

Warszawa 14.07.2026 r.

Prof. Mariusz Gajda
Instytut Fizyki PAN
Al. Lotników 32/46,
02-668 Warszawa

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Jacka Gębali
zatytułowanej**

**Three-body physics of ultracold gases: theory of weakly bound quantum
states in strongly interacting systems**

Analiza formalna

Praca doktorska mgr. Jacka Gębali nosi tytuł „Three-body physics of ultracold gases: theory of weakly bound quantum states in strongly interacting systems”, jest napisana w języku angielskim. Liczy 143 strony i jest logicznie podzielona na 8 rozdziałów. Dziewiąty rozdział to bibliografia licząca 297 pozycji – imponująca liczba, typowa dla obszernych monografii. Trzy początkowe rozdziały stanowią wprowadzenie do badanych zagadnień: rozdział pierwszy omawia główne osiągnięcia, przede wszystkim eksperymentalne, w dziedzinie ultrazimnych gazów kwantowych; rozdział drugi jest poświęcony opisowi najważniejszych rezultatów, zarówno doświadczalnych jak i teoretycznych dotyczących procesów trzyciałowych, ze szczególnym naciskiem na fizykę stanów Efimova. Kolejny, trzeci rozdział przedstawia bardzo szczegółowo teoretyczne aspekty opisu problemu trzech ciał. Rozdział czwarty został pomyślany jako przegląd uniwersalnych własności procesów trzyciałowych w granicy gdy długość rozpraszania jest największą skalą długości. Autor przedstawia w tym rozdziale główne koncepcje oraz wyprowadzenia znanych wyników. Dodatkowo, w części 4.3 – Effective range theory, która opiera się na pracy [227], do której mgr J. Gębala, zgodnie z własnym oświadczeniem, wniósł wiodący i znaczący wkład badawczy, przedstawione są nowe i oryginalne wyniki.

Główne wyniki rozprawy zawarte są w rozdziale piątym, gdzie mgr. J. Gębala bada układ jon-atom-atom, oraz w rozdziale szóstym, w którym bada procesy trzyciałowe, stany Efimova i szybkości zderzeń w funkcji szerokości rezonansu, koncentrując się na wąskich rezonansach Feshbacha.

M. Gajda

Rozdział siódmy poświęcony jest omówieniu źródeł błędów numerycznych i metod numerycznych zapewniających obliczenia o dużej dokładności. Rozdział ósmy podsumowuje najważniejsze osiągnięcia pracy oraz wskazuje kierunki dalszych badań.

Rozdziały rozprawy zawierające oryginalne wyniki kandydata oparte są na opublikowanej pracy i na pracy przygotowanej do publikacji. W części rozdziału czwartego (4.3) oraz w rozdziale piątym zawarte są istotne fragmenty opublikowanej pracy, i w mojej ocenie ich wysokie podobieństwo do opublikowanych artykułów uniemożliwia opublikowanie pracy doktorskiej w internetowym depozytorium arxiv. Stawia to pod znakiem zapytania sens pisanie rozprawy w języku angielskim. A szkoda, bo rozdział trzeci zawiera mnóstwo szczegółowych technicznych informacji, które mogą być pożyteczne dla studentów i doktorantów.

We wstępie do rozdziału szóstego autor powtarza (po raz któryś z kolei) podstawowe informacje dotyczące stanów Efimowa i fizyki trzyciałowej. Dlatego rozdział sprawia wrażenie samodzielnej publikacji naukowej blisko związanej z tematyką rozprawy ale niezbyt spójnie dołączonej do niej. Powtarzanie tych samych informacji nie stwarza wrażenia jednolitego opracowania.

Mam więc pewien niesmak czytając rozprawę, w której autor w niektórych rozdziałach, poza drobnymi modyfikacjami, praktycznie przepisuje artykuł naukowy (którego jest jego ważnym współautorem) zamiast opisać osiągnięcie z własnej perspektywy własnymi słowami. W przypadku ocenianej rozprawy odnoszę wrażenie, że napisanie pracy w języku angielskim służyło wyłącznie temu, aby ułatwić kandydatowi takie właśnie kopiowanie. Mimo, że taka forma jest dopuszczalna w opinii Rady Doskonałości Naukowej, jestem zdecydowanym krytykiem takiej formy.

Kwestię formy rozprawy doktorskiej reguluje art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce w ust. 3:

Art. 187 ust. 3:

„Rozprawę doktorską może stanowić praca pisemna, w tym monografia naukowa, zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych, praca projektowa, konstrukcyjna, technologiczna, wdrożeniowa lub artystyczna, a także samodzielna i wyodrębniona część pracy zbiorowej.”

Rozprawa doktorska w formie monografii powinna zawierać samodzielne opracowanie oryginalnego zagadnienia naukowego. Niniejsza rozprawa jest hybrydą klasycznej monografii naukowej i zbiorem opublikowanych (lub przyjętych do druku) artykułów naukowych. Trzy pierwsze rozdziały i fragment rozdziału czwartego są oryginalnym ujęciem autora, część

M. Gajda

rozdziału czwartego i rozdział piąty są praktycznie kopią pracy zbiorowej i w tych częściach autor złożył stosowne oświadczenia o wkładzie własnym, który jest istotny.

Mam problem z zaklasyfikowaniem tej rozprawy. Niewątpliwie nie jest to zbiór opublikowanych prac – przepisana jest tylko jedna praca. Rozprawa wygląda więc bardziej jak monografia, ale wtedy oczekiwałbym, że będzie stanowiła jednolite opracowanie. Dosłowne kopiowanie całych rozdziałów z publikacji wieloautorskich, jest, w mojej ocenie, pewnym wypaczeniem idei ustawy.

Mimo tych uwag stwierdzam, że rozprawa jest zgodna z interpretacją podaną przez Radę Doskonałości Naukowej, spełnia więc wymogi formalne nałożone przez ustawę.

Ocena merytoryczna

Cel i główne wyniki rozprawy

Mgr Jacek Gębala w rozprawie doktorskiej bada zderzenia trzyciałowe w ultrazimnych układach atomowych. W szczególności praca dotyczy jonów baru zanurzonych w licie w warunkach bardzo silnego oddziaływania atom-atom. Jednym z głównych celów rozprawy jest charakteryzacja uniwersalnych i nieuniwersalnych cech rezonansów Feshbacha, (zdominowane przez zamknięty lub otwarty kanał – wąskie lub szerokie rezonanse) w kontekście procesów trzyciałowych i stanów Efimova. Podstawowym zadaniem jest wyznaczenie szybkości zderzeń (collision rates) dla kanałów prowadzących do powstania cząsteczek Li_2 , którym towarzyszą straty jonów baru. Oprócz tego wyznaczono stany kwantowe cząsteczek BaLi^+ , które powstają w zderzeniach jonu z dimerem Feshbacha.

Trzyciałowe procesy są bardzo ważne w układach ultrazimnych gazów kwantowych. Są one między innymi odpowiedzialne za czas życia układu. Ich zrozumienie i możliwość kontroli jest bardzo istotna z punktu widzenia eksperymentów. Trzyciałowe zderzenia są również ważnym sensorem różnych efektów, takich jak rezonanse Feshbacha czy też stanów Efimova lub ultrazimnej chemii. O ile dobrze uniwersalność stanów Efimova w przypadku heterojądrowych stanów z krótkozasięgowym oddziaływaniem jest dobrze zrozumiana, to zrozumienie stanów Efimova w przypadku długozasięgowych oddziaływań jest dość słabe. Dlatego badania procesów zderzeniowych w układach jon-dimer prowadzących do utraty jonu ma duże znaczenie dla prowadzonych obecnie badań z wykorzystaniem jonów baru i iterbu.

Autor rozwiązuje wielokanałowe równanie Schroedingera zapisane we współrzędnych hipersferycznych w celu wyznaczenia związanych stanów i stanów rozproszonych układu dwóch atomów litu i jonu berylu. Oddziaływanie lit-lit jest opisane potencjałem Lenarda-

M. Gębala

Jonsa proporcjonalnym do $1/r^6$, z parametrami dobranymi tak, aby odtworzyć eksperymentalną wartość długości rozpraszania. Potencjał lit jon baru proporcjonalny do $1/r^4$, zawiera parametr, którego wartość jest zmieniana aby móc opisać układ w pobliżu rezonansu Feshbacha atom-jon. W rozprawie doktorskiej mgr Jacek Gębala pokazuje, że rzeczywiste układy trójciałowe wykazują istotne odstępstwa od uniwersalnej teorii Efimowa z powodu skończonego zasięgu oddziaływań jon-atom i właściwości rezonansów Feshbacha.

Ocena poszczególnych rozdziałów rozprawy

Wstęp do rozprawy jest trochę chaotyczny. Ma on za zadanie przedstawić bogaty dorobek dziedziny. Ale w mojej ocenie jest to bardzo fragmentaryczny opis, w którym dobór omawianych osiągnięć w dziedzinie jest trochę przypadkowy. Trudno znaleźć myśl przewodnią. Ta część jest trochę niespójna i niekompletna. Nie jest łatwo podsumować ponad trzydziestoletnią historię burzliwie rozwijającej się gałęzi fizyki. Na marginesie dodam, że mgr. J. Gębala uważa że ta historia liczy tylko 25 lat (w „Summary” i na str.6).

Niektóre z odwołań do źródeł literaturowych wydają się dość dziwne. Przykładowo mgr J. Gębala mówiąc o rozwoju badań ultrazimnych gazów dipolowych słusznie cytuje fundamentalną pracę grupy T. Pfaua z roku 2005, ale tuż obok, mówiąc o dalszych osiągnięciach, podaje odwołanie do pracy dotyczącej cieplnych własności polarnych molekuł [23]. Jest to wielki przeskok myślowy. Cytowanie tej pracy wydaje się nieuzasadnione.

I podobnie: nie bardzo rozumiem dlaczego mówiąc o chłodzeniu laserowym mgr J. Gębala cytuje prawie niezauważoną przez środowisko pracę [2]. W tym miejscu powinny znaleźć się cytowania doniosłych prac dotyczących chłodzenia laserowego, za co przyznano nagrodę Nobla. I o tym autor wie, bo cytuje w dalszej części rozprawy stosowne wykłady Noblowskie. Powód cytowania tej bliżej nieznanej pracy powinien być jakoś wyjaśniony w tekście.

Natomiast pisząc o mieszaninach bozonowo-fermionowych ważne eksperymenty grupy Cheng-China są całkowicie pominięte.

W rozdziale drugim mgr J. Gębala przedstawia osiągnięcia fizyki trójciałowej, której dotyczy jego rozprawa doktorska. Nie mam większych uwag do tej części pracy, ale muszę zaprotestować przeciwko stwierdzeniu na stronie 15, gdzie autor mówi o pierwszym doświadczeniu, w którym wytworzono stany Effimova w ultrazimnych gazach. Cytuję:

“One of the first series of works includes studies by the Ferlino group ...”

Rzeczywiście Francesca Ferlino jest pierwszym autorem pracy, ale była ona w tym czasie stażystą (post-doc) w grupie kierowanej przez prof. R. Grimma. Należałoby właściwie docenić bardzo ważny wkład R. Grimma w dziedzinę ultrazimnych atomów. Jest on wychowawcą

M. Gębala

szeregu fizyków odnoszących obecnie spore sukcesy naukowe. F. Ferlaino należy do tego grona. Osiągnęła ona później bardzo znaczące wyniki jako kierownik zespołu, ale dotyczą one raczej gazów dipolowych.

W rozdziale trzecim autor opisuje metody opisu problemów trzyciałowych które prowadzą do wielokanałowych równań dostosowanych do obliczeń numerycznych w celu wyznaczenia energii stanów związanych, szybkości rekombinacji i czasów życia. Mgr J. Gębala definiuje współrzędne Jacobiego, współrzędne hipersferyczne, przybliżenie adiabatyczne, współrzędne Johnsona, kąty Eulera, rozwinięcie Fadeeva, itd. W szczególności przedstawia szczegółowe wyprowadzenie formalizmu równania Schrodingera w zmiennych hipersferycznych.

Wyprowadza wyrażenia analityczne na różne wyrazy hamiltonianu wynikające z laplasjanu w tych współrzędnych. Autor nie ogranicza się do końcowych wyników, ale przedstawia wszystkie pośrednie kroki. Jest to kompendium wiedzy dla kogoś, kto chciałby nauczyć się metody teoretycznej od podstaw, wyprowadzając wszystkie równania z pierwszych zasad. W moim odczuciu część tych wyprowadzeń powinna być przedstawiona w dodatku.

Rozdział czwarty przedstawia najważniejsze wyniki dotyczące uniwersalności w fizyce układów kilku ciał. Autor pokazał, że uniwersalne własności układów trójciałowych wynikają z długozasięgowego potencjału proporcjonalnego do $1/R^2$, niezależnego od szczegółów oddziaływań na krótkich odległościach.

Oryginalny wkład mgr. J. Gębali w teorię efektywnego zasięgu, jest przedstawiony w części 4.3. Autor pokazuje, że dla układów jon–atom klasyczne rozwinięcie efektywnego zasięgu musi zostać zmodyfikowane z powodu długozasięgowego potencjału polaryzacyjnego $1/r^4$. Mgr J. Gębala zaproponował uogólnione rozwinięcie zawierające dodatkowe wyrazy proporcjonalne do $k^2 \ln k$, a wyniki numeryczne potwierdzają zgodność z przewidywaniami teoretycznymi. Autor wskazuje, że oddziaływania długozasięgowe prowadzą do odejścia od klasycznej uniwersalności van der Waalsa i wyznaczają nową klasę uniwersalnego zachowania układów kwantowych.

Wyniki dotyczące wspomnianego wyżej rozwinięcia pokazano na rys. 4.4. Niestety opis rysunku jest mętny (identyczny jak w publikacji, której współautorem jest mgr J. Gębala), miałem trudności z identyfikacją różnych ciągłych i przerywanych kolorowych linii. Podsumowanie rysunku w tekście rozprawy wydaje mi się niewystarczające.

Rozdział piąty „Weakly bound three-body states in ion-atom-atom systems” opiera się na opublikowanej pracy:

- J. Gębala, M. Tomza, J. P. D’Incao, *Universality in ionic three-body systems near an ion-atom Feshbach resonance*, Physical Review Letters (2026).

M. Gębala

Na początku rozdziału autor szczegółowo określa swój udział. Stwierdza, że wnioś wiodący i istotny wkład („leading and substantial contributions”), obejmujący: wykonanie wszystkich obliczeń numerycznych z wykorzystaniem infrastruktury PLGrid, opracowanie oprogramowania do analizy danych, przygotowanie wszystkich wykresów, udział w dyskusji naukowej, wprowadzenie modyfikacji do kodów numerycznych opracowanych wcześniej przez J. P. D’Incao, przygotowanie pierwszej wersji manuskryptu.

W tym rozdziale mgr. Jacek Gębala przedstawia analizę słabo związanych stanów trójciałowych w układach złożonych z dwóch atomów i jonu, ze szczególnym uwzględnieniem mieszaniny LiLiBa^+ . Otrzymane wyniki porównuje z analogicznymi dla neutralnego układu LiLiBa .

Ze względu na długozasięgowe oddziaływanie jon-atom, stany Efimowa w tym przypadku są zmodyfikowane w porównaniu do ich atomowych odpowiedników. Autor wykazuje, że jonowe stany Efimowa charakteryzują się znacznie dłuższymi czasami życia, nawet o pięć rzędów wielkości, za co ma odpowiadać mniejsza rola procesów nieelastycznych oraz mniejsza energia wiązania. J. Gębala analizuje również widmo trójatomowych stanów molekularnych oraz proces rekombinacji trójciałowej w szerokim zakresie energii. Uzyskane wyniki wskazują, że układy jonowe posiadają gęstsze widmo stanów związanych i mogą tworzyć wyjątkowo trwałe trimery. W dalszej części rozdziału mgr J. Gębala pokazał, że uniwersalne własności w układach jonowych są bardziej odporne na zmiany oddziaływania między dwoma atomami niż w układach neutralnych. Oznacza to, że własności trójciałowe są w większym stopniu determinowane przez oddziaływanie jon–atom niż atom–atom. Autor wskazuje, że ultrazimne układy jonowo-atomowe stanowią obiecującą platformę do obserwacji długożyjących stanów Efimowa oraz badania uniwersalnych zjawisk w procesach angażujących kilka ciał. Podsumowując: najważniejszymi oryginalnymi wynikami rozdziału 5. jest wykazanie, że układ Li-Li-Ba^+ należy do nowej klasy uniwersalności układów trójciałowych z oddziaływaniami jon–atom, oraz przewidzenie, że stany Efimowa w układzie LiLiBa^+ mają czasy życia nawet o pięć rzędów wielkości dłuższe niż w układzie neutralnym LiLiBa .

Ten rozdział pracy uważam za bardzo ciekawy i jest on najważniejszym osiągnięciem rozprawy doktorskiej.

Jeśli chodzi o krytyczne uwagi, to nie jest dla mnie oczywiste, że mniejsze energie wiązania automatycznie oznaczają dłuższe czasy życia. Jaki jest fizyczny mechanizm uzasadniający takie stwierdzenie? Czy chodzi tu o większy rozmiar tego słabo związanego stanu i małe przekrycie z niżej leżącymi stanami związanymi? A jak wrażliwy jest układ na zewnętrzne pole elektryczne? Jakiś drobny komentarz i uzasadnienie byłoby pożyteczne.

M. Gębala

Autor zapowiada we wstępie, że jego obliczenia są ważne dla doświadczeń z jonami baru i iterbu i służą:

"...to characterize three-body processes occurring in a system consisting of a trapped ytterbium or barium ion immersed in a lithium gas..."

Niestety, nie znalazłem żadnego odniesienia w jakim stopniu uzyskane w tym rozdziale wyniki przenoszą się na przypadek jonu iterbu. Skoro jest to ważny z punktu widzenia układu i autor anonsuje we wstępie wspomniany powyżej cel badań to taka dyskusja byłaby pożądana.

Pojęcie "time delay" jest zupełnie nieokreślone na str. 95 i 111. Podano odnośnik do publikacji. O ile w publikacji naukowej wystarczy podać odnośnik do pozycji literaturowej, w rozprawie doktorskiej oczekuje się pełnego wyjaśnienia używanych pojęć.

Definiując bardzo ważną dla rozprawy wielkość – stałą rekombinacji trójciałowej L_3 , wzór (5.2), mgr J. Gębala zamiast wyjaśnienia odsyła do publikacji [225]. Oczekiwałbym przynajmniej jakiegoś krótkiego komentarza, gdyż wzór nie jest oczywisty. Podobnie wzory (5.3) oraz (5.9) pojawiają się jak wyciągnięte z rękawa.

Rozdział 6 (Universality near narrow Feshbach resonances) jest oparty na badaniach będących w trakcie przygotowania do publikacji, (wspólnie z M. Tomzą i J. P. D'Incao) Rozdział ten jest poświęcony analizie uniwersalności fizyki Efimowa w pobliżu wąskich rezonansów Feshbacha. Autor bada, w jaki sposób szerokość rezonansu, opisywana parametrem s_{res} , wpływa na własności stanów trójciałowych. J. Gębala wykorzystał zmienne hipersferyczne i przybliżenie adiabatyczne. Parametr s_{res} był kontrolowany poprzez zmianę siły sprzężenia między kanałami otwartym i zamkniętym rezonansu. Przeprowadzone obliczenia dla różnej liczby kanałów zamkniętych i otwartych pokazują, że dla szerokich rezonansów spełniona jest uniwersalność van der Waalsa, natomiast dla wąskich rezonansów pojawiają się wyraźne odstępstwa od przewidywań uniwersalnej teorii. Objawiają się one zmniejszeniem energii wiązania stanów Efimowa oraz skróceniem ich czasu życia. Autor wykazuje, że źródłem tych efektów jest pojawienie się efektywnego odpychającego oddziaływania w kanale atom–dimer przy większych hiperpromieniach. Dodatkowo zbadano wpływ oddziaływań za pomocą dodatkowego potencjału typu soft-wall, co pozwoliło lepiej zidentyfikować mechanizm łamania uniwersalności. Mgr J. Gębala pokazuje, że szerokość rezonansu Feshbacha jest jednym z kluczowych parametrów decydujących o granicach obowiązywania uniwersalnej teorii Efimowa oraz o strukturze stanów trójciałowych.

M. Gębala

Moje krytyczne uwagi w tej części rozprawy nie odnoszą się do zagadnień merytorycznych. Jak już wspominałem, rozdział szósty zawiera wstęp, który wydaje się być wstępem do samodzielnego artykułu naukowego, a nie do kolejnego rozdziału rozprawy doktorskiej. Po raz któryś z kolei mgr Jacek Gębala wyjaśnia istotę stanów Effimova i związanej z nimi fizyki. Burzy to nieco spójność rozprawy.

Na zakończenie chcę powiedzieć, że bardzo ciekawy jest rozdział siódmy „Strategies for computational accuracy”. Tam dopiero można się dowiedzieć jak autor obliczał różne wielkości fizyczne dotyczące badanego problemu.

Praca jest napisana dość starannie, aczkolwiek znalazłem pewną liczbę drobnych błędów:

1. Zmienna λ na stronie 6 nie jest zdefiniowana
2. W podrozdziale 1.2
Przesadą jest stwierdzenie, że “Ultracold ions have become a central part of ultracold physics ”
3. L_3 nie zdefiniowane na stronie 15
4. We wzorze (4.21) definiującym H_J brak minusa przed drugą pogodną.
5. Str. 60: β jest zasięgiem oddziaływania ale wcześniej tak oznaczono jeden z kątów.
Należałoby ujednolicić oznaczenia.

Błędy te nie mają żadnego znaczenia dla oceny rozprawy doktorskiej.

Podsumowując, mgr Jacek Gębala wykazał się dogłębną znajomością problematyki ultrazimnych zderzeń trzyciałowych i stanów Efimova. Poziada on również dużą i ugruntowaną wiedzę dotyczącą zaawansowanych wielokanałowych obliczeń kwantowych. W rozprawie rozwiązał bardzo ważki i aktualny problem związany ze stanami Efimova w układach atom-atom-jon, zbadał czasy życia tych stanów oraz warunki uniwersalności.

Wobec powyższej oceny stwierdzam, że przedłożona rozprawa doktorska mgr. Jacka Gębali spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z późniejszymi zmianami, i wnoszę o dopuszczenie mgr. Jacka Gębale do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

M. Gajda
Mariusz Gajda