

ZAKŁAD FIZYKI ATOMOWEJ

Skład osobowy

Prof. dr hab. Marek Pajek – kierownik zakładu,
dr Dariusz Banaś, mgr Marcin Czarnota, mgr 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 atomowych w wysokich stanach ładunkowych. Badanymi procesami są tu: rekombinacja radiacyjna (RR), rekombinacja dwuelektronowa (DR), rekombinacja trójciałowa (TBR). Eksperymenty rekombinacyjne są prowadzone we współpracy z Laboratorium Manne Siegbahna Uniwersytetu w Sztokholmie przy wykorzystaniu pierścienia akumulacyjnego CRYRING oraz pierścienia ESR w GSI, w Darmstadt. 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 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 rezonansowego rozpraszania Ramana promieniowania synchrotronowego

*J. Szlachetko, A.Kubala-Kukuś, M. Pajek, R. Barrett¹, M. Berset², J.-Cl. Dousse²,
K. Fennane², J. Hoszowska¹ i M. Szlachetko²*

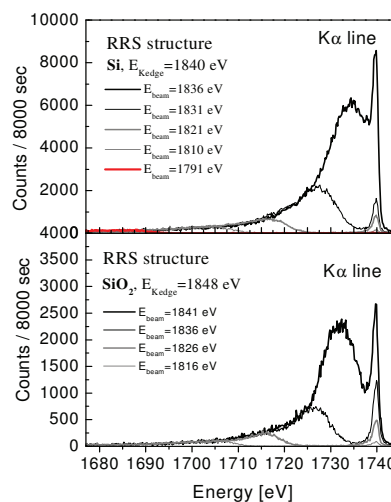
Zastosowanie metody rentgenowskiej analizy fluorescencyjnej z całkowitym odbiciem wiązki padającej (TXRF) w połączeniu ze źródłem synchrotronowym promieniowania rentgenowskiego stwarza nowe możliwości pomiarów bardzo małych koncentracji pierwiastków lekkich np. aluminium (Al), stanowiących zanieczyszczenie materiałów półprzewodnikowych. Granica wykrywalności pierwiastków ograniczona jest jednak przez obecność promieniowania rezonansowego rozpraszania Ramana (RRS). Tak więc w tego typu pomiarach istotna jest dokładna znajomość kształtu widma zdeterminowanego głównie przez rozpraszanie Ramana.

W ramach prowadzonych badań analizowano rezonansowe rozpraszanie Ramana promieniowania synchrotronowego w ciele stałym (Si, Al, SiO₂ i Al₂O₃). Eksperyment został przeprowadzony w European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) w Grenoble (Francja), na wiązce fotonów ID21, przeznaczonym do spektroskopii rentgenowskiej z wysoką zdolnością rozdzielczą. Widma promieniowania rejestrowano przy wykorzystaniu spektrometru krystalicznego typu von Hamos o wysokiej zdolności rozdzielczej (~eV), co umożliwiło określenie dokładnego kształtu widm rozpraszania ramanowskiego oraz wyznaczenie stosunku intensywności tego promieniowania do intensywności linii fluorescencyjnej K α .

Pomiary przeprowadzono dla różnych energii promieniowania synchrotronowego (od 1400 eV do 1900 eV), o natężeniu 10¹² – 10¹³ fotonów/s z energetyczną zdolnością rozdzielczą wiązki ~6eV w obszarze poniżej krawędzi absorpcji powłoki K. Na podstawie zarejestrowanych widm wyznaczono przekroje czynne na rezonansowe rozpraszanie Ramana promieniowania synchrotronowego. Zaobserwowano istotne różnice w kształcie widm promieniowania rozpraszania Ramana między metalem (Al) i półprzewodnikiem (Si), jak również między ich tlenkami. Rezultatem badań będzie możliwość obniżenia progu wykrywalności zanieczyszczenia Al w materiałach półprzewodnikowych.



Rys.1 Zdjęcie spektrometru krystalicznego typu von Hamos zainstalowanego w układzie ID21 ESRF.



Rys. 2 Widma promieniowania rozpraszania Ramana mierzone dla krzemu (Si) oraz tlenku krzemu (SiO₂) dla różnych energii

¹European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), Grenoble, Francja

²Department of Physics, University of Fribourg, Fribourg, Szwajcaria

Wpływ efektów relatywistycznych na szerokość rozkładu energii dwufotonowego przejścia $2^1S_0 \rightarrow 1^1S_0$ w helopodobnym uranie

*D. Banaś, Th. Stöhlker¹, A. Gumberidze¹, A. Orsic-Muthig¹,
U. Spillmann¹, S. Tachenow¹, D. Sierpowski² i A. Warczak²*

Równoczesna emisja dwóch fotonów w skutek przejść elektrycznych dipolowych (E1) jest dominującym mechanizmem rozpadu stanu 2^1S_0 w He-podobnych jonach. Proces ten jest wynikiem oddziaływania pomiędzy atomem a polem elektromagnetycznym i może być opisany następująco:

$$1s2s\ ^1S_0 \rightarrow 1s^2\ ^1S_0 + \hbar\omega_1 + \hbar\omega_2,$$

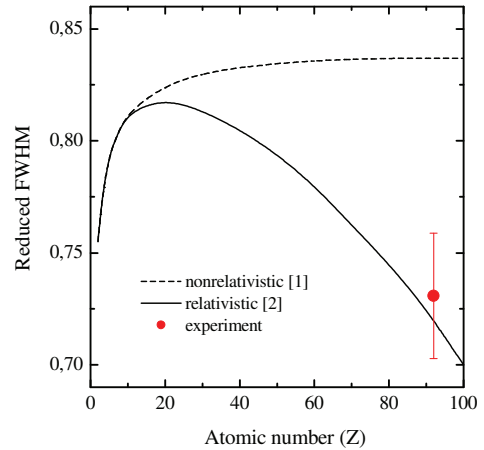
gdzie $\hbar\omega_1$ oraz $\hbar\omega_2$ są energiami fotonów emitowanych w przejściu. Suma energii tych fotonów jest zawsze równa różnicy energii pomiędzy stanem początkowym i końcowym elektronu biorącego udział w przejściu:

$$\hbar\omega_1 + \hbar\omega_2 = E_I - E_F$$

Istotnym jest fakt, że każdy z fotonów jest emitowany z ciągłym rozkładem energii, którego maksimum znajduje się w połowie energii przejścia. Szerokość tego rozkładu (FWHM) wzrasta z liczbą atomową od $Z = 2$ do 20, po czym stopniowo maleje. Zmiany kształtu (szerokości) rozkładu energii emitowanych fotonów są rezultatem, po pierwsze, oddziaływania coulombowskiego elektron-elektron, które zmniejsza szerokość rozkładu dla $Z < 20$ oraz, po drugie, efektów relatywistycznych, które z kolei zmniejszają jego szerokość dla $Z > 20$ (patrz rysunek). Ten wyraźny wpływ oddziaływania elektron-elektron dla małych Z oraz efektów relatywistycznych dla dużych Z pozwala na jednoznaczny eksperymentalny test przewidywań teoretycznych opisujących He-podobne jony.

Pierwszy eksperyment umożliwiający dokładny pomiar rozkładu energii fotonów dla dużych Z został przeprowadzony w zeszłym roku dla He-podobnych jonów uranu gromadzonych i chłodzonych w pierścieniu akumulacyjnym ESR w GSI Darmstadt. W eksperymencie tym zastosowano całkowicie nową technikę pomiaru przejść dwufotonowych w której He-podobne jony uranu, wzbudzone do stanu $2s$, były wytwarzane poprzez selektywną jonizację powłoki K w Li-podobnych jonach. Technika ta pozwoliła na bardzo wydajny oraz wolny od tła pomiar przejść dwufotonowych w He-podobnym uranie, a tym samym pierwszy test przewidywań teoretycznych dla wysokich Z .

Zmierzona w eksperymencie zredukowana szerokość rozkładu dwufotonowego przejścia $2^1S_0 \rightarrow 1^1S_0$ w He-podobnym uranie okazała się zgodna z obliczeniami relatywistycznymi, potwierdzając tym samym przewidziane teoretycznie zmniejszanie się szerokości tego rozkładu na skutek efektów relatywistycznych.



¹Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI), Darmstadt, Niemcy

²Instytut Fizyki im. M. Smoluchowskiego, Uniwersytet Jagielloński, Kraków

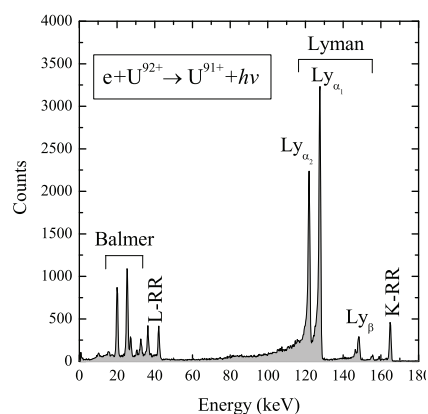
Radiacyjna rekombinacja jonów uranu U^{92+} z elektronami swobodnymi

M. Pajek, D. Banaś, M. Czarnota, J. Szlachetko, Th. Stöhlker¹, A. Gumberidze¹,
A. Orsic-Muthig¹, U. Spillmann¹, R. Reusch¹, S. Tachenow¹, D. Sierpowski² i A. Warczak²

Przeprowadzone dotąd eksperymenty, w których badano proces rekombinacji jonów z elektronami pokazały, że zmierzone współczynniki rekombinacji radiacyjnej zgadzają się z przewidywaniami teoretycznymi tylko dla energii względnych wyższych niż temperatura poprzeczna wiązki elektronów kT_{\perp} , natomiast dla energii poniżej temperatury podłużnej kT_{\parallel} obserwowany jest istotny wzrost tych współczynników w stosunku do przewidywań teoretycznych. Jest to tzw. efekt „wzmocnienia” - zaobserwowany po raz pierwszy eksperymentalnie z gęstą tarczą elektronową w GSI i potwierdzony w wielu pierścieniach akumulacyjnych dla różnych jonów, aż do całkowicie obdartego uranu U^{92+} .

W większości tych eksperymentów jony, które wychwyciły elektron wskutek radiacyjnej rekombinacji były separowane od zgromadzonej w pierścieniu wiązki za pomocą magnesu dipolowego umieszczonego zaraz za strefą oddziaływania jonów z elektronami i mierzone za pomocą detektora cząstek. Taka technika, jeśli zostanie zastosowana do zerowych energii względnych, pozwala jedynie na pomiar jonów, które wychwyciły elektron w wyniku radiacyjnej rekombinacji, nie umożliwia natomiast identyfikacji stanu, do którego ten elektron został wychwycony.

W 2004 roku został przeprowadzony pierwszy eksperyment dla energii względnych 0-1000 meV, w którym możliwa była jednoznaczna identyfikacja stanów elektronowych rekombinujących jonów poprzez pomiar promieniowania rentgenowskiego emitowanego w procesie bezpośredniej radiacyjnej rekombinacji lub dalszej deekscytacji stanów wzbudzonych. W eksperymencie tym badano rekombinację radiacyjną całkowicie zjonizowanych jonów uranu o energii 23 MeV/u, gromadzonych w pierścieniu akumulacyjnym ESR (GSI Darmstadt) i chłodzonych w chłodnicy elektronowej, która jednocześnie służyła za tarczę elektronową. W eksperymencie mierzono jednocześnie fotony promieniowania rentgenowskiego będące skutkiem bezpośredniej rekombinacji do niskich stanów elektronowych ($n = 1,2$) tzn. K-RR oraz L-RR oraz linie serii Lymana i Balmera, które są rezultatem kaskadowej deekscytacji następującej po wychwycie elektronów do wysokich stanów elektronowych (patrz rys.). Z intensywności linii K-RR i L-RR wyznaczono współczynniki rekombinacji do stanów $1s_{1/2}$, $2s_{1/2}$, $2p_{1/2}$, $2p_{3/2}$, natomiast intensywności linii Lymana i Balmera okazały się bardzo dobrym narzędziem do badania procesu rekombinacji dla wysokich stanów rydbergowskich. Eksperyment ten umożliwił więc, po raz pierwszy, badanie efektu „wzmocnienia” rekombinacji jonów dla szerokiego zakresu stanów elektronowych i energii względnych, dając tym samym unikalną możliwość lepszego zrozumienia procesu radiacyjnej rekombinacji jonów z elektronami.



Widmo promieniowania rentgenowskiego zmierzone dla zerowej energii względnej przez detektor umieszczony pod kątem 0°

¹Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI), Darmstadt, Niemcy

² Instytut Fizyki, Uniwersytet Jagielloński, Kraków

Wielokrotna jonizacja powłok L i M pierwiastków o średnim Z w zderzeniach z jonami tlenu

*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. Stabkowska³ i J. Hoszowska⁴*

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. Opisany eksperyment został przeprowadzony w Instytucie Paula Scherrera (PSI) w Villigen w Szwajcarii. Używając wiązek jonów tlenu o energii 279 MeV oraz neonu o energii 178 MeV zmierzono widma linii $L\alpha_{1,2}$ ($L_3M_{4,5}$) oraz $L\beta_1$ (L_2M_4) dla Zr, Mo oraz Pd. Do pomiarów wykorzystano krystaliczny spektrometr typu von Hamosa o zdolności rozdzielczej 0,6 eV w mierzonym zakresie energii.

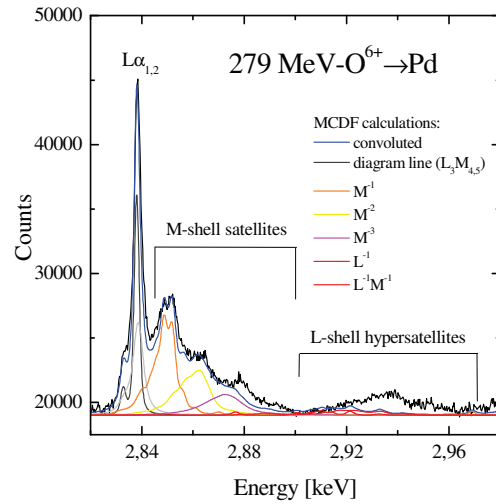
W celu oszacowania prawdopodobieństw wielokrotnej jonizacji wykorzystano dostępne obliczenia MCDF dla Zr, Mo i Pd. Użyto konfiguracji o maksymalnie trzech dziurach w powłoce M i jednej dziurze w powłoce L. Dla otrzymanych względnych intensywności poszczególnych linii sprawdzono, czy podlegają one rozkładowi dwumianowemu:

$$P_{N_i}(k_i) = \binom{N_i}{k_i} p_i^{k_i} (1-p_i)^{N_i-k_i},$$

gdzie: p_i – prawdopodobieństwo jonizacji powłoki N , k_i – ilość dziur w powłoce N .

Otrzymane dla powłok L i M prawdopodobieństwa wielokrotnej jonizacji wyniosły 5-8% dla powłoki L oraz 7-9% dla powłoki M. Stwierdzono, że otrzymane eksperymentalnie względne stosunki intensywności poszczególnych linii nie są zgodne z rozkładem dwumianowym. Otrzymane wyniki porównano również z wartościami obliczonymi na podstawie modelu geometrycznego, które dały wartości prawdopodobieństw jonizacji dla powłoki L – 10%, a dla powłoki M – 5%. Ponieważ do obliczeń nie włączono bardziej skomplikowanych konfiguracji, dla których nie były dostępne obliczenia MCDF, otrzymane wyniki należy traktować jako szacunkowe wyniki wstępne, obarczonych błędem ok. 25%.

W celu wyznaczenia dokładnych wartości prawdopodobieństw jonizacji powłok L i M dla mierzonych atomów o średnim Z, do dalszej analizy zostaną użyte obliczenia MCDF dla bardziej złożonych konfiguracji ($M^{-m}N^{-n}$) dziur w powłokach elektronowych.



Linia $L\alpha_{1,2}$ palladu ze strukturą satelitarną powłoki M i hipersatelitarną powłoki L wraz ze strukturami uzyskanymi na podstawie obliczeń MCDF.

¹Physics Department, University of Fribourg, Fribourg, Szwajcaria

²Instytut Problemów Jądrowych im. A. Soltana, Świerk-Owtock

³Wydział Chemii, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Toruń

⁴European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), Grenoble, Francja