



dr hab. Piotr Żuchowski, Prof. UMK
(pzuch@fizyka.umk.pl
piotr.zuchowski@gmail.com
tel +48 784647638
room number 470)

Recenzja pracy “Observation of ‘Missing’ Vibrational Levels and Extending Photoassociation Spectra of Excited Ultracold Cesium Dimers”

W niniejszej recenzji podejmuję się oceny pracy doktorskiej “*Observation of ‘Missing’ Vibrational Levels and Extending Photoassociation Spectra of Excited Ultracold Cesium Dimers*” kandydata do stopnia doktora, pana Koray’a Dincera który wykonał tą pracę pod kierunkiem Dr Mariusza Semczuka i Prof. Pawła Kowalczyka.

Głównym celem tej pracy jest fotoasocjacja atomów cezu w stan molekularny. Ta fascynująca dziedzina, motywowana produkcją ultrazimnych gazów kwantowych z dipolarnych, złożonych gatunków, została zapoczątkowana ponad 2 dekady temu. Co godne uwagi, atomy cezu odegrały główną rolę w inauguracyjnych eksperymentach spektroskopii PA. Do 2008 roku eksperymenty te już wyprodukowały Cs₂, jedną z pierwszych stabilnych molekuł tego rodzaju. Spektroskopia wzbudzonych stanów cezu jest bardzo dobrze udokumentowana. Co godne uwagi, w spektroskopii dimeru cezu w stanach wzbudzonych występowały pewne luki, które są adresowane w tej pracy, co, biorąc pod uwagę wysokie wymagania spektroskopii precyzyjnej wykorzystanej w formowaniu ultrazimnych gazów atomowych, powinno zostać rozwiązane.

Kluczowo, aparatura eksperymentalna zaprojektowana przez grupę Semczuka i Kowalczyka ma stać się kamieniem węgielnym dla przyszłych przedsięwzięć mających na celu tworzenie molekuł takich jak KCs (dla wielu izotopów) oraz całkowicie nowych gatunków, takich jak KAg, CsAg. Ten układ można postrzegać jako idealny dla eksperymentów i fotoasocjacji i STIRAP (Stymulowane Ramanowskie Przejście Adiabatyczne). Badanie trudno uchwytnych linii fotoasocjacji, wcześniej nieobserwowanych w systemach takich jak dimer cezu,

jest kluczowe, ponieważ służy jako bardzo rygorystyczny test aparatury eksperymentalnej i metod (jak system laserowy, schemat detekcji). Dlatego też, ta praca nie tylko przyczynia się do naszego zrozumienia molekuł cezu, które służy jako benchmark czułości zbudowanego aparatu, ale również kładzie podwaliny pod przyszłe badania bardziej egzotycznych systemów molekularnych.

Krótko opiszę strukturę tej pracy dyplomowej.

Praca rozpoczyna się od wprowadzenia, które ładnie nakreśla główną motywację do badania fotoasocjacji oraz planowaną strukturę pracy. Charakteryzując się zwięzłością i brakiem podrozdziałów, wprowadzenie przygotowuje grunt pod kolejne dyskusje.

Drugi rozdział koncentruje się na chłodzeniu laserowym oraz manipulowaniu / pułapkowaniu atomów za pomocą fotonów. Ponownie, ta część jest przeglądem i opisem zasad pułapki magneto-optycznej, chłodzenia Syzyfa i melasy optycznej.

W miarę postępu pracy, punkt ciężkości przenosi się na bardziej specjalistyczne tematy. Rozdział 3 prowadzi czytelnika w świat badań nad ultrazimnymi cząsteczkami, szczegółowo opisując metody ich wytwarzania i wprowadzając fotoasocjację. Ostatni podrozdział omawia strukturę cząsteczkową i potencjały oddziaływań cząsteczek van der Waalsa. Tutaj, autor skupia się głównie na potencjałach oddziaływań dalekiego zasięgu, nieco pomijając zawiłości fizyki krótkiego zasięgu. Rozdział 3.2 mógłby skorzystać z dyskusji na temat ograniczeń przedstawionego modelu w równaniu 3.4, zwłaszcza w kontekście zachowania asymptotycznego ekspansji potencjału, gdy atomy zbliżają się do siebie, co będzie przedmiotem dyskusji poniżej (rozdział 5). Inna uwaga, na stronie 16, tabela 3.1 współczynniki dyspersji odpowiadają tylko tym, które odpowiadają oddziaływaniom dyspersyjnym (interakcje dipol-indukowany dipol) to jest C6, C7, C8, a nie niższe potęgi, tak więc użycie tej nazwy w nagłówku tabeli jest błędne.

Rozdział 4 opisuje dogłębny opis procedur eksperymentalnych. Obejmując prawie 80 stron, obszerny szczegół jest uzasadniony skupieniem pracy na manipulacji laserowej atomów oraz maszynierii do wykorzystywania rezonansów Feshbacha, które wymagają stabilnego pola magnetycznego do dokładnej obserwacji. Kluczowym segmentem tego rozdziału jest kompleksowy przegląd systemu obrazowania, który wykorzystuje techniki absorpcji i fluorescencji do detekcji atomów. Ta sekcja wyróżnia się ze względu na swój potencjał jako cenne źródło dla przyszłych członków grupy, efektywnie służąc jako podręcznik, z którego mogą się nauczyć opracowanego zestawu eksperymentalnego.

Wreszcie, rozdział 5 jest esencją pracy i najważniejszą częścią z perspektywy dziedziny. Fotoasocjacja jest wykonywana w trzech różnych warunkach: w pułapce magneto-optycznej (MOT) o niskiej gęstości i stosunkowo wysokiej temperaturze oraz w optycznej pułapce dipolowej z nałożonym zewnętrznym polem magnetycznym, i na końcu - w sieci optycznej. Praca potwierdza wszystkie istniejące rezonanse dla dimeru cezu przy niskich polach magnetycznych po zastosowaniu iluminacji laserowej która wzmacnia fotoasocjację, jak zaproponował B. Verhaar i zaimplementował dla cezu S. Chu. To prowadzi do pytania: Czy spektroskopia Feshbacha może zostać ulepszona, aby wyeliminować potrzebę detekcji optycznej? Podsekcja 5.5 bada i wykrywa wiele więcej stanów vibracyjnych, w tym bardzo głęboko związane. Nowe punkty danych zostały dopasowane do ulepszonej formuły LeRoy-Bernstein (wyprowadzonej przez D. Comparat). Dokładność tego dopasowania jest pokazana na rysunku 5.17 pracy, wskazując dobrą precyzję aż do około -120 liczby falowej. Dla głębszych stanów dokładność tej metody maleje, co może sugerować, że model jest zbyt uproszczony. Chciałbym zwrócić uwagę na drobną literówkę na rys. 5.20 dolna asymptota (kolor niebieski) powinna być $6S + 6S$, a nie $6S + 6P_{1/2}$. Jestem pewien, że autor to rozumie.

Stan 0_u^- jest bardzo interesujący, ponieważ pochodzi z potencjału z podwójną studnią (oddzieloną wysoką barierą). Doktorant był w stanie znaleźć najniższy stan rowibracyjny w zewnętrznej studni, dostrojając stan początkowy blisko rezonansu Feshbacha (metoda FOPA), co może okazać się bardzo użytecznym narzędziem w przyszłych badaniach cząsteczek zawierających Ag, które są planowane w grupie. Dowód na wzmocnienie FOPA jest podany na rys. 5.23.

Jeśli chodzi o analizę nowo wyprowadzonych potencjałów oddziaływania z danych spektroskopowych: istnieje dość znacząca różnica między wcześniej zgłoszonymi wartościami C6/C8 dla potencjałów przypadku Hund a).

Rozdział 6 kończy pracę i jasno nakreśla przyszłe zastosowanie opracowanej w grupie aparatury.

Specyficzna lista pytań, na które chciałbym usłyszeć komentarz podczas obrony:

- Na stronie 125, a także na Rysunku 5.8 - dlaczego kierunek pola musi być tak starannie optymalizowany? Na pierwszy rzut oka można by powiedzieć, że fizyka będzie taka sama niezależnie od kierunku, czy możesz krótko powiedzieć, czy w twojej konfiguracji jest jakiś preferowany kierunek, który musi być wybrany?

PS

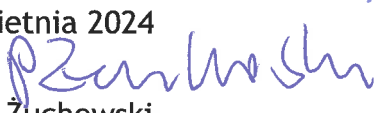
- Co do Rysunków 5.17 i 5.18 - bezwzględne błędy stanów słabo związanych są zastąpione przez stany głęboko związane. Czy jest możliwe narysowanie błędu względnego (innymi słowy - rezyduów [przepraszam za problem z tłumaczeniem "residuals"])? Ta sama uwaga dotyczy 5.26.
- Chciałbym również wiedzieć, co to jest za wielkość $a_{6s}a_{6p}$ zdefiniowana w Tabeli 5.4, proszę określić, jak została obliczona.
- Pytanie do części eksperymentalnej przedstawionej na Rysunku 5.6 oraz w kilku innych miejscach: Wyobrażam sobie, że jednostki arbitralne powinny być używane tylko wtedy, gdy eksperyment jest przeprowadzany w sekwencjach, dla których mamy (idealnie) te same warunki. Tutaj badane są różne mieszanki spinów, które, jak przypuszczam, mają różną liczbę atomów. Czy to jest to samo, co frakcja atomowa (co nie byłoby tak arbitralne)?
- Komentarz do możliwych pomysłów na uzyskanie lepszego modelu teoretycznego (mniejsze rezudua, lepsza zgodność C6, C8), np. włączając tłumienie ekspansji van der Waalsa.

Część techniczna pracy jest bardzo dobra. Było wielką radością obserwować kreatywność w wizualizowaniu różnych danych z różnych etapów eksperymentu. Doceniam rysunki, na których autor skompilował wiele wyników z różnych publikacji na jednym wykresie, takie jak Rysunek 5.28 na stronie 143. Rysunek 4.45 jest fantastyczny, wyjaśnia zakresy laserów używanych w zaprojektowanych eksperymentach z Cs2 i KCs w niezwykle jasny sposób, co sprawia, że jest zrozumiały nawet dla osób spoza tej dziedziny. Rysunki zaczerpnięte z literatury zawsze cytują oryginalne źródło. Niektóre rysunki zostały stworzone z zdigitalizowanych danych innych rysunków z literatury. Opis eksperymentu zawiera kilka zdjęć i projektów systemów laserowych, cewek i komór eksperymentalnych. Kandydat stosuje odniesienia i hiperłącza w odpowiedni sposób, bardzo ładnie sformatował pracę i zwrócił dużą uwagę na wszystkie szczegóły. Użyte w tekście odniesienia wydają się być kompletne; nie zauważyłem żadnej ważnej publikacji bez cytowania. Wręcz przeciwnie, praca zawiera dobry przegląd wcześniej badanych cząsteczek ultrazimnych, koncentrując się na publikacjach, które nie mają więcej niż 10 lat. Struktura pracy jest bardzo jasna, rozdziały mają logiczną kompozycję, a treść jest dobrze zorganizowana, z każdym fragmentem tekstu na swoim miejscu. Język pracy jest bardzo dobry, bez większych wad. Zauważyłem kilka przypadków użycia słów, które mogą być dyskusyjne i kilka powtórzeń tekstu. Doceniam, jak autor konsekwentnie wspominał wkład członków swojego zespołu w

projekt eksperymentalny na każdym etapie, w każdej części pracy, wyraźnie określając swoją własną rolę i wkład w każdy segment skomplikowanego eksperymentu, składającego się z wielu niezależnych części.

Podsumowując, autor rozprawy samodzielnie rozwiązał nietrywialny problem naukowy, stosując metodę fotoasocjacji wzmocnionej przez Feshbacha, aby określić pełne szersze niż dotychczas spektrum Cs_2 i znaleźć trudno dostępne stany $v=0$ oraz $v=1$ w zewnętrznej studni stanu dimeru Cs_2 0_g^- , jak również wiele stanów na krzywych 0_g^+ i 1_g z bardzo dużym odstrojeniem od linii atomowej (około 300 cm^{-1}). Spektroskopia została przeprowadzona przy użyciu zaawansowanego optycznie układu, stworzonego przy ogromnym wkładzie doktoranta. Ten aparat zostanie wykorzystany w przyszłych badaniach egzotycznych cząsteczek KAg , CsAg . Te systemy są jeszcze nieznane i dobrze, że układ jest przygotowany na pesymistyczne scenariusze tworzenia cząsteczek, takie jak słabe czynniki Franka-Condon między stanami wibracyjnymi stanu podstawowego a stanami wzbudzonymi. Taki benchmark, jaki przedstawiono w rozprawie, był bardzo potrzebny. Dlatego wnioskuję o dopuszczenie mgr Koray'a Dincer'a do dalszych etapów procedury doktorskiej.

7 kwietnia 2024


Piotr Żuchowski

