

dr hab. Danuta Stefańska
Zakład Inżynierii i Metrologii Kwantowej
Instytut Badań Materiałowych i Inżynierii Kwantowej
Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3
60-965 Poznań
e-mail: danuta.stefanska@put.poznan.pl

Poznań, 19.09.2021

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Patryka Kamińskiego
pt. „Rozkład ładunku chmury elektronowej w atomie He powstałym
w wyniku przechwycenia elektronu przez jon He^+ w zakresie energii pośrednich”**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr. Patryka Kamińskiego została zrealizowana w Instytucie Fizyki Doświadczalnej na Wydziale Matematyki, Fizyki i Informatyki Uniwersytetu Gdańskiego, pod opieką naukową dr. hab. Ryszarda Drozdowskiego, profesora Uczelni.

Tematyka badawcza i cel rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska Pana mgr. Patryka Kamińskiego dotyczy badań procesów zderzeń szybkich jonów helu $^4\text{He}^+$ o tzw. energiach pośrednich z termicznymi atomami helu ^4He w zewnętrznym polu elektrycznym. Badania procesów zderzeniowych wysokoenergetycznych cząstek były prowadzone już w pierwszej połowie XX wieku, umożliwiając weryfikację wielu modeli teoretycznych dotyczących budowy materii i oddziaływań w mikroświecie, a także lepsze poznanie zjawisk zachodzących w makroskali, m.in. w przestrzeni międzygwiazdnej. Szczególne miejsce w tematyce zderzeń zajmują zderzenia jonów o energiach tzw. pośrednich (tzn. o prędkościach porównywalnych z orbitalnymi prędkościami elektronów w atomach) z atomami termicznymi. W opisie procesów zderzeniowych z tego przedziału energii konieczne jest uwzględnienie wewnętrznej struktury zderzających się obiektów, z drugiej strony jednak krótki czas oddziaływania implikuje konieczność przyjęcia do analizy procesu zderzenia modelu o charakterze dynamicznym.

Badania procesów zderzeniowych z udziałem jonów i neutralnych atomów helu zostały już zapoczątkowane we wcześniejszych latach w grupie badawczej, do której należy Doktorant. Podjął je najpierw Promotor Doktoranta dr hab. Ryszard Drozdowski, profesor Uniwersytetu Gdańskiego, a następnie były one kontynuowane przez dr Emilię Baszanowską. Mgr Patryk Kamiński uczestniczył w istotnym zakresie w prowadzonych badaniach od etapu realizacji swojej pracy magisterskiej, sfinalizowanej w roku 2008. W swoim doktoracie skoncentrował się już na badaniach wzbudzenia szybkich atomów helu, powstałych w wyniku przechwytu elektronu przez jony w procesie zderzenia. Jest to istotny element nowości, pozwalający bardziej wszechstronnie zrozumieć mechanizmy tego typu zderzenia, bowiem obiektem dotychczasowych badań były zawsze wzbudzone w procesie zderzenia atomy termiczne. Szczególny akcent w swoich badaniach położył Doktorant na wskazane w tytule rozprawy określenie rozkładu ładunku elektrycznego we wzbudzonych szybkich atomach helu, zależnego od obsadzonych w rezultacie zderzenia stanów elektronowych i wyrażonego ilościowo w kategoriach indukowanego zewnętrznym polem elektrycznym momentu dipolowego (*EDM – electric dipole moment*).

Wybór jako obiektu badań nie (jak dotąd) atomów termicznych tylko atomów szybkich, powstałych w wyniku przechwyty elektronu z szybkich jonów, wiąże się z szeregiem utrudnień, zarówno natury eksperymentalnej jak i interpretacyjnej. W sferze eksperymentalnej podkreślić należy przede wszystkim ograniczone prawdopodobieństwo tworzenia szybkich atomów neutralnych oraz konieczność efektywnej separacji przestrzennej strefy zderzenia i strefy obserwacji jego rezultatów. W interpretacji natomiast niezbędne jest, związane z tą właśnie separacją, uwzględnienie dodatkowego etapu ewolucji czasowej wzbudzonych stanów elektronowych w trakcie przelotu atomów pomiędzy obydwoma strefami. Powyższe aspekty wymagały odrębnego podejścia, wykraczającego poza dotychczas wypracowane w metodologii badawczej standardy.

Analizy będących przedmiotem pracy efektów procesu zderzenia Doktorant dokonał na podstawie badań trypletowych linii widmowych między układami bardzo blisko siebie położonych poziomów $1s4d^3D$, $1s4f^3F \rightarrow 1s2p^3P$, z uwagi na ograniczenia zdolności rozdzielczej metody traktowanych jako jedna linia widmowa o długości fali $\lambda = 447.2$ nm. Badania natężenia linii zostały przeprowadzone w zależności od wartości natężenia panującego w strefie zderzenia i jej otoczeniu zewnętrznego osiowego pola elektrycznego oraz jego zwrotu w stosunku do kierunku propagacji wiązki jonowej. W związku z wyborem linii widmowej pozyskane informacje dotyczą obsadzenia w procesie zderzenia elektronowych stanów wzbudzonych o głównej liczbie kwantowej $n=4$. Stanowi to pewne uproszczenie opisu bardzo w istocie złożonego procesu oddziaływania szybkich i termicznych atomów tego samego izotopu helu ^4He , na tym etapie badań jednak w pełni uzasadnione. Po pierwsze prawdopodobieństwo wzbudzenia rozważanych stanów znacznie przewyższa prawdopodobieństwa obsadzenia stanów o większych wartościach głównej liczby kwantowej n , po drugie w badanym zakresie stosunkowo niewielkich natężeń pola elektrycznego stany z $n=4$ nie mieszają się ze stanami o innych wartościach n (co uzasadnia użycie w opisie modelu jednopowłokowego), natomiast mieszają się silnie między sobą, stwarzając korzystne warunki do zastosowania spektroskopii antykrzyżowania poziomów jako adekwatnej metody eksperymentalnej.

Ocena formalna i merytoryczna rozprawy doktorskiej

Rozprawa ma formę monografii, liczącej 154 strony. W strukturze rozprawy Doktorant wyróżnił wstęp, dwa główne bloki oznaczone jako część teoretyczna i część doświadczalna, podsumowanie, uzupełnienia oraz bibliografię. Rozprawa nie zawiera streszczenia, co wydaje się stanowić pewne przeoczenie.

Część teoretyczna to jeden obszerny rozdział, podzielony na 11 podrozdziałów, zawierający opis procesu zderzenia jonu $^4\text{He}^+$ w zakresie energii pośrednich z atomem helu ^4He i metod badania jego następstw. Część doświadczalna składa się z czterech rozdziałów, poświęconych odpowiednio: opisowi układu eksperymentalnego, przedstawieniu procedury optymalizacji jego parametrów, omówieniu przebiegu samego eksperymentu, i wreszcie dyskusji otrzymanych rezultatów.

Wykaz uzupełnień liczy 8 pozycji, dotyczących poruszanych w różnych częściach pracy zagadnień szczegółowych. Zestawienie bibliografii obejmuje 94 pozycje.

W obszernym, liczącym 10 stron, **wstępie** Autor omówił szczegółowo dotychczasowe dokonania eksperymentalne i teoretyczne w tematyce zderzeń szybkich jonów (zwłaszcza z zakresu energii pośrednich), w tym kontekście zwyczajowo określanymi mianem pocisków, z termicznymi atomami helu, nazywanymi atomami tarczy. Podkreślił dodatkową komplikację samego procesu zderzenia w sytuacji, kiedy w charakterze pocisków stosowane są jony tego samego pierwiastka, a zwłaszcza trudności związane z badaniem szybkich atomów helu, powstałych z jonów pocisków w wyniku przechwyty elektronu od termicznych atomów tarczy. Szczególna uwaga została poświęcona obserwowanemu w procesach zderzeniowych preferencyjnemu obsadzaniu stanów charakteryzujących się asymetrią rozkładu ładunku (tzn. wykazujących niezerowe wartości elektrycznego momentu dipolowego), które jest rezultatem koherentnego wzbudzania stanów o przeciwnych parzystościach. Na

nakreślonym w ten sposób tle Autor zaprezentował postawione sobie do realizacji w ramach rozprawy doktorskiej cele szczegółowe.

W podrozdziałach stanowiącego całość *części teoretycznej* rozprawy doktorskiej **rozdziału I** Autor przedstawił zarówno różne aspekty samego procesu zderzenia, zastosowane w jego analizie modele teoretyczne i podstawy formalizmu matematycznego, jak i strukturę poziomów elektronowych atomu helu w zewnętrznym polu elektrycznym, czy podstawy fizyczne metody spektroskopowej użytej do ich badania.

Podrozdział I.1 zawiera półklasyczny opis zderzenia jonów pocisków ${}^4\text{He}^+$ z atomami tarczy ${}^4\text{He}$. Autor podkreślił, że w zakresie energii pośrednich proces zderzenia można opisać w kategoriach chwilowego tworzenia pseudomolekuły He_2^+ i jej ewolucji.

W **podrozdziale I.2** Autor przedstawił poglądowy schemat przebiegu zderzenia między jonami ${}^4\text{He}^+$ i atomami ${}^4\text{He}$ (bezpośredniego i z przekazem ładunku), prowadzącego do wzbudzenia u obu partnerów zderzenia zarówno singletowych jak i trypletowych stanów elektronowych. Uproszczony model tłumaczy stwierdzone w literaturze eksperymentalnie jednakowe wartości sumarycznych przekrojów czynnych na wzbudzenie stanów obu multipletowości. Również w tym podrozdziale przedstawiony został fragment diagramu korelacyjnego dla molekuly H_2^+ , stanowiącej wstępne przybliżenie dla opisu molekuly He_2^+ , na podstawie którego Autor przedyskutował bardzo ogólnie możliwą ewolucję czasową molekularnych stanów elektronowych, prowadzących docelowo do stanów elektronowych wzbudzonych atomu i jonu po zderzeniu. Dokładniejsza analiza diagramu korelacyjnego dla molekuly H_2^+ stanowi przedmiot **podrozdziału I.3**.

Podrozdział I.4 poświęcony jest wyjaśnieniu różnicy pomiędzy dwoma typami krzywych potencjalnych, opisujących ewolucję stanów elektronowych atomu dwupoziomowego w trakcie zderzenia – tzw. krzywych *diabatycznych* (ewolucja w przypadku zderzenia z pociskiem o dużej energii, gdzie proces zderzenia można rozpatrywać w kategoriach oddziaływania atomu z krótkim impulsem elektrycznym) i *adiabatycznych* (ewolucja w przypadku zderzenia z pociskiem o małej energii, gdzie utworzona przejściowo w procesie zderzenia molekula może być traktowana jako relatywnie stabilna, i w opisie dobrze sprawdza się przybliżenie orbitali molekularnych). Dyskusja tego zagadnienia jest uzasadniona, gdyż Doktorant zajmował się w swojej rozprawie pośrednim zakresem energii pocisku, gdzie ewolucja stanów atomowych w trakcie zderzenia może przebiegać wzdłuż obu typów krzywych potencjalnych, a poprawny opis wzbudzenia uzyskuje się przy założeniu, że w tym samym procesie zderzenia ewolucja następuje kolejno (przy zbliżaniu i następnie oddalaniu partnerów zderzenia) wzdłuż obu typów krzywych.

W kolejnym **podrozdziale I.5** Autor zdefiniował pojęcie *parabolicznych* stanów kwantowych, jako odpowiednich superpozycji stanów sferycznych (czyli stanów przedstawionych w naturalnym dla izolowanych atomów sferycznym układzie współrzędnych), i podał adekwatne do ich opisu tzw. paraboliczne liczby kwantowe. Opis stanów elektronowych wzbudzonego w procesie zderzenia atomu w kategoriach stanów parabolicznych podyktowany jest w szczególności kompatybilnością układu współrzędnych parabolicznych z geometrią sytuacji fizycznej, a także występującymi w efekcie zderzenia na ogół wysokimi wartościami elektrycznego momentu dipolowego, który szczególnie klarownie można wyrazić za pomocą parabolicznych liczb kwantowych.

Podrozdział I.6 omawia zaproponowany przez Gebharda von Oppena półklasyczny model „atomowej pułapki Paula”, nawiązujący do podobieństwa potencjału siodłowego pomiędzy dwoma rdzeniami He^+ , doznającego w przebiegu zderzenia $\text{He}^+ - \text{He}$ szybkiego obrotu i zmiany wartości, i periodycznie zmiennego potencjału siodłowego wytwarzanego w jonowych pułapkach elektromagnetycznych Paula. Zgodnie z tym modelem jeden z elektronów atomu tarczy He , stabilizowany dynamicznie na siodle potencjału, w drugiej fazie zderzenia zwiększa swoją energię wraz z energią siodła, skutkiem czego podlega tzw. promocji – wzrasta jego efektywna główna liczba kwantowa. Elektron taki może następnie albo powrócić do macierzystego atomu, albo zostać przechwycony przez jon pocisku, prowadząc do powstania szybkiego wzbudzonego atomu He^* – głównego obiektu zainteresowania mgr. Patryka Kamińskiego w ramach Jego pracy doktorskiej.

W **podrozdziale I.7** Doktorant skoncentrował się na efektach wzbudzenia powstałego w wyniku zderzenia z przechwytem elektronu szybkiego atomu helu, podając kwantowo-mechaniczny opis obserwowanych stanów wzbudzonych. Stan atomu został opisany w kategoriach macierzy gęstości; Autor przedstawił ewolucję macierzy gęstości wzbudzonego atomu He^+ , wyróżniając trzy etapy: wzbudzenie w fazie zderzenia, ewolucję czasową w obszarze zewnętrznego osiowego pola elektrycznego w trakcie przelotu ze strefy zderzenia do strefy obserwacji, i wreszcie zanik wzbudzenia ze spontaniczną emisją obserwowanych fotonów. Po krótkim wprowadzeniu do formalizmu macierzy gęstości (**podrozdział I.7.1**) dwa pierwsze z wymienionych etapów omówione są dokładniej w **podrozdziałach I.7.2 i I.7.3**.

W **podrozdziale I.8** omówiona została struktura poziomów elektronowych atomu helu – najpierw swobodnego (**podrozdziały I.8.1 i I.8.2**), a następnie znajdującego się w zewnętrznym polu elektrycznym (**podrozdział I.8.3**). Rozszczepienie poziomów w polu elektrycznym (efekt Starka) może prowadzić do antykrzyżowania poziomów (*level anti-crossing*) dla sprzężonych stanów elektronowych przy wartościach natężenia pola elektrycznego, przy których powinno nastąpić ich przecięcie (na skali energii). Zjawisko to zostało wykorzystane w metodzie spektroskopowej antykrzyżowania poziomów, w której obserwuje się rezonansowe zmiany fluorescencji, o ile populacje sprzężonych antykrzyżujących się poziomów są różne. W atomie helu takie sprzężenie wywołane zewnętrznym polem elektrycznym dotyczy niektórych stanów o różnych multipletowościach (singletowych i trypletowych). Autor omówił podstawy zjawiska antykrzyżowania poziomów i opartej na nim metody eksperymentalnej w **podrozdziale I.8.4**; przedstawił tam również parametry znanych z literatury punktów antykrzyżowania dla konfiguracji o głównej liczbie kwantowej $n = 4$ ($4d$ i $4f$) w atomie helu, na których oparł swoją procedurę identyfikacji poziomów wzbudzonych w efekcie zderzenia z przechwytem elektronu.

W **podrozdziale I.9** przedyskutowana została kwestia obsadzania w wyniku zderzenia z przechwytem elektronu stanów wzbudzonych wykazujących niezerowy elektryczny moment dipolowy, w zależności od orientacji zewnętrznego pola elektrycznego, w którym ma miejsce zderzenie. Autor podkreślił, że stany o różnych parzystościach (należące do konfiguracji $1s4d$ i $1s4f$) wzbudzane są asymetrycznie względem siebie, z różnymi prawdopodobieństwami dla przeciwnych znaków pola elektrycznego.

Obszerny **podrozdział I.10** (około 20 stron – niestety, nie podzielony na podrozdziały kolejnego poziomu) nawiązuje już bezpośrednio do eksperymentu. W ramach tego podrozdziału Autor najpierw przeanalizował rozkład zewnętrznego pola elektrycznego w całym obszarze, w którym może następować ewolucja stanu szybkiego atomu helu (od miejsca zderzenia do końca obszaru obserwacji), a także wpływ na końcowe rezultaty planowanych przybliżeń, mających na celu przyspieszenie obliczeń numerycznych. Na tej podstawie za zadowolający uznał opis geometrycznego rozkładu pola za pomocą wybranej prostej funkcji wielomianowej, a także pominięcie wpływu pola elektrycznego na dalszą ewolucję stanu atomu, począwszy od pewnej empirycznie dobranej odległości od miejsca zderzenia. Dalsza część tego podrozdziału opisuje konstrukcję tzw. *funkcji wzbudzenia*, tzn. rozkładu prawdopodobieństwa wzbudzenia w wyniku zderzenia z przechwytem elektronu, na podstawie założonych uproszczonych relacji geometrycznych strefy oddziaływania wiązki pocisków z atomami tarczy. Funkcja wzbudzenia determinuje wyjściową postać macierzy gęstości, opisującej stan szybkiego atomu helu bezpośrednio po zderzeniu, natomiast rozkład pola elektrycznego wpływa na jej ewolucję czasową, zatem dyskusja obu tych zagadnień jest niewątpliwie w pełni uzasadniona i potrzebna, natomiast pewne wątpliwości budzi jej umiejscowienie w pracy.

Ostatni w części teoretycznej **podrozdział I.11** przedstawia pojęcie *bazowych sygnałów natężeń linii widmowych*, tzn. obliczonych teoretycznie (w zależności od wartości i orientacji zewnętrznego osiowego pola elektrycznego) natężeń linii, oczekiwanych w przypadku selektywnego wzbudzenia konkretnych stanów elektronowych – parabolicznych lub sferycznych, o określonej multipletowości, a także członów interferencyjnych. W podrozdziale tym Autor przytoczył także (w formie wykresów) przykładowe wyniki dla maksymalnej energii pocisków z badanego zakresu.

Część doświadczalną rozpoczyna **rozdział II**, w którym Doktorant przedstawił dokładny opis stosowanego w badaniach układu eksperymentalnego. Doktorant nie konstruował tego układu samodzielnie, ale – zgodnie z Jego oświadczeniem, które potwierdza analiza dotychczasowego dorobku – uczestniczył w jego budowie na wszystkich etapach. Po ogólnym schemacie całości układu i przedstawieniu współdziałania podstawowych jego modułów, Autor przystąpił do szczegółowego omówienia budowy i najistotniejszych parametrów poszczególnych komponentów, zaczynając od źródła jonów He^+ (**podrozdział II.1**), przez układ przyspieszania i kształtowania wiązki jonowej (**podrozdział II.2**), komorę zderzeń ze szczególnym uwzględnieniem jej najważniejszego elementu nazywanego komórką zderzeniową (**podrozdział II.3**), aż do optycznego układu detekcji fluorescencji emitowanej przez wzbudzone szybkie atomy helu (**podrozdział II.4**).

Rozdział III zawiera dokładny opis procedur optymalizacji i kalibracji całego układu eksperymentalnego. Za tę część przygotowania do eksperymentu Doktorant był odpowiedzialny osobiście. W **podrozdziale III.1** omówiono optymalizację układu detekcji, w szczególności dobór parametrów pracy fotopowielacza w trybie zliczania fotonów. **Podrozdział III.2** przedstawia z kolei optymalizację pozostałej części systemu, w tym parametrów pracy źródła jonów (**podrozdział III.2.1**), parametrów systemu kształtowania wiązki jonowej (**podrozdział III.2.2**), a także ciśnienia w komorze zderzeń (**podrozdział III.3**).

W krótkim **rozdziale IV** omówiony został przebieg eksperymentu. Z uwagi na szczegółowe odniesienia do eksperymentu we wcześniejszych rozdziałach, niezbędne do omówienia np. funkcji poszczególnych elementów układu eksperymentalnego czy też kryteriów ich optymalizacji, rozdział IV nie wnosi istotnych nowych treści, a jedynie w pewnym stopniu porządkuje informacje podane na wcześniejszych etapach.

Rozdział V zawiera prezentację rezultatów pomiarowych, a także ich dyskusję. Analiza jest szczegółowa i wydaje się kompletna.

Doktorant najpierw przedstawił wyniki identyfikacji wzbudzonych w szybkich atomach helu stanów elektronowych dla poszczególnych badanych energii pocisków. Identyfikacja ta została dokonana na podstawie dopasowania odpowiednio dobranej superpozycji bazowych sygnałów natężeń do zarejestrowanych – w zależności od natężenia i znaku zewnętrznego osiowego pola elektrycznego – eksperymentalnych natężeń wybranej do badań trypletowej linii widmowej $\lambda = 447.2 \text{ nm}$. Przewidywania dotyczące konkretnych potencjalnie wzbudzonych stanów parabolicznych i sferycznych, zarówno trypletowych jak i singletowych, zostały oparte przede wszystkim na modelu oddziaływania wykorzystującym mechanizm promocji elektronu w „atomowej pułapce Paula”. Dopasowanie przebiegów teoretycznych do eksperymentalnych przeprowadzono standardową metodą najmniejszych kwadratów, ze szczególnym naciskiem na prawidłowe odwzorowanie pików antykrzyżowania poziomów, występujących przy określonych znanych wartościach pola elektrycznego. Autor podkreślił, że za ogólny przebieg krzywych odpowiedzialne są przede wszystkim stany trypletowe (między tymi bowiem zachodzą badane przejścia optyczne), natomiast wpływ stanów singletowych uwidacznia się wyłącznie w postaci pików antykrzyżowania poziomów. Przebiegi residuum wskazują, że podstawowe stany wzbudzone zostały zidentyfikowane poprawnie, aczkolwiek niewątpliwie przyjęty model jednopułkowy stanowi tutaj pewne przybliżenie. Otrzymane na tej podstawie przekroje czynne na wzbudzenie poszczególnych stanów, zebrane w tabelach, są proporcjonalne do odpowiednich elementów macierzy gęstości.

W następnej kolejności, na podstawie macierzy gęstości, Doktorant wyznaczył elektryczne momenty dipolowe (*EDM*) szybkich atomów helu. Rezultaty te należałoby uznać za zwieńczenie badań, bowiem wiążą się one bezpośrednio z tytułem rozprawy doktorskiej. Otrzymane średnie wartości okazały się mniejsze niż zakładano na podstawie opisu procesu zderzenia dla zakresu energii pośrednich w kategoriach promocji elektronu w „atomowej pułapce Paula”. Przyczyny takiego rezultatu Doktorant upatruje m.in. w pominięciu w analizie zderzenia przejść kaskadowych z wyższych poziomów na poziomy jedynej branej pod uwagę w badaniach konfiguracji z główną liczbą kwantową $n = 4$, które to przejścia poza obszarem pola elektrycznego powinny prowadzić głównie do obsadzania wzbudzonych stanów sferycznych; ponieważ stany sferyczne nie wykazują elektrycznych momentów dipolowych, zwiększenie ich udziału skutkowałoby w istocie zmniejszeniem efektywnej wartości *EDM*. Innym

efektem, który Doktorant rozważył jako potencjalnie istotny, może być występujący w niektórych przypadkach, wykraczający poza mechanizm „atomowej pułapki Paula”, przechwyty przez jony pocisku elektronów „siodłowych” przesuniętych w sensie przestrzennym „do przodu”, a więc dających w rezultacie EDM powstałych szybkich atomów o zwrocie przeciwnym do średniego.

Ostatnim rozdziałem rozprawy jest liczące 3 strony **podsumowanie**. Rozdział ten przedstawia w syntetyczny sposób podstawowe cele pracy w kontekście dotychczasowego stanu wiedzy, a dalej – zakres przeprowadzonych badań eksperymentalnych oraz podstawowe założenia metody analizy wyników i wreszcie przegląd uzyskanych w ramach rozprawy rezultatów. Autor przypomniał również potencjalne znaczenie prowadzonych badań w szerszym kontekście, m.in. z punktu widzenia zastosowań astrofizycznych.

Rozprawę kończy szereg **uzupełnień**, omawiających różne zagadnienia szczegółowe, zaczynając od zestawienia stosowanych jednostek, zaprezentowanego w **uzupełnieniu 1**. Następnie przedstawione zostały oszacowania różnych parametrów istotnych dla analizowanego procesu zderzenia, m.in. prędkość pocisków czy czas zderzenia (**uzupełnienia 2–5**). **Uzupełnienie 6** zawiera opis opracowanego w grupie badawczej kodu, zastosowanego przez Autora w obliczeniach przewidywanych teoretycznie składowych sygnału (bazowych sygnałów natężeń linii widmowych), natomiast **uzupełnienie 7** – graficzne przedstawienie kompletu takich składowych (których przykłady podane już zostały w podrozdziale I.11). Ostatnie **uzupełnienie 8** podaje stabilizowane wyniki obliczeń przekrojów czynnych na przechwyty elektronu przez jon ${}^4\text{He}^+$ i wzbudzenie bezpośrednie atomu ${}^4\text{He}$ w procesie zderzenia badanych obiektów (otrzymane na podstawie wcześniejszych danych literaturowych).

Uwagi krytyczne

Rozprawa doktorska Pana mgr. Patryka Kamińskiego stanowi wartościową dokumentację przeprowadzonych przez Niego badań, poszerzających istotnie dotychczasową wiedzę na temat procesów zderzeniowych jonu i atomu tego samego pierwiastka (helu) w zakresie tzw. energii pośrednich. Przyjęta metodologia nie budzi wątpliwości, konieczność zastosowania w opisie badanego procesu i analizie rezultatów pewnych przybliżeń jest na ogół w wystarczający sposób uzasadniona. Doktorantowi nie udało się jednak uniknąć pewnych usterek.

Największe zastrzeżenia budzą pewne elementy struktury rozprawy, które w moim przekonaniu negatywnie rzutują na jej ogólną klarowność.

Na przykład zasadny byłby podział materiału zawartego w jedynym w części teoretycznej rozdziale I na co najmniej dwa rozdziały. Zagadnienia poruszane w podrozdziałach I.1–I.6 zawierają generalnie opis przebiegu zderzenia szybkich jonów helu z atomami termicznymi tego pierwiastka, podczas gdy podrozdziały I.7–I.9 i I.11 koncentrują się na zagadnieniach związanych ze strukturą wewnętrzną powstałych w trakcie zderzenia szybkich atomów helu, w tym procesach obsadzania poszczególnych stanów kwantowych, a także ich wpływu na oczekiwane natężenie analizowanej linii widmowej. Oczywiście istnieją pewne powiązania treści poszczególnych podrozdziałów, jednak przy tak szerokim zakresie tematycznym i znacznej objętości całej części teoretycznej (blisko 60 stron) prześledzenie całej logiki wywodu stanowi spore wyzwanie.

Umiejscowienie zawartości podrozdziału I.10 uważam za niezbyt fortunne. Mimo że podrozdział ten omawia przybliżone modelowanie rozkładu zewnętrznego pola elektrycznego i obszaru oddziaływania pod kątem ich wpływu na wyniki obliczeń sygnałów przewidywanych teoretycznie, to jednak w sposób ścisły odwołuje się do konkretnych warunków eksperymentu, włącznie z ilościowymi relacjami geometrycznymi. Lektura tego podrozdziału przed zapoznaniem się z częścią doświadczalną rozprawy jest w związku z tym miejscami trudna.

Rozdział V (*Wyniki pomiarów*) zyskałby w moim odczuciu na przejrzystości, gdyby Autor podzielił go na dwa podrozdziały: pierwszy – poświęcony identyfikacji najistotniejszych stanów wzbudzonych, dających wkład do obserwowanych natężeń badanej linii widmowej, i drugi – dotyczący wyznaczania na tej podstawie elektrycznych momentów dipolowych, a więc tytułowego rozkładu ładunku elektrycznego w powstałych w strefie zderzenia szybkich atomach helu.

W przypadku pewnych kwestii w rozdziałach III (*Optymalizacja warunków doświadczalnych*) oraz V (*Wyniki pomiarów*) pożądana byłaby nieco obszerniejsza dyskusja.

Wskazane niedociągnięcia nie mają charakteru merytorycznego, dotyczą raczej sposobu prezentacji poszczególnych zagadnień, i nie umniejszają w znaczącym stopniu wartości rozprawy doktorskiej. Szczegółowa lista uwag i sugestii została oddzielnie przekazana Doktorantowi.

Wnioski końcowe

Podsumowując pragnę podkreślić, że mimo przedstawionych uwag krytycznych moja ocena rozprawy doktorskiej Pana mgr. Patryka Kamińskiego pozostaje **jednoznacznie pozytywna**.

Praca ta niewątpliwie stanowi nowy istotny wkład do badań procesów zderzeń międzyatomowych w najtrudniejszym i w związku z tym najślabiej dotychczas przeanalizowanym zakresie energii pośrednich. Element nowości stanowi zwłaszcza przyjęcie za obiekt badań szybkich atomów powstałych w procesie zderzenia na skutek przechwyty elektronu przez jony pocisków – dotychczas w literaturze badano bowiem przede wszystkim wzbudzenia termicznych atomów tarczy. Ta pozornie niewielka zmiana wiązała się z koniecznością wprowadzenia istotnych modyfikacji zarówno procedury pomiarowej jak i metody analizy wyników. Obrona tematyka badawcza jest zarówno pod względem eksperymentalnym jak i interpretacyjnym bardzo wymagająca i niezwykle czasochłonna, i temu zapewne należy przypisać stosunkowo skromny jeszcze (niemniej jednak systematycznie powiększany) dorobek publikacyjny Doktoranta. Należy mieć nadzieję, że wyniki zebrane w rozprawie doktorskiej doczekają się również w niedługim czasie publikacji.

Uzyskane dotychczas rezultaty eksperymentalne stanowią w moim przekonaniu wystarczającą bazę do dalszej analizy w modelu wzbudzenia poszerzonym o najważniejsze pominięte na obecnym etapie elementy. Analiza taka (z pewnością wymagająca dużych nakładów czasowych) mogłaby umożliwić bardziej jednoznaczną interpretację zaobserwowanych przez Doktoranta ciekawych efektów związanych z rozkładem ładunku chmury elektronowej we wzbudzonych szybkich atomach helu, i być może w konsekwencji przyczynić się do stworzenia ulepszanego teoretycznego modelu zderzenia.

Biorąc pod uwagę powyższe, stwierdzam, że w moim głębokim przekonaniu przedstawiona praca Pana mgr. Patryka Kamińskiego spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie Kandydata do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk fizycznych.

Danuta Stefańska