

Recenzja pracy doktorskiej mgr. Michała Stepaniuka

p.t. „Badanie przemiany beta izotopów bromu o liczbach masowych od $A=87$ do $A=91$ z wykorzystaniem Modularnego Spektrometru Pełnej Absorpcji”

Rozprawa doktorska mgr. Michała Stepaniuka zawiera szczegółową analizę rozpadu beta jąder izotopów bromu - ^{87}Br , ^{88}Br , ^{89}Br , ^{90}Br , ^{91}Br oraz ^{91}Kr przyczyniając się do istotnej poprawy określenia intensywności tego rozpadu. Dzięki wykorzystaniu wyników pomiarów z zastosowaniem detektora pełnej absorpcji promieniowania gamma i beta - Modularnego Spektrometru Pełnej Absorpcji (MTAS) składającego się z 19 detektorów scyntylacyjnych NaI(Tl) dużych rozmiarów i dwóch segmentowanych detektorów krzemowych, ich analiza wniosła ważny wkład do uzupełnienia schematu rozpadu omawianych jąder. Uzyskane dzięki temu wyniki posłużyły do uściślenia energii uwalnianej w rozpadzie produktów rozszczepienia jąder, określonej ciepłem powyłączeniowym. Badania te umożliwiły także określenie dokładniejszego rozkładu energii antyneutrino emitowanych w rozpadzie β^- , a w rezultacie obliczenie całkowitego strumienia antyneutrino emitowanych z reaktorów jądrowych.

Praca doktorska p. Stepaniuka została wykonana w Zakładzie Fizyki Jądrowej IFD Uniwersytetu Warszawskiego, pod kierunkiem promotora prof. dr. hab. Marka Karnego, a jej wyniki są zawarte w opracowaniu liczącym 158 stron. Motywem przeprowadzonych badań eksperymentalnych w instytucie Oak Ridge National Laboratory z wykorzystaniem spektrometru pełnej absorpcji o prawie 100% wydajności dla promieniowania beta i gamma (MTAS) była między innymi rekomendacja listy nuklidów kluczowych dla obliczeń ciepła powyłączeniowego metodą pełnej absorpcji, zgłoszona przez roboczą grupę Nuclear Energy Agency. Z uwagi na to, że wymienione nuklidy bromu są emiterami opóźnionych neutronów, ważną motywacją badań było określenie odpowiedzi detektora MTAS na oddziaływanie z neutronami. Ta zbadana dodatkowa możliwość spektrometru wzbogaciła uzyskane dane jądrowe.

Przedstawione w rozprawie wyniki badań zostały opublikowane w dwóch czasopismach o zasięgu międzynarodowym, w których mgr Stepaniuk jest pierwszym autorem. Zaprezentował on również ustnie uzyskane wyniki na trzech międzynarodowych konferencjach, oraz trzykrotnie przedstawił plakaty także na międzynarodowych konferencjach. Wykazał więc dużą aktywność w rozpropagowaniu uzyskanych rezultatów badań.

Rozprawa zawiera wszystkie elementy potrzebne do przedstawienia, analizy i omówienia uzyskanych, nowych wyników badań będących jej przedmiotem. We *Wstępie* autor określa cel badań jakim było uściślenie schematu rozpadu β pięciu izotopów bromu i jednego kryptonu, w celu lepszego obliczenia średniej energii unoszonej przez promieniowanie beta i gamma, a także rozkładu energetycznego antyneutrin w rozpadzie. W efekcie dane te korygują wartość ciepła powyłączeniowego reaktorów oraz wprowadzają zmiany ilościowe oddziaływań antyneutrin z materią.

We *Wprowadzeniu* zdefiniowana jest energia rozpadu beta i wyjaśniony na schemacie rozpadu przypadek emisji neutronów opóźnionych towarzyszących temu rozpadowi. Określone zostaje prawdopodobieństwo emisji takich neutronów i konkurencyjna deekscytacja stanów powyżej energii wiązania neutronu poprzez emisję kwantu gamma. Przedstawione są formuły służące do obliczenia ciepła powyłączeniowego reaktora jądrowego, oraz zaprezentowane istniejące rozbieżności w funkcji czasu, między tym ciepłem wydzielanym w wyniku rozszczepienia ^{235}U , obliczonym w oparciu o dane jądrowe i eksperyment. Autor rozprawy wyjaśnia wpływ nierejestrowania wysokoenergetycznych fotonów gamma emitowanych po rozpadzie beta do wysoko wzbudzonych stanów jądra córki (emisja cząstek beta o niskiej energii) na bilans wydzielonego ciepła. Pokazuje także wagę wyznaczenia strumienia antyneutrin elektronowych w oparciu o uściślony schemat rozpadu beta, z zastosowaniem reakcji odwrotnego rozpadu beta, dla określenia składu paliwa jądrowego, a także do wyjaśnienia występowania tak zwanej anomalii antyneutrin reaktorowych.

W rozdziale *Układ eksperymentalny* bardzo ogólnie omawiany jest zastosowany w badaniach układ detekcyjny. Zabrakło na przykład informacji o polu powierzchni implantowanej aktywności na taśmie, czy o progu energetycznym rejestrowanych elektronów przez detektor Si po przeciwnej stronie taśmy. Nie ma także informacji o poziomie mierzonego tła.

W rozdziale *Analiza* Autor podkreśla, iż analizowano wyłącznie zdarzenia koincydencyjne pomiędzy sygnałem w detektorze krzemowym, który otwierał bramkę, a sygnałami rejestrowanymi przez pozostałe segmenty układu. Długość bramki była dobrana

tak, aby zarejestrować oprócz fotonów gamma także neutrony, opóźnione o czas rozpadu jądra, minimalizując jednocześnie koincydencje przypadkowe. Modułarna budowa spektrometru pozwalała na budowanie histogramów liczby zliczeń dla różnych konfiguracji modułów detektora w funkcji energii. W celu porównania widm doświadczalnych ze symulowanymi odpowiedziami detektora MTAS dla danego rozpadu w oparciu o dostępne dane jądrowe, Autor rozprawy zmodyfikował wykorzystywany wcześniej program komputerowy oparty na pakiecie Geant4, wprowadzając do niego szereg wymienionych w pracy poprawek. Natomiast program do analizy widm został napisany od nowa. W dalszej części pokazane są kolejne kroki prowadzące do uzyskania teoretycznej funkcji odpowiedzi spektrometru na dany rozpad. Następnym działaniem jest wprowadzenie do analizy quasi-poziomów w jądrze pochodnym w celu dopasowania widma symulowanego do eksperymentalnego. Obserwowaną rozbieżność przypisuje się nieuwzględnieniu w istniejących schematach rozpadu stanów o wysokiej energii wzbudzenia i słabym zasilaniu beta w rozpatrywanym obszarze widma. W dalszej części Autor omawia algorytmy dopasowania intensywności zasilania β pozwalające odtwarzać teoretyczną funkcję odpowiedzi, zgodną z doświadczalną w każdym kanale widma. W tym celu wprowadzona jest analiza koincydencyjna 2D pozwalająca otrzymywać histogramy zawierające informację o koincydencjach między wybranymi segmentami detektora. Następnie pokazana jest złożoność analizy widm z udziałem neutronów opóźnionych, gdyż jak podkreśla Autor „symulowana funkcja odpowiedzi na neutrony uzyskana przy pomocy pakietu Geant4 nie jest w pełni zgodna z eksperymentalną”. Znajomość oddziaływań neutronów z zastosowanym materiałem scyntylatorów pozwoliła na uwzględnienie w analizie odpowiednich poprawek w celu dopasowania widm symulowanych do uzyskanych eksperymentalnie. Rozdział kończy określenie czynników wpływających na obliczenie niepewności zasilania β , oraz wprowadzenie wzorów przyjętych do jej obliczenia.

Rozdział *Wyniki* zawiera szczegółową i obszerną analizę, w tym analizę koincydencyjną, uzyskanych wyników dla rozpadu β dla każdego z badanych jąder atomowych. We wszystkich przypadkach zostały wprowadzone uzupełniające poziomy jądrowe w dotychczas istniejących schematach rozpadu, istotnie je wzbogacając. W wyniku tego dla wszystkich jąder uzyskano dobrą zgodność symulowanej funkcji odpowiedzi detektora MTAS z eksperymentalnym widmem zdeponowanej w nim całkowitej energii. Dla każdego jądra porównano także średnią energię promieniowania γ i średnią energię unoszoną przez cząstki β w rozpadzie stosując dane z dostępnych baz jądrowych, z uzyskanymi wynikami doświadczalnymi. Dokonano tego po skorygowaniu intensywności przejść β do

wysokoenergetycznych poziomów jąder pochodnych. Wyniki takiego dopasowania ukazują na przeszacowanie energii przejść β i niedoszacowanie energii unoszonej przez promieniowanie γ w oparciu o dotychczas dostępne dane. W przypadku jądra ^{91}Br ta niezgodność jest najbardziej jaskrawa. Wynika ona z dużego braku danych w bazach dla tego jądra. Dla wszystkich analizowanych izotopów bromu zaobserwowano emisję neutronów opóźnionych i obliczono jej prawdopodobieństwo, które zgadza się z danymi literaturowymi. Uzyskano także widma energetyczne neutronów. Natomiast w przypadku ^{91}Kr nie zaobserwowano poziomów wzbudzonych w jądrze pochodnym powyżej energii wiązania neutronu B_n , stąd brak takiego widma. Ponadto, dane zasilania w rozpadzie β poziomów w jądrach pochodnych powyżej energii wiązania neutronu posłużyły do analizy konkurencji emisji neutronu względem fotonu γ . Konkurencję zaobserwowano we wszystkich przypadkach z wyjątkiem rozpadu β ^{90}Br . Dla tego jądra nie stwierdzono emisji kwantów γ ze stanów powyżej energii B_n w ^{90}Kr . Wykonana analiza wykazała także bardzo dobrą zgodność wyznaczonego czasu połowicznego zaniku jąder $^{87-90}\text{Br}$ z danymi literaturowymi.

W rozdziale *Omówienie wyników* pokazano całościowo w sposób usystematyzowany wyniki analizy zaprezentowane w poprzednich rozdziałach. Dodatkowo przedstawiono wpływ zmiany rozkładu energii emitowanych cząstek β , wynikającej z analizy danych eksperymentalnych, na zmianę rozkładu energii emitowanych antyneutrino $\bar{\nu}_e$. Uwzględniając ją i biorąc pod uwagę dostępne wartości przekroju czynnego na odwrotny rozpad β Autor rozprawy wyliczył rozkład energii wykrywalnych antyneutrino elektronowych emitowanych z rozpatrywanych jąder. We wszystkich przypadkach obliczona liczba wykrywalnych $\bar{\nu}_e$ ulega zmniejszeniu o około 50%. Rozpatrując ten wpływ na ogólną liczbę emitowanych z reaktora jądrowego wykrywalnych $\bar{\nu}_e$ w wyniku sumowania w całym zakresie ich energii, Autor rozprawy konkluduje, że dla izotopów uranu powoduje to zmniejszenie deficytu $\bar{\nu}_e$ prawie o połowę, wpływając istotnie na rozwiązanie tak zwanej anomalii neutrin reaktorowych.

Końcowy rozdział *Podsumowanie* zwięźle omawia osiągnięte w badaniach rezultaty dla pięciu rozpatrywanych jąder atomowych. Mgr M. Stepaniuk porównuje je z wartościami dostępnymi dotychczas w bazie danych i przedstawia ich wpływ na wzbogacenie wiedzy o rozpadach jąder, ważnej dla dogłębszego poznania energii wydzielanej przez fragmenty rozszczepienia w reaktorach jądrowych.

Do rozprawy dołączony jest *Dodatek* z tabelami przedstawiającymi dane dotyczące zasilania beta oraz emisji neutronów opóźnionych w przemianie β jąder izotopów bromu - ^{87}Br ,

^{88}Br , ^{89}Br , ^{90}Br , ^{91}Br oraz ^{91}Kr , uzyskane przez Autora w analizie. Rozprawa oparta jest o bogatą *Bibliografię* składającą się z 82 pozycji.

Rozprawa doktorska mgr. M. Stepaniuka jest napisana i zredagowana starannie z dużą liczbą rysunków, tabel i schematów. Występują jednak pewne potknięcia językowe i nieścisłości takie jak (podkreślenia moje):

- opracowano nowe schematy rozpadu MTAS - (Streszczenie),
- wzór 2.1 trudno nazwać równaniem – s.3
- Neutron rozprasza się aż do osiągnięcia energii termicznej, a następnie zostaje pochłonięty przez proton – s.14
- W punkcie implantacji umieszczono detektor germanowy – s.21
- w symulacjach neutronów - s.45.

W podsumowaniu stwierdzam, że praca doktorska mgr. M. Stepaniuka zawiera szczegółową analizę oraz wnikliwą interpretację wyników badań mających bardzo duże znaczenie poznawcze oraz praktyczne. W rozwiniętej przez Autora analizie wykorzystano wyniki badań przeprowadzonych w wiodącym, światowym laboratorium w ORNL w Oak Ridge, z zastosowaniem jednego z najwydajniejszych detektorów pełnej absorpcji promieniowania gamma MTAS. Uzupełnione przez Autora schematy rozpadu pięciu omawianych jąder, będących fragmentami rozszczepienia ^{235}U pozwoliły istotnie je rozszerzyć, a w przypadku ^{91}Br utworzyć jego kompletny schemat. Dla rozpadu tego jądra ustalono nowe przejścia β -n- γ do czterech poziomów jądra pochodnego. W przypadku czterech jąder ujawniono konkurencję emisji neutronu względem fotonu γ , z poziomów powyżej energii wiązania neutronu w jądrach pochodnych. Analiza zarejestrowanych w MTAS neutronów opóźnionych określiła rozkład ich energii oraz prawdopodobieństwo ich emisji. Modyfikacja schematów rozpadu przyczyniła się od uściślenia całkowitego ciepła powyłączeniowego w reaktorze jądrowym, dając w efekcie dobrą jego zgodności z wartością doświadczalną.

Szczegółowa analiza danych przeprowadzona przez Autora rozprawy świadczy o gruntownym rozumieniu badanej problematyki i procesów fizycznych zachodzących w detektorze. Do analizy mgr. M. Stepaniuk wykorzystał istniejące i utworzone przez Niego zaawansowane programy komputerowe. Uzyskane nowe wyniki stanowią istotny wkład do badań ciepła powyłączeniowego w reaktorze jądrowym.

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska spełnia wymogi ustawowe i zgłaszam wniosek o dopuszczenie mgr. Michała Stepaniuka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Biorąc pod uwagę bardzo wysokie osiągnięcia w analizie wyników eksperymentalnych, w szczególności dotyczące analizy 2D, wniesiony postęp w badaniu przemiany beta izotopów wymienionych w tytule, będących fragmentami rozszczepienia ^{235}U , oraz wkład w badania tej przemiany dla kilku innych jąder (artykuły w *Phys. Rev. C* - pozycje [50, 51] bibliografii) wnoszę do Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr. Michała Stepaniuka.

y. Andriejewski