

prof. dr hab. Roman Ciuryło  
Instytut Fizyki  
Uniwersytet Mikołaja Kopernika

**Ocena dorobku naukowego i jednotematycznego cyklu publikacji  
dra Krzysztofa Jachymskiego pt.: „Inżynieria kwantowa złożonych ultrazimnych układów  
atomowych”**

Osiągnięciem naukowym dr. Krzysztofa Jachymskiego przedłożonym do ocen jest jednotematyczny cykl dziesięciu publikacji. Prace zostały opublikowane w czasopismach naukowych: Physical Review A – 3 prace, Physical Review Letters – 2 prace, Journal of Physics B – 2 prace, Physical Review Research – 1 praca, Applied Science – 1 praca, Communications Physics – 1 praca. Dr Krzysztof Jachymski był jedynym autorem dwóch spośród nich. Ten wybór publikacji jest odpowiedni jeśli chodzi o ich powiązanie tematyczne. W siedmiu pracach rola habilitanta była wiodąca a w trzech znacząca i polegała w nich przede wszystkim na wykonaniu obliczeń rozproszonych dostarczając odpowiednich przekrojów czynnych. Oświadczenie dr. Krzysztofa Jachymskiego dotyczące jego wkładu w prace cyklu są zgodne z oświadczeniami pozostałych współautorów.

Wybrane publikacje są częścią szerokiego nurtu badań nad kwantowymi własnościami ultrazimnej materii. Z jednej strony badania te mają już bogatą historię i zaowocowały szeregiem nagród Nobla. Z drugiej strony rozwiązywanie stawianych na początku problemów (takich jak: chłodzenie atomowe, kondensacja Bosego-Einsteina, kontrola oddziaływań, tworzenie skorelowanych par fermionowych, optyczne zegary atomowe ...) powoduje pojawianie się kolejnych pytań i wyzwań o coraz bardziej złożonym charakterze. Wraz z przełamywaniem kolejnych barier technologicznych badania nad i z wykorzystaniem ultrazimnej materii stały się jedną z najprężniej rozwijanych gałęzi współczesnej fizyki. Dostarczają kolejnych nowych platform badawczych. Prace cyklu przedłożonego przez dr. Krzysztofa Jachymskiego eksplorują własności oraz zastosowania magnetycznych rezonansów Feshbach w układach atomowych ograniczonych przestrzenią w pułapkach i jonów oddziałujących z ultrazimnymi gazami atomowymi.

Pierwsza grupa prac to prace poświęcone inżynierii stanów kwantowych układów dwuatomowych w przestrzeni ograniczonej polem pułapki oraz ich zastosowaniem w magnetometrii. Autor bada tu własności stanów z uwzględnieniem anizotropii i anharmoniczności pola pułapkującego atomy oraz biorąc pod uwagę kontrolowane polem magnetycznym oddziaływanie międzyatomowe. Zmienność długości rozpraszania charakteryzującej oddziaływanie dwuatomowe wynika tu z występowania jednego lub więcej magnetycznych rezonansów Feshbacha. Te rezonanse niezwykle czułe na indukcję pola magnetyczne powodują silną zmienność transmisji atomu



zderzającego się z innym uwięzionym w ciasnej pułapce optycznej, co można następnie wykorzystać w magnetometrii.

W jednoautorskiej pracy habilitanta [H10] wychodząc poza to co zostało pokazane w pracach [T. Bush, B. Englert, K. Rzazewski, M. Wilkens, *Found. Phys.* 28, 549 (1998)] i [E. L. Bolda, E. Tiesinga, P. S. Julienne, *Phys. Rev. A* 66, 013403 (2002)] przedstawione są wyniki dla trójwymiarowych pułapek anizotropowych idących do granic pułapek jedno i dwu wymiarowych. Zbadane zostały własności dwóch interferujących ze sobą rezonansów Feshbach. Ponadto zostały wykonane modelowe obliczenia dla realistycznego przypadku K-Rb badanego doświadczalnie w JILA [J. P. Covey, S. A. Moses, M. Gärttner, A. Safavi-Naini, M. T. Miecnikowski, Z. Fu, J. Schachenmayer, P. S. Julienne, A. Maria Rey, D. S. Jin, J. Ye, *Nat. Commun.* 7, 11279 (2016)]. Wyniki przedstawione w tej pracy pokazały jak dobrać odpowiednią siłę pola pułapkującego by interferujące ze sobą rezonanse pozostawały rozseparowane. Umożliwia to adresowanie konkretnego stanu molekularnego unikając tworzenia superpozycji stanów. Oczywiście praca ta pokazuje również jak tworzyć doświadczalne warunki dla tworzenia superpozycji stanów molekularnych co również jest interesujące.

W kolejnej jednoautorskiej pracy habilitanta [H6] uwaga została skupiona na odtworzeniu podstawowych cech stanów dwuatomowych z uwzględnieniem możliwości tunelowania między sąsiednimi oczkami sieci optycznej. Tu ograniczono się do rozważenia jedynie dwóch oczek sieci modelowanych poprzez podwójną pułapkę. W takim przypadku stany ruch środka masy i stany ruch względnego atomów nie mogą być traktowane niezależnie. Ich sprzężenia prowadzą do pojawiających się antyprzecięć w zależności energii stanów od zmieniających się długości rozpraszania wraz ze zmianą pola magnetycznego. Co ważne te antyprzecięcia mogą być obserwowane doświadczalnie poprzez indukowany wzrost strat atomów z pułapki.

Praca [H8] przedstawia ideę zastosowania jednoatomowej bramki do pomiaru pola magnetycznego. Atom bramkujący jest umieszczony w quasijednowymiarowej pułapce optycznej przypominającej rurkę. Na tak przygotowany układ zostaje puszczony atom wzdłuż rurki ze ściśle określoną energią. Taki atom albo zostaje odbity albo „przechodzi przez” atom bramkujący. Prawdopodobieństwo transmisji jest zależne od przekroju czynnego na zderzenie, który może być modyfikowany przez magnetyczny rezonans Feshbacha. Tak więc dobierając odpowiednie parametry układy można wykorzystać do pomiaru transmisji atomowej do pomiaru pola magnetycznego.

Praca [H7] jest rozszerzeniem poprzedniej idei. Wykorzystywana jest tam macierz quasijednowymiarowych pułapek z pojedynczymi atomami bramkującym. Proponowany układ jest ładnie zilustrowany rysunkiem 1 pracy [H7]. Takie podejście może pozwolić na pomiar pola magnetycznego z rozdzielczością przestrzenną rzędu paruset nanometrów w dwóch wymiarach przestrzennych jednocześnie. W konsekwencji proponowany układ pozwala również na wyznaczenie gradientu składowych pola magnetycznego.

Mimo, że wyniki prac [H6] i [H10] nie zyskały dotąd silnego oddźwięku w publikacjach innych badaczy to prezentowane spostrzeżenia należy uznać za oryginalne, ciekawe oraz istotne. Na szczególne uznanie zasługuje praca [H8], której dr Krzysztof Jachymski jest pierwszym współautorem, prezentująca bardzo oryginalny pomysł pomiaru pola magnetycznego poprzez pomiar transmisji

atomów zderzających się z pojedynczymi atomami uwięzionymi w ciasnych pułapkach quasijednowymiarowych. Oryginalność tego pomysłu została doceniona przez recenzentów prestiżowego *Physical Review Letters* a dalsze możliwości rozwoju eksploatuje praca [H7].

Drugie zagadnienie rozważane przez habilitanta dotyka szalenie aktualnej problematyki zachowania ultrazimnych gazów w których oddziaływanie międzyatomowe jest dalekozasięgowe i ma charakter dipolowy. Uwaga jest tu skupiona na realistycznym opisie rozpraszania międzyatomowego wychodzącym poza często stosowane przybliżenie Borna oraz zastosowania go do opisu kropli kwantowych.

W pracy [H9] zostały przeprowadzone kwantowo mechaniczne obliczenia kątowej zależności amplitudy rozpraszania dla  $E_r$  oraz  $D_y$  i porównane z prostym dobrze znanym wyrażeniem analitycznym wynikającym z przybliżenia Borna. Okazało się, że analityczne wyrażenie na amplitudę rozpraszania znacznie lepiej zgadza się z obliczeniami numerycznymi gdy skala długości oddziaływania dipolowego  $R_{dd}$  zastąpiona jest przez od odpowiednio dobrany efektywny parametr  $\alpha_{dd}$ . Parametr ten jest zmienny i zależy od stosunku  $R_{dd}$  do długości rozpraszania. Możliwość zmiany długości rozpraszania oczywiście wynika z zastosowania magnetycznych rezonansów Feshbacha. To spostrzeżenie pozwoliło na bardzo prostą modyfikację analitycznego pseudopotencjału opisującego binarne oddziaływanie między atomowe bazującego na przybliżeniu Borna poprzez proste zastąpienie  $R_{dd}$  przez  $\alpha_{dd}$ . Taki pseudopotencjał został następnie użyty w zmodyfikowanym równaniu Grossa-Pitaevskiego do opisu własności kropli kwantowych.

Wyniki obliczeń w pracy [H9] pozwoliły uzyskać lepszą zgodność z doświadczeniem na określenie warunków stabilności kropli kwantowych  $D_y$  [F. Böttcher, M. Wenzel, J.-N. Schmidt, M. Guo, T. Langen, I. Ferrier-Barbut, T. Pfau, R. Bombín, J. Sánchez-Baena, J. Boronat, F. Mazzanti, Phys. Rev. Res. 1, 033088 (2019)] i stały się jednym z podejść referencyjnych w badaniach korelacji w układach wielodziałowych. Praca [H9] zyskała też zainteresowanie innych badaczy, którzy cytowali ją już paręnaście razy. Uważam że praca ta stanowi istotne osiągnięcie rozszerzające nasze rozumienie skorelowanych układów wieloatomowych mimo, że w swej głównej oryginalnej części praca skupiona jest na poprawnym opisie oddziaływania dwucząstkowego.

Trzecia problematyka ujęta w przedłożonym cyklu prac jest związana z oddziaływaniem jonów o niskiej energii kinetycznej z ultrazimnymi atomami.

Praca [H2] przedstawia wyniki pionierskiego eksperymentu umożliwiającego pomiar ruchliwości jonów w zdegenerowanym gazie bozonowym oraz konfrontację z wynikami obliczeń teoretycznych. Imponująca jest tu zgodność wyniku doświadczalnego i symulacji na poziomie oszacowanych niepewności. Praca ta została opublikowana w *Physical Review Letters* i wyróżniona przez edytorów mianem „Editors’ Suggestion” oraz „Featured in Physics”. Mimo, że dr Krzysztof Jachymski nie był wiodącym autorem tej pracy to jego wkład w to osiągnięcie był niebagatelny. Jak sam pisze: „uczestniczył w analizie wyników eksperymentu” a co wydaje się jeszcze istotniejsze „wykonał obliczenia rozproszeniowe i dostarczył przekroje czynne potrzebne w symulacjach”. Należy podkreślić, iż często w nowatorskich pracach gdzie wyrafinowany eksperyment spotyka się z zaawansowanym modelowaniem teoretycznym otrzymanych wyników, oba aspekty pracy:

doświadczalny i teoretyczny są równie cenne dla końcowego wyniku i stanowią poważne przedsięwzięcia same w sobie. Obliczenia przekrojów czynnych wykonane przez dr. Krzysztofa Jachymskiego stanowią bardzo istotny wkład w to osiągnięcie i dobrze się wpisują w przedłożony cykl publikacji.

Podobny charakter miał udział habilitanta w pracy [H3] poświęconej równie ciekawemu problemowi formowania się w procesie trójciałowym molekularnych jonów  $Rb_2^+$  w różnych stanach oscylacyjnych zależnie od czasu oddziaływania jonu ze zdegenerowanym gazem atomowym. Ta praca wydaje mi się równie oryginalna i ciekawa co [H2].

W kolejnej pracy [H5] dr Krzysztof Jachymski jest znów niekwestionowanym liderem projektu. Praca ta podaje metodologie opisu nieelastycznych zderzeń molekularnych jonów z atomami. Ważnym spostrzeżeniem tej pracy było wskazanie na uniwersalny charakter tego typu zderzeń ze względu na długo zasięgowe oddziaływania opisywane prostym wyrażeniem potęgowym. To właśnie podejście opracowane w tej pracy (a nie jak zwozdi nas nieco habilitant, wskazując w autoreferacie na prace [H4]) zostało użyte by opisać wyniki doświadczalne pracy [H3].

W pracach [H2] i [H3] dr Krzysztof Jachymski w istotny sposób przyczynił się do rozumienia dynamiki w pionierskich eksperymentach z atomowymi i molekularnymi jonami oddziałującymi z kondensatem Bosego-Einsteina (BEC) poprzez obliczenie odpowiednich przekrojów czyny na zderzenia. Na szczególne uznanie zasługuje praca [H5], która stanowiła podstawę analizy dotyczącej dynamiki obsadzania stanów oscylacyjnych w obecności BEC. Uważam te osiągnięcia za szczególnie ważne również dla przyszłych badań prowadzonych w tej dziedzinie.

Ostatnią czwartą problematyką ujętą w cyklu prac habilitacyjnych są kwantowe symulacje, które pozwalają badać stany i procesy uciążliwe lub wręcz nie traktowalne za pomocą obliczeń numerycznych na klasycznych komputerach.

Praca [H4] (a nie wskazana w autoreferacie praca [H2]) prezentuje opis układu jonów zanurzony w gazie atomowym. Jest to platforma mogąca służyć do modelowania zachowania gazu elektronowego w sieci jonów. Przez dobór odpowiednich parametrów rozważanego układu możliwe stają się badania dynamiki tworzących się polaronów i bipolaronów. Uwzględnia się tu daleko zasięgowe oddziaływanie między atomami indukowane przez fonony. Co ważne w ten sposób można było wykonywać symulacje procesów prowadzących do parowania fermionów a co za tym idzie do nadprzewodnictwa.

Ostatnią pracą cyklu jest już opublikowana [G. E. Astrakharchik, L. A. Peña Ardila, R. Schmidt, K. Jachymski, A. Negretti, Nat. Comm. 4, 94 (2021)] praca [H1]. Rola habilitanta w jej powstaniu była istotna i obejmowała nie tylko analizę zderzeń dwuciałowych, ale też uczestnictwo w formułowaniu celów projektu, analizie danych i pisaniu manuskryptu. W pracy pokazano, że ze względu na występowanie porównywalnych różnych skal długości w układzie jonu i słabo oddziałującego gazu bozonowego możliwe jest powstanie mezoskopowego stanu o bardzo silnych korelacjach. Ponadto zidentyfikowano przejście między reżimem, w którym uzasadnione jest podejście perturbacyjne dla słabego oddziaływania jon-atom oraz wielociałowym, w którym silne korelacje odgrywają kluczową rolę.

Prace [H4] i [H1] wskazują bardzo interesujące sposoby realizacji symulacji kwantowych procesów zachodzących w ciałach stałych. To bardzo aktualna tematyka współczesnej fizyki a prace te stanowią istotny wkład w jej rozwój.

Osiągnięcie przedstawione do ocen stanowi istotny wkład w rozumienie i kontrolę zderzeń atomów w pułapkach oraz oddziaływanie jonów z ultrazimnymi atomami. Na szczególne podkreślenie zasługują prace o pionierskim charakterze wskazujące na nowe zastosowania w magnetometrii, inicjujące badania oddziaływania molekularnych jonów z kondensatem Bosego-Einsteina oraz proponujące konkretne rozwiązania dla platformy umożliwiające prowadzenie kwantowych symulacji.

Przedstawiony przez dr. Krzysztofa Jachymskiego dorobek naukowy obejmuje 32 publikacje. Do roku uzyskania stopnia doktora włącznie opublikowane zostało 11 prac. Osiągnięcie habilitacyjne składa się z 10 prac a pozostały dorobek stanowi 11 prac. W pozostałym dorobku można znaleźć prace na temat jonizacji Penninga, chaotycznych widm rezonansów Feshbach, modyfikacjom podejścia pola średniego czy rydbergowskich polarytonów. W tym szerokim tematycznie zakresie jest 6 prac których dr Krzysztof Jachymski jest pierwszym współautorem. Na podkreślenie zasługuje fakt, że 3 prace zostały opublikowane w prestiżowych czasopismach: Review of Modern Physics, Physical Review Letters, Nature Communication. Już teraz można stwierdzić, że prace dr. Krzysztofa Jachymskiego wywarły wpływ na innych badaczy, którzy cytowali jego prace ponad 470 razy zgodnie z Web of Science a indeks H jest równy 12. Zarówno samo osiągnięcie habilitacyjne jak i pozostały dorobek nie pozostawia żadnych wątpliwości, że jego autor jest świetnym badaczem podejmującym ciekawe wyzwania i kreatywnie podchodzi do ich rozwiązania. Osiągnięcie habilitacyjne wraz z pozostałym dorobkiem oceniam bardzo wysoko.

Dr Krzysztof Jachymski kierował projektami NCN PRELUDIUM, NCN OPUS, NAWA i był wykonawcą w dwóch innych projektach finansowanych przez NCN i DFG. Warto zaznaczyć, że uzyskał prestiżowe stypendium Fundacji Humboldta. Odebrał dwa kilkuletnie staże zagraniczne w latach 2015-2020 na University of Stuttgart oraz Forschungszentrum Jülich uzyskując tam istotne wyniki naukowe opublikowane w uznanych periodykach. O jego pozycji międzynarodowej świadczy szereg wykładów wygłaszanych na zaproszenie, wizyty w renomowanych ośrodkach badawczych (NIST, Harvard University, University of Maryland), współpraca z wiodącymi w świecie grupami wymienię tu tylko profesorów: Paula Julienna, Johannes Hecker Denschlaga, Tilmana Pfaua oraz recenzowanie dla czasopism takich jak: Physical Review Letters, Nature Communications, New Journal of Physics, EPL, Physical Review A.

Habilitant może się też pochwalić dorobkiem dydaktycznym i popularyzatorskim. Był opiekunem dwóch prac licencjackich i jednej magisterskiej na trzech różnych uniwersytetach w: Warszawie, Stuttgarcie i Kolonii. Prowadził szereg zajęć dydaktycznych obejmujących zaawansowane zagadnienia takie jak: Quantum Information Processing, Quantum gases and liquids, Advanced Quantum Mechanics, Ultracold quantum gases. Prowadził również ćwiczenia przedmiotów bardziej elementarnych takich jak: Analiza, Algebra, Mechanika i chemia kwantowa, Rachunek różniczkowy i

całkowity. Prowadził spotkania popularyzujące fizykę kwantową z uczniami liceum i członkami koła naukowego.

Przebieg kariery oraz osiągnięcia uzyskane przez doktora Krzysztofa Jachymskiego są wręcz modelowe. Jest uczonym prowadzącym nowatorskie badania i zdobył rozpoznawalną pozycję na arenie międzynarodowej. Zarówno jego osiągnięcia jak i pozostały dorobek naukowy oceniam bardzo wysoko. Podsumowując stwierdzam, iż przedstawione osiągnięcia oraz pozostały dorobek naukowy w pełni spełniają ustawowe oraz zwyczajowe wymagania stawiane w przewodach habilitacyjnych. Tym samym wnoszę o przystąpienie do dalszych kroków postępowania i nadanie doktorowi Krzysztofowi Jachymskiemu stopnia doktora habilitowanego.



---