

Kraków, 04.01.2024

## Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Andrea Bevilacqua pt. “ $\kappa$ -deformed scalar field”

Praca doktorska Pana mgr Andrea Bevilacqua pt. “ $\kappa$ -deformed scalar field” została przygotowana w Narodowym Centrum Badań Jądrowych. Promotorami pracy byli prof. dr hab. Jerzy Kowalski-Glikman oraz prof. dr hab. Wojciech Wiślicki. Praca ma 150 stron i została napisana w języku angielskim.

W pracy, mgr Andrea Bevilacqua podejmuje zadanie skonstruowania teorii zespolonego pola skalarnego z symetrią  $\kappa$ -Poincaré oraz zbadania wybranych konsekwencji fenomenologicznych takiej teorii. Rozważania te przybierają formę próby zbudowania pomostu pomiędzy fizyką na skali Plancka a fizyką cząstek elementarnych.

O ile konstrukcja teorii pola z symetrią  $\kappa$ -Poincaré jest przedmiotem badań już od około dwudziestu lat, wyniki zaprezentowane w dysertacji podejmują to zagadnienie zarówno w sposób kompleksowy, jak i oparty na nowej strategii teoretycznej, której wyraźną zaletą jest w szczególności łatwość analizy symetrii dyskretnych.

Należy podkreślić, że zawarte w dysertacji rezultaty badań ściśle wpisują się w obecne główne nurty badawcze w obszarze kwantowej grawitacji i stanowią do nich znaczącą kontrybucję. Zaprezentowane wyniki wskazują na bardzo dobre zgłębienie tematyki przedmiotu oraz wypracowany solidny warsztat matematyczny.

Dysertacja została podzielona na trzy rozdziały (zawierające podrozdziały) oraz bibliografię, zawierającą 110 pozycji literaturowych.

W Rozdziale 1, Autor, w sposób klarowny, dokonuje wprowadzenia do przedmiotu dysertacji. Rozdział ten przywołuje, w szczególności, motywację fizyczną stojącą za wprowadzeniem deformacji symetrii przestrzeni Minkowskiego, jako możliwego sposobu manifestowania się fizyki na skali Plancka. Jako wiodący przykład takiej modyfikacji dyskutowany jest przypadek czasoprzestrzeni  $\kappa$ -Minkowskiego. Symetrie tej przestrzeni ujęte są w algebrze generatorów - tzw. algebrze  $\kappa$ -Poincaré.

Co więcej, dyskusja stanów wielocząstkowych wymaga wprowadzenia pojęcia algebry Hopfa. W Rozdziale 1, Autor zaprezentował, związane z tym, pojęcia, niezbędne do zrozumienia dalszej części pracy. Rozdział zakończony jest ciekawą dyskusją przypadku kinematyki dwucząstkowej, obrazującą różnice z przypadkiem niezdeformowanym. Rozważany jest przypadek rozpadu cząstki o masie  $M$  na dwie cząstki o masach  $m$ . Otrzymane są wyniki kinematyczne dla takiego rozpadu w pierwszym rzędzie rozwinięcia w parametrze  $1/\kappa$  (odwrotności skali energii). W wyniku deformacji reguły składania czteropędów, pędy przestrzenne mogą przyjmować różne, co do normy, wartości w trakcie takiego rozpadu. Zaburzony zostaje również rozkład kątowy powstałych, w wyniku rozpadu, cząstek. Autor przywołuje przykładowe rozpady dla których przeprowadzone rozważania mogłyby znaleźć

zastosowanie. Można jednak odnieść wrażenie, że dyskusja ta domaga się rozwinięcia.

W mojej ocenie, wartościowe byłoby przytoczenie dostępnych wyników eksperymentalnych dla przywołanych rozpadów i rozważanie wynikających z nich ograniczeń kinematycznych na parametr  $\kappa$ . Oczywiście, należy się spodziewać, że ograniczenie takie będzie bardzo słabe, pozwoliłoby to jednakże ilościowo zobrazować dystans dzielący nas do badania fizyki na skali Plancka w tym kontekście. Ponadto, szczegółowe rozpisywanie wyrażeń dla zdeformowanych pchnięć stanów dwucząstkowych wydaje się nie odgrywać wiodącej roli do zrozumienia przekazu pracy. W mojej ocenie, właściwsze byłoby ujęcie tych formuł w dodatku.

Rozdział 2, zawiera zasadniczą część dysertacji, dyskutującą teorię zespolonego pola skalarnego na czasoprzestrzeni  $\kappa$ -Minkowskiego. Czytelnik może na wstępie zadać pytanie, dlaczego taki a nie inny wybór przedmiotu rozważań? Autor jednak szybko przechodzi do technicznych aspektów dyskutowanej konstrukcji, nie podając uzasadnienia podejmowanego kierunku. W mojej ocenie, należałoby w tym miejscu, lub jeszcze w Rozdziale 1, załączyć stosowną motywację. Nie wynika to też z treści pracy czy tematyka zespolonego pola skalarnego w przypadku z deformacją  $\kappa$ -Poincaré była dyskutowana we wcześniejszej literaturze. W Rozdziale 1, Autor przywołuje zbiorczą listę prac w których rozważano teorię pola na przestrzeni  $\kappa$ -Minkowskiego, nie odnosząc się jednak do szczegółów tych pozycji, w szczególności do badanych wcześniej typów pól. Dopiero przyglądając się tym publikacjom dochodzimy do wniosku, że dotyczą one rzeczywistych pól skalarnych. O ile zasadniczo przypadek zespolonego pola skalarnego nie różnie się znacząco od przypadku pola rzeczywistego pola skalarnego, wprowadza on jednakże jedną ważną nową cechę. Mianowicie, ładunek, który pozwala rozróżniać cząstki od antycząstek. Rozważania dyskretnej symetrii sprzężenia ładunkowego  $C$ , w kontekście zdeformowanym, stanowią zaś nowatorski przyczynek dysertacji. W mojej ocenie, odpowiednie podkreślenie powyższych kwestii, jak również możliwych zastosowań fizycznych zespolonych pól skalarnych powinno się znaleźć we wstępie do Rozdziału 1 lub 2. W innym przypadku, Czytelnik zmuszony jest do domyślania się znaczenia poczynionego przez Autora wyboru.

W dalszej części Rozdziału 2, Autor przyjął strategię pracy w komutującym układzie współrzędnych, co implikuje możliwość zastosowania mapy Weyla, wprowadzającej iloczyn wewnętrzny  $\star$ . Na tej podstawie, działanie dla zespolonego pola skalarnego zdefiniowane jest poprzez odpowiednie wprowadzenie operacji  $\star$  do niezdeformowanego działania dla takiego pola. W celu wyprowadzenia równań ruchu oraz postaci propagatora pola, Autor wyprowadza wyrażenia zawierające działanie pochodnych czasoprzestrzennych na wyrażenia zawierające iloczyn wewnętrzny  $\star$ . Szczególną uwagę Autor zwraca analizie liniowych kombinacji funkcji modów. Szereg żmudnych obliczeń pozwala Autorowi dokonać wariacji działania i ostatecznie wyprowadzić równania ruchu. Autor przeprowadza również analizę struktury symplektycznej, umożliwiającą m.in. wprowadzenie nawiasów Poissona, znajdujących zastosowanie w kwantowaniu kanonicznym.

Znajomość struktury symplektycznej pomaga również Autorowi wyprowadzić wyrażenia

na ładunki/generatory związane z symetriasmi ciągłymi, po czym weryfikuje On spełnienie przez nie algebry Poincaré (która dla wybranych zmiennych pozostaje niezmodyfikowana). Ciekawa obserwacja poczyniona przez Autora dotyczy pchnięć. Mianowicie, zastosowanie pchnięcia do stanu jednocząstkowego pola różni się od wyniku wykreowania cząstki z wcześniej odpowiednio pchniętego stanu próżni. Istotnie nowym krokiem poczynionym w rozdziale drugim jest wykazanie niekomutowania (w odróżnieniu do przypadku niezdeformowanego) generatora symetrii sprzężenia ładunkowego  $C$  z pchnięciem, tj.  $[\mathcal{N}_i, C] \neq 0$ . Jest to, niewątpliwie, jeden z najważniejszych wyników dysertacji.

Zgodnie z twierdzeniem Greenberga, złamanie symetrii CPT jest równoważne złamaniu symetrii Lorentza. W rozważanym przypadku, Autor wykazuje spełnienie symetrii CPT przez działanie dla  $\kappa$ -zdeformowanego pola zespolonego. Jednakże, zaobserwowane niekomutowanie generatorów symetrii ciągłych (pchnięcia) z generatorami symetrii dyskretnych (sprzężenie ładunkowe) może skutkować niespełnieniem założeń stojących za twierdzeniem Greenberga. Autor poddaje tę kwestię dyskusji, wskazując możliwe kontrprzykłady dla twierdzenia Greenberga, co stanowi bardzo ciekawy i oryginalny element przedstawionej dyskusji.

Rozdział drugi zwieńczony jest dyskusją możliwych konsekwencji empirycznych. Rozważany jest rozpad niestabilnych cząstek i zależność czasu życia stanu niestabilnego dla przypadku  $\kappa$ -zdeformowanego. Jak wykazano, we wiodącym wkładzie rozwinięcia w  $1/\kappa$ , czas rozpadu nie rozróżnia pomiędzy cząstką a antycząstką. Dla typowych wartości parametrów, oczekiwana poprawka od  $\kappa$ -deformacji jest na poziomie  $10^{-19}$ , co jest niezwykle praktycznie niemożliwe do zmierzenia.

Rozdział 3, zawiera dyskusję propagatora dla pola skalarnego wprowadzonego w Rozdziale 2. Uwaga Autora skupiona jest na przypadku propagatora Feynmana. Wyjściowo, rozważania przeprowadzone są dla przypadku pola swobodnego. Przypadek ten jest następnie rozszerzony, poprzez uwzględnienie członu oddziaływania postaci  $g\psi\frac{\phi^2}{2}$ . W celu otrzymania poprawki 1-pętlowej zastosowana została standardowa technika renormalizacji wymiarowej. Rozdział zwieńczony jest podsumowaniem otrzymanych wyników oraz konkluzjami.

Dobrze widzianym zwieńczeniem prac jest wskazanie na przyszłe możliwe kierunki rozwojowe wynikające z otrzymanych wyników, czego niestety zabrakło w ocenianej pracy. Czytelnikowi mogą się nasunąć np. takie pytania jak:

- Czy Autor dostrzega możliwość występowania procesów w których efekty  $\kappa$ -deformacji będą istotnie silniejsze niż w rozpatrzonych przypadkach?
- Jakich różnic możemy się spodziewać w przypadku z samoodziaływaniem pola?
- Czy przeprowadzając rozszerzenie do przypadku multipletu zespolonych pól skalarnych, Autor spodziewa się dodatkowych trudności wynikających z  $\kappa$ -deformacji? (Co może mieć znaczenie w kontekście bozonu Higgsa)
- W jaki sposób  $\kappa$ -deformacja wpływa na energię stanu próżni pola?

- Jak rysuje się możliwość uogólnienia rozważań poza czasoprzestrzeń  $(\kappa-)$ Minkowskiego do przypadku czasoprzestrzeni zakrzywionych (np. de Sittera)?
- Czy Autor zauważa jakąś korzyść, od strony renormalizacji pola, wynikającą z  $\kappa$ -deformacji?

Podsumowując, praca stanowi spójny ciąg rozumowania, zgodny z metodologią pracy naukowej. Rozprawa, rozpoczyna się od przeglądu literaturowego oraz motywacji, choć zawierającej pewne braki wskazane powyżej (w szczególności, brak wyraźnie postawionej hipotezy badawczej). Wyniki pracy wypełniają brakujący obszar we wcześniejszych badaniach i mają charakter eksploracyjny. Podjęty kierunek został poddany systematycznej analizie, w ramach metod klasycznej i kwantowej teorii pola oraz teorii algebr Hopfa. Na podstawie przeprowadzonych rozważań teoretycznych, Autor podjął próbę konfrontacji otrzymanych przewidywań z wybranymi danymi doświadczalnymi, głównie czasami rozpadu. To pozwoliło na narzucanie więzów empirycznych na parametr deformacji  $\kappa$ .

Praca zawiera zarówno wyniki nowe jak i już opublikowane w dwóch publikacjach:

- A. Bevilacqua, J. Kowalski-Glikman and W. Wislicki, “ $\kappa$ -deformed complex scalar field: Conserved charges, symmetries, and their impact on physical observables,” Phys. Rev. D **105** (2022) no.10, 105004,
- M. Arzano, A. Bevilacqua, J. Kowalski-Glikman, G. Rosati and J. Unger, “ $\kappa$ -deformed complex fields and discrete symmetries,” Phys. Rev. D **103** (2021) no.10, 106015,

oraz w jednym preprincie:

- A. Bevilacqua, J. Kowalski-Glikman and W. Wiślicki, “Finite  $\kappa$ -deformed two-particle boost,” [arXiv:2305.09180 [hep-th]].

Prace te, na podstawie bazy INSPIRE HEP, zostały, jak dotąd, cytowane łącznie 29 razy. Ponadto, Pan mgr Andrea Bevilacqua jest Autorem i współautorem trzech publikacji konferencyjnych oraz jednego preprintu, związanego z tematyką rozprawy doktorskiej. Jest to wynik spełniający zwyczajowe oczekiwania stawiane przed kandydatem do stopnia doktora w dziedzinie nauk fizycznych.

Poza drobnymi literówkami, praca została przygotowana w sposób bardzo staranny. Pracę czyta się bardzo dobrze i spełnia przyjęte standardy przyjęte dla tego typu prac. Co ważne, uwzględnienie wielu szczegółowych obliczeń, podwyższa dydaktyczną wartość dysertacji. Można liczyć na to, że stanie się ona cenną pomocą dla n owych pokoleń adeptów eksploracji fizyki na skali Plancka.

Zaprezentowane wyniki, w otrzymaniu których Pan mgr Andrea Bevilacqua miał wiodący udział, potwierdzają dojrzałość naukową doktoranta.

Podsumowując, stwierdzam, że praca Pana mgr Andrea Bevilacqua pt. “ $\kappa$ -deformed scalar field” spełnia warunki określone w Art. 186 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r - Prawo o

szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz. 1668).

Z poważaniem,

A handwritten signature in black ink, reading "Jakub Mielczarek". The signature is written in a cursive style with a large initial 'J'.

dr hab. Jakub Mielczarek, prof. UJ  
Instytut Fizyki Teoretycznej  
Uniwersytet Jagielloński