

ZAKŁAD FIZYKI ATOMOWEJ

Skład osobowy

Prof. dr hab. Marek Pajek – kierownik zakładu,
dr Dariusz Banaś, mgr Marcin Czarnota, dr Aldona Kubala-Kukuś,
mgr 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:

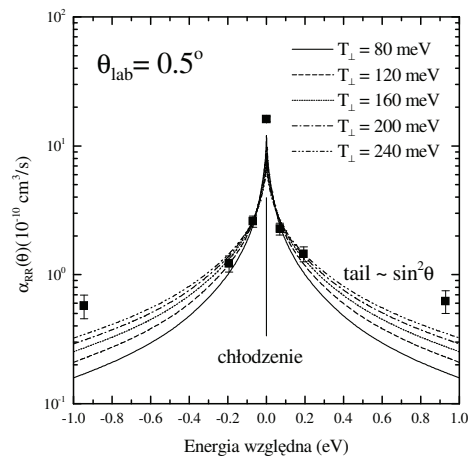
Instytut Problemów Jądrowych w Świerku
Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów Uniwersytetu Warszawskiego w Warszawie
Świętokrzyskie Centrum Onkologii w Kielcach
Uniwersytet w Erlangen, Niemcy
Instytut Ciężkich Jonów (GSI), Darmstadt, Niemcy
Uniwersytet w Sztokholmie, Szwecja
Laboratorium Manne Siegbahna, 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, M. Czarnota, J. Szlachetko, Th. Stöhlker¹, A. Gumberidze¹, A. Orsic-Muthig¹, U. Spillmann¹, R. Reusch¹, S. Tachenow¹, D. Sierpowski², A. Warczak²

Proces radiacyjnej rekombinacji (RR) ciężkich jonów, całkowicie obdartyh z elektronów, był w ostatnich latach szeroko badany w pierścieniach akumulacyjnych, gdzie wiązki jonów są chłodzone przez gęste wiązki elektronów w chłodziarach elektronowych. Dla niskich energii elektronów proces ten może być opisany w ramach nierelatywistycznego przybliżenia dipolowego (NDA). Jednakże przeprowadzone dotychczas eksperymenty rekombinacyjne w różnych pierścieniach akumulacyjnych (TSR, CRYRING, ESR) pokazały, że dla względnych energii elektronów mniejszych od ich temperatury poprzecznej kT_{\perp} , zmierzone współczynniki rekombinacji są zdecydowanie wyższe, niż przewidywania teoretyczne NDA. Efekt ten, zwany „efektem wzmocnienia” był badany w kilku eksperymentach z całkowicie obdartymi jonami, włączając U^{92+} [1]. Zaobserwowano w nich, między innymi, że na wielkość „wzmocnienia” ma wpływ pole magnetyczne w chłodnicy elektronowej oraz podłużna temperatura wiązki elektronów $kT_{\parallel} \ll kT_{\perp}$ [1,2]

W 2004 roku przeprowadzony został w kompleksie akceleratorowym SIS-ESR w GSI w Darmstadt eksperyment [3] w którym badano selektywnie efekt „wzmocnienia” rekombinacji jonów dla szerokiego zakresu stanów elektronowych poprzez pomiar promieniowania rentgenowskiego emitowanego bezpośrednio w procesie rekombinacji oraz w rezultacie kaskady radiacyjnej. W pierwszej części tego eksperymentu, dla zadanego pola magnetycznego $B = 70$ mT w chłodnicy elektronowej, zmierzono szybkość rekombinacji dla sześciu energii względnych elektronów: $E_{rel} = \pm 69$ meV, ± 190 meV, ± 930 meV. Zmierzone zależności współczynników rekombinacji do powłoki K zostały porównane z przewidywaniami nierelatywistycznego przybliżenia dipolowego (Rys. 1). Wyniki potwierdzają istnienie efektu wzmocnienia w granicy zerowych energii względnych w przypadku bezpośredniej rekombinacji do powłoki K. Jednocześnie dla wysokich energii względnych ($E_{rel} \gg kT_{\perp}$) zmierzone współczynniki rekombinacji znacznie przewyższają przewidywania teoretyczne. Jest to spowodowane efektami relatywistycznymi, które zaczynają odgrywać tu istotną rolę, z powodu znacznej redukcji czynnika dipolowego ($\sim \sin^2\theta$) dla kątów obserwacji bliskich zera stopni względem wiązki jonów.



Rys. 1. Zmierzone współczynniki rekombinacji do powłoki K w funkcji energii względnej elektronów. Wyniki zostały znormalizowane na przewidywania NDA dla $kT_{\perp} = 120$ meV i $E_{rel} = 190$ meV.

[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., Proc. of ICPEAC-2005 (in press).

¹Gesellschaft für Schwerionenforschung, Darmstadt, Germany

²Institute of Physics, Jagiellonian University, Cracow, Poland

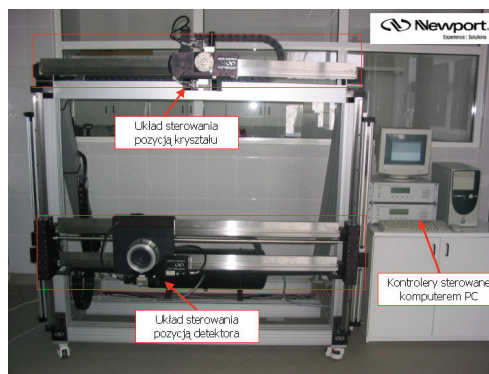
Spektrometr krystaliczny do pomiaru niskoenergetycznego promieniowania rentgenowskiego

D. Banaś, P. Jagodziński¹, M. Pajek, Th. Stöhlker², M. Trassinelli², S. Tachenow², R. Reuschl², U. Spillmann²

Pomiar subtelnych efektów QED w ciężkich kilkuelektronowych jonach pozwala na bardzo czuły test przewidywań elektrodynamiki kwantowej w obszarze silnych pól kulombowskich. Jak dotąd, głównie ze względu na dostępność metod eksperymentalnych i precyzyjnych przewidywań teoretycznych, w większości przeprowadzonych eksperymentów, wpływ elektrodynamiki kwantowej na energię stanów badany był poprzez pomiar przesunięcia Lamba stanu 1s i 2s, odpowiednio w H- i Li-podobnych jonach. Duży postęp w spektroskopii ciężkich jonów [1] oraz obliczeniach teoretycznych [2], który nastąpił w ostatnich latach, pozwala obecnie na rozszerzenie tych badań również na obszar He-podobnych jonów, o których strukturze i energiach stanów wciąż niewiele wiemy. Badanie efektów QED jest możliwe jedynie poprzez pomiar energii wiązania i energii przejść rentgenowskich z wysoką dokładnością (1 eV).

Spektrometr krystaliczny do pomiaru niskoenergetycznego (1-10 keV) promieniowania rentgenowskiego budowany obecnie w Instytucie Fizyki w ramach kolaboracji SPARC (we współpracy z GSI, Darmstadt) zostanie wykorzystany w przyszłych eksperymentach z He-podobnymi jonami uranu gromadzonymi w pierścieniu akumulacyjnym ESR. Umożliwi on bardzo precyzyjny pomiar energii wewnątrzpowłokowych ($\Delta n=0$) przejść rentgenowskich, w tym np. przejścia $1s2p^3P_2 \rightarrow 1s2s^3S_1$ w He-podobnym uranie, którego energia wynosi 4.5 keV. Ponadto zostanie wykorzystany do pomiaru przesuniętych dopplerowsko linii serii Balmera w H-podobnych jonach oraz struktury satelitarnej promieniowania rentgenowskiego serii M wzbudzonej w zderzeniach jonów o średnim Z z ciężkimi atomami.

Konstruowany spektrometr pracuje w geometrii Johann-a [3] z promieniem okręgu Rowlanda równym $R=0.5$ m (Rys. 1). Wykorzystuje sferyczny kryształ Si(111) firmy Zeiss o średnicy 75 mm i promieniu krzywizny $2R=1$ m. Sferyczność kryształu zwiększa liczbę fotonów promieniowania rentgenowskiego odbitych w kierunku detektora, zwiększając tym samym istotnie wydajność spektrometru bez istotnego wpływu na jego zdolność rozdzielczą. Spektrometr jest wyposażony w dwa liniowe silniki krokowe do przesuwu w kierunku osi x, pneumatyczny silnik liniowy do przesuwu w kierunku osi y oraz dwa silniki obrotowe, jeden do obrotu kryształu a drugi detektora. Wszystkie silniki są obsługiwane przez komputer PC oraz dwa kontrolery firmy Newport. Do detekcji promieniowania rentgenowskiego wykorzystywany będzie detektor CCD składający się z macierzy 1024×256 pikseli o rozmiarze $26 \mu\text{m}$. Spodziewana zdolność rozdzielcza spektrometru, obliczona w oparciu o geometrię źródło-kryształ-detektor, charakterystykę użytego kryształu i parametry detektora jest rzędu 0.5 eV. Szacowana wydajność spektrometru obliczona z wykorzystaniem dynamicznej teorii dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego wynosi $\sim 10^{-6}$.



[1] A. Gumberidze et al., Phys. Rev. Lett. 92, 203004 (2004)

[2] A. N. Artemyev et al., Phys. Rev. A 71, 062104 (2005)

[3] H. H. Johann, Zeitschrift für Physik 69, 185 (1931)

¹Politechnika Świętokrzyska, Kielce

²Gesellschaft für Schwerionenforschung, Darmstadt, Germany

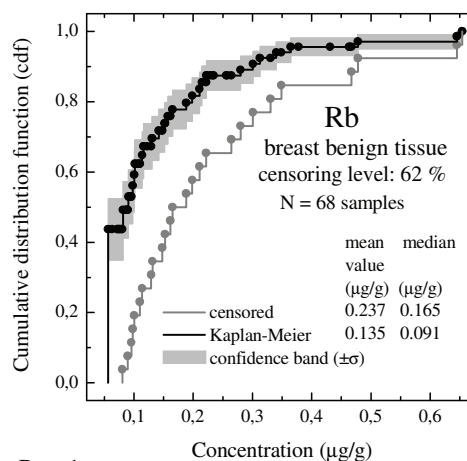
Analiza cenzurowanych rozkładów koncentracji pierwiastków śladowych w tkankach nowotworowych piersi

A. Kubala-Kukuś, D. Banaś, J. Braziewicz, U. Majewska, M. Pajek i S. Góźdz¹

Prowadzone badania dotyczyły zastosowań spektroskopii rentgenowskiej w badaniu rozkładów koncentracji pierwiastków śladowych w różnorodnych próbkach biologicznych i medycznych. W pomiarach koncentracji pierwiastków wykorzystano metody rentgenowskiej analizy fluorescencyjnej (XRF, TXRF). Istotnym problemem w prowadzonych badaniach są pomiary kiedy koncentracja pierwiastka, będąca poniżej progu wykrywalności metody pomiarowej, nie jest określana. W poprzednich badaniach zaproponowano do opisu takich pomiarów statystyczną koncepcję danych losowo lewostronnie cenzurowanych, a do odtwarzania dystrybuanty i w konsekwencji parametrów rozkładu, estymator Kaplana-Meiera. Dla testów porównawczych rozkładów cenzurowanych w różnych populacjach zaproponowano test log-rangowy.

Rezultaty powyższe zostały obecnie wykorzystane praktycznie do odtwarzania cenzurowanych rozkładów koncentracji pierwiastków śladowych w tkankach nowotworowych piersi, badanych metodą TXRF. Próbki pochodziły od dwóch grup (nowotwór łagodny $N_B = 68$ i złośliwy $N_M = 26$ próbek) pacjentek Świętokrzyskiego Centrum Onkologii w Kielcach. W każdej grupie określono koncentracje 13 pierwiastków (od fosforu P do ołowiu Pb), będącą na poziomie od kilku ng/g do 0,1%, a następnie sporządzono rozkłady koncentracji. Zaobserwowano, że dla ponad 50% pierwiastków rozkłady koncentracji były cenzurowane, na poziomie od 2% do 62%. Wykorzystując estymator Kaplana-Meiera dla każdego rozkładu cenzurowanego odtworzono jego dystrybuantę a następnie parametry rozkładu, tzn. wartość oczekiwaną oraz medianę, otrzymując korekcję tych parametrów od 5% do 60% (Rys. 1). W celu znalezienia możliwych korelacji pomiędzy koncentracją danego pierwiastka a rodzajem nowotworu przeprowadzono analizę porównawczą, w której zastosowano test log-rangowy, możliwy do stosowania również w przypadku danych cenzurowanych. W rezultacie przeprowadzonej analizy porównawczej rozkładów koncentracji pierwiastków w tkankach łagodnego i złośliwego nowotworu piersi, zaobserwowano statystycznie istotny (poziom ufności 95%) wyższy poziom koncentracji niektórych pierwiastków (P, S, K, Ca, Fe, Ni, Se, Rb) w tkance nowotworu złośliwego.

Zaproponowana procedura statystycznego opracowywania danych losowo lewostronnie cenzurowanych powinna być standardowym narzędziem analizy w metodzie XRF, jak również w każdej metodzie pomiarowej, w której występuje problem danych cenzurowanych.



Rys. 1
Porównanie dystrybuanty cenzurowanego na poziomie 62% rozkładu koncentracji rubidu (Rb) w tkance nowotworu łagodnego z dystrybuantą odtworzoną przy wykorzystaniu estymatora Kaplana-Meiera.

¹Świętokrzyskie Centrum Onkologii, Artwińskiego 3, 25-734 Kielce

Rezonansowe rozpraszanie Ramana promieniowania synchrotronowego w Si i SiO₂ w obszarze poniżej krawędzi absorpcji powłoki K

J. Szlachetko, A.Kubala-Kukuś, M. Pajek, R. Barrett¹, M. Berset², J.-Cl. Dousse²,

K. Fennane², J. Hoszowska¹, M. Szlachetko²

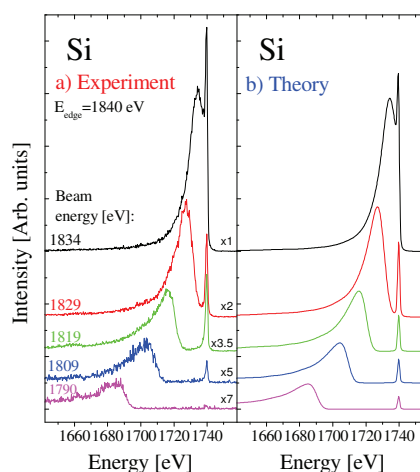
W ramach prowadzonych badań analizowano rezonansowe rozpraszanie Ramana (RRS) promieniowania synchrotronowego w ciele stałym (Si, SiO₂), w obszarze poniżej krawędzi absorpcji powłoki K. Eksperyment został przeprowadzony w European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) w Grenoble (Francja), na wiązce 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 poniżej krawędzi absorpcji powłoki K (Rys.1), co pozwoliło zweryfikować opis teoretyczny zjawiska rezonansowego rozpraszania Ramana.

Pomiary przeprowadzono dla różnych energii promieniowania synchrotronowego w zakresie od 1790 do 1900 eV, na wiązce o natężeniu 10¹² – 10¹³ fotonów/s z energetyczną zdolnością rozdzielczą wiązki ~6eV.

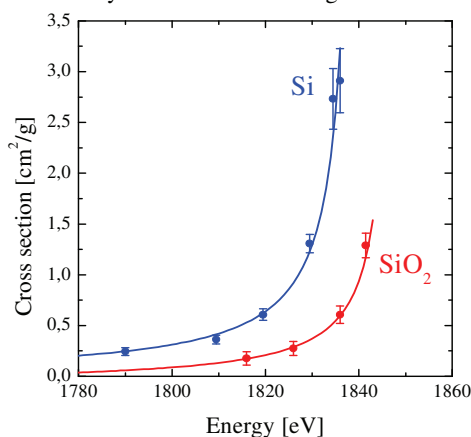
Na podstawie zarejestrowanych widm wyznaczono przekroje czynne na rezonansowe rozpraszanie Ramana promieniowania w Si i SiO₂, które porównane zostały z przekrojami teoretycznymi na rozpraszanie ramanowskie w obszarze poniżej krawędzi absorpcji powłoki K wyznaczonymi z formuły Kramersa-Heisenberga (Rys.2). Wyznaczono również funkcje gęstości stanów nieobsadzonych dla Si i SiO₂, co umożliwiło zaobserwowanie różnic w strukturze elektronowej dla Si i jego tlenku. Praktycznym zastosowaniem otrzymanych rezultatów będzie możliwość obniżenia progu wykrywalności pierwiastków lekkich w materiałach półprzewodnikowych, analizowanych metodą rentgenowskiej analizy fluorescencyjnej z całkowitym odbiciem wiązki padającej (TXRF).

¹European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), F-38043 Grenoble, France

²Department of Physics, University of Fribourg, CH-1700 Fribourg, Switzerland



Rys. 1 Porównanie widm eksperymentalnych (a) rezonansowego rozpraszania Ramana promieniowania synchrotronowego w Si z widmami teoretycznymi (b), wyznaczonymi z formuły Kramersa-Heisenberga



Rys. 2 Całkowite eksperymentalne przekroje czynne (punkty) na rozpraszanie Ramana promieniowania synchrotronowego w Si i SiO₂ w porównaniu z wartościami teoretycznymi (linie).