

Kielce, 30 sierpnia 2022 roku

prof. dr hab. Marek Pajek
Instytut Fizyki
Uniwersytet Jana Kochanowskiego
w Kielcach

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Weroniki Bieli-Nowaczyk
pt. „Rzadkie procesy atomowe w ciężkich jonach badane przy pomocy aparatury EBIT”**

Pani mgr Weronika Biela-Nowaczyk, doktorantka na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego, przygotowała rozprawę doktorską zatytułowaną „Rzadkie procesy atomowe w ciężkich jonach badane przy pomocy aparatury EBIT” pod opieką naukową prof. dr hab. Andrzeja Warczaka z Instytutu Fizyki UJ.

Przedłożona mi do recenzji rozprawa podejmuje ważny temat badania stosunkowo rzadkich, z punktu widzenia możliwości obserwacji, procesów zachodzących w zderzeniach elektronów z ciężkimi jonami wysokonaładowanymi, które są unikalnymi układami z punktu widzenia fizyki atomowej, zarówno w aspekcie ich wytwarzania jak i struktury elektronowej. W szczególności badania struktury wodoropodobnych jonów jednoelektronowych lub helopodobnych jonów dwuelektronowych dają możliwość precyzyjnego testowania elektrodynamiki kwantowej (QED) czy, odpowiednio, efektów wieloelektronowych w możliwie najprostszycy układach kulombowskich. Dodatkowo, procesy atomowe z udziałem jonów wysokonaładowanych odgrywają fundamentalną rolę w plazmie laboratoryjnej i astrofizycznej, jak również prowadzą do wielu nowych egzotycznych efektów w ich oddziaływaniu z materią skondensowaną (tworzenie „pustych” atomów czy też nanostruktur powierzchniowych). Rozwój pułapek jonowych typu EBIT (Electron Beam Ion Trap), umożliwiających wytwarzanie jonów wysokonaładowanych poprzez sukcesywną jonizację atomów wiązką elektronów, otworzył możliwości badania różnych procesów oddziaływania elektronów z tak egzotycznymi jonami. Tego typu badania, przeprowadzone z wykorzystaniem unikalnej pułapki UJ-EBIT zainstalowanej w Instytucie Fizyki UJ są podstawą rozprawy doktorskiej mgr Weroniki Bieli-Nowaczyk. Należy podkreślić, że badania opisane w rozprawie doktorantki optymalnie wykorzystują unikalny charakter pułapki EBIT, gdzie wiązka elektronów wytwarzająca jony wysokonaładowane jest jednocześnie wykorzystywana do badania zderzeń jonów z elektronami, w tej liczbie rzadkich procesów atomowych omawianych w rozprawie.

Rozprawa mgr Weroniki Bieli-Nowaczyk przygotowana została w sposób dobrze odzwierciedlający wszystkie istotne etapy prowadzonych badań (cel, aparatura i metodyka eksperymentu, opis badanych procesów emisji promieniowania rentgenowskiego, interpretacja i analiza wyników). Rozprawa liczy 148 stron obejmujących 7 rozdziałów, dodatek oraz bibliografię zawierającą 99 pozycji dobrze opisujących aktualny stan wiedzy dotyczący zarówno aspektów eksperymentalnych jak i badanych procesów atomowych. Materiał graficzny zawarty w rozprawie dobrze ilustruje omawiane badania i osiągnięte wyniki. Rozprawa jest przejrzysta, prezentowane zagadnienia są jasno omawiane, poza drobnymi nieścisłościami omawianymi poniżej.

W rozprawie przedstawione są badania wybranych procesów oddziaływania jonów wysokonaładowanych z elektronami prowadzących do emisji promieniowania rentgenowskiego, którego obserwacja jest dokonywana półprzewodnikowym dryfowym detektorem krzemowym (SDD). Energetyczna zdolność rozdzielcza stosowanego detektora SDD (~ 100 eV) ogranicza pełne rozdzielenie emitowanych linii rentgenowskich, ale umożliwia częściowe rozdzielenie wkładów pochodzących od różnych stanów ładunkowych, co stanowi podstawę identyfikacji i interpretacji badanych procesów atomowych. W rozprawie opisane zostały eksperymenty dotyczące emisji promieniowania rentgenowskiego w oddziaływaniach elektronów o energiach kilku keV z atomami/jonami Ne i Ar zachodzącymi w plazmie pułapki EBIT. W szczególności w rozprawie badane były następujące procesy

atomowe: elektronowa zderzeniowa jonizacja (EII), wzbudzenie (EIE) i deekscytacja (EID), rekombinacja radiacyjna (RR), rekombinacja dwuelektronowa (DR) oraz rekombinacja trój- (TR) i cztero-elektronowa (QR). Procesy te determinują rozkład stanów ładunkowych jonów uwięzionych w pułapce EBIT, a w konsekwencji określają kształt widm energetycznych obserwowanego promieniowania rentgenowskiego. Zagadnienie interpretacji badanych procesów atomowych na podstawie zmierzonych widm rentgenowskich, z uwzględnieniem rozkładu stanów ładunkowych jonów wysokonaładowanych uwięzionych w pułapce EBIT, było głównym problemem z którym musiała się zmierzyć Doktorantka. Niezbędne do tego celu okazały się obliczenia struktury elektronowej jonów i ich relaksacji oraz przekrojów czynnych dla rekombinacji radiacyjnej (RR) i dwuelektronowej (DR). Obliczenia te, które zostały przeprowadzone z wykorzystaniem programu FAC (Flexible Atomic Code), umożliwiły wyznaczenie wartości średnich energii badanych linii rentgenowskich dla różnych stanów ładunkowych badanych jonów. Przyjęta metodyka analizy danych eksperymentalnych zastosowana do opisanie profili linii $K\alpha$ oraz linii rekombinacyjnych (RR) umożliwiła interpretację zmierzonych widm rentgenowskich oraz wyznaczenie rozkładu stanów ładunkowych jonów uwięzionych w pułapce EBIT. Dodatkowo, w aspekcie eksperymentalnym wykorzystane zostały dostępne w aparaturze EBIT możliwości pomiaru energii fotonów promieniowania X w zależności od energii elektronów czy też czasu uwięzienia jonów w pułapce. Zmierzone zależności intensywności promieniowania X od energii elektronów umożliwiły identyfikację struktury rezonansowej charakterystycznej dla rekombinacji dwuelektronowej (DR) oraz wieloelektronowej (TR). W szczególności, zaobserwowana została sygnatura rekombinacji trójelektronowej (TR) typu KK-LLL w argonie prowadzącej do wzmocnienia intensywności promieniowania hipersatelitarnego $K\alpha^n$.

Podsumowując opisane w rozprawie eksperymenty oraz przedstawioną interpretację wyników należy podkreślić że Doktorantka jednoznacznie wykazała że pułapka EBIT jest znakomitym narzędziem badawczym do pomiarów rzadkich, często egzotycznych, procesów oddziaływania jonów wysokonaładowanych z elektronami. Badania tego typu wymagają szczegółowego poznania wielu aspektów eksperymentalnych determinujących funkcjonowanie unikalnego urządzenia badawczego jakim jest pułapka EBIT, jak również konieczności wykonywania złożonych obliczeń atomowych, w tym przypadku z wykorzystaniem programu FAC. Pomimo dużej złożoności badanych procesów atomowych Doktorantka pokazała że obserwacja emitowanego promieniowania rentgenowskiego w połączeniu ze złożonymi obliczeniami atomowymi, daje możliwość badania tych procesów poprzez subtelny analizę zmierzonych widm rentgenowskich. Jest to, w moim przekonaniu, najważniejszy rezultat rozprawy, gdyż wnikliwe poznanie aparatury badawczej jest warunkiem koniecznym dla osiągnięcia istotnych wyników fizycznych. Rozprawa doktorska mgr Weroniki Bieli-Nowaczyk znakomicie to ilustruje. W tym miejscu warto odnotować, że omawiane w rozprawie badania z wykorzystaniem pułapki EBIT zaowocowały dalszymi eksperymentami kontynuowanymi w kompleksie akceleratorowym FAIR w Darmstadt, dotyczącymi badania procesów trójelektronowej rekombinacji (TR) w pierścieniu akumulacyjnym CRYRING.

Interpretacja wyników diskutowanych w rozprawie opiera się na analizie zmierzonych widm rentgenowskich wykorzystującej teoretyczne wartości średnich, ze względu na stan ładunkowy, energii badanych linii rentgenowskich obliczone programem FAC. Istotnym ograniczeniem przyjętym w tych obliczeniach było założenie że jony w poszczególnych stanach ładunkowych są w stanie podstawowym, co jednoznacznie determinowało ich konfigurację elektronową. Tymczasem można się spodziewać, że w plazmie EBIT jony w określonym stanie ładunkowym mogą posiadać różne konfiguracje elektronowe. Powstaje zatem pytanie, jaki może być wpływ tego efektu na interpretację zmierzonych widm rentgenowskich? W kontekście bardziej szczegółowego omawiania diskutowanych w rozprawie widm rentgenowskich powstaje pytanie czy w obszarach linii rekombinacyjnych RR wspomniany efekt konfiguracji elektronowej może dawać wkład do zmierzonych widm? Przyjęta w rozprawie jakościowa interpretacja zakłada rekombinację radiacyjną z udziałem gazów reszkowych obecnych w pułapce, co może dawać obserwowalny wkład do zmierzonych widm rentgenowskich. Oczekuję ustosunkowania się Doktorantki do podniesionych powyżej kwestii w czasie obrony rozprawy.

W ocenianej rozprawie w kilku miejscach znajduję nieścisłości wymagające komentarza. Przekrój czynny na proces radiacyjnej rekombinacji wyrażony równaniem 3.7 jest w istocie znaną formułą Kramersa-Bethe-Salpetera otrzymaną dla dużych liczb kwantowych (zasada korespondencji !) zarówno na gruncie półklasycznym (Kramers, 1923) jak i kwantowym (Bethe-Salpeter, 1957) – nie jest to zatem formuła Stobbe'ego (1930) jak oznaczone zostało w rozprawie. Dodatkowo, czym różni się E_e od E_{CM} w tym równaniu? Równanie 4.1 (powtórzone na str. 58) wyrażające intensywność rejestrowanego promieniowania rentgenowskiego wymaga korekty wymiarowej. W dyskusji ewolucji czasowej rozkładu ładunkowego jonów w pułapce EBIT, otrzymanej w wyniku modelowania zmierzonych widm rentgenowskich (Rys. 4.2 i 4.3), zabrakło mi informacji o jednoznaczności dopasowania profili dla różnych stanów ładunkowych, co może mieć istotny wpływ na wyznaczany rozkład stanów ładunkowych. W dyskusji zdolności rozdzielczej detektora SDD (str. 30) podana została jej wartość dla energii fotonów 5.4 keV. Celowym byłoby podanie zdolności rozdzielczej detektora dla niższych energii dyskutowanych w rozprawie, do około 1 keV, gdzie jej wartość powinna być znacznie mniejsza.

Z obowiązku recenzenta muszę odnotować zauważone niezręczności językowe i drobne pomyłki zawarte w tekście rozprawy, które – w moim przekonaniu - nie wpływają na fizyczne wyniki w niej zawarte. Na przykład, na stronie 76 znajdujemy cyt. „... w widmie niebieskim obecne jest promieniowanie ..., które nie było widoczne w widmie czerwonym.”, czy też na str. 77/78 „w stabilnych warunkach plazmy R_{loss} dla LCI jest wysoki”. Są to zbyt daleko idące uproszczenia znacząco odbiegające od ich sensu fizycznego. Odnotowałem w tekście rozprawy kilka pomyłek w pisowni nazwisk, na przykład Chand(r)a (str. 21), Kramer(s)a (str. 71) jak również i potknięć gramatycznych których nie wymieniam. W bibliografii zamieszczonej w rozprawie zawarty jest ewidentnie błędny (!) tytuł klasycznej dziś pracy Kramersa z 1923 (poz. [93]), czy też pojawiają się niepełne referencje do prac jak na przykład tylko „W: (2008)” w pozycji [68], czy też „en. 2014.” w poz. [6]. Nawiasem mówiąc stosowanie wszędzie tegoż „W:” w bibliografii jest niepotrzebne. Dodatkowo, ujednoczenie pełnych imion czy inicjałów autorów wyglądałoby znacznie lepiej w opracowanej bibliografii.

Przytoczone powyżej krytyczne uwagi nie wpływają istotnie na moją bardzo pozytywną opinię o przedłożonej mi do oceny rozprawie doktorskiej Pani mgr Weroniki Bieli-Nowaczyk. Rozprawa ta zawiera dobrze udokumentowany opis ważnych badań rzadkich procesów atomowych zachodzących w oddziaływaniach elektronów z jonami w wysokich stanach ładunkowych wytwarzanych w pułapce EBIT. Na podkreślenie zasługuje wysoki stopień zaawansowania stosowanej techniki eksperymentalnej (pułapka jonowa, ultra-wysoka próżnia, spektroskopia rentgenowska), której metody Doktorantka doskonale opanowała przygotowując rozprawę doktorską. Godnym odnotowania jest również szerokie spektrum podjętych badań z zakresu fizyki zderzeń atomowych (jonizacja, rekombinacja radiacyjna oraz dwu- i wielo-elektronowa) co jest charakterystyczne dla fizyki plazmy. Należy również podkreślić duży wkład Doktorantki w przeprowadzone zaawansowane teoretyczne obliczenia atomowe niezbędne dla końcowej interpretacji wyników przeprowadzonych eksperymentów.

Podsumowując, uważam że rozprawa doktorska Pani mgr Weroniki Bieli-Nowaczyk pt. „Rzadkie procesy atomowe w ciężkich jonach badane przy pomocy aparatury EBIT” reprezentuje wysoki poziom naukowy i Doktorantka, jak i Jej rozprawa, spełnia wszelkie wymogi stawiane kandydatom do uzyskania stopnia naukowego doktora wymagane w „Ustawie - Prawo o szkolnictwie wyższym” (Dz. U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.) Z pełnym przekonaniem wnioskuję zatem o dopuszczenie Pani mgr Weroniki Bieli-Nowaczyk do dalszych etapów przewodu doktorskiego.