



Centrum Fizyki Teoretycznej

Polskiej Akademii Nauk

Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa

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

Email: cft@cft.edu.pl

NIP 525-000-92-81

Warszawa, dn. 17.07.2024 r.

Recenzja pracy doktorskiej pt. "A DHOST MODEL TO UNIFY THEM ALL" złożonej przez mgra Enrico Laudato.

Uwagi ogólne dotyczące pracy doktorskiej

Uwaga dla komisji doktorskiej i kandydata. Pierwotna wersja tej recenzji została sporządzona w języku angielskim. Poniższa wersja polska została przygotowana jako pomocnicza jednak jako wersję wzorcową proszę traktować tekst angielski niniejszej recenzji.

Praca doktorska złożona przez pana Enrico Laudato została przygotowana pod kierunkiem prof. dr. Vincenzo Salzano. Składa się z 157 stron, jednakże po wyłączeniu bibliografii i dołączonych streszczeń główna część pracy zawiera 121 stron. Biorąc pod uwagę, że znajduje się w niej spora liczba dużych tabel i pełnostronicowych rysunków, rzeczywista długość tekstu wynosi około 100 stron. Praca jest napisana w dość dobrym języku angielskim, ale styl języka i spójność narracji są zróżnicowane. Są fragmenty napisane bardzo jasno (na przykład opis technik bayesowskich i nomenklatury), w innych częściach tekst czasem trudno jest śledzić, a narracja może być niejasna. Ogólnie jednak, w większości przypadków praca jest dobrze napisana i wystarczająco klarowna.

Praca ta dotyczy tematyki z zaawansowanej kosmologii fizycznej związanej z fizycznym opisem kosmologicznej struktury wielkoskalowej, gdy założenie/aksjomat ogólnej teorii względności (GR) jako podstawowej teorii grawitacji jest zrelaksowane. Mianowicie, autor skupia się na rozszerzonych teoriach grawitacji (ETG), a konkretnie na zdegenerowanych teoriach skalarno-tensorowych wyższego rzędu -

teorii z ang. “ Degenerate Higher Orders Scalar Tensor” (DHOST), jako potencjalnych rozszerzeniach klasycznej GR w kontekście kosmologicznym. Te teorie wprowadzają dodatkowe stopnie swobody i stosują mechanizmy ekranowania, aby dawać przewidywania zgodne z ogólną teorią względności na mniejszych skalach, jednocześnie mając potencjał do opisanie zjawisk ciemnej energii i materii.

Autor w swoich badaniach testuje, czy określony model DHOST może jednocześnie naśladować ciemną energię na skalach kosmologicznych i ciemną materię na skalach astrofizycznych. Skuteczność modelu została przetestowana na dwóch klasach obiektów: gromadach galaktyk i ultra-rozmytych galaktycznych (z ang. Ultra Diffuse Galaxies - UDG).

Do badań autor wziął próbkę 16 gromad z programu Cluster Lensing and Supernova Survey with Hubble (CLASH), korzystając z obserwacji rentgenowskich i soczewkowania grawitacyjnego. Masy gromad są modelowane, uwzględniając wkłady wszystkich komponentów, w tym gorącego gazu, najjaśniejszej galaktyki gromady (BCG), ciemnej materii i galaktyk.

Na skali galaktycznej badano wewnętrzną kinematykę trzech UDG zidentyfikowanych za pomocą Dragonfly Telescope Array. Tutaj modelowanie masy uwzględniało zarówno ciemną materię, jak i komponenty gwiazdowe.

Wyniki ocenione z perspektywy bayesowskiej wskazują, że model DHOST, który naśladuje komponent ciemnej energii, wykazuje niewielką przewagę nad ogólną teorią względności w większości gromad. Autor interpretuje tę niewielką statystyczną przewagę jako zdolność teorii DHOST do łagodzenia napięcia między rentgenowskimi a soczewkowymi obserwacjami. Jestem nieco bardziej sceptyczny wobec tej interpretacji, o czym będę pisał dalej. W przypadku UDG analiza bayesowska sugeruje, że scenariusz DHOST jest zasadniczo równoważny ogólnej teorii względności, co może być interpretowane jako wada, ponieważ należałoby oczekiwać, że model DHOST powinien oferować lepszemu dopasowaniu do danych z uwagi na wprowadzenie dodatkowych stopni swobody w porównaniu do GR.

Gdy model DHOST jest używany do opisu efektywnego ciemnej materii ze względu na mechanizm częściowego łamania ekranowania Vainshteina, wyniki pokazują, że na skalach gromad galaktyk ten scenariusz jest statystycznie niekorzystny w porównaniu z ogólną teorią względności. Jednak na skalach galaktycznych pozostaje statystycznie równoważny ogólnej teorii względności w kontekście braku ciemnej materii. Ponownie, moja interpretacja jest bardziej konserwatywna, skłaniająca się ku interpretacji tego wyniku raczej na niekorzyść modelu DHOST ze względu na zwiększony koszt za wprowadzenie nowych stopni swobody.

Te badania dostarczają istotnych wglądów w potencjał modeli DHOST w wyjaśnianiu zarówno zjawisk ciemnej energii, jak i ciemnej materii, przyczyniając się do szerszego zrozumienia kosmologii i teorii grawitacji. Praca jest również przykładem na to, jak teorie takie jak DHOST, które są wewnętrznie znacznie bardziej skomplikowane niż standardowa GR, mogą być nadal skontrastowane z obserwacjami za pomocą solidnej analizy bayesowskiej.

Rozdział 1.

Ten rozdział jest wprowadzeniem do standardowego modelu kosmologicznego - modelu Lambda-Cold-Dark-Matter. Autor nazywa LCDM modelem "konsensusu", co jest nieco niekonserwatywne. W literaturze przyzwyczajaliśmy się odnosić do LCDM jako modelu "zgodności", co jest prawdą, ponieważ 6 wolnych parametrów modelu podstawowego zostało ograniczonych przez obserwacje obejmujące szeroki zakres długości i skal czasowych, od nukleosyntezy Wielkiego Wybuchu, przez CMB, aż po struktury wielkoskalowe z klastrami galaktyk i ciemnej materii, skalę oscylacji akustycznych barionów, aż po skalę klastrów galaktyk i galaktyk. Pomimo otwartych pytań, nie ma wątpliwości, że LCDM jest prawdziwie wielkim osiągnięciem, wyjaśniającym tak wiele obserwacji za pomocą prostego modelu 6-parametrowego z ogólną teorią względności (GR) jako jego podstawą. Osobiście wolę bardziej precyzyjne (historycznie i faktycznie) określenie model "zgodności" (concordance) niż "konsensusu", ponieważ to drugie sugeruje, że pewne czynniki socjologiczne odegrały główną rolę. To tylko semantyka. Rozdział dobrze wprowadza czytelnika w kosmologię tła LCDM. Co jednak zaskakujące, autor wprowadza tylko model tła (nie wychodzi poza równania Friedmana). Istnieje solidna teoria oparta na modelu tła w LCDM, która opisuje formowanie i ewolucję struktury wielkoskalowej we Wszechświecie, aż do skali gromad galaktyk i galaktyk oraz ich zgęstek ciemnej materii. Ponieważ później analizowane są obserwacje tych obiektów, należałoby wprowadzić chociażby podstawową ich powstawania i ewolucji. Można było wspomnieć o spherical collapse top-hat model, czy teorii Press-Schechtera, aż do formowania się zgęstek ciemnej materii z kondensacją chłodnego gazu, co prowadzi do powstawania galaktyk. Szczególnie, że później, gdy wprowadzana jest parametryzacja DHOST, czytelnik powinien zostać zapoznany z podstawową analizą, w jaki sposób nowe człony w równaniach Poissona i na potencjał mogą wpływać na standardowy obraz LCDM formowania się halo i galaktyk. Będę komentował to bardziej szczegółowo później, gdy będę omawiał drugi rozdział.

Mam więcej uwag dotyczących treści tego rozdziału. Kiedy omawia się "LCDM: successes and failures", autor stwierdza, że LCDM skutecznie wyjaśnia kilka obserwacji. To raczej niedopowiedzenie! Z tego, co mi wiadomo, z wyjątkiem kilku pojedynczych obiektów i niezgodności (Hubble'a i parametru S_8), LCDM jest w stanie wyjaśnić zdecydowaną większość naszych obserwacji LSS. Wprowadzając i

omawiając niezgodność H_0 , autor popełnia niefortunny, powszechny błąd, nazywając wartość H_0 wyprowadzoną z pomiarów CMB "wartością z wczesnych etapów". H_0 z CMB to wartość dotycząca późnych (obecnych) etapów ewolucji Wszechświata uzyskana przez ekstrapolację (na podstawie równań Friedmana i ich czynnika $E(z)$, który ustala ewolucję $H(z)$). Cała dyskusja na temat niezgodności H_0 nie zawiera żadnego komentarza na temat tego, jak na ten problem wpłynęłoby przejście od GR do teorii DHOST. To samo można powiedzieć o innym współczesnym problemie kosmologicznym, który jest wprowadzany później w rozdziale - mianowicie niezgodności parametru S_8 . Ponieważ w teoriach DHOST (które poznajemy dopiero w rozdziale 2) potencjały Poissona i skalarnego Bardeena nie są ogólnie równe. Można oczekiwać, że ta teoria może zaoferować zmiany w opisie i przewidywaniach na S_8 względem GR.

Na koniec rozdział kończy się sekcją przedstawiającą motywację do badania teorii DHOST, które zawierają potencjał do ujednoczenia fizycznego opisu DE i DM. Cieszę się, że ta sekcja została dodana, ponieważ odpowiednia motywacja do badania rozszerzeń naszego obecnego paradygmatu jest zawsze mile widziana. Zalecałbym jednak nieco bardziej rygorystyczne podejście. Stwierdzenie, że "Nie mamy pojęcia, czym może być DM, i nie mamy pojęcia, czym może być DE" może dotyczyć tylko autora, ponieważ potoczne "my", gdy jest interpretowane jako szersza społeczność naukowa, ma w rzeczywistości wiele pomysłów na to, czym DM i DE mogą być fizycznie.

Rozdział 2.

Tutaj przedstawiono szczegółowe wprowadzenie do technikaliów teorii DHOST. Rozdział jest dobrze napisany, a tekst i narracja są znacznie bardziej przekonujące i kompleksowe w porównaniu do Rozdziału 1. Najpierw przedstawiono ogólne rozważania (zaczynając od całki działania Einsteina-Hilberta), które są poparte dobrymi odniesieniami do literatury i kontekstem historycznym. Po ogólnych rozważaniach autor przechodzi do opisu zjawisk na skalach astrofizycznych, które będą szczególnie aplikowalne do analizy przedstawionej później w pracy. Tutaj, jak już wspominałem, brakuje mi pewnych rzeczy. Nie ma śladu dyskusji na temat tego, jak na przykład zmodyfikowane równania (2.26) wpłynęłyby na standardowy obraz, który mamy z GR+ Λ CDM na takich skalach. Na przykład zmodyfikowany potencjał ogólnie zmieni energię wiązania galaktyk i ich halo ciemnej materii, co może wpływać zarówno na dyspersje prędkości takich systemów, jak i na ich relaksację (stan wirializacji), w porównaniu do tego samego systemu w opisie tylko GR. Kilka uwag tutaj byłoby na miejscu. Czy powinniśmy oczekiwać jakichś większych różnic w stosunku do GR? Na przykład, jak zmodyfikowana energia potencjału grawitacyjnego wpłynęłaby na rozważania dotyczące równowagi hydrostatycznej, które są założone przy analizie frakcji gorącego gazu rentgenowskiego w gromadach? Co z degeneracją orbitalną obiektów takich jak gromady kuliste, które są używane do wyznaczania mas galaktyk UDF Dragonfly? To są ważne pytania, a odpowiedzi na nie wraz z dyskusją pozwoliłyby czytelnikowi zbudować obraz tego,

jak zmodyfikowana grawitacja w DHOST może wpływać na stan fizyczny i ewolucję systemów, które będą analizowane.

Rozdział 3.

W tym rozdziale autor przedstawia podstawowe koncepcje związane z obserwacjami, które są używane później do analizy bayesowskiej. Obejmuje to soczewkowanie grawitacyjne w reżimie gromad galaktyk, profile temperatury gorącego gazu rentgenowskiego oraz rekonstrukcje masy dla gromad galaktyk i później dla UDG. Przedstawiono standardowe składniki używane do modelowania rozkładu masy systemu, które dla gromad obejmują komponenty DM, gorący gaz, BCG i galaktyki gromady. Dla UDG użyto standardowej analizy opartej o równania Jeans'a z dwoma głównymi składnikami galaktyki: gwiazdnym i DM. Następnie autor bardzo biegle przedstawia dobrze napisane wprowadzenie do maszynierii bayesowskiej do testowania modeli i dowodów obserwacyjnych. Ogólnie ta część rozprawy przedstawia solidną i w większości aktualną metodologię stosowaną do takich analiz. Mam tutaj tylko kilka uwag i pytań. Nie ma dyskusji na temat profilu gęstości NFW w kontekście teorii DHOST. Na przykład autor czyni wewnętrzne założenie sferycznej symetrii dla składnika ciemnej materii. Wiemy jednak z symulacji (i obserwacje to potwierdzają), że halo DM mają tendencję do bycia trójosiowymi spłaszczonym elipsoidami obrotowymi. Jest dobrze ustalone, że parametr trójosiowości, zdefiniowany jako stosunki kwadratów różnic głównych półosi elipsoidy trójosiowej $T = (a^2 - b^2) / (a^2 - c^2)$, rośnie wraz z masą halo. Dla masywnych halo gromad galaktyk osiąga on maksima, przyjmując typowe wartości $T \sim 0.8$. Oznacza to, że wewnętrzne założenie symetrii sferycznej nie jest dobrze spełnione dla halo DM gromad galaktyk. Ponieważ grawitacja DHOST wprowadza piątą siłę dodatkowe oddziaływanie (5-th force), Różnica między trójosiowością wewnętrzną GR i DHOST może manifestować się jako ukryty efekt systematyczny, gdy nie jest uwzględniana. Na przykład, jeśli w DHOST można oczekiwać nieco niższej trójosiowości niż w GR, mogłoby to manifestować się jako lepsze dopasowanie do danych przy założeniu symetrii sferycznej. Szczegółowe badania tego wymagałyby prawdopodobnie dedykowanej symulacji N-ciałowej, co jest oczywiście poza zakresem tematyki pracy. Ale dyskusja związana z wewnętrznie założoną symetrią sferyczną byłaby na miejscu.

Wreszcie, w przypadku modelowania UDG, są dwa elementy standardowego modelu profilu masy, na które może wpływać dodatkowa fizyka DHOST. Relacja masy gwiazdnej do masy halo może odbiegać od standardowych szacunków LCDM, a tego samego (prawdopodobnie nawet w większym zakresie) można oczekiwać w przypadku relacji koncentracja-masa $c(M)$. Ponownie, nie oczekuję, że autor głęboko zagłębi się w technicznie trudne szacunki potencjalnych efektów DHOST na relacje SMHM i $c(M)$. Ale powinny być podjęte podstawowe rozważania, zasadniczo można by pomyśleć o tym, jak modyfikować priorytety, aby uwzględnić potencjalne różnice między oczekiwanymi zachowaniami GR i DHOST.

Rozdział 4.

W tym rozdziale przedstawiono główne wyniki analizy bayesowskiej danych dotyczących gromad galaktyk. Dane składają się z próby gromad CLASH. Najpierw autor przeprowadza standardową ponowną analizę danych, tj. rekonstrukcję profilu masy w standardowym scenariuszu GR. Tutaj mamy dwa przypadki. Jeden z pełnymi danymi, które obejmują obserwacje soczewkowania i rentgenowskie, a oddzielnie brane są tylko dane z soczewkowania. Następnie autor przeprowadza podobną analizę dla dwóch przypadków DHOST, jeden, gdy EOG naśladuje tylko dynamiczną DE, więc potrzebny jest standardowy komponent CDM, a drugi, gdzie teoria DHOST powinna odpowiadać za oba fenomenologiczne komponenty LCDM, czyli DE i DM jednocześnie. Uważam, że wyniki przedstawione tutaj są bardzo interesujące i naukowo wartościowe. Ogólnie możemy traktować wyniki tej analizy jako nowe konkurencyjne ograniczenia obserwacyjne całej klasy teorii DHOST.

Mam tutaj kilka uwag. Po pierwsze, nie rozumiem, dlaczego tylko dla GR przedstawiono oddzielnie dopasowanie danych tylko do soczewkowania i soczewkowania+rentgenowskich? Jest mały fragment, w którym autor komentuje, że ze względu na szum w danych z soczewkowania dopasowanie tylko do tego przypadku dla DHOST nie było efektywne. Cóż, ale ten argument powinien również dotyczyć GR. Jeśli dopasowania dla DHOST do samych danych z soczewkowania są znacznie gorsze lub nie zbiegały się, to powinniśmy nadal być przedstawieni z wynikami i komentarzem. W przeciwieństwie do przypadków artykułów w czasopiśmie, w rozprawach doktorskich zawsze jest i powinno być miejsce także na wyniki negatywne. Które również mogą odgrywać informacyjną rolę w analizie.

Po drugie, zauważyłem pewne dziwne nieprawidłowości w wartościach zgłoszonych w Tabeli 4.1. Mianowicie, tylko w przypadku DHOST (ponieważ nigdy nie zdarza się to dla GR) jest kilka wartości c_{500} , α_h i Beta_1 , które odpowiadają minimalnej wartości Chi^2 , która wydaje się być więcej niż 1-sigma od wartości mediany zgłoszonego parametru. Jest to dość dziwne i nigdy nie jest komentowane, podczas gdy faktycznie może sugerować nieregularny rozkład Chi^2 . Czy to nie powinno być alarmujące i sugerować, że może być jakiś problem ze zbieżnością łańcucha Markowa dla tych przypadków?

Wymieniam je teraz tutaj:

A209 dla parametru DHOST+NFW c_{500}

MS2137 dla parametru DHOST+NFW α_h

MACSJ1115 dla parametru DHOST+NFW c_{500}

MACSJ0429 dla DHOST+NFW c_{500} i dla DHOST - bez NFW α_h i Beta_1

MACSJ0329 dla parametru DHOST+NFW c_{500}

MACSJ1149* dla parametrów DHOST+NFW α_h i Beta_1 .

Na stronie 73 autor pisze, że galaktyki inne niż BCG znacząco przyczyniają się do $M(<r)$ od 500 do 200 kpc, podczas gdy z Rysunku 4.1 możemy wyczytać, że

dzieje się to właściwie na skalach co najmniej o rząd wielkości większych. Może literówka?

Również, uważam, że ogólnie trudno jest czytać i interpretować Rysunek 4.4. Nie jest jasne z samego rysunku, ani z podpisu ani z głównego tekstu, które obszary są faktycznie wykluczone w przestrzeni parametrów. Mogę tylko zgadywać, że wypełnione niebieskie obszary są nadal dozwolone, ponieważ spodziewałbym się, że ograniczający przypadek GR dla $\alpha_h \rightarrow 0$ i $\beta_1 \rightarrow 0$ powinien znajdować się w "dozwołonym" reżimie. Ale co z przypadkiem pulsara Hulse-Tylor? Tylko pary parametrów, które leżą na czerwonej linii są dozwolone? To samo dotyczy przerywanych zielonych linii, nie jest jasne, który prostokąt na diagramie ograniczają/nie aprobują?

Rozdział 5.

Ten rozdział dotyczy bayesowskiej analizy danych obserwacyjnych trzech UDG z teleskopu Dragonfly: NGC 1052-DF2, NGC 1052-DF4 i Dragonfly 44. Rozdział ten składa się z solidnego kawałka badań z bardzo wartościowymi i interesującymi wynikami. Interesujące byłoby porównanie dopasowań dla tych samych komponentów między teoriami, a nie modelowanie wszystkich różnych komponentów w jednej teorii. Czyli porównanie tylko dopasowań gwiazdowych między GR, DHOST+NFW i DHOST bez NFW, i tak dalej. Również uważam za intrygujące, że tylko modele DHOST mogą produkować dość nieregularne prognozy dla $\sigma_{\text{eff}}(R)$ dla Dragonfly 44. Jest to nieco podejrzane, ponieważ jaki mógłby być fizyczny mechanizm, który pozwalałby na takie ostre skoki w dyspersji prędkości? Wydaje się raczej, że dodatkowe stopnie swobody z DHOST pozwala na "nadmierne dopasowanie", co skutkuje dość niefizycznymi prognozami dla σ_{eff} . Autor wydaje się tego nie zauważać. Ogólnie rzecz biorąc, bardzo ważnym wynikiem tego rozdziału wydaje się wskazywanie na niespójność między teorią DHOST z zjednoczoną cechą DE+DM a obiektem Dragonfly 44. Nie posunąłbym się tak daleko, jak sugeruje autor, że to "unieważnia" tę opcję, ponieważ nie powinniśmy się spieszyć z odrzucaniem teorii na podstawie tylko jednego obiektu. Zwłaszcza że analiza Jeansa jest bardzo wrażliwa na błędy obserwacyjne i może tu występować wiele potencjalnych efektów systematycznych. Niemniej jednak jest to bardzo interesujący wynik.

Rozdział 6.

Przedstawia zwięzłe podsumowanie głównych wyników pracy, co jest bardzo mile widzianym i użytecznym dodatkiem do pracy.

Podsumowanie

Uważam, że praca jest napisana w sposób wystarczająco dobry. Autor wyraźnie wykazał się ekspercką wiedzą na temat głównych zagadnień współczesnej kosmologii. Wyniki pracy są bardzo wartościowe naukowo, interesujące i solidne. Ta praca doktorska spełnia obecne standardy badań naukowych w nowoczesnej kosmologii, jakich oczekuje się od pracy doktorskiej, a także wymogi ustawowe określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2023 r. poz. 742 ze zm.). Dlatego z wielką przyjemnością rekomenduję kandydata i pracę do następnych etapów procedury doktorskiej, w tym do publicznej obrony.

Z poważaniem,

dr hab., prof. CFT PAN, Wojciech Hellwing