

dr hab. Piotr Żuchowski

Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej

Instytut Fizyki, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

ul. Grudziądzka 5/7

87-100 Toruń

Recenzja pracy doktorskiej mgr. Krzysztofa Jachymskiego pt.

Quantum control of collisional properties of ultracold atoms and molecules

Praca doktorska mgr. Krzysztofa Jachymskiego wykonana została pod opieką promotora - dr hab. Zbigniewa Idziaszka w Instytucie Fizyki Teoretycznej na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Praca dotyczy tematyki bardzo aktualnej: minęło ledwie 20 lat od wyprodukowania pierwszych kondensatów Bosego-Einsteina, około 10 lat od początków wykorzystywania rezonansów Feschbacha w ultrazimnej fizyce, siedem lat od rozpoczęcia badań nad ultrazimnymi molekułami. Trzonem pracy doktorskiej jest wielokanałowa teoria defektu kwantowego, model rozpraszania kwantowego, rozwijany od wielu lat głównie przez prof. Paula Julienne z NISTu, w ostatnich latach intensywnie (i z sukcesami) rozwijanego przez dr hab. Zbigniewa Idziaszka, promotora pracy. Cztery z pięciu głównych rozdziałów pracy poświęcone są właśnie rozwojowi tej teorii i jej zastosowaniu do pewnych szczególnych, niezwykle istotnych z punktu widzenia eksperymentalnego układów. Praca doktorska opiera się ściśle na dziesięciu publikacjach naukowych wskazanych na stronie 99 i tylko na nich: tak więc każdy rozdział rozprawy doktorskiej przeszedł już proces *peer review* przed publikacją w odpowiednim piśmie. Rozprawa ta została jednak napisana w taki sposób, że czytający nie musi sięgać do oryginalnych publikacji. Językiem pracy jest język angielski. Praca zawiera około 250 odniesień, z których przeważającą większość stanowią publikacje z ostatnich 10 lat. Niezbyt intuicyjny jest algorytm sortowania owych referencji.

Zanim ustosunkuję się do treści pracy doktorskiej, zwrócę uwagę na dorobek publikacyjny mgr. Krzysztofa Jachymskiego. W chwili złożenia pracy doktorskiej Doktorant był autorem dwunastu prac, z których dziesięć jest ściśle związanych z tematyką pracy. Większość z tych prac ukazała się w ostatnich dwóch latach doktoratu, trudno więc analizować je z punktu widzenia bibliometrii, zwrócę jednak uwagę, że praca numerowana jako 1 na liście na stronie 99 ma już liczbę cytowań rzędu 15 (wg. Google Scholar). W przypadku siedmiu z tych prac Dok-

torant jest pierwszym autorem - wśród nich uwagę zwracają dwie publikacje w czasopiśmie *Physical Review Letters*. Szczególnie chciałem zaznaczyć fakt, że trzy z tych publikacji na liście autorów nie mają promotora. Świadczy to szczególnie o dojrzałości mgr. Jachymskiego jako naukowca i jego niezależności. Trzy z tych prac są rezultatem ścisłej współpracy z grupami eksperymentalnymi (kierowanych przez prof. Andreasa Osterwaldera oraz prof. Johanesa Heckera Denschlaga).

Krótko przedstawię treść rozprawy i moje uwagi:

- W rozdziale "Introduction" (czyli we wstępie) Autor krótko zarysowuje tło swoich badań. Przedstawia krótko tematykę ultrazimnych gazów, omawia zjawisko rezonansu Feshbacha i zastosowanie tych rezonansów do produkcji molekuł, podaje krótki opis (potencjalnych) zastosowań ultrazimnych gazów w informatyce kwantowej, oraz opisuje ultrazimną chemię, czyli eksperymenty zderzeniowe na molekułach w niskich i ultraniskich temperaturach. Przedstawiona nam zostaje również krótko historia metody defektu kwantowego. Na końcu tego rozdziału podaje również plan pracy oraz jej cele, pozwolę sobie więc je skomentować. Cele te zostały sprecyzowane nieco zachowawczo i ogólnie: sądzę, że Autor rozprawy chciał pozostawić sobie wyjście na te tematy które są najbardziej aktualne i interesujące z punktu widzenia eksperymentalnego. Była to trafiona strategia: eksperymenty prof. Osterwaldera, prof. Denschlaga czy prof. Nareviciusa, do których bezpośrednio odnosi się Autor pracy, dały pierwsze wyniki w 2012 i 2013 roku. Również praca dotycząca bramek kwantowych skonstruowanych w pułapkach nanoplazmowych jest szybką reakcją na publikacje które powstały po rozpoczęciu studiów doktoranckich przez mgr Jachymskiego (np. praca Gullasa z zespołu Mikhaila Lukina z 2012). Wypada więc pochwalić zarówno promotora jak i mgr. Jachymskiego za intuicję oraz niezamykanie się na potrzeby eksperymentatorów oraz najnowsze trendy badań teoretyków.

- Pierwszy rozdział pracy poświęcony jest modelowaniu zimnych zderzeń reaktywnych przy pomocy teorii defektu kwantowego dla szerokiego zakresu energii kinetycznych. Wprowadzony model jest bardzo ciekawy, jest uogólnieniem znanego modelu Langevina na przypadek kwantowego odbicia i tunelowania przez barierę centryfugalną oraz na przypadek gdy nie ma jednostkowego prawdopodobieństwa zajścia reakcji na krótkim zasięgu. Model poprawnie przewiduje zderzenia w okolicy rezonansu kształtu. Autor szeroko opisuje jakie przypadki model ten może opisywać słabo oraz zaznacza ścieżki rozwoju tej metody. Model ten bardzo udanie został wykorzystany w dalszej części pracy, mianowicie w opisie zderzeń

atomów metastabilnych gazów szlachetnych i jonizacji Penninga.

W tym miejscu od razu przeskoczę do rozdziału 4 -go gdzie właśnie autor opisuje zastosowanie teorii do modelowania jonizacji Penninga w niskich temperaturach. Wykorzystanie modelu z rozdziału 1 pozwoliło na wyciągnięcie informacji o prawdopodobieństwie reakcji chemicznej na krótkim zasięgu i przewidzenie zachowania stałej reakcji chemicznej dla szerokiego spektrum energii. Pokazano dobrą stosowalność tego modelu do układów takich jak $\text{He}(^3\text{S}_0) + \text{Ar}$ oraz $\text{He}(^3\text{S}_0) + \text{amoniak}$. Ciekawym pomysłem jest wykorzystanie MQDT to wyjaśnienia tzw. "branching ratio" dla produktów reakcji chemicznej. Warto tu jednak też wspomnieć że **zastosowanie modelu z jednym kanałem wejściowym i jednym reaktywnym** jest dużym uproszczeniem dla układów zawierających amoniak, z racji tego, że w amoniaku obecne jest tzw rozszczepienie tunelowe i w stanie $j=1$ mamy nie jeden, a dwa blisko leżące poziomy energetyczne, z których tylko jeden jest obsadzony w eksperymencie. Autor jednak sam czyni to zastrzeżenie. Z pewnością zarówno w eksperymencie jak i teorii zderzeń atom + amoniak jest jeszcze pole do poprawienia wyników.

- Drugi rozdział poświęcony jest rezonansom Feshbacha w układach ultrazimnych, w szczególności Autor wprowadza model opisu rezonansów nachodzących na siebie, co jest dużym wkładem do teorii opisu tych rezonansów i ma bardzo istotne, i aktualne znaczenie: w badanych ostatnio układach zawierających lantanowce o wysokim momencie magnetycznym (Er, Dy) widmo rezonansów Feshbacha jest bardzo gęste, model ten zdaje się być idealnie zaprojektowany do tego typu układów. Autor bardzo ciekawie przedstawia mechanizm poszerzenia rezonansu wąskiego pod wpływem znajdującego się w pobliżu rezonansu szerszego (rysunek 2.1). W tym samym rozdziale Autor opisuje też rezonans Feshbacha w obecności pułapki zewnętrznej wykorzystując metodę oddziaływania konfiguracji.

- Trzeci rozdział przedstawia wpływ ograniczeń przestrzennych (sieci optycznej) na zderzenia. Autor formułuje teorię zderzeń dla przypadku quasi-1D oraz quasi-2D parametryzując je zredukowaną długością rozpraszania oraz wcześniej wprowadzonym w rozdziale 1 parametrem y (miarą prawdopodobieństwa reakcji na krótkim zasięgu). Dodatkowo Autor prezentuje zastosowanie tej teorii dla przypadku zderzeń molekuł Rb_2 w stanie wibracyjnie podstawowym oraz w sieci optycznej - owoc współpracy z eksperymentatorami z grupy prof. Denschlaga. Model opisany w tym rozdziale poprawnie tłumaczy zderzenia tych molekuł w stanie rotacyjnym $R=0$. Ponadto rozdział trzeci zawiera przypadek oddziałującego gazu dipolowego w geometrii quasi-1D: tematyka ta jest bardzo szeroko badana od kilku lat w

związku z eksperymentami zderzeniowymi z molekułami KRb. Autor podaje jednak własny, model tych zderzeń i porównuje go z obliczeniami numerycznymi wykonanymi przez Andreę Simoniego i jego grupę. W świetle ostatnich badań rozpadu dipolowych molekuł Feschbacha Er_2 w pułapkach naleśnikowych model ten wydaje się bardzo interesujący.

- Ostatni rozdział zawiera propozycję eksperymentalnej realizacji bramki kwantowej wykorzystujący pułapki o strukturze podwójnej studni, oparte na nanoplazmonicznych pułapkach o dużej stałej oscylacyjnej. Przedstawiony przez Autora pomysł rozwiązuje problem adresowania pojedynczych atomów w nanoplazmonicznych, ciasnych pułapkach przy pomocy rezonansów Feschbacha. Treść tego rozdziału jest dokładnym odzwierciedleniem publikacji która ukazała się w czasopiśmie *Physical Review Letters*, zatem można powiedzieć, że pomysł zyskał ogromne uznanie środowiska fizyki ultrazimnej.

Autor posiada znakomity warsztat badawczy. Większość problemów badanych w pracy opisuje na ile to się da analitycznie, posługuje się stałymi zredukowanymi i bezwymiarowymi (na przykład długością rozpraszania odniesioną do charakterystycznego zasięgu oddziaływania van der Waalsa) co pozwala na wyciąganie bardzo ogólnych wniosków. Autor zawsze dyskutuje szczególne przypadki i sam wskazuje słabe punkty teorii, pozostawiając niewiele dla recenzenta. Dodatkowym atutem pracy są duże walory dydaktyczne. Na przykład w rozdziale o nakrywających się rezonansach Feschbacha Autor po raz pierwszy systematycznie wyprowadza wzory na szerokość i przesunięcie rezonansu.

Kilka komentarzy, uwag i pytań

- stan elektronowy helu metastabilnego to $^3\text{S}_0$ a nie $^3\text{S}_2$ (dot. str 76, rozdz 4.1);
- Co do teorii przedstawionej w rozdziale 2 pokazanej na rysunku 2.2 - czy możliwe jest bardziej precyzyjne wyrażenie warunku na sytuację w której dwa rezonanse Feschbacha nakrywając się nie dają wogóle rezonansu. Dla jakich kombinacji parametrów to występuje? Taką sytuację można sobie wyobrazić w układzie typu Rb+Sr dla stanu $M_F=-1$ dla którego poziomy energetyczne odpowiadają dwóm odpychającym się gałęziom hiperboli, chętnie usłyszę jak to Autor skomentuje;
- W rozdziale 3 w przypadku zderzeń molekuł Rb_2 wyniki dla stanu rotacyjnego $R=2$ są znacznie mniej zadowalające niż dla stanu podstawowego $R=0$. Molekuły w stanie rotacyjnym $R=2$ doświadczają innego rodzaju oddziaływania, jest to oddziaływanie kwadrupol-kwadrupol,

anizotropowe o asymptotyce $1/r^5$ - Autor zdaje się pomijać to w pracy. Czy możliwe jest uwzględnienie tego w teorii?

- Teoria zderzeń reaktywnych przedstawiona w rozdziale 1 jest stosowalna dopóki potencjał centryfugalny nie zaburza znacznie potencjału van der Waalsa.

Autor pokazuje że model dobrze stosuje się do układu $\text{He}^* + \text{Ar}$ i twierdzi, że nie da się go zastosować do układu $\text{He}^* + \text{H}_2$. Dlaczego? Przecież obydwa układy można zaliczyć do lekkich, o podobnej masie zredukowanej i podobnej liczbie stanów związanych (rzędu jedności). Gdzie jest więc granica stosowalności tej metody?

Pozwolę sobie na podsumowanie. Praca doktorska Krzysztofa Jachymskiego jest bez wątplenia znakomitą pracą. Jest to pierwsza praca jaką oceniam i mgr Jachymski bardzo wysoko zawiesił poprzeczkę pracom doktorskim jakie być może przyjdzie mi oceniać w przyszłości. Publikacje naukowe będące rezultatem jego badań ukazały się w najbardziej renomowanych czasopismach fizycznych a mgr Jachymski jest większości przypadków ich pierwszym autorem, a jeśli nie to przynajmniej w bardzo silny sposób wywarł wpływ na daną pracę. Mgr Jachymski jest już obecnie rozchwytywanym przez grupy eksperymentalne teoretykiem - przykład współpracy z prof. Osterwalderem - i potrafi szybko rozwiązać zadane przez nich problemy. Jest bardzo samodzielny i z pewnością bardzo szybko odnajdzie swoją własną ścieżkę naukową. Co do samej pracy doktorskiej - żaden z rozwiązanych przez Autora rozprawy problemów nie jest "ślepią uliczką" - przeciwnie, w moim odczuciu dla każdego zagadnienia podjętego w rozprawie bardzo szybko znajdzie się rozwinięcie i nowe zastosowania w fizyce ultrazimnej lub fizyce chemicznej.

Z pełnym przekonaniem stawiam więc wniosek o dopuszczeniu jej do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Dodatkowo, z uwagi na ogromną wartość publikacji naukowych będących wynikiem realizowanej rozprawy i znaczny wpływ jaki badania mgr Jachymskiego już zdążyły wywrzeć na fizykę ultrazimną, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

Piotr Żuchowski

Piotr Żuchowski,

Toruń, 12 maja 2015