



## Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Anny Przysiężnej „On engineering topological effects in ultracold atoms”

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska pani mgr Anny Przysiężnej pod tytułem „On engineering topological effects in ultracold atoms” została zrealizowana w Instytucie Fizyki Teoretycznej i Astrofizyki na Wydziale Matematyki, Fizyki i Informatyki Uniwersytetu Gdańskiego. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. Paweł Horodecki z Katedry Fizyki Teoretycznej i Informatyki Kwantowej na Wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Gdańskiej, natomiast kopromotorem jest dr Omjyoti Dutta z ICFO Institute of Photonic Sciences w Barcelonie.

**Rozprawa** łączy niezwykle istotne obszary współczesnej fizyki – efekty topologiczne w materii skondensowanej, układy zimnych atomów i sieci optyczne. Zagadnienia podjęte w rozprawie należą do wyjątkowo konkurencyjnego obszaru badań, zarówno ze względu na ich uniwersalność, bogactwo koncepcji sformułowanych w kilku ostatnich dekadach (pierwotnie do opisu stanów kwantowego zjawiska Halla), jak i zładną prostotą układów identycznych cząstek w prostych sieciach, umożliwiającą jednoczesną realizację eksperymentalną oraz stosowanie i testowanie modeli i metod analitycznych i numerycznych mechaniki kwantowej wielu ciał. Ważne w tym kontekście są również nadzieje na mniej lub bardziej odległe praktyczne zastosowania nanotechnologiczne. Jednym z wielkich wyzwań współczesnej nauki jest na przykład realizacja idei komputera kwantowego, której konsekwencje cywilizacyjne trudno nawet w tej chwili ocenić, ale ze względu na znaczenie przetwarzania informacji trudno wykluczyć, że mogłyby stanowić przełom na miarę wynalezienia mowy, pisma, druku, radia czy też internetu. I w tym właśnie fascynującym obszarze nauki umieszczam badania opisane w niniejszej rozprawie.

**Tematem** niniejszej rozprawy jest inżynieria stanów topologicznych materii kwantowej w sieciach o prostej geometrii, z wykorzystaniem kierunkowego tunelowania między wzbudzonymi orbitalami o złamanej symetrii sferycznej. Przeanalizowano dokładnie dwa mechanizmy obsadzenia tych orbitali: przyciągające oddziaływanie kontaktowe na węzle oraz „potrząsanie” sieci.

**Najważniejsze rezultaty** rozprawy przedstawiono wcześniej w serii pięciu artykułów naukowych, opublikowanych (wspólnie z innymi autorami) w latach 2014 oraz 2015 w wiodących czasopismach fizycznych: Physical Review A (3), New Journal of Physics oraz Scientific Reports.

**Struktura** przedłożonej rozprawy jest następująca. Zawiera ona 167 stron, spis treści, streszczenie, wprowadzenie w tematykę badań, opis metod badawczych i oryginalnych rezultatów, wnioski oraz jednolity spis cytowanej literatury obejmujący aż 300 pozycji, w tym zarówno te już klasyczne dla tego obszaru badań jak i prace najbardziej aktualne. Rozprawę podzielono logicznie na 10 rozdziałów: 1. Introduction; 2. Topological states

of matter; 3. Ultracold atoms in optical lattices; 4. Fermionic mixtures and multi-orbital Hubbard models; 5. Periodic driving and Floquet theorem; 6. Emergent non-trivial lattices; 7. Rice-Mele model in a shaken optical lattice; 8. Shaking induced anomalous Hall effect; 9. Experimental realization and probing; 10. Conclusions. Każdy rozdział logicznie podzielono na podrozdziały, co znakomicie ułatwia lekturę rozprawy. Rozprawa zawiera też 3 dodatki: A. Numerical methods; B. Iterative commutation; C. Renormalization of the interactions. Należy podkreślić, że tak doskonale przemyślana struktura rozprawy jest bardzo istotna zwłaszcza w sytuacji, gdy przedstawiany materiał jest trudny i obszerny, łączy co najmniej dwa duże obszary tematyczne i obejmuje kilka znaczących rezultatów oryginalnych. Na pochwałę zasługują także starannie przygotowane ilustracje.

**Rozdziały 2 i 3** stanowią cenne i adekwatne wprowadzenie w dwa duże obszary tematyczne, na styku których lokuje się prezentowane badania. W Rozdziale 2 poświęconym topologicznym stanom materii omówiono m.in. takie zagadnienia jak topologia pasm energetycznych, krzywizna Berry'ego w przestrzeni odwrotnej i liczba Cherna (oraz jej związek z jednej strony z geometrycznym twierdzeniem Gaussa-Bonneta, a z drugiej strony z wartością przewodności hallowskiej), niezmienniki topologiczne  $Z_1$  i  $Z_2$ , związek symetrii hamiltonianu z topologią układu, modele Rice-Mele i Su-Schrieffer-Heeger, kwantowe zjawiska Halla oraz izolatory topologiczne. Natomiast w Rozdziale 3 poświęconym układom zimnych atomów w sieciach optycznych omówiono m.in. techniki wytwarzania, kontroli i badań eksperymentalnych tych układów, związek układów rzeczywistych z modelami Hubbarda, a także zagadnienia związane z wytwarzaniem i rolą syntetycznych pól magnetycznych w układach na sieci, kluczowych dla emergencji nietrywialnych własności topologicznych badanych w rozprawie.

**Rozdział 4** szczegółowo i starannie opisuje oryginalne rozszerzenie modelu Hubbarda o wzbudzone orbitale ze złamaną symetrią sferyczną. Model ten jest podstawą rozważań przedstawionych w dalszej części rozprawy. W tym rozdziale wyprowadzono go z ogólnego teorio-polowego hamiltonianu (4.1) dla dwuskładnikowego ( $\uparrow, \downarrow$ ) układu wielu ciał. Ze względu na unieruchomienie cząstek mniejszościowych ( $\uparrow$ ), model ten jest podobny do modelu Falicova-Kimballa, jednak różni się od niego w istotny sposób, gdyż zawiera procesy tunelowania kierunkowego między wzbudzonymi orbitalami (niesferycznymi), kluczowe dla emergencji nietrywialnych własności topologicznych.

**Rozdział 5** omawia teorię Floqueta w ogólnym kontekście układu pobudzanego periodycznie w czasie i wprowadza efektywny hamiltonian (5.43-5.44) dla „potrzęsanej” sieci optycznej (parametryzowany renormalizowanymi elementami macierzowymi tunelowania).

**Rozdział 6** przedstawia oryginalne rezultaty opublikowane wcześniej w pracy [O. Dutta, A. Przysiężna, M. Lewenstein, Emergent nontrivial lattices for topological insulators, *Physical Review A* 89, 043602 (2014)], dotyczące dwuskładnikowego układu opisanego w rozdziale 4, w przypadku konkretnej dwuwymiarowej sieci kwadratowej. Wykazano, że silne oddziaływanie parujące w obecności wzbudzonych (asferycznych) orbitali prowadzić może do samoorganizacji odpowiadającej emergencji pseudospinu w układzie w także do realizacji faz topologicznych: stanu kwantowego anomalous zjawiska Halla ze spontanicznie złamaną symetrią odbicia w czasie, izolującym wnętrzem, przewodzącymi stanami krańcowymi i skwantowaną przewodnością hallowską (poprzeczną).

**Rozdział 7** przedstawia oryginalne rezultaty opublikowane wcześniej w pracy [A. Przysiężna, O. Dutta, J. Zakrzewski, Rice-Mele model with topological solitons in an optical lattice, *New J. Phys.* 17, 013018 (2015)], dotyczące układu atomów (fermionowych) z oddziaływaniem przyciągającym w „potrzęsanej” sieci jednowymiarowej, stanowiącego realizację idealnego modelu Rice-Mele. Wykazano, że w określonym reżimie parametrów (potrzęsania) układ zawiera ułamkowe defekty topologiczne.

**Rozdział 8** przedstawia oryginalne rezultaty opublikowane wcześniej w pracy [O. Dutta, A. Przysiężna, J. Zakrzewski, Spontaneous magnetization and anomalous Hall effect in an emergent Dice lattice, *Scientific Reports* 5, 11060 (2015)], dotyczące dotyczące dwuskładnikowego układu opisanego w rozdziale

4, w przypadku konkretnej dwuwymiarowej sieci trójkątnej. Wykazano, że frustracja geometryczna związana z siecią trójkątną prowadzi, w obecności  $p$ -orbitali, do emergencji syntetycznego pola magnetycznego, a w konsekwencji do anomalnego zjawiska Halla (oraz kwantowego anomalnego zjawiska Halla w przypadku silnych pól syntetycznych).

**Rozdział 9** analizuje możliwości realizacji doświadczalnych układów badanych w rozdziałach 6-8.

**Rozdział 10** stanowi podsumowanie rozprawy i przedstawia główne wnioski.

Przy lekturze rozprawy nasunęły mi się następujące pytania: 1. Przy badaniu wybranych geometrii sieci przyjęto konkretne współczynniki ich zapełnienia przez cząstki mniejszościowe (str. 55:  $n_1=1/2$  dla sieci kwadratowej oraz  $n_1=1/3$  dla sieci trójkątnej); dlaczego właśnie takie i czy ten wybór jest krytyczny dla uzyskanych rezultatów? 2. W rozdziale 4.2.5 wspomniano o możliwym efektywnym oddziaływaniu trójciałowym, które jednak (wg Autorki) w większości przypadków można pominąć; czy jednak są możliwe układy, w których to oddziaływanie jest silne i odpychające (czyli opisane dodatnim parametrem  $\delta U_3$ )? innymi słowy, czy możliwa jest realizacja sieciowego odpowiednika hallowskiego stanu Moore'a-Reada?

**Podsumowując**, na materiał przedstawiony w niniejszej rozprawie składają się świetnie napisane wprowadzenie w tematykę oraz interesujące i znaczące rezultaty oryginalne przedstawione w pięciu artykułach opublikowanych w wiodących czasopismach fizycznych. Doskonałe wykształcenie ogólne doktorantki, głęboka wiedza w dziedzinie objętej rozprawą oraz biegłość w posługiwaniu się złożonym aparatem matematycznym, a także inwencja i wytrwałość w rozwiązywaniu złożonych problemów – nie budzą najmniejszej wątpliwości. Rozprawa jest znakomita zarówno pod względem treści jak i formy.

Z czysto recenzenckiego obowiązku odnotowuję, że doktorantka nie ustrzegła się drobnych uchybień językowych czy redakcyjnych. Na przykład: na str. 32 jest mowa o lokalizacji krzywizny Berry'ego bez należytego wyjaśnienia, że chodzi o lokalizację w obszarze przestrzeni odwrotnej: „in this place of the energy band the Berry curvature is localized (...) Berry phase localized around local minima of the next band...”; W opisie Rys. 2.12 nie podano dla jakich konkretnych/szczególnych wartości parametrów  $m^*$ ,  $\lambda$ ,  $\Delta$  narysowano krzywe; w zdaniu „The 2D topological insulator is synonymously called quantum spin Hall effect (QSHE)” zrównano układ ze zjawiskiem; na str. 44 użyto żargonowego sformułowania „nodes or the anti-nodes of the laser intensity”. Praca zawiera też (niezbyt liczne) literówki. Jednak uchybienia te w najmniejszym stopniu nie umniejszają mojej wysokiej oceny wartości tej rozprawy.

Wydaje mi się, że jest to najbardziej imponująca rozprawa doktorska jaką miałem kiedykolwiek okazję recenzować.

**Konkluzja:** Z przekonaniem stwierdzam zatem, że przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska pani mgr Anny Przysiężnej pod tytułem „On engineering topological effects in ultracold atoms” spełnia wymagania określone Ustawą z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2003 nr 65 poz. 595, z późn. zmianami). W związku z tym wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

Jednocześnie, biorąc pod uwagę wybitne osiągnięcia naukowe przedstawione w rozprawie oraz doskonałą jej formę, z przyjemnością wnioskuję o jej wyróżnienie.

