



prof. dr hab. Mariusz P. Dąbrowski
Kierownik - Szczecińska Grupa Kosmologiczna
Instytut Fizyki, Uniwersytet Szczeciński

ul. Wielkopolska 15, 70-451 Szczecin
tel: (+48) 91 4441248; fax: (+48) 91 4441427;
<http://cosmo.usz.edu.pl>

Mariusz.Dabrowski@usz.edu.pl



Szczecin, 18.08.2023

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ PANA MGR DANILO ARTIGASA
pt. "Searching for quantum features in cosmology:
stochastic inflation and non-linear-field spaces."

Współczesna kosmologia, a szczególnie jej obszar badań bliski wysokoenergetycznej ery Plancka, przeplata ze sobą dwa reżimy: klasyczny i kwantowy. Choć większość testów kosmologicznych jest oparta na klasycznej (bądź zmodyfikowanej, ale wciąż klasycznej) teorii grawitacji, to istnieje kilka zjawisk, których nie da się wyjaśnić w ramach tej teorii. Przykładem jest tu powstanie zaburzeń pierwotnych prowadzących do obecnej struktury wielkoskalowego rozkładu galaktyk, których źródłem są kwantowe zaburzenia w epoce inflacji kosmologicznej. Zakładając, iż poza granicą stosowalności teorii grawitacji Einsteina, tj. powyżej skali energii Plancka, Wszechświat jest w pełni rządzony prawami mechaniki kwantowej (kwantowej grawitacji), a poniżej tej granicy - teorią klasyczną, wciąż możemy spodziewać się płynnego a nie ostrego przejścia od reżimu kwantowego do klasycznego i pozostawienia pewnych cech reżimu kwantowego w reżimie klasycznym. Na tym tle pojawia się rozprawa doktorska mgr Danilo Artigasa, która dotyczy wpływu fizyki w skali rzędu energii Plancka na różne zjawiska obserwowalne w klasycznej ewolucji Wszechświata takie jak np. niegaussowskość w rozkładzie temperatury promieniowania tła, stany ściśnięte, czy też kwantowa geneza ciemnej materii i energii.

Rozprawa powstała na bazie trzech opublikowanych prac w czasopiśmie o wysokim parametrze wpływu takich jak Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, Physical Review D, czy też Classical and Quantum Gravity oraz dwóch jeszcze nieopublikowanych, chociaż przygotowanych do publikacji, artykułach. Doktorant ma też jedną opublikowaną pracę z roku 2019 (PRD100, 043533 (2019)), która nie jest włączona do rozprawy. Publikacje są względnie nowe (2019-22) i stąd jeszcze dosyć słabo cytowane – liczba cytowań (bez autocytowań) wynosi 7. Indeks Hirscha dla całego dorobku to $h=2$.

Rozprawa składa się z imponującej liczby 280 stron a jej struktura nie jest typową pracą pisemną, lecz ma charakter „hybrydowy” – jest to mieszanka tekstów napisanych specjalnie oraz załączonych i jakoby „wplecionych” w narrację pracy oryginalnych artykułów bądź gotowych do wysłania wersji artykułów dotyczących tematu pracy. I tak na początku mamy 6 rozdziałów wprowadzających (44 strony) napisanych specjalnie, potem 7 rozdział „hybrydowy” składający się z nowego tekstu (7 stron) oraz załączonych kopii 2 artykułów (120 stron!), następnie 8 rozdział całkowicie napisany na potrzeby rozprawy (10 stron) i w końcu rozdział 9 oparty wyłącznie na artykułach (38 stron). Potem następują rozdziały podsumowujące 10-12 w trzech językach (angielski, francuski i polski) oraz dwa dodatki. Załączona na stronach 269-279 bibliografia zawiera 166 pozycji.

Praca ma też nadaną ogólniejszą strukturę składającą się z trzech zasadniczych sekcji (nałożoną na rozdziały 1-12): I. Motywacji, II. Kosmologii (klasycznej) oraz III. Kosmologii kwantowej. Jako motywacja przedstawione są zagadnienia nieliniowości w kosmologii a w szczególności rozważanie reakcji zwrotnej (back-reaction) pierwotnych kwantowych zaburzeń we Wszechświecie na jego klasyczną geometrię/ewolucję. Przedstawiona jest też motywacja o której wspominałem na początku dotycząca ujawnienia się kwantowych efektów w klasycznej ewolucji Wszechświata (np. wybór próżni kwantowej i jego wpływ na spektrum fal grawitacyjnych). Wprowadzony jest też formalizm hamiltonowski dla ogólnej teorii względności, który odgrywa kluczową rolę dla wielu wyników uzyskanych w pracy.

W sekcji II znajdujemy 3 rozdziały. Pierwszy z numerem 5, będący w zasadzie krótkim wprowadzeniem do jednorodnej kosmologii Friedmanna-Lemaître'a-Robertsona-Walkera (FLRW) wraz z klasycznymi problemami horyzontu, płaskości i monopoli i ich rozwiązaniem za pomocą inflacji przez Alana Gutha i Andreja Lindego na początku lat 80-tych XX wieku. Drugi z numerem 6, jest wprowadzeniem do teorii zaburzeń kosmologicznych z omówieniem takich pojęć jak formalizm niezmienniczy względem cechowania, ewolucja zaburzeń oraz spektrum mocy. Oba te rozdziały wskazują, iż doktorant posiadał odpowiedni poziom wiedzy na temat tych zagadnień aby przejść do ich rozszerzenia w swojej rozprawie.

To rozszerzenie następuje w rozdziale 7, gdzie rozwijany jest wspomniany już problem reakcji zwrotnej kwantowych zaburzeń na klasyczną ewolucję Wszechświata. Zaburzenia te rozkładane się na „długofalowe” oraz „krótkofalowe”. Jak jest wspomniane, te pierwsze ujawniają się w obserwowanym spektrum jako zaburzenie krzywizny Wszechświata przedstawione formułą (7.14) i dają niegaussowskość temperatury promieniowania tła, a te drugie (krótkofalowe) tak naprawdę odpowiedzialne za właściwą reakcję zwrotną, są obserwowane jako szum stochastyczny ujawniający się na dużych skalach długości we Wszechświecie. Wszystko to jest opisane w rozdziale 7.5 będącym kopią imponującego 43-stronicowego artykułu [1] (JCAP 02, 001 (2022)) na ten temat. Istotą tej pracy jest po pierwsze zaniechanie gradientów krzywizny w równaniach nieliniowych zaburzeń a po drugie zastosowanie formalizmu tzw. „oddzielonych Wszechświatów” (separate universe formalism) – przestrzenie rozdzielonych jednorodnych i izotropowych płatów przekraczających rozmiar Hubble'a dla ewoluującego niejednorodnego Wszechświata-tła. Niejednorodność polega na tym, iż rozdzielone przyczynowo płaty charakteryzują się różnymi własnościami fizycznymi (pola fizyczne zmieniają się od płata do płata). Na uwagę zasługuje złożoność techniczna przeprowadzonych obliczeń w tym formalizmie – dodatki techniczne zajmują 14 stron. Kilka wyników artykułu [1] wymaga podkreślenia. Okazało się, iż formalizm rozdzielonych wszechświatów daje dobry opis w formalizmie niezmienniczego cechowania (takim jak zmienne Mukhanova-Sasaki) a także jest niezależny od specyficznego rozwiązania dla ewoluującego rozwiązania-tła. Jednak nie wszystkie cechowania mogą być zastosowane w tym formalizmie – na przykład pojawiają się trudności dla cechowania Newtona a cechowanie zerowej krzywizny w ogóle się do tego formalizmu nie nadaje.

Wątek doboru cechowania jest kontynuowany w rozdziale 7.6 będącym kopią znowu imponującego 72-stronicowego, jeszcze nieopublikowanego artykułu „Hamilton formalism for cosmological perturbations: fixing the gauge”. Sformułowanie teorii perturbacji kosmologicznych (CPT) dla dowolnego cechowania w formalizmie rozdzielonych wszechświatów okazało się zadaniem niełatwym pomimo zastosowania nowatorskiej metodologii zastosowanie np. cechowania jednolitej ekspansji pozostawia swobodę wyboru cechowania. To niestety zmniejsza szansę na pełne zastosowanie formalizmu. Uzyskany rezultat jest nieco pesymistyczny, ale pokazuje możliwości doktoranta w przeliczaniu skomplikowanych formalnie zagadnień teorii perturbacji kosmologicznych, co jest oczywiście zaletą.

Sekcja II rozprawy zatytułowana jest „kwantowa kosmologia”, co do jakiegoś stopnia jest adekwatne chociaż te dwa słowa zwykle dla relatywisty kojarzą się z podejściem kanonicznym w formalizmie Wheelera-DeWitta. Ale mamy tutaj do czynienia z pewnymi nowatorskimi pomysłami w zakresie nawet bardziej fenomenologicznym. Wprowadzeniem do tej sekcji jest rozdział 8 dotyczący sformułowania geometrii kählerowskiej dla przestrzeni Hilberta. Zespolone rozmaitości Kählera pozwalają na przejście

do przestrzeni fazowej położen i pędów, a dodatkowo pozwalają na odejście od sformułowania liniowego mechaniki kwantowej (patrz podrozdział 8.2), co pozwala na szerokie zastosowania do opisu np. układów spinowych na sferze (podrozdział 8.3). Te działania są realizowane w duchu tzw. wzajemności Borna (Born reciprocity theorem).

Rozdział 9 otwiera listę 3 prac obejmujących zagadnienia związane z kwantowymi aspektami grawitacji w języku klasycznym poprzez zastosowanie różnorodności kählerowskich. Zastosowana jest tu metoda „nieliniowej teorii przestrzeni pól” (non-linear-field space theory - NFST) poprzez użycie przestrzeni sferycznej odpowiadającej przestrzeni fazowej spinu i dokonanie kwantowania. W reżimie półklasycznym tj. dla dużych wartości spinu, geometria sferyczna przestrzeni fazowej zastąpiona jest geometrią płaską. To zagadnienie jest przedmiotem podrozdziału 9.1 (opartego o pracę [2] CQG 38, 085007 (2021) – ponownie 25 stron), w którym rozważana jest sytuacja przestrzeni de Sittera – w odróżnieniu od standardowego podejścia, tutaj Wszechświat rozszerza się osiągając maksymalną wartość czynnika skali (co zachodzi w nieskończonej przyszłości na hiperboloidzie de Sittera) a następnie kurczy prowadząc do swoistego, niestandardowego, „Wielkiego Odbicia” (co formalnie odpowiada nieskończonej przeszłości). Efekt ten podyktowany jest zachowaniem się zaburzeń (a właściwie ich reakcji zwrotnej na geometrię), które są duże, gdy objętość Wszechświata jest mała, powodując odpychanie. Problemem jest, iż należy w jakiś sposób włączyć tutaj efekty zwykłej materii, bowiem oczekujemy aby „Wielkie Odbicie” miało miejsce w skończonym czasie w przeszłości/przyszłości.

Podrozdział 9.2 to jeszcze nieopublikowany krótki (10 stron) artykuł pt. „Squeezing of light from the Planck scale physics” i być może ze względu na moje osobiste zaangażowanie w prace nad Uogólnioną Zasadą Nieoznaczoności (GUP), ciekawą fenomenologią i odniesienie się do danych obserwacyjnych/eksperymentalnych podoba mi się najbardziej z całej pracy. Uwzględnienie krzywizny w przestrzeni fazowej prowadzi do GUP, która uzupełnia standardową Zasadę Nieoznaczoności Heisenberga (HUP) o (z założenia niewielki) człon proporcjonalny do kwadratu pędu. Poprawki do HUP są parametryzowane przez β o wymiarze odwrotności energii. Głównym efektem rozważanym w pracy jest efekt ściśnięcia stanów w określonym kierunku przestrzeni fazowej. W istocie ściśnięcie w kierunku pędu powoduje zmniejszenie nieoznaczoności w tym kierunku kosztem jej wzrostu w kierunku położen. Wprowadzenie poprawki proporcjonalnej do β w HUP powoduje też ciekawe efekty obserwacyjne. Na przykład modyfikowana jest relacja dyspersyjna i fotony wysokoenergetyczne poruszają się szybciej w przestrzeni niż fotony o niskiej energii. Dla błysków gamma (GRB) o energii ok. 1 TeV różnica w czasie przybycia na dystansie 1 Gpc to około 1 sekunda i jest to efekt mierzalny eksperymentalnie. Z kolei współczynnik ściśnięcia stanów koherentnych dla tych samych fotonów może sięgać nawet wartości 10^{28} , co jest wynikiem zadziwiającym.

Ostatni podrozdział 9.3 i ostatnia praca opublikowana (nr [3] Phys. Rev. D 102, 125029 (2020)) używa NFST do wyrażenia przestrzeni fazowej spinu w terminach kanonicznych pól skalarnych. Dalej następuje przejście do teorii Diraca-Borna-Infelda (DBI), która w tym sformułowaniu prowadzi do zadziwiającej kosmologii z ujemną gęstością energii co z kolei związane jest z nadświatłą propagacją zaburzeń (dźwięku) w kosmosie. Taki efekt znany jest także jako następstwo tzw. k-esencji (k-essence).

Moje uwagi krytyczne oraz pytania odnoszą się do następujących kwestii:

- „Hybrydowa” struktura pracy powoduje, iż czasami trudno zorientować się co jest wyłączną treścią rozprawy a co kopią opublikowanych artykułów. Same artykuły są „ukryte” w treści rozprawy i czasami trudno je „wyłowić”. Sprawę rozwiązałaby jedna strona z wymienionymi jawnie artykułami zawartymi w rozprawie np. na początku pracy. Inna sprawa, że wołałbym albo jednolitą pracę pisemną bez kopii artykułów lub artykuły opatrzone kilkunastostronicowym wstępem z opisem najważniejszych wyników.

- Str. 32, przed formułą 5.39 – skrót USR (ultra-slow-roll inflation) nie został formalnie wprowadzony.
- Pierwszy akapit podrozdziału 6.3 – wyjaśnienie pochodzenia oraz liczby stopni swobody dla poszczególnych przypadków nie jest dla mnie (i prawdopodobnie dla innego czytelnika) jasne. Czy zdanie „This implies that we are left with six gauge-invariant variables in Hamiltonian formalism ...” jest poprawne w świetle zdania poprzedniego o czterech więzach?
- O ile zdanie przed formułą (7.8) („the most general inhomogeneous metric with vanishing ...”) jest słuszne w kontekście jednorodnych rozwiązań FLRW dla równań Einsteina, o tyle spora grupa relatywistów uważa, iż nie jest ono prawdziwe, bowiem istnieje cała (i ogólniejsza) klasa rozwiązań tych równań, które są rozwiązaniami ścisłymi (np. sferycznie symetryczne rozwiązanie Lemaître’a-Tolmana-Bondi’ego (LTB), rozwiązanie Szekeres’a, Wainwrighta-Goode’a i wiele innych) i nie są zawarte w klasie opisywanej metryką (7.8). Ciekawe byłoby poszukiwanie odpowiedniości tych rozwiązań z zaburzonymi rozwiązaniami typu FLRW. Wymaga to komentarza.
- Na ile formalizm „oddzielonych Wszechświatów” (separate universe formalism), który zawiera możliwość zmiany pól fizycznych od płata do płata, może być zastosowany do opisu zmienności stałych fundamentalnych we Wszechświecie?
- Formułą (93) w artykule z podrozdziału 9.2 doktorant przyzywa poprawkę do GUP pochodzącą od kwadratu współrzędnych, ale nawet nie wspomina, iż jest to bardzo dobrze znane zagadnienie, a formuła ta odpowiada tzw. GEUP czyli Uogólnionej Rozszerzonej Zasadzie Nieoznaczoności (GEUP – Generalized Extended Uncertainty Principle), która jest świetnie opisana na przykład w przeglądowej pracy S. Hossenfelder, Living Rev. Relat. 16, 2 (2013).
- Pojawienie się ujemnych gęstości energii w podrozdziale 9.3 jest bardzo awangardowym odejściem od standardów kosmologii. Znana jest praca R. Nemiroff i inni (JCAP 06, 006 (2015), arXiv: 1402.4522) o modelach FLRW z taką materią, ale trudno tutaj znaleźć podstawy obserwacyjne jak to jest np. w przypadku fantomu, czyli materii z superujemnym ciśnieniem (choć patrz też ostatnia praca arXiv: 2301.12725). Przydałoby się tutaj głębsze uzasadnienie.

Ogólnie praca jest bardzo długa, zawiera wiele wątków, ale wyniki nie wskazują na istotne przełomy, co odzwierciedla się słabym zainteresowaniem środowiska kosmologów przedstawionymi w rozprawie wynikami w postaci niskiej liczby cytowań. Być może jako praca porządkująca pewne zagadnienia, potrzebuje ona więcej czasu do jej zauważenia i docenienia w tym zakresie. Nieco „pośredni” etap badań jest odzwierciedlony w konkluzji 10/11/12, której co najmniej jedna trzecia poświęcona jest przyszłym planom i perspektywom. Na mój własny użytek spisałem sobie 5 głównych wyników: 1) użycie metody rozdzielonych wszechświatów do reakcji zwrotnej zaburzeń kwantowych, ale z trudnościami wyboru cechowania; 2) opis kwantowy za pomocą klasycznej zakrzywionej przestrzeni fazowej; 3) wskazanie, że nieliniowe efekty kwantowe prowadzą do ściśniętych fluktuacji kwantowych; 4) GUP prowadzi do stanów ściśniętych dla fotonów; 5) przejście z przestrzeni spinu do formalizmu pól skalarnych i dalej do teorii DBI z efektem ujemnej gęstości energii. Szkoda, że doktorant sam nie podsumował, które z Jego wyników uważa za najważniejsze i dlaczego.

Pomimo tych kilku krytycznych uwag uważam, iż rozprawa doktorska mgr Danilo Artigasa stanowi nowatorski wkład do zagadnień z pogranicza klasycznej i kwantowej teorii grawitacji oraz kosmologii. Stwierdzam, że **spełnia ona zawiązka wymogi ustawowe (art. 187 ust. 1, 2 i 3 ustawy „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” z dn. 20 lipca 2018) stawiane osobom ubiegającym się o stopień naukowy doktora**. W związku z tym rekomenduję rozprawę p. mgr Danilo Artigasa do publicznej obrony. Jednocześnie sugeruję jej wyróżnienie jako pracy bardzo wszechstronnej. Obejmuje ona bardzo szerokie spektrum badań - od pierwotnych zaburzeń i ich wpływu na geometrię Wszechświata, poprzez zastosowanie matematyki różnicowości kählerowskich, aż do fenomenologii kwantowej grawitacji.

