



Warszawa, 26.06.2024 r.

dr hab. Katarzyna Małek  
Narodowe Centrum Badań Jądrowych  
Zakład Astrofizyki  
ul. Pasteura 7  
02-093 Warszawa

## Recenzja rozprawy doktorskiej magistra Enrico Laudato zatytułowanej „A DHOST model to unify them all”

### I. Podstawa opracowania

Recenzja została sporządzona w związku z powołaniem mnie przez Radę Naukową Instytutu Fizyki Uniwersytetu Szczecińskiego z dnia 9 maja 2024 roku do pełnienia funkcji recenzentki w postępowaniu w sprawie nadania stopnia naukowego doktora nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne mgr Enrico Laudato.

### II. Ogólna charakterystyka rozprawy

Opiniowana praca doktorska magistra Laudato, wykonana pod kierunkiem dr hab. Vincenzo Salzano, prof. Uniwersytetu Szczecińskiego Instytucie Fizyki Uniwersytetu Szczecińskiego, dotyczy rodziny modeli grawitacji wyższego rzędu, tzw. Degenerate Higher-Order Scalar Tensor (DHOST) i sprawdzeniu, czy modele te są uniwersalne w różnych skalach astrofizycznych. W pracy tej, oprócz części teoretycznej, znajduje się bardzo obszerny test modelu DHOST na danych obserwacyjnych.

Rozprawa doktorska napisana jest w języku angielskim. Składa się z sześciu rozdziałów i bibliografii. Obszerna bibliografia zawiera wiele prac opublikowanych w ostatnich latach, w tym również trzy prace, w których mgr Laudato jest pierwszym autorem. Pomimo, że na pracę doktorską składają się wyniki z trzech opublikowanych artykułów naukowych, praca napisana jest w formie spójnej rozprawy, bez podziału pracy na trzy oddzielne części. Dzięki temu rozprawę czyta się płynnie z rozdziału na rozdział. Rozprawa jest napisana bardzo ciekawie, z interesującymi wtrąceniami.

**Rozdział pierwszy**, stanowiący wstęp rozprawy doktorskiej, zawiera bardzo ciekawie zarysowany wstęp do problemu poruszanego w rozprawie. W rozdziale tym mgr Laudato bardzo zgrabnie nakreśla problem historyczny, wprowadza model  $\Lambda$ CDM. W rozdziale tym znajdują się wszystkie podstawowe wzory matematyczne umożliwiające śledzenie tekstu. W rozdziale tym, mgr Laudato nakreśla problem wyznaczenia zarówno parametru Hubble’a ( $H_0$ ), jak i amplitudy widma mocy w skali  $8h^{-1}\text{Mpc}$  ( $s_8$ )

i bardzo systematycznie opisuje kolejne próby zmierzenia tego parametru przy użyciu różnych instrumentów i metod. W rozdziale tym, oprócz opisu metod obserwacji, magister Laudato wprowadza także pojęcia takie jak ciemna energia i ciemna materia. Nakreśla też, w ostatnim podrozdziale motywację unifikacji pojęć ciemnej energii i ciemnej materii. Zwykle ciemna energia i ciemna materia są uważane za odrębne składniki fizyczne, ponieważ posiadają różne właściwości fizyczne. Jednakże mogą one jednak być różnymi stronami tego samego oddziaływania grawitacyjnego. Podążając za tą hipotezą, za pomocą jednego modelu, zamiast wielu, możliwe byłoby, w zależności od skali, opisanie efektów, które przypisujemy ciemnej materii i ciemnej energii. W przypadku teorii unifikacji kluczowe jest zrozumienie, w jakiej skali taka unifikacja może nastąpić, a także jakie dane obserwacyjne mogą pomóc w sprawdzeniu teorii. Podsumowując, rozdział ten daje bardzo dobry zarys problemu, naświetla różne metody obserwacyjne, a także stanowi bardzo dobrą motywację do dalszej części pracy doktoranta.

W rozdziale drugim został przedstawiony bardzo dokładnie model DHOST, w którym zawierają się teorie zdegenerowanych tensorów skalarnych wyższego rzędu. Rozdział ten, pomimo opisu bardzo trudnego i złożonego zagadnienia, czyta się bardzo dobrze, a komentarze mgr Laudato sprawiają, że czytelnik wchodzi w teorię rodziny modeli GHOST bardzo łagodnie. W tym rozdziale zostaje też naświetlona możliwość potwierdzenia/zaprzeczenia tej teorii poprzez obserwacje astrofizyczne. W moim odczuciu rozdział drugi jest dalszą częścią wstępu, naświetlającym tym razem użyte w pracy narzędzie i możliwości obserwacyjne.

W Rozdziale trzecim magister Laudato przedstawił różne typy astrofizycznych danych obserwacyjnych mogących wpłynąć na odrzucenie/udoskonalenie teorii DHOST. Skupił się na masywnych skupiskach galaktyk (galaxy clusters, GC) i skrajnie rozproszonych galaktykach (Ultra Diffuse Galaxies, UDGs). GC są najbardziej masywnymi strukturami związanymi grawitacyjnie we Wszechświecie, dla których przeprowadzono szczegółową analizę dynamiczną i kinematyczną i dlatego stanowią swoiste laboratoria analizy ciemnej materii. W celu zrekonstruowania masy GC używana jest metoda soczewkowania grawitacyjnego. W rozdziale tym mgr Laudato przedstawił najważniejsze założenia metody modelowania masy w jasnych GC oraz kolejne składowe modelowania. Przybliżył też dane obserwacyjne GCs z przeglądu CLASH. Bardzo wyczerpująco została też opisana metodologia wyznaczania masy UDGs, poparta przykładami obserwacyjnymi (zarówno galaktyk o zawartości ciemnej materii rzędu 99% - Dragonfly 44, jak i 1% - DF2, DF4) z projektu Dragonfly Arrey Telescope. W rozdziale tym została też szczegółowo omówiona analiza statystyczna użyta w pracy magistra Laudato. Rozdział ten, przedstawiający zarówno sposoby modelowania, jak i dane obserwacyjne jest bardzo dobrze napisany i pozwala na połączenie informacji teoretycznych, przedstawionych we wcześniejszych rozdziałach, z obserwacjami astrofizycznymi.

W rozdziale czwartym mgr Laudato przedstawia otrzymane, w serii trzech opublikowanych pierwszoautorskich artykułów naukowych, wyniki swojej analizy. I tak analizując dane z przeglądu CLASH, mgr Laudato użył modelu DHOST z dodatkowym wpływem najjaśniejszej galaktyki w gromadzie i innych komponentów galaktycznych. Próbka 16 gromad galaktyk została zbadana z użyciem danych z promieniowania w paśmie X oraz obserwacji zarówno silnego, jak i słabego soczewkowania grawitacyjnego. W celu modelowania mas uwzględniono wkład od gorącego gazu i galaktyk. W rozdziale tym mgr Laudato wykazał, że DHOST model jest nieznacznie bardziej skuteczny niż Ogólna Teoria Względności w odwzorowaniu efektów związanych z samą ciemną energią, jednak równocześnie DHOST był mniej skuteczny w odwzorowywaniu efektów związanych z ciemną materią w skalach astrofizycznych.

Rozdział piąty poświęcony jest omówieniu rezultatom otrzymanym dla próbki trzech UDGs obserwowanych przez Dragonfly Array. Po raz pierwszy w celu oszacowania całkowitego budżetu masy dla dwóch UDGs, dla których wykazano wcześniej w literaturze jedynie niewielki odsetek udziału ciemnej materii, została przeprowadzona analiza skoncentrowana jedynie na materii barionowej, bez użycia dodatkowego czynnika związanego z ciemną materią. Wyniki uzyskane z DHOST sugerują, że w celu wyjaśnienia danych obserwacyjnych dla galaktyk o bardzo niskiej zawartości ciemnej materii lub nawet bez ciemnej materii, DHOST może być równie skuteczny, jak Ogólna Teoria Grawitacji. Wykazano również, że użycie teorii DHOST z uwzględnieniem związku pomiędzy masą gwiazdową a masą halo nie jest w stanie odtworzyć danych obserwacyjnych.

W przypadku analizy galaktyki Dragonfly 44, w którym ciemna materia stanowi około 99% masy galaktyki, model DHOST jest znacznie mniej skuteczny, a odwzorowanie danych obserwacyjnych możliwy jest dopiero po włączeniu Ogólnej Teorii Względności ze stałą anizotropią i rozdzielonymi komponentami ciemnej materii i materii barionowej.

Rozdział szósty stanowi podsumowanie wszystkich trzech prac przedstawionych w poniższej rozprawie. Jest on bardzo przejrzysty, dotyka najważniejszych cech modelu DHOST, a także, w bardzo klarowny sposób przedstawia najważniejsze wnioski otrzymane przez doktoranta. Odpowiedź na pytanie postawione na samym początku rozprawy, czy DHOST może zastąpić inne modele teoretyczne i jako uniwersalny model być stosowany na różnych skalach astrofizycznych została zawarta w ostatnim paragrafie pracy i w bardzo zgrabny sposób spina całą rozprawę.

### III. Uwagi recenzenta oraz pytania do Autora rozprawy:

#### 1. Ogólne:

- a. Autor używa wielu skrótów, co jest ogólnie zrozumiałe, jednak bardzo przydatny byłby słownik skrótów, szczególnie dla czytelników niebędących ekspertami w dziedzinie.

Odłożenie pracy i powrót do czytania po kilku dniach jest bardzo trudny. Dodatkowo autor nie wyjaśnia kilku często używanych przez niego skrótów, czasami bardzo istotnych, takich jak ETG itp.

- b. W rozdziale pierwszym i drugim używana jest inna stylistyka niż w dalszych rozdziałach i użycie przecinków czy kropek po równaniach wydaje się być wysoko losowe.
2. W rozdziale pierwszym brakuje mi prostej grafiki, nawet znanej z publikacji takich jak Di Valentino et al., 2021 Class. Quantum Grav. 38 153001, w której różne misje, wartości  $H_0$  i niepewności przedstawione są w formie drabiny. Mając przedstawione same wartości, czasem ciężko jest zilustrować globalny problem.
  - a. Bardziej specyficzne uwagi/pytania:
    - i. Na czym polegała zmiana analizy danych w projekcie H0LiCOW, która doprowadziła do znacznej zmiany parametru  $H_0$ ?
    - ii. Jak duża (procentowo) jest rozbieżność między wartością  $S_8$  uzyskaną z danych Planka, a tymi otrzymanymi ze słabych soczewek, liczenia gromad i zniekształceń przestrzeni przesunięcia ku czerwieni? Wiem, że w dalszej części wstępu wymieniane są różne eksperymenty, ale ze względu na brak tabeli/grafiki, taka ogólna informacja byłaby bardzo przydatna.
    - iii. Na stronie 12 wprowadzony jest operator Dalambertian, natomiast na stronie 23 d'Alambert operator. Która z nazw jest poprawna?
3. W rozdziale drugim, z 25 skupisk galaktyk CLASH, magister Laudato wybrał 16 do dalszej analizy. W jaki sposób wyselekcjonowano te 16 skupisk galaktyk? Co je różni od pozostałych 9? Dlaczego nie można użyć całej próbki?
4. W analizie GC wykorzystano parametr  $r_{500}$  zamiast najbardziej standardowego, przynajmniej tak stwierdzono w rozprawie,  $r_{200}$ . Rozumiem, że podyktowane było to danymi obserwacyjnymi. Czy jest możliwe określenie, jak wpłynęłaby zmiana parametru z  $r_{500}$  na  $r_{200}$ , albo gdyby użyto pojedynczego profilu Sersic'a zamiast podwójnego? Czy możliwe było samodzielne wyznaczenie parametru  $r_{200}$ , w celu otrzymania bardziej 'standardowych' wyników?
5. Bardziej specyficzne uwagi/pytania do tej części:
  - a. W części dotyczącej modelowania masy GC (3.1.3) w pierwszym akapicie brakuje referencji do podanych wartości (w GC ciemna materia stanowi (..) 30% (przy  $\sim 5$  kpc) i  $\sim 60%$  (przy  $\sim 5$  Mpc) całkowitej masy GC itp).
6. Ploty 4.2 i 4.3 nie posiadają legendy do użytych na nich kolorów.
7. W rozdziale piątym przedstawiono analizę bardzo ekstremalnych UDGs: tych zawierających śladowy wkład od ciemnej materii oraz taką, dla której aż 99% masy stanowi ciemna materia. Czy możliwa byłaby podobna analiza dla mniej ekstremalnych przypadków? Co mogłaby ona wniesić do pracy?

#### IV. Podsumowanie

Przedstawione powyżej uwagi nie umniejszają wartości pracy magistra Laudato. W mojej opinii przedłożona rozprawa doktorska wnosi nowy wartościowy wkład do dziedziny teorii grawitacji. Podsumowując, uważam, że mgr Laudato osiągnął założony cel pracy, czyli na postawie zarówno pracy teoretycznej, jak i próby odwzorowania danych obserwacyjnych w skalach gromad galaktyk i pojedynczych galaktyk ultra-rozproszonych odpowiedział na pytanie, czy model DHOST jest uniwersalny. Odpowiedź, pomimo że negatywna, stanowi bardzo cenny wkład naukowy. Praca jest bardzo starannie i ciekawie napisana. Trzy pierwszoautorские artykuły naukowe magistra Laudato zostały opublikowane w międzynarodowych recenzowanych czasopismach i pomimo ich niedawnego opublikowania są wysoko cytowane. Ten fakt jedynie potwierdza wysoką jakość pracy naukowej doktoranta. W moim przekonaniu kandydat wykazał się zarówno umiejętnością prowadzenia samodzielnych badań naukowych, jak i wiedzą niezbędną do właściwej interpretacji uzyskanych wyników.

Podsumowując, recenzowana praca **spełnia wszystkie kryteria właściwe dla rozpraw doktorskich** określone w art. 187 ust. 1-2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. z 2023 r. poz. 742 ze zm.), co uzasadnia postawienie wniosku o przyjęcie rozprawy do publicznej obrony. Ze względu na wysoką wartość naukową wyników ich publikacje w bardzo dobrych czasopismach, dojrzałość naukową doktoranta i jego duży dorobek naukowy wnioskuję również o wyróżnienie rozprawy doktorskiej magistra Laudato.

dr hab. Katarzyna Małek



Warszawa, 26.06.2024 r.

dr hab. Katarzyna Małek  
Narodowe Centrum Badań Jądrowych  
Zakład Astrofizyki  
ul. Pasteura 7  
02-093 Warszawa

**Referee's report of the PhD thesis of Mr Enrico Laudato, entitled  
"A DHOST model to unify them all"**

**Unofficial English version for Mr Laudato**

**I. Legal basis:**

This review has been prepared in connection with my appointment by the Scientific Council of the Institute of Physics of the University of Szczecin, dated 9 May 2024, to act as a reviewer in the proceedings for the conferment of the degree of Doctor of Science in the discipline of physical sciences to Enrico Laudato, Msc.

**II. General characteristics of the dissertation**

The Mr Laudato dissertation I am reviewing carried out under the supervision of Dr Vincenzo Salzano, Prof. of the University of Szczecin's Institute of Physics at the University of Szczecin, deals with a family of higher-order gravity models, the so-called Degenerate Higher-Order Scalar Tensor (DHOST), and testing whether these models are universal at different astrophysical scales. In addition to the theoretical part, the paper includes a very extensive test of the DHOST model on observational data.

The dissertation is written in English. It consists of six chapters and a bibliography. The extensive bibliography contains many papers published in recent years, including three papers in which Mgr Laudato is the first author. Although the dissertation consists of results from three published scientific articles, the work is written as a coherent dissertation without dividing the work into three separate parts. As a result, the dissertation reads smoothly from chapter to chapter. The dissertation is very clearly written, with interesting interjections.

The **first chapter**, which is the introduction of the dissertation, provides a very interesting outline of the problem addressed in the dissertation. In this chapter, Mgr Laudato very elegantly outlines the historical problem and introduces the  $\Lambda$ CDM model. The chapter provides all the essential mathematical formulas to follow the text. In the chapter, Mgr Laudato outlines the problem of determining both the Hubble parameter ( $H_0$ ) and the power spectrum amplitude on the 8h-1Mpc ( $s_8$ )

scale and systematically describes successive attempts to measure this parameter using different instruments and methods. In this chapter, in addition to describing the observational techniques, Magister Laudato introduces concepts such as dark energy and dark matter. In the last subsection, he also outlines the motivation behind the unification of the concepts of dark energy and dark matter. Dark energy and dark matter are considered separate physical components because they have different physical properties. However, they may be different sides of the same gravitational interaction. Following this hypothesis, with a single model instead of many, it would be possible, depending on the scale, to describe the effects we attribute to dark matter and dark energy. For unification theory, it is crucial to understand at what scale such unification can occur and what observational data can help test the theory. In summary, this chapter gives a very good outline of the problem, illuminates various observational methods, and provides a very good motivation for the rest of the PhD thesis.

The DHOST model, which includes higher-order degenerate scalar-tensor theories, is presented in great detail in the **second chapter**. Despite describing a very difficult and complex issue, this chapter is easy to read, and the comments by Mgr Laudato make the reader enter the theory of the GHOST family of models very smoothly. The possibility of confirming/denying the theory through astrophysical observations is also illuminated in this chapter. In my opinion, chapter two is a further part of the introduction, illuminating this time the tool and observational possibilities used in the work.

In **chapter three**, the candidate presented different types of astrophysical observational data that could influence the rejection/refinement of the DHOST theory. He focused on massive galaxy clusters (GCs) and extremely diffuse galaxies (Ultra Diffuse Galaxies, UDGs). GCs are the most massive gravitationally bound structures in the Universe, for which a detailed dynamical and kinematic analysis has been carried out and, therefore, represents a kind of laboratory for dark matter analysis. A gravitational lensing method is used to reconstruct the mass of GCs. In this chapter, Mgr Laudato presented the most important assumptions of the mass modelling method in bright GCs and the subsequent modelling components. He also introduced the observational data of GCs from the CLASH review. The methodology for determining the mass of UDGs was also described in great detail, supported by observational examples (both galaxies with 99% dark matter content - Dragonfly 44 and 1% - DF2, DF4) from the Dragonfly Arrey Telescope project. The chapter also details the statistical analysis used in Laudato's MSc work. This chapter, which presents both modelling approaches and observational data, is well written and allows the theoretical information presented in earlier chapters to be combined with astrophysical observations.

In the **fourth chapter**, Mgr Laudato presents the results of his analysis obtained in a series of three published first-author scientific papers. Thus, when analysing data from the CLASH survey, Mgr Laudato used the DHOST model with the additional influence of the brightest galaxy in the cluster and

other galactic components. A sample of 16 galaxy clusters was examined using X-band radiation data and observations of both strong and weak gravitational lensing. Contributions from hot gas and galaxies were included to model the masses. In this chapter, Mgr Laudato showed that the DHOST model was marginally more effective than the General Theory of Relativity in reproducing the effects associated with dark energy itself. Still, at the same time, DHOST was less effective in reproducing the effects associated with dark matter on astrophysical scales.

**Chapter five** is devoted to discussing the results obtained for a sample of three UDGs observed by the Dragonfly Array. For the first time, to estimate the total mass budget for two UDGs, for which only a small percentage of dark matter contribution was previously shown in the literature, an analysis focused only on baryonic matter was performed without using an additional dark matter factor. The results obtained with DHOST suggest that DHOST can be as effective as the General Theory of Gravitation in explaining observational data for galaxies with very low or no dark matter. It has also been shown that using the DHOST theory with the relationship between stellar mass and halo mass is not able to reproduce the observational data.

In the analysis of the Dragonfly 44 galaxy, where dark matter accounts for about 99% of the galaxy's mass, the DHOST model is much less effective. The observational data can only be reproduced when the General Theory of Relativity is included with constant anisotropy and separated dark matter and baryonic matter components.

The **sixth chapter** summarises all three papers presented in the following dissertation. It is very clear, touches on the most important features of the DHOST model, and presents the most important conclusions obtained by the PhD student. The answer to the question posed at the very beginning of the dissertation, whether DHOST can replace other theoretical models and, as a universal model, be applied on different astrophysical scales, is contained in the last paragraph of the dissertation and ties up the whole dissertation in an elegant way.

### III. Referee's comments

#### 1. General:

- a. The author uses many abbreviations, which is generally understandable, but a glossary of abbreviations would be very useful, especially for readers who are not experts in the field. It isn't very easy to put the work down and return to reading after a few days. In addition, the author does not explain several abbreviations he uses frequently, sometimes significant ones, such as ETG, etc.
- b. Chapters one and two use a different style than later chapters, and the use of commas or full stops after equations seems highly random.



2. Chapter one lacks simple graphics, even well-known from publications such as Di Valentino et al., 2021 *Class. Quantum Grav.* 38 153001, in which the different missions,  $H_0$  values and uncertainties are presented in the form of a ladder. With values alone presented, it is sometimes difficult to illustrate a global problem.
  - a. More detailed comments/questions:
    - i. What was the change in data analysis in the H0LiCOW project that led to a significant change in the  $H_0$  parameter?
    - ii. How large (in percentage terms) is the discrepancy between the S8 value obtained from the Plank data and those obtained from weak lensing, cluster counts and redshift space distortion? I know that various experiments are mentioned later in the introduction, but in the absence of a table/graph, such general information would be beneficial.
    - iii. On page 12, the Dalambertian operator is introduced, while on page 23, the d'Alambert operator is introduced. Which of the names is correct?
3. In chapter two, out of 25 CLASH galaxy clusters, Mgr Laudato selected 16 for further analysis. How were these 16 clusters of galaxies selected? What makes them different from the other 9? Why can't the whole sample be used?
4. The GC analysis used the parameter  $r_{500}$  instead of the most standard, at least so stated in the thesis,  $r_{200}$ . I understand that this was dictated by the observational data. Is it possible to determine how a change in parameter from  $r_{500}$  to  $r_{200}$  would have been affected, or if a single Sersic profile had been used instead of a double one? Was it possible to determine the  $r_{200}$  parameter independently to obtain more 'standard' results?
5. More specific comments/questions for this section:
  - a. In the GC mass modelling section (3.1.3), the first paragraph lacks reference to the values given (in GCs, dark matter accounts for (...) 30% (at  $\sim 5$  kpc) and  $\sim 60\%$  (at  $\sim 5$  Mpc) of the total GC mass, etc.).
6. Figures 4.2 and 4.3 do not have a legend for the colours used on them.
7. Chapter five presented an analysis of very extreme UDGs: those containing a marginal contribution from dark matter and one for which as much as 99% of the mass is dark matter. Would a similar analysis be possible for less extreme cases? What could it contribute to the work?

#### IV. Summary

The comments presented above do not diminish the value of Mr Laudato's work. In my opinion, the submitted dissertation provides new valuable input to the field of gravitational theory. In conclusion, I believe that Mgr Laudato has achieved the stated aim of the thesis; that is, based on both the theoretical work and the attempt to map observational data on the scales of galaxy clusters and single

ultra-scattered galaxies, he has answered the question of whether the DHOST model is universal. The answer, although negative, is a very valuable scientific contribution. The paper is very carefully and interestingly written. The three first-author scientific articles by mgr Laudato have been published in international peer-reviewed journals and, despite their recent publication, are highly cited. This fact only confirms the high quality of the PhD student's scientific work. In my opinion, the candidate has demonstrated both the ability to conduct independent scientific research and the knowledge necessary to properly interpret the results obtained.

In conclusion, the reviewed dissertation **meets all the criteria appropriate for doctoral dissertations**, which justifies the request to accept it for public defence. In view of the high scientific value of the results, which were published in very good journals, the scientific maturity of the doctoral student, and his large scientific output, I also request that the dissertation of MSc Laudato be distinguished.



dr hab. Katarzyna Małek