ul. Bartycka 18, 00-716 Warszawa
tel: (22) 841 00 41, (22) 3296 100
email: camk@camk.edu.pl
http://www.camk.edu.pl

CENTRUM ASTRONOMICZNE IM. MIKOŁAJA KOPERNIKA PAN

9 czerwca 2025

Dr hab. Michał Bejger
Profesor instytutu, CAMK

Recenzja doktoratu Noshad Khosravi Largani pt. ,,Symulacje hydrodynamiki promieniowania neutrinowego: Przewidywanie obserwowalnych oznak przejścia fazowego QCD pierwszego rzędu w astrofizyce gwiazd zwartych”

Praca doktorska pani Largani dotyczy jednego z najważniejszych zagadnień badawczych w astrofizyce relatywistycznej, a mianowicie stanu bardzo gęstej materii we wnętrzach zwartych obiektów, powszechnie znanych jako gwiazdy neutronowe. Pytanie to jest interesujące samo w sobie, z punktu widzenia podstaw fizyki cząstek elementarnych - gwiazdy neutronowe są najgęstszymi obiektami znanymi ludzkości, a tego rodzaju materii nie da się wytworzyć w ziemskich eksperymentach - dlatego każdy postęp w tej dziedzinie jest przydatny i na czasie. Niemniej jednak, badania wykorzystujące dostępnych astrofizycznych ,,posłańców'' - emisję elektromagnetyczną, neutrina i fale grawitacyjne - są trudne, ale można do nich podejść z różnych punktów widzenia. Pani Largani wybrała jeden podstawowy temat - chromodynamiczne przejście fazowe od złożonych hadronów do ,,uwolnionej'' materii kwarkowej - i trzy kierunki jego badania: szybko rotujące gwiazdy zwarte, supernowe typu II (z kolapsem jądra/rdzenia), ze szczególnym uwzględnieniem emitowanego sygnału neutrinowego, oraz wywołane akrecją zapadnięcie się gwiazdy neutronowej.

Trzy wyżej wymienione tematy zostały przedstawione w oparciu o opublikowane wyniki, i stanowią trzon rozprawy: podrozdział 3.3 (oparty o pracę Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 515, s. 3539, 2022 - cytowany 22 razy według NASA ADS w momencie pisania tej recenzji), chociaż niektóre wyniki z tej publikacji są wykorzystywane w innych częściach pracy (np. Rozdział 3 „Equation of state”); Rozdział 4 (Astrophysical Journal, Vol. 964, 143, 2024 - cytowany 12 razy); Rozdział 5 (Astronomy & Astrophysics, Vol. 687, A245, 2024 - cytowany 5 razy).

Wyniki zostały opublikowane w renomowanych czasopismach, z doktorantką jako pierwszym autorem, i jak widać były już cytowane, tzn. przyciągnęły uwagę społeczności astrofizyków. Ponadto rozprawa zawiera rozdział 6 zatytułowany „Gravitational Wave Mode Analysis”, co moim zdaniem jest mylące, ponieważ rozdział ten opisuje wyznaczenie częstotliwości modów oscylacyjnych (f-mode, g-mode) dla obiektów sferycznych, natomiast

rozdział nie zawiera nawet przybliżonej estymacji amplitudy fal grawitacyjnych. Zasadnicza część rozprawy (156 stron - rozdziały 1-7, nie licząc spisów tabel i rysunków oraz listy bibliograficznej zawierającej 384 pozycje) rozpoczyna się 82-stronicowym rozdziałem 1 „Core-collapse supernova phenomenology'', rozdziałem 2 „Neutrino radiation hydrodynamics" i częścią rozdziału 3 „Equation of state". Pracę kończy rozdział 7 „Summary and Conclusions", który zawiera skrótowy opis wyników i listę otwartych problemów do rozwiązania. W związku z tym mniej więcej połowa rozprawy poświęcona jest wprowadzeniu, a druga połowa nowym wynikom badań; składają się na nie symulacje numeryczne.

Moim głównym odczuciem po przeczytaniu rozprawy jest to, że dziedzina ta jest daleka od dobrze przebadanej, a niniejsze rezultaty są jednym z kroków eksploracyjnych na drodze do pełnego zrozumienia. Podczas czytania tekstu znalazłem kilka kwestii, które chciałbym lepiej zrozumieć. Są one głównie związane z założeniami (co czasami może oznaczać ograniczenia) przyjętych metod lub dokonanych wyborów:

- Podczas poszukiwania uniwersalnych relacji w podrozdziale 3.3 wybrano równanie stanu (EOS) z temperaturą T = 0, a także EOS z reprezentatywną wartością (uśrednionej) entropii na cząstkę dla gwiazd o skończonej temperaturze, $s = 3k_B$ (motywowane badaniami supernowych z kolapsem rdzenia), oraz stosunek (frakcję) leptonów $Y_L = 0{,}3$. Dlaczego nie skonstruowano bardziej uniwersalnego zestawu uniwersalnych relacji, dla innych wartości s i Y_L oprócz M^*_{max} and R^*_{max} dla danej klasy równań stanu? Innym takim parametrem jest sama częstotliwość rotacji gwiazdy neutronowej. Te dodatkowe stopnie swobody mogłyby zostać uwzględnione w końcowych formułach. Wygląda mi to na straconą okazję i chciałbym się więcej dowiedzieć o przyczynach takiego wyboru,

- Rozdział 2 bardzo szczegółowo opisuje kod do symulacji hydrodynamiki AGILE-BOLZTRAN, ale kod RNS i solver TOV używane w podrozdziale 3.3 nie są opisane z nawet przybliżonym poziomem szczegółowości (równania TOV nie są nawet przywoływane ani cytowane w rozprawie). Wyniki podrozdziału 3.3 zakładają jednorodną (sztywną) rotację zarówno dla zimnych, jak i gorących obiektów zwartych; podczas gdy dla zimnych gwiazd jest to powszechnie akceptowane, dla gorących obiektów, które mają równanie stanu przypominające to z zapadającego się rdzenia supernowej, jednorodna sztywna rotacja nie jest oczywista. Chciałbym dowiedzieć się więcej o tym założeniu - czy inne profile rotacji nie były interesujące, czy też zostały z innych powodów wykluczone? Czy to nie jest istotne fizyczne ograniczenie użyteczności wyników?

- Zapadanie się gwiazd neutronowych wywołane akrecją jest modelowane w rozdziale 5 w symetrii sferycznej, podczas gdy wiemy, że w realistycznych układach gwiazdy neutronowe akreują materię i moment pędu, co prowadzi do wirowania gwiazd neutronowych i ewolucji (zwykle spadku) gęstości centralnej. Czy uwzględnienie tych efektów jest tutaj nieistotne?

- Na ile wiarygodne są wyniki z rozdziału 6 związane z częstotliwościami oscylacji g-modów w obecności przejścia fazowego z materii hadronowej do kwarkowe w

symetrii sferycznej z punktu widzenia perspektywy przyszłych detekcji? Czy możliwe byłoby wyciągnięcie jakichś analogii z modów f w symetrii sferycznej vs modelowania wielowymiarowego?

- Wyniki w rozdziale 6 nie pozwalają na bezpośrednie oszacowanie amplitudy emitowanych fal grawitacyjnych, a tym samym porównanie z krzywą czułości detektorów w różnych częstotliwościach, aby uzyskać odległość „głośnościową" od potencjalnie obserwowalnych zdarzeń badanych w rozprawie. Byłaby to zdecydowanie interesująca kontynuacja. Jednak strumienie i energie emitowanych neutrin są szacowane: powinno być możliwe oszacowanie „wykrywalnej" odległości dla obecnych i planowanych detektorów, a następnie oszacowanie częstotliwości tych zdarzeń (nawet przy braku dotychczasowych detekcji); niestety w tekście jest tylko kilka ogólnych stwierdzeń na temat tego aspektu badania. Czy są możliwe choćby przybliżone oszacowania?

Tekstowi przydałaby się poprawki redakcyjne, zwłaszcza dwóch pierwszych rozdziałów, które nie były częścią publikacji, oraz podsumowania i wniosków, w których zauważyłem kilka błędów językowych. Części, które były pierwotnie opublikowanymi artykułami, wykazują czasami inny zapis niż reszta tekstu (np. EOS vs EoS w niektórych miejscach w rozdziale 3), np. odniesienie do „This present paper" w rozdziale 7, strona 177, co sugeruje, że zdania i akapity zostały skopiowane wprost z publikacji.

Podsumowując, ponieważ rozprawa spełnia wymogi formalne określone przepisami prawa, wnoszę o dopuszczenie p. Largani do dalszych etapów w procedurze obrony pracy doktorskiej.

Michał Bejger

Polish Academy of Sciences
NICOLAUS COPERNICUS ASTRONOMICAL CENTER
Bartycka 18, 00-716 Warsaw, Poland
tel: +(4822) 841 00 41, +(4822) 3296 100
fax: +(4822) 841 00 46
email: camk@camk.edu.pl
http://www.camk.edu.pl

9 June 2025

Dr hab. Michał Bejger
Associate Professor, NCAC

Review of a PhD thesis titled ''Neutrino Radiation-Hydrodynamics Simulations: Predicting Observable Signatures of a First-Order QCD Phase Transition in Compact Star Astrophysics'' by Noshad Khosravi Largani

Ms Largani's PhD thesis is related to one of the most important research questions in relativistic astrophysics, namely the state of very dense matter in the interiors of compact objects, commonly known as neutron stars. This question is interesting in itself, from the point of view of the fundamentals of particle physics - neutron stars are the densest objects known to mankind, and this kind of matter cannot be reproduced in terrestrial experiments - therefore any progress in this domain is useful and timely. Nevertheless, research using available astrophysical messengers - electromagnetic, neutrino and gravitational-wave emission - is difficult, but may be approached from various vantage points. Ms Largani selected one underlying theme - QCD phase transition from composite hadrons to deconfined quark matter - and three directions to study it: rapidly rotating compact stars, type II supernovae (core-collapse supernovae), with special attention put on the emitted neutrino signal, and accretion-induced collapse of a neutron star.

The three topics mentioned above are reported based on published results, and form the core of the thesis: Section 3.3 (based on Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 515, p. 3539, 2022 - cited 22 times according to NASA ADS at the time of writing of this report) although some results from this publications are used in other parts of the thesis (e.g. Chapter 3 ''Equation of state''); Chapter 4 (Astrophysical Journal, Vol. 964, 143, 2024 - cited 12 times); Chapter 5 (Astronomy & Astrophysics, Vol. 687, A245, 2024 - cited 5 times).

The results were published in renowned journals, with the PhD candidate as the first author, and were cited, i.e. attracted the attention of the astrophysics community. In addition, the thesis contains Chapter 6 entitled ''Gravitational Wave Mode Analysis'', which in my opinion is misleading, because the chapter describes extraction of frequencies of oscillation modes (f-modes, g-modes) for spherical objects, and there is no mention on even approximate estimation of gravitational-wave amplitude. Main body of the thesis (156 pages - chapters 1-7, excluding lists of tables and figures, and the bibliography list with 384 entries) starts with 82 pages of introductory Chapter 1 ''Core-collapse supernova phenomenology'', Chapter 2

''Neutrino radiation hydrodynamics'' and part of Chapter 3 ''Equation of state''. The thesis is concluded by Chapter 7 ''Summary and Conclusions'' with a short summary of results and a list of open problems. Therefore, roughly half of the thesis is devoted to introduction, and the second half to novel research results; they consist of numerical simulations.

My main feeling after reading the thesis is that this domain is far from being well-researched and completed, and that these results are one exploratory step on the road towards a full understanding. While reading the text I have found a few issues, I'd like to understand better. They are mostly related to assumptions (which may sometimes mean shortcomings) of adopted methods or choices made:

- In a search for universal relations in Section 3.3, temperature T=0 EOS were chosen, as well as EOSs with a representative value for the (averaged) entropy per particle for the finite-temperature stars, $s = 3k_B$ (motivated by the core-collapse supernova studies), as the lepton fraction of $Y_L = 0.3$. Why a more universal set of universal relations wasn't constructed, including other values of s and Y_L in addition to M^*_{max} and R^*_{max} for a given EOS class? Another such parameter is the neutron-star spin frequency. These additional degrees of freedom could be incorporated in the final formulae. This looks to me like a missed opportunity, and I would like to understand this choice,

- Chapter 2 is really detailed in the description of the AGILE-BOLZTRAN hydrodynamics simulation code, but the RNS code and the TOV solver used in Section 3.3 are not described with such a level of detail (the TOV equations are not even referenced in the thesis). Results of Section 3.3 assume uniform rotation for both cold and hot NS; while for cold NS it is widely accepted, for hot objects which have EOS resembling the one present in the core collapse, uniform rotation is not obvious. I'd like to know more about this assumption - were other rotation profiles not interesting, or were excluded for some reason? Is it a real physical limit on applicability of these results?

- Accretion-induced collapse of neutron stars is modeled in Chapter 5 in spherical symmetry, whereas we know that realistic systems neutron stars accrete matter and angular momentum, leading to neutron stars spin up and evolution (usually the decrease) of central density. Is taking these effects into account irrelevant here?

- How reliable are the results from Chapter 6 related to g-mode oscillation frequencies in the presence of the hadron-quark phase transition in spherical symmetry from the point of view of future detection prospects? Would it be possible to draw some analogies from f-modes in spherical symmetry vs multi-dimensional modelling?

- Results in Chapter 6 does not allow for a straightforward estimate of gravitational-wave strain amplitude, and therefore a comparison with the detectors' sensitivity curve across the frequencies, to obtain the ''loudness'' distance to the potentially observable events studied in the thesis. This would definitely be an interesting follow up. However, emitted neutrino fluxes and energies are estimated: is should then be possible to estimate ''detectable'' distance for current and planned

detectors, and subsequently estimate the rate of these events (even from no detections so far); unfortunately, there are just a few general statements about this aspect of the study in the text. Are even rudimentary estimates possible?

The text would benefit from one more careful editorial read, especially two first Chapters that were not part of the publications, and the summary and conclusions, where I've spotted a few language errors. Parts that were originally published papers exhibit sometimes different notation than the rest of the text (e.g. EOS vs EoS in Chapter 3), e.g. reference to ''This present paper'' in Chapter 7, page 177, which suggests that the sentences and paragraphs were copied verbatim from publications.

In summary, as the thesis satisfies formal requirements set forth by the law, I request that Ms Largani is permitted to proceed towards the PhD defense.

Michał Bejger