

Wrocław dn. 09.12.2025

Prof. dr hab. Andrzej Borowiec  
Uniwersytet Wrocławski  
Instytut Fizyki Teoretycznej

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ MGR BARTŁOMIEJA BĄKA  
*THEORY OF GRAVITY AS THEORY OF LOCAL INERTIAL FRAMES*

Promotorzy: prof. dr hab. Jacek Jezierski (Uniwersytet Warszawski) i prof. dr hab. Jerzy Kijowski (Centrum Fizyki Teoretycznej PAN).

Tematyka przedstawionej do oceny rozprawy jest ściśle związana z działalnością naukową drugiego promotora i bazuje na wspólnej z nim publikacji (*J. Math. Phys.* 65, 092501 (2024), ref. [9]). Dokładniej, o ile w powyższej publikacji proponuje się przeformułowanie konwencjonalnej teorii grawitacji w duchu metryczno-afinicznego formalizmu Palatiniego, to w samej rozprawie wychodzi się poza tradycyjne równania Einsteina do ich afinicznych uogólnień. Tym samym rozprawę można zaliczyć do współcześnie rozwijanego szerokiego nurtu rozszerzonych (albo zmodyfikowanych) teorii grawitacji, które motywowane są próbami wyjaśnienia problemów takich jak ciemna energia, ciemna materia, inflacja, czy nierenormalizowalności einsteinowskiej teorii grawitacji. Ideę przewodnią i punkt wyjścia stanowi związek pomiędzy beztorsyjnymi koneksjami afinicznymi a istnieniem lokalnych układów inercjalnych obecnych także w teoriach metrycznych.

**Omówienie pracy i jej wyników:**

Poprawnie napisana w języku angielskim rozprawa doktorska mgr. Bartłomieja Bąka *Theory of Gravity as Theory of Local Inertial Frames* liczy 120 stron. Składa się z czterech logicznie uporządkowanych rozdziałów, trzech dodatków oraz spisu literatury. Rozdział wstępny (Introduction) wprowadza oznaczenia oraz podstawowe definicje. Uwagę zwraca algebraiczna redefinicja tensora Riemanna, nazwana dalej tensorem Kijowskiego. Jego użycie znajduje uzasadnienie w następnym rozdziale (Preliminaries) poświęconym rachunkowi wariacyjnemu. Okazuje się, że pęd sprzężony do (beztorsyjnej) koneksji afinicznej można uzyskać za pomocą pochodnej cząstkowej po tensorze Kijowskiego.

Ogólna struktura równań ruchu w teoriach afinicznych, tj. takich w których gęstość lagrangianu zależy od symetrycznej koneksji i jej pierwszych pochodnych, przedstawiona jest w podrozdziale 2.3. Autor proponuje dalej sześć konkretnych skalarnych gęstości,  $V_0$  -  $V_6$ , z których można skonstruować czysto afiniczne lagrangiany: wzory (2.145)-(2.151) oraz (2.160). Mają one skomplikowaną postać zawierającą cztero-liniowe zwężenia tensora Riemanna i gęstości Levi-Civity. Rozkład na nieprzywiedlne komponenty pozwala

na wyodrębnienie członów co najwyżej kwadratowych w antysymetrycznej (elektromagnetycznej) części tensora Ricciego i odpowiednika tensora Weyla (bezsładowej komponenty tensora Riemanna). Te, tzw. przybliżone (approximated) lagrangiany podlegają dalszej analizie w podrozdziale 2.5, gdzie omówiono ich własności. Należą do nich równania ruchu, ich zlinearyzowana wersja, analog równań Einsteina czy efektywna stała kosmologiczna.

Rozdział trzeci (Affine Lagrangians) stanowi pogłębioną analizę niektórych przypadków rozważanych w poprzednim rozdziale. Podrozdział 3.1 bada afiniczne działanie typu Borna-Infelda, z rozkładem na część grawitacyjną i elektromagnetyczną, odpowiadającą wyborowi gęstości  $V_0$  (2.145). W praktyce rozważa się tylko człony co najwyżej kwadratowe w tensorze elektromagnetycznym (wzór 3.4). Ciekawym przypadkiem jest wyodrębnienie członu odpowiadającego polu masywnego bozonu o spinie jeden (pola Proca, Dodatek B). Warto zauważyć, że część grawitacyjna była rozważana przez Sir Arthura Stanleya Eddingtona w książce *The Mathematical Theory of Relativity*, z roku 1924 (drugie wydanie), a współczesna literatura koncentruje się raczej na podejściu Palatiniego, z metryką i koneksją jako niezależnymi zmiennymi. Pozostałe dwa podrozdziały 3.3 i 3.4 analizują przybliżone afiniczne działania, związane z gęstościami  $V_1$  (2.146) i  $V_6$  (2.151) przy użyciu rachunku perturbacyjnego. Najwięcej problemów dostarczają człony zawierające algebraicznie bezsładową (Weylowską) część tensora Riemanna, którym przypisuje się w rozprawie związek z ciemną materią, odgrywającą nieistotną rolę w skali układu słonecznego. Podrozdział 3.5 analizuje więc przypadek w którym ten tensor jest niedynamiczny, tj. pełni rolę ustalonego tła.

Zasadnicze, według autora i dotychczas niepublikowane wyniki rozprawy, są zawarte w rozdziale czwartym (Metric Gravity) i dotyczą przejścia do efektywnego opisu metrycznego w modelach afinicznych z poprzednich podrozdziałów. Wprowadzenie metryki pozwala na rozkład symetrycznej koneksji na część metryczną i tensor niemetryczności jak i odpowiedni rozkład tensora Riemanna. Po zastosowaniu transformacji Legendre'a i przejściu do nowych zmiennych, którymi są metryka i tensor niemetryczności, otrzymuje się teorię przypominającą formalizm Palatiniego, podobnie jak we wcześniejszej wspólnej pracy doktoranta z profesorem Jerzym Kijowskim, ref. [9]. Główną zaletą takiego podejścia jest możliwość wyodrębnienia członów odpowiadających za materię (4.39), która jednak składa się z czysto geometrycznych komponentów. Należy podkreślić, że równoważność z afinicznymi sformułowaniami zachodzi na powierzchni masy (on shell), czyli po uwzględnieniu równań pola. Może to mieć znaczenie przy próbach kwantowania takich teorii.

#### **Uwagi krytyczne:**

Przedstawione w rozprawie wyniki mają charakter badań teoretycznych o trudnych do przewidzenia zastosowaniach praktycznych. Zawężenie możliwych funkcjonatów działania do lagrangianów opartych na gęstościach  $V_0 - V_6$ , zawierających działanie typu

Borna-Infelda, można postrzegać jako zaletę tego podejścia. Zwykle rozszerzone teorie grawitacji oferują trudną do ogarnięcia liczbę możliwości.

Zaproponowany w rozprawie formalizm jest czysto geometryczny, matematycznie skomplikowany, i z mojego punktu widzenia nieoczywisty w zakresie fizycznej interpretacji. W szczególności jest bardzo trudny do praktycznego zaimplementowania w konkretnych modelach fizycznych, zwykle dobrze opisywalnych w ramach innych uogólnień teorii Einsteina. Mam tu na myśli zastosowania w kosmologii (inne niż ciemna energia reprezentowana przez stałą kosmologiczną), do opisu inflacji, czy poszczególnych faz ewolucji wszechświata oraz jego wielkoskalowej struktury za pomocą metryki Friedmanna-Robertsona-Walkera i jej zaburzeń. Ogólniej, możliwości sprzężeń z powszechnie stosowanymi formami materii, jak np. materia pyłowa, czy z innymi płynami idealnymi, potrzebnymi do opisu obserwowalnych obiektów astrofizycznych, powstawania galaktyk, dysków akrecyjnych, zapadania grawitacyjnego, itp. wydają się mocno ograniczone. Innymi słowy, trudno będzie zrealizować scenariusze wyrażone słynnym cytatem z J.A. Wheelera: "matter tells spacetime how to curve and gravity tells matter how to move". Podkreśla on istnienie dwóch niezależnych i równoprawnych bytów, geometrii i materii połączonych równaniami pola w których prawa strona należy do geometrii a lewa opisuje materię. Proponowany formalizm przesuwając środek ciężkości w stronę geometrii, a materia pełni rolę emergentną i przez to trudną do kontrolowania.

#### **Podsumowanie i rekomendacja:**

Zaprezentowana rozprawa doktorska mgr. Bartłomieja Bąka wnosi nowe, czysto geometryczno-teoretyczne spojrzenie na teorię grawitacji, oraz jej możliwą interpretację fizyczną. W mojej ocenie, uzyskane oryginalne, choć w większości jeszcze nieopublikowane wyniki, zawarte w przedstawionej mi do oceny rozprawie doktorskiej oraz sposób ich prezentacji wskazujący na bardzo dobrą znajomość zaawansowanych metod rachunku tensorowego i rachunku wariacyjnego, świadczą o dobrym przygotowaniu doktoranta do samodzielnej pracy naukowej. Reasumując, rozprawa doktorska mgr. Bartłomieja Bąka spełnia formalne, zwyczajowe i ustawowe wymogi stawiane pracom doktorskim. Dlatego, z pełnym przekonaniem rekomenduję Radzie Naukowej Dyscypliny Nauk Fizycznych Uniwersytetu Warszawskiego dopuszczenie mgr. Bartłomieja Bąka do dalszych czynności w prowadzonym przewodzie doktorskim, w tym do publicznej obrony.

Borna