

## ZAKŁAD FIZYKI ATOMOWEJ

### Skład osobowy

Prof. dr hab. Marek Pajek – kierownik zakładu,  
dr Dariusz Banaś, dr Marcin Czarnota, dr Aldona Kubala-Kukuś,  
dr Jakub Szlachetko, mgr Marek Detka, mgr inż. Ewa Kacak

### Tematyka badawcza

Działalność naukowa zakładu dotyczy fizyki zderzeń atomowych. Eksperymentalnie badana jest dynamika procesu jonizacji wewnętrznych powłok atomowych, w tym jonizacji wielokrotnej, w zderzeniach ciężkich jonów o energiach 0.1-10 MeV/n z atomami. Obserwowane jest wzbudzone promieniowanie rentgenowskie serii K-, L i M z wykorzystaniem metod spektroskopii rentgenowskiej (detektory półprzewodnikowe oraz spektrometry krystaliczne). Eksperymenty takie są wykonywane na wiązkach różnych akceleratorów, głównie we współpracy z Uniwersytetem w Erlangen w Niemczech (tandem), Instytutem Paula Scherrera (PSI) w Szwajcarii (cyklotron Philipsa) oraz Środowiskowym Laboratorium Ciężkich Jonów Uniwersytetu Warszawskiego (cyklotron U200). Drugą tematyką badawczą z zakresu zderzeń atomowych jest badanie procesów rekombinacji jonów w wysokich stanach ładunkowych z elektronami. Badanymi procesami są tu: rekombinacja radiacyjna (RR), rekombinacja dwuelektronowa (DR), rekombinacja trójcząłowa (TBR). Eksperymenty rekombinacyjne są prowadzone w Instytucie Badań Ciężkich Jonów (GSI) z wykorzystaniem kompleksu akceleratorowego SIS-ESR. Badania dotyczące rezonansowego rozpraszania ramanowskiego promieniowania rentgenowskiego są prowadzone przy wykorzystaniu Europejskiego Źródła Promieniowania Synchrotronowego (ESRF) w Grenoble.

### Zakład współpracuje z następującymi ośrodkami:

Instytut Problemów Jądrowych w Świerku  
Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów Uniwersytetu Warszawskiego w Warszawie  
Świętokrzyskie Centrum Onkologii w Kielcach  
Uniwersytet w Erlangen, Niemcy  
Instytut Ciężkich Jonów (GSI), Darmstadt, Niemcy  
Uniwersytet w Sztokholmie, Szwecja  
Laboratorium Manne Siegbahna, Sztokholm, Szwecja  
Uniwersytet we Fribourgu, Szwajcaria  
Uniwersytet w Basel, Szwajcaria  
Instytut Paula Scherrera (PSI) w Villigen, Szwajcaria  
Uniwersytet Kansai Gaidai, Osaka, Japonia  
Europejskie Źródło Promieniowania Synchrotronowego (ESRF), Grenoble, Francja

# Badanie „efektu wzmocnienia” w procesie radiacyjnej rekombinacji jonów uranu $U^{92+}$ z elektronami swobodnymi

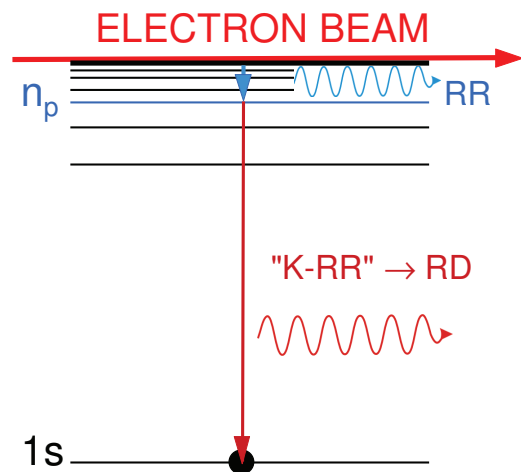
M. Pajek, D. Banaś, Sz. Zając, M. Czarnota, J. Szlachetko, Th. Stöhlker<sup>1</sup>, A. Gumberidze<sup>1</sup>, A. Orsic-Muthig<sup>1</sup>, U. Spillmann<sup>1</sup>, R. Reusch<sup>1</sup>, S. Tachenow<sup>1</sup>, D. Sierpowski<sup>2</sup>, A. Warczak<sup>2</sup> et al.

W eksperymencie rekombinacyjnym przeprowadzonym w pierścieniu akumulacyjnym ESR w GSI w Darmstadt dotyczącym rekombinacji radiacyjnej (RR) jonów  $U^{92+}$  z niskoenergetycznymi elektronami w „chłodnicy” elektronowej zaobserwowano wzrost szybkości rekombinacji w zakresie „zerowej” energii względnej elektronów. Istnienie efektu „wzmocnienia” RR potwierdzają relatywistyczne obliczenia szybkości rekombinacji do powłoki K (K-RR) w zakresie energii względnych elektronów 0 – 1 eV. W celu ostatecznego potwierdzenia efektu „wzmocnienia” rekombinacji K-RR należy wyjaśnić rolę innych konkurencyjnych procesów mogących dawać wkład do mierzonego promieniowania rentgenowskiego K-RR.

Jednym z takich procesów jest proces dwustopniowy RR+RD w którym w pierwszym etapie swobodny elektron jest wychwytywany radiacyjnie (RR) do wysokiego, pośredniego stanu wzbudzonego  $n_p$  z emisją fotonu, a następnie stan ten rozpada się radiacyjnie ( $n_p \rightarrow 1s$ ) emitując foton o energii bliskiej energii fotonów K-RR, dokładnie ujmując pomniejszonej o energię wiązania stanu pośredniego  $Z^2 R/n_p^2$ .

Uwzględniając zdolność rozdzielczą ( $\sim 700$  eV) detektora promieniowania X można zauważyć, że dla wysokich pośrednich stanów rydbergowskich proces RR+RD może dawać wkład do rejestrowanego promieniowania K-RR.

Przeprowadzone obliczenia wkładu procesu RR+RD na gruncie uproszczonego modelu, jak również szczegółowych obliczeń numerycznych, pokazały że względny udział tego procesu jest mniejszy niż 2.5%. Oznacza to że proces RR+RD nie może tłumaczyć efektu „wzmocnienia” RR obserwowanego dla „zerowej” energii względnej. Obliczenia te uwzględniały rzeczywistą geometrię eksperymentu oraz fakt że pierwotny akt RR zachodzi w dowolnym miejscu w chłodnicy elektronowej, a radiacyjny rozpad stanu pośredniego  $n_p$  następuje w losowym momencie czasu podlegającym rozkładowi opisanemu czasem życia tego stanu.



Rys. 1. Schemat procesu RR+RD

- 1) Gesellschaft für Schwerionenforschung, Darmstadt, Germany
- 2) Institute of Physics, Jagiellonian University, Cracow, Poland

## Literatura:

- [1] W. Shi et al., Eur. Phys. J. D 15, 145-154 (2001).
- [2] G. Gwinner et al., Phys. Rev. Lett. 84, 4822 (2000).
- [3] M. Pajek et al., *Photonic, Electronic and Atomic Collisions*, edited by P.D. Fainstein et al., World Scientific Publishing, Singapore (2006) 289.

# Efekt cenzurowania i rozkłady log-stabilne w analizie pierwiastków śladowych

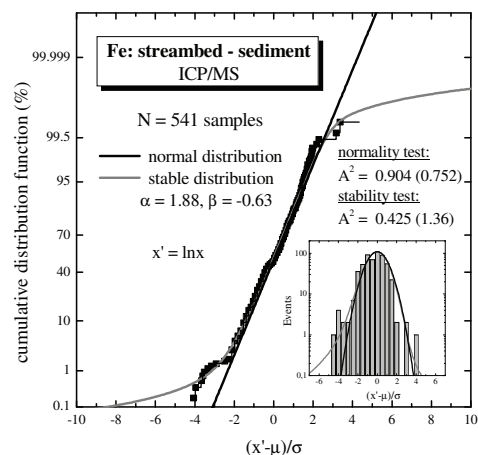
A. Kubala-Kukuś, M. Pajek, D. Banaś, J. Braziewicz, S. Gózdź<sup>1</sup>, U. Majewska

Wieloletnie badania dotyczące zastosowania metod spektroskopii rentgenowskiej (XRF, TXRF) do określania rozkładów koncentracji pierwiastków śladowych w różnorodnych próbkach biologicznych i medycznych doprowadziły do stwierdzenia następujących efektów: i) powszechności log-normalnej, lub ogólniej, log-stabilnej natury rozkładów koncentracji pierwiastków śladowych oraz ii) konieczności stosowania koncepcji losowego lewostronnego cenzurowania w statystycznej analizie wyników w celu uwzględnienia pomiarów ograniczonych progiem wykrywalności metody pomiarowej.

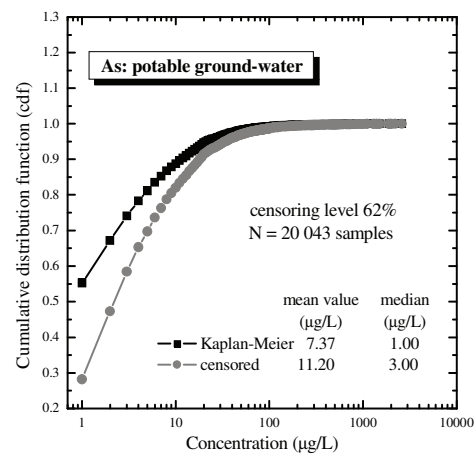
W prezentowanych badaniach wykazano, że omawiane efekty (rozkłady log-stabilne oraz cenzurowanie) odgrywają również istotną rolę w pomiarach koncentracji pierwiastków w innych rodzajach próbek analizowanych wykorzystując różne metody pomiarowe. W szczególności log-stabilność rozkładów koncentracji dyskutowano w oparciu o rezultaty analizy pierwiastkowej osadów rzecznych (Rys. 1), natomiast efekt cenzurowania na podstawie analizy pierwiastkowej próbek surowicy oraz koncentracji arsenu w wodzie pitnej (Rys. 2).

Dla rozkładów koncentracji pierwiastków w osadach rzecznych dokonano estymacji parametrów rozkładu log-stabilnego i zaobserwowano, że rozkłady te również są rozkładami log-stabilnymi, o indeksie stabilności  $\alpha = 1.5 - 2$ . Obserwacje te zostały potwierdzone przeprowadzonymi testami statystycznymi (test Andersona-Darlinga). Dla rozkładów koncentracji pierwiastków śladowych w próbkach surowicy i w próbkach wody pitnej, cenzurowanych na poziomie od 2% do 67% dla ponad 70% pierwiastków, odtworzono dystrybuanty rozkładu wykorzystując estymator Kaplana-Meiera. Następnie odtworzono wyznaczone wartości średnie i mediany koncentracji, otrzymując istotną (2-3 krotną) korekcję tych parametrów.

Zaproponowane procedury statystycznego opracowywania rozkładów koncentracji mogą być wykorzystane w analizie pierwiastkowej dowolnego rodzaju próbek, przy wykorzystaniu dowolnej metody pomiarowej.



Rys. 1 Wykresy dystrybuanty empirycznej i dystrybuanty rozkładu  $\alpha$ -stabilnego w funkcji zmiennej standaryzowanej dla koncentracji żelaza (Fe) w osadach. Wewnątrz: histogram koncentracji z rozkładami teoretycznymi: normalnym i stabilnym.



Rys. 2 Analiza cenzurowanych na poziomie 62% pomiarów koncentracji arsenu (As) w wodzie pitnej. Porównano dystrybuantę rozkładu dla danych cenzurowanych z dystrybuantą odtworzoną w oparciu o estymator Kaplana-Meiera.

<sup>1</sup>Świętokrzyskie Centrum Onkologii, Artwińskiego 3, 25-734 Kielce

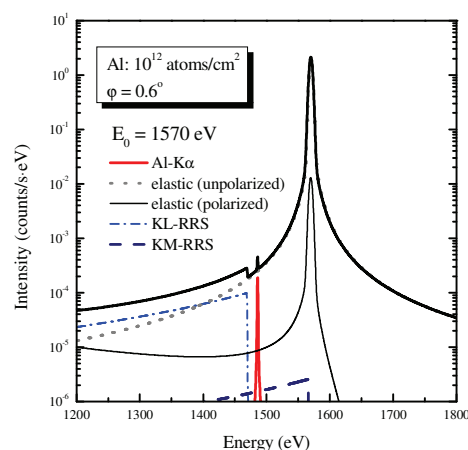
# Określanie śladowych zanieczyszczeń aluminium w krzemie metodą GEXRF ze wzbudzeniem promieniowaniem synchrotronowym

A. Kubala-Kukuś, D. Banaś, M. Pajek, J. Szlachetko, W. Cao<sup>1</sup>, J.-Cl. Dousse<sup>1</sup>, J. Hoszowska<sup>1</sup>, Y. Kayser<sup>1</sup>, M. Szlachetko<sup>1</sup>, M. Salomé<sup>2</sup>, J. Susini<sup>2</sup>

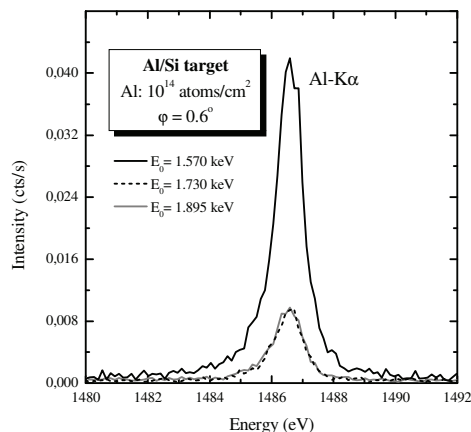
Szybki rozwój mikroelektroniki wymaga nowych technik kontroli śladowych zanieczyszczeń materiałów półprzewodnikowych pierwiastkami lekkimi, na przykład aluminium, z granicą wykrywalności poniżej  $10^{10}$  atomów/cm<sup>2</sup>. Granica wykrywalności zanieczyszczeń Al metodami spektroskopii rentgenowskiej ograniczona jest obecnością promieniowania rezonansowego rozpraszania Ramana (RRS). Celem przeprowadzonych badań było wykorzystanie metody GEXRF (grazing emission x-ray fluorescence) na wiązce promieniowania synchrotronowego do pomiaru zanieczyszczeń Al w krzemie. W metodzie GEXRF promieniowanie fluorescencyjne rejestrowane jest pod małym kątem względem powierzchni, mniejszym od kąta krytycznego. Efektem tak dobranej geometrii pomiaru jest redukcja promieniowania linii K $\alpha$  krzemu, stanowiącego tło dla widm promieniowania fluorescencyjnego badanych zanieczyszczeń.

W celu dobrania optymalnych warunków pomiarów modelowano kształt widm rentgenowskich GEXRF wysokiej zdolności rozdzielczej, otrzymywanych przy naświetlaniu tarczy Si zanieczyszczonej Al promieniowaniem synchrotronowym, wykorzystując wyniki wcześniejszego eksperymentu w którym zmierzono widma RRS, przeprowadzonego w European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) w Grenoble. Obliczenia przeprowadzono dla różnych energii promieniowania synchrotronowego i geometrycznych warunków eksperymentalnych (Rys. 1). Przewidywania sprawdzono w eksperymencie przeprowadzonych w ESRF, w których określano koncentrację Al w krzemie, dla różnych energii promieniowania synchrotronowego: 1570, 1730 i 1895 eV (Rys. 2). Widma rejestrowano przy pomocy spektrometru krystalicznego von Hamosa o wysokiej zdolności rozdzielczej (~eV).

W eksperymencie tym uzyskano próg wykrywalności Al w krzemie na poziomie  $10^{12}$  atomów/cm<sup>2</sup>, co przy zastosowaniu dodatkowych metod chemicznych (VPD) odpowiada wykrywalności  $10^7$  atomów/cm<sup>2</sup>. Otrzymane rezultaty pokazują duże możliwości nowych zastosowań metody GEXRF.



Rys. 1  
Eksperymentalne widma linii K $\alpha$  Al z krzemu zanieczyszczonego aluminium o koncentracji  $10^{14}$  atomów/cm<sup>2</sup> mierzone pod kątem  $\varphi = 0.6^\circ$  metodą GEXRF.



Rys. 2  
Zmierzone widmo GEXRF linii K $\alpha$ -Al emitowanej z krzemu otrzymane dla energii 1570 eV wzbudzającego promieniowania synchrotronowego.

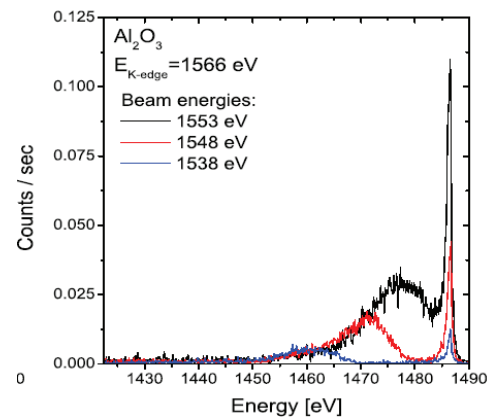
<sup>1</sup>Department of Physics, University of Fribourg, CH-1700 Fribourg, Switzerland

<sup>2</sup>European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), F-38043 Grenoble, France

# Rezonansowe rozpraszanie Ramana promieniowania synchrotronowego w krzemie (Si), aluminium (Al) i ich tlenkach (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) w obszarze krawędzi absorpcji powłoki K

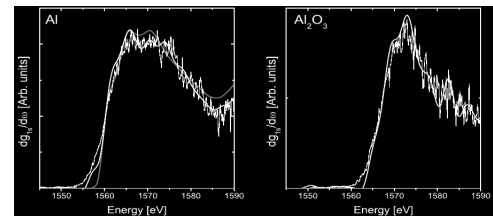
*J. Szlachetko, A. Kubala-Kukuś, M. Pajek, R. Barrett<sup>1</sup>, M. Berset<sup>2</sup>, J.-Cl. Dousse<sup>2</sup>, K. Fennane<sup>2</sup>, J. Hoszowska<sup>1</sup>, M. Szlachetko<sup>2</sup>*

W ramach prowadzonych badań analizowano rezonansowe rozpraszanie Ramana (RRS) promieniowania synchrotronowego w krzemie (Si), aluminium (Al) i ich tlenkach (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), w obszarze krawędzi absorpcji powłoki K. Eksperyment został przeprowadzony w European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) w Grenoble (Francja), na wiązce fotonów ID21, wykorzystywanej do spektroskopii rentgenowskiej z wysoką zdolnością rozdzielczą. Widma promieniowania rejestrowano przy wykorzystaniu spektrometru krystalicznego typu von Hamos o wysokiej zdolności rozdzielczej (~ eV). Dało to możliwość określenia dokładnego kształtu widm RRS w obszarze krawędzi absorpcji powłoki K (Rys.1), co pozwoliło zweryfikować opis teoretyczny zjawiska rezonansowego rozpraszania Ramana. Pomiar przeprowadzono dla różnych energii promieniowania synchrotronowego w zakresie od 1530 do 1850 eV, na wiązce o natężeniu 10<sup>10</sup> – 10<sup>11</sup> fotonów/s z energetyczną zdolnością rozdzielczą wiązki ~ 6 eV.



Rys. 1  
Eksperymentalne widma rezonansowego rozpraszania Ramana promieniowania synchrotronowego w Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Na podstawie zarejestrowanych widm wyznaczono przekroje czynne na rezonansowe rozpraszanie Ramana promieniowania w badanych materiałach, otrzymując bardzo dobrą zgodność z teoretycznymi przekrojami czynnymi na rozpraszanie ramanowskie w obszarze poniżej krawędzi absorpcji powłoki K wyznaczonymi z formuły Kramersa-Heisenberga. Wyznaczono również funkcje gęstości stanów nieobsadzonych ( $dg_{1s}/d\omega$ ) dla Si i SiO<sub>2</sub> oraz dla Al i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (rys. 2), co umożliwiło zaobserwowanie różnic w strukturze elektronowej dla metalu i jego tlenku. Tym samym pokazano, że analiza widm rezonansowego rozpraszania Ramana jest alternatywną metodą badania struktury krzywej absorpcji.



Rys. 2  
Zmierzone funkcje gęstości stanów nieobsadzonych ( $dg_{1s}/d\omega$ ) dla Al i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Otrzymane rezultaty stanowią podstawę dalszych badań, których głównym celem jest wykorzystanie metod spektroskopii rentgenowskiej w określaniu koncentracji zanieczyszczeń pierwiastkowych w materiałach półprzewodnikowych o różnych strukturach.

<sup>1</sup>European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), F-38043 Grenoble, France

<sup>2</sup>Department of Physics, University of Fribourg, CH-1700 Fribourg, Switzerland

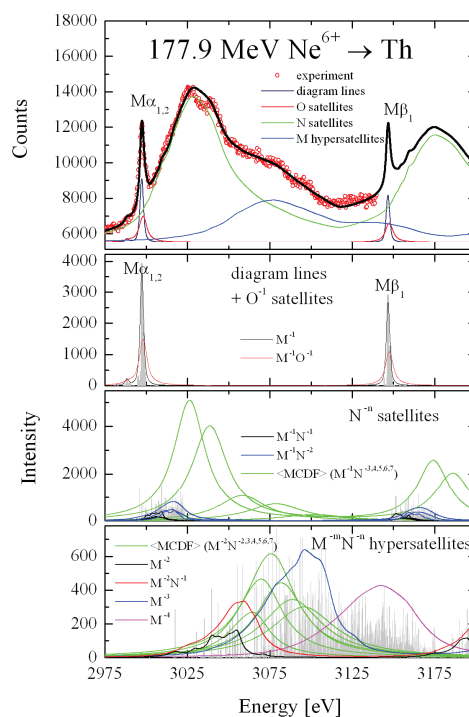


## Analiza struktury satelitarnej oraz hipersatelitarnej linii $M\alpha_{1,2}$ ( $M_5N_{6,7}$ ) toru z wykorzystaniem obliczeń MCDF

*M. Czarnota, D. Banaś, M. Pajek, J.-Cl. Dousse<sup>1</sup>, M. Breset<sup>1</sup>, Y.-P. Maillard<sup>1</sup>, O. Mauron<sup>1</sup>, P. A. Raboud<sup>1</sup>, D. Chmielewska<sup>2</sup>, Z. Sujkowski<sup>2</sup>, J. Rządkiwicz<sup>2</sup>, M. Polasik<sup>3</sup>, K. Słabkowska<sup>3</sup>, J. Hoszowska<sup>4</sup>*

Promieniowanie rentgenowskie emitowane przez wielokrotnie zjonizowane atomy zawiera w sobie informacje o strukturze elektronowej atomu w chwili emisji tego promieniowania. Szczegóły tej struktury mogą być analizowane dzięki wykorzystaniu dyfrakcyjnej spektroskopii rentgenowskiej. Opisywany eksperyment został przeprowadzony w Instytucie Paula Scherrera (PSI) w Villigen w Szwajcarii. Używając wiązek jonów tlenu o energii 376.0 MeV oraz neonu o energii 177.9 MeV zmierzono widma linii  $M\alpha_{1,2}$  ( $M_5N_{6,7}$ ) oraz  $M\beta_1$  ( $M_4N_5$ ) dla Th. Do pomiarów wykorzystano krystaliczny spektrometr typu von Hamosa o zdolności rozdzielczej 0,6 eV w mierzonym zakresie energii.

W celu interpretacji zmierzonych widm zostały przeprowadzone obliczenia wielokonfiguracyjną metodą Diraca-Focka (MCDF) dla wielodziurowych konfiguracji powłok elektronowych w palladzie ( $M^mN^n$ ). Maksymalna liczba dziur wynosiła  $m = 4$  dla powłoki M oraz  $n = 3$  dla powłoki N, z uwzględnieniem stanów  $s$ ,  $p$  i  $d$ . Dla widm wzbudzonych wiązką jonów Ne struktury satelitarne oraz hipersatelitarne, obserwowane w mierzonym widmie, dla których niemożliwe było przeprowadzenie obliczeń MCDF, zostały zamodelowane w oparciu o istniejące obliczenia MCDF. Zmierzone widma rentgenowskie zostały odtworzone poprzez liniową kombinację struktur otrzymanych z obliczeń MCDF, oraz struktur zamodelowanych, wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów dla znalezienia indywidualnych intensywności dla poszczególnych struktur. W rezultacie stwierdzono dobre odtworzenie widm eksperymentalnych linii  $M\alpha_{1,2}$  Th. Wyznaczono prawdopodobieństwa jonizacji na elektron dla powłoki N palladu. Prawdopodobieństwa te wynoszą odpowiednio dla widm wzbudzonych jonami tlenu  $0.051 \pm 0.004$  oraz dla widm wzbudzonych jonami neonu  $0.130 \pm 0.016$ .



Linia  $M\alpha_{1,2}$  toru ze strukturą satelitarną oraz hipersatelitarną powłoki M oraz strukturami uzyskanymi na podstawie obliczeń MCDF i strukturami modelowanymi odtwarzającymi zmierzone widmo eksperymentalne. Dolne panele przedstawiają komponenty MCDF oraz struktury modelowane  $\langle \text{MCDF} \rangle$ .

<sup>1</sup>Physics Department, University of Fribourg, CH-17000 Fribourg, Switzerland

<sup>2</sup>Sołtan Institute for Nuclear Studies, 05-400 Otwock-Świerk, Poland

<sup>3</sup>Faculty of Chemistry, Nicholas Copernicus University, 87-100 Toruń, Poland

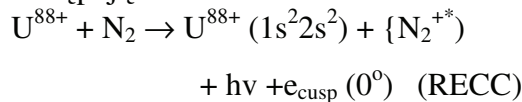
<sup>4</sup>European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), F-38043 Grenoble, France

## Badanie procesu radiacyjnego wychwytu elektronu do kontinuum (RECC) w zderzeniach $U^{88+}$ ( $1s^2 2s^2$ ) z azotem

*M. Nofal<sup>1,2</sup>, S. Hagmann<sup>1,2</sup>, Th. Stöhlker<sup>1</sup>, D. H. Jakubassa-Amundsen<sup>3</sup>, Ch. Kozhuharov<sup>1</sup>, A. Gumberidze<sup>1</sup>, U. Spillmann<sup>1</sup>, R. Reuschl<sup>1</sup>, S. Hess<sup>1</sup>, S. Trotsenko<sup>1</sup>, D. Banaś et al. [1]*

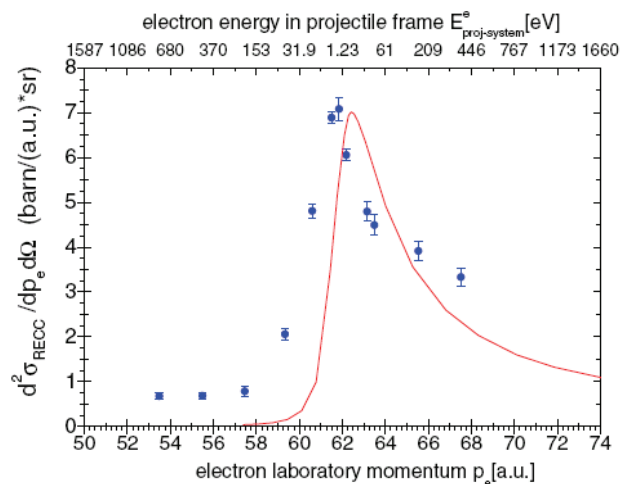
W zderzeniach ciężkich całkowicie obdartych i kilkuelektronowych ciężkich jonów z lekkimi atomami przy niskich prędkościach zderzenia dominującym procesem wychwytu elektronu do kontinuum jest wychwyt bezradiacyjny (ECC). Jednak, wraz ze wzrostem prędkości zderzenia jego rola maleje, a wzrasta rola procesów radiacyjnych, w tym, w szczególności radiacyjnego wychwytu elektronu do kontinuum (RECC). Proces ten polega na wychwycie quasi-swobodnego elektronu atomu tarczy do kontinuum pocisku z jednoczesną emisją fotonu promieniowania rentgenowskiego. Pomiar tego promieniowania w koincydencji z emitowanym w procesie elektronem pozwala na szczegółową analizę dynamiki zderzeń ciężkich jonów z atomami.

W prezentowanym eksperymencie badano proces radiacyjnego wychwytu elektronu w zderzeniach  $U^{88+}$  o energii 90 MeV/u zgromadzonym w pierścieniu akumulacyjnym ESR z gazową tarczą azotową, który można przedstawić następująco:



Fotony emitowane w tym procesie były rejestrowane za pomocą detektora germanowego umieszczonego pod kątem  $90^\circ$  w stosunku do kierunku wiązki. Natomiast elektrony emitowane pod małymi kątami w kierunku wiązki były najpierw separowane za pomocą  $60^\circ$  magnesu dipolowego, a następnie rejestrowane za pomocą dedykowanego

spektrometru elektronów, wyposażonego w pozycyjnie czuły detektor umożliwiający pomiar ich rozkładu pędów w dwóch płaszczyznach. Wyznaczona w ten sposób zależność podwójnie różniczkowego przekroju czynny dla radiacyjnego wychwytu elektronu do kontinuum (RECC) od pędu elektronów została pokazana na rysunku 1 w porównaniu z przewidywaniami teoretycznymi. Na rysunku możemy zobaczyć charakterystyczny pik (tzw. „cusp”), który odpowiada sytuacji gdy prędkość elektronu w kontinuum pocisku (w układzie laboratoryjnym) jest w przybliżeniu równa prędkości pocisku.



**Rys. 1.** Zależność podwójnie różniczkowego przekroju czynnego (DDCS) dla radiacyjnego wychwytu elektronu do kontinuum (RECC) w funkcji pędu elektronu w układzie laboratoryjnym.

- 3) Gesellschaft für Schwerionenforschung, Darmstadt, Germany
- 4) Institut für Kernphysik, Universität Frankfurt, Frankfurt, Germany
- 5) Mathematisches Institut, Ludwig-Maximilianus Universität, München, Germany

Literatura:

[1] M. Nofal et al. Phys. Rev. Lett. 99, 163201 (2007)