

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 (1) fizyki zderzeń atomowych oraz (2) zastosowań spektroskopii rentgenowskiej w badaniu koncentracji pierwiastków śladowych.

1) Eksperymenty z zakresu fizyki zderzeń atomowych dotyczą głównie badania dynamiki 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.

2) Badania aplikacyjne z zakresu spektroskopii rentgenowskiej bazują na posiadanej lampie rentgenowskiej wraz z dodatkową aparaturą umożliwiającą stosowanie rentgenowskiej analizy fluorescencyjnej (XRF) oraz rentgenowskiej analizy fluorescencyjnej z całkowitym odbiciem zewnętrznym (TRXRF). Metody te pozwalają określać koncentrację pierwiastków śladowych na poziomie ppm-ppb, głównie dla celów medycznych i ekologicznych. Badania te prowadzone są we współpracy ze Świętokrzyskim Centrum Onkologii w Kielcach.

Zakład dysponuje następującą aparaturą:

Lampa rentgenowska (Siemens 3 kW, 60 kV), detektory promieniowania X Si(Li) (Canberra), spektrometr niskotłowy promieniowania γ Ge(Li), układ mikrowiązki promieniowania X

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 w Kyoto i Uniwersytet w Miyazaki, Japonia

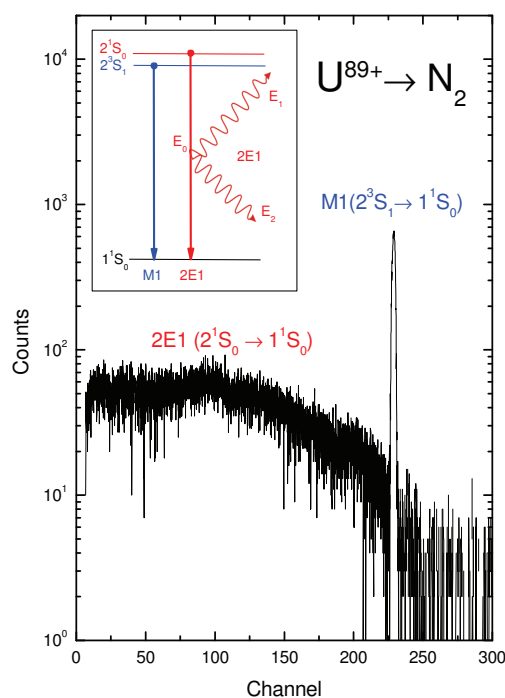
Badanie rozkładu energii dwufotonowego przejścia $2^1S_0 \rightarrow 1^1S_0$ w helopodobnym uranie

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

Silnie zjonizowane atomy ciężkich pierwiastków są specyficznymi układami atomowymi, w których korelacje między elektronami, efekty relatywistyczne i QED stają się bardzo istotne. W takich układach na skutek silnego pola kulombowskiego gwałtownie wzrasta rola efektów wewnątrzpowłokowych oraz prawdopodobieństwa przejść które w neutralnych atomach są zabronione, bądź bardzo słabe. Jednym z takich przejść jest rozpad dwufotonowy stanu 2^1S_0 w helopodobnym uranie. W procesie tym przejście między dwoma stanami ($2^1S_0 \rightarrow 1^1S_0$) może zachodzić jedynie przez równoczesną emisję dwóch fotonów. Suma energii tych fotonów jest zawsze równa różnicy energii stanów biorących udział w przejściu, a energie pojedynczych fotonów tworzą ciągły rozkład z maksimum w połowie całkowitej energii przejścia. Rozpad jednofotonowy w tym przypadku jest silnie wzbroniony przez zasadę zachowania momentu pędu, ponieważ początkowy i końcowy stan elektronu mają moment pędu równy zero, podczas gdy emitowany foton ma spin równy jeden.

Niedawno na pierścieniu akumulacyjnym ESR w GSI Darmstadt został przeprowadzony eksperyment w którym badano proces jonizacji powłoki K w zderzeniach litopodobnego uranu o energii 378 MeV/amu z tarczą gazową N_2 . Zaskakującym rezultatem była silna selektywność procesu jonizacji w takich układach, objawiająca się dużym prawdopodobieństwem jonizacji elektronu w stanie $1s$ połączonym z bardzo małym prawdopodobieństwem jednoczesnego wzbudzenia elektronu w stanie $2s$. Sелеktywność ta powoduje, że w Li-podobnym atomie elektron $2s$ pozostaje praktycznie niezaburzony w czasie jonizacji powłoki K tego atomu. W zderzeniu populowane są więc helopodobne atomy z jednym elektronem wzbudzonym do stanu 2^1S_0 lub 2^3S_1 . Pomiar promieniowania X emitowanego przy przejściu tych atomów do stanu podstawowego pozwala nam badać mechanizm populacji takich układów oraz daje unikalną możliwość pomiaru niezaburzonego rozkładu energii dwufotonowego przejścia $2E1$ ($2^1S_0 \rightarrow 1^1S_0$) w helopodobnym uranie.

Rezultatem eksperymentu są zmierzone po raz pierwszy (patrz rys.) rozkłady energii dwufotonowego przejścia $2E1$ w helopodobnym uranie. Kształt tych rozkładów, który jest silnie modyfikowany przez efekty relatywistyczne, okazał się być zgodny z relatywistycznymi obliczeniami Derevianko i Johnsona. Jest to, jak dotąd jedyny, precyzyjny test przewidywań teoretycznych w wysokim zakresie Z .



¹Gesellschaft für Schwerionenforschung, Darmstadt, Germany

²Institute of Physics, Jagiellonian University, Cracow, Poland

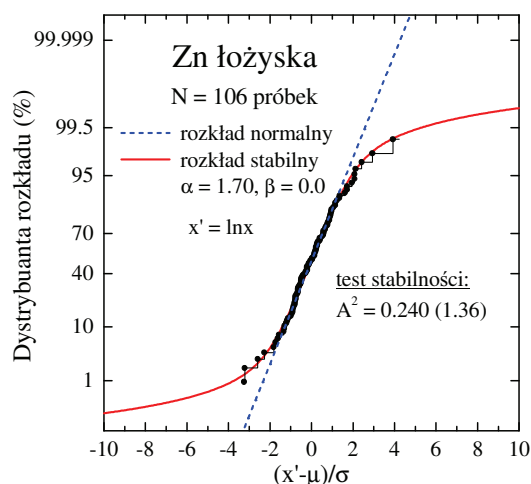
Log-stabilne rozkłady koncentracji pierwiastków w próbkach medycznych

A. Kubala-Kukuś, J. Braziewicz i M. Pajek

W prowadzonych badaniach podjęto problem wykorzystania rentgenowskiej analizy fluorescencyjnej do badania rozkładów koncentracji pierwiastków śladowych w różnorodnych próbkach medycznych. Do wyznaczenia koncentracji pierwiastków w próbkach wykorzystywane były dwie metody rentgenowskiej analizy fluorescencyjnej: metoda XRF oraz metoda TXRF. Celem prowadzonych badań jest badanie wpływu zanieczyszczenia środowiska na poziom pierwiastków śladowych w organizmie ludzkim, a także poszukiwanie zależności między koncentracją pierwiastków w tkankach nowotworowych a stopniem zdegenerowania tych tkanek.

W oparciu o systematyczne pomiary koncentracji pierwiastków śladowych w próbkach medycznych (surowica, krew, mocz, łożyska, tkanki nowotworowe płuc, tarczycy) pokazano, że rozkłady koncentracji pierwiastków śladowych w tych próbkach opisane są symetrycznymi rozkładami log-stabilnymi, przy czym dla większości rozkładów parametr α rozkładu stabilnego był równy dwa ($\alpha=2.0$), co odpowiada szczególnemu przypadkowi rozkładu log-stabilnego, mianowicie rozkładowi log-normalnemu. Jednakże, dla istotnej części analizowanych rozkładów, około 10-20% przypadków, estymowany indeks stabilności α był znacząco mniejszy od 2. Kolejnym etapem prowadzonych badań było przyjęcie hipotezy o symetryczności transformowanych rozkładów koncentracji. W celu sprawdzenia tej hipotezy, w pierwszej kolejności dla wszystkich rozkładów dokonano estymacji parametrów przy założeniu, że rozkład stabilny $S_{\alpha}(\mu, \sigma, \beta)$ jest asymetryczny ($\beta \neq 0$), a następnie zakładając, że rozkłady są symetryczne ($\beta=0$). W badaniach opracowano metody umożliwiające testowanie statystyczne rozkładów stabilnych przy wykorzystaniu testu Andersona-Darlinga (A^2), a nieznanne wartości krytyczne tego testu dla rozkładów stabilnych zostały obliczone metodą Monte Carlo. Test A^2 potwierdził, na poziomie ufności 95%, że rozkłady koncentracji pierwiastków w próbkach medycznych są symetrycznymi rozkładami log-stabilnymi.

Log-stabilny charakter rozkładów koncentracji wskazuje, że proces akumulacji pierwiastków śladowych w próbkach medycznych może być interpretowany jako losowy proces multiplikacyjny generowany przez losowe impulsy podlegające rozkładowi stabilnemu. Z praktycznego punktu widzenia opisanie rozkładów koncentracji pierwiastków w próbkach medycznych rozkładami log-stabilnymi oznacza dużo większe niż w przypadku rozkładu log-normalnego prawdopodobieństwo pojawiania się dużych wartości koncentracji. Własność taka może mieć szczególne znaczenie w badaniach medycznych, gdzie w standardowo przyjętych procedurach przekroczenie norm koncentracji pierwiastka może być indykacją choroby.



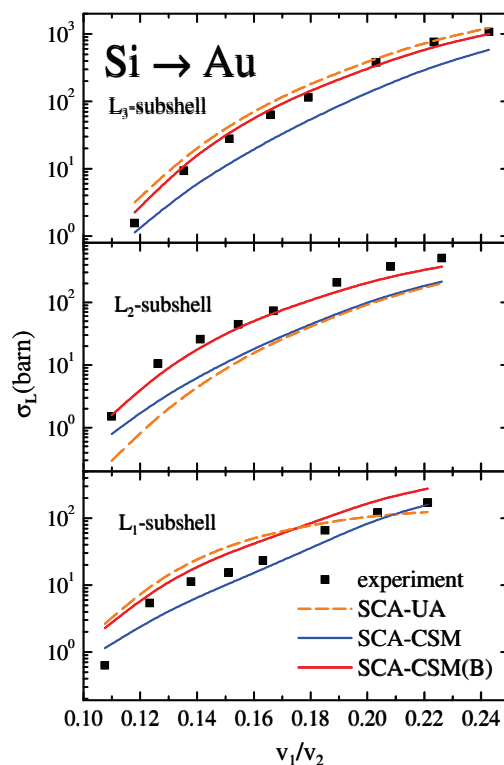
Przykład α -stabilnego rozkładu logarytmicznie transformowanych koncentracji cynku w próbkach łożysk, analizowanych metodą TXRF. Na rysunku podano wartość statystyki testowej oraz podaną w nawiasach wartość krytyczną testu A^2 .

Jonizacja powłoki L w zderzeniach atomów z ciężkimi jonami: rola sprzężeń międzypowłokowych i zmiany energii wiązania

M. Pajek, D. Banaś, J. Braziewicz, M. Czarnota, U. Majewska, J. Semaniak, I. Fijał¹,
M. Jaskóła¹, A. Korman¹, W. Kretschmer², D. Trautmann³, T. Mukoyama⁴

Zjawisko jonizacji powłoki L atomów w zderzeniach z cząstkami naładowanymi bada się poprzez obserwację promieniowania rentgenowskiego emitowanego ze wzbudzonych, zjonizowanych atomów. W przypadku ciężkich jonów, takich jak jony Si ($Z_1=14$) czy też S ($Z_1=16$), wielokrotna jonizacja atomów w wyższych powłokach (M, N, O) powoduje konieczność uwzględnienia efektów przesuwania i poszerzania obserwowanych linii charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego, co istotnie utrudnia interpretację wyników. Dodatkowo, należy uwzględnić możliwość zamykania w atomach wielokrotnie zjonizowanych silnych przejść Coster-Kroniga, Efekt ten wywołuje zmianę wydajności fluorescencyjnej oraz prawdopodobieństw przejść Coster-Kroniga, a więc parametrów niezbędnych do wyznaczenia przekrojów czynnych na jonizację powłoki L. W pracy pokazano, iż pomimo uwzględnienia diskutowanych efektów na gruncie zaproponowanego modelu statystycznego, otrzymane przekroje czynne na jonizację powłoki L jonami Si i S pozostają w silnej rozbieżności z przewidywaniami obliczeń półklasycznych (SCA) wykonanych w przybliżeniu „połączonych atomów” (UA). Porównanie wyników eksperymentalnych z przewidywaniami teorii SCA-UA pokazano na rysunku.

Obserwowane rozbieżności spowodowane są m.in. istnieniem sprzężeń międzypowłokowych nie uwzględnianych w teorii SCA. Efekt ten, jak pokazano wcześniej w przypadku zderzeń atomów z jonami O ($Z_1=8$), odgrywa istotną rolę dla powłoki L i może być on uwzględniony w ramach modelu sprzężonych podpowłok (CSM) rozwiniętego przez Mukoyamę. Jednak, jak pokazujemy w obecnej pracy, zmodyfikowane obliczenia SCA-CSM wciąż nie opisują dobrze wyników dla cięższych jonów Si i S. Dodatkowo należy uwzględnić efekt saturacji poprawki opisującej zwiększoną energię wiązania elektronu w momencie zderzenia, przyjmując jej maksymalną dopuszczalną wartość odpowiadającą skrajnemu przypadkowi „połączonych atomów”. Tak zmodyfikowane obliczenia, nazwane SCA-CSM(B) są w znacznie lepszej zgodności z wynikami eksperymentalnymi.



¹ Instytut Problemów Jądrowych im. A. Sołtana, Świerk,

² Physikalisches Institut, Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, Germany

³ Institute of Theoretical Physics, University of Basel, Basel, Switzerland

⁴ Kansai Gaidai University, Hirakata, Osaka, Japan