



Centrum Fizyki Teoretycznej

Polskiej Akademii Nauk

Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa

Tel. (+48 22) 847 09 20, Fax/Tel: (+48 22) 843 13 69

Email: cft@cft.edu.pl

NIP 525-000-92-81

REGON 000844815

Dr hab. Jarosław Korbicz
Centrum Fizyki Teoretycznej PAN
02-668 Warszawa

Warszawa, 12.09.2024

Recenzja pracy doktorskiej mgr-a Konrada Schlichtholza

„Non-classicality of bosonic fields in states of
undefined particle numbers”

Przedstawiona rozprawa doktorska to zbiór czterech pierwszoautorskich publikacji, opatrzonej 30-to stronicowym wstępem. Prace opublikowane zostały w wysoko-punktowanych pismach New J. Phys. oraz Scientific Reports. Wstęp napisany jest w języku angielskim, dobrą angielszczyzną i co najważniejsze wskazuje, że Kandydat bardzo dobrze opanował zarówno aparat pojęciowy jak i techniczny podejmowanego tematu.

Główny temat badań Kandydata to nieklasyczość stanów kwantowego, nierelatywistycznego pola bozonowego (np. pola optycznego czy masowego pola bozonowego). W pracach [PhD1], [PhD2], badane są nierówności Bella (w postaci ważnej nierówności CHSH) oraz kontekstualność (a la Peres-Mermin-Cabello). Prace opierają się na zaproponowaniu nowych, ulepszonych operatorów typu Stockes'a. Najważniejsze osiągnięcia tych prac to: i) otwarcie możliwości badania nieklasyczości stanów o nieokreślonej liczbie wzbudzeń, w tym stanów „makroskopowych” o dużej średniej ilości wzbudzeń; Autorzy badają dla przykładu jasne stany ściśnięte (BSV) jak i egzotyczne stany sześciomodowe - jasne stany GHZ (BGHZ). ii) uporządkowanie pewnego mętlika wokół nierówności Bella dla pól poprzez wyłuskanie istotnych cech połowych odpowiedników macierzy Pauliego (np. odpowiednie spektrum i relacje antykomutacji), kosztem cech mniej istotnych (np. kowariancji). Co ciekawe, operatory z [PhD1] są w zasadzie mierzalne i ma nadzieję zobaczyć doświadczenie oparte na tej pracy. Warte zauważenia jest, że przy okazji pomysłu na ulepszone operatory Stockes'a cytowana jest praca magisterska Kandydata (pozycja [19] w [PhD1]). Sugeruje to, że prace [PhD1], [PhD2] to rozpracowanie młodzieńczych pomysłów Kandydata, czemu można tylko przyklasnąć. Dwa pytania co do [PhD1]:

1) Rys. 1b) sugeruje, że za łamanie nierówności CHSH odpowiedzialny jest człon próżniowy. Jeśli tak to dlaczego tak jest pomimo odjęcia rzutu na próżnię? Czy oznacza to, że próżnia elektromagnetyczna jest mocno nieklasyczna? Czy ma to związek ze starą pracą np. B. Reznika „Entanglement from vacuum”, Found.Phys. 33 (2003) 167-176 ?

2) Czy wykres 1a) był robiony dla mniejszych wartości obciążenia $n < 150$ by potwierdzić czy nagły spadek łamania CHSH powyżej ~ 2.16 jest faktycznie artefaktem obciążenia?

Kulminacją tego kierunku badań jest praca [PhD3], w której dowiedziono twierdzenia Gisina dla pól kwantowych. Autorzy pokazują że dla dowolnego czystego splątanego (modowo) stanu pola istnieje odpowiednia nierówność Bella (w postaci nierówności Clausera-Horna) łamana przez ten stan. Crux pracy to budowa pomysłowego izomorfizmu pozwalającego przepisać zagadnienie dla pól kwantowych na równoważne w abstrakcyjnej, dwuciałowej przestrzeni Hilberta oraz wykorzystanie konstrukcji Gisina a następnie powrót do wyjściowej przestrzeni. Otrzymane w ten sposób twierdzenie stanowi

bardzo ważne uogólnienie twierdzenia Gisina z co najmniej dwóch powodów: i) jest sformułowane w najbardziej fundamentalnym języku jaki mamy czyli języku pól kwantowych co pokazuje jego uniwersalny charakter; ii) mówi sporo o samym kwantowym polu bozonowym – dowolne jego splątanie (modowe) wyklucza lokalne zmienne ukryte, więc nie ma tu „okna” przez które można przemycić opis klasyczny (pomijając ew. efekty grawitacyjne jak zauważają Autorzy we wnioskach końcowych). Sama konstrukcja dowodu jest gesta, intensywna i bardzo zaawansowana koncepcyjnie co tylko podwyższa wartość pracy. Mam tu następujące pytanie:

3) Czy przy pomocy skonstruowanego izomorfizmu można poprzemycić inne rezultaty z teorii nieklasyczności, np. badane wcześniej nierówności kontekstualne, świadków splątania, etc? Tzn. czy można powtórzyć wyniki [PhD2]?

Ostatnia praca z cyklu [PhD4] podchodzi do zagadnienia nieklasyczności pól od innej strony. Poświęcona jest poszukiwaniu minimalnego, w sensie ilości parametrów, formalizmu do opisu splątania. W przeciwieństwie do poprzednich prac, podejście jest tym razem w pełni dynamiczne. Bazując na wcześniejszych pracach Gdańskiej grupy, Autorzy wprowadzają tzw. rozszerzony formalizm stanu zredukowanego i badają jego ewolucję i to w fizycznym scenariuszu oddziaływania ze środowiskiem (badane są równania typu Master). Choć formalizm nie jest tak elegancki jak w poprzednich pracach, np. wymaga wprowadzania pomocniczych tensorów by domknąć ewolucję, jak również działa w ograniczonym zakresie, gdyż daje warunek dostateczny splątania, to jednak pozwala uzyskać ciekawe wyniki. Np. wykrywa splątanie stanów BSV dla dowolnej jasności opisuje, na ile może, dynamikę występowania splątania przy oddziaływaniu z kąpielą termiczną czy pokazuje związek statystyki sub-Poissonowskiej ze splątaniem.

Podsumowując, rozprawa pokazuje szeroką wiedzę i doświadczenie Kandydata. Bada nieklasyczność pól zarówno od strony nierówności Bella jak i ewolucji otwartej typu master. Tematyka rozprawy jest jak najbardziej aktualna i istotna, zwłaszcza część poświęcona nieklasyczności Bellowskiej w świetle nagrody Nobla z fizyki za 2022r. przyznanej właśnie za pionierskie badania nierówności Bella. Ich rolę i potencjał poznawczo czy technologiczny dopiero zaczynamy odkrywać. Przedstawione w rozprawie uogólnienia na bozonowe pola kwantowe zarówno pomagają uporządkować wiedzę nt Bellowskiej nieklasyczności tych pól w stanach o nieokreślonej, w tym makroskopowej, liczbie wzbudzeń, jak i być może przyczynią się do opracowania nowych możliwości jej wykorzystania. W związku z bozonowym charakterem pól nasuwa się naiwne pytanie:

4) Czy i jak przedstawione rezultaty mogą przenieść się na pola fermionowe?

Należy podkreślić, że wszystkie przedstawione prace starają się rozwinąć i na ile to możliwe wyczerpać temat. Prace są obszernie, wysoce nietrywialne zarówno technicznie jak i koncepcyjnie i z obszernymi załącznikami, co tylko wzmacnia odczucie solidnie wykonanej pracy i sporego wysiłku. Oprócz prac wchodzących do rozprawy doktorskiej, Kandydat jest również współautorem sześciu innych publikacji oraz wniosku patentowego z zakresu kwantowych generatorów liczb losowych. W większości tych prac Kandydat jest pierwszym autorem a publikacje ukazały się w renomowanych pismach, np. Phys. Rev. A czy New J. Phys. Jest to imponujący dorobek, którego należy Kandydatowi pogratulować.

Na podstawie powyższych argumentów, stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska stanowi istotny i niebanalny wkład w zarówno w teorię pól kwantowych jak i nierówności typu Bella. Spełnia ona również z dużą nawiązką ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane pracom doktorskim. Jestem przekonany, że Kandydat jest gotów do samodzielnego prowadzenia badań naukowych na bardzo wysokim poziomie. Wnoszę więc o dopuszczenie mgr-a Konrada Schlichtholza do dalszego etapu przewodu doktorskiego. Wnioskuje również o wyróżnienie rozprawy na podstawie doniosłego charakteru wyników oraz bogatego dorobku Kandydata.