

Kraków, 24 VIII 2023

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Tomasza Linowskiego pt. "Reduced state of the field and classicality of symplectic time evolution"

Uwagi wstępne

Recenzowana rozprawa napisana jest w języku angielskim i składa się ze zbioru trzech opublikowanych artykułów naukowych, dodatkowo omówionych na 31 stronach. Omówienie to składa się z czterech krótkich rozdziałów: wstępu do tematyki pracy, streszczenia używanego formalizmu matematycznego, omówienia oryginalnych wyników uzyskanych przez Autora rozprawy, i wreszcie dyskusji o otwartych problemach na przyszłość. Artykuły naukowe składające się na rozprawę zostały opublikowane w renomowanych czasopismach naukowych (w szczególności dwa w piśmie o wysokiej nocie ministerialnej 140 punktów):

1. T. Linowski, A. Teretenkov, Ł. Rudnicki
Dissipative evolution of quantum Gaussian states
Physical Review A **106**, 052206 (2022)
DOI: 10.1103/PhysRevA.106.052206.
2. T. Linowski, Ł. Rudnicki
Reduced state of the field and classicality of quantum Gaussian evolution
Physical Review A **106**, 062204 (2022)
DOI: 10.1103/PhysRevA.106.062204
3. T. Linowski, Ł. Rudnicki
Classicality of the Bogoliubov transformations and the dynamical Casimir effect through the reduced state of the field
Acta Physica Polonica A **143**, S95 (2023)
DOI: 10.12693/APhysPolA.143.S95

Należy także nadmienić, że poza powyższymi pracami, Autor rozprawy podczas swoich studiów doktorskich opublikowała także cztery inne prace (trzy razy po 140 i raz 100 punktów ministerialnych) oraz dwa pre-prints w dziedzinie informacji kwantowej i optyki kwantowej.

Przedmiot rozprawy i jej wartość naukowa

Głównym celem recenzowanej rozprawy jest rozwinięcie teoretycznego opisu klasycyzacji w fizyce kwantowej. W szczególności, wykorzystując nowatorski opis zredukowanego stanu pola, Autor bada klasycz-

ność ewolucji symplektycznej (oraz jej szczególnego przypadku – transformacji Bogoliubowa), która jest najczęściej używanym modelem ewolucji czasowej w optyce kwantowej. W wyniku tego, Autor uzyskuje ściśle warunki matematyczne na klasyczność ewolucji symplektycznej, interpretuje je fizycznie, a także wykorzystuje je by rzucić nowe światło na dynamiczny efekt Casimira.

W Artykule 1 Autor zajmuje się najpierw samą strukturą lindbladowskiej ewolucji symplektycznej, która modeluje eksperymentalne operacje w optyce kwantowej. Zbiór takich operacji symplektycznych ograniczony jest do operacji mapujących gaussowskie stany pola w gaussowskie stany pola. Inspirując się pracami z dziedziny teorii zasobów, w której rozpatruje się kwantowe stany gaussowskie (czyli kombinacje wypukłe stanów gaussowskich), i zauważając, że takie stany mapowane są same w siebie przez lindbladowską ewolucję symplektyczną, Autor proponuje rozszerzenie pojęcia lindbladowskiej ewolucji symplektycznej na taką, która mapuje kwantowe stany gaussowskie same w siebie. Propozycję tę uważam za bardzo dobrze trafioną, co świadczy o intuicji fizycznej Autora. Jest ona także porządnie uzasadniona, ponieważ wprowadzone dzięki temu rozszerzeniu operacje mają naturalną interpretację fizyczną. Jak Autor pokazuje w swoim artykule, wprowadzone operacje opisują ewolucję dyssypacyjną wynikającą np. z rozpraszania losowego lub kontrolowanej dyssypacji (która może być wykorzystywana do produkcji splątania). Moim zdaniem Artykuł 1 stanowi znaczący wkład Autora w rozwój optyki kwantowej: praca jest przede wszystkim bardzo dobra pod względem koncepcyjnym, ale także od strony technicznej Autor wykazał się niemalą sprawnością, dzięki czemu jego argumenty są mocno poparte rygorystycznym rozumowaniem matematycznym.

Uzupełniwszy opis lindbladowskiej ewolucji symplektycznej o brakujący komponent dyssypacyjny w Artykule 1, Autor w Artykule 2 jest gotowy do zajęcia się głównym celem rozprawy, tj. wyróżnieniem wśród wszystkich ewolucji symplektycznych tych, które można uznać za klasyczne. W tym celu, Autor najpierw analizuje niedawno wprowadzony mezoskopowy model służący do opisu wielociałowych układów bozonowych, znany jako zredukowany opis pola. W szczególności, Autor pokazuje, że model ten opisuje tylko podzbiór ewolucji symplektycznych (i stanów gaussowskich), do tego podzbiór, który nie zawiera żadnej informacji na temat dwucząstkowego splątania. Jak zatem Autor wnioskuje, podzbiór stanów i operacji uchwyconych przez zredukowany opis pola przejawia cechy klasyczności. Aby dodatkowo wzmocnić ten argument, Autor pokazuje, że w formalizmie zredukowanego opisu pola kwantowa entropia von Neumana stanu i jego klasyczna entropia Wehrla są sobie niemal równe. Argumenty te są dla mnie jak najbardziej przekonujące i świadczą zarówno o przenikliwości Autora, jak i jego bardzo dobrym zrozumieniu pojęć klasyczności i kwantowości we współczesnej fizyce. Co więcej, Autor pokazuje następnie, że te operacje symplektyczne, które według jego warunku uznaje za klasyczne (tj. te, które uchwycone są w pełni przez zredukowany opis pola), odpowiadają dokładnie (1-do-1) optycznym operacjom pasywnym. Są to operacje, które zachowują energię i które mają swoje jasne klasyczne odpowiedniki, takie jak płytki fazowe czy dzielniki wiązek. Podsumowując, w Artykule 2 Autor, opierając się na najnowszych badaniach, wprowadza nowy, bardzo dobrze uargumentowany, podział na zjawiska klasyczne i kwantowe w optyce kwantowej; a zatem według mnie Artykuł 2 prezentuje istotny wkład Autora do badań nad zjawiskiem klasyczności w optyce kwantowej.

W Artykule 3 Autor skupia się na klasyczności szczególnego przypadku ewolucji symplektycznej zadanej przez transformację Bogoliubowa. Korzystając z formalizmu stworzonego w Artykule 2, Autor znajduje dokładne warunki matematyczne określające, kiedy transformację Bogoliubowa można uznać za klasyczną, zarówno dla układu zamkniętego (izolowanego), jak i dla układu otwartego. W pierwszym wypadku uzyskano warunki wystarczające i konieczne, w drugim zaś tylko konieczne. Jednak przy dodatkowym założeniu, iż układ otwarty początkowo nie jest skorelowany z otoczeniem, a otoczenie to początkowo znajduje się w stanie próżni, Autor był w stanie wyprowadzić warunek wystarczający i konieczny także dla układu otwartego. To dodatkowe założenie jest w szczególności spełnione przy analizie dynamicznego efektu Casimira, dlatego też uzyskane wyniki matematyczne posłużyły Autorowi do analizy klasyczności tego zjawiska. Tu Autor pokazał, iż z perspektywy układu zamkniętego efekt ten musi być uznany za w pełni kwantowy, jednak patrząc na niego z perspektywy układu otwartego można w nim wyróżnić klasyczny charakter (co, jak przekonywująco argumentuje Autor, nie prowadzi do sprzeczności). Choć Artykuł 3 w porównaniu do pozostałych dwóch artykułów nie ma już w sobie takiej oryginalności (dlatego, że korzysta z obserwacji i wyników uzyskanych w Artykule 1 i 2), to jednak wykorzystanie tworzonego formalizmu do analizy klasyczności dynamicznego efektu Casimira rzuca na niego nowe światło, a zatem można uznać Artykuł 3 za niepomijalny wkład Autora w rozwój dziedziny.

Uwagi krytyczne

Przy tak dobrej jakości pracy trudno o poważne uwagi krytyczne. Jedynym pojęcjalnym zarzutem jaki można mieć wobec rozprawy (który jednak nie wpływa na jej wartość merytoryczną) jest to, że omówienie trzech artykułów Autora mogłoby być nieco obszerniejsze, zwłaszcza w części wstępnej i tej dotyczącej formalizmu matematycznego. O ile bowiem dla fachowca omówienie to jest wystarczające do szybkiego zrozumienia wyników zawartych w artykułach, o tyle dla osoby bez podstaw optyki kwantowej może to stanowić problem. Dlatego też kilka dodatkowych stron opisujących podstawy optyki kwantowej (np. skąd się biorą operatory kreacji i anihilacji w modach z równań Maxwella) mogłoby znacząco zwiększyć grono czytelników tej bardzo dobrej rozprawy.

Ocena końcowa

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy bardzo istotnego, zarówno od strony fundamentalnej jak i praktycznej, tematu klasyczności w fizyce kwantowej. Wybór trzech artykułów składających się na zbiór prezentowany w rozprawie (spośród dziewięciu napisanych przez Autora podczas doktoratu) jest bardzo trafny, dzięki czemu tworzą one spójny jednotematyczny cykl, a nie zbiór luźno połączonych artykułów. We wszystkich tych artykułach Autor jest pierwszym autorem, a jego wiodącą rolę w badaniach jasno podkreślają oświadczenia współautorów. Postawione sobie cele badawcze Autor zrealizował wyśmienicie, wykorzystując przy tym sprawnie zaawansowane metody optyki i informacji kwantowej do

rozwiązania postawionych sobie problemów badawczych, a także wykazując się intuicją fizyczną i przenikliwością. Wartość naukową rozprawy uważam za bardzo dobrą i jestem pewien, że uzyskane przez Autora wyniki będą wykorzystywane w przyszłości przez innych badaczy. Poza wartością naukową rozprawy, należy także podkreślić jej styl, który jest na światowym poziomie. Językowo nie mam nic do zarzucenia (co jest niemal niespotykane przy ponad 60 stronach tekstu), wywody są bardzo klarowne i spójne, a omówienie prac skondensowane w najlepszy możliwy sposób (tj. zwięzłe i zrozumiałe).

Całokształt pracy, a więc wstęp oraz bardzo porządnie przygotowane omówienie wyników, a także trzy bardzo wysokiej jakości artykuły, świadczą o dogłębnej wiedzy Autora w zakresie optyki kwantowej oraz o jego świetnych umiejętnościach badawczych. Podsumowując, oceniam recenzowaną rozprawę doktorską jako bardzo dobrze spełniającą wszelkie wymogi stawiane tego typu pracom.

Ja, niżej podpisany stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska mgra Tomasza Linowskiego spełnia wymogi ustawowe stawiane pracom doktorskim w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne, i wnioskuję o przyjęcie jej przez Radę Dyscypliny Nauki fizyczne Uniwersytetu Gdańskiego, oraz o dopuszczenie do publicznej obrony.



Dr hab. Kamil Korzekwa