

## ZAKŁAD FIZYKI ATOMOWEJ

### **Skład osobowy**

Dr hab. Marek Pajek – kierownik zakładu,  
dr hab. Janusz Braziewicz, dr hab. Sławomir Chojnacki, dr Dariusz Banaś,  
dr Uruszuła Majewska, mgr Marcin Czarnota, mgr Aldona Kubala-Kukuś,  
mgr Józef Antosik, 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  $\gamma$  Ge(Li), układ mikrowiązki promieniowania X

### **Zakład współpracuje z następującymi ośrodkami:**

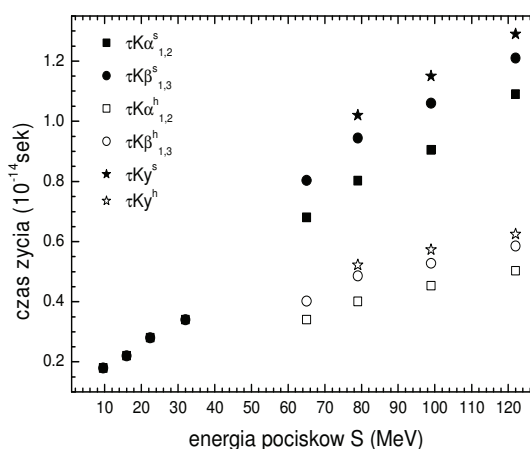
Instytut Problemów Jądrowych w Świerku  
Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów Uniwersytetu Warszawskiego w Warszawie  
Świętokrzyskie Centrum Onkologii w Kielcach  
Uniwersytet w Erlangen, Niemcy  
Instytut Ciężkich Jonów (GSI), Darmstadt, Niemcy  
Uniwersytet w Sztokholmie, Szwecja  
Laboratorium 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

## Dynamika procesów zachodzących w pociskach siarki o energiach 9.6 - 122 MeV penetrujących tarcze węglowe [5]

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

Jon szybko poruszający się w tarczy ciała stałego podlega wskutek oddziaływania z atomami tarczy wielu procesom - jonizacji zewnętrznych i wewnętrznych powłok atomowych, przeniesieniu elektronów na wyższe poziomy energetyczne, wychytowi elektronów z atomów ośrodka, bezpromienistej i promienistej deekscytacji. Emitowane przez taki jon charakterystyczne promieniowanie rentgenowskie niesie informację o owych procesach i o stopniu jonizacji jego powłok atomowych.

W eksperymentach przeprowadzonych w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Erlangen-Nurnberg w Niemczech i Środowiskowym Laboratorium Ciężkich Jonów w Warszawie użyto jonów siarki  $S^{q+}$  ( $q^+ = 4^+, 6^+, 7^+, 13^+$  i  $14^+$ ) o energiach 9.6, 16, 22.4, 32, 65, 79, 99 i 122 MeV, którymi bombardowano tarcze węglowe o grubości 15-210  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ . Za pomocą detektora półprzewodnikowego Si(Li) zarejestrowano widma charakterystycznego promieniowania X serii K siarki, w których rejestrowano i analizowano linie satelitarne  $K\alpha_{1,2}^s$  i  $K\beta_{1,3}^s$  oraz linie hipersatelitarne  $K\alpha_{1,2}^h$  i  $K\beta_{1,3}^h$  (dla energii jonów siarki od 32 MeV), będące wynikiem nałożenia przejść elektronowych typu  $1s^{-1} \rightarrow 2p^{-1}$  i  $1s^{-1} \rightarrow 3p^{-1}$  oraz  $1s^{-2} \rightarrow 1s^{-1}2p^{-1}$  i  $1s^{-2} \rightarrow 1s^{-1}2p^{-1}$ . Dla energii pocisków 79, 99 i 122 MeV zaobserwowano linię  $K\gamma^h$ , odpowiadającą przejściu typu  $1s^{-2} \rightarrow 1s^{-1}4p^{-1}$  i  $1s^{-2} \rightarrow 1s^{-1}5p^{-1}$ . Na podstawie intensywności zmierzonych linii określono przekroje czynne na produkcję promieniowania charakterystycznego X i przeanalizowano je w funkcji grubości tarczy. Wyniki tej analizy pozwoliły określić przekroje czynne na: i) produkcję jedno i dwudziurowych konfiguracji elektronowych w powłoce K jonu S, ii) deekscytację tych dziur poprzez promieniste i bezpromieniste przejścia elektronowe z powłok zewnętrznych, iii) wychyt elektronu tarczy. Stwierdzono, że w procesie tworzenia dziur w powłoce K istotną rolę pełnią procesy wzbudzenia elektronów z powłoki K pocisków do ich wyższych powłok, w szczególności L i M, oraz że w procesie deekscytacji dziur powłoki K ważny udział ma wychyt elektronów, które nie są związane z atomami tarczy węglowej. Wykazano, że jony siarki poruszające się w tarczy ciała stałego mają elektrony na podpowłokach 4p i 5p, czyli na podpowłokach, które w obojętnym atomie siarki nie są obsadzone. Oszacowano też średnie czasy życia dziur w powłoce K jonu siarki ze względu na przejścia satelitarne  $K\alpha_{1,2}^s$  i  $K\beta_{1,3}^s$  i hipersatelitarne  $K\alpha_{1,2}^h$  i  $K\beta_{1,3}^h$  (patrz rys.).



Czasy życia dziury w powłoce K ze względu na przejścia satelitarne i hipersatelitarne odpowiadające serii K promieniowania rentgenowskiego siarki.

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

<sup>2</sup>Uniwersytet Erlangen-Nurnberg, Niemcy

<sup>3</sup>Wydział Chemii Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń

## Koncentracja pierwiastków śladowych a stopień rozwoju zdegenerowanych komórek rakowych człowieka

*J. Braziewicz, St. Góźdz<sup>1</sup>, M. Kucharzewski<sup>2</sup> i U. Majewska*

Niektóre pierwiastki w organizmie człowieka odgrywają istotną rolę w procesach nowotworowych, chroniąc go przed rakowaceniem lub przeciwnie, przyspieszają te procesy. Celem badań jest znalezienie korelacji pomiędzy zawartością pierwiastków w różnego rodzaju tkankach człowieka (surowica, krew, tkanki organów) a stopniem zdegenerowania komórek rakowych u chorego pacjenta. Badaniom poddane zostały: krew i tkanki tarczycy pobrane od pacjentów z różnymi rodzajami chorób tarczycy (wole guzkowe tarczycy, rak tarczycy, choroba Basedowa) oraz tkanki jelita od pacjentów z nowotworem jelita (rak jelita grubego oraz polipy okrężnicy i odbytu). W próbkach tych określono zawartość miedzi, cynku i seleniu. Otrzymane wyniki poddano analizie statystycznej za pomocą testów t-Studenta oraz Snedecor-Fischera. W przypadku analizy krwi rezultaty porównano z wartościami uzyskanymi na podstawie badań grupy kontrolnej składającej się z osób, u których nie stwierdzono chorób tarczycy i jelit.

Cynk uczestniczy w metabolizmie węglowodanów, tłuszczów, białek oraz syntezie i degradacji kwasów nukleinowych; jest też kofaktorem enzymu dysmutazy nadtlenkowej, która zapobiega zapoczątkowaniu i progresji nowotworów poprzez ochronę komórek przed substancjami, które powodują tworzenie wolnych rodników. Selen jest integralną częścią enzymu peroksydazy glutationowej, która odgrywa ważną rolę w ochronie tkanki przed oksydacyjnym utlenianiem. Stwierdzono statystycznie istotne różnice w koncentracji Cu we krwi u pacjentów z chorobami tarczycy: najwyższą zawartość Cu zaobserwowano w przypadku raka tarczycy ( $2.02 \pm 0.23 \mu\text{g/g}$ ), a najniższą w grupie pacjentów z chorobą Basedowa ( $1.17 \pm 0.19 \mu\text{g/g}$ ). We wszystkich trzech chorobach poziom Cu był wyższy niż we krwi osób zdrowych ( $0.73 \pm 0.06 \mu\text{g/g}$ ). Analiza tkanek tarczycy wykazała najwyższą zawartość Cu w przypadku wola guzkowego tarczycy, a najniższą, podobnie jak we krwi, w grupie pacjentów z chorobą Basedowa. Statystyczną różnicę pomiędzy zawartością Zn we krwi znaleziono porównując przypadki: rak tarczycy - choroba Basedowa oraz rak tarczycy - grupa kontrolna. Nie została stwierdzona różnica pomiędzy przypadkiem raka tarczycy a wolem guzkowym tarczycy. W przypadku tkanki tarczycy koncentracje Zn w chorobie Basedowa i wole tarczycy są statystycznie różne od koncentracji cynku w raku tarczycy na poziomie ufności 99.95%. Zauważono interesującą zależność: w przypadku choroby Basedowa koncentracja Zn jest najwyższa w tkance tarczycy, a najniższa we krwi, natomiast w przypadku raka tarczycy jest odwrotnie: we krwi maksymalna, w tkance tarczycy minimalna. Statystycznie różne koncentracje Se we krwi stwierdzono w grupach: „choroba Basedowa” ( $0.48 \pm 0.07 \mu\text{g/g}$ ) a „rak tarczycy” ( $0.57 \pm 0.10 \mu\text{g/g}$ ) oraz „choroba Basedowa” a „wole guzkowe” ( $0.60 \pm 0.06 \mu\text{g/g}$ ), a w przypadku tkanki tarczycy statystyczne różnice znaleziono pomiędzy grupami: „choroba Basedowa” ( $1.47 \pm 0.38 \mu\text{g/g}$ ) a „rak tarczycy” ( $0.88 \pm 0.11 \mu\text{g/g}$ ) oraz „rak tarczycy” a „wole guzkowe” ( $1.48 \pm 0.34 \mu\text{g/g}$ ).

Uzyskane rezultaty sugerują, że cynk i miedź mogą stać się markerem chorób tarczycy. Stwierdzone najniższe stężenie seleniu w raku tarczycy potwierdza ochronną rolę tego pierwiastka, polegającą na wiązaniu go przez białko tarczycy

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

<sup>2</sup>Śląska Akademia Medyczna w Bytomiu

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

M. Czarnota, M. Pajek, D. Banaś, D. Chmielewska<sup>1</sup>, J. Rzadkiewicz<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. Hozowska<sup>4</sup>

Promieniowanie rentgenowskie emitowane w zderzeniach ciężkich jonów z atomami niesie informacje o wielokrotnej jonizacji zewnętrznych powłok atomowych (L, M, N i O), bowiem energia przejść rentgenowskich zależy od konfiguracji elektronowej w momencie emisji promieniowania rentgenowskiego, czyli od ilości „dziur” w powłokach atomowych. Emitowane w takich warunkach promieniowanie X tworzy strukturę satelitarną, która odpowiada możliwym konfiguracjom elektronowym w zjonizowanym atomie.

Analizowane były widma promieniowania X zmierzone z wykorzystaniem krystalicznego spektrometru refleksyjnego Von Hamosa zainstalowanego na wiązce jonów cyklotronu Philipsa w Instytucie Paula Scherrera w Villigen w Szwajcarii. Zastosowany spektrometr umożliwił uzyskanie wysokiej zdolności rozdzielczej (około 1 eV dla energii 3 keV). Zmierzono widma serii L dla Zr, Mo i Pd oraz serii M dla Th. Analiza widm opierała się na porównywaniu zmierzonych widm z widmami teoretycznymi otrzymanymi na podstawie wielokonfiguracyjnych, relatywistycznych obliczeń Diraca-Focka (MCDF). Przy opracowywaniu wyników pomiarów przyjęto założenie, że intensywności linii satelitarnych w widmie podlegają rozkładowi dwumianowemu. Ze względu na bardzo złożony charakter obliczeń strukturalnych MCDF, przeprowadzono analizę, wykorzystującą obliczenia MCDF dla konfiguracji zawierających do trzech dziur. Stwierdzono, bardzo dobrą zgodność widm zmierzonych z teoretycznymi w tym obszarze. Dla pełnego odtworzenia struktury satelitarnej zmierzonych widm potrzebne są jednak dalsze obliczenia MCDF dla konfiguracji z czterema i więcej dziurami.

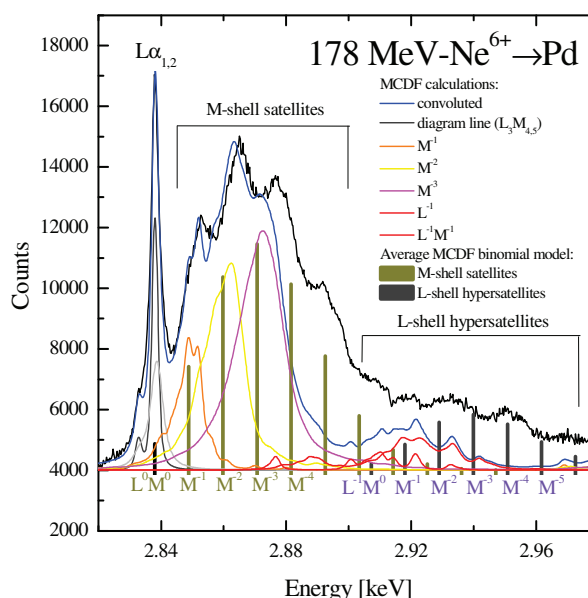
Badania prowadzone były we współpracy z Instytutem Problemów Jądrowych w Świerku, Uniwersytetem im. M. Kopernika w Toruniu oraz Uniwersytetem we Fryburgu i Instytutem Paula Scherrera (PSI) w Villigen w Szwajcarii.

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

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

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

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



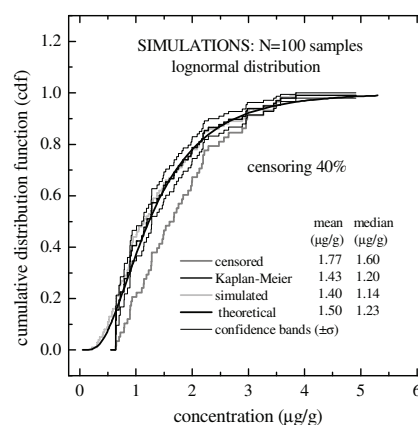
Zmierzone widmo linii  $L\alpha_{1,2}$  palladu z widoczną strukturą satelitarną oraz hipersatelitarną wraz z teoretycznym rozkładem intensywności linii satelitarnych uzyskany w oparciu o model dwumianowy (słupki) oraz strukturą wynikającą z obliczeń MCDF.

## Cenzurowanie w rentgenowskiej analizie fluorescencyjnej

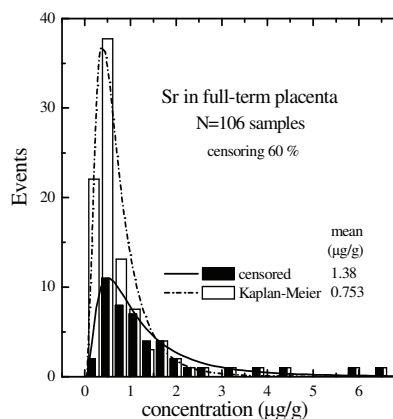
A. Kubala-Kukuś, J. Braziewicz i M. Pajek

Prowadzone badania dotyczyły zastosowań spektroskopii rentgenowskiej w badaniu rozkładów koncentracji pierwiastków śladowych w różnorodnych materiałach biomedycznych. Badania te mają charakter interdyscyplinarny, dotyczą zagadnień z pogranicza fizyki, medycyny i ochrony środowiska. W pomiarach koncentracji pierwiastków śladowych wykorzystuje się rentgenowską analizę fluorescencyjną (XRF) oraz rentgenowską analizę fluorescencyjną z całkowitym odbiciem wiązki padającej (TXRF). Celem tych badań jest poznanie natury rozkładów koncentracji pierwiastków śladowych, a także odtwarzanie rozkładów koncentracji w przypadkach kiedy koncentracja nie jest wyznaczana bezpośrednio w pomiarze, ze względu na wartość koncentracji poniżej progu wykrywalności metody.

W ostatnio prowadzonych badaniach zostało pokazane, że pomiary koncentracji pierwiastków śladowych w przypadku wartości koncentracji poniżej progu detekcji stanowią przykład losowego lewostronnego cenzurowania. Znane metody estymowania dystrybuanty dla danych losowo prawostronnie cenzurowanych (estymatory Kaplana-Meiera oraz Nelsona-Aalena) zostały odpowiednio zmodyfikowane dla danych cenzurowanych lewostronnie. Dokładność tych estymatorów (~5%) została sprawdzona w przeprowadzonych symulacjach Monte Carlo, obejmujących rozkłady log-normalne i log-stabilne (opisujące rozkłady koncentracji pierwiastków w materiałach biomedycznych) dla różnych liczebności próbek a także różnych poziomów cenzurowania (Rys. 1). Symulacje potwierdziły użyteczność omawianych estymatorów w analizie danych cenzurowanych. Rezultaty powyższe zostały następnie wykorzystane praktycznie do odtwarzania cenzurowanych rozkładów koncentracji pierwiastków śladowych w materiałach biomedycznych, badanych metodą rentgenowskiej analizy fluorescencyjnej (Rys. 2). Dyskutowane estymatory umożliwiły również statystyczną interpretację metody rekonstrukcji cenzurowanych rozkładów koncentracji, która to metoda została opracowana w sposób niezależny, bez uprzedniego wprowadzania koncepcji cenzurowania. Opracowano statystycznie poprawne metod porównywania cenzurowanych rozkładów koncentracji pierwiastków śladowych (log-rank test), co ma szczególne znaczenie dla porównywania koncentracji pierwiastków śladowych w różnych populacjach. W realizowanych badaniach rozwinięto również metody statystyczne umożliwiające testowanie statystyczne rozkładów log-stabilnych (z koniecznymi symulacjami Monte Carlo)



Rys.1 Cenzurowany rozkład koncentracji dla N=100 próbek, symulowany z rozkładu log-normalnego, dla 40% poziomu cenzurowania. Przedstawiano dystrybuanty rozkładów: teoretycznego, symulowanego, cenzurowanego i odtworzonego przy użyciu estymatora Kaplana-Meiera.



Rys.2 Cenzurowany rozkład koncentracji strontu (Sr) w próbkach łożysk porównany z rozkładem odtworzonym przy użyciu estymatora Kaplana-Meiera. Podano średnie wartości koncentracji.

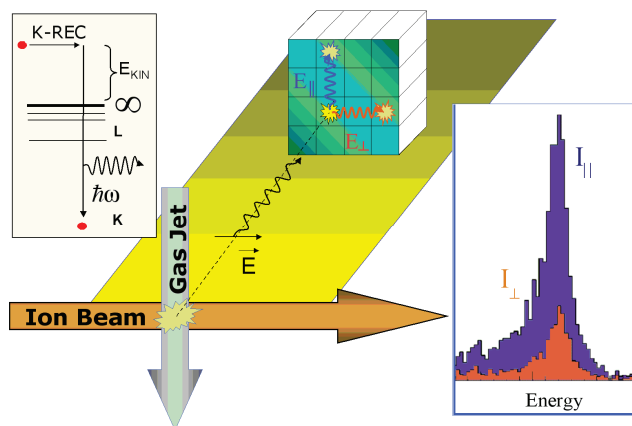
## Pomiar polaryzacji promieniowania rentgenowskiego emitowanego w relatywistycznych zderzeniach ciężkich jonów z atomami

*D. Banaś*

W zderzeniach ciężkich, całkowicie obdartych lub kilku-elektronowych jonów z lekkimi atomami dominującym procesem prowadzącym do emisji promieniowania rentgenowskiego jest wychwyty quasi-swobodnego elektronu tarczy do niezapełnionego stanu związanego pocisku czyli tzw. radiacyjny wychwyty elektronu (REC). Przeprowadzone dotychczas eksperymenty pokazały, że całkowity przekrój czynny na emisję REC maleje silnie z energią jonów, a intensywność emitowanego promieniowania zależy od kąta emisji. Ponadto, zgodnie z przewidywaniami teoretycznymi, promieniowanie emitowane w procesie radiacyjnego wychwyty elektronu powinno być spolaryzowane liniowo, a jego polaryzacja silnie zależy od energii jonów oraz kąta rejestracji.

W roku 2002 w GSI w Darmstadt został przeprowadzony pierwszy eksperyment na wiązce z pierścienia akumulacyjnego ESR, którego celem był pomiar stopnia polaryzacji promieniowania K-REC emitowanego w zderzeniu ciężkich, całkowicie obdartych jonów uranu o energii 400MeV/u z atomami azotu. W pomiarach wykorzystano fakt, że zgodnie z formułą Kleina-Nishiny, przez pomiar kąta rozproszenia fotonu w wyniku efektu Comptona można określić jego początkową polaryzację. Przy prędkościach relatywistycznych energia promieniowania emitowanego w procesie wychwyty elektronu do powłoki K (K-REC) w układzie laboratoryjnym mieści się zazwyczaj w zakresie od 50 do 500 keV, a więc efekt Comptona jest dominującym procesem zachodzącym w detektorze.

Do pomiaru wykorzystano pozycyjnie czuły segmentowy (4x4) detektor germanowy zamontowany pod kątem  $90^\circ$  w stosunku do kierunku wiązki (patrz rysunek). Tego typu detektor umożliwia określenie stopnia polaryzacji przez pomiar koincydencji między dwoma dowolnymi segmentami detektora, a tym samym wyznaczenie kąta rozproszenia fotonu. Pierwszy z segmentów mierzy energię elektronu Comptona, drugi natomiast energię rozproszonego fotonu. Fakt, że energia zdeponowana przez elektron jest zawsze mniejsza od energii fotonu pozwala jednoznacznie zidentyfikować segment, w którym nastąpiło rozproszenie. Analizując wszystkie możliwe kombinacje pikseli można precyzyjnie określić polaryzację mierzonych fotonów.



Na rysunku pokazano wstępne wyniki przeprowadzonego eksperymentu. Porównano zmierzoną intensywność promieniowania rozproszonego prostopadle i równoległe do osi wiązki. Wyniki jednoznacznie pokazują, że emitowane w procesie K-REC promieniowanie jest silnie spolaryzowane w płaszczyźnie reakcji.