

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 trójciałowa (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:

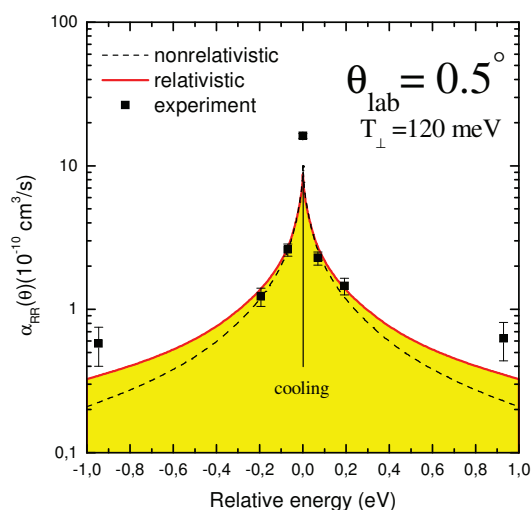
Instytut Problemów Jądrowych w Świerku
Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów Uniwersytetu Warszawskiego w Warszawie
Świętokrzyskie Centrum Onkologii w Kielcach
Uniwersytet w Erlangen, Niemcy
Instytut Ciężkich Jonów (GSI), Darmstadt, Niemcy
Uniwersytet w Sztokholmie, Szwecja
Laboratorium Manne Siegbahna, 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 rekombinacji radiacyjnej 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 et al.

W procesie rekombinacji radiacyjnej (RR) jonów U^{92+} z elektronami swobodnymi emitowane jest promieniowanie rentgenowskie niosące informację o energii stanu związanego i szybkości rekombinacji. Proces RR był w ostatnich latach szeroko badany w pierścieniach akumulacyjnych, gdzie wiązki jonów są chłodzone przez gęste wiązki elektronów w chłodnicach elektronowych. W tych eksperymentach, w układzie jonu, elektrony posiadają termiczny, asymetryczny rozkład prędkości ($T_{\parallel} \ll T_{\perp}$). Dla niskich energii względnych elektronów proces RR może być opisany w ramach nierelatywistycznego przybliżenia dipolowego. Jednakże przeprowadzone dotychczas eksperymenty rekombinacyjne w pierścieniach akumulacyjnych pokazały, że dla bardzo niskich energii względnych elektronów, mniejszych od ich temperatury poprzecznej kT_{\perp} , zmierzone współczynniki rekombinacji są zdecydowanie wyższe, niż przewidywania teoretyczne. Efekt ten, zwany „efektem wzmocnienia” był badany w kilku eksperymentach z całkowicie obdartymi jonami, włączając U^{92+} [1].

W przeprowadzonym eksperymencie rekombinacyjnym w kompleksie akceleratorowym SIS-ESR w GSI w Darmstadt zmierzono szybkości rekombinacji jonów U^{92+} z elektronami swobodnymi poprzez obserwację emitowanego promieniowania rentgenowskiego. W zakresie energii względnych elektronów 0 - 1 eV. Zmierzone zależności współczynników rekombinacji do powłoki K zostały porównane z przewidywaniami nierelatywistycznych i relatywistycznych obliczeń procesu RR (Rys. 1). Przeprowadzone obliczenia potwierdzają istnienie efektu wzmocnienia w granicy zerowych energii względnych w przypadku bezpośredniej rekombinacji do powłoki K. Przyczyny obserwowanych rozbieżności dla wyższych energii względnych elektronów ($E_{\text{rel}} \gg kT_{\perp}$) pozostają do wyjaśnienia.



Rys. 1 Zmierzony współczynnik RR jonów U^{92+} z elektronami swobodnymi o temperaturze poprzecznej $kT_{\perp}=120$ meV w zależności od energii względnej elektronów.

- 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.

Rezonansowe rozpraszanie Ramana promieniowania synchrotronowego w Si i SiO₂ w obszarze 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 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).

Pomiary przeprowadzono dla różnych energii promieniowania synchrotronowego w zakresie od 1790 do 1840 eV, na wiązce o natężeniu 10¹² – 10¹³ fotonów/s z energetyczną zdolnością rozdzielczą wiązki ~ 6eV.

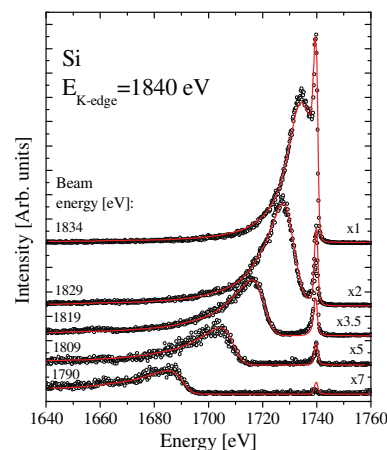
Na podstawie zarejestrowanych widm (Rys. 1) zbadano strukturę widm RRS, zarówno w obszarze poniżej jak i powyżej krawędzi absorpcji powłoki K. Wyznaczono eksperymentalne przekroje czynne na rezonansowe rozpraszanie Ramana promieniowania w Si i SiO₂, uzyskując bardzo dobrą zgodność z przewidywaniami teoretycznymi zgodnie z teorią Kramersa-Heisenberga.

W oparciu o widma RRS wyznaczono również funkcje gęstości stanów nieobsadzonych ($dg_{1s}/d\omega$) dla Si (Rys. 2) i SiO₂, zwracając uwagę na fakt, że analiza RRS jest alternatywną do innych metod (EXAFS, XANES) metodą badania struktury krzywej absorpcji.

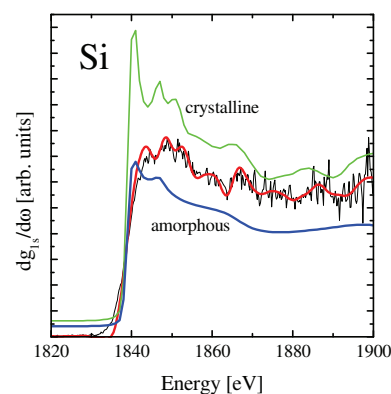
Praktycznym zastosowaniem otrzymanych rezultatów będzie wykorzystanie informacji o procesie rezonansowego rozpraszania Ramana w badaniu śladowych zanieczyszczeń w materiałach półprzewodnikowych, analizowanych metodami rentgenowskiej analizy fluorescencyjnej, a w konsekwencji obniżenie progu wykrywalności.

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

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



Rys. 1
Eksperymentalne widma rezonansowego rozpraszania Ramana promieniowania synchrotronowego w Si w porównaniu z widmami teoretycznymi (linie ciągła), wyznaczonymi z formuły Kramersa-Heisenberga.



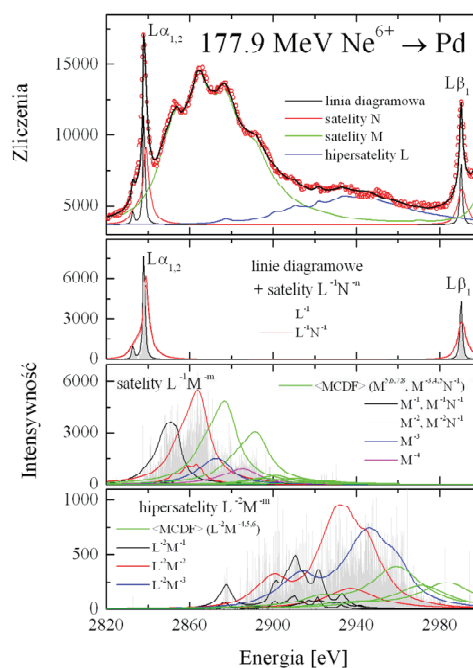
Rys. 2
Funkcja gęstości stanów nieobsadzonych ($dg_{1s}/d\omega$) dla Si (linia czerwona). Dla porównania funkcje gęstości stanów dla Si uzyskane w innych eksperymentach.

Interpretacja struktury satelitarnej oraz hipersatelitarnej linii $L\alpha_{1,2}$ ($L_3M_{4,5}$) palladu z wykorzystaniem obliczeń MCDF

M. Czarnota, D. Banaś, M. Pajek, J.-Cl. Dousse¹, M. Breset¹, Y.-P. Maillard¹, O. Mauron¹, P. A. Raboud¹, D. Chmielewska², Z. Sujkowski², J. Rządkiwicz², M. Polasik³, K. Słabkowska³, J. Hoszowska⁴

W strukturze promieniowania rentgenowskiego emitowanego przez wielokrotnie zjonizowane atomy zawarta jest informacja o konfiguracji elektronowej atomu w chwili emisji tego promieniowania. Obserwacja tej struktury wymaga pomiarów widma z dużą zdolnością rozdzielczą i może być przeprowadzona dzięki wykorzystaniu dyfrakcyjnej spektroskopii rentgenowskiej. Opisywane wyniki zostały uzyskane w eksperymencie przeprowadzonym w Instytucie Paula Scherrera (PSI) w Villigen w Szwajcarii. Użyto wiązek jonów tlenu o energii 279 MeV oraz neonu o energii 178 MeV w celu zmierzenia widm rentgenowskich linii $L\alpha_{1,2}$ ($L_3M_{4,5}$) oraz $L\beta_1$ (L_2M_4) dla Zr, Mo oraz Pd. Pomiarzy przeprowadzono przy wykorzystaniu krystalicznego spektrometru typu von Hamosa o zdolności rozdzielczej 0,6 eV dla mierzonego zakresu 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 $n = 1$ 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 bardzo dobre odtworzenie widm eksperymentalnych linii $L\alpha_{1,2}$ Pd. Dodatkowo wyznaczono prawdopodobieństwa jonizacji na elektron dla powłoki M palladu. Prawdopodobieństwa te wynoszą odpowiednio dla widm wzbudzonych jonami tlenu 0.062 ± 0.007 oraz dla widm wzbudzonych jonami neonu 0.159 ± 0.007 .



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

¹Physics Department, University of Fribourg, CH-17000 Fribourg, Switzerland

²Sołtan Institute for Nuclear Studies, 05-400 Otwock-Świerk, Poland

³Faculty of Chemistry, Nicholas Copernicus University, 87-100 Toruń, Poland

⁴European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), F-38043 Grenoble, France

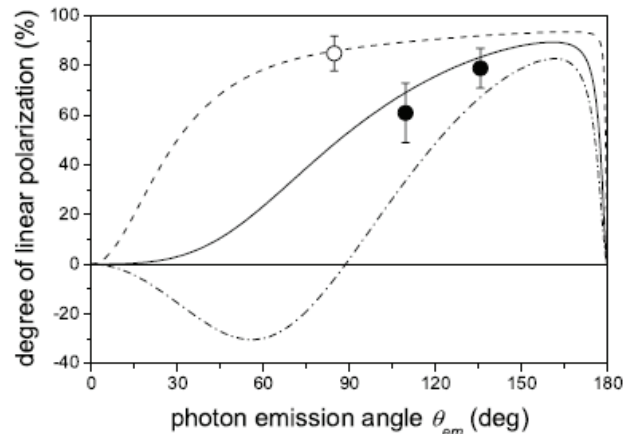
Pomiar polaryzacji promieniowania rentgenowskiego emitowanego w procesie radiacyjnego wychwytu elektronu (REC)

S. Tachenov¹, Th. Stöhlker¹, D. Banaś, S. Fritzsche², A. Gumberidze¹, D. Protić³, D. Sierpowski⁴, U. Spillmann¹, A. Surzhykov², et al. [1]

W zderzeniach ciężkich, całkowicie obdartyh z elektronów jonów uranu z lekkimi atomami dominującym procesem prowadzącym do emisji promieniowania rentgenowskiego jest wychwyt radiacyjny quasi-swobodnego elektronu z atomu tarczy do niezapełnionego stanu związanego pocisku czyli tzw. radiacyjny wychwyt elektronu (REC). Zgodnie z przewidywaniami teoretycznymi, promieniowanie emitowane w tym procesie powinno być spolaryzowane liniowo, a jego polaryzacja silnie zależy od energii jonów oraz kąta rejestracji [2].

W latach 2002-2005 w Laboratorium Ciężkich Jonów (GSI) w Darmstadt na wiązce pierścienia akumulacyjnego ESR przeprowadzona została seria eksperymentów których celem było określenie stopnia polaryzacji promieniowania K-REC emitowanego w zderzeniach całkowicie obdartyh jonów uranu U^{92+} z atomami azotu. Pomiary przeprowadzono dla czterech energii jonów (98, 132, 190 i 400 MeV/u) oraz trzech różnych, w układzie pocisku, kątów obserwacji miejsca oddziaływania.

Do detekcji promieniowania REC wykorzystano 16 segmentowy (4x4) detektor germanowy – tzw. polarymetr komptonowski [3], który pozwala na wyznaczenie stopnia polaryzacji poprzez pomiar kąta rozproszenia fotonu w wyniku efektu Comptona. Zgodnie bowiem z formułą Kleina-Nishiny dla promieniowania spolaryzowanego liniowo rozkład kątowy fotonów rozproszonych komptonowsko ma największą intensywność w kierunku prostopadłym do ich płaszczyzny polaryzacji. Mierzając więc stosunek liczby fotonów rozproszonych w płaszczyźnie oddziaływania (zdefiniowanej przez kierunek wiązki jonów i emitowanego fotonu) do liczby fotonów rozproszonych pod kątem prostopadłym do tej płaszczyzny możemy wyznaczyć stopień polaryzacji rejestrowanego promieniowania.



Rys. 1. Wyznaczony eksperymentalnie stopień polaryzacji liniowej fotonów K-REC emitowanych w zderzeniu całkowicie obdartyh jonów uranu U^{92+} o energii 98 i 400 MeV/u z atomami azotu w zależności od kąta emisji fotonu w porównaniu z zaawansowanymi obliczeniami relatywistycznymi [2]

- 1) Gesellschaft für Schwerionenforschung, Darmstadt, Germany
- 2) University of Kassel, Kassel, Germany
- 3) Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, Germany
- 4) Institute of Physics, Jagiellonian University, Cracow, Poland

Literatura:

- [1] S. Tachenov et al. Phys. Rev. Lett. 97, 223202 (2006)
- [2] A. Surzhykov et al. Phys. Rev. A 68, 022710 (2003)
- [3] Detektor udostępniony przez IKP Forschungszentrum Jülich GmbH.