

Autoreferat

Jakub Szlachetko

Instytut Fizyki, Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach

20.08.2015

Spis treści

1. Curriculum Vitae

- 1.1 Dane personalne
- 1.2 Wykształcenie i stopnie naukowe
- 1.3 Przebieg zatrudnienia
- 1.4 Staże naukowe
- 1.5 Dane bibliometryczne

2. Osiągnięcie naukowe

- 2.1 Tytuł osiągnięcia naukowego
- 2.2 Wykaz publikacji stanowiący osiągnięcie naukowe
- 2.3 Omówienie celu naukowego prac

3. Streszczenie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych oraz dydaktycznych

1. Curriculum Vitae

1.1 Dane personalne:

Imię i nazwisko:	Jakub Szlachetko
Data i miejsce urodzenia:	10.06.1977, Kielce
Adres:	Instytut Fizyki Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach ul. Świętokrzyska 15 25-406 Kielce Polska
Tel:	+48 41 349 64 40
Email:	jakub.szlachetko@psi.ch

1.2 Wykształcenie i stopnie naukowe

2007	PhD in Natural Sciences, Departament Fizyki, Uniwersytet we Fribourgu, Szwajcaria (2007), rozprawa pt. „Resonant Raman X-ray scattering in low Z elements and relative detection efficiency of charge-coupled devices”, promotor Prof. Jean-Claude Dousse.
2003	magister fizyki, Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach, praca pt: „Zastosowanie rentgenowskiej analizy fluorescencyjnej z całkowitym odbiciem zewnętrznym do określania koncentracji pierwiastków śladowych”, promotor Prof. Janusz Braziewicz.

1.3. Przebieg zatrudnienia:

2007 -	adiunkt w Zakładzie Fizyki Atomowej Instytutu Fizyki, Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach.
2003-2007	asystent w Zakładzie Fizyki Atomowej Instytutu Fizyki, Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach.

1.4 Staże naukowe

2013-	naukowiec, Paul Scherrer Institut (PSI), Villigen, Szwajcaria, w SwissFEL na linii eksperymentalnej ESA.
2010-2013	pozycja PostDoc, Paul Scherrer Institut (PSI), Villigen, Szwajcaria, w Swiss Light Source (SLS) na linii eksperymentalnej SuperXAS.
2008-2010	pozycja PostDoc, Europejskie Centrum Promieniowania Synchrotronowego, Grenoble, Francja. Linia eksperymentalna ID21.
2007-2008	wizytujący naukowiec, Europejskie Centrum Promieniowania Synchrotronowego, Grenoble, Francja. Linia eksperymentalna ID21.
2003-2007	doktorant, Department Fizyki, Uniwersytet we Fribourgu, Szwajcaria.

1.5 Dane bibliometryczne*.

Całkowita liczba publikacji**	71
Liczba publikacji jako pierwszy/korespondencyjny autor	20
Liczba publikacji po uzyskaniu tytułu doktora	66
Całkowita liczba cytowań	599
Całkowita liczba cytowań bez autocytowań	463
Średnia cytowań na jedną publikację	7.6
Indeks Hirscha	14
Sumaryczny Impact Factor	273

* na podstawie bazy danych Web Of Science z dnia 10.07.2015.

** artykuły indeksowane w bazie Journal Citation Reports.

2. Osiągnięcie naukowe

2.1 Tytuł osiągnięcia naukowego

Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595 ze zm.) stanowiącego podstawę postępowania habilitacyjnego:

Osiągnięcie habilitacyjne stanowi cykl publikacji na temat:

Synchrotronowe metody spektroskopii rentgenowskiej w badaniach struktury elektronowej i dynamiki przemian materii.

2.2 Wykaz publikacji stanowiący osiągnięcie naukowe

Na cykl składają się następujące artykuły:

(I_f – impact factor z roku publikacji, N_c – liczba cytowań, % - szacunkowy wkład własny, szczegółowy opis wkładu zawarty jest w załączniku nr.4 „Wykaz dorobku habilitacyjnego”)

Poz	Publikacja	I _f	N _c	%
H1	J. Szlachetko, M. Nachtegaal, E. de Boni, M. Willmann, O. Safonova, J. Sa, G. Smolentsev, M. Szlachetko, J. A. van Bokhoven, J.-Cl. Dousse, J. Hoszowska, Y. Kayser, P. Jagodzinski, A. Bergamaschi, B. Schmitt, C. David, A. Lucke <i>A von Hamos x-ray spectrometer based on a segmented-type diffraction crystal for single-shot x-ray emission spectroscopy and time-resolved resonant inelastic x-ray scattering studies</i> Review of Scientific Instruments 83, 103105 (2012). DOI:10.1063/1.4756691	1.6	33	75%
H2	J. Szlachetko, J. Sá <i>Rational design of oxynitride materials: From theory to experiment</i> CrystEngComm 15, 2583-2587 (2013). DOI: 10.1039/C3CE26909D	3.9	11	50%
H3	J. Szlachetko, K. Michalow-Mauke, M. Nachtegaal, J. Sa <i>Determination of conduction and valence band electronic structure of anatase and rutile TiO₂</i> Journal of Chemical Sciences 126, 511 (2014) DOI:10.1007/s12039-014-0584-1	1.2	2	75%
H4	J. Szlachetko, J. Sá, M. Nachtegaal, U. Hartfelder, J.-Cl. Dousse, J. Hoszowska, D.L.A. Fernandes, H. Shi, C. Stampfl <i>Real Time Determination of the Electronic Structure of Unstable Reaction Intermediate During Au₂O₃ Reduction</i> The Journal of Physical Chemistry Letters, 5, 80-84 (2014). DOI: 10.1021/jz402309s	7.5	3	50%

Poz	Publikacja	I _f	N _c	%
H5	J. Szlachetko, M. Nachtegaal, J. Sa, J.-Cl. Dousse, J. Hoszowska, E. Kleymenov, M. Janousch, O.V. Safonova, C. König, J.A. van Bokhoven <i>High energy resolution off-resonant spectroscopy at sub-second time resolution: (Pt(acac)₂) decomposition</i> Chemical Communications 48, 10898-10900 (2012). DOI: 10.1039/C2CC35086F	6.4	19	75%
H6	W. Blachucki, J. Szlachetko, J. Hoszowska, J.-Cl. Dousse, Y. Kayser, M. Nachtegaal, J. Sa <i>High energy resolution off-resonant spectroscopy for x-ray absorption spectra free of self-absorption effects</i> Physical Review Letters 112, 173003 (2014). DOI:10.1103/PhysRevLett.112.173003	7.5	1	50%
H7	J. Szlachetko, C.J. Milne, J. Hoszowska, J.-Cl. Dousse, W. Blachucki, J. Sa, Y. Kayser, M. Messerschmidt, R. Abela, S. Boutet, C. David, G. Williams, M. Pajek, B. Patterson, G. Smolentsev, J.A. van Bokhoven, M. Nachtegaal <i>The electronic structure of matter probed with a single femtosecond hard x-ray pulse</i> Structural Dynamics 1, 21101 (2014). DOI:10.1063/1.4868260	0*	4	75%

* Structural Dynamics jest czasopismem recenzowanym które zostało utworzone w roku 2013 przez American Institute of Physics (AIP), dlatego też Impact Factor nie jest jeszcze indeksowany w bazie danych Journal Citation Report. Obecnie Structural Dynamics jest indeksowane w bazie Web Of Science.

Powyższe prace są wynikiem kilkunastu eksperymentów z wykorzystaniem promieniowania rentgenowskiego na Szwajcarskim Źródle Promieniowania Synchrotronowego (SLS - Swiss Light Source) oraz pierwszym na świecie laserze rentgenowskim na elektronach swobodnych w USA (LCLS – Linac Coherent Light Source). Eksperymenty przeprowadzone były przy współpracy z naukowcami ze Szwajcarii w Paul Scherrer Institute (PSI), Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Uniwersytetu w Fribourgu, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), oraz naukowcami z LCLS (USA), Uniwersytetu w Sydney (Australia), Uniwersytetu w Aveiro (Portugalia), J. Stefan Institute (Słowenia) i Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

2.3 Omówienie celu naukowego prac

Wszystkie zmiany obserwowane w procesach biologicznych, chemicznych oraz fizycznych są inicjowane poprzez zmianę w konfiguracji elektronowej atomów. Podczas transformacji, atomy przechodzą do nowego stanu równowagi energetycznej wskutek reorganizacji układu elektronowego. Procesy przemiany materii, jak również zmiany otoczenia chemicznego danego pierwiastka zachodzą w różnych czasach rozciągających się w szerokim zakresie od femto- do kilku sekund. Możliwość wykrywania oraz badania kolejności zmian stanów elektronowych ma podstawowe znaczenie dla zrozumienia i poznania etapów w reakcjach chemicznych czy procesach biologicznych. Większość procesów może być stymulowana w laboratoriach, ale wciąż brak jest technik eksperymentalnych pozwalających na badanie stanów materii w czasie rzeczywistym i w rzeczywistych warunkach pracy. W niedawnych materiałach konferencyjnych na temat kierunków rozwoju technik pomiarowych możemy przeczytać¹: *„Obecnie szczegółowo znane są mechanizmy tylko kilku reakcji – techniki pomiarowe są zazwyczaj zbyt powolne, aby umożliwić monitorowanie stanów pośrednich. To trochę tak, jakby widzieć, kto pierwszy przekracza linie mety w wyścigu, ale nie wiedzieć jak się tam dostał.”*

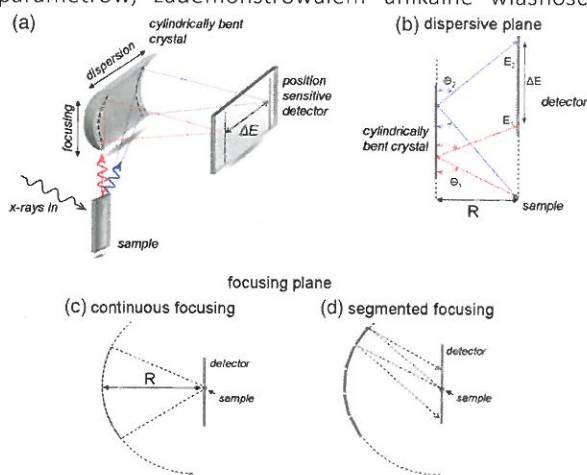
W ostatnich latach obserwuje się znaczący rozwój i zastosowanie technik spektroskopii rentgenowskiej wykorzystujących promieniowanie X w zakresie energii rzędu kilku, kilkunastu tysięcy elektronowoltów. Ten zakres energetyczny (zwany z ang. „hard X-ray”) pozwala na badanie materii w warunkach kontrolowanych np. temperatury, stanu skupienia czy ciśnienia. Duża przenikalność promieniowania X umożliwia pomiary, w których próbka umieszczona jest w zamkniętych komorach, pozwalających na kontrolowanie przemian materii. Promieniowanie X pozwala na badanie stanów elektronowych praktycznie wszystkich pierwiastków układu okresowego, z zastosowaniem technik absorpcyjnych (XAS – „X-ray absorption spectroscopy”), technik emisyjnych (XES – „X-ray emission spectroscopy”) czy połączenia technik XAS/XES pozwalającego na pomiar rezonansowego rozpraszania promieniowania X (RIXS – „Resonant Inelastic X-ray Scattering”). Szerokie zastosowanie oraz ciągły rozwój technik spektroskopii rentgenowskiej możliwy jest dzięki stałemu rozwojowi źródeł promieniowania synchrotronowego, w szczególności dzięki nowo budowanym synchrotronom wykorzystującym najnowsze techniki akceleratorowe (tj. MaxIV-Szwecja, PetraIII-Niemcy czy Solaris w Polsce). Duże nadzieje na nowe możliwości eksperymentalne związane są również z najnowocześniejszymi źródłami promieniowania X, tzw. źródłami czwartej generacji, opartymi na laserze na swobodnych elektronach (XFEL z ang. - „X-ray Free Electron Laser”). Promieniowanie X dostępne na tych źródłach charakteryzuje się wyjątkową intensywnością, monochromatycznością, koherencją, polaryzacją oraz ultra-krótką długością pulsu w zakresie femtosekundowym, i obecnie zaczyna być szeroko używane przez naukowców z wielu dziedzin badań.

Głównym celem prac naukowych będących podstawą mojego osiągnięcia habilitacyjnego było wykorzystanie oraz rozwój technik rentgenowskich, pozwalających na pomiary zmian stanów elektronowych w materiałach istotnych dla procesów katalizy i fotokatalizy. Zastosowane przeze mnie nowe rozwiązania w technikach spektroskopowych, w szczególności budowa i wykorzystanie wysokorozdzielczego spektrometru krystalicznego, umożliwiło bardzo czułe pomiary struktury elektronowej. W kolejnych pracach pokazałem że dzięki opracowanej przeze mnie metodzie spektroskopowej, której nadałem nazwę „High energy resolution off-resonant spectroscopy (HEROS)” można uzyskać informacje o stanie chemicznym danego pierwiastka oraz badać jego najniższe stany elektronowe, które odpowiedzialne są za wiązania chemiczne czy molekularne. Metoda HEROS łączy energetyczną zdolność rozdzielczą układu eksperymentalnego, dyspersyjną metodę detekcji promieniowania X oraz proces poza-rezonansowego rozpraszania promieniowania X w atomach. W pracach pokazałem, że metoda HEROS umożliwia pomiary w bardzo krótkich czasach, nieosiągalnych dla technik absorpcyjnych, jak również może być stosowana w pomiarach z użyciem femtosekundowych pulsów promieniowania X generowanych na źródłach XFEL.

Wyniki zaprezentowane w pracy [H1] przedstawiają koncept oraz główne parametry spektrometru krystalicznego, który zaprojektowałem i wybudowałem na linii eksperymentalnej SuperXAS w Szwajcarskim Źródle Promieniowania Synchrotronowego (Swiss Light Source, SLS). W porównaniu z

¹ W. R. Flavell, Proceedings of PAC07, New Mexico, USA (2007) (<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/p07/PAPERS/FRZKI03.PDF>), cytat w języku oryginalnym: *„At present, the mechanisms of very few reactions are understood in any detail – measurement techniques are usually too slow to monitor the intermediates formed. It’s a bit like only being able to see who crosses the finishing line first in a race, and not how they got there.”*

innymi rozwiązaniami stosowanymi na liniach synchrotronowych², spektrometr został zaprojektowany w geometrii von Hamos'a, która wykorzystuje tylko jednowymiarowe ogniskowanie promieniowania X. Spektrometry typu von Hamos charakteryzują się niższą wydajnością detekcji, jak również słabszą energetyczną zdolnością rozdzielczą, w porównaniu na przykład do spektrometrów pracujących w geometrii Johanna. Z drugiej strony, spektrometr von Hamos'a pozwala na pomiary widm emisyjnych (XES) w trybie dyspersyjnym, który umożliwia detekcję promieniowania X w szerokim zakresie energetycznym (rzędu kilkudziesięciu – kilkuset eV) bez elementów skanujących w czasie trwania pomiarów. W perspektywie eksperymentów wymagających krótkich czasów akwizycji geometria von Hamos'a jest więc idealnym rozwiązaniem. Aby zapewnić relatywnie wysoką wydajność spektrometru oraz energetyczną zdolność rozdzielczą poniżej 1 eV, zastosowałem nowatorskie rozwiązanie polegające na użyciu kryształu dyfrakcyjnego w formie wąskich segmentów. Dzięki temu otrzymana energetyczna zdolność rozdzielcza spektrometru jest rzędu 200-300 meV na stosunkowo krótkim promieniu wygięcia kryształu, który zapewnia jednocześnie wysoką wydajność detekcji. Geometria spektrometru von Hamos oraz schematyczne przekroje w płaszczyznach dyspersyjnej i ogniskującej pokazane są na rysunku 1. W pracy [H1], oprócz szczegółów konstrukcji spektrometru oraz jego parametrów, zademonstrowałem unikalne własności spektrometru pozwalające na zastosowanie



Rysunek 1: Schemat przedstawiający zastosowanie segmentowego kryształu cylindrycznego w geometrii von Hamosa. a) schemat geometrii von Hamosa, b) przekrój w płaszczyźnie dyspersyjnej, c) przekrój w płaszczyźnie ogniskującej, d) przekrój w płaszczyźnie ogniskującej dla kryształu segmentowego. Z pracy [H1].

technik RIXS oraz XES z wysoką rozdzielczością czasową pomiaru.

Ostateczna wersja spektrometru von Hamos'a, który wyposażyłem w dodatkowe kryształy dyfrakcyjne w celu pomiarów promieniowania X w szerokim zakresie od 4 keV do 15 keV, została zainstalowana na linii eksperymentalnej SuperXAS jesienią 2012 r. Od tego czasu spektrometr jest głównym narzędziem wykorzystywanym przez użytkowników wykonujących eksperymenty na linii SuperXAS³. Od daty publikacji w październiku 2012 r., artykuł [H1] był cytowany 33 razy oraz wykorzystany w ponad 60-ciu eksperymentach. Warto zaznaczyć, że zaproponowane zastosowanie segmentowego kryształu dyfrakcyjnego w geometrii von Hamos'a zostało skomercjalizowane i obecnie tego typu rozwiązania są dostępne dla naukowców na rynku⁴. Obecnie pracuję nad skomercjalizowaniem przygotowywanych przez nas w Paul Scherrer Institute segmentowych kryształów o unikatowym rozmiarze segmentu 1mm oraz różnych

promieniach krzywizny, przy współpracy z działem transferu technologii. Zaprezentowany w pracy [H1] spektrometr został wykorzystany w eksperymentach, których wyniki przedstawione są w pracach będących podstawą prezentowanego osiągnięcia habilitacyjnego [H2]-[H7].

Metoda rezonansowego rozpraszania promieniowania X (z ang. RIXS – Resonant Inelastic X-ray Scattering) jest uznawana za jedną z najczulszych technik pomiarowych pozwalających na wykrycie bardzo niewielkich zmian w układzie elektronowym badanego pierwiastka⁵. Metoda ta oparta jest na procesie wzbudzenia pierwotnym promieniowaniem X elektronu rdzenia do stanów nieobsadzonych tuż powyżej poziomu Fermiego i jednoczesnej detekcji promieniowania X emitowanego przy przejściu atomu z tego stanu pośredniego do stanu końcowego. Poprzez monitorowanie intensywności promieniowania X, jak również analizę kształtu widm emisyjnych, można odtworzyć szczegółowy obraz

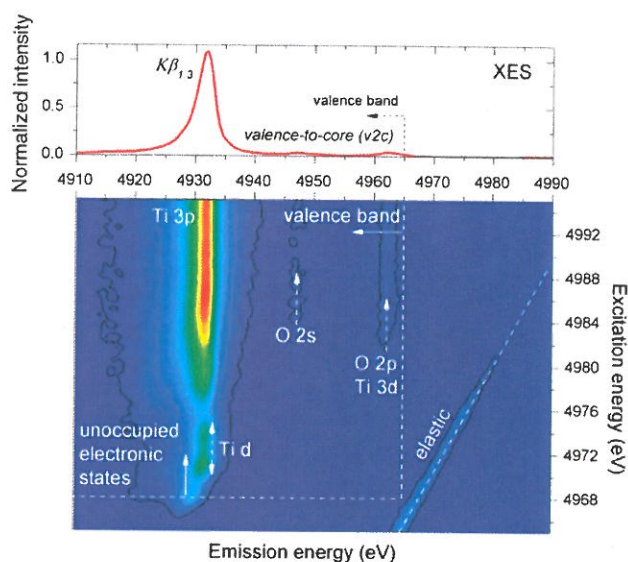
² np. D. Sokaras et al., *A seven-crystal Johann-type hard x-ray spectrometer at the Stanford Synchrotron Radiation Light Source*, Review of Scientific Instruments 84, 053102 (2013), doi:10.1063/1.4803669.

³ <http://www.psi.ch/sls/superxas/superxas>

⁴ <http://xrstech.com/x-ray-crystal-analyzers-2/>

⁵ np. Special Issue on: *Progress in Resonant Inelastic X-ray Scattering*, Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena, 188, 1-182 (2013).

stanów elektronowych. Metoda RIXS została zastosowana w pracach [H2] i [H3] poświęconych badaniu struktur elektronowych w fotokatalizatorach. W pracy [H2] skupiłem się na interpretacji widm RIXS otrzymanych dla nanocząstek tlenku tytanu oraz analizie wpływu domieszkowania na zmianę struktury elektronowej tego półprzewodnika. Tlenek tytanu jest najczęściej używanym fotokatalizatorem, niewydajnym jednak w zakresie światła widzialnego, dlatego też często jest domieszkiwany innymi pierwiastkami (np. N, Cr) w celu obniżenia przerwy energetycznej, z próbą jednoczesnego zachowania jego właściwości katalitycznych. W projekcie [H2] eksperyment wykonany został w zakresie energii krawędzi absorpcji K dla Ti, z detekcją widm emisyjnych dla przejścia $3p \rightarrow 1s$ oraz ze stanów walencyjnych do stanu $1s$ (tzw. przejście „valence-to-core”). W pracy pokazałem, że strategia pomiarów przejść z wyższych stanów elektronowych pozwala na szczegółowe wyznaczenie lokalnej struktury elektronowej tytanu. Porównując wyniki eksperymentalne z obliczeniami teoretycznymi, które wykonałem przy użyciu kodu FEFF9.0⁶, możliwe było określenie struktury stanów walencyjnych (Ti-d oraz O-2p, 2s), ich hybrydyzacji oraz energii i położenia w widmach RIXS. Pomiar RIXS przy użyciu przejść z wyższych stanów elektronowych (tj. $3p \rightarrow 1s$) okazały się także wyjątkowo czułe na określenie natury najniższych stanów nieobsadzonych 3d w Ti. Przy wzbudzeniu elektronu z powłoki $1s$ do stanu przejściowego 3d-zlokalizowanego, wzbudzony elektron oddziałuje z elektronami powłoki $3p$, powodując przesunięcie linii emisyjnej $3p \rightarrow 1s$ do niższych energii o 1.8 eV wskutek efektu ekranowania. Natomiast w przypadku wzbudzenia do stanów 3d-zdelokalizowanych oddziaływanie elektron-elektron jest znikome i przesunięcie energetyczne nie jest obserwowane. Zbadany efekt domieszkowania TiO_2 atomami N pokazał zmianę w konfiguracji walencyjnej poprzez przesunięcie orbitali N 2p (w stosunku do O 2p) do wyższych energii i zmniejszenie przerwy energetycznej o około 0.5 eV. Zaprezentowana w pracy [H2] strategia analizy danych uzyskanych w eksperymentach $K\beta$ -RIXS może być wykorzystywana do badania struktury elektronowej półprzewodników w rzeczywistym czasie domieszkowania, pozwalając na większą kontrolę struktury elektronowej przygotowywanych materiałów fotokatalitycznych. Ostatnio metoda opisana w pracy [H2] została zastosowana do określenia struktury elektronowej $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ w formie nanofilmów⁷ czy niestechiometrycznego TiO_{2-x} ⁸.



Rysunek 2: Widmo rezonansowego rozpraszania promieniowania X dla TiO_2 o strukturze anatazu. Główne stany elektronowe obserwowane z wykorzystaniem techniki RIXS są schematycznie podpisane na rysunku. Górny wykres przedstawia nie-rezonansowe widmo emisji promieniowania X (non-resonant XES) dla Ti wraz z opisem głównych pików emisji Ti. Z pracy [H3].

W kolejnym okresie moich badań naukowych, metodyka opisana w pracy [H2], łącząca pomiary RIXS z obliczeniami teoretycznymi została zastosowana do porównania stanów elektronowych w różnych strukturach TiO_2 . Wyniki tych badań są przedstawione w pracy [H3] skupiającej się na zastosowaniu metody RIXS do wyznaczenia struktur elektronowych w tlenku tytanu (IV), występującym w dwóch różnych strukturach krystalicznych: rutil i anataz. W szczególności skupiłem się na zbadaniu efektu różnych faz krystalicznych na populację zlokalizowanych oraz zdelokalizowanych stanów 3d w Ti. Podobnie jak w pracy [H2], eksperyment został wykonany w zakresie energii krawędzi absorpcji K dla tytanu. Przejście ze stanu wzbudzonego do końcowego było rejestrowane poprzez detekcję linii emisyjnej $K\beta_{1,3}$ jak również przez równoczesną detekcję przejść ze stanów walencyjnych ($K\beta_{2,5}$).

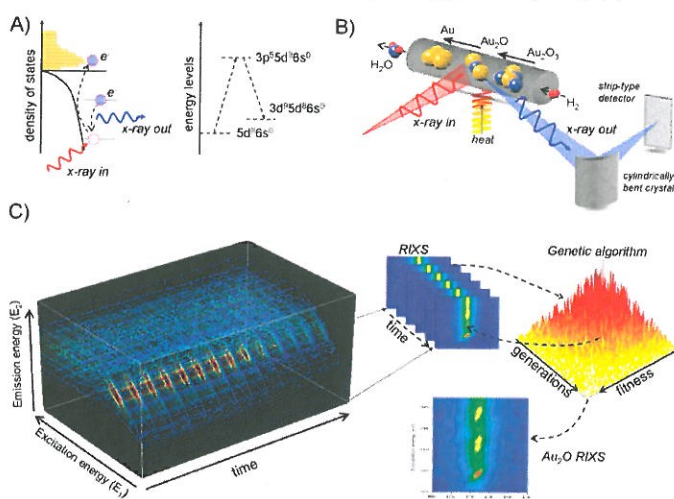
⁶ J.J. Rehr et al., *Parameter-free calculations of x-ray spectra with FEFF9*, Phys. Chem. Chem. Phys., 12, 5503-5513 (2010), doi:10.1039/b926434e.

⁷ J. Szlachetko et al., *Determination of conduction and valence band electronic structure of $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ thin film*, RSC Adv., 4, 11420-11422 (2014), doi:10.1039/C3RA47357K.

⁸ K. Kollbek et al., *X-ray spectroscopic methods in the studies of nonstoichiometric TiO_{2-x} thin films*, Appl. Surf. Sci., 281, 100-104 (2013), doi:10.1016/j.apsusc.2013.02.119.

Przykładowe widmo rozpraszania rezonansowego K β -RIXS przedstawione jest na rysunku 2 dla TiO₂ w formie anatazu. Jak zaznaczyłem w pracy [H3], zastosowanie dyspersyjnego spektrometru krystalicznego pozwoliło na absolutną energetyczną kalibrację danych eksperymentalnych z błędem mniejszym niż 0.1 eV. Dlatego też, możliwe było porównanie struktur elektronowych mierzonych metodą RIXS w funkcji struktury krystalicznej TiO₂ z wyjątkowo dużą dokładnością. W pracy [H3] skupiłem się głównie na analizie pików przed-krawędziowych dla rutylu i anatazu. Struktura przed-krawędziowa, pojawiająca się przy energiach wzbudzenia 4970eV do 4974eV, odpowiada wzbudzeniu elektronowemu ze stanu rdzenia 1s dla Ti do najniższych nieobsadzonych stanów elektronowych Ti-3d. Przejścia elektronowe typu s-d są przejściami kwadrupolowymi, których prawdopodobieństwo wzbudzenia jest stosunkowo niewielkie w porównaniu do przejść dipolowych, które są powszechnie badane metodą RIXS. Jednak, jak pokazałem przy pomocy obliczeń teoretycznych, ze względu na silną hybrydyzację stanów d→p w związku TiO₂, przejścia 1s→3d charakteryzują się stosunkowo wysokim prawdopodobieństwem wzbudzenia. Szczegółowa analiza danych eksperymentalnych pokazała, że struktura widma dla nieobsadzonych stanów zdelokalizowanych jest różna, zarówno pod względem intensywności jak i położenia energetycznego pików, porównując strukturę rutylu z anatazem. W przypadku rutylu, rozszczepienie struktury przed-krawędziowej jest o około 0.6 eV większe, powodując przesunięcie najniższych stanów nieobsadzonych do niższych energii, i w konsekwencji zmniejszając przerwę energetyczną o 0.2 eV. Wynik eksperymentalny został potwierdzony przy pomocy obliczeń teoretycznych z wykorzystaniem kodu FEF9.0⁶, które potwierdziły znaczący wpływ hybrydyzacji orbitali elektronowych na strukturę walencyjną w rutylu i anatazie TiO₂. Ponadto, w pracy [H3] przedyskutowałem możliwość wyznaczenia absolutnej wartości przerwy energetycznej oraz możliwości wykorzystania pomiarów K β -RIXS w przypadkach, gdzie powszechnie używane metody optyczne są niewystarczające (tj. w przypadku „dark-samples” lub w przypadku próbek zawierających tzw. „color-centers”). Otrzymane wyniki sugerują, że wyznaczenie absolutnej wartości przerwy energetycznej metodą K β -RIXS może być trudne ze względu na silne oddziaływanie wzbudzonego elektronu rdzenia w stanie 3d z elektronami walencyjnymi oraz ze względu na jednocześnie zachodzący proces ekranowania dziury rdzenia. Obydwa procesy mogą wpłynąć na małą, ale niezaniebdywalną, zmianę poziomów elektronowych, zanim atom Ti przejdzie do stanu końcowego. Niemniej jednak wyniki pomiarów K β -RIXS, otrzymane dla rutylu i anatazu, sugerują, że relatywne zmiany w przerwie energetycznej mogą być wyznaczone oraz badane z wysoką precyzją.

Zastosowanie rentgenowskich metod spektroskopowych do pomiarów o wysokiej czasowej zdolności rozdzielczej jest ograniczone przez kilka czynników technicznych. Pomiar RIXS, wykorzystujący spektrometry ogniskujące², wymagają skanowania zarówno energii pierwotnego promieniowania X, jak również skanowania energii emisji. Dlatego też metoda RIXS, pomimo wyjątkowej czułości pomiaru, mogła być stosowana tylko w eksperymentach, w których badana próbka była utrzymywana w stanie równowagi chemicznej. Zastosowanie przede



Rysunek 3: a) schematyczny rysunek przedstawiający proces RIXS w atomie złota, b) eksperymentalny układ doświadczalny wykorzystany do wykonania pomiarów w rzeczywistych warunkach pracy RIXS, c) seria widm RIXS zmierzonych podczas eksperymentu (time-resolved RIXS) wraz ze schematycznym opisem analizy danych wykorzystującym algorytm genetyczny. Z pracy [H4].

mnie spektrometru typu von Hamos do spektroskopii RIXS umożliwia znaczne skrócenie czasu pomiarowego dzięki dyspersyjnej detekcji emitowanego promieniowania. W takiej konfiguracji eksperymentalnej czas pomiaru określony jest tylko przez szybkość skanowania energii wiązki pierwotnej, która na obecnych synchrotronach może być rzędu kilku-, kilkunastu sekund. Ma to istotne znaczenie w badaniu procesów nieodwracalnych, w których powtórzenie pomiarów w tych samych warunkach chemicznych jest bardzo trudne lub czasami

niewykonalne, np. z powodu małej ilości dostępnej próbki. W pracy [H4] wykorzystałem aspekt czasowych pomiarów RIXS z użyciem spektrometru dyspersyjnego do badania lokalnej struktury elektronowej Au w procesie termicznie programowanej redukcji (TPR) tlenku złota Au_2O_3 . Podczas pomiarów, tlenek złota Au_2O_3 utrzymywany był w atmosferze H_2 i jednocześnie podgrzewany w sposób ciągły z prędkością 5°C na minutę w zakresie od 20°C do 300°C . Schematyczny opis układu doświadczalnego przedstawiony jest na rysunku 3. Pomiary RIXS, wykorzystujące dipolowe wzbudzenie $2p_{3/2} \rightarrow 5d$ oraz przejście emisyjne $3d_{3/2} \rightarrow 2p_{3/2}$ do stanu końcowego, wykazały zmianę walencyjnej konfiguracji Au z $5d^8 6s^0$ do $5d^{10} 6s^1$, odpowiadającą redukcji tlenku złota Au_2O_3 do metalicznej formy Au^0 dla temperatur powyżej 150°C . Jednak głównym osiągnięciem, opisanym w pracy [H4], było zarejestrowanie przejściowych form Au w konfiguracji $5d^{10} 6s^0$ odpowiadających formowaniu się tlenku złota(I) czyli Au_2O . Wynik był zaskakujący, ponieważ związek chemiczny Au_2O jest niestabilny⁹ i w krótkim czasie redukuje się do formy Au^0 . Na podstawie pomiarów RIXS oraz używając analizy bazującej na algorytmie genetycznym możliwe było określenie struktury elektronowej stanów 5d, jak również ustalenie układu krystalograficznego Au_2O . Przy współpracy z naukowcami z Uniwersytetu w Sydney wyniki eksperymentalne zostały potwierdzone obliczeniami DFT (z ang. „density functional theory”), pozwalając na potwierdzenie dwustopniowego procesu redukcji Au_2O_3 . Zastosowanie w pomiarach techniki RIXS z wysoką rozdzielczością czasową było kluczem do otrzymania wyników opisanych w pracy [H4]. Metoda umożliwiła zbadanie po raz pierwszy struktury niestabilnego tlenku złota(I).

Pracując przez ostatnie kilka lat z naukowcami zajmującymi się katalizatorami zaobserwowałem, że przy badaniach synchrotronowych wiele procesów chemicznych jest sztucznie spowalnianych w celu uzyskania interpretowalnych wyników eksperymentalnych. Limit czasowy, rzędu kilkunastu sekund, nakreślony przez konieczność skanowania wiązki promieniowania X, był wciąż głównym ograniczeniem w dokładnym badaniu materii w rzeczywistych warunkach pracy, jak również poznawania kolejnych kroków w etapach reakcji. Pomysłem na rozwiązanie tych technicznych przeszkód było zastosowanie poza-rezonansowego rozpraszania promieniowania X, procesu, którym wstępnie zajmowałem się podczas studiów doktoranckich¹⁰. Koncept wykorzystania poza-rezonansowego (z ang. „off-resonant”) rozpraszania promieniowania X sięga roku 1982, kiedy na podstawie teorii Kramers-Heisenberg’a, J. Tulkki i T. Åberg opracowali uproszczone równania opisujące oddziaływanie fotonów z atomem¹¹. W tej teoretycznej pracy autorzy zauważyli, że dla energii wiązki promieniowania X ustawionej poniżej krawędzi absorpcji, kształt widma emisyjnego (XES) jest proporcjonalny do gęstości nieobsadzonych stanów elektronowych w atomie. Poza-rezonansowe rozpraszanie jest rozpatrywane jako proces dwuciałowy, w którym energia promieniowania pierwotnego jest dzielona pomiędzy elektronem wzbudzonym a fotonem emitowanym przy przejściu atomu do stanu końcowego. Jednak potencjał i możliwości wyznaczania struktury elektronowej z widm emisyjnych nie był szeroko badany ze względu na bardzo niski przekrój czynny rozpraszania poza-rezonansowego.

W pracach [H5-H7] połączyłem aspekty poza-rezonansowego rozpraszania, wysokorozdzielczej spektroskopii rentgenowskiej i dyspersyjnej metody detekcji do pomiarów stanów elektronowych. Zaproponowana przeze mnie metoda (z ang. „High energy resolution off-resonant spectroscopy - HEROS”) podczas pomiaru nie wymaga skanowania żadnych elementów optycznych, dlatego też badania mogą być przeprowadzane w czasach eksperymentalnych nieosiągalnych dla technik XAS czy RIXS. Praca [H5] przedstawia teoretyczne podejście do opisu widm emisyjnych w warunkach poza-rezonansowego rozpraszania oraz porównanie otrzymanych wyników z widmami zmierzonymi tradycyjnymi metodami absorpcyjnymi. W szczególności przedyskutowany i zademonstrowany został aspekt energetycznej zdolności rozdzielczej, mający istotny wpływ na jakość otrzymywanych wyników. W pracy zwróciłem uwagę na wady i zalety pomiarów metodą HEROS, która w wielu przypadkach może być stosowana jako uzupełnienie do pomiarów XAS. W celu zademonstrowania możliwości oferowanych przez HEROS, zbadałem proces dekompozycji związku $\text{Pt}(\text{acac})_2$ ($\text{Pt}(\text{II})$ acetylacenotate), wywołany szybkim ogrzewaniem ($300^\circ\text{C}/\text{min}$) w atmosferze wodoru. W eksperymencie, przeprowadzonym w pobliżu krawędzi absorpcji L_3 dla Pt, czas pomiarowy jednego widma wynosił 0.5 sekundy przy całkowitym czasie eksperymentalnym około 100 sekund. Eksperyment pozwolił na

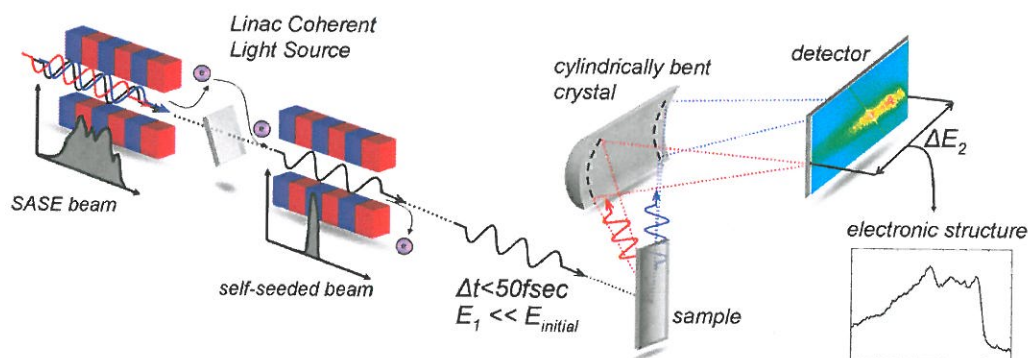
⁹ H. Shi et al., *Properties of the Gold Oxides Au_2O_3 and Au_2O : First-Principles Investigation*, Phys. Rev. B 75, 205125 (2007), doi:10.1103/PhysRevB.75.205125.

¹⁰ J. Szlachetko et al., *High resolution study of x-ray resonant Raman scattering at the K edge of silicon*, Phys. Rev. Lett. 97, 073001 (2006), doi:10.1103/PhysRevLett.97.073001.

¹¹ J. Tulkki and T. Åberg, *Behavior of Raman resonance scattering across the K X-ray absorption edge*, J. Phys. B At. Mol. Opt. 15, L435 (1982), doi:10.1088/0022-3700/15/13/004.

wykrucie stanu pośredniego w procesie dekompozycji poprzez korelację populacji stanów nieobsadzonych 5d w platynie i energii krawędzi absorpcji. Wcześniejsze badania pokazały, że mechanizm dwustopniowej redukcji zachodzi w atmosferze azotu, jednak stany pośrednie w atmosferze wodoru nie zostały zarejestrowane¹². Zaprezentowana metoda HEROS, dzięki wysokiej energetycznej i czasowej zdolności rozdzielczej, okazała się idealnym narzędziem do badania szybkich przemian materii, pozwalając na dokładne monitorowanie zmian w stanach elektronowych. Przedstawiona w pracy [H5] metodyka i strategia pomiarów HEROS została wkrótce wykorzystana do badania procesów redoksywacji zachodzących w katalizatorach na bazie platyny, z czasem akwizycji rzędu 100-200 milisekund¹³.

W czasie wykonywania serii obliczeń dla widm HEROS z wykorzystaniem równań różniczkowych opisujących proces poza-rezonansowego rozpraszania, zauważyłem, że widma zarejestrowane techniką HEROS nie powinny być modulowane przez efekty samo-absorpcyjne. Efekt samo-absorpcji zaliczany jest do jednego z szeregu zjawisk zakłócających pomiar absorpcyjny¹⁴ i prowadzi do modyfikowania kształtu mierzonego widma absorpcyjnego, widoczny zwłaszcza w przypadku próbek o wysokich koncentracjach badanego pierwiastka. Jest kilka metod, zarówno obliczeniowych jak i eksperymentalnych, które pozwalają zminimalizować efekty samo-absorpcji w widmach eksperymentalnych, jednak brak było metody spektroskopowej pozwalającej na bezpośredni pomiar widma XAS nie zawierającego efektu samo-absorpcji. Dlatego też przygotowałem oraz wykonałem eksperyment mający na celu zbadanie efektów samo-absorpcji dla metody HEROS. Wyniki tych badań przedstawione są w pracy [H6]. W eksperymencie zmierzaliśmy szereg widm absorpcyjnych dla metalicznego Ta o różnych grubościach w zakresie 0.5 μm do 50 μm . Dla każdej próbki wykonaliśmy pomiary absorpcyjne w transmisji, we fluorescencji, a także pomiary RIXS. Warto zaznaczyć że każdy z pomiarów wykazywał bardzo silne efekty samo-absorpcji dla grubszych próbek, obserwowane w szczególności w zakresie energetycznym wzbudzenia 2p \rightarrow 5d. W tym samym eksperymencie zmierzaliśmy także szereg widm HEROS dla ustalonej energii promieniowania padającego o wartości -26 eV poniżej krawędzi jonizacji L₃. Pomiary jednoznacznie pokazały, że widma HEROS są identyczne dla każdej z badanych próbek, a ich kształt nie zmienia się w funkcji grubości próbki. Brak efektu samo-absorpcji w pomiarach HEROS wytłumaczyłem ustaloną geometrią pomiaru (czyli brakiem skanowania elementów optycznych podczas pomiarów), pozwalającą na pomiar widma przy ustalonych energiach wiązki padającej i energii emisji. W pracy [H6] pokazałem więc, że metoda HEROS może być



Rysunek 4: Układ doświadczenia w eksperymencie wykorzystującym wzbudzenia poza-rezonansowe oraz laser rentgenowski oparty na elektronach swobodnych. Pierwsza część undulatorów w LCLS wykorzystana jest do wytworzenia promieniowania X poprzez emisję spontaniczną (tryb SASE). Druga część undulatora wykorzystana jest do tzw. trybu „self-seeded”, pozwalającego na wytworzenie monochromatycznej wiązki promieniowania X o długości około 30fsec. Energia wiązki padającej jest ustalona poniżej krawędzi absorpcji ($E_1 \ll E_{\text{initial}}$) a widma emisyjne rejestrowane są z wykorzystaniem spektrometru dyspersyjnego. Z pracy [H7].

¹² S. G. Fiddy et al., Particle development and characterization in Pt(acac)₂ and Pt(acac)₂/GeBu₄ derived catalysts supported upon porous and mesoporous SiO₂: effect of reductive environment, and support structure, Phys. Chem. Chem. Phys., 4, 827-834 (2002) doi: 10.1039/B108545J.

¹³ J. Szlachetko et al., Subsecond and in Situ Chemical Speciation of Pt/Al₂O₃ during Oxidation-Reduction Cycles Monitored by High-Energy Resolution Off-Resonant X-ray Spectroscopy, J. Am. Chem. Soc. 135, 19071 (2013), doi: 10.1021/ja410146c.

¹⁴ S. Eisebitt, T. Boske, J.-E. Rubensson, W. Eberhardt, Determination of absorption coefficient for concentrated samples by fluorescence detection, Phys. Rev. B 47, 14103 (1993), doi:10.1103/PhysRevB.47.14103.

stosowana nie tylko do pomiarów wymagających wysokiej rozdzielczości czasowej, ale także do pomiarów, gdzie dokładna znajomość struktury absorpcyjnej jest istotna dla specjacji chemicznej czy obliczeń teoretycznych.

Podczas trwania badań, które przeprowadzałem na źródłach synchrotronowych, w roku 2012 zatwierdzona została moja aplikacja o czas pomiarowy na pierwszym dostępnym laserze na swobodnych elektronach (XFEL) operującym w reżimie „hard x-ray” (Linac Coherent Light Source, USA). W projekcie, którego byłem kierownikiem, wykorzystałem spektroskopię XES oraz HEROS do pomiarów zmian w układach elektronowych spowodowanych oddziaływaniem femtosekundowych pulsów promieniowania X z materią. Wyniki eksperymentu są przedstawione w pracy [H7], w której opisałem zastosowanie metody HEROS do badania stanów elektronowych z wykorzystaniem femtosekundowych pulsów promieniowania rentgenowskiego. Ponieważ metoda HEROS wymaga monochromatycznej wiązki promieniowania pierwotnego, w eksperymencie wykorzystaliśmy specjalny tryb pracy LCLS tzw. „self-seeding”, który pozwala na generowanie promieniowania X w wąskim paśmie energii. Eksperyment był przeprowadzony dla metalicznego Cu oraz tlenków Cu_2O i CuO w pobliżu krawędzi absorpcji K. Warto zaznaczyć, że pojedynczy impuls generowany w XFEL, trwający 30 fs, może zawierać 10^{11} fotonów zogniskowanych do rozmiarów 100 nm^2 , dając moc rzędu 10^{17} - 10^{18} W/cm^2 . W pracy [H7] zademonstrowałem możliwość zastosowania techniki HEROS na źródłach XFEL oraz pokazałem, że kształt widm HEROS jest niezależny od dużych fluktuacji intensywności promieniowania pierwotnego – parametru, który w znaczny sposób utrudnia pomiary widm technikami absorpcyjnymi. Pomiary HEROS dowiodły także efektywności tej techniki w analizie specjacyjnej na źródłach XFEL. W pracy pokazałem, że stany elektronowe, zmierzone dla miedzi i tlenków miedzi przy niskich intensywnościach promieniowania XFEL, są identyczne z wynikami pomiarów przeprowadzonych na synchrotronie. Na koniec wykazałem że metoda HEROS jest na tyle wydajna, że pozwala na wykonanie pomiaru stanów elektronowych danego pierwiastka tylko z wykorzystaniem pojedynczego pulsu promieniowania X.

Wyniki przedstawione w pracy [H7] zamykają pewien etap w mojej karierze naukowej. W przedstawionym jednotematycznym cyklu prac skupiłem się na badaniach struktury elektronowej materii z wykorzystaniem nowych technik spektroskopii rentgenowskiej. Na przedstawione artykuły złożyło się kilka lat doświadczeń oraz pracy w kilku laboratoriach na całym świecie. Zaprezentowany cykl prac, opisuje rozwój [H2, H5, H6] oraz nowe zastosowania [H3, H4] technik spektroskopowych, który został zainicjowany przez budowę dedykowanego spektrometru opisanego w pracy [H1]. Zebrane w ostatnich latach doświadczenie zamierzam wykorzystać w przyszłości w badaniach zarówno fundamentalnych jak i aplikacyjnych, wykorzystujących najnowsze źródła promieniowania rentgenowskiego.

3. Streszczenie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych oraz dydaktycznych

Mój pierwszy kontakt z technikami spektroskopii rentgenowskiej miał miejsce podczas przygotowania pracy magisterskiej na Uniwersytecie Jana Kochanowskiego w Kielcach w roku 2002. Przez rok zajmowałem się wykorzystaniem rentgenowskiej analizy fluorescencyjnej z całkowitym zewnętrznym odbiciem (TXRF) do badania pierwiastków śladowych w zastosowaniach medycznych. Po otrzymaniu tytułu magistra w roku 2003 zostałem zatrudniony na stanowisku asystenta w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Jan Kochanowskiego w Kielcach i jednocześnie oddelegowany na studia doktoranckie na Uniwersytet we Fribourgu, Szwajcaria. Podczas studiów doktoranckich po raz pierwszy zetknąłem się z wysokorozdzielczymi technikami spektroskopowymi pracując w laboratorium prof. Jean-Claude Dousse. Pobyt we Fribourgu umożliwił mi poznanie różnych aspektów spektroskopii wraz z ich zastosowaniem do badań na źródłach promieniowania synchrotronowego. W okresie tym zajmowałem się rezonansowym rozpraszaniem promieniowania X oraz charakteryzacją detektorów CCD do wysokorozdzielczej spektroskopii. Brałem także udział w badaniach wielokrotnej jonizacji, zarówno w ciałach stałych jak i w układach gazowych (np. artykuły ⁵⁸⁻⁶⁴ wymienione załączniku 4), a także uczestniczyłem w eksperymentach poświęconych zastosowaniu promieniowania rentgenowskiego do badań powierzchniowych (np. artykuły ^{14,57}).

W roku 2007, po ukończeniu doktoratu, otrzymałem grant Szwajcarskiej Narodowej Fundacji Nauki na pobyt w Europejskim Centrum Promieniowania Synchrotronowego (ESRF), Francja. Celem grantu była budowa spektrometru krystalicznego do zastosowań w mikroskopii rentgenowskiej na linii eksperymentalnej ID21. Spektrometr wykorzystywałem w badaniach aplikacyjnych przy współpracy z naukowcami z dziedzin geologii, biologii czy dziedzictwa kulturowego (np. artykuły ^{45,51-52}). Jednocześnie zajmowałem się zastosowaniami wysokorozdzielczej spektroskopii do pomiarów

pozwalających na charakteryzację ultracienkich filmów oraz badanie efektów implantowania jonami w półprzewodnikach (np. artykuły^{10,54,56}). Pobyt w ESRF umożliwił mi dokładne poznanie zasad działania synchrotronu, linii eksperymentalnych, zastosowania optyki rentgenowskiej i detektorów promieniowania X, jak również poznanie aspektów kierowania projektami badawczymi, od poziomu planowania, przez finansowanie, do realizacji. Także w roku 2007, po otrzymaniu tytułu doktora nauk fizycznych zostałem przeniesiony na stanowisko adiunkta w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Jana Kochanowskiego w Kielcach. W celu poszerzenia mojej wiedzy i praktyki w dziedzinie spektroskopii rentgenowskiej zdecydowałem się na kontynuowanie staży w zagranicznych ośrodkach naukowych.

Zdobyte w latach 2007-2010 umiejętności zaowocowały otrzymaniem pozycji Post-Doc w Szwajcarskim Źródle Promieniowania Synchrotronowego. Rozpocząłem prace na linii eksperymentalnej SuperXAS, dedykowanej do badań katalitycznych. W tym okresie, oprócz rozwijania zainteresowań związanych z wysokorozdzielczą spektroskopią rentgenowską, brałem udział w eksperymentach typu „pump-probe”, wykorzystujących światło laserowe do inicjowania zmian elektronowych w układach molekularnych (np. artykuły^{26,33}). Kontynuowałem także badania powierzchniowe z wykorzystaniem najnowszych detektorów promieniowania X o wysokiej przestrzennej zdolności rozdzielczej (np. artykuły^{18,19,25}).

W roku 2013 zostałem zatrudniony jako naukowiec w projekcie SwissFEL. Szwajcarskie źródło laserowe na swobodnych elektronach jest w trakcie budowy i będzie oddane do użytku w 2017 roku. Obecnie jestem odpowiedzialny za rozwój i zastosowanie technik wysokorozdzielczej spektroskopii rentgenowskiej na dwóch stacjach eksperymentalnych. W przyszłości planuję kontynuację moich zainteresowań naukowych związanych z wykorzystaniem spektroskopii i promieniowania rentgenowskiego generowanego na źródłach XFEL do badań poświęconych zmianom układów elektronowych w procesach chemicznych i fotochemicznych, jak również badań dotyczących nieliniowej absorpcji promieniowania X.

Jestem współautorem 71 publikacji, cytowanych dotychczas 599 razy (na podstawie Web Of Science z lipca 2015), zaś mój indeks Hirscha jest równy 14. Jestem także autorem rozdziału pt. „X-ray spectroscopy techniques” w książce zatytułowanej „High resolution XAS/XES: Analyzing Electronic Structure of Catalysts”, która została wydana w roku 2014, a także współautorem rozdziału „X-ray spectroscopy at X-ray Free Electron Lasers” w książce pt. „XAS and XES; theory and applications”, która będzie wydana w sierpniu 2015 przez wydawnictwo John Wiley & Sons. Obecnie pracuje także nad rozdziałem pt. „X-ray spectroscopy: the driving force to understand and develop catalysis” do książki „Advanced Catalytic Materials”, która będzie wydana pod koniec 2015 roku przez wydawnictwo InTech.

Moja działalność dydaktyczna na Uniwersytecie Jana Kochanowskiego była stosunkowo ograniczona ze względu na kilkuletnie oddelegowanie do zagranicznych ośrodków naukowych. Niemniej jednak, utrzymując ściśle kontakty z Instytutem Fizyki UJK, od roku 2008 byłem promotorem czterech prac magisterskich. W mojej pracy dydaktycznej zależało mi na czynnym uczestnictwie studentów w przeprowadzanych eksperymentach, jak również możliwości nabycia przez nich nowych doświadczeń. Dlatego też każda praca magisterska pod moim kierownictwem wiązała się z krótkoterminowym stażem naukowym w ośrodku, w którym przebywałem (od tygodnia do trzech miesięcy). Fundusze na pobyt studentów otrzymywałem z projektów, o które aplikowałem (zarówno aplikacje wewnętrzne tj. ESRF, jak i aplikacje na poziomie międzynarodowym tj. Swiss National Science Foundation). W okresie mojego pobytu w ESRF, powstały trzy prace magisterskie na temat pomiarów powierzchniowych z wykorzystaniem promieniowania X oraz zastosowania spektroskopii rentgenowskiej do mikrofluorescencji. Kolejna praca magisterska powstała podczas mojego pobytu w Szwajcarskim Źródle Promieniowania Synchrotronowego w roku 2013 i skupiała się na wysokorozdzielczej spektroskopii poza-rezonansowej (HEROS). Obecnie jestem opiekunem naukowym pracy doktorskiej, powstającej przy współpracy z Uniwersytetem we Fribourgu, zatytułowanej „High energy resolution off-resonant spectroscopy”, której obrona planowana jest na październik 2015 roku. Poza czynną pracą ze studentami fizyki w ramach prac magisterskich, uczestniczyłem także w praktycznych kursach skierowanych do młodych naukowców organizowanych przez ESRF lub SLS (np. Kursy HERCULES w roku 2009 i 2012). W latach 2003-2007 podczas mojego pobytu na Uniwersytecie we Fribourgu, prowadziłem regularne zajęcia laboratoryjne dla studentów fizyki oraz biologii i medycyny.

Szczegółowy wykaz opublikowanych prac naukowych oraz informacja o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki zawarty jest w załączniku nr.4 „Wykaz dorobku habilitacyjnego”.

