

STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Ultra zimne atomy bozonowe ze słabym magnetycznym oddziaływaniem dipolowym w sieciach optycznych

autor:

Joanna PIETRASZEWICZ

Promotor:

prof. dr hab. Mariusz GAJDA

Promotor pomocniczy:

dr Tomasz SOWIŃSKI

Tematyka tej rozprawy jest skondentrowana wokół spinowych stopni swobody w sieci optycznej. Głównym zamierzeniem było zbadanie dynamiki spinu w ultrazimnym gazie atomów chromu w potencjale optycznym.

Dynamikę spinu mogą inicjować dwa rodzaje oddziaływań: zależne od spinu oddziaływania kontaktowe oraz długozasięgowe magnetyczne oddziaływania dipolowe. Te pierwsze zachowują magnetyzację w układzie, zaś te drugie rządzą się zupełnie innymi prawami. Wnioski i wyniki badań zostały przedstawione w rozdziale czwartym i piątym.

W części pierwszej rozdziału 4. opisano ewolucję N atomowego układu w obrębie dwóch oczek sieci optycznej z uwzględnieniem tunelowania. W chwili początkowej jednakowa liczba atomów okupowała stan spinowy $m_S = 2$ każdego oczka. Największą energię w hamiltonianie stanowiły oddziaływania kontaktowe, najmniejszą zaś - długozasięgowe oddziaływania dipolowe. Dla stanu spinowego $m_S = 2$ przejście do innych składowych magnetycznych mogło być wywołane zarówno przez oddziaływania kontaktowe jak i dipolowe. W układzie ze średnio jednym atomem na oczko dynamikę spinu inicjowały wyłącznie nielokalne oddziaływania dipolowe. Sytuacja uległa diametralnej zmianie, gdy liczba atomów na oczko była większa niż jeden. Rachunek pokazał, że w procesie dynamiki spinu rolę przywódczą przejmują wtedy oddziaływania kontaktowe zależne od spinu. Liczba obsadzanych stanów magnetycznych zależy wtedy od liczby atomów w układzie. W trakcie ewolucji układu z jednym lub dwoma atomami na oczko maksymalnie były obsadzone 3 składniki magnetyczne. Dla dużej liczby atomów można oczekiwać obsadzenia wszystkich 7 składników spinowych.

Druga część rozdziału czwartego dotyczyła rezonansowej dynamiki spinu dwóch

atomów chromu pod wpływem magnetycznych oddziaływań dipolowych. Układ znajdował się w niezerowym polu magnetycznym B_{rez} . Przeanalizowano dwa typy wzbudzeń dipolowych w pojedynczym oczku, i) gdy tylko jeden atom zmienia stan spinowy ($\Delta M_z = -1$), ii) gdy oba atomy robią to równocześnie ($\Delta M_z = -2$). Początkowo dwa atomy znajdowały się w stanie podstawowym potencjału z magnetyzacją $m_S = 3$. Proces dynamiki spinu został ograniczony do podprzestrzeni maksymalnie trzech składników magnetycznych, tj. najpierw w konfiguracji $m_S = \{3, 2\}$, a potem $m_S = \{3, 2, 1\}$. To ograniczenie wynikało z postaci oddziaływań dipolowych i kontaktowych. Wszystkie procesy dipolowe przebadano dla trzech typów potencjałów: model idealnego oscylatora harmonicznego, model anharmoniczny, rzeczywiste oczko sieci optycznej. W każdym przypadku pokazano strukturę energetyczną rezonansowo sprzężonych stanów, jednoczątkowe gęstości stanów końcowych oraz energię własną stanu początkowego. Takie podejście do problemu pozwoliło zademonstrować jak anharmoniczność i anizotropowość modyfikują dynamikę spinu w oczku. Świadectwem tego była rozbieżność wyników między powszechnie stosowanym przybliżeniem harmonicznym a rzeczywistą sytuacją, która występuje w sieci optycznej.

W dipolowej pułapce optycznej o symetrii osiowej, w gazie ultrazimnych atomów przewidziano realizację eksperymentu Einsteina de Haasa (*EdH*). W sieci optycznej taki scenariusz okazuje się niemożliwy. Główną przeszkodą jest kształt pojedynczego oczka, którego nawet w przypadku wysokich barier potencjalnych, nie można traktować jako osiowo-symetrycznego. Wszelkie spekulacje i próby zaobserwowania wiru na sieci optycznej nie mogą mieć miejsca. Istnieją jednak dobre strony z takiego obrotu spraw... Rachunek przedstawiony w tej rozprawie pokazał, że oddziaływania dipolowe są bardzo dobrym sposobem próbkowania dwuciałowych stanów wzbudzonych w zewnętrznym potencjale przy różnych wartościach pola magnetycznego. Oddziaływania te są bardzo czułe, dlatego wychwytyują takie niedoskonałości jak anharmoniczność czy brak osiowej symetrii pojedynczego oczka. Bogactwo struktury rezonansowej to także wynik samych oddziaływań kontaktowych, które znoszą degeneracją w stanach dwuczątkowych.

Rezonansowe oddziaływanie dipolowe można uznać za kolejne, pomocne narzędzie kontroli wielociałowego układu. Na dodatek może ono posłużyć jako precyzyjna metoda w wyznaczaniu nieznanych długości rozpraszania atomów uwikłanych w dynamikę spinu, np. dla Dysprozu czy Erbu.

Wyniki z rozdziału 4-tego są tematycznie powiązane z aktualnie prowadzonymi doświadczeniami grupy francuskiej pod kierunkiem prof. Bruna Laburthe-Tolra. Odniesiono się do danych eksperymentalnych tej grupy. Teoretyczne

oszacowania prezentowane w tej rozprawie jakościowo zgadzają się z wynikami doświadczalnymi, ale ukazują także niedoskonałości eksperymentu. Poprawny opis układu ultrazimnych atomów w sieci optycznej jest dość złożony i bardzo subtelny. Tak samo wygląda sprawa od strony eksperymentalnej, gdyż wymagana jest niebywała precyzja w kontroli pola magnetycznego ($\sim 100 \mu\text{G}$).

W Rozdziale 5-tym zaproponowano dwuskładnikowy model Bosego-Hubbarda (BH). Dwa składniki magnetyczne $m_S = 3$ i $m_S = 2$ były ze sobą sprzężone dipolowym oddziaływaniem. Klasa modeli tego typu nie była do tej pory badana. W tym rozdziale skupiono się na analizie układu z co najwyżej jednym atomem na oczko. Pokazano, że w tym dwuskładnikowym modelu BH występują dwa przejścia fazowe oraz dodatkowo egzotyczne fazy. Dowodem na to jest diagram fazowy układu. W magnetycznym polu rezonansowym przywidziano trzy typy faz:

- izolator Motta M , gdzie atom jest superpozycją stanu podstawowego o magnetyzacji $m_S = 3$ oraz stanu Wanniera z orbitalnym momentem pędu $\Delta L_z = 1$ i magnetyzacji $m_S = 2$,
- fazę MS będącą superpozycją fazy Motta w składniku a i fazy nadciekłej $P_x + iP_y$ w składniku b ,
- fazę S , w której faza nadciekła współlistnieje w obydwu składnikach a i b .

Cały rachunek przeprowadzono wzorując się na metodzie Fishera. Należy podkreślić, że przedstawiony model jest niezwykle uniwersalny. Sprawdza się dla dowolnego układu dwupoziomowego, w którym dwa rezonansowe stany są sprzężone dipolowym oddziaływaniem. Model ten można realizować bez względu na charakter oczka sieci optycznej. Pozostaje więc nadzieja, że teoretyczne przewidywania dotyczące dwuskładnikowego modelu Bosego-Hubbarda z oddziaływaniem dipolowym zostaną zweryfikowane doświadczalnie.

