

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Marcina Umińskiego
„Decaying Feshbach resonances in complex ultracold systems”**

Rozprawa doktorska mgr. Marcina Umińskiego została przygotowana pod kierunkiem dr. hab. Piotra S. Żuchowskiego, prof. UMK, oraz promotora pomocniczego dr. inż. Mateusza Borkowskiego. Rozprawa poświęcona jest modelowaniu rezonansów Feshbacha w złożonych układach ultrazimnych, ze szczególnym uwzględnieniem przypadków, w których rezonansom towarzyszą kanały stratne. Modelowanie wykonano na podstawie krzywych i płaszczyzn energii potencjalnej obliczonych metodami ab initio. Podjęta przez Autora rozprawy tematyka badawcza jest aktualna i ważna. Rezonanse Feshbacha w układach ultrazimnych odgrywają ważną rolę w badaniach podstawowych i zastosowaniach związanych z symulacjami kwantowymi, precyzyjną spektroskopią oraz metrologią. Szczególnie interesujące są przy tym układy silnie anizotropowe, zawierające atomy magnetyczne lub cząsteczki, gdyż ich złożona struktura energetyczna prowadzi do powstawania bardzo skomplikowanych układów rezonansów oraz do pojawiania się procesów stratnych, które mogą zasadniczo zmieniać właściwości zderzeń. Badanie takich układów jest istotne nie tylko dla lepszego zrozumienia podstawowych mechanizmów rozpraszania, lecz także dla oceny możliwości kontroli oddziaływań w eksperymentach.

Praca ma tradycyjną formę rozprawy doktorskiej, jest napisana w języku angielskim i składa się z siedmiu rozdziałów oraz bibliografii obejmującej 229 pozycji literaturowych. Rozdział pierwszy poświęcony jest wprowadzeniu do fizyki ultrazimnych atomów i cząsteczek, podstawom teorii rozpraszania oraz omówieniu rezonansów Feshbacha. W rozdziale drugim opisano analizę struktury rotacyjno-wibracyjnej stanu podstawowego dla układu jonu NO^+ i cząsteczki wodoru. Rozdział trzeci poświęcony jest ultrazimnym zderzeniom helu i litu, ze szczególnym uwzględnieniem procesów jonizacji Penninga oraz opisu strat za pomocą zespolonego potencjału optycznego. W rozdziale czwartym przedstawiono obliczenia rezonansów Feshbacha w układzie Li–Er, w tym analizę wpływu skalowania potencjału oraz masy zredukowanej na położenia i właściwości rezonansów. W rozdziale piątym omówiono analogiczne zagadnienia dla układu K–Dy, obejmujące m.in. gęstość rezonansów, stany związane oraz elementy analizy statystycznej wskazującej na możliwe przejawy chaosu kwantowego. W rozdziale szóstym przedstawiono analizę ultrazimnych zderzeń atomu strontu z cząsteczką SrOH oraz możliwości powstawania rezonansów Feshbacha w tym układzie. Ostatni rozdział zawiera podsumowanie uzyskanych wyników i prezentuje dalsze perspektywy badawcze w tej tematyce.

W pracy występują drobne błędy językowe i literówki, np. „4.1 Introduction do Li+Er”. Są to jednak uchybienia redakcyjne, które nie wpływają na zrozumienie treści rozprawy ani nie obniżają jej wartości merytorycznej. Z perspektywy czytelności pracy korzystne byłoby ujednolicenie jednostek, w których prezentowana jest energia poziomów (cm^{-1} , K). Obecne zróżnicowanie jednostek nie wydaje się konieczne z merytorycznego punktu widzenia i utrudnia porównanie prezentowanych wyników.

Zgodnie z zaleceniami Rady Doskonałości Naukowej recenzja rozprawy doktorskiej powinna zawierać następujące elementy:

- 1) ocenę wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora w określonej dyscyplinie;
- 2) ocenę wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez osobę ubiegającą się o nadanie stopnia doktora;
- 3) ocenę wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

I Czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora w określonej dyscyplinie?

Stwierdzam, że w przedstawionej do recenzji rozprawie doktorskiej Autor prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie nauki fizyczne w zakresie prowadzonych przez siebie badań. Świadczy o tym zarówno zakres zagadnień omówionych w części wprowadzającej, jak i sposób, w jaki Autor wykorzystuje aparat teoretyczny w kolejnych rozdziałach pracy.

We wstępie Autor przedstawia podstawowe pojęcia dotyczące metod otrzymywania i pułapowania atomów i cząsteczek, a także aparat służący do opisu zderzeń rezonansowych w układach atom–atom i atom–cząsteczka. Przedstawione w rozdziale pierwszym zagadnienia tworzą spójne kompendium pomocne w zrozumieniu dalszych części rozprawy. Ponadto rozdział drugi, poświęcony obliczeniom energii poziomów rotacyjno-wibracyjnych w układzie $\text{H}_2\text{--NO}^+$, wskazuje na opanowanie przez Autora narzędzi, którymi posługuje się w dalszej części pracy. W mojej opinii funkcję edukacyjną przypisywaną przez Autora temu rozdziałowi dopełniłoby umieszczenie w dodatkach lub repozytorium plików wejściowych oprogramowania użytego do obliczeń.

W tym kontekście pozytywnie oceniam również konstrukcję kolejnych rozdziałów rozprawy. Każdy z nich został poprzedzony wstępem prezentującym kontekst prowadzonych badań, zarówno od strony teoretycznej, jak i doświadczalnej. Autor nie ogranicza się tylko do przedstawienia wyników obliczeń, lecz osadza

analizowane układy w szerszym kontekście: wskazuje, dlaczego dany problem jest istotny, jakie wcześniejsze prace teoretyczne i eksperymentalne stanowią punkt odniesienia oraz jakie własności badanego układu decydują o jego znaczeniu dla ultrazimnej fizyki.

II Czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez osobę ubiegającą się o nadanie stopnia doktora?

Spójny i logiczny układ rozprawy oraz kolejność podejmowanych problemów naukowych wskazują na dobrze sformułowany program badawczy. Autor prowadzi analizę od zagadnień przygotowawczych i prostszych układów do coraz bardziej złożonych przypadków. Kolejne rozdziały wynikają z siebie tematycznie i metodologicznie, tworząc spójną całość badawczą. Przedstawiony w rozprawie sposób realizacji tego programu wskazuje na samodzielność Autora na kolejnych etapach pracy. Dotyczy to zarówno identyfikacji problemów fizycznych, jak i rozpoznania trudności obliczeniowych związanych z ich rozwiązaniem. Autor musiał dobrać odpowiednie narzędzia, kontrolować poprawność uzyskiwanych wyników oraz modyfikować parametry obliczeń w zależności od badanego układu. Wymagało to zrozumienia, które elementy modelu mają istotny wpływ na końcowe wnioski fizyczne.

Rozprawa wykazuje także umiejętność pracy mgr. Umińskiego z literaturą naukową. Literatura jest obszerna i właściwie dobrana. Autor odnosi własne obliczenia do wcześniejszych wyników teoretycznych i eksperymentalnych. Wskazuje, które zagadnienia były już badane, a które wymagają dalszej analizy. Dzięki temu wyniki pracy są osadzone w szerszym kontekście.

Wymienione powyżej argumenty pozwalają mi stwierdzić, że rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez jej Autora.

III Czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego?

Autor w rozprawie prezentuje wyniki badań nad zanikającymi rezonansami Feshbacha w złożonych układach ultrazimnych i pokazuje, jak obecność kanałów stratnych, anizotropia oddziaływań, struktura stanów związanych oraz pole magnetyczne wpływają na własności widm rezonansowych. Jest to zagadnienie aktualne i ważne dla fizyki ultrazimnych atomów i cząsteczek. Ma ono znaczenie zarówno dla teorii zderzeń kwantowych, jak i dla interpretacji oraz planowania doświadczeń. Wybrane przez mgr. Umińskiego układy, dla których przeprowadził swoje badania, są ściśle związane z aktualnymi lub rozwijającymi się kierunkami badań doświadczalnych.

W mojej ocenie część rozprawy dotycząca $\text{He}^*\text{-Li}$ spełnia przesłankę oryginalnego rozwiązania problemu naukowego. Sam proces jonizacji Penninga w tym układzie oraz użycie zespolonych potencjałów optycznych były już wcześniej badane. Oryginalny element rozprawy polega natomiast na zastosowaniu tego opisu do ultrazimnego, wielokanałowego problemu rozpraszania w polu magnetycznym oraz na interpretacji strat jonizacyjnych poprzez zanikające rezonanse Feshbacha, ich szerokości, czasy życia i zespoloną długość rozpraszania. Wyniki te mają charakter głównie metodologiczny i eksploracyjny, lecz stanowią uzasadnione rozszerzenie wcześniejszych prac teoretycznych i eksperymentalnych nad $\text{He}^*\text{-Li}$.

Zaprezentowane w rozprawie wyniki dotyczące charakterystyki rezonansów Feshbacha w układzie Li-Er stanowią rozszerzenie obecnego stanu wiedzy przez włączenie do analizy kanałów wzbudzonych oraz kanałów stratnych. Autor bada osobno wzbudzenia litu i erbu, wyznacza położenia oraz szerokości rezonansów, analizuje czasy życia stanów rezonansowych, a w wybranych przypadkach wykorzystuje efektywne momenty magnetyczne do interpretacji przesunięć położenia rezonansów w polu magnetycznym. Dzięki temu pokazuje, jak zmieniają się własności rezonansów po uwzględnieniu w obliczeniach kanałów wzbudzonych.

Autor podjął także próbę odniesienia obliczeń do danych eksperymentalnych. W tym celu analizował wpływ skalowania krzywej energii potencjalnej na położenia rezonansów. Podjęta przez mgr. Umińskiego próba nie prowadzi do pełnego odtworzenia obserwowanego widma, ale ma istotną wartość poznawczą. Pozwala ocenić, jak dokładne muszą być krzywe energii potencjalnej, aby możliwy był ilościowy opis rezonansów w układzie Li-Er . Wskazuje także na ograniczenia obecnych modeli i potrzebę ich dalszego doskonalenia. Jest to ważny etap na drodze do uzyskania poprawnego opisu ilościowego tak złożonego układu.

Podobnie dla układu K-Dy Autor wykracza poza znane z literatury badania rezonansów Feshbacha w tym układzie, przedstawiając systematyczny opis teoretyczny widm rezonansowych nie tylko dla stanu podstawowego, lecz także dla kanałów wzbudzonych atomu potasu oraz atomu dysprozu. Szczególnie istotne jest uwzględnienie zanikających rezonansów Feshbacha, części urojonej długości rozpraszania oraz związanych z nią strat dwuciałowych. Oryginalny wkład tej części rozprawy polega przede wszystkim na pokazaniu, że w układzie K-Dy charakter strat zależy silnie od wyboru kanału wzbudzonego i pola magnetycznego, a wzbudzenie silnie magnetycznego atomu dysprozu prowadzi do znacznie większych strat niż wzbudzenie atomu alkalicznego. Wynik ten ma znaczenie dla interpretacji doświadczeń oraz dla oceny możliwości wykorzystania rezonansów Feshbacha do kontroli oddziaływań i dysypacji w złożonych układach ultrazimnych. W rozprawie przedstawiona jest także analiza nieregularności widma rezonansowego K-Dy i jego chaotycznego charakteru, z wykorzystaniem rozkładu odstępów najbliższych sąsiadów oraz parametru Brody'ego. Do tej części mam jednak zastrzeżenie

metodyczne. Chociaż zastosowana metoda jest spotykana w literaturze, analiza odstępów między położeniami rezonansów w polu magnetycznym może prowadzić do zawyżenia oceny chaotyczności układu. Bardziej adekwatna byłaby, moim zdaniem, analiza statystyki poziomów energetycznych.

Istotnym i oryginalnym elementem rozprawy jest część dotycząca układu Sr–SrOH. Eksperymentalnie rozwijane są obecnie metody chłodzenia, pułapkowania i kontroli cząsteczek SrOH. Pełna realizacja zderzeń Sr + SrOH oraz otrzymanie ultrazimnych cząsteczek Sr₂OH nie zostały jednak jeszcze osiągnięte. Obliczenia przedstawione w rozprawie wyprzedzają zatem aktualny stan doświadczeń. Wskazują możliwy kierunek tworzenia bardziej złożonych ultrazimnych cząsteczek. Pokazują także, że silna anizotropia oddziaływania może prowadzić do bardzo gęstego widma stanów słabo związanych. Wyniki te zostały ujęte w pracy opublikowanej w „Physical Chemistry Chemical Physics”, której mgr Umiński jest współautorem.

Podsumowując, wyniki badań zaprezentowane przez Autora w rozprawie spełniają wymaganie oryginalnego rozwiązania problemu naukowego.

W związku z powyższym, w mojej opinii przedstawiona praca spełnia ustawowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim, określone w art. 187 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. z późniejszymi zmianami. Wnoszę więc o dopuszczenie mgr. Marcina Umińskiego do dalszych czynności przewodu doktorskiego.