

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Fabiana Wagnera pt. “Modified uncertainty relations from classical and quantum gravity”

Praca doktorska Pana mgr Fabian Wagnera pt. “Modified uncertainty relations from classical and quantum gravity” została przygotowana na Uniwersytecie Szczecińskim. Promotorem pracy był Prof. dr hab. Mariusz Dąbrowski a promotorem pomocniczym dr Hussain Gohar. Praca ma 169 stron i została napisana w języku angielskim.

W pracy, mgr Fabian Wagner, podejmuje wyzwanie zrozumienia znanych w fenomenologii kwantowej grawitacji modyfikacji relacji nieoznaczoności Heisenberga, jako przejawu krzywizny przestrzeni położeń oraz przestrzeni pędów. Próby geometrycznej interpretacji wspomnianych modyfikacji, były podejmowane wcześniej przez innych badaczy. Zgodnie z moją wiedzą, nie stanowiły one jednak wcześniej tak szeroko zakrojonego programu badawczego, jaki nakreślił i rozwinął w swojej pracy doktorskiej mgr Wagner. Należy podkreślić, że zaprezentowane badania ściśle wpisują się w obecne główne nurty badawcze w obszarze kwantowej grawitacji i stanowią do nich znaczącą kontrybucję. Otrzymane wyniki cechują się oryginalnym oraz szerokim spojrzeniem, co jest szczególnie warte docenienia u młodego badacza. Zaprezentowane wyniki wykazują bardzo dobre zgłębienie tematyki przedmiotu oraz wypracowany solidny warsztat matematyczny. Otrzymane rezultaty stanowią rodzaj unifikacji położeń i pędów modyfikacji zasady nieoznaczoności. Autor, dla wiodących wkładów do modyfikacji, wykazuje bezpośredni ich związek odpowiednio z krzywizną przestrzeni położeń oraz pędów. Co więcej, mgr Wagner wprowadza, dla rozważanego przypadku, konsystentne sformułowanie mechaniki kwantowej. Wyniki te dostarczają nowego, bardziej kompletnego, zrozumienia związku między fizyką na skali Plancka a krzywizną przestrzeni pędów. Zaprezentowane rezultaty, odsłaniają również, wciąż słabo poznaną, dualność między małymi a dużymi skalami i związaną z tym symetrię wzajemności Borna oraz T-dualność. Ponadto, wyniki mgr Wagnera, stanowią silną zachętę do próby sformułowania teorii kwantowej grawitacji w oparciu o krzywiznę przestrzeni fazowej, syntezując tym samym krzywiznę przestrzenną oraz pędową.

Dysertacja została podzielona na dziesięć rozdziałów, oraz trzy dodatki. Ponadto, na uwagę zasługuje obszerna i skrupulatnie przygotowana bibliografia, zawierająca 599 pozycji literaturowych.

W Rozdziale 1, Autor, w sposób klarowny i konkretny dokonuje wprowadzenia do przedmiotu dysertacji. Rozdział ten przywołuje, w szczególności, motywację fizyczną stojącą za przyjęciem minimalnej (długość Plancka) oraz maksymalnej (rozmiary horyzontu kosmologicznego) skali długości dla teorii kwantowych. Wyjaśniona zostaje terminologia stosowana w pracy oraz przedstawiony jest rys historyczny wiodący do aktualnego stanu badań. Całość została bogato uzupełniona odnośnikami literaturowymi.

Rozdział 2, zawiera syntetyczne podsumowanie sformułowania mechaniki kwantowej na przestrzeniach zakrzywionych, wprowadzonego przez DeWitta. Podejście to jest, w dalszej części pracy (Rozdział 9), uogólnianie przez Autora do przypadku z krzywizną przestrzeni pędów, co stanowi jeden z kluczowych wyników pracy.

W kolejnym rozdziale, w sposób dydaktyczny, wprowadzone zostają zmodyfikowane relacje komutacji, będące przedmiotem rozważań dysertacji. Wyjściowo dyskutowane są przypadki GUP (z minimalną długością) oraz EUP (z maksymalną długością). Po czym, uwaga zostaje skoncentrowana na modyfikacjach typu GUP. Jak jednak podkreślono w pracy, przypadek EUP jest analogiczny do GUP i odpowiednie wyniki mogą zostać z łatwością odtworzone. Na tym etapie, nie dyskutowany jest przypadek łączny - GEUP. W rozdziale tym, wyliczona zostaje m.in. odpowiednia modyfikacja równania Schrödingera. Jako przykład zastosowania, przeanalizowany zostaje, w sposób szczegółowy, przypadek z jednowymiarową studnią potencjału o skończonej wysokości. Pozwala to dokonać ograniczenia parametru deformacji, na podstawie rozważań promienia jądra deuteru.

Na kanwie, mających charakter wprowadzający, Rozdziałów 1-3, w Rozdziale 4, Autor dyskutuje wyniki swoich badań, opublikowanych w pracach: Mariusz P. Dąbrowski and Fabian Wagner. "Asymptotic Generalized Extended Uncertainty Principle". In: *Eur. Phys. J. C* **80**, 7 (2020), p. 676, oraz Luciano Petruzziello and Fabian Wagner. "Gravitationally induced uncertainty relations in curved backgrounds", In: *Phys. Rev. D* **103**, 10 (2021), p. 104061. W rozważaniach tych Autor odchodzi o założenia modyfikacji relacji komutacji (i w konsekwencji zasady nieoznaczoności), dyskutowanej w rozdziale 3. Rozwija natomiast koncepcję, którą można uznać, w pewnym sensie, za rozszerzenie ciągu myślowego związanego z przypadkiem EUP, w którym maksymalna skala długości wyznaczona jest przez skalę krzywizny czasoprzestrzeni kosmologicznej (promień Hubble'a). Autor podejmuje próbę uogólnienia tych rozważań do przypadku ogólnej czasoprzestrzeni. Celem jest wyprowadzenie relacji GUP i EUP nie poczynając założeń co do modyfikacji relacji komutacji. Samo podążanie podejściem DeWitta nie prowadzi jednak do modyfikacji zasady nieoznaczoności. Uwzględnienie wpływu krzywizny na relację nieoznaczoności wymaga więc poczynienia dodatkowych założeń. Autor przyjął, rozważaną już wcześniej, hipotezę, że skala krzywizny wyznacza obszar w którym funkcja falowa może przyjmować niezerową wartość. Obszar ten jest zdefiniowany poprzez tzw. kulę geodezyjną (ang. geodesic ball), na powierzchni której, przyjęto, że funkcja falowa znika. Autor bada konsekwencje tego założenia, najpierw dla przypadku płaskiej przestrzeni a następnie, wprowadzając, w sposób perturbacyjny, niezerową krzywiznę przestrzeni pędów. Przeprowadzone obliczenia prowadzą do oryginalnego wyrażenia na zmodyfikowaną postać relacji nieoznaczoności, wyrażoną w funkcji niezmienników krzywizny. Rozdział tej dostarcza niewątpliwie bardzo świeżego spojrzenia, które jest rozwijane w kolejnych Rozdziałach. Moją wątpliwość budzi jednak empiryczną operacyjność definicji promienia kuli geodezyjnej, przez co rozumiem zdolność do jego estymacji w warunkach eksperymentalnych.

W Rozdziale 5, Autor przytacza kolejne wyniki z artykułu Luciano Petruzziello and

Fabian Wagner. “Gravitationally induced uncertainty relations in curved backgrounds”. In: Phys. Rev. D **103**, 10 (2021), p. 104061. Dotyczą one uogólnienia wyników diskutowanych w poprzednim rozdziale do przypadku cząstki relatywistycznej. W tym celu, rozważany jest przypadek masywnej cząstki na metryce, wyrażonej w zmiennych ADM. Pozwala to na dalszą hamiltonowską analizę problemu i wyprowadzenie z poprawką do zasady nieoznaczoności, wynikającą z krzywizny czasoprzestrzennej. Co ciekawe, wiodący wkład do poprawki zadany jest przez gradient funkcji przesunięcia. Autor pozostawia jednak Czytelnika z pewnym niedosytem, nie dokonując dalszej pogłębionej analizy i interpretacji tego wyniku.

W Rozdziale 6, opartym na wynikach pracy Fabian Wagner “Relativistic extended uncertainty principle from spacetime curvature”. In: Phys. Rev. D **105** (Jan. 2022), p. 025005, podjęta zostaje próba skonstruowania kowariantnego uogólnienia wyników z Rozdziału 5. Wynikiem złożonych obliczeń jest propozycja relatywistycznej postaci zasady nieoznaczoności (z wiodącymi poprawkami). Finalnie, Autor dyskutuje subtelności związane z kowariantnym sformułowaniem relacji nieoznaczoności. W mojej ocenie, dyskusja kowariantnego sformułowania relacji nieoznaczoności dla cząstek jest zdecydowanie nietrywialną kwestią. Dlatego też, w szczególności, otrzymany wzór (6.58) powinien zostać poddany dalszym analizom. Szkoda, że w pracy nie zawarto jawnego dowodu kowariancji otrzymanych poprawek. Ponadto, odzyskanie zmodyfikowanej algebry Heisenberga i algebry Poincaré mogłoby rzucić dodatkowe światło na własności symetrii otrzymanej relacji nieoznaczoności. Niewątpliwie, część problemu wynika z cząstkowego a nie teoriopolewego charakteru rozważań, w ramach którego istniałaby możliwość potwierdzenia kowariancji (także w postaci zdeformowanej) poprzez analizę algebry deformacji hiperpowierzchni.

Dysponując przeprowadzoną w rozdziałach wcześniejszych analizą teoretyczną rozważanych modyfikacji zasady nieoznaczoności, w Rozdziale 7, Autor analizuje szerokie spektrum zastosowań. Zaprezentowane wyniki, weszły w skład zarówno przywołanych już publikacji, jak i artykułów Mariusz P. Dąbrowski and Fabian Wagner. “Extended Uncertainty Principle for Rindler and cosmological horizons”. In: Eur. Phys. J. C **79**, 8 (2019), p. 716, oraz Fabian Wagner. “Relativistic extended uncertainty principle from spacetime curvature”. In: Phys. Rev. D **105** (Jan. 2022), p. 025005. Rozważane są zarówno geometrie kosmologiczne, jak i te mające znaczenie astrofizyczne. Autor bada również przypadek dla horyzontu Rindlera oraz dwa przypadki zmodyfikowanych teorii grawitacji. W typowych sytuacjach, rozmaite poprawki mogą zostać zaniedbane. W pracy nie zawarto jednak dyskusji w reżimach wysokokrzywiznowych, takich jak kosmologia wczesnego wszechświata. Ciekawe mogłoby być omówienie tego co otrzymane wyrażenia mówią o sytuacji w której promień Hubble’a zbliża się do długości Plancka.

Rozdział 8, opiera się na wynikach publikacji Fabian Wagner. “Generalized uncertainty principle or curved momentum space?” In: Phys. Rev. D **104**, 12 (Dec. 2021), p. 126010. Autor bada w nim możliwość interpretacji teorii z zakrzywioną przestrzenią w języku modyfikacji relacji nieoznaczoności. W tym celu, rozważa On teorię cząstki nierelatywistycznej, z

kanoniczną postacią algebry Heisenberga, lecz z nieznikającą krzywizną przestrzeni pędów. Dokonując odpowiedniej zmiany zmiennych kanonicznych, pokazuje On, że teoria taka jest równoważna teorii bez krzywizny przestrzeni pędów, lecz ze zmodyfikowaną algebrą Heisenberga. To zaś prowadzi do zmodyfikowanej relacji nieoznaczoności. W oparciu o dostępne dane doświadczalne i obserwacyjne, Autor narzuca ograniczenia na skalar krzywizny przestrzeni pędów oraz na skalar Cartana. Ograniczeniem przedstawionych wyników jest fakt, iż dotyczą one przypadku w którym metryka nie zależy od zmiennych przestrzennych. To wyklucza zaś możliwości zastosowania wyników do przypadku z niekartezjańskimi układami współrzędnych i z krzywizną przestrzenną.

W Rozdziale 9, Autor podejmuje finalnie próbę uogólnienia wcześniejszych rezultatów do przypadku metryki zależnej zarówno od zmiennych przestrzennych, jak i pędowych. Rozdział ten opiera się na preprincie Fabian Wagner. "Towards quantum Mechanics on the curved cotangent bundle". In: (Dec. 2021). arXiv: 2112.06758 [gr-qc]. W rozważaniach, analizowany jest przypadek wiązki kostycznej, dla której istnieje rozkład przestrzeni fazowej na część współrzędnych uogólnionych i pędowych. Należy mieć jednak na uwadze fakt, że nie jest to ogólna własność przestrzeni symplektycznych. Jednakże, takie założenie pozwala przeprowadzić dalsze rozważania w oparciu o rozwinięte wcześniej metody. Autor konstruuje mechanikę kwantową dla cząstki nierelatywistycznej z uwzględnieniem efektów krzywizny przestrzennej i pędowej. Rozważania prowadzone są z wykorzystaniem rozwinięcia metryki względem przypadku płaskiego. Jako przykład zastosowania, rozważane są przypadki izotropowego oscylatora harmonicznego oraz cząstki w potencjale kulombowskim. Jak pokazano, wyliczone, we wiodącym rzędzie, poprawki respektują symetrię wzajemności Borna (ang. Born reciprocity).

Rozdział 10 zawiera podsumowanie otrzymanych wyników oraz konkluzje.

Praca stanowi spójny ciąg rozumowania, zgodny z metodologią pracy naukowej. Rozprawa, rozpoczyna się o szerokiego przeglądu literaturowego oraz postawienia hipotez badawczych. W kolejnym korku, hipotezy te przyjmują precyzyjną matematyczną postać i są przedmiotem badań teoretycznych. Rozważania te mają na celu zarówno skonfrontowanie diskutowanych rozszerzeń z symetriami relatywistycznymi, jak i wyprowadzenie, wynikających z nich, maksymalnie ogólnych przewidywań. Na podstawie otrzymanych wyrażeń teoretycznych, studiowany jest następnie szereg przypadków modelowych. To zaś pozwala na narzucanie więzów empirycznych na studiowane efekty, w oparciu o dostępne dane eksperymentalne i obserwacyjne.

Warto zauważyć, że w pracy rozważono szerokie spektrum koncepcji i modeli, wykazując szeroką wiedzę i zainteresowania Autora. Dojrzałość zaprezentowanych wyników wskazuje zarówno na dużą pomysłowość Autora w formułowaniu problemów badawczych, jak i na doskonały warsztat, pozwalający dane problemy z sukcesem podejmować.

Trzy publikacje jednoautorskie oraz pozostałe cztery z wiodącym wkładem doktoranta, potwierdzają dojrzałość i niezależność Autora w prowadzeniu badań naukowych. Łącznie,

jest On autorem i współautorem 13 publikacji oraz preprintów w bazie INSPIRE HEP, cytowanych 98-krotnie. Jest to bardzo dobry rezultat, jak na obecny etap kariery naukowej.

Warto podkreślić, że w pracy rozważany jest przypadek cząstek. Uogólnienie przeprowadzonego rozumowania do przypadku pól kwantowych - które, jak obecnie rozumiemy, są obiektami fizycznymi pierwotnymi do cząstek - mogłoby stanowić ciekawą kontynuację przeprowadzonych rozważań. W mojej ocenie, brak stosownych odwołań do teorii pól kwantowych oraz dyskusji związanej z ograniczeniami jakie stanowi ograniczenie się do analizy cząstek, stanowi pewien mankament pracy.

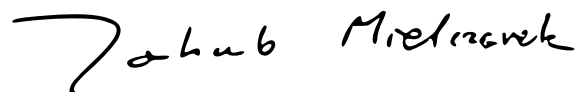
Praca nie podejmuje również dyskusji przypadku ogólnych przestrzeni symplektycznych, ograniczając się do wiązek kostycznych. O ile założenie takie jest wystarczające do analizy modelu cząstki punktowej, to nie może już zostać zastosowane np. do opisu spinu. W pracy zabrakło podkreślenia tych istotnych ograniczeń przeprowadzonych rozważań.

Poza drobnymi literówkami, praca została przygotowana w sposób bardzo staranny. Pracę czyta się bardzo dobrze. Dobrze zbalansowana została jej zawartość, przez co mam na myśli adekwatny udział rozważań czysto technicznych i dygresji.

Podsumowując, stwierdzam, że praca Pana mgr Fabiana Wagnera pt. "Modified uncertainty relations from classical and quantum gravity" spełnia warunki określone w art. 13 ust.1 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (t.j. Dz. U. z 2017r. poz. 1789 w związku z art. 179 ust. 1 i ust. 2 ustawy z dnia 3 lipca 2018r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018r. poz. 1669 z późn. zm.).

Ponadto, ze względu bardzo wysoki poziom i znaczenie zaprezentowanych wyników naukowych oraz wysoką samodzielność w ich otrzymaniu, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr Fabiana Wagnera.

Z poważaniem,



dr hab. Jakub Mielczarek
Instytut Fizyki Teoretycznej
Uniwersytet Jagielloński