Recenzja pracy zatytułowanej

Quantum groups and asymptotic symmetries

przedłożonej przez pana magistra

Josua Unger

jako rozprawa doktorska.

Rozprawa ma 156 stron, składa się na nią sześć rozdziałów, dwa załączniki, abstrakt i bibliografia. Rozdziały 1-3 są wprowadzeniem do tematyki pracy. Rozdział 4 oparty jest na trzech publikacjach:

A. Borowiec, L. Brocki, J. Kowalski-Glikman and **J. Unger**, "κ-deformed BMS symmetry," Phys. Lett. B 790 (2019), 415-420 doi:10.1016/j.physletb.2019.01.063 [arXiv:1811.05360 [hep-th]],

A. Borowiec, L. Brocki, J. Kowalski-Glikman and **J. Unger**, "BMS algebras in 4 and 3 dimensions, their quantum deformations and duals," JHEP 02 (2021), 084 doi:10.1007/JHEP02(2021)084 [arXiv:2010.10224 [hep-th]],

A. Borowiec, J. Kowalski-Glikman and **J. Unger**, "3-dimensional Λ-BMS Symmetry and its Deformations," [arXiv:2106.12874 [hep-th]].

Szczegóły techniczne tych wyników, wyprowadzenia i matematyczne dowody, zostały przedstawione i zanalizowane w załacznikach A oraz B. Rozdział 5 zawiera autorskie propozycje zastosowań wyników, w tym dyskusję ich potencjalnego znaczenia dla fizyki. Podsumowanie rezultatów pracy zawarte zostało w rozdziale 6.

Tematem rozprawy są kwantowe deformacje symetrii klasycznej czasoprzestrzeni. Punktem wyjścia są dwa składniki: deformacje symetrii przestrzeni Minkowskiego oraz symetrie asymptotyczne czasoprzestrzeni zakrzywionej. Celem pracy jest uogólnienie tych pierwszych, czyli deformacji kwantowych, do tych drugich, czyli symetrii asymptotycznej geometrii czasoprzestrzeni. Symetrie są ważnym narzędziem współczesnej fizyki teoretycznej. Odkrycie transformacji Lorentza i Poincarego jako symetrii teorii Maxwella doprowadziło do powstania szczególnej teorii względności. Postulat niezmienniczości ze względu na ogólne transformacje układu współrzędnych naprowadził Einsteina i innych na trop poprawnego sformułowania ogólnej teorii względności. Postulat niezmienniczości ze względu na transformacje Poincarego leży też u podstaw kwantowej teorii pola. Poszukujemy teorii kwantowej niezmienniczej ze względu na symetrie ogólnej teorii względności. Teoria grup kwantowych robi krok w innym, nowym kierunku. Zakłada ona, że symetrie klasyczne są jedynie przybliżeniem ogólniejszej struktury zwanej grupą kwantową. To zrozumiałe skądinąt przypuszczenie realizowane w ten konkretny sposób niesie za sobą dalsze bardzo ważne konsekwencje. Klasyczna czasoprzestrzeń Minkowskiego jest reprezentacją grupy Poincarego. Geometria czasoprzestrzeni Minkowskiego jawi się jako struktura zachowywana przez symetrie. Jeśli grupa Poincarego miałaby zostać zastąpiona grupą kwantową, wiązałoby się to z zastąpieniem geometrii odpowiednio zmienioną strukturą, którą możemy nazwać geometrią kwantową. Kwantową deformację grupy Poincarego (na poziomie algebry) znaleźli J Lukierski, H Ruegg, A Nowicki oraz VN Tolstoy, jest ona dziś znana jako kappa-deformacja. W kolejnych pracach J. Kowalskiego-Glikmana i S. Majida skonstruowano reprezentację dla kappa-deformacji algebry Poincarego. Ma ona interpretację zdeformowanej czasoprzestrzeni Minkowskiego nazywanej dzisiaj przestrzenią kappa-Minkowskiego. Na podstawie jej własności stworzono podwójnie szczególną teorię względności, jest ona dziedziną dla nowej zdeformowanej kwantowej teorii pola. Wzorowane na konstrukcji algebry kappa-Poincarego i czasoprzestrzeni kappa-Minkowskiego powstają liczne modele kwantowych czasoprzestrzeni: kwantowa czasoprzestrzeń de Sittera, kwantowe czasoprzestrzenie kosmologiczne. Przy użyciu kwantowych czasoprzestrzeni konstruuje się kwantowe modele opisujące pola materii i grawitację. Potencjalnie obserwowalnym efektem kwantowej deformacji czasoprzestrzeni byłaby dyspersja cząstek gamma i neutrin, być może także fal grawitacyjnych. Drugim wyjściowym składnikiem rozprawy doktorskiej są symetrie asymptotyczne czasoprzestrzeni klasycznej. Naiwnie możnaby przypuszczać, że z daleka od źródeł pola grawitacyjnego i przy zaniedbaniu stałej grawitacyjnej asymptotyczną grupą symetrii będzie grupa Poincarego, tak samo, jak dla czasoprzestrzeni płaskiej. Od dawna jednak wiadomo, że symetrie czasoprzestrzeni asymptotycznie płaskiej tworzą nieskończenie wielo wymiarową grupę BMS (Bondi, Metzner, Sachs 1962), która dopuszcza nieskończenie wiele zanurzeń grupy Poincarego. Jedynie podgrupę translacji można zidentyfikować jednoznacznie. Uzupełnia ją nieskończenie wielowymiarowa grupa supertranslacji. Generatory obrotów i pchnięć definiowalne są jedynie z dokładnością do dowolnych supertranslacji. Grupa BMS i związana z nią zerowa struktura czasoprzestrzeni asymptotycznie płaskiej są podstawowymi narzędziami teorii promieniowania, w tym fal grawitacyjnych. Pozwalają na całkowicie ścisły, nieperturbacyjny opis tych zjawisk oraz towarzyszących im strumieni energii, pędu oraz momentu pędu. Ważną własnością jest tutaj dodatniość strumienia energii. W obecności dodatniej stałej kosmologicznej asymptotyka czasoprzestrzeni ulega zmianie. Najogólniejsza grupa symetrii składa się z dowolnych dyfeomorfizmów trójwymiarowego brzegu konforemnego uzwarcenia czasoprzestrzeni oraz dowolnych lokalnych przeskalowań indukowanego tensora metrycznego. Brzeg ma chakter przestrzenny, co utrudnia wyodrębnienie ewolucji czasowej. Inną trudnością jest nieokreslonosć znaku promieniowanej energii. Czasem wprowadza się dodatkowa strukturę, która upodabnia asymptotyczny brzeg czasoprzestrzeni z dodatnią stałą kosmologiczną do brzegu czasoprzestrzeni asymptotycznie płaskiej. Podobny jest przypadek z ujemną stałą kosmologiczną, przy czym brzeg asymptotyczny ma charakter czasoprzestrzenny, co ułatwia opis dynamiki. W literaturze często rozważane też są też zabawkowe modele czasoprzestrzeni o zmniejszonej liczbie wymiarów. I w tych przypadkach struktura asymptotyczna czasoprzestrzeni jest podobna, posiada swoje grupy BMS.

W świetle przytoczonych powyżej faktów zadanie postawione w recenzowanej rozprawie można sformułować jako uogólnienie kwantowej deformacji grupy symetrii czasoprzestrzeni płaskiej - problemu rozwiązanego juz w literaturze - na przypadek grupy symetrii czasoprzestrzeni *asymptotycznie* płaskiej. Pomysł ten jest doskonały biorąc pod uwagę (teoretyczne) sukcesy kappa-deformacji oraz wagę symetrii BMS w ogólnej teorii wzgledności - aż dziw, że nikt nie zrobił tego wcześniej. Kappa-deformacja symetrii BMS została przeprowadzona poprzez uogólnienie świetlnej (zerowej) algebry Hopfa kappa-Poincarego, czyli kappa-deformacji algebry Hopfa symetrii Poincarego. Ougólnienie było możliwe dzieki temu, że algebra BMS zawiera algebrę Poincarego jako podalgebrę, a deformacja podalgebry jest rozszerzalna do całej zawierającej ją algebry. Zbadana została struktura zdeformowanej algebry BMS dla wymiarów czasoprzestrzeni 3 oraz 4. Scharakteryzowano też zależność rozszerzenia od wyboru podalgebry izomorficznej z algebrą Poincarego. Ponieważ nierównoważnych zanurzeń algebry Poincarego w algebrze BMS jest nieskończenie wiele, deformacja i rozszerzenie mogą prowadzić do nieskończenie wielu różnych nowych zdeformowanych algebr BMS. Zbadano różne typy deformacji przez skręcenie. Przeanalizowano różne typy niekomutatywnych czasoprzestrzeni wyłaniających się ze zdeformowanych algebr Hopfa. Wyniki te zostały zawarte w rozdziale 4 rozprawy. Na zdeformowanych algebrach BMS zdefiowano struktury bialgebry i zbadano związane z nimi grupy kohomologii. Szczegóły techniczne tych wyników zostały zawarte w załącznikach A oraz B. W rozprawie podjęto też próbę zastosowania własności zdeformowanych symetrii BMS i odpowiadających im nieprzemiennych czasoprzestrzeni do przewidywań potencjalnych konsekwencji fenomenologicznych. Najważniejszym skutkiem kwantowej deformacji czasoprzestrzeni byłaby dyspersja w propagacji czastek bezmasowych (foton, neutrino). Przedyskutowano też znaczenie nowych nieprzemiennych deformacji czasoprzestrzeni dla problemu utraty informacji w czarnej dziurze oraz miękkich włosów i innych miękkich obiektów definiowanych na horyzoncie czarnej dziury oraz asymptotycznym brzegu czasoprzestrzeni.

Pewną wartość posiadają także rozdziały wstępne pracy, czyli Rozdzial 2 i 3. Zawierają one bardzo dobre wprowadzenie do wykorzystywanych w pracy teorii grup kwantowych i symetrii asymptotycznych struktur czasoprzestrzeni. Wprowadzony materiał jest znany w literaturze specjalistycznej, jednak takiego całościowego sformułowania nie byłoby łatwo znaleźć w podręcznikach. Ten rozbudowany i techniczny wstęp niewątpliwie dodatkowo podnosi wartość pracy. Mam jednak wątpliwości w jakim sensie wzór (3.59) jest ogólną postacią metryki, skoro jedynym stopniem swobody jest w nim wartość stałej kosmologicznej. Trochę poważniejszym zarzutem mogłoby być zwrócenie uwagi na bezkrytyczny stosunek autora do przyjmowanych wersji grup BMS. W przypadku asymptotycznie płaskim i cztero-wymiarowym przyjęto grupę BMS zawierającą super rotacje, czyli wszystkie lokalne konforemne transformacje płaszczyzny niekoniecznie zdefiniowane na całej sferze niebieskiej. W ten sposób sześcio-wymiarowa grupa Lorenza zastąpiona została grupą nieskończenie-wymiarową. Drugi przypadek, to przyjęta za Compere i Fiorucci wersja grupy symetrii BMS dla cztero-wymiarowej czasoprzestrzeni w przypadku dodatniej stałej kosmologicznej. Mająca w tamtym przypadku miejsce redukcja grupy wszystkich dyfeomorfizmów do tych przypominających BMS przestrzeni asymptotycznie płaskiej uzyskana jest dzięki wprowadzeniu dodatkowej foliacji, której wyróżnienie byłoby trudne do uzasadnienia. Rozumiem jednak, że celem rozprawy była deformacja dostępnych w literaturze klasycznych symetrii, a nie ocena zasadności ich definicji.

Podsumowując wysoko oceniam zawartość merytoryczną i formę rozprawy, z przyjemnością dopuszczam ją do obrony, podczas której chciałbym zadać doktorantowi nastepujące pytania:

1) W jaki sposób własności klasycznej algebry BMS asymptotycznie płaskiej cztero-wymiarowej czasoprzestrzeni istotne dla fizycznych pojęć energii, pędu i momentu pędu przenoszą się na zdeformowaną algebrę BMS.

2) Jaki uzyskanoby wynik deformacji, gdyby w przypadku czasoprzestrzeni asymptotycznie de Sittera i cztero-wymiarowej przyjęto algebrę BMS zawierającą jako podalgebrę wszystkie generatory dyfeomorfizmów trój-wymiarowego asymptotycznego brzegu czasoprzestrzeni?

Prof. dr hab. Jerzy Lewandowski