



**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, 03.08.2023

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ PANA MGR ALEKSANDRA KOZAKA**  
**pt. "Conformally-invariant framework for scalar-tensor theories of gravity in the metric, Palatini, and hybrid approaches."**

Motywowany problemem ponad 70% zawartości Wszechświata w postaci ciemnej energii, czyli materii o globalnym ujemnym ciśnieniu, której fizyczne podstawy nie są do dzisiaj znane, ostatnimi laty nastąpił dynamiczny rozwój rozszerzonych/alternatywnych teorii grawitacji. Te teorie próbują znaleźć wyjaśnienie zjawiska przyspieszenia ewolucji Wszechświata w oparciu o znane pola fizyczne lub konfiguracje geometryczne. Wśród całego szeregu teorii obejmujących bardzo awangardowe i słabo sprawdzone eksperymentalnie teorie superstrun, bran, M-teorię itp., pojawiają się teorie o bardziej standardowych podstawach, chociaż także w dużej mierze niepotwierdzone eksperymentalnie w wystarczająco jednoznaczny sposób w porównaniu z klasyczną ogólną teorią względności.

Na tym tle pojawia się rozprawa doktorska mgr Aleksandra Kozaka, która dotyczy mniej awangardowych, choć wciąż nieco wyszukanych, teorii skalarno-tensorowych w podejściu niemetrycznym w formalizmie Palatiniego (metryka i koneksja są niezależnymi obiektami). Chociaż teorie Palatiniego są znane już od zarania tworzenia podstaw ogólnej teorii względności, to zadziwiającym jest, iż wiele w zasadzie podstawowych aspektów tych teorii, nie zostało zbadanych pozostawiając bardzo dobrą lukę do uzupełnienia w rozważanej rozprawie doktorskiej.

Rozprawa powstała na bazie czterech opublikowanych prac w czasopismach o wysokim parametrze wpływu takich jak Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, Physical Review D, czy też European Physical Journal C. Doktorant ma też w dorobku 6 prac z innej niż doktorat tematyki, w tym 2 prace złożone do czasopism i już dostępne na archiwach elektronicznych. Publikacje są względnie nowe (2019-23) i całkiem, jak na doktoranta, dobrze cytowane – liczba cytowań (bez autocytowań) wynosi 78. Indeks Hirscha dla całego dorobku p. mgr A. Kozaka to  $h=3$ .

Rozprawa zawiera 153 strony i jej struktura nie jest typową pracą pisemną, lecz składa się z 56-stronicowego wprowadzenia (rozdziały 1-3) a następnie z 4 rozdziałów będących wklejonymi opublikowanymi pracami poprzedzonych krótkim streszczeniem oraz 4-stronicowego podsumowania głównych wyników. Załączona na stronach 147-153 bibliografia zawiera 105 pozycji.

Pracę rozpoczynają krótkie pytania wprowadzające oraz omówienie jej struktury oraz źródeł. Rozdziały 2 i 3 skupiają się na podstawowych własnościach obecnie panującej ogólnej teorii względności oraz omówieniu jej słabości jako przyczyny rozważania teorii rozszerzonych. Postawione jest też pytanie w



jaki sposób modyfikować teorię Einsteina, bo ścieżek do tego jest bardzo wiele, co prowadzi do nadmiaru „bytów nad potrzeby”.

Krótko omówię zasadniczą treść i rezultaty czterech prac opisane w rozdziałach 4-8 oraz załączonych jako reprints. Czasami będę się odnosił do opisu własnego doktoranta a czasami do oryginalnych prac.

W rozdziale 4 (opartym na pracy EPJC 79, 335 (2019)) dokonane zostało uogólnienie pojęcia odwzorowania konforemnego na teorie skalarno-tensorowe w podejściu Palatiniego, tzn. w przypadku niezależności metryki i koneksji. Wykonano to poprzez zastosowanie transformacji działającej na koneksję niezależnie od metryki. Najważniejszym osiągnięciem tego podejścia było znalezienie niezmienników tego uogólnionego na przypadek Palatiniego odwzorowania. Analizy dokonano w tradycyjnych układach konforemnych Jordana i Einsteina. Ciekawe jest, iż w układzie Einsteina niezmiennicza koneksja jest koneksją Levi-Civity definiowaną względem niezmienniczego tensora metrycznego.

Przedmiotem rozdziału 5 (opartego o pracę JCAP 07, 003 (2020)) jest hybrydowa teoria metryczno-Palatiniego, w której działanie oparte jest na kombinacji działania Einsteina-Hilberta i działania analogicznego do teorii wyższego rzędu opartego o funkcję skalara Ricciego w ujęciu Palatiniego, czyli z niezależnymi metryką i koneksją. W analogii do transformacji Legendre’a dla teorii metrycznej  $f(R)$ , działanie w teorii hybrydowej można sprowadzić do działania Bransa-Dicke’go z potencjałem będącym funkcją nowo definiowanego pola skalarnego  $U_F(\Phi)$ . Znaleziony wcześniej inwariant uogólnionych transformacji konforemnych (3.5) służy teraz do rozróżnienia pomiędzy teoriami: metryczną (m), Palatiniego (P) i hybrydową (h). Dalej pojawia się kolejne uogólnienie teorii hybrydowej polegające na wprowadzeniu siedmiu niezależnych funkcji pola skalarnego  $\Phi$ . W końcu, oprócz dyskusji możliwej ich redukcji, rozważane są pewne szczególne wybory tych funkcji we wspomnianych trzech podstawowych ujęciach m, P i h, wraz z przejściem do określenia niektórych parametrów kosmologicznych (np. związanych z kosmologiczną inflacją).

Sformułowanie kwantowo-kosmologiczne teorii skalarno-tensorowych w formalizmie hybrydowym jest przedmiotem rozdziału 6 (PRD 105, 044011 (2022)). W tym ujęciu kluczową rolę odgrywa funkcja lapsu stająca się czynnikiem konforemnym dla metryki w minisuperprzestrzeni. Diagonalizacja tej metryki pozwala zapisać wszystkie wielkości teorii kwantowej jako niezmienniki konforemne, co pozwala na badanie teorii w niezmiennicznym układzie Einsteina, a nie np. Jordana. Dodatkową zaletą jest rozdzielenie członów kinetycznych pola skalarnego i czynnika skali ułatwiające sformułowanie zagadnienia Cauchy’ego w tej minisuperprzestrzeni. Jednak, jak się w końcu okazuje, anomalne sprzężenie materii z polem skalarnym w układzie Einsteina, prowadzi do niefizycznego wyniku (łamanie słabej zasady równoważności) – wymaga to przejścia do innego równoważnego układu i komplikacji teorii. Na uwagę zasługuje taka manipulacja funkcją lapsu, iż można uniknąć jednego z kwantowomechanicznych problemów kwantowej kosmologii jakim jest problem tzw. uporządkowania operatorów (operator ordering problem). W końcu otrzymuje się ciekawe całki ruchu w zaproponowanym podejściu dla klasy teorii  $f(R)$  w ujęciach metrycznym i Palatiniego.

Zastosowanie niezmienników konforemnych do badania struktury gwiazdowej ma miejsce w rozdziale 7 (EPJC 81, 492 (2021)), gdzie formułowane jest podstawowe równanie struktury gwiazdowej Tolmana-Oppenheimera-Volkoffa (TOV). Zrobione jest to w sposób niezmienniczy zarówno w układzie Einsteina jak również w układzie Jordana. To podejście ma jednak ograniczenie polegające na konieczności wyboru niezmienniczej metryki lub koneksji, których wybór jest jednak niejednoznaczny.

Rozdział 8 zawiera podsumowanie pracy.



Moje uwagi krytyczne oraz pytania odnoszą się do następujących kwestii:

- Uogólnione transformacje konforemne (5a-c) (lub odpowiednio 6a-c) prowadzą do formuł transformacyjnych (12)-(16). O ile stosunkowo łatwo można znaleźć granicę relatywistyczną standardowej transformacji konforemnej (5a-c) przyjmując stałą wartość pola skalarnego  $\Phi$  (lub odpowiednich funkcji tego pola), o tyle ta granica wydaje się nietrywialna w przypadku relacji (12)-(16). Warto byłoby wyjaśnić w pracy dochodzenie do tej granicy.
- Jaki jest analog niezmiennika Weyla w teoriach Palatiniego? Jak on się ma do niezmienników uzyskanych przy uogólnionych transformacjach (5a-c)?
- W formule pomiędzy (3.4) i (3.5) (bez numeru) nie jest dla mnie jasne dlaczego w granicy  $\Omega_A \rightarrow \infty$  otrzymuje się ogólną teorię względności przy  $\omega_{BD} \rightarrow 0$ , skoro w klasycznym ujęciu, aby przejść od teorii Bransa-Dicke'go do teorii Einsteina, trzeba wziąć  $\omega_{BD} \rightarrow \infty$ ?
- Wprowadzenie 7 dodatkowych funkcji w (4.1) (pomimo możliwej ich redukcji) wydaje się mnożeniem bytów nad potrzeby. Jakikolwiek porównanie takich teorii metodami kryteriów statystycznych wobec  $\Lambda$ CDM wydaje się bardzo niekorzystne wobec tych teorii ze względu na dużą liczbę nowych parametrów. Jaki to ma sens? Jakie kryteria zastosować?
- We wprowadzeniu do ostatniej pracy oraz w podsumowaniu całości rozprawy, pojawia się dyskusja na temat fizycznego sensu różnych konforemnie związanych układów, bowiem transformacje konforemne nie są tym samym co transformacje współrzędnych i wobec tego w różnych układach konforemnych możemy obserwować różną fizykę. Z drugiej strony wprowadzenie niezmienników konforemnych sugerowałoby, iż dla tych niezmienników układy konforemne są ekwiwalentne. Jednak niezmienniki nie zawsze odpowiadają najbardziej interesującym nas wielkościom fizycznym, a więc wydaje się, iż problem wyboru układu konforemnego wciąż pozostaje otwartym?

Ogólnie mogę stwierdzić, iż rozprawa w formie wprowadzenia i przeglądu opublikowanych prac jest dosyć klarownie napisana, zawiera nowatorskie propozycje w obszarze teorii skalarno-tensorowych grawitacji opierających się na wciąż, jak widać, do końca niezbadanym, formalizmie Palatiniego. Podstawą rozprawy są prace, które pojawiły się w wysoko punktowanych czasopismach.

Podsumowując uważam, iż rozprawa doktorska mgr Aleksandra Kozaka stanowi bardzo konkretny i nowatorski wkład do zagadnień rozszerzonych teorii grawitacji. Stwierdzam, że **spełnia ona z nawiązką 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 Aleksandra Kozaka do publicznej obrony. Jednocześnie sugeruję jej wyróżnienie.

