



Centrum Fizyki Teoretycznej

Polskiej Akademii Nauk

Aleja Lotników 32/46, 02-668 Warszawa

Tel. +48 573 823 493

E-mail: [cft@cft.edu.pl](mailto:cft@cft.edu.pl), NIP: 525-000-92-81, REGON: 000844815

Warszawa, 20.11.2025 r.

## **Recenzja rozprawy doktorskiej Pana Mateusza Bocheńskiego**

### **pt. „Feshbach Spectroscopy of Potassium-Cesium Mixtures”**

Praca doktorska „Feshbach Spectroscopy of Potassium-Cesium Mixtures” dotyczy doświadczeń nad mieszaninami gazów potasu i cezu schłodzonymi do dziesiątek mikrokelwinów. Pan Mateusz Bocheński przedstawił nowe oryginalne wyniki dotyczące tych mieszanin, w szczególności optymalizację metod chłodzenia dwóch składników na raz, badanie zderzeń między różnymi izotopami potasu oraz między atomami potasu i cezu oraz pomiary temp strat trójciałowych. Zderzenia między różnymi atomami scharakteryzowano za pomocą pomiarów rezonansów Feshbacha, czyli zmierzenie wartości pól magnetycznych, przy których rezonanse mają miejsce oraz szerokości tych rezonansów.

Rozprawa doktorska ma logiczny układ. Pierwsze rozdziały są bardzo dokładnym wstępem zaczynającym się od omówienia najważniejszych cech atomów cezu i potasu oraz tego jak cechy te można wykorzystać do pułapkowania i obrazowania. Kolejne rozdziały są wprowadzeniem do tematyki chłodzenia gazów, omówieniem układu doświadczalnego, a w trzech ostatnich rozdziałach przedstawiają najważniejsze wyniki kandydata do stopnia doktora,. Każdy z rozdziałów dotyczących doświadczeń w Warszawie zaczyna się krótkim wstępem z podsumowaniem treści rozdziału, ale też opisem wkładów różnych członków grupy w omawiane wyniki. Rozprawa jest napisana w sposób prosty i wnikliwy, więc ma też dużą wartość dydaktyczną. Autor rozprawy przedstawił zarówno sukcesy, jak i nieudane próby. Takie podejście oceniam, jako rzetelne, uczciwe i bardzo przydatne, przede wszystkim dla poszczególnych członków grupy.

Rozprawa pokazuje istotne postępy w doświadczeniach nad ultrazimnymi atomami na Uniwersytecie Warszawskim, będące jednocześnie jednymi z najbardziej zaawansowanych doświadczeń w tej tematyce w Polsce, rozpoznawalnymi za granicą. Znaczną rolę w tych badaniach odegrał Pan Mateusz Bocheński. Grupa operuje już gazami więzionymi w pułapkach dipolowych, schładza różne pierwiastki oraz ich różne izotopy i wykonuje oryginalne pomiary na tych układach. Osiągnięcie mieszaniny potasu i cezu wymagało dokładnej optymalizacji chłodzenia w tzw. szarej melasie, tak aby zapewnić maksymalny transfer atomów do pułapki dipolowej. Sukces w tym chłodzeniu potwierdza duże umiejętności eksperymentalne Pana Mateusza Bocheńskiego. W rozprawie zaprezentowano cechy zbudowanego układu doświadczalnego - możliwość pułapkowania mieszanin bozonowo-bozonowych oraz fermionowo-bozonowych, eksperymenty w jednej komorze

próżniowej, z oryginalnymi technikami chłodzenia i obrazowania z użyciem prostego dozownika potasu z naturalnym składem izotopowym. To ostatnie rozwiązanie pozwoliło Panu Mateuszowi Bocheńskiemu na wykonywanie pomiarów dla trzech różnych izotopów potasu. Wadą układu jest jeszcze chłodzenie do temperatury zbyt wysokiej, aby możliwe było wydajne wytwarzanie schłodzonych gazów molekuł i problemy ze zmiennym ciśnieniem resztkowym w komorze, co wpływa na tempo zaniku chmury atomowej.

Najwyżej oceniam wyniki dotyczące pomiaru rezonansów Feshbacha potasu-41 i cezu oraz pomiar tempa strat trójciałowych. Wyniki są przedstawione w rozdziale 8, który uważam za najlepiej opisany - różni się od tekstu publikacji narracją, która prowadzi czytelnika przez kolejne próby zmierzenia rezonansów w tej mieszaninie, czasami prowadzące do ślepych zaułków, czasami wymagające wielokrotnego powtórzenia pomiarów, aby odrzucić tymczasową hipotezę. Badania polegały początkowo na skanowaniu tempa strat atomów dla pól magnetycznych, dla których zaprzyjaźniona grupa teoretyczna przewidziała rezonanse Feshbacha. Obliczenia teoretyczne zakładały potencjały oddziaływania między atomami cezu i potasu, które wynikały z najnowszej literatury. Autor rozprawy podał też różne doświadczalne intuicje, które wpływały na kolejne decyzje podczas pomiarów i interpretacje wyników. Początkowe pomiary wydawały się obiecujące, jednak potem okazały się szumem statystycznym. Dopiero po weryfikacji założeń i kolejnych eksperymentach, udało się znaleźć poszukiwane rezonanse. Jest to być może pierwszy pomiar tych rezonansów na świecie. Wyniki zgodziły się, z przewidywaniami teoretycznymi, ale opartymi na potencjałach oddziaływania z wcześniejszej literatury. Ta historia pokazuje też, że tematyka jest aktualna, a pomiary kandydata do doktoratu dostarczają ważnych i nowych danych.

W trakcie czytania nasunął mi się szereg pytań:

- 1) W tekście pojawia się nawiązanie do wyższych fal parcjalnych, ale potem nie jest ono dyskutowane. Jakie fale odgrywają rolę w zderzeniach w najniższych temperaturach jakie udało się osiągnąć w doświadczeniu i czy można je mierzyć?
- 2) Jakie kroki należy jeszcze wykonać, aby osiągnąć ultrazimne molekuły potasowo-cezowe i czy techniki użyte ostatnio do wytworzenia molekuł potasu 39 i cezu (grupa brytyjsko-austriacka <https://arxiv.org/pdf/2506.16520>) będą przydatne w Warszawie?
- 3) Autor wskazał na problemy w chłodzeniu przez parowanie potasu 39 z uwagi na ujemną długość rozpraszania charakteryzującą zderzenie między tymi izotopami. Dlaczego chłodzenie przez parowanie nie zadziała w tym przypadku?
- 4) W wytworzonych mieszaninach bozonowo-fermionowych jest duża nierównowaga między liczbą fermionów i bozonów (dwa rzędy wielkości). Autor podał motywację do badania mieszanin fermionowo-bozonowych w ogólności, ale jakie efekty fizyczne mogą być mierzone w tym układzie, który udało się osiągnąć?
- 5) Grupy doświadczalne badając straty cząstek często porównują się z wynikiem prostego modelu, takiego jak równanie (3.3) (ang. „rate equation”). Czy autor używał analitycznych rozwiązań tego równania (w przypadkach strat jednociąłowych, albo jedno i dwuciąłowych, albo jedno- i trójciałowych równanie można odcałkować)? Wynikiem nie jest

zanik eksponencjalny, a szczegóły zaniku są dyskutowane w wielu pracach, np. Phys. Rev. Lett. 104, 120402 (2010). Jak różni się wynik tego najprostszego opisu, równania (3.3), od numerycznego rozwiązywania równania (3.4)? Porównanie zdaje się być na rysunku 3.3, ale podpis pod rysunkiem nie wyjaśnia, które z równań zostało użyte, do której linii.

6) Czy badanie mieszaniny bozonowo-fermionowe potasu-39 oraz potasu-40 daje jakąś przewagę, może dostęp do innego reżimu parametrów, w stosunku do mieszaniny potasu-41 oraz potasu-40, badanej już doświadczalnie przez inne grupy?

7) Rozprawa porównuje zmierzone tempa strat trójciałowych z literaturą (ref. [45] i [46]). Z drugiej strony tempa strat trójciałowych są czułe na pole magnetyczne. Jak różni się pole magnetyczne obecne w eksperymencie opisanym w doktoracie od tego z referencji [45] i [46]? Jaka jest fizyczna przyczyna większych strat trójciałowych mieszaniny 41K-Cs w porównaniu z 39K-Cs?

Uważam, że praca jest napisana bardzo dobrze, jednak z uwagi na moją rolę recenzenta jestem zmuszony też do uwag krytycznych, również odnośnie strony redakcyjnej, które nie wpływają na mój ogólnie bardzo pozytywny odbiór rozprawy. Moją uwagę zwróciło sporo powtórzeń w tekście. Skoro doktorat ma formę regularnej rozprawy, a nie tzw. „spinki”, powtórzenie wielokrotnie szczegółów np. układu laserowego dla potasu albo definicji CMOT (wyjaśnionej kilkakrotnie, aż do strony 154) wydaje się niepotrzebne. Mam wrażenie, że te części bazowały na tekstach publikacji, co z kolei mogło wpłynąć na dość wysoki wynik w teście JSA.

Mam też drobne uwagi edytorskie. Co prawda oficjalnego tekstu rozprawy nie można już edytować, jednak uwagi mogą być przydatne do ewentualnej wersji na arXiv, bądź spisania erraty. Tych uwag jest mało i na pewno nie wymagają odniesienia się do nich podczas obrony. Na stronie 139, Autor odsyła Czytelnika do dodatku “(see Supplement 1)”, ale zapewne chodzi o dodatek 6.6. W rozdziale 7 litery (a) i (b) najpierw użyte są do oznaczanie różnych poziomów struktury nadsubtelnej potasu i cezu (przy badaniu rezonansów Feshbacha), a stronę później - do oznaczenia rodzaju pierwiastka (przy badaniu tempa strat trójciałowych). Następnie notacja (a), (b) i (c) pojawia się w rozdziale 8, ale bez wytłumaczenia. Z uwag edytorskich - odwołania do rozdziałów, rysunków i równań mają taką samą formę, np. „Eq. 3.3, 3.4”. Zwykle odróżnia się te odniesienia, chociaż częściowo, poprzez dodatnie nawiasów do równań, np. „Eqns. (3.3), (3.4)”. Powyższe drobne uwagi krytyczne są podyktowane obowiązkami recenzenta. Chciałbym podkreślić, że praca jest bardzo dobra, budzi ciekawość Czytelnika i stymuluje do kolejnych pytań.

Podsumowując rozprawę doktorską Pana Mateusza Bocheńskiego oceniam pozytywnie. Uważam, że spełnia ona wszystkie wymogi stawiane pracom doktorskim. Wniosuję o dopuszczenie pana Mateusza Bocheńskiego do dalszych etapów postępowania doktorskiego.

Krzysztof Pietrowski