

2019 -02- 14 JB.ül.

dr hab. Jan Chwedeńczuk
Katedra Optyki Kwantowej i Fizyki Atomowej
Instytut Fizyki Teoretycznej
Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski
ul. Pasteura 5, 02 093 Warszawa
tel. 22 55 32 922
jan.chwedenczuk@fuw.edu.pl

Warszawa, 14. lutego 2019

Recenzja rozprawy habilitacyjnej dr. Krzysztofa Pawłowskiego oraz ocena Jego dorobku

Pan Krzysztof Pawłowski otrzymał tytuł magistra nauk fizycznych na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w 2008 roku. Jego promotorem był prof. Marek Trippenbach, zaś praca magisterska – rozwijająca półklasyczne metody modelowania dynamiki kondensatu Bosego Einsteina – została uznana za najlepszą pracę magisterską roku na Wydziale Fizyki UW.

Od 2008 roku Habilitant zatrudniony jest na stanowisku adiunkta w Centrum Fizyki Teoretycznej Polskiej Akademii Nauk (CFT PAN). Ponadto, w 2011 roku Pan Krzysztof Pawłowski piastował stanowisko asystenta na Uniwersytecie w Stuttgarcie.

W 2012 roku Pan Krzysztof Pawłowski otrzymał stopień doktora nauk fizycznych na Uniwersytecie Kardynała Stefana Wyszyńskiego (UKSW). Promotorem jego pracy był autorytet w dziedzinie optyki kwantowej i fizyki zimnych gazów kwantowych – prof. Kazimierz Rzążewski.

Następnie, w 2012 roku dr Pawłowski przez cztery miesiące odbywał staż podoktorski na Uniwersytecie w Stuttgarcie. Kolejny staż, składający się z dwóch etapów finansowanych przez CNRS oraz IFRAF odpowiednio w latach 2012 2013 i 2013 2014, miał miejsce w Laboratoire Kastler Brossel w Paryżu. Od kiedy wrócił do Polski, dr Pawłowski kontynuuje pracę w CFT PAN.

Formalny opis rozprawy habilitacyjnej—Na rozprawę habilitacyjną będącą przedmiotem tej recenzji składa się dziewięć prac tworzących cykl “Powstawanie atomowych stanów splątanych na skutek nieliniowości typu Kerra”. Prace te ukazały się w międzynarodowych czasopismach o uznanej renomie, takich jak *Physical Review A* (7 prac), *Euro Physics Letters* (1 praca) oraz *The European Physical Journal B* (1 praca).

Publikacje wchodzące do cyklu są wynikiem szerokiej międzynarodowej współpracy z prądującymi przedstawicielami takich dziedzin, jak interferometria fal materii i fizyka ultra zimnych gazów atomowych. Należy tu przede wszystkim wymienić takie osobistości jak: Alice Sinatra, Philipp Treutlein, Jérôme Estève czy Jakob Reichel. Wkład Habilitanta w powstanie wszystkich powyższych publikacji był wysoki i wyniósł od 33% do 80%. Doktor Krzysztof Pawłowski jest pierwszym autorem w trzech pracach i drugim w pozostałych sześciu.

Dyskusja wyników przedstawionych w rozprawie habilitacyjnej—Niniejsza rozprawa habilitacyjna składa się z prac, które zgłębiają fundamentalne zagadnienia mechaniki kwantowej i interferometrii fal materii w dwu aspektach – to jest powstawania nieklasycznych stanów w układach wielu cząstek oraz wpływu nań, mających różnorakie podłoża, procesów utraty spójności.

Głównym mechanizmem prowadzącym do powstania nieklasycznych stanów materii, rozważanym w pracach [H1 H9], jest atomowy analogon optycznego zjawiska Kerra. W układach optycznych zjawisko Kerra jest wynikiem nieliniowej odpowiedzi ośrodka, w którym propaguje się wiązka światła, zaś w układach atomowych to oddziaływanie – bezpośrednie, czyli dwuciałowe, bądź pośrednie, będące wynikiem oddziaływania gazu ze światłem we wnęce rezonansowej – prowadzi do zjawisk nieliniowych (w znaczeniu drugiej kwantyzacji), co z kolei skutkuje w powstawaniu stanów splątanych wielu cząstek. W skrócie, Habilitant badał proces powstawania takich stanów, następnie ich podatność na zaburzenia oraz użyteczność jako stanów wejściowych w interferometriach atomowych bądź jako próbników egzotycznych kwantowych zjawisk takich jak paradoks EPR (akronim pochodzi od nazwisk Einstein, Podolsky i Rosen). Zreferuję teraz pokrótce treść dziewięciu prac tworzących cykl "Powstawanie atomowych stanów splątanych na skutek nieliniowości typu Kerra".

- [H1] Zbadano metrologiczne zastosowania gazu Bosego o całkowitym spinie $F = 1$ i makroskopowej magnetyzacji w obecności jednorodnego pola magnetycznego. W szczególności wykazano, że układ taki, o ile znajduje się w równowadze termodynamicznej, pozwala na osiągnięcie skalowania Heisenberga, czyli takiej zależności precyzji $\Delta\theta$ estymacji parametru θ od liczby cząstek N , gdy $\Delta\theta \propto \frac{1}{N}$ (co stanowi znaczące zwiększenie precyzji względem skalowania charakterystycznego dla szumu śrutowego, gdy $\Delta\theta \propto \frac{1}{\sqrt{N}}$). Ponadto, praca argumentuje, że wynik ten jest osiągalny zarówno w fazie ferromagnetycznej, jak i anty ferromagnetycznej. Autorzy zbadali również, jaki jest wpływ fluktuacji pola magnetycznego na czułość $\Delta\theta$. Praca ta ilustruje, że nawet złożone układy wielociałowe mogą być użyteczne w zagadnieniach metrologicznych.

- [H2] Stosunkowo niedawna praca, z 2017 roku, do której obliczenia prowadził student pod opieką Habilitanta. Praca bada ewolucję dwu oddziałujących makroskopowych spinów w obecności strat cząstek. Taki model z jednej strony uwzględnia splątanie się podukładów w trakcie ewolucji, z drugiej strony bada wpływ utraty spójności na skutek wspomnianego powyżej procesu. Publikacja pokazuje, jak w układzie powstają i są niszczone kwantowe korelacje, ze szczególnym naciskiem na możliwą obserwację zjawiska EPR, mierzonego współczynnikiem sterowalności (z angielskiego *steering coefficient*). Autorzy argumentują, że te ogólne rozważania znajdują zastosowanie w opisie pary dwumodowych, oddziałujących kondensatów Bosego Einsteina. Mając na uwadze najnowsze osiągnięcia grupy doświadczalnej Philippa Treutleina, z którym Habilitant ma udokumentowaną współpracę, wyniki przedstawione w tej pracy są szczególnie ważne.

- [H3] Kolejna praca odwołująca się do doświadczeń grupy Philippa Treutleina i obserwacji zjawiska EPR w kondensatach Bosego Einsteina. Praca bada w sposób szczegółowy i systematyczny przebieg takiego doświadczenia, uwzględniając wielomodową strukturę każdego z kondensatów. W ten sposób można uwzględnić wzbudzenia do wyższych energetycznie stanów w pułapkach harmonicznym, które to wzbudzenia są konsekwencją zmiany potencjałów pułapkujących. Wykazano, że mimo bogatej wielomodowej struktury, w realistycznym układzie dwu kondensatów można zaobserwować zjawisko EPR.

- [H4] Praca badająca powstawanie silnie splątanych stanów (*à la* “kot Schrödingera”) w dwumodowych kondensatach Bosego Einsteina. O znaczeniu pracy decyduje uwzględnienie dwóch mechanizmów prowadzących do utraty spójności: strat cząstek i statystycznych fluktuacji całkowitej liczby cząstek (to znaczy uwzględnienia, że liczba cząstek w układzie nie jest ustalona). Rozważono zagadnienie wielomodowe, biorąc pod uwagę wzbudzenia termiczne wynikające z niezerowej temperatury układu oraz przedyskutowano wyniki w kontekście metrologii kwantowej.

- [H5] Praca badająca powstawanie silnie splątanych stanów w dwumodowych kondensatach Bosego Einsteina w ramach dynamiki “dwuosiovej” – to jest takiej, gdy Hamiltonian układu jest sumą kwadratów dwu prostopadłych składowych całkowitego momentu pędu. Dynamika taka w ogólności jest niezwykle złożona – w odróżnieniu od prostszego zagadnienia jednoosiovej – stąd wszelkie rozważania teoretyczne są utrudnione. Niemniej Autorom udało się znaleźć prosty model, oparty na przybliżeniu półklasycznym, który obrazuje jak w układzie powstają wielociałowe stany splątane. Praca, korzystając z takich narzędzi teoretycznych jak informacja Fishera, dyskutuje zastosowanie tych stanów w układach metrologicznych.

- [H6] Publikacja powstała we współpracy z przodującymi specjalistami z dziedziny metrologii fal materii. Praca pokazuje, jak powstają wielociałowe stany splątane w wyniku oddziaływania efektywnie dwumodowego (to jest po adiabaticznej eliminacji trzeciego stanu) kondensatu Bosego Einsteina z jednym modem światła we wnętrzu rezonansowej. Praca w szczególności skupia się na badaniu tego, jak bardzo można ścisnąć (czyli jak bardzo można zredukować fluktuacje pewnej wielkości fizycznej przy zachowaniu wysokiej spójności układu) początkowo niesplątany stan atomów w wyniku oddziaływania światła z gazem kwantowym. Atutem pracy jest to, że Autorzy wykonali obliczenia dla realistycznych parametrów doświadczalnych oraz wzięli pod uwagę proces utraty spójności na skutek emisji spontanicznej (to jest niespójnej względem modu światła we wnętrzu).

- [H7] Kolejna praca będąca rezultatem międzynarodowej współpracy Habilitanta. Autorzy badają wpływ strat jedno-, dwu- i trzy-ciałowych na proces powstawania stanów splątanych w dwumodowym kondensacie Bosego Einsteina oddziałujących atomów. Korzystając ze ścisłych metod diagonalizacji równania “master”, praca pokazuje, jaki jest wpływ strat na przydatność takich stanów na potrzeby interferometrii atomowej.

- [H8] Publikacja – będąca wynikiem współpracy z grupą doświadczalną prof. Philippa Treutleina – poświęcona badaniu powstawania stanów typu EPR w parze dwumodowych kondensatów Bosego Einsteina. Praca pokazuje, że zderzenia dwuciałowe w każdym z kondensatów oraz “na krzyż”, czyli między atomami z dwu kondensatów, prowadzą do powstania zarówno stanów splątanych lokalnie (w każdej ze studni potencjału), czyli przydatnych dla potrzeb metrologicznych, jak i stanów splątanych właśnie “na krzyż”, czego świadkiem jest parametr sterowania EPR. Silną stroną opracowania, i pochodną współpracy z grupą doświadczalną, jest przeprowadzenie obliczeń dla realistycznego zestawu parametrów, co zwiększa szansę na zastosowanie opisywanego schematu w laboratorium.

- [H9] Ostatnia praca cyklu, również poświęcona badaniu stanów typu “kot Schrödingera” w układzie N oddziałujących bozonowych spinów. Praca uwzględnia wpływ utraty spójności na skutek strat cząstek, szczególnie biorąc pod uwagę potencjalną przydatność układu na potrzeby interferometrii atomowej.

Ocena pracy habilitacyjnej: podsumowanie—Podsumowując, dziewięć prac wchodzących w cykl “Powstawanie

atomowych stanów splątanych na skutek nieliniowości typu Kerra” tworzy spójną całość i stanowi o wysokim poziomie zaawansowania Habilitanta w dziedzinie metrologii fal materii. Ponadto, Pan Krzysztof Pawłowski wykazał, że nieobce mu są subtelne rozważania na temat fundamentów teorii kwantów, czego dowodzi – będący bardzo na czasie – cykl prac poświęconych badaniu paradoksu EPR w kondensatach Bosego Einsteina. Autor wykazał się samodzielnością i dojrzałością, o czym stanowi praca [H2], która powstała pod jego opieką, lecz do której *gros* obliczeń wykonał młody student. Wart podkreślenia jest wysiłek, jaki Pan Krzysztof Pawłowski włożył w to, by jego badania brały pod uwagę realistyczne warunki doświadczalne, poprzez uwzględnienie procesów utraty spójności, pochodzących z wielu źródeł. Wszystkie prace ukazały się w czasopiśmie o wysokiej renomie i można się spodziewać, że będą miały istotny wkład w planowanie przyszłych doświadczeń w dziedzinie metrologii kwantowej, ale też w badaniach fundamentów mechaniki kwantowej.

Ocena całkowitego dorobku—Na całkowity dorobek Habilitanta składa się 22 prac i jedna monografia. Tworzą one spójny obraz wieloletnich badań nad zjawiskami w zimnych gazach atomowych. Szczególny nacisk Pan Krzysztof Pawłowski położył na uwzględnienie zjawisk dekoherencji (to jest utraty spójności) i ich wpływu na zanik efektów kwantowych w układach wielociałowych. Już w trakcie doktoratu był współautorem trzech prac poświęconych różnym aspektom dekoherencji gazów kwantowych.

W kolejnych latach rozwijał narzędzia teoretyczne, które pozwoliły na uwzględnienie zjawisk termicznych w gazach atomowych (5 prac). Ponadto Autor dał dowód swojej wszechstronności, badając efekty dipolowe (to jest pochodzące od długozasięgowego oddziaływania między atomami będącego konsekwencją ich niezerowego momentu dipolowego). Na ten cykl składają się cztery prace. Całkowita liczba cytowań to 148, zaś indeks Hirscha wynosi 8. Biorąc pod uwagę szeroką współpracę międzynarodową i dużą liczbę prac opublikowanych w wiodących czasopiśmie, bardzo wysoko oceniam całkowity dorobek Habilitanta.

Ocena dorobku dydaktycznego, organizacyjnego i popularyzatorskiego—Habilitant wykazał się znacznym doświadczeniem dydaktycznym, organizacyjnym i popularyzatorskim. Kierował dwoma projektami badawczymi, był wykonawcą w kolejnych czterech. Otrzymał trzy nagrody: za recenzowanie do czasopisma *Journal of Physics B*, za pracę magisterską oraz za najlepszy plakat konferencyjny. Wygłosił 10 referatów na międzynarodowych konferencjach, brał czynny udział w licznych seminariach. Ponadto opublikował dwa artykuły popularyzatorskie w czasopiśmie *Delta*. Prowadził ćwiczenia z fizyki i matematyki na UKSW. Był opiekunem wielu stażystów, wypromował jednego licencjata, jest promotorem pomocniczym pracy doktorskiej.

Biorąc pod uwagę powyższe osiągnięcia, bardzo wysoko oceniam dorobek dydaktyczny, organizacyjny i popularyzatorski Habilitanta.

Podsumowanie i wniosek końcowy—Podsumowując osiągnięcia Habilitanta uważam, że wartość omawianej rozprawy habilitacyjnej i całkowitego dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego dr. Krzysztofa Pawłowskiego spełniają warunki określone przez Ustawę o tytułach i stopniach naukowych i wnoszę o dopuszczenie Kandydata do dalszych etapów postępowania habilitacyjnego.

Jan Chwedeńczuk

