

## ZAKŁAD FIZYKI ATOMOWEJ

### **Skład osobowy**

Dr hab. Marek Pajek – kierownik zakładu, dr hab. Janusz Braziewicz,  
dr hab. Sławomir Chojnacki, dr Ewa Braziewicz, dr Jacek Semaniak, mgr Dariusz Banaś,  
mgr Uruszuła Majewska, mgr Aldona Kubala-Kukuś, mgr Józef Antosik, mgr Marek Detka,  
mgr inż. Ewa Kacak

### **Tematyka badawcza**

Działalność naukowa zakładu dotyczy fizyki zderzeń atomowych (1) oraz zastosowań spektroskopii rentgenowskiej (2) 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 oraz jonów molekularnych z elektronami swobodnymi przy użyciu chłodzonych wiązek jonów w pierścieniu akumulacyjnym. Badanymi procesami są tu: rekombinacja radiacyjna (RR), rekombinacja dwuelektronowa (DR), rekombinacja trójciałowa (TBR) i rekombinacja dysocjatywna jonów molekularnych (MDR). Eksperymenty rekombinacyjne są prowadzone we współpracy z Laboratorium Manne Siegbahna Uniwersytetu w Sztokholmie przy wykorzystaniu pierścienia akumulacyjnego CRYRING.

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  $\gamma$  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

Uniwersytet w Sztokholmie, Szwecja

Uniwersytet we Fribourgu i Uniwersytet w Basel, Szwajcaria

Instytut Paula Scherrera (PSI) w Villigen, Szwajcaria

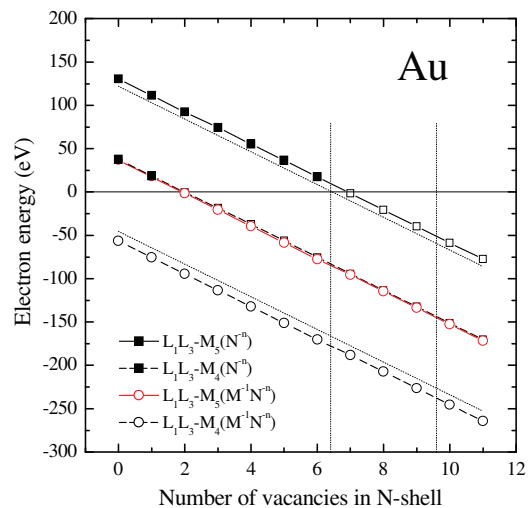
Uniwersytet w Kyoto i Uniwersytet w Miyazaki, Japonia

## Przekroje czynne na jonizację powłoki L Przejścia Costera-Kroniga w wielokrotnie zjonizowanych atomach złota

*D. Banaś, J. Braziewicz, M. Pajek, J. Semaniak, T. Czyżewski<sup>1</sup>, M. Jaskóła<sup>1</sup>,  
W. Kretschmer<sup>2</sup>, T. Mukoyama<sup>3</sup> i D. Trautmann<sup>4</sup>*

Podstawowym mechanizmem jonizacji wewnętrznych powłok atomowych w asymetrycznych ( $Z_{\text{pocisku}} \ll Z_{\text{tarczy}}$ ) zderzeniach jon-atom jest jonizacja kulombowska. Polega ona na wzbudzeniu elektronu tarczy ze stanu związanego do kontinuum na skutek oddziaływania z polem kulombowskim pocisku. Teoretycznie proces jonizacji można opisać w ramach przybliżenia Borna z falami płaskimi (PWBA) lub przybliżenia półklasycznego SCA. Podejścia te, z uwzględnieniem poprawek na efekty wyższych rzędów, dobrze opisują jonizację wywołaną lekkimi cząstkami naładowanymi. W przypadku jonizacji ciężkimi jonami obserwuje się istotne rozbieżności pomiędzy danymi eksperymentalnymi, a przewidywaniami teoretycznymi.

Celem przeprowadzonych pomiarów było wyznaczenie przekrojów czynnych na jonizację powłoki L złota wywołaną jonami tlenu. W analizie zmierzonych widm uwzględniono przesunięcie i poszerzenie linii rentgenowskiej wskutek wielokrotnej jonizacji atomu. Jedną z przyczyn obserwowanych rozbieżności jest nie uwzględniany dotąd wpływ wielokrotnej jonizacji na parametry atomowe. Dodatkowe dziury w zewnętrznych powłokach atomowych M i N modyfikują prawdopodobieństwa i szerokości przejść radiacyjnych, Augera i Coster-Kroniga. Parametry atomowe zmieniają się w zakresie 5-15%. Istnieje jednak również znacznie silniejszy efekt, który może modyfikować te parametry nawet dwukrotnie. Wielokrotna jonizacja prowadzi bowiem do zmiany energii wiązania poziomów, w przybliżeniu, proporcjonalnie do liczby dziur w zewnętrznych powłokach atomowych. Zmiana energii wiązania sprawia, że niektóre przejścia bezpromienne stają się wzbronione. Jest to szczególnie istotne dla pierwiastków z zakresu  $Z=77-92$ , dla których, już dla konfiguracji jednodziurowej, obserwuje się silną zmianę parametrów atomowych wskutek zamykania lub otwierania się przejść Costera-Kroniga. W przypadku złota wpływ wielokrotnej jonizacji na przejścia Costera-Kroniga jest związany z zamykaniem się silnego przejścia  $L_1L_3-M_{4,5}$ , co prowadzi do silnej modyfikacji parametrów atomowych, w szczególności, do prawie dwukrotnej zmiany wydajności fluorescencyjnej dla powłoki  $L_1$ .



Obliczone energie elektronów dla satelitów  $L_1(N^n)$ - $L_3M_{4,5}(N^n)$  i  $L_1(M^1N^n)$ - $L_3M_{4,5}(M^1N^n)$  przejścia Coster-Kroniga  $L_1L_3-M_{4,5}$  w złocie, wykreślone w funkcji liczby dziur w powłoce N. Przejścia dla których obliczona energia elektronu jest ujemna (otwarte symbole) są energetycznie wzbronione. Powierzchnia zaznaczona przez przerywane linie pokazuje obliczony zakres średniej energii elektronów Coster-Kroniga w wielokrotnie zjonizowanym atomie złota.

<sup>1</sup> Soltan Institute for Nuclear Studies, 05-400 Otwock-Świerk, Poland

<sup>2</sup> Physikalisches Institut, Universität Erlangen-Nürnberg, D-91058 Erlangen, Germany

<sup>3</sup> Kansai Gaidai University, Hirakata, Osaka, Japan

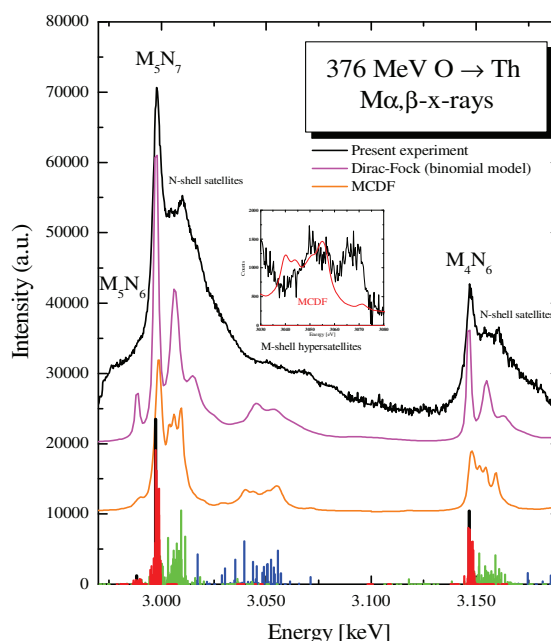
<sup>4</sup> Institute of Theoretical Physics, University of Basel, CH-4056 Basel, Switzerland

## Pomiary struktury satelitarnej promieniowania X serii L i M wzbudzonego w zderzeniach jonów O i Ne z ciężkimi atomami

*M. Czarnota, M. Pajek, D. Banaś, D. Chmielewska<sup>1</sup>, J. Rządkiwicz<sup>1</sup>, Z. Sujkowski<sup>1</sup>,  
M. Polasik<sup>2</sup>, J.-Cl. Dousse<sup>3</sup>, M. Berset<sup>3</sup>, Y.-P. Maillard<sup>3</sup>, P.-A. Raboud<sup>3</sup>,  
O. Mauron<sup>3</sup> i J. Hoszowska<sup>4</sup>*

Promieniowanie rentgenowskie emitowane w zderzeniach ciężkich jonów z atomami niesie informacje o wielokrotnej jonizacji zewnętrznych powłok atomowych, ponieważ energia przejść rentgenowskich zależy od konfiguracji elektronowej w momencie emisji promieniowania rentgenowskiego, czyli od liczby dziur w powłokach atomowych. Emitowane w takich warunkach promieniowanie X tworzy strukturę satelitarną, która odpowiada możliwym konfiguracjom elektronowym w zjonizowanym atomie.

Przeprowadzone badania dotyczyły pomiaru struktury satelitarnej promieniowania X serii L wzbudzonego jonami O o energiach 376 i 279 MeV oraz Ne o energii 178 MeV na tarczach z Zr, Mo i Pd oraz promieniowania serii M wzbudzonego tymi samymi jonami na tarczach z Pt i Th. Do pomiarów wykorzystano krystaliczny spektrometr refleksyjny Von Hamosa zainstalowany na wiązce jonów cyklotronu Philipsa w Instytucie Paula Scherrera w Villigen. Dzięki wysokiej zdolności rozdzielczej spektrometru (poniżej 1 eV) w zmierzonych widmach po raz pierwszy zaobserwowano strukturę hipersatelitarną przejść serii L oraz M. Zmierzone widma porównano z teoretycznymi uzyskanymi na podstawie uśrednionych obliczeń Diraca-Focka, przy założeniu o dwumianowym rozkładzie intensywności linii satelitarnych w oraz z widmami uzyskanymi w oparciu o wielokonfiguracyjne, relatywistyczne obliczenia Diraca-Focka (MCDF) dla stanów jedno-dziurowych. Stwierdzono, że uśrednione obliczenia Diraca-Focka o dwumianowym rozkładzie intensywności linii nie wystarczają do opisu bogatej struktury widm. Rachunki MCDF dobrze odwzorowują strukturę zmierzonych widm, jednakże wymagają one obliczeń dla konfiguracji wielodziurowych. Precyzyjna kalibracja energetyczna zmierzonych widm (z błędem na poziomie 0.4 eV) pozwoli na ich systematyczne porównanie z wynikami obliczeń MCDF.



Zmierzone widmo serii M, linie  $M_5N_7$  i  $M_4N_6$  Th z widoczną strukturą hipersatelitarną powłoki M (mniejszy rysunek) oraz satelitarną powłoki N wraz z teoretycznym rozkładem linii satelitarnych wynikającym z rozkładu dwumianowego i obliczeń w ramach MCDF.

<sup>1</sup>Instytut Problemów Jądrowych, Świerk,

<sup>2</sup>Uniwersytet im. M. Kopernika, Toruń,

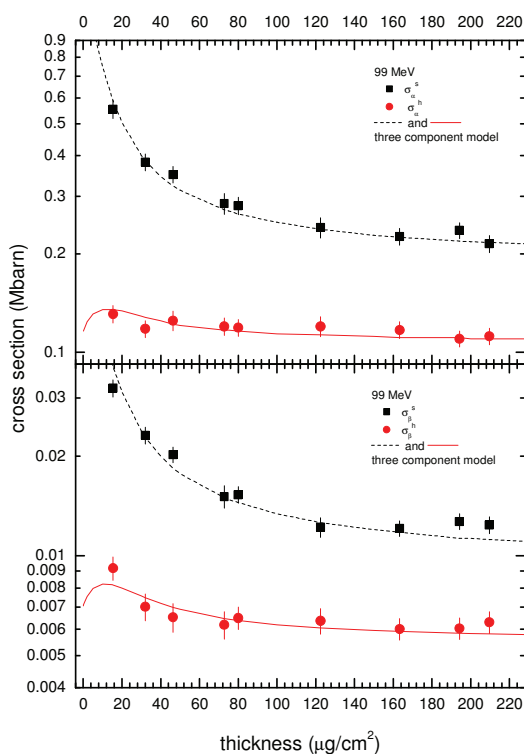
<sup>3</sup>Uniwersytet we Fryburgu, Szwajcaria,

<sup>4</sup>European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), Grenoble, Francja

## Badanie procesów jonizacji pocisków S o energiach 9.6-122 MeV w zderzeniach z atomami węgla

*U. Majewska, K. Słabkowska<sup>1</sup>, M. Polasik<sup>1</sup>, J. Braziewicz, D. Banaś, T. Czyżewski<sup>2</sup>,  
I. Fijał<sup>2</sup>, M. Jaskóła<sup>2</sup>, A. Korman<sup>2</sup>, S. Chojnacki i W. Kretschmer<sup>3</sup>*

Przy użyciu detektora półprzewodnikowego Si(Li) zarejestrowano linie satelitarne, hipersatelitarne i linie REC, odpowiadające promieniowaniu emitowanemu przez pocisk w stanie równowagi ładunkowej przechodzący przez tarczę z ciała stałego. Analiza otrzymanych widm pozwoliła określić przesunięcia energii linii satelitarnych i hipersatelitarnych w stosunku do energii tychże linii dla atomów jednokrotnie zjonizowanych oraz intensywności i stosunki intensywności tych linii. Dane te pozwoliły określić wielkość jonizacji powłoki K, ilość elektronów na powłoce L pocisku oraz na poziomach 3p i 4p, najbardziej prawdopodobne konfiguracje elektronowe (wg modelu MCDF) pocisku odpowiedzialne za emisję obserwowanych linii oraz przekroje czynne na produkcję promieniowania X z pocisku. Wykazano, że pocisk przechodzący przez użyte tarcze o grubościach 15-210  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  jest w stanie równowagi ładunkowej. Wykorzystując model 2- i 3-składnikowy wg Allisona pokazano, że na podstawie zależności produkcyjnych przekrojów czynnych od grubości tarczy (patrz rysunek) można określić wartość przekrojów czynnych na produkcję pierwszej i drugiej dziury w powłoce K pocisku, na wychwyt elektronu z tarczy do powłoki K pocisku z jedną dziurą i z dwoma dziurami oraz przekroje czynne na wypełnienie dziur w powłoce K z równoczesną emisją linii satelitarnych i hipersatelitarnych serii K. Udowodniono, że w pociskach siarki o 1, 2, 3, 4 elektronach obsadzone są poziomy 4p i 5p, choć w normalnym atomie siarki stany te nie są obsadzone.



<sup>1</sup> Wydział Chemii, UMK, Toruń

<sup>2</sup> Instytut Problemów Jądrowych, Warszawa

<sup>3</sup> Uniwersytet w Erlangen, Niemcy

## Badanie koncentracji pierwiastków śladowych w próbkach medycznych

U. Majewska, J. Braziewicz, D. Banaś, A. Kubala-Kukuś, M. Kucharzewski<sup>2</sup>,  
J. Waler<sup>1</sup>, S. Góździł<sup>1</sup> i J. Wudarczyk<sup>1</sup>

Określono koncentrację pierwiastków śladowych we krwi i tkance tarczycy pacjentów Śląskiej Akademii Medycznej oraz badano korelację pomiędzy zawartością tych pierwiastków w badanych próbkach a stanem chorobowym pacjenta. Szczególną uwagę poświęcono selenowi i cynkowi. Szukano odpowiedzi na pytanie, czy mogą one stać się markerami chorób tarczycy. Analizowane próbki krwi i tkanki tarczycy pobrane zostały od 71 kobiet w wieku 14-72 lat. 41 z nich było operowanych z powodu rozpoznanego klinicznie i potwierdzonego klinicznie wola guzkowego tarczycy, 21 z powodu raka tarczycy, a 18 – z chorobą Basedowa. Grupę kontrolną stanowiło 51 osób wybranych przypadkowo, deklarujących dobry stan zdrowia. Znaleziono następujące średnie zawartości Zn (w  $\mu\text{g/g}$ ) w badanych próbkach tarczycy i krwi:

Choroba	Tkanka tarczycy	Krew
Choroba Basedowa	41.7 $\pm$ 3.8	4.8 $\pm$ 0.7
Wole guzkowe	38.3 $\pm$ 2.8	6.3 $\pm$ 0.6
Rak tarczycy	23.1 $\pm$ 3.6	7.1 $\pm$ 0.8
Grupa kontrolna		5.8 $\pm$ 1.4

Jak widać koncentracje cynku w przypadku choroby Basedowa i wola tarczycy są statystycznie różne od koncentracji cynku w raku tarczycy na poziomie ufności 99.95%. Dla próbek krwi testy wykazały statystyczną różnicę pomiędzy zawartością cynku w raku tarczycy a chorobą Basedowa i w odniesieniu do grupy kontrolnej na poziomie ufności 99.95% oraz nie wykazały różnicy pomiędzy przypadkiem raka tarczycy a wolem guzkowym tarczycy. Uzyskane rezultaty sugerują, że cynk może stać się markerem chorób tarczycy.

Średnie zawartości Se (w  $\mu\text{g/g}$ ) w badanych próbkach tarczycy i krwi przedstawiają się następująco:

Choroba	Tkanka tarczycy	Krew
Choroba Basedowa	1.473 $\pm$ 0.378	0.476 $\pm$ 0.065
Wole guzkowe	1.487 $\pm$ 0.336	0.597 $\pm$ 0.059
Rak tarczycy	0.881 $\pm$ 0.107	0.572 $\pm$ 0.101

Statystycznie różne są koncentracje selenu we krwi w grupach: „choroba Basedowa” a „rak tarczycy” oraz „choroba Basedowa” a „wole guzkowe”, a w przypadku tkanki tarczycy test wykazał statystyczne różnice pomiędzy grupami: „choroba Basedowa” a „rak tarczycy” oraz „rak tarczycy” a „wole guzkowe”. Stwierdzone najniższe stężenie selenu w raku tarczycy jest zgodne z wcześniejszymi danymi. Badania norweskie wykazały mianowicie znacząco wyższą zapadalność na raka tarczycy u osób z niskim stężeniem selenu w surowicy krwi przed operacją. Potwierdza to ochronną rolę tego metalu w tarczycy, polegającą na jego wiązaniu przez białko tarczycy.

<sup>1</sup> Świętokrzyskie Centrum Onkologii w Kielcach

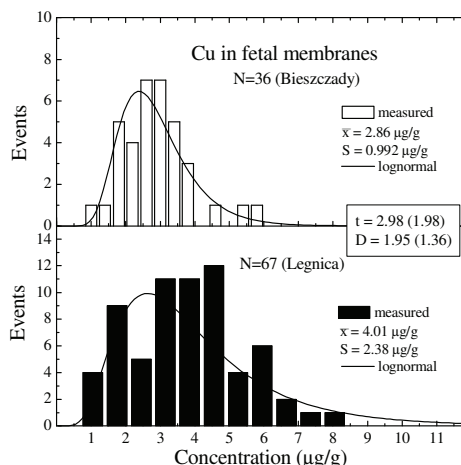
<sup>2</sup> Klinika Chirurgii, Śląska Akademia Medyczna w Bytomiu

## Badania porównawcze rozkładów koncentracji pierwiastków śladowych w próbkach łożysk i błon płodowych metodą TXRF

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

Metoda rentgenowskiej analizy fluorescencyjnej z całkowitym odbiciem wiązki padającej (TXRF) została wykorzystana do wyznaczenia koncentracji pierwiastków śladowych w próbkach łożysk (184) i błon płodowych (103). Próbki pochodziły od dwóch grup kobiet, mieszkających na obszarach o różnym stopniu zanieczyszczenia środowiska: w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym (region "zanieczyszczony") oraz w Bieszczadach (region "kontrolny"). Celem tych badań było znalezienie możliwych korelacji pomiędzy poziomem zanieczyszczenia środowiska, a budową i składem analizowanych próbek, głównie w aspekcie zawartości metali ciężkich.

W wyniku przeprowadzonych pomiarów określono w próbkach zawartość następujących pierwiastków: P, S, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, Ge, Se, Br, Rb, Sr, Hg i Pb, których koncentracje zawarte były w granicach od 10 ng/g do 5000 µg/g ( $\pm 15\%$ ). W celu znalezienia możliwych korelacji pomiędzy zawartością danego pierwiastka a zanieczyszczeniem obszaru, z którego pochodziła próbka dokonano analizy statystycznej rozkładów koncentracji pierwiastków w próbkach łożysk i błon płodowych. Po pierwsze dla rozkładów "obciętych" przez próg wykrywalności, tj. takich, dla których koncentracje pierwiastków nie są wyznaczone we wszystkich próbkach, odtworzono oryginalny rozkład stosując metodę rekonstrukcji rozkładów i otrzymując korekcję wartości średniej rozkładu od 5% do 50%. Następnie wykorzystano testy statystyczne Studenta i Kołmogorowa-Smirnowa na poziomie ufności 95% dla porównania rozkładów koncentracji pierwiastków dla obu rodzajów próbek i obszarów. Testy przeprowadzono dla przetransformowanych rozkładów ( $x' = \ln x$ ), zapewniając warunek normalności rozkładu konieczny w teście Studenta.



Rozkłady koncentracji miedzi w błonach płodowych wraz z wartościami statystyk: t (test Studenta) oraz D (test Kołmogorowa -Smirnowa).

W rezultacie przeprowadzonej analizy statystycznej stwierdzono statystycznie istotne różnice pomiędzy koncentracjami niektórych pierwiastków w próbkach z obszarów zanieczyszczonego i kontrolnego. Dla próbek łożysk stwierdzono większą zawartość Sr, Pb, K i mniejszą zawartość Se, Mn, Rb, Cr w obszarze "zanieczyszczonym". W próbkach błon płodowych zaobserwowano większą zawartość Mn, Cu i mniejszą zawartość Ge, Cr, Rb w obszarze "zanieczyszczonym".

Ostateczna interpretacja zaobserwowanych różnic koncentracji pierwiastków śladowych, w szczególności w aspekcie zmian patologicznych łożysk i błon płodowych, wymaga dodatkowych badań medycznych.

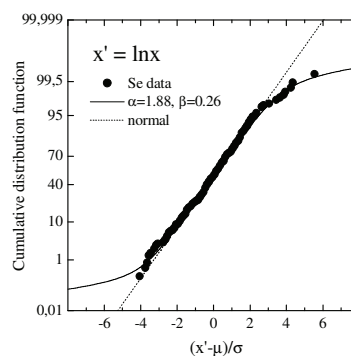
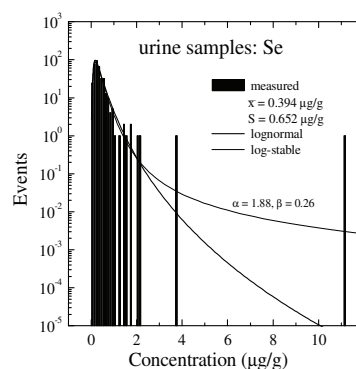
## Log-stabilny charakter rozkładów koncentracji pierwiastków śladowych w materiałach biomedycznych

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

Stosując metodę rentgenowskiej analizy fluorescencyjnej (XRF oraz TXRF) określono koncentrację pierwiastków śladowych w różnorodnych materiałach medycznych (krew, surowica, mocz, tkanki nowotworowe itp.). Badania te dotyczyły diagnostyki chorób nowotworowych, a także badania wpływu zanieczyszczenia środowiska na zawartość pierwiastków śladowych w tych materiałach. Dzięki dużej liczbie analizowanych próbek, populacje rzędu 50-400 próbek, pomiary umożliwiły szczegółową analizę statystyczną rozkładów koncentracji pierwiastków w próbkach biomedycznych. Zmierzone rozkłady, jak zostało pokazane wcześniej, w większości przypadków dobrze opisywane są rozkładem log-normalnym. Jednakże, dla kilku badanych pierwiastków zaobserwowano w obszarze dużych wartości koncentracji istotne rozbieżności w opisie rozkładu przez rozkład log-normalny. Pokazano, że zaobserwowane rozbieżności związane są z log-stabilną naturą rozkładów koncentracji pierwiastków śladowych. Rozkłady log-stabilne stanowią szerszą klasę cztero-parametrycznych rozkładów, których logarytm ma rozkład stabilny. Szczególnym przypadkiem rozkładu log-stabilnego jest rozkład log-normalny (parametr stabilności  $\alpha = 2$ ).

Jako przykład, na rysunku przedstawiony jest rozkład koncentracji Se w moczu, dla którego dokonano estymacji parametrów rozkładu log-stabilnego metodą największej wiarygodności (ML), otrzymując  $\alpha = 1.88$ . W celu weryfikacji hipotezy o log-stabilnej naturze rozkładu przeprowadzono test Andersona-Darlinga ( $A^2$ ), który, w przeciwieństwie do znanego testu zgodności Pearsona- $\chi^2$ , lepiej nadaje się do testowania kształtu rozkładu dla dużych odchyleń od wartości oczekiwanej rozkładu (tzw. "ogony" rozkładu). Test Andersona-Darlinga potwierdził na poziomie ufności 95% log-stabilność rozkładu koncentracji Se. Wartości krytyczne dla testu A-D zostały obliczone metodą Monte Carlo. W próbkach moczu rozkłady log-stabilne o parametrze  $\alpha < 2$  zaobserwowano również w przypadku rozkładów koncentracji S i Fe.

W rezultacie badań stwierdzono, że rozkłady koncentracji pierwiastków w próbkach biomedycznych opisane są rozkładami log-stabilnymi (przy czym najczęściej jest to rozkład log-normalny), a kształt rozkładów powiązany jest z naturą procesów akumulacji pierwiastków śladowych. Badania pokazały ponadto, że w celu analizowania roli rozkładów log-stabilnych należy badać większe populacje próbek (~1000).



Rozkład koncentracji Se w próbkach moczu wraz z krzywymi rozkładu log-normalnego i log-stabilnego (górny rysunek). Dystrybuanta empiryczna zlogarytmowanego rozkładu koncentracji wraz z dystrybuantami teoretycznymi rozkładów normalnego i stabilnego dla  $\alpha = 1.88$  (dolny rysunek).

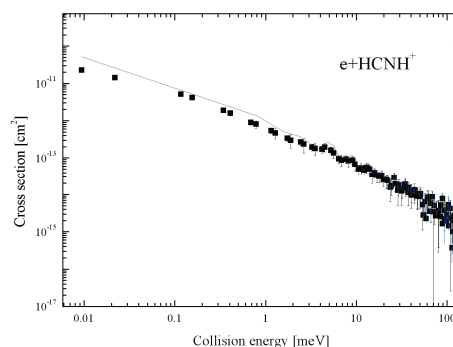
# Badanie zderzeń jonów molekularnych z elektronami swobodnymi

Jacek Semaniak

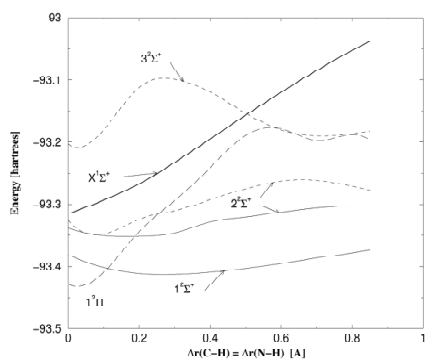
Badania zderzeń jonów molekularnych z elektronami swobodnymi mają na celu dostarczenie danych niezbędnych dla diagnostyki niskotemperaturowej plazmy występującej w obłokach międzygwiazdowych, jonosferach planet, obszarach brzegowych tokamaków itp. W tego typu ośrodkach jednym z głównych mechanizmów prowadzących do zmniejszenia koncentracji elektronów jest rekombinacja jonów molekularnych z elektronami, prowadząca do dysocjacji powstałej cząsteczki na neutralne elektrycznie fragmenty ( $AB^+ + e \rightarrow A + B$ ). Jest to proces odgrywający istotną rolę w syntezie mniej lub bardziej złożonych cząsteczek w warunkach, w których reakcje pomiędzy obojętnymi elektrycznie atomami lub cząsteczkami są wzbronione z uwagi na wysokie energie aktywacji.

Prace eksperymentalne obejmowały badanie: rekombinacji dysocjatywnej jonów  $HCNH^+$ ,  $C_2H_3^+$  oraz  $H_3^+$ , rezonansowego tworzenia par ( $AB^+ + e \rightarrow A^+ + B^-$ , jako konkurencyjnego w stosunku do rekombinacji dysocjatywnej procesu prowadzącego do wytworzenia pary jonów przeciwnie naładowanych) jonów  $HD^+$ ,  $H_3^+$  oraz dysocjację ujemnych jonów molekularnych  $CN^-$  w wyniku odłączenia elektronu w zderzeniach z elektronami swobodnymi. Eksperymenty prowadzono na wiązce ciężkojonowego pierścienia akumulacyjnego CRYRING w Laboratorium Manne Siegbahna w Sztokholmie.

Wykonano pomiary absolutnych przekrojów czynnych na dysocjatywną rekombinację jonów  $HCNH^+$ ,  $C_2H_3^+$  oraz  $H_3^+$  w zakresie energii poniżej 0.2 eV. Zmierzono prawdopodobieństwa dla różnych kanałów



Absolutne przekroje czynne na dysocjatywną rekombinację jonów  $HCNH^+$ .



Krzywe energii potencjalnej jonu i cząsteczki  $HCNH^+$ .

dysocjacji jonów  $HCNH^+$ ,  $C_2H_3^+$  dla energii 0 eV. Stwierdzono, że dominującym (7%) kanałem dysocjatywnej rekombinacji jonu  $HCNH^+$  jest  $HCN(HNC)+H$  (67%), oraz  $CN+H+H$  (33%). Modele gęstych obłoków międzygwiazdowych przewidują, że badana reakcja jest głównym źródłem cząsteczek HCN i HNC w tych ośrodkach. Dane eksperymentalne i obliczenia teoretyczne wskazują, że w dysocjatywnej rekombinacji tych jonów ważną rolę może odgrywać mechanizm rekombinacji nie wprost, poprzez serię stanów rydbergowskich związanych ze stanem podstawowym jonu  $X^1\Sigma^+$  co w efekcie prowadzi do dysocjacji cząsteczki wzdłuż stanów o symetrii  $1X^2\Sigma^+$  i  $2X^1\Sigma^+$ . Obliczenia teoretyczne wskazują na możliwość zachodzenia dysocjacji trzyciałowej w sposób bezpośredni (a nie jako następstwo wtórnej dysocjacji cząsteczki HCN lub HNC, powstającej w rozpadzie dwuciałowym) wzdłuż stanu  $2X^1\Sigma^+$ .

Zmierzono również absolutne przekroje czynne na odłączenie elektronu w zderzeniach jonów ujemnych  $F^-$  i  $CN^-$  w zderzeniach z elektronami swobodnymi w zakresie energii poniżej, odpowiednio, 40 eV i 60 eV.