

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr Małgorzaty Mochol-Grzelak zatytułowanej
„Efekty topologiczne i sztuczne pola
cechowania w zimnych gazach atomowych”.**

Przedmiotem rozprawy doktorskiej Pani mgr Małgorzaty Mochol-Grzelak pod tytułem „Efekty topologiczne i sztuczne pola cechowania w zimnych gazach atomowych” są zjawiska fizyczne występujące w fizyce zimnych gazów atomowych, w których występują efekty topologiczne. Praca została napisana w języku polskim pod opieką profesora dr hab. Krzysztofa Sachy na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej w Instytucie Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego w Uniwersytecie Jagiellońskim. Temat pracy jest bardzo aktualny i ciekawy, a praca zawiera nowe, oryginalne wyniki opublikowane już w dwóch pracach w Physical Review A oraz z Scientific Reports. Kolejne prace zostały wysłane do recenzji.

Rozprawa doktorska zatytułowana „Efekty topologiczne i sztuczne pola cechowania w zimnych gazach atomowych” zawiera rozważania dotyczące trzech zagadnień fizycznych: (1) lokalizacji (Andersona) ciemnego solitonu w zewnętrznym potencjale przypadkowym, (2) generacji syntetycznego pola magnetycznego w chmurze zimnych atomów (kondensatu i chmury termicznej) przy zastosowaniu elektromagnetycznej fali zanikającej, która powstaje w wyniku całkowitego wewnętrznego odbicia w pryzmacie, (3) generacji kwantowego efektu Halla w siatkach optycznych w czterech wymiarach. Wspólnym mianownikiem tych trzech zagadnień są efekty topologiczne. Są to pewne generyczne własności układów, które pozwalają podzielić różne zagadnienia fizyczne na pewne klasy równoważności. W pracy są rozważane różne obiekty (klasy) poczynając od najprostszego, jednowymiarowego solitonu, następnie dwuwymiarowe wiry, kończąc na kwantowym efekcie Halla.

Badania mają charakter podstawowy. Już na wstępie pragnę zaznaczyć, że prezentowany materiał wystarczyłby w moim mniemaniu z powodzeniem na co najmniej dwa doktoraty. Jest ten materiał bardzo obszerny i bogaty, ale z konieczności niektóre części są opisane dosyć skrótowo i technicznie. Dotyczy to w szczególności ostatniego rozdziału, w którym opisany jest kwantowy efekt Halla. Został on potraktowany bardzo bardzo kompaktowo (nie znaczy to, że nie ściśle) i studiowanie go, jako osobie z niewielkim w tym zakresie doświadczeniem, stanowiło dla mnie nie lada wyzwanie.

Pani Małgorzata Mochol-Grzelak włożyła w badania oraz w przygotowanie rozprawy z pewnością bardzo wiele pracy. Jej część została wykonana w Instytucie Nauk Fotonicznych w Barcelonie w grupie profesora Lewensteina. Autorka uzyskała środki finansowe na prowadzenie badań zawartych w rozprawie doktorskiej z Narodowego Centrum Nauki w ramach finansowania stypendium doktorskiego ETIUDA oraz projektu PRELUDIUM. Świadczy to niezbicie o tym, że osiągnęła ona nie tylko wysoki poziom wykształcenia w

zakresie szeroko pojętej teorii pola, optyki kwantowej oraz teorii zimnych atomów. Ale również okazała duża skuteczność w zdobywaniu zewnętrznego finansowania. Miałem okazję słuchać kilku referatów pani magister Małgorzaty Mochol-Grzelak, między innymi na konferencjach z serii „Quantum Technologies Conference” i do wyżej wymienionych talentów doktorantki mogę z pewnością dodać jeszcze umiejętność przejrzystej prezentacji wyników badań. Podsumowując, moim zdaniem jest ona w pełni przygotowana do przejścia do kolejnego, bardziej samodzielnego etapu rozwoju jej kariery naukowej.

Przyjrzyjmy się teraz szczegółowo samej rozprawie. Składa się ona z czterech rozdziałów, podsumowania i obszernej bibliografii.

Rozdział pierwszy tradycyjnie stanowi wprowadzenie do zagadnień fizycznych rozważanych w dysertacji. Wprowadzone zostały podstawowe pojęcia dotyczące teorii zimnych atomów, kondensacji w przybliżeniu średniego pola, przybliżenie Thomasa Fermiego, wzbudzenia Bogoliubova, a następnie przechodzimy do zagadnień topologicznych (nie wiem czy hasło zjawiska topologiczne jest już powszechnie przyjęte), definicji izomorfizmu i homotopii, defektów topologicznych, wraz z przykładami (solitony, wiry) odnoszącymi się do treści pracy. Najwięcej uwagi poświęcono w końcu tego rozdziału zjawisku efektu Halla, który został zaprezentowany w ujęciu klasycznym i kwantowym. Dodam jeszcze, że na początku każdego rozdziału dodano szczegółowe wprowadzenie dotyczące konkretnie materiału tam zawartego, każdy też rozdział jest zakończony zwięzłym podsumowaniem.

Rozdział 2. Został zatytułowany „Ciemny soliton w potencjale przypadkowym”, a jego motywem przewodnim jest wykazanie występowania lokalizacji Andersona ciemnego solitonu w obecności nieporządku (potencjału przypadkowego) oraz wyznaczenie czasu życia stanów zlokalizowanych. Rozdział ten rozpoczyna się prezentacją wyników uzyskanych jeszcze podczas przygotowywania przez doktorantkę jej pracy magisterskiej, której promotorem był również profesor Sacha. Praca ta była kontynuowana w trakcie studiów doktoranckich, w szczególności rozszerzona o przypadek potencjału przypadkowego i problem lokalizacji. Badano deformację ciemnych solitonów pod wpływem zaburzeń, korzystając z teorii Bogoliubova oraz rozkładu na mody w potencjale Poschl-Tellera. W celu zbadania zjawiska lokalizacji wprowadzono opis kwantowy (wychodzący poza opis pola średniego) i wykorzystano doświadczenie z badań lokalizacji jasnego solitonu w potencjale przypadkowym. Ze względu na sprzężenie pomiędzy stopniem swobody związanym z położeniem solitonu z podukładem kwazicząstek zlokalizowane stany mogą rozpadać się poprzez emisję fononu. Obliczono czas życia stanów zlokalizowanych korzystając ze złotej reguły Fermiego i stwierdzono, że dla danych liczbowych odpowiadających typowym danym doświadczalnym czas rozpadu powinien wynosić od kilku do kilkunastu minut. W rezultacie stwierdzono, że powinna być możliwa jest eksperymentalna obserwacja lokalizacji ciemnego solitonu.

Rozdział 3. zatytułowany „Sztuczne pola cechowania w zimnych gazach atomowych” przedstawia nam metodę generacji „syntetycznego” pola magnetycznego przy pomocy elektromagnetycznej fali zanikającej, która powstaje w wyniku całkowitego wewnętrznego odbicia w pryzmacie. Zaprezentowano tu wyniki analityczne oraz wyniki symulacji numerycznych. W rozdziale przedstawiono również propozycja eksperymentu z niezdegenerowanymi zimnymi gazami atomowymi.

W niniejszym rozdziale dosyć szczegółowo udokumentowano całe rozumowanie prowadzące do pojawiania się potencjałów wektorowych, starując z modelu

dwupoziomowego i stosując obraz atomów ubranych. Opisano adiabaticzny ruch atomów i podano warunki, jakie są konieczne na to, aby przybliżenie adiabaticzne było spełnione. Następnie wprowadzono pojęcie fazy Berrego i pokazano, że efektywny hamiltonian ma postać analogiczną z hamiltonianem opisującym oddziaływanie z polem magnetycznym. Następnie zaproponowano konkretną realizację fizyczną przy zastosowaniu fali zanikającej na powierzchni pryzmatu. Opis został skonstruowany najpierw dla fali płaskiej, a następnie dla bardziej realistycznej paczki gaussowskiej. Zastosowanie fali płaskiej pozwala uzyskać analityczne rozwiązania oraz przeprowadzić wstępną analizę zarówno pola, jak i jego wpływu na chmurę ultrazimnych atomów. Okazuje się jednak, że do otrzymania optymalnych pól potrzebne są wiązki padające pod kątem bliskim kątowni granicznemu dla całkowitego wewnętrznego odbicia. W związku z tym konieczne jest wzięcie pod uwagę rzeczywistego gaussowskiego profilu wiązki laserowej. W przypadku kondensatu Bosego Einsteina pokazano pojawianie się wirów w polu średnim, będących sygnaturą sztucznego pola magnetycznego. Ponadto zaproponowano układ będący swoistym lustrem dla zimnych gazów atomowych, aby obecność sztucznego pola magnetycznego mogła być obserwowana w eksperymentach z zimnymi gazami atomowymi w fazie termicznej, a nie kondensacie, które są dużo łatwiejsze z perspektywy doświadczalnej implementacji. Należy wówczas zamiast rozwiązywać równia na pole średnie, obserwować pojedyncze trajektorie, następnie je uśredniając. Wszystko to było robione pod kątem przeprowadzenia konkretnego eksperymentu, który potencjalnie mógłby być wykonany „in house” przez grupę doświadczalną Zakładu Optyki Atomowej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie, prowadzoną przez dra Tomasza Kawalca.

W Rozdziale czwartym, zatytułowanym „Kwantowy efekt Halla w 4D” opisano metodę eksperymentalnej realizacji kwantowego efektu Halla używając „rzeczywistych” wymiarów przestrzennych, które można osiągnąć poprzez odpowiednią inżynierię sieci optycznej. Przedstawiono efektywny algorytm wyznaczania drugiej liczby Cherna - niezmiennika topologicznego charakteryzującego topologiczne fazy w czterech wymiarach. Ponadto zaprezentowano szkic eksperymentalnej realizacji najprostszego topologicznego izolatora z udziałem zimnych gazów atomowych umieszczonych w trójwymiarowej sieci Bravais. W każdym z oczek sieci zaproponowano umieszczenie pięciopunktowej bazy. Konstrukcja sieci z bazą (w obrębie tego samego układu eksperymentalnego) wymaga użycia wiązek laserowych o wyższych harmonicznych, aby „nadrukować” na sieć kubiczną dodatkową strukturę. Te badania nie zostały jeszcze ukończone (jest to opinia powstała na podstawie lektury rozprawy – być może od czasu jej spisania pojawiły się nowe wyniki), ale szkic pomysłu wygląda interesująco.

Całość materiału stanowi spójną i ciekawą prezentację i jest napisana przejrzysto i z dbałością zarówno o szczegóły teoretyczne jak i kontekst doświadczalny. Autorka pisząc tę rozprawę wykazała się zrozumieniem opisywanych zjawisk. Bardzo wysoko oceniam merytoryczną stronę prezentowanych wyników. Część z nich została już pozytywnie oceniona przez recenzentów w *Physical Review A* i *Scientific Reports*, a z pewnością i ostatnia część dotycząca kwantowego efektu Halla zostanie niedługo opublikowana. Strona językowa jest także bez zarzutu. Pracę czyta się dobrze, problemy i rozwiązania sformułowane są klarownie i spójnie. Autorka wykazała się sprawnością w używaniu języka teorii pola, optyki kwantowej, teorii Bogolibova a nawet w ostatnim rozdziale, języka geometrii różniczkowej. W tym pewien udział miał z pewnością promotor. Ale część pracy została wykonana w ICFO, w grupie profesora Lewensteina, wraz z kilkoma młodymi kolegami. Poza tym doktorantka wykonała sprawnie wiele obliczeń numerycznych, a w tym promotor jej z pewnością nie pomógł. Ogólnie zatem skłaniam się ku stwierdzeniu, że pani magister Małgorzata Mochol-

Grzelak zbudowała bardzo wyrafinowany i cenny w dalszych badaniach warsztat pracy, który powinien procentować w dalszych etapach kariery naukowej.

Jestem pod wrażeniem redakcji przedstawionej mi do oceny dysertacji, autorce nie udało się jednak uniknąć kilku usterek formalnych. Przytoczę tu kilka z nich dla przykładu, dodając, że nie jest ich zbyt wiele. Autorka w całej pracy używa słowa „sekcja”, tam gdzie ma na myśli paragraf, lub podrozdział, wprowadza przybliżenie długiej fali (przybliżenie dipolowe), padają też stwierdzenia „Zimne atomy są układami o ogromnych możliwościach manipulacji”, oraz „Potencjał wektorowy A związany jest z fazą Berry’ego, ... wynikającą z ruchu adiabaticznego atomu oraz nietrywialnej geometrii przestrzeni parametrów”. Mówi również o „izotropowych amplitudach tunelowań, ... pozbawione zostały indeksów sieciowych”, ale tunelowanie w kierunku x i y pozostają różne. Nie rozumiem też stwierdzenia „ $\varphi = p/q$, gdzie p i q są relatywnie pierwsze, a więc nie posiadają wspólnych dzielników oprócz jednośc”. Moim zdaniem w ułamku wspólne podzielniki się skracają! Jest też kilka usterek formalnych, np. we wzorze 4.1.9 powinno być kx , a x pojawia się jako subskrypt. Jeszcze raz pragnę jednak zaznaczyć, że tych usterek nie jest zbyt wiele, i może nawet powinno się przyjąć, że statystycznie rzecz ujmując, powinny się one pojawić.

Stwierdzam, że rozprawa Pani mgr Małgorzaty Mochol-Grzelak spełnia wszelkie wymagania stawiane pracom doktorskim z dziedziny fizyki.

Wnoszę o dopuszczenie kandydatki do dalszych etapów obrony pracy doktorskiej. Dodatkowo zgłaszam wnioszek o wyróżnienie.

Uzasadnienie wyróżnienia.

Uważam, że na wyróżnienie zasługuje opracowanie metody wytwarzania sztucznego pola magnetycznego blisko powierzchni dielektrycznej, wykorzystując zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia. W tym zjawisku powstają fale zanikające (evanescent waves) i o ile atomy poruszają się odpowiednio wolno, tak aby można było zastosować przybliżenie adiabaticzne, odczuwają one, obecność fazy Berregego, w postaci potencjału wektorowego, analogicznego do potencjału pola magnetycznego. W wyniku rozważań analitycznych oraz obliczeń numerycznych wykazano, że zjawiska te pojawiają się nawet dla odpowiednio silnie schłodzonej chmury termicznej. Moim zdaniem te wyniki mogą stać się inspiracją dla rzeczywistych eksperymentów, w których zostaną urzeczywistnione symulatory kwantowe.

Marek Trippenbach

