

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

Tematyka badawcza

Działalność naukowa zakładu dotyczy fizyki zderzeń atomowych i zastosowań spektroskopii rentgenowskiej. Tematyka prowadzonych eksperymentów obejmuje badanie dynamiki procesu jonizacji, w tym wielokrotnej, wewnętrznych powłok atomowych, 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 akceleratorowych, głównie we współpracy z Uniwersytetem w Erlangen w Niemczech (tandem) oraz Instytutem Paula Scherrera (PSI) w Szwajcarii (cyklotron Philipsa). Drugą tematyką badawczą z zakresu zderzeń atomowych jest badanie procesów rekombinacji radiacyjnej najcięższych jonów w wysokich stanach ładunkowych, do U^{92+} włącznie. Eksperymenty rekombinacyjne są prowadzone w ramach międzynarodowej współpracy SPARC na chłodzonej elektronami wiązce jonów w pierścieniu akumulacyjnym ESR w GSI w Darmstadt. Badania dotyczące zastosowań spektroskopii rentgenowskiej w badaniach materiałów prowadzone są metodą niskokątowej fluorescencji rentgenowskiej (GEXRF) wysokiej zdolności rozdzielczej na wiązce promieniowania synchrotronowego ID21 w Europejskim Źródle Promieniowania Synchrotronowego (ESRF) w Grenoble. Badania te są prowadzone we współpracy z Departamentem Fizyki Uniwersytetu we Fribourgu w Szwajcarii.

Zakład współpracuje z następującymi ośrodkami:

Instytut Problemów Jądrowych w Świerku
Świętokrzyskie Centrum Onkologii w Kielcach
Wydział Chemii, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
Instytut Fizyki, Uniwersytet Jagielloński w Krakowie
Uniwersytet w Erlangen, Niemcy
Instytut Ciężkich Jonów (GSI), Darmstadt, Niemcy
Uniwersytet we Fribourgu i Uniwersytet w Basel, Szwajcaria
Instytut Paula Scherrera (PSI) w Villigen, Szwajcaria
Uniwersytet Kansai Gaidai, Osaka, Japonia
Europejskie Źródło Promieniowania Synchrotronowego (ESRF), Grenoble, Francja

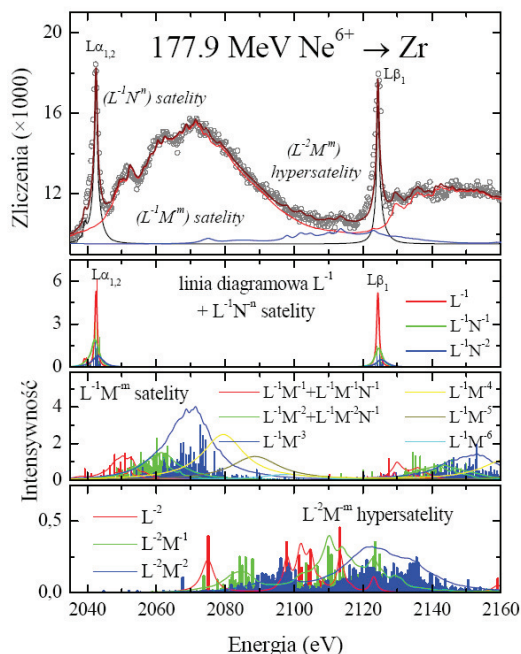
Badanie struktury satelitarnej i hipersatelitarnej linii $L\alpha_{1,2}$ i $L\beta_1$ cyrkonu wzbudzonego jonami tlenu i neonu

*M. Czarnota, D. Banaś, M. Pajek, J.-Cl. Dousse¹, M. Berset¹, J. Hoszowska¹,
Y.-P. Maillard¹, O. Mauron¹, P. A. Raboud¹, K. Słabkowska², M. Polasik²,
D. Chmielewska³, J. Rządkiwicz³ i Z. Sujkowski³*

Dzięki pomiarom widm rentgenowskich linii $L\alpha_{1,2}$ i $L\beta_1$ emitowanych z atomów cyrkonu wzbudzonych jonami tlenu i neonu prowadzonym z wysoką zdolnością rozdzielczą mamy możliwość szczegółowego badania konfiguracji wielodziurowych w powłokach elektronowych tych atomów. Pomiaru te są szczególnie istotne dla testowania atomowych obliczeń strukturalnych, w szczególności obliczeń wykonywanych w oparciu o wielokonfiguracyjną metodę Diraca-Focka (MCDF), która uwzględnia oddziaływanie Breit'a oraz poprawki wynikające z elektrodynamiki kwantowej (QED).

Omawiane pomiary zostały przeprowadzone w Instytucie Paula Scherrera w Villigen w Szwajcarii. Do wzbudzania tarcz cyrkonowych wykorzystano wiązkę jonów tlenu o energii 278,6 MeV oraz neonu o energii 177,9 MeV, pochodzących ze źródła ECR i przyspieszanych do żądanych energii za pomocą cyklotronu Philipsa. Widma rentgenowskie zmierzono za pomocą spektrometru krystalicznego o wysokiej zdolności rozdzielczej, pracującego w układzie von Hamosa. Aparaturowa zdolność rozdzielcza wykorzystanego spektrometru w zakresie mierzonych energii promieniowania rentgenowskiego wynosiła około 0,3 eV, a dokładność kalibracji energetycznej mierzonych widm 0,3 eV.

Analizę otrzymanych widm oparto o strukturalne obliczenia MCDF. Obliczenia te, wykonane dla wielodziurowych konfiguracji $L^1M^mN^n$, uwzględniały do czterech dodatkowych dziur w powłoce M dla struktur satelitarnych oraz dwóch dziur w powłoce M dla struktur hipersatelitarnych. Zostały one wykonane specjalnie na potrzeby omawianej analizy. W przypadku widma wzbudzonego jonami neonu rozszerzono je do sześciu dodatkowych dziur w powłoce M dla struktur satelitarnych za pomocą modelu MCDF. Wyniki tak przeprowadzonej analizy dla widma wzbudzonego jonami neonu przedstawia rysunek. W analizowanym widmie wyraźnie widoczne są struktury odpowiadające określonej liczbie dodatkowych dziur w powłokach L i M. Zmierzone intensywności tych struktur wykorzystano do wyznaczenia prawdopodobieństw wielokrotnej jonizacji powłok L i M. Wartości te dają informację o dynamice procesu wielokrotnej jonizacji badanych atomów i mogą być porównane z wartościami teoretycznymi określonymi za pomocą różnych modeli.



¹ Wydział Fizyki, Uniwersytet we Fribourgu, Fribourg, Szwajcaria

² Wydział Chemii, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Toruń

³ Instytut Problemów Jądrowych im A. Sołtana Otwock-Świerk

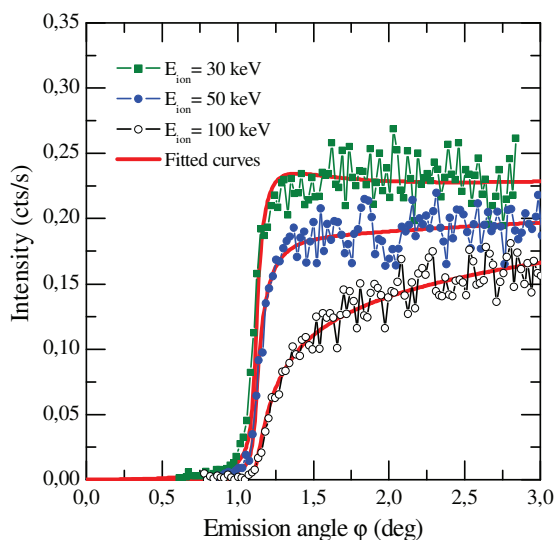
Analiza profili głębokościowych implantowanego aluminium w krzemie metodą GEXRF ze wzbudzeniem promieniowaniem synchrotronowym

Y. Kayser¹, J.-Cl. Dousse¹, J. Hoszowska¹, W. Cao¹, A. Kubala-Kukuś, D. Banaś, M. Pajek, J. Szlachetko, M. Salomé², J. Susini², P. Jagodzinski³ i M. Kavcic⁴

Postęp w rozwoju mikroelektroniki wymaga stosowania czułych technik analizy śladowych domieszek materiałów półprzewodnikowych pierwiastkami lekkimi, a w szczególności analizy ich profili głębokościowych. Potencjalne możliwości zastosowania w powyższych zagadnieniach metody GEXRF (*grazing emission x-ray fluorescence*) ze wzbudzeniem promieniowaniem synchrotronowym testowano w badaniu profili głębokościowych krzemu implantowanego jonami aluminium. Profile głębokościowe otrzymuje się przez pomiar zależności intensywności emitowanej linii fluorescencyjnej Al-K α od kąta emisji w obszarze kąta krytycznego promieniowania Al-K α . Kształt profili głębokościowych jest zdeterminowany przez energię implantowanego jonu, a koncentracja jonów przez dawkę implantacji.

Badane próbki krzemu implantowane były jonami aluminium o energii odpowiednio 30, 50 oraz 100 keV oraz dawce 10^{16} jonów/cm². Pomiar przeprowadzono w ESRF w Grenoble, na wiązce ID21. Widma rejestrowano przy pomocy spektrometru krystalicznego von Hamosa o wysokiej zdolności rozdzielczej (~eV). Zmierzone zależności kątowe intensywności linii fluorescencyjnej Al-K α wzbudzonej promieniowaniem synchrotronowym o energii 1570 eV (rysunek) porównano z przewidywaniami teoretycznymi.

Teoretyczne zależności kątowe obliczono przy założeniu profili implantowanych jonów, obliczonych przy wykorzystaniu symulacji TRIM (TRansport of Ions in Matter). W przypadku badanych energii implantacji jonów aluminium, profile jonów modelowane są przez rozkład Gaussa. Symulując rozkład jonów aluminium możliwe jest obliczenie oczekiwanej w pomiarach metodą GEXRF zależności kątowej. Dopasowane zależności teoretyczne dobrze opisują otrzymane wyniki eksperymentalne. Pomiar zależności kątowych umożliwia zatem odtworzenie rozkładu jonów w implantowanym materiale.



Zmierzone zależności kątowe intensywności linii fluorescencyjnej Al-K α wzbudzonej promieniowaniem synchrotronowym o energii 1570 eV w krzemie implantowanym jonami aluminium dla różnych energii jonów.

Otrzymane rezultaty prezentują nowe możliwości zastosowania metody GEXRF do badania rozkładów domieszek w materiałach półprzewodnikowych.

¹ Department of Physics, University of Fribourg, Fribourg, Switzerland

² European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), Grenoble, France

³ Politechnika Świętokrzyska, Kielce

⁴ J. Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia

Zastosowanie rentgenowskiej analizy fluorescencyjnej dla małych kątów emisji (GEXRF) do określania śladowych zanieczyszczeń pierwiastkowych w materiałach półprzewodnikowych

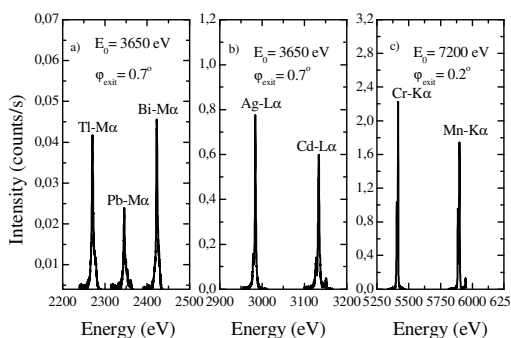
J. Szlachetko, D. Banaś, A. Kubala-Kukuś, M. Pajek, W. Cao¹, J.-Cl. Dousse¹, J. Hoszowska¹, Y. Kayser¹, M. Szlachetko¹, M. Salomé², J. Susini² i M. Kavčič³

Rozwój przemysłu półprzewodnikowego wymaga stosowania technik kontroli śladowych zanieczyszczeń materiałów półprzewodnikowych z granicą wykrywalności poniżej 10^{10} atomów/cm². W prowadzonych dotychczas badaniach wykorzystano rentgenowską analizę fluorescencyjną dla małych kątów emisji (GEXRF) na wiązce promieniowania synchrotronowego do pomiaru zanieczyszczeń Al w krzemie. W eksperymencie przeprowadzonym w European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) w Grenoble, dla optymalnej energii promieniowania synchrotronowego 1570 eV, uzyskano próg wykrywalności Al w krzemie na poziomie 10^{12} atomów/cm², co przy zastosowaniu dodatkowych metod chemicznych (VPD) odpowiada wykrywalności 10^7 atomów/cm².

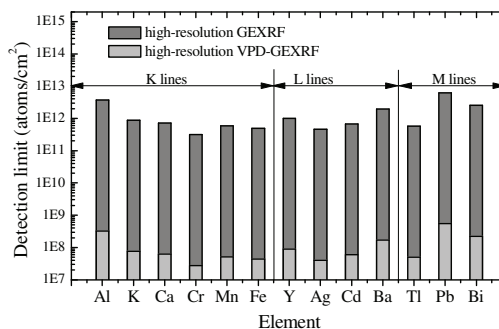
W celu wyznaczenia progu wykrywalności metody GEXRF dla innych pierwiastków analizowano serię K α , L α and M α promieniowania fluorescencyjnego różnych pierwiastków w zakresie energii od 2 keV do 7 keV. W eksperymencie przeprowadzonym w ESRF, zastosowano promieniowanie synchrotronowe o energii 3.65 keV do wzbudzenia linii Y, Tl, Pb, Bi, Ag, Cd, K oraz 7.2 keV dla Ca, Ba, Ti, Cr, Mn, Fe. Widma promieniowania (Rys. 1) rejestrowano dla kątów emisji 0.7° i 0.2°, przy pomocy spektrometru krystalicznego von Hamosa o wysokiej zdolności rozdzielczej (~eV).

W oparciu o zarejestrowane widma wyznaczono granicę wykrywalności analizowanych pierwiastków (Rys. 2), która dla bezpośrednich pomiarów metodą GEXRF jest rzędu 10^{12} atomów/cm². Otrzymana wartość jest porównywalna, a w przypadku niektórych pierwiastków nawet mniejsza, niż w metodzie TXRF, standardowo używanej w kontroli zanieczyszczeń materiałów półprzewodnikowych.

Łącząc technikę GEXRF z dodatkowymi metodami chemicznymi (VPD) możliwe jest uzyskanie wykrywalności pierwiastków na poziomie 10^7 atomów/cm².



Rys. 1 Widma promieniowania fluorescencyjnego serii K α , L α , M α różnych pierwiastków wzbudzone w metodzie GEXRF z wysoką zdolnością rozdzielczą.



Rys. 2 Granica wykrywalności różnych pierwiastków dla metody GEXRF i VPD-GEXRF.

¹ Department of Physics, University of Fribourg, Fribourg, Switzerland

² European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), Grenoble, France

³ J. Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia

Wykorzystanie metody GEXRF ze wzbudzeniem promieniowaniem synchrotronowym do badania nanostruktury cienkich warstw powierzchniowych

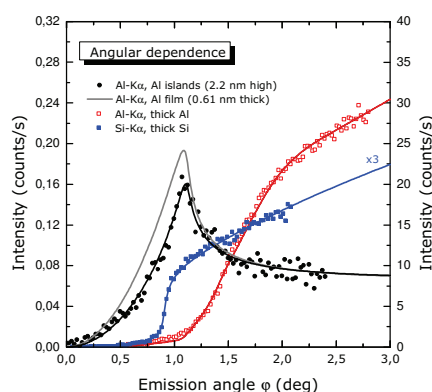
A. Kubala-Kukuś, D. Banaś, W. Cao¹, J.-Cl. Dousse¹, J. Hozzowska¹, Y. Kayser¹,
M. Pajek, J. Szlachetko, M. Szlachetko¹, M. Salomé² i J. Susin²

Metoda GEXRF jest techniką badawczą, w której emitowane z próbki promieniowanie fluorescencyjne rejestrowane jest pod małym kątem ($\varphi < \varphi_c$) względem powierzchni, mniejszym od kąta krytycznego φ_c , będącego poniżej 1° . Szczególna geometria metody GEXRF skutkuje wzrostem intensywności promieniowania charakterystycznego emitowanego przez atomy cienkich (rzędu nm) warstw powierzchniowych, przy jednoczesnej redukcji tego promieniowania emitowanego przez atomy podłoża.

Przeprowadzone w European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) w Grenoble eksperymenty pokazały, że zastosowanie metody GEXRF w połączeniu ze wzbudzeniem promieniowaniem synchrotronowym i detekcją promieniowania fluorescencyjnego przy pomocy spektrometru krystalicznego von Hamosa o wysokiej zdolności rozdzielczej ($\sim eV$), daje wiele możliwości badania struktur cienkich warstw powierzchniowych. Technika GEXRF może być stosowana przy określaniu śladowych koncentracji zanieczyszczeń powierzchniowych, ich rozkładów głębokościowych i powierzchniowych, w skali odpowiednio, nano- i mikrometrów.

Informację o warstwie powierzchniowej badanego materiału otrzymuje się z eksperymentalnie wyznaczonej zależności intensywności emitowanego promieniowania fluorescencyjnego od kąta emisji. Kształt tej zależności zmienia się wraz z grubością warstwy powierzchniowej (rysunek). W przeprowadzonych eksperymentach określano zależności kątowe dla różnych struktur powierzchniowych (np. gruba warstwa Al, gruba warstwa Si, cienka warstwa Al napyłona na Si). Krzywe eksperymentalne dopasowano następnie krzywymi teoretycznymi. W przypadku cienkiej warstwy Al na Si zależność eksperymentalna jest dobrze opisywana przez obliczenia teoretyczne, zwłaszcza poniżej kąta krytycznego, przy założeniu, że napyłona warstwa Al nie jest warstwą jednorodną lecz ma strukturę wyspową o wysokości wysp w diskutowanym przypadku 2.2 nm. Formowanie się wysp podczas tworzenia się cienkich warstw, w szczególności Al na Si, jest znanym procesem Volmer-Webera.

Otrzymane rezultaty demonstrują czułość metody GEXRF na morfologię nanostruktur powierzchniowych, co stanowi o potencjalnych możliwościach wykorzystania promieniowania synchrotronowego w badaniu nanostruktury cienkich warstw powierzchniowych.



Zależności kątowe intensywności linii fluorescencyjnej: i) Al-K α wzbudzonej promieniowaniem synchrotronowym o energii 1570 eV dla cienkiej warstwy Al na krzemie i grubej warstwy Al, oraz ii) Si-K α wzbudzonej promieniowaniem o energii 2000 eV. Dla cienkiej warstwy Al na Si, krzywe ciągłe są obliczeniami teoretycznymi dla jednorodnej warstwy Al o grubości 0.61 nm oraz dla warstwy Al o strukturze wyspowej z wysokością wysp 2.2 nm.

¹ Department of Physics, University of Fribourg, Fribourg, Switzerland

² European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), Grenoble, France

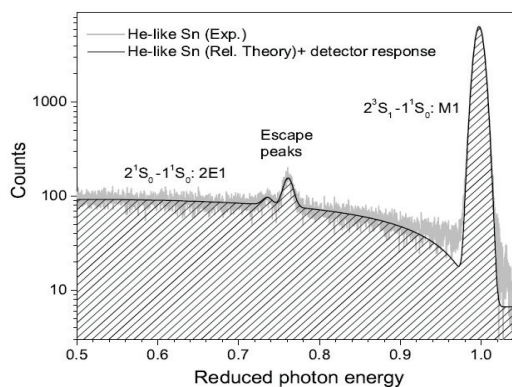
Rozkład energii dwufotonowego przejścia $2^1S_0 \rightarrow 1^1S_0$ w helopodobnej cynie.

S. Trotsenko¹, A. Kumar¹, A. Gumberidze¹, S. Haggmann¹, S. Hess¹, C. Kozhuharov¹,
R. Reuschl¹, U. Spillmann¹, M. Trassinelli¹, G. Weber¹, Th. Stöhlker¹, D. Banaś,
P. Jagodziński, A. Volotka² et al.

Dominującym mechanizmem rozpadu stanu 2^1S_0 w He-podobnych jonach jest emisja dwóch fotonów wskutek przejścia $2E1$ ($2^1S_0 \rightarrow 1^1S_0$). Suma energii tych fotonów jest zawsze równa różnicy energii pomiędzy stanem początkowym i końcowym elektronu biorącego udział w przejściu, przy czym każdy z fotonów jest emitowany z ciągłym rozkładem energii, którego maksimum znajduje się w połowie energii przejścia. Kształt tych rozkładów jest silnie modyfikowany przez oddziaływanie elektron-elektron dla niskich Z i efekty relatywistyczne dla wysokich Z [2]. Jak dotąd żaden z przeprowadzonych eksperymentów badających rozkłady dwufotonowe poprzez pomiar koincydencji między dwoma emitowanymi fotonami nie osiągnął poziomu dokładności wystarczającego do weryfikacji zaawansowanych, relatywistycznych obliczeń teoretycznych.

Niedawno zaproponowano nową technikę produkcji dużej liczby wzbudzonych do stanu 2^1S_0 He-podobnych jonów poprzez selektywną jonizację powłoki K jonów Li-podobnych w zderzeniach z lekką tarczą gazową (np. N_2). W metodzie tej do rejestracji fotonów emitowanych w przejściu dwufotonowym wykorzystuje się jeden detektor promieniowania rentgenowskiego a pomiar odbywa się w koincydencji z jonami które straciły w oddziaływaniu z tarczą jeden elektron [3,4].

Pierwszy eksperyment w którym intensywność zmierzonego rozkładu energii fotonów okazała się być wystarczająca do testu przewidywań teoretycznych został przeprowadzony w GSI w Darmstadt dla He-podobnych jonów cyny. W eksperymencie zderzano 300 MeV/u Li-podobne jony cyny z gazową tarczą azotową. Przykładowe widmo pokazano na rysunku. Do analizy danych eksperymentalnych wybrano region między 0.8 i 0.9 zredukowanej energii fotonu ($\hbar\omega_1/(\hbar\omega_1+\hbar\omega_2)$) w którym oddziaływanie elektron-elektron i efekty relatywistyczne mają największy wpływ na obserwowany rozkład. Zmierzone rozkłady energii dwufotonowego przejścia $2^1S_0 \rightarrow 1^1S_0$ w He-podobnej cynie okazały się być zgodne z przewidywaniami teoretycznymi.



Porównanie zmierzonego rozkładu energii dwufotonowego przejścia $2^1S_0 \rightarrow 1^1S_0$ w He-podobnej cynie z obliczeniami relatywistycznymi (razem z przejściem M1 i uwzględnieniem wyznaczonej z pomocą pakietu EGS4 odpowiedzi detektora)

- [1] S. Trotsenko, przesłane do Phys. Rev. Lett.
- [2] A. Deravianko and W. R. Johnson, Phys. Rev. A **56**, 1288 (1997)
- [3] D. Banaś et al. Nucl. Instrum. and Methods B **235**, 326 (2005)
- [4] J. Rządkiwicz et al. Phys. Rev. A **74**, 012511 (2006)

¹ Gesellschaft für Schwerionenforschung, Darmstadt, Germany

² Physikalisches Institut der Universität Heidelberg, Germany

³ Institut für Theoretische Physik, Technische Universität Dresden, Germany

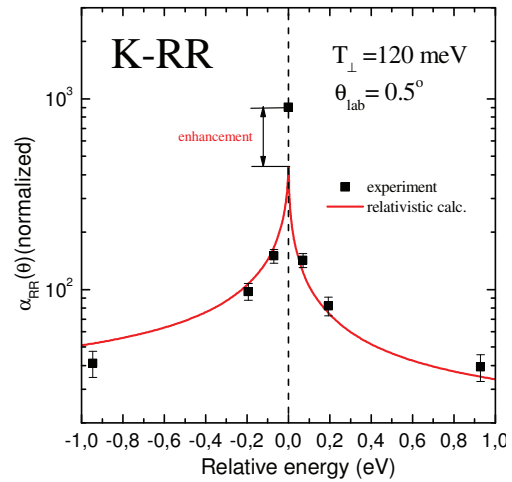
Obserwacja efektu wzmocnienia w radiacyjnej rekombinacji elektronów swobodnych do powłoki K jonów uranu U^{92+}

D. Banaś, M. Czarnota, M. Pajek, J. Szlachetko, C. Brandau¹, A. Gumberidze¹, C. Kozhuharov¹, U. Spillmann¹, A. Surzhykov^{1,2}, R. Reusch¹, S. Tachenow¹, S. Trotsenko¹, Th. Stöhlker^{1,2}, D. Sierpowski³, A. Warczak³ et al.

W przeprowadzonym eksperymencie rekombinacyjnym w kompleksie akceleratorowym SIS-ESR w GSI w Darmstadt zmierzono współczynnik radiacyjnej rekombinacji jonów U^{92+} z elektronami swobodnymi poprzez obserwację emitowanego w tym procesie promieniowania rentgenowskiego. Uzyskane dane eksperymentalne [1,2] zostały porównane z przewidywaniami nierelatywistycznego przybliżenia dipolowego w granicy niskiej energii [3] oraz pełnymi obliczeniami relatywistycznymi [4]. W nierelatywistycznym przybliżeniu dipolowym różniczkowy przekrój czynny na rekombinację do powłoki K jest opisany przez dobrze znaną zależność $d\sigma_{K-RR}/d\Omega = \sigma_{1s} \sin^2\vartheta$, która jest symetryczna względem kąta $\vartheta=90^\circ$ pomiędzy kierunkiem nadlatującego elektronu (w układzie pocisku) a emitowanym fotonem, powodując że różniczkowy współczynnik rekombinacji jest symetryczny w stosunku do energii względnej $E_{rel} = 0$ eV.

W przeprowadzonym eksperymencie zaobserwowano jednak wyraźną asymetrię różniczkowego współczynnika rekombinacji względem $E_{rel} = 0$ eV (patrz rys.). Istnienie tej asymetrii wyjaśniono w oparciu o pełne relatywistyczne obliczenia jako wynik niedipolowych elektrycznych i magnetycznych efektów w oddziaływaniu elektron-foton, które nie są uwzględnione w nierelatywistycznym przybliżeniu dipolowym. W konsekwencji zmierzony współczynnik rekombinacji nie jest symetryczny względem zerowej energii względnej.

Na rysunku widzimy, że uzyskane wyniki eksperymentalne są bardzo dobrze opisywane przez obliczenia relatywistyczne w zakresie energii względnych różnych od zera. Natomiast dla zerowej energii względnej pojawiają się istotne rozbieżności między przewidywaniami teoretycznymi a wynikami eksperymentu, które jednoznacznie potwierdzają istnienie efektu wzmocnienia w procesie radiacyjnej rekombinacji jonów U^{92+} z elektronami swobodnymi.



Współczynnik rekombinacji do powłoki K w funkcji energii względnej. Na wykresie porównano rezultaty eksperymentu z przewidywaniami modelu relatywistycznego dla temperatury poprzecznej wiązki elektronów równej $kT_{\perp}=120\text{meV}$.

[1] M. Pajek et al., Proc. of ICPEAC (World Scientific Publishing, Singapore, 2006), p. 289

[2] D. Banaś et al., Eur. Phys. J. ST, przyjęte do druku

[3] M. Pajek and R. Schuch, Phys. Rev. A **45**, 7894 (1992)

[4] A. Surzhykov et al., Comput. Phys. Com. **165**, 139 (2005)

¹ Gesellschaft für Schwerionenforschung, Darmstadt, Germany

² Physikalisches Institut der Universität Heidelberg, Germany

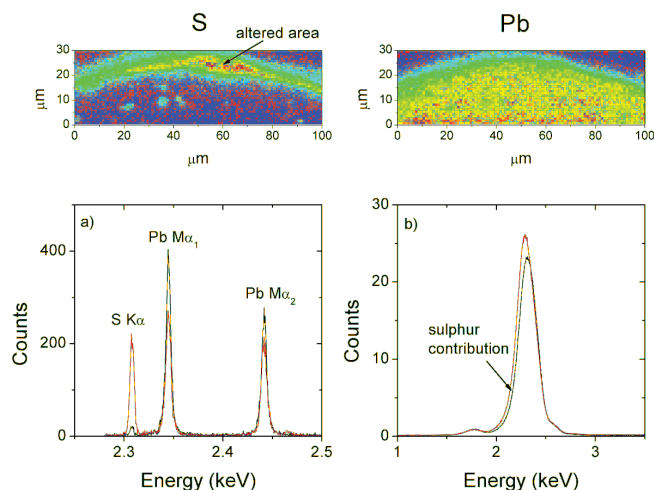
³ Instytut Fizyki, Uniwersytet Jagielloński

Budowa spektrometru krystalicznego przeznaczonego do rentgenowskiej mikroanalizy fluorescencyjnej na linii ID21 promieniowania synchrotronowego w ESRF

J. Szlachetko^{1,2}, M. Cotté^{2,3}, J. Morse², M. Salomé², P. Jagodziński⁴, J.-Cl. Dousse⁵, J. Hoszowska⁵, Y. Kayser⁵ i J. Susini²

Linia eksperymentalna ID21 w Europejskim Centrum Promieniowania Synchrotronowego (ESRF) w Grenoble, Francja, przeznaczona jest do mikroskopii i mikroanalizy w zakresie energii promieniowania rentgenowskiego od 1 keV do 7 keV. Stosowane techniki eksperymentalne, takie jak analiza mikro-fluorescencyjna (μ -XRF) oraz absorpcyjna (XANES), znajdują zastosowanie w zastosowaniach geologicznych, archeologicznych oraz biologicznych. Obecnie, głównym kierunkiem rozwoju techniki mikro-fluorescencyjnej jest obniżenie poziomu wykrywalności metody, które pozwoli na pomiary śladowych ilości pierwiastków. W tym celu, skonstruowany i wybudowany został dyfrakcyjny spektrometr krystaliczny przeznaczony do rejestracji z wysoką zdolnością rozdzielczą charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego.

Spektrometr krystaliczny, który został zintegrowany z Mikroskopem Rentgenowskim ID21, składa się z dwóch głównych elementów: stołu z uchwytem polikapilary oraz goniometru. Promieniowanie fluorescencyjne emitowane z analizowanej próbki, ogniskowane jest przy wykorzystaniu polikapilary i kierowane na płaski kryształ. Fotony odbite dyfrakcyjnie na kryształach rejestrowane są przez detektor gazowy. Spektrometr wyposażony jest w cztery kryształy (TIAP(001), ADP(101), Si(111), Ge(220)) umożliwiające pomiar promieniowania fluorescencyjnego w zakresie od 0.5 keV do 7.5 keV. Energetyczna zdolność rozdzielcza spektrometru jest w zakresie od 10 eV do 30 eV, natomiast wyznaczony poziom wykrywalności jest rzędu 10-20 ppm. Spektrometr będzie wykorzystywany w badaniach próbek medycznych, biologicznych, archeologicznych oraz dzieł sztuki (Rys.)



Górny panel: Obraz 2D sygnału fluorescencyjnego dla S i Pb w przekroju poprzecznym obrazu (*Bateaux de Pêche*, J. A. Noel (1867), Musée de Picardie, Amiens, France) zawierającym zdegradowany obszar. Dolny panel: a) widmo fluorescencyjne uzyskane z wykorzystaniem spektrometru krystalicznego, b) widmo fluorescencyjne uzyskane z wykorzystaniem detektora półprzewodnikowego.

¹ Instytut Fizyki UJK

² European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), Grenoble, France

³ Centre of Research and Restoration of French Museums, Paris, France

⁴ Politechnika Świętokrzyska, Kielce

⁵ Department of Physics, University of Fribourg, Fribourg, Switzerland