

dr hab. Jacek Styszyński
Instytut Fizyki, Uniwersytet Szczeciński
Szczecin

**Recenzja osiągnięcia naukowego oraz dorobku i aktywności
w zakresie badawczym i dydaktycznym
w postępowaniu habilitacyjnym dr. Jacka Rzadkiewicza**

I. Ocena osiągnięcia naukowego

Przedstawione do recenzji osiągnięcie naukowe to cykl czternastu publikacji zatytułowany „*Rozwój metod analizy wysokorozdzielczych widm rentgenowskich powstających podczas procesów zderzeniowych, procesów hamowania i w strukturach plazmowych oraz projektowanie warunków dla zarejestrowania procesu wzbudzenia jądra poprzez wychwyty elektronu*”. Wszystkie publikacje są wieloautorskie, w sześciu z nich habilitant jest pierwszym autorem. Sumaryczny Impact Factor (IF) tych publikacji wynosi 80, w tym dla 10 z nich jest bliski lub większy niż 3. Wśród publikacji tych jedna o IF = 41,6 ukazała się w Nature, jedna o IF=7,4 w Physical Review Letters, a jedna o IF = 2,9 jako Rapid Communication w Physical Review A. Publikacje ukazały się w latach 2006-2019, z czego 6 w latach 2017-2019. Do dokumentacji habilitant dołączył oświadczenia współautorów potwierdzające, że badania związane z daną publikacją miały charakter zespołowy zarówno w części eksperymentalnej jak i związanej z obliczeniami i interpretacją wyników. Dla każdej publikacji cyklu autor zamieszcza opis jego wkładu w jej powstanie oraz procentowy udział. W pięciu pracach autor określa swój wkład na 50% lub więcej, a w czterech na 25% - 20%. Publikacje te doczekały się 193 cytowań, co świadczy o tym, że zostały one zauważone przez społeczność badaczy zajmujących się podobnymi zagadnieniami.

Tematem badawczym o ogromnym znaczeniu teoretycznym jak i możliwych potencjalnie zastosowaniach jest zjawisko NEEC i określenie warunków dla jego zarejestrowania, tj. powstania procesu wzbudzenia jądra atomowego w wyniku wychwyty elektronu do niezapełnionej powłoki atomu, po którym następuje deekscytacja do stanu podstawowego i uwolnienie energii. W badaniach tych rozważa się jądro molibdenu występujące w stanie izomerycznym ^{93m}Mo o spinie 21/2 i parzystości dodatniej, energii ok. 2,4 MeV i czasie połowicznego zaniku bliskim $t_{1/2} = 6,8\text{h}$. Jądro w tym stanie może być wzbudzone do stanu pośredniczącego o spinie 17/2 i parzystości dodatniej, leżącego o 4,8 keV powyżej stanu izomerycznego, o czasie połowicznego zaniku $t_{1/2} = 3,5\text{ ns}$. Stan pośredniczący rozpada się sekwencyjnie do stanu podstawowego, przy czym przejście $17/2^+ \rightarrow 13/2^+$ o energii 268 keV może służyć do identyfikacji procesu NEEC. W wyniku przeprowadzonych zaawansowanych obliczeń udało się autorom ustalić najbardziej efektywne warunki dla wytworzenia jonów molibdenu w stanie izomerycznym ^{93m}Mo w reakcji $^{91}\text{Zr} + ^4\text{He}$ i

$^{90}\text{Zr} + ^7\text{Li}$ jak również energie kinetyczne jonów molibdenu o różnym stopniu jonizacji począwszy od $q=+32$ (i konfiguracji elektronowej $1s^22s^22p^6$) do $q=+36$ (i konfiguracji elektronowej $1s^22s^22p^2$), dla których wychwyty elektronu do powłoki N lub M może powodować przejście jądra molibdenu do stanu wzbudzonego. Te obliczenia pozwoliły na wyznaczenie stanów ładunkowych q oraz kinetycznych energii rezonansowych jonów ^{93m}Mo , dla których w procesie wychwyty elektronu uwalniana jest ilość energii potrzebna do przejścia jądra ze stanu izomerycznego do pośredniczącego. Przeprowadzony wg teoretycznych wskazówek eksperyment w Arragone National Laboratory w USA w wykorzystaniu spektrometru Gammasphere pozwolił na identyfikację sekwencji przejść wskazującą na wzbudzenie stanu izomerycznego do stanu pośredniczącego w wyniku procesu NEEC. Należy uznać to za ogromny sukces, gdyż jest to pierwsze eksperymentalne potwierdzenie procesu NEEC dla izomeru ^{93m}Mo . Dla przeprowadzonego eksperymentu określono po raz pierwszy prawdopodobieństwo zajścia procesu NEEC dla tarczy węglowej na 1%, a odpowiadający temu przekrój czynny na 40 b. Autor wraz ze współpracownikami wyznaczył także optymalne warunki dla zajścia procesu NEEC dla stanu izomerycznego ^{242m}Am o spinie 5 i ujemnej parzystości wytwarzanego w reakcji $^{242}\text{Pu} + ^2\text{D}$. Autorzy przewidują, że w wyniku wychwyty elektronu do niezapełnionej powłoki atomowej, następować może wzbudzenie jądra Am do stanu pośredniczącego o spinie 3 i parzystości ujemnej, leżącego 4 keV powyżej stanu 5^- . W badaniach teoretycznych dla tarcz stałych ^7Li , ^{12}C i ^{27}Al wyznaczają średnie stany ładunkowe w funkcji ich energii kinetycznych oraz rezonansowe energie kinetyczne jonów ^{242m}Am . Ponadto obliczają również teoretyczne siły rezonansowe dla wychwyty elektronu do poszczególnych podpowłok w funkcji energii jonów. Przeprowadzone badania pozwalają przewidywać, że największe przyczynki do zajścia procesu NEEC pochodzą od powłok np ($n = 5, 6, 7$) dla jonów ^{242m}Am o stanach ładunkowych $q = +54$ do $q = +62$ przy energiach kinetycznych 3,0 - 5,5 MeV/A. Wyniki badań autora i współpracowników dotyczące zjawiska NEEC opublikowane zostały w artykule w prestiżowym czasopiśmie Nature (A11) oraz w Physica Review C (A10, A14).

Niezmiernie ciekawym obszarem zainteresowań dr. Jacka Rządkiwicza są badania dotyczące atomów wydrążonych, czyli atomów z podwójnie zjonizowaną powłoką K. Autor wraz ze współpracownikami rozważa dwa mechanizmy usunięcia elektronów z powłoki K przez jeden foton (DPI): tzw. strząsanie oraz mechanizm zderzeniowy. W mechanizmie SO (*shake off*) pierwszy z elektronów w wyniku zaabsorbowania fotonu bardzo szybko opuszcza atom, a pozostałe elektrony odczuwają nagłą zmianę potencjału jądra, co prowadzi to do jonizacji (strząsania) pozostałych powłok, w tym drugiego elektronu powłoki K. W mechanizmie KO (*knock out*) pierwszy z elektronów po zaabsorbowaniu fotonu oddziałuje kulombowsko z drugim z elektronów, przekazuje mu część swojej energii, i oba elektrony prawie jednocześnie opuszczają atom. Stan atomowy podwójnie zjonizowany jest krótko żyjącym stanem (poniżej 1fs) wysoko wzbudzonym i ulega natychmiastowej deekscytacji, czemu towarzyszy emisja fotonu. W ten sposób mierzone widmo rentgenowskie zawiera charakterystyczne linie hipersatelitarne $K^h\alpha_1$, $K^h\alpha_2$ (OEOP), $K\alpha\alpha^h$ (TEOP), wyróżniające się nadzwyczajnie dużą szerokością. Przeprowadzone

przez autora i współpracowników zaawansowane obliczenia szerokości linii hipersatelitarnych $K^h_{\alpha 1}$, $K^h_{\alpha 2}$ oparte na metodzie MCDF z uwzględnieniem poprawek relatywistycznych do oddziaływania dwuelektronowego oraz efektów QED nie dały wartości porównywalnych z wynikami eksperymentu. Uwzględnienie w kolejnym kroku efektu otwartej powłoki walencyjnej (OVC) i co za tym idzie - przejść odpowiadających grupie stanów początkowych i grupie stanów końcowych spowodowało zwiększenie efektywnych szerokości linii hipersatelitarnych. Kolejnym czynnikiem poprawiającym zgodność szerokości badanych linii z wartościami eksperymentalnymi jest uwzględnienie efektu jonizacji i wzbudzenia zewnętrznych powłok atomowych (OIE). W tym celu autor i współpracownicy rozważyli dwa scenariusze strząsania elektronów z zewnętrznych powłok, które doprowadziły do bardzo ciekawych konkluzji. Pierwszy z nich (OIE1) dominuje w przypadku wysokich energii fotonu (znacznie przewyższających energię wiązania elektronów powłoki K) i prowadzi do zredukowanego poszerzenia szerokości linii hipersatelitarnych. Drugi scenariusz (OIE2) dotyczy średnich i niskich energii fotonów i skutkuje silniejszym strząsaniem elektronów z powłok walencyjnych, co prowadzi do dodatkowego poszerzenia analizowanych linii hipersatelitarnych. Ten mechanizm okazał się dominujący dla rozważanego zakresu energii fotonów i uwzględnienie go w obliczeniach doprowadziło do dobrej zgodności obliczonych wartości szerokości linii hipersatelitarnych z doświadczeniem dla rozważanych atomów Ca, V, Cr, Co i Zn. W przypadku przejść dwuelektronowych (TEOP) autor badał atomy wydrążone Mg, Al i Si. W celu uzyskania wartości teoretycznych zgodnych z doświadczalnymi dla energii przejść, względnych intensywności i szerokości linii widmowych autor wykonał zaawansowane obliczenia metodą MCDF z uwzględnieniem poprawki Breita do oddziaływań międzyelektronowych i efektów QED. Istotnym okazało się uwzględnienie efektów korelacji elektronowej na poziomie wzbudzeń jedno- i dwuelektronowych. Ponadto w obliczeniach uwzględniono efekt otwartej powłoki walencyjnej i efekt jonizacji i wzbudzenia elektronów zewnętrznych powłok atomowych. Wyznaczone w powyższy sposób względne intensywności przejść dają dobrą zgodność z wartościami doświadczalnymi (najlepszą w porównaniu z dotychczas znanymi wartościami teoretycznymi), a obliczone wartości szerokości linii $K^h_{\alpha\alpha}$ zostały uzyskane po raz pierwszy. Wyniki tych badań opublikowane zostały w artykule w Physical Review Letters (A5) i jako Rapid Communication w Physical Review A (A9). Stanowią one istotny wkład w rozwój fizyki atomowej i mogą być wykorzystane w wysokorozdzielczej diagnostyce rentgenowskiej plazmy.

Prace związane z rozwojem metod analizy wysokorozdzielczych widm rentgenowskich stanowią istotną część osiągnięcia naukowego habilitanta. Badania te dotyczą widm powstających podczas procesów hamowania jonów w tarczach stałych (A2, A4) oraz widm powstających w strukturach plazmowych (A6, A7, A8, A12, A13). W zaprojektowanym i wykonanym przez dr. J. Rzakiewiczza eksperymencie na liniowym akceleratorze w instytucie GSI w Darmstadt mierzone były widma rentgenowskie serii K emitowane przez stały ośrodek hamujący SiO_2 (oraz przez jony Ca) przy różnych głębokościach penetracji tarczy przez jony Ca. Autorzy zbadali wpływ dodatkowych dziur w powłoce L i M (powłoka walencyjna) na położenie linii

satelitarnych. Analiza danych eksperymentalnych z wykorzystaniem zaawansowanych obliczeń teoretycznych umożliwiła prawidłową interpretację widm, wyznaczenie dokładnych wartości eksperymentalnych energii promieniowania rentgenowskiego i intensywności linii $K\alpha L^N$ w trzech etapach hamowania mimo zastosowanego prostego modelu atomowego uwzględniającego efekt chemiczny wiązań z atomami tlenu poprzez zmianę obsadzenia powłok walencyjnych atomu Si. Wyniki badań dr. J. Rzadkiewicza zaprzeczają hipotezie o tworzeniu się struktur nano-plazmowych wokół toru jonu wapnia podczas procesu hamowania w tarczy, co jest kolejnym ciekawym wnioskiem z jego badań.

Udział habilitanta w projekcie związanym z modernizacją wysokorozdzielczej diagnostyki rentgenowskiej dla tokamaka JET w Culham w Wielkiej Brytanii zaowocował ważnymi wynikami eksperymentalnymi i teoretycznymi. Zaprojektowana przez autora modyfikacja, pozwalająca monitorować promieniowanie rentgenowskie pochodzące od zanieczyszczeń z obszaru plazmy centralnej tokamaka JET (emitowane przez jony Ni^{26+} , Mo^{32+} , W^{45+} i W^{46+}), oparta jest na unikatowej konstrukcji spektrometru umożliwiającej rejestrowanie widma dla dwóch grup spektralnych: dla jonów Mo^{32+} , W^{45+} i W^{46+} (górny kanał) oraz dla Ni^{26+} (dolny kanał). Na końcu kanałów diagnostycznych zainstalowano specjalnie zaprojektowane detektory gazowe typu GEM o wysokiej energetycznej zdolności rozdzielczej i czułości pozycyjnej. W celu weryfikacji i kalibracji energetycznej mierzonych widm uzyskanych w tokamaku JET konieczne było przeprowadzenie niezależnych pomiarów odpowiednich widm w kontrolowanych warunkach temperatury i gęstości elektronowej w urządzeniu typu elektronowa pułapka jonowa (EBIT). Przeprowadzona precyzyjna kalibracja pozwoliła na bardzo dokładne wyznaczenie długości fal linii zmierzonych eksperymentalnie w widmach rentgenowskich jonów wolframu niklo- i miedziopodobnych zarejestrowanych dla urządzenia EBIT. Wyznaczone ostatecznie z dokładnością 0.9 mÅ długości fal linii widma rentgenowskiego zarejestrowanego na tokamaku JET dla jonów wolframu W^{45+} , W^{46+} są najdokładniejszymi wartościami eksperymentalnymi dla tych linii odpowiadających widmom uzyskanym dla plazmy generowanej w urządzeniach typu tokamak. Prowadzonym badaniom towarzyszyły zaawansowane obliczenia prowadzone za pomocą pakietu FAC opartego o metodę Diraca-Focka-Slatera i model kolizyjno-radiacyjny (CRM) oraz za pomocą metody MCDF z uwzględnieniem efektów korelacji elektronowej metodą CI z pojedynczymi i podwójnymi wzbudzeniami. Wyznaczone z uwzględnieniem efektów korelacji elektronowej teoretyczne długości linii widmowych niklo- i miedziopodobnych jonów wolframu zgadzają się bardzo dobrze z wartościami eksperymentalnymi.

Dr Jacek Rzadkiewicz uczestniczył również w badaniach eksperymentalnych związanych z produkcją stanów S i P powstających w jonach helo- i berylopodobnych uranu. Wyniki tych badań opublikowane zostały w pracach A1 i A3. W doświadczeniu rozpędzone litopodobne jony uranu U^{+89} zderzane były z molekułami N_2 tarczy gazowej. Powstające podczas procesów jonizacji (U^{+88}) i wychwytu elektronu (U^{+90}), towarzyszących zderzeniom jon-atom, widma rentgenowskie poddane zostały zaawansowanej analizie. Wykazano, że dla energii jonu poniżej 100 MeV/u, jonizacja powłoki K prowadzi do tworzenia się stanów S w jonach helopodobnych przy czym nie

jest zachowany tzw. model statystyczny. Natomiast procesy wychwytu elektronu prowadzą do tworzenia się stanów P zgodnie z tym modelem. Stwierdzono ponadto wysoki stopień selektywności produkcji stanów 1S_0 powstających w wyniku jonizacji powłoki K litopodobnych jonów uranu U^{+89} .

Ten dość skrótowy opis wyników badań naukowych przedstawionych w serii 14 obszernych publikacji nie oddaje w pełni ich rozmiaru i znaczenia. Wszystkie prezentują wysoki poziom naukowy. Zawierają cenne wyniki i wnioski związane z rozwojem metod analizy wysokorozdzielczych widm rentgenowskich, wyjaśnieniem procesu podwójnej fotojonizacji oraz wyznaczeniem warunków i obserwacją zjawiska wzbudzenia jądra poprzez wychwyt elektronu. Część tych wyników opublikowana została w artykułach w prestiżowych czasopismach naukowych Nature, Physical Review Letters oraz w Physical Review A (jako Rapid Communication) i C. Z pełnym przekonaniem stwierdzam, że przedstawione do recenzji osiągnięcie naukowe stanowi znaczny wkład autora w rozwój fizyki.

II. Ocena dorobku i aktywności naukowej, dydaktycznej, popularyzatorskiej oraz w zakresie współpracy międzynarodowej

A. Dorobek i aktywność naukowa

Poza 14 artykułami (A1-A14) z cyklu habilitacyjnego dr Jacek Rządkiwicz wykazuje w autoreferacie pozostały dorobek w postaci 30 prac (C1-C30) opublikowanych w recenzowanych i punktowanych czasopismach naukowych z bazy JCR (za wyjątkiem artykułu C2). Poruszane w nich zagadnienia dotyczą m.in. zjawisk z udziałem jonów uranu (radiacyjne procesy rekombinacyjne, rozpad atomowych stanów wzbudzonych, czasy życia wiązek, wysokoenergetyczne promieniowanie rentgenowskie), badania przekrojów czynnych na jonizację i wychwyt elektronu w procesach zderzeniowych, badania struktury widm rentgenowskich indukowanych w procesach zderzeniowych oraz w plazmie impulsowej, zagadnień dotyczących monitoringu i diagnostyki plazmy na rzecz reaktora termojądrowego ITER. Publikacje te zostały zacytowane 224 razy. W wykazie opublikowanych prac naukowych po doktoracie autor zamieszcza poza pracami A1-A14 i C1-C30 dodatkowo 9 prac z czasopism z bazy JCR oraz 17 publikacji w czasopismach spoza bazy JCR, najczęściej materiałów konferencyjnych. Globalne parametry dotyczące całego dorobku habilitanta wynoszą: sumaryczny impact factor według Journal Citation Reports - 155, liczba wszystkich cytowań bez autocytowań wg bazy Web of Science (WoS) – 793, a indeks Hirscha wg WoS – 15, a więc są na dobrym poziomie, wystarczającym w zupełności dla kandydatów do stopnia doktora habilitowanego nauk fizycznych.

Bardzo dobrze wyglądają inne aspekty działalności naukowej habilitanta. Kierował on projektem badawczym w ramach Programu Badań Międzynarodowych Departamentu Obrony USA oraz projektem badawczym finansowanym z programu regionalnego województwa mazowieckiego. Był kierownikiem dwóch komercyjnych projektów badawczych realizowanych dla KGHM i PGNiG oraz wykonawcą w 4 projektach

badawczych. Brał udział w 3 pracach typu projektowo - konstrukcyjnego dla przemysłu, jest współautorem 5 opracowań i ekspertyz na potrzeby przemysłu. Wygłosił po doktoracie 9 referatów na krajowych i zagranicznych konferencjach naukowych o międzynarodowym zasięgu oraz był współautorem 16 komunikatów posterowych prezentowanych na 7 konferencjach międzynarodowych. Jest przewodniczącym Rady Zarządzającej *Centrum Nowych Technologii Energetycznych*, powołanego w 2014 roku przez 12 uczelni i instytutów badawczych.

B. Współpraca międzynarodowa

Dr Jacek Rządkiwicz w latach 2004 – 2005 pracował jako *postdoc* w grupie fizyki atomowej prof. T. Stöhlkera w GSI w Darmstadt w Niemczech, a w latach 2008-2012 pracował w Oxfordshire w Wielkiej Brytanii jako koordynator wysokorozdzielczej diagnostyki rentgenowskiej. W latach 2007-2008 był przedstawicielem MNiSW w europejskim forum strategicznym ds. infrastruktury badawczych ESFRI, a w latach 2016-2017 członkiem doradczego komitetu STAC konsorcjum europejskiego realizującego program EUROfusion,. Jak wspomniałem wyżej, kierował również projektem badawczym w ramach Programu Badań Międzynarodowych Departamentu Obrony USA. Recenzował 6 artykułów dla 3 międzynarodowych czasopism naukowych. Ponadto dr Jacek Rządkiwicz prowadząc swoje badania współpracował z naukowcami z 11 uczelni i instytutów naukowych. Przyniesione fakty pozwalają pozytywnie ocenić jego działalność naukową w kontekście współpracy międzynarodowej.

C. Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji

Osiągnięcia dydaktyczne habilitanta są dość skromne. Jest to jednak zrozumiałe, jeśli uwzględnić fakt, że pracował i pracuje on w instytucjach o charakterze badawczym. Dr Jacek Rządkiwicz przez 2 lata prowadził zajęcia w WSliZ w Rzeszowie z przedmiotów fizyka, matematyka dla informatyków, przedmiotów dotyczących programowania. Prowadził również zajęcia jako prelegent w czasie letnich szkół dla studentów, doktorantów i młodych pracowników naukowych w Kudowie-Zdroju (2006) i w Budapeszcie (2007). Wypromował jedną pracę magisterską i sprawował opiekę nad studentami w ramach praktyk studenckich. Osiągnięcia habilitanta w zakresie popularyzacji nauki związane są z jego kilkukrotnym udziałem w audycjach telewizyjnych i radiowych popularyzujących naukę. Dorobek dydaktyczny i popularyzatorski dr. J. Rządkiwicza oceniam pozytywnie.

Podsumowanie

Przedstawione do recenzji *osiągnięcie naukowe* habilitanta stanowi zwartą i logiczną całość, a składające się na nie czternaście publikacji prezentuje wysoki poziom badań naukowych. Publikacje te zostały zauważone przez społeczność

naukową, o czym świadczy liczba cytowań tych publikacji. Zawierają one szereg istotnych dla rozwoju fizyki atomowej i jądrowej wyników, jak chociażby określenie warunków dla powstania zjawiska wzbudzenia jądra atomowego przez wychwyty elektronu i jego zaobserwowanie czy wyjaśnienie poszerzenia linii hipersatelitarnych poprzez uwzględnienie mechanizmu strąsania elektronów z powłok walencyjnych. Rezultaty badań habilitanta opublikowane zostały w renomowanych czasopismach międzynarodowych takich jak Nature, Physical Review Letters czy Physical Review A i C. Przedstawione do oceny pozostałe publikacje oraz inne osiągnięcia naukowe pozwalają umiejscowić jego osiągnięcie habilitacyjne w szerszym kontekście i postrzegać go jako dojrzałego badacza zajmującego się zarówno stroną eksperymentalną badań jak i teoretyczną. Wyniki badań dr. Jacka Rządkiwicza mają charakter zarówno poznawczy jak i praktyczny, co również wpływa na pozytywną ocenę całokształtu jego działalności. Tematyka podejmowanych przez niego badań jest zawsze niezwykle aktualna, a powstające w rezultacie tych badań koncepcje i wyniki są interesujące i naukowo ważne.

Stwierdzam, że dorobek naukowy i aktywność badawcza habilitanta spełniają wszystkie ustawowe i zwyczajowe kryteria pozwalające nadać mu stopień doktora habilitowanego i wnoszę o nadanie dr. Jackowi Rządkiwiczowi stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych, w dyscyplinie nauki fizyczne.



Szczecin, 06.04.2020