

On engineering topological effects in ultracold atoms

Rozprawa doktorska pani mgr Anny Przysiężnej ma charakter pracy teoretycznej. Dotyczy ona bardzo aktualnej i modnej tematyki związanej z badaniami ultra zimnych, silnie skorelowanych gazów atomowych. Od roku 1995, kiedy po raz pierwszy uzyskano kondensat Bosego-Einsteina atomów rubidu, badania ultra zimnych układów atomowych nieprzerwanie znajdują się na froncie badań fizycznych. Przełomowe eksperymenty z atomami w periodycznych strukturach czynią z fizyki atomowej swojego rodzaju pole doświadczalne dla fizyki materii skondensowanej, ale nie tylko, gdyż często wychodzą znacznie poza zakres tej tematyki. Pani mgr Anna Przysiężna w swojej pracy doktorskiej zajmowała się właśnie taką sytuacją. Przedstawiła bardzo ciekawe pomysły wytworzenia topologicznych stanów materii w dwuskładnikowym układzie fermionów. Zbadała przy tym różne geometrie sieci optycznej: od dwuwymiarowej kwadratowej sieci, poprzez jednowymiarowy łańcuch aż do sieci trójkątnej włącznie. Wszystkie te przypadki zasadały się na ciekawym pomysle. Ideą tą jest zaprojektowanie i wykorzystanie takiego układu, w którym proces tunelowania między dwoma różnymi pasmami energetycznymi sieci optycznej, w tym wypadku między orbitalami s i p , będzie dominował. Jak się okazuje, w takiej sytuacji dwuskładnikowy gaz fermionów może wykazywać własności charakterystyczne dla egzotycznych materiałów takich.

Rozprawa jest bardzo obszerna, liczy 167 stron. Napisana jest w języku angielskim i jest podzielona na 10 rozdziałów i 3 uzupełnienia. Autorka podaje też niesłychanie bogaty spis literatury liczący 300 pozycji. Pierwszy rozdział to krótki wstęp. Dwa kolejne, czyli rozdział drugi i trzeci to bardzo szerokie wprowadzenie do zagadnień związanych ze stanami topologicznymi oraz do fizyki ultra zimnych atomów. Szczególny nacisk autorka położyła na opis sposobów wytwarzania sztucznych pól cechowania, czyli warunków, w których neutralne atomy zachowują się tak jak pod wpływem siły analogicznej do siły Lorentza działającej na naładowane cząstki w polu magnetycznym. Te dwa obszerne rozdziały są bardzo przejrzyste napisane i mają charakter monografii. Jest to bardzo pouczająca część rozprawy. Mam odczucie, że mgr A. Przysiężna poświęciła na opracowanie tej części więcej czasu i wysiłku niż na opisanie własnych rezultatów.

Następnie w rozdziale czwartym mgr Anna Przysiężna wprowadziła aparat teoretyczny niezbędny do opisu dwuskładnikowego gazu fermionów w sieci

optycznej. Jest to bardzo ważny dla pracy rozdział, gdyż tu zdefiniowane są najważniejsze przybliżenia. Pani mgr A. Przysiężna wprowadziła fermionowy model Hubbarda oraz jego niestandardowe rozszerzenia. Rozszerzenia polegają na uwzględnieniu dwóch dodatkowych elementów. Po pierwsze, mgr A. Przysiężna nie ogranicza się jedynie do podstawowego pasma s , ale włącza do opisu również kolejny orbital typu p . Po drugie, uwzględnia nie tylko tunelowanie w obu pasmach wynikające z procesów jednociąłowych, ale również tunelowania będące wynikiem dwuciąłowych oddziaływań, tzw. tunelowanie indukowane przez gęstość. Tego typu rozszerzenia są spotykane w literaturze. Zupełnym novum moim zdaniem jest uwzględnienie indukowanego przez gęstość tunelowania między pasmami s - p . Ten proces w standardowych warunkach jest bardzo mało prawdopodobny ze względu na zasadę zachowania energii. Pani mgr A. Przysiężna zaproponowała bardzo ciekawą konfigurację układu, przy której ten międzypasmowy proces tunelowania ma charakter rezonansowy.

Modelowy układ, który bada mgr A. Przysiężna to sieć optyczna w której znajdują się dwa rodzaje fermionów, nie więcej niż po jednym fermionie każdego rodzaju na oczko sieci. Ważne jest również to, że oba zbiory nie są równoliczne. Fermiony będące w mniejszości znajdują się w paśmie podstawowym i przyciągają do siebie partnera z drugiego liczniejszego zbioru. Powstaje w ten sposób nieruchomy „kompozyt” – para atomów w paśmie podstawowym. Pozostałe „większościowe fermiony” mogą być albo w stanie podstawowym s w pustym oczku sieci, albo mogą tunelować do stanu p w oczku ze stanem s zajęty przez złożony „kompozyt”. Ale wtedy, ze względu na zakaz Pauliego, muszą zająć wzbudzony stan p . Ponieważ po „przetunelowaniu” większościowy fermion dozna przyciągania ze strony mniejszościowego fermionu tworzącego kompozyt, to może się tak zdarzyć, że ujemna energia przyciągania skompensuje wzrost energii związany z przeskokiem atomu do pasma wzbudzonego p . Na tym rezonansowym procesie zasadza się, moim zdaniem główny pomysł, na którym osnuta jest rozprawa doktorska. Ale ponieważ w typowych warunkach koszt energetyczny przeskoku z pasma s do pasma p dla głębokich sieci jest rzędu $2\pi \times 100$ KHz (pomnożone przez stałą Plancka), a energia oddziaływania kontaktowego jest około $2\pi \times 10$ KHz, więc należy wykorzystać rezonanse Feshbacha aby zwiększyć energię oddziaływania i dostroić się do rezonansu. Istnieje też inna możliwość – można odpowiednio potrząsać siecią optyczną i w ten sposób dostarczyć układowi brakującą energię.

Mgr A. Przysiężna rozważa tę drugą możliwość w rozdziale 5. Jak już wspominałem zamiast zwiększania oddziaływania między fermionami różnego typu autorka proponuje by okresowo potrząsać siecią optyczną z częstotliwością ω . Wówczas różnica energii między stanem s w pustym oczku i stanem p w oczku z

kompozytem może zostać skompensowana nie dzięki silnemu przyciąganiu między tunelującym atomem a jednym z atomów kompozytu, ale poprzez „absorpcję N fononów” drgającej sieci optycznej. Tunelowanie między różnymi orbitalami może stać się rezonansowo wzmocnione w wyniku odpowiedniego potrząsania sieci. Dodatkowo potrząsanie pozwala stroić amplitudy tunelowania w tym samym paśmie oraz „ubierać” te amplitudy w czynniki fazowe. Również tym rozważaniom poświęcony jest rozdział 5. rozprawy. Mgr A. Przysiężna pokazuje, jak przejście do układu nieinercyjnego, w którym sieć optyczna spoczywa, oraz uśrednienie po szybkich oscylacjach, prowadzi do hamiltonianu efektywnego, w którym amplitudy tunelowania są zmodyfikowane i zależą w istotny sposób od parametrów potrząsania. Rozdział piąty rozprawy jest przeglądem znanych rezultatów, jednak w moim odczuciu nie jest już tak ładnie napisany jak dwa wcześniejsze. Wydaje mi się nieco zbyt techniczny, np. wzór (5.42) zajmujący 9 linijek tekstu nie wydaje mi się użyteczny. Tak długie wzory powinny się znaleźć w dodatku, jeśli w ogóle.

Rozdziały 6., 7. i 8. to opis głównych wyników rozprawy. Każdy z nich odpowiada innej opublikowanej pracy naukowej. Najpierw, w rozdziale 6., mgr A. Przysiężna rozważa dwuwymiarową kwadratową sieć optyczną z silnie oddziałującymi fermionami różnego typu. Pokazuje, że w takim układzie, w pewnym zakresie parametrów, międzypasmowe tunelowanie prowadzi do organizowania się „kompozytów” w periodyczne struktury. Te struktury w połączeniu z oryginalną siecią optyczną stanowią dla większościowego składnika nietrywialną topologicznie periodyczną sieć. W przypadku dwuwymiarowej kwadratowej sieci jest to sieć Lieba. Rozważając strukturę pasm energetycznych dla większościowego składnika mgr A. Przysiężna pokazała, że pasma te mają ciekawą topologię. Aby uzyskać w układzie anomalny kwantowy efekt Halla lub spinowy efekt Halla należy otworzyć przerwę energetyczną w punktach przecinania się pasm. W tym celu dodatkowe słabe oddziaływania zostały uwzględnione. Oddziaływania te to oddziaływania dipoli magnetycznych atomów prowadzące do sprzężenia spinu z orbitalnymi stopniami swobody, oraz oddziaływania trzyciałowe .

W rozdziale 7. mgr A. Przysiężna zajmowała się jednowymiarowym układem. Pokazała jak odpowiednio dobierając parametry potrząsania siecią można ogólny model z rozdziału 4. doprowadzić do znanych modeli : modelu Su-Shrieffer-Hegeer lub modelu Rice-Mele, w których pojawiają się topologicznie chronione stany materii - solitony. Ponownie jak we wcześniej rozważanym przypadku, dwuatomowe kompozyty organizują się w periodyczne struktury – co drugie oczko sieci jest obsadzone przez kompozyt. Pozwala to większościowym atomom tunelować (co zmniejsza energię układu) między stanami s w oczku między kompozytami do stanów p w oczkach z unieruchomionymi kompozytami. Na dodatek amplituda

tunelowania zależy od kierunku. W ten sposób pojawia się w układzie struktura dimerów: oczek w których większościowy atom może obsadzać orbital s na przemian z oczkami gdzie atom jest w orbitalu p . Na brzegach układu oraz na defektach w periodycznym ustawieniu dimerów pojawiają się zlokalizowane stany.

W rozdziale 8. mgr A. Przysiężna bada stany topologiczne, jakie mogą powstać gdy dwuskładnikowy układ fermionów zostanie umieszczony na trójkątnej sieci. Przez odpowiednie okresowe potrząsanie siecią optyczną, tym razem wzdłuż eliptycznej trajektorii, można otrzymać układ opisany efektywnym Hamiltonianem, w którym dominuje tunelowanie między różnymi orbitalami oraz oddziaływania kontaktowe. Oddziaływania kontaktowe są odpowiedzialne za powstanie kompozytów i ich unieruchomienie w sieci, Kompozyty, przy założeniu, że liczba kompozytów na jedno oczko sieci wynosi $1/3$, organizują się w pewnym obszarze parametrów w sieć kostkową (dice lattice). Mgr A. Przysiężna pokazała, że większościowe atomy poruszające się po tak powstałej sieci są poddane działaniu sztucznego nieabelowego pola magnetycznego. Strumień tego pola może być kontrolowany. W zależności od parametrów można w układzie wywołać anomalny lub kwantowy anomalny efekt Halla.

Mgr A. Przysiężna w rozdziale 9. analizuje szereg problemów i barier, jakie należy pokonać aby zobaczyć przewidziane efekty w rzeczywistym układzie. Mnie jednak nieco niepokoi, że podstawowe założenie wszystkich rozważanych modeli, nie zostało starannie przebadane. Mam tu na myśli warunek rezonansowego tunelowania między orbitalami p i s . Warunek określony równaniem (4.34) mówi, że różnica energii między stanem początkowym s a stanem końcowym w paśmie p w oczku z kompozytem wynosi Δ :

$$\Delta = U_1 + E_1.$$

Rezonans zachodzi wtedy, kiedy ta różnica znika, $\Delta = 0$. Mgr A. Przysiężna powinna pokusić się o oszacowanie ograniczenia na tę różnicę energii. Jak duże może być to odstrojenie aby tunelowanie między orbitalami s i p było jeszcze dominujące? Wydaje mi się, że odstrojenie musi być mniejsze od amplitudy tunelowania między sprzężonymi pasmami. Stąd wynika też ograniczenie na dokładność z jaką należy kontrolować wartość pola magnetycznego dostrajającego oddziaływanie kontaktowe do pożądanej wartości. Obawiam się, że wymagana jest niezwykła precyzja. Z jaką dokładnością należy kontrolować pole magnetyczne ?

W przypadku potrząsania siecią warunek rezonansowego tunelowania ma postać (5.40):

$$U_1 + E_1 = 2\Delta + N\omega.$$

Po pierwsze w tym wzorze nie zgadzają się jednostki (częstość to nie energia) oraz nie wiem dlaczego nagle pojawił się czynnik 2, czyli dlaczego zmieniono definicję odstrojenia. Po drugie nie wiem czy powyższy warunek może być spełniony. Z jednej strony Δ ma zniknąć, czyli częstość potrząsania siecią ω powinna być rzędu energii pasma p , $E_1 = \omega$. Z drugiej zaś strony częstość potrząsania siecią powinna być dużo większa od wszystkich innych skal związanych z charakterystycznymi energiami problemu $\omega \gg U_1, E_1$. Tak przynajmniej rozumiem mało precyzyjne określenie na stronie 79, na początku sekcji 5.3, które brzmi: „driving is fast with respect to other timescales in the system”.

I ponownie pozostaje pytanie jak dokładnie należy kontrolować częstość i amplitudę potrząsania aby spełnić warunek rezonansu oraz inne warunki na znikanie „niepożądanych” procesów tunelowania.

Moja kolejna uwaga dotyczy oddziaływań magnetycznych momentów dipolowych, które są odpowiedzialne za otwarcie przerwy energetycznej w punkcie przecięcia pasm w przypadku dwuwymiarowej, kwadratowej sieci optycznej. Oddziaływania dipoli magnetycznych są bardzo małe, nawet w przypadku najbardziej magnetycznych atomów czyli chromu, erbu czy dysprozu. Obawiam się, że przerwa energetyczna po zniesieniu degeneracji przez te oddziaływania będzie bardzo mała. Mgr A. Przysiężna pisze o tym, ale nie podaje żadnych wartości liczbowych. Szkoda, że autorka nie oszacowała jak bardzo trzeba schłodzić układ aby uniknąć wzbudzeń termicznych przy tak wąskiej przerwie.

I na koniec parę drobnych usterek, które udało mi się zauważyć:

1. Streszczenie, str. ii – Nie można powiedzieć, że „atomy są jedynie lekko oddziałujące”. Można powiedzieć słabo oddziałujące.
2. Brak komentarza dotyczącego trzyciałowych oddziaływań we wzorze (4.23). Nie wiem po co one są dopisane na tym etapie rozważań. Równie dobrze możnaby dopisać oddziaływania dipoli magnetycznych atomów.
3. Nie wiem co autorka miała na myśli pisząc na str. 69 „Additionally to the commutation relations given in the previous subsection we also have $s_i^+ b_i^+$ due to the Pauli exclusion principle.”
4. Na stronie 90 znajduję warunek $\Delta \ll 0$. Nie można tak pisać. Brakuje skali aby stwierdzić czy coś jest duże.
5. Wzory (6.12) - Powinna zostać wyjaśnione, dlaczego tak zdefiniowane korelacje odpowiadają różnym parametrom porządku związanych ze złamaniem odpowiednich symetrii. Ja mam kłopot ze zrozumieniem opisu pod tymi wzorami.

6. Str. 80 – Co to jest Ω ? Jeśli częstość, to wzór na quasi energie jest błędny bo ma zły wymiar. Ω powinna być wtedy w liczniku.
7. Na stronie 114 jest prawdopodobnie żargonowe, ale dla mnie niejasne zdanie: „Total kinetic energy around the considered plaquette can be written as”. Nie wiem co to jest energia wokół plakietki.

Znalazłem też pewną liczbę prostych błędów edytorskich. Takich błędów nie da się uniknąć. Ich liczba jest stosunkowo mała (ja robię znacznie więcej). Nie chcę być małostkowy, ale gdyby mgr A. Przysiężna chciała opublikować swą pracę np. w internecie, to podaję listę ewentualnych poprawek:

1. Wzór (2.6) – według mnie powinien być + a nie minus, albo znaki w wykładnikach powinny być zamienione?
2. Str. 14 – zbędna kropka w środku zdania w drugiej linijce od dołu.
3. Str. 21 – pojawia się odwołanie do rys (2.3) i (2.5). Brak rysunku (2.4).
4. Str. 23 – pierwsza linijka: „ are supported only on by one type”.
5. Str. 29 – prawa strona wzoru (2.35) – brakuje symbolu sumy.
6. Str. 34 – przedostatni akapit – „ internal mechanizm of to spin-orbit coupling”.
7. Str. 54 – pierwszy akapit – “combine interaction with by periodic driving” .
8. Str. 57 – znaki w wykładniku w transformacji Fouriera I transformacji odwrotnej powinny być przeciwne, wzór (4.5) I (4.7).
9. Str. 71 – „on the last panel of Fig 4.10.”– Powinno być “on the third panel of Fig. 4.10.”
10. Str. 42 – ostatnia linia: “play” – powinno być “plays”.
11. Str. 77 – pierwsza linijka „transformationis” –powinno być „transformations”.
12. Str 99 – brak numeru rozdziału i sekcji: jest Chapter ?? oraz Section ??
13. Str. 101, druga linijka od góry; jest interband a powinno chyba być intraband.
14. Str 101, drugi akapit: jest „would would”.
15. Str 107 jest „dice lattice is with synthetic non-Abelian field is formed.”
16. Str. 116 - odwołanie do nieistniejącego rysunku Fig. 8.2c.

Podsumowując chcę wyraźnie stwierdzić, że bardzo wysoko oceniam wyniki otrzymane przez mgr A. Przysiężną. Oryginalny, ciekawy pomysł oraz jakość otrzymanych wyników stanowią o wysokiej wartości rozprawy doktorskiej. Niewątpliwie wyniki mgr A. Przysiężnej stanowią spore wyzwanie dla eksperymentatorów. Prawdziwym sukcesem byłoby zrealizowanie któregoś z pomysłów autorki w doświadczeniu. Nie będzie to łatwe i właśnie z tym wiążą się moje polemiczne uwagi. Nie umniejszają one w żaden sposób wartości przedstawionych przez mgr A. Przysiężną teoretycznych badań. Przedstawiona rozprawa doktorska z nadmiarem spełnia wszelkie formalne i zwyczajowe wymogi stawiane przed rozprawami doktorskimi i wnoszę o dopuszczenie Pani mgr Anny Przysiężnej do dalszych etapów postępowania doktorskiego.



Warszawa, 30.09.2015 r.

Prof. dr hab. Mariusz Gajda