David Abarca ma w swoim dorobku 9 innych recenzowanych publikacji, których jest współautorem. Wszystkie te publikacje były do tej pory cytowane ponad 369 razy według bazy danych ADS.

We wstępie Autor omawia podstawy fizyczny badanych zjawisk: równania ogólnorelatywistycznej radiacyjnej magnetohydrodynamiki, opisującej ruch namagnetyzowanego zjonizowanego gazu wraz z promieniowaniem w silnym polu grawitacyjnym, dla którego przyjęta została metryka Schwarzschilda. Autor omawia następnie zastosowane metody numeryczne, korzystające z powszechnie stosowanych w astrofizycznych symulacjach schematów typu Godunova opartych na przybliżonych rozwiązaniach hydrodynamicznego problemu Riemanna, występujące w literaturze pod nazwą „HLL Riemann solvers”. Zastosowane metody obliczeniowe, wykorzystujące zachowawczą postać relatywistycznych równań magnetohydrodynamiki i równań transportu promieniostego, oparte są na solidnych podstawach matematycznych i są najbardziej zaawansowanymi metodami stosowanymi we współczesnej astrofizyce obliczeniowej. Szczególną uwagę autor poświęca numerycznym rozwiązaniom równania indukcji magnetycznej, do którego wykorzystana została



metoda „Constraint Transport” Evansa i Hawleya z 1988 roku, która dzięki odpowiedniemu schematowi numerycznemu jest wolna od błędów numerycznych będącym źródłem niefizycznych efektów wynikających z pojawiającej się w innych schematach niezerowej dywergencji pola magnetycznego. Zastosowanie tej metody jest kluczowe w warunkach silnej magnetyzacji gazu akreujących relatywistycznych przepływów.

W podrozdziale 1.2 wstępu autor omawia podstawowe zasady działania kodu Koral w którym wykorzystane zostały wcześniej wspomniane metody numeryczne. Autorem kodu jest dr Aleksander Sądowski, główny współautor większości wspólnych publikacji autora rozprawy.

David Abarca dodał do kodu Koral nowe procedury numeryczne umożliwiające modelowanie silnie namagnetyzowanych przepływów oraz odbiciowe warunki brzegowe imitujące twardą powierzchnię gwiazdy neutronowej. **Na podstawie opisu zagadnień dotyczących teoretycznych i numerycznych aspektów prowadzonych badań można wywnioskować, że autor prezentuje wysoki poziom kompetencji w tym zakresie.**

Kolejne podrozdziały Wstępu (1.3 oraz 1.4) przedstawiają zagadnienie super-Edingtonowskiej akrecji dyskowej na gwiazdy neutronowe, omawiając różnorodne efekty związane z obecnością pola magnetycznego oraz propagacją promieniowania w tych ekstremalnych warunkach i odwołując się szeroko do licznych publikacji innych autorów dotyczących tematyki ultra jasnych źródeł emisji Rentgenowskiej (ULXs), ze szczególnym uwzględnieniem źródeł pulsujących (PULXs). Zaprezentowane w dalszych rozdziałach rozprawy badania będą dotyczyły wyjaśnienia natury fizycznej tychże obiektów. **Prezentacja ogólnych zagadnień związanych z przedmiotem badań jest przejrzysta i świadczy o dobrym opanowaniu astrofizycznych zagadnień stanowiących przedmiot rozprawy doktorskiej.**

W rozdziale 1.5 autor przedstawia szczegółowe założenia przeprowadzonych symulacji numerycznych, koncentrując się na zagadnieniach technicznych dotyczących m. in. konstrukcji warunków brzegowych dla rozważanych przypadków akrecji na gwiazdę neutronową i na czarną dziurę. **Zamieszczone tutaj wyjaśnienia pozwalają docenić wysoki stopień pokonanych trudności oraz ogrom pracy włożonej w przygotowanie i przeprowadzenie eksperymentów numerycznych.**

Podsumowując rozdział wstępny, który stanowi bardzo ważną część rozprawy doktorskiej można z całą pewnością stwierdzić, że David Abarca znakomicie opanował zagadnienia teoretyczne oraz elementy profesjonalne warsztatu naukowego astrofizyka-teoretyka.

Kolejne rozdziały 2-5 prezentują oryginalne wyniki kandydata przedstawione w załączonych oryginalnych publikacjach.



Pierwszy artykuł (Abarca and Kluźniak, MNRAS, 461, 3233, 2016) prezentuje analityczne badania oscylacji atmosfery wokół gwiazdy neutronowej w warunkach zbliżonych do jasności Edingtona. W pracy tej znalezione zostały liniowe rozwiązania dla radialnych oscylacji o stałym ciśnieniu, o częstotliwościach w zakresie 300-600 Hz, które mogły by odpowiadać QPOs obserwowanym w niektórych X-ray binaries. Jednakże, gdy uwzględnione zostały efekty tarcia promienistego, oscylacje okazały się jednak silnie wytlumione (over-damped). **Wprawdzie rozważany model nie pomógł wyjaśnić kilkusetherzowych QPOs w atmosferach gwiazd neutronowych, to należy przyznać, że została wykonana wartościowa praca przygotowująca grunt do kolejnych publikacji.**

Drugi artykuł (Abarca, Kluźniak, Sądowski, MNRAS, 479, 2018) dotyczy super-Edingtonowskiej akrecji na nienamagnetyzowaną gwiazdę neutronową. W tym artykule przedstawione zostały dwie dwuwymiarowe osiowosymetryczne symulacje GRRMHD super-Edingtonowskiej akrecji. Jedna symulacja dotyczyła akrecji na czarną dziurę, a druga na nienamagnetyzowaną gwiazdę neutronową. Obydwie symulacje różniły się wewnętrznymi warunkami brzegowymi. W przypadku czarnej dziury warunek brzegowy umożliwiał swobodny przepływ materii pod horyzont zdarzeń, a w przypadku gwiazdy neutronowej skonstruowany został specjalny warunek brzegowy typu odbiciowego, akumulujący akreującą materię jednocześnie absorbując jej moment pędu. Symulacja akrecji na czarną dziurę ujawniła silne skolimowane wypływy oraz super-Edingtonowską jasność, które mogłyby odpowiadać źródłom typu ULX o mniejszych jasnościach. Z drugiej strony, w przypadku akrecji na gwiazdę neutronową stwierdzono obecność słabego, wypływu o rozkładzie zbliżonym do sferycznej symetrii, z prawie izotropowym rozkładem promieniowania w okolicach pojedynczej jasności Edingtona. **Jest to niewątpliwie ważny wynik, który wskazuje, że skonstruowany model atmosfery gwiazdy neutronowej nie jest jeszcze odpowiednim modelem źródła typu ULX.**

Trzeci artykuł, (Abarca, Pathfrey, Kluźniak, ApJL 913, L31, 2021) dotyczy super-Edingtonowskiej akrecji na gwiazdę neutronową z polem magnetycznym  $2 \times 10^{10}$  G. W tym przypadku przepływ akrecyjny odbywa się wzdłuż linii silnego pola magnetycznego tworząc kolumny akrecyjne. Promieniowanie emitowane głównie u podstawy kolumn akrecyjnych jest następnie ogniskowane przez wypływający gaz. Maksymalna jasność izotropowa osiąga wartość  $140 L_{\text{Edd}}$ , co oznacza, że akreująca gwiazda neutronowa z polem magnetycznym jest w stanie wyemitować promieniowanie odpowiadające ultrajasnemu źródłu promieniowania rentgenowskiego typu ULX.

**Przedstawiony w tym artykule model akreującej super-Edingtonowskiej gwiazdy neutronowej jest w mojej opinii najbardziej zaawansowanym na świecie modelem numerycznym tychże obiektów. Należy zauważyć, że symulacje które doprowadziły do tego wyniku są ekstremalnie trudne i czasochłonne ze względu na ekstremalne warunki fizyczne panujące w bliskim sąsiedztwie gwiazd neutronowych. Osiągnięcie tego wyniku było możliwe dzięki mistrzowskiemu opanowaniu przez Autora rozprawy Davida Abarca techniki relatywistycznych**



**symulacji numerycznych z pomocą ogólnorelatywistycznego magnetohydrodynamicznego kodu Koral, do którego autor wniósł swój wkład w postaci kluczowych w tym projekcie procedur numerycznych. Uzyskane wyniki w dziedzinie modelowania akrecji na gwiazdy neutronowe zasługują na duże uznanie.**

Pomimo ogólnego bardzo dobrego wrażenia i przyjemności czytania rozprawy doktorskiej Davida Abarca należy jednak dodać, że autor nie ustrzegł się kilku drobnych usterek, które nie umniejszają wartości rozprawy:

- na stronie 22 wymienione są trzy prędkości charakterystyczne dla ośrodka gazowego (równ.1.62), a w następnej linii pojawia się wyjaśnienie, że "odpowiadają one odpowiednio fali uderzeniowej, nieciągłości kontaktowej i fali rozrzedzającej" Wyjaśnienie jest mylące, ponieważ  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$  mogą indywidualnie odpowiadać fali uderzeniowej lub fali rozrzedzającej.

- na s. 26 wyjaśnienie oryginalnej metody „Constraint transport (CT) jest poprawne tylko dla siatki 2D, w 3D narożniki komórek powinny być zastąpione krawędziami komórek.

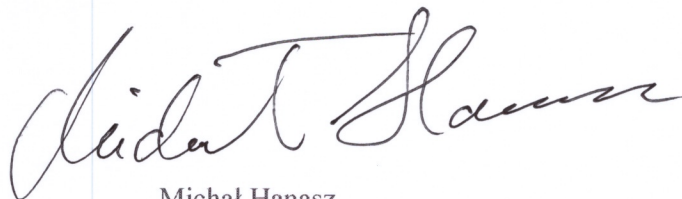
- na s. 32 wspomniano, że "Powszechnie stosowana prosta (ale błędna) interpretacja niestabilności magnetorotacyjnej polega na rozważaniu dwóch słabo sprzężonych elementów płynu...". Autor nie wyjaśnił, co w tej interpretacji jest błędne.

- na stronie 40 definicja parametru „Plazma beta” została odwrócona. Powinien to być stosunek ciśnienia gazu do ciśnienia magnetycznego.

### **Wniosek końcowy**

Zaprezentowane w rozprawie doktorskiej wyniki oryginalnych badań mgr. Davida Abarca stanowią oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w zakresie badań akrecji na gwiazdy neutronowe przyczyniając się tym samym do wyjaśnienia ultrajasných źródeł promieniowania rentgenowskiego typu ULX. Rozprawa prezentuje ponadto ogólną wiedzę teoretyczną kandydata oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia badań w dyscyplinie astronomia. W podsumowaniu stwierdzam, że Rozprawa Doktorska Davida Abarca spełnia wymogi Art. 187 Ustawy Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z dnia 20.07 2018 roku, zatem wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej.

Moja ocena rozprawy doktorskiej mgr Davida Abarca jest bardzo wysoka, wobec tego wnioskuję o jej wyróżnienie.



Michał Hanasz