

Prof. dr hab. Józef Andrzejewski
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Uniwersytet Łódzki

Łódź, 06 czerwca 2016

WPLYNEŁO DN. 8.06.2016
.....

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr Aleksandry Fijałkowskiej na temat:
*Badanie przemiany beta produktów rozszczepienia z wykorzystaniem
spektrometru pełnej absorpcji***

Rozprawa doktorska mgr Aleksandry Fijałkowskiej (promotor – dr hab. Marek Karny) dotyczy aktualnych i ważnych badań przemiany β^- neutrono-nadmiarowych produktów rozszczepienia ^{235}U i ^{239}Pu o krótkim czasie półrozpadu, których wyniki mają istotne znaczenie dla określenia rozkładu ciepła powyłączeniowego w reaktorach jądrowych oraz strumienia emitowanych antyneutrino.

Badania przeprowadzono w Oak Ridge National Laboratory (ORNL) w Holifield Radioactive Ion Beam Facility (HRIBF) z wykorzystaniem wiązki protonów indukujących reakcję rozszczepienia jąder ^{238}U . Tak otrzymane fragmenty rozszczepienia były następnie separowane i implantowane na taśmie mylarowej, a ich produkty rozpadu rejestrowane za pomocą specjalnie do tego celu zbudowanego Modularnego Spektrometru Pełnej Absorpcji (MTAS).

Rozprawa p. A. Fijałkowskiej napisana na 148 stronach składa się z ośmiu rozdziałów, dwóch załączników i bibliografii, spełniając bardzo dobrze standardy zawartości doświadczalnej pracy doktorskiej. Wyniki badań stanowiące podstawę ocenianej pracy są przedstawione w czterech publikacjach o zasięgu międzynarodowym. Mgr A. Fijałkowska jest wiodącą autorką dwóch z nich. Dwie kolejne prace, których jest współautorką zostały wysłane do czasopism o wysokim IF.

Cel pracy został na wstępie jasno określony jako potrzeba oszacowania ciepła powyłączeniowego w wyniku rozpadu beta minus jąder fragmentów rozszczepienia rekomendowanych przez Agencję Energii Jądrowej (NEA) Organizacji Współpracy Gospodarczej i Rozwoju (OECD). W pracy doktorskiej p. A. Fijałkowska opisuje i analizuje badania przeprowadzone za pomocą techniki pełnej absorpcji ośmiu nuklidów, w tym sześciu z listy rekomendowanej w raporcie NEA OECD. Są to jadra:

^{86}Br , ^{89}Kr , ^{89}Rb , $^{90\text{gs}}\text{Rb}$, ^{90}Kr , $^{90\text{m}}\text{Rb}$, ^{92}Rb , i ^{139}Xe . Kolejnym celem pracy była weryfikacja sumarycznego strumienia antyneutrino elektronowych w funkcji energii, towarzyszących rozpadowi β fragmentów rozszczepienia oraz oszacowanie liczby ich oddziaływań z materią otaczającą strefę reaktora. Cele te wynikały z zakładanej, niepełnej dotychczas informacji o schematach rozpadu produktów rozszczepienia, co ujawniało się w rozbieżności między oszacowaniem ciepła powyłęczeniowego opartym o jądrowe dane doświadczalne, a pomiarami tego ciepła. Dotychczasowe eksperymenty ujawniły także 6% deficyt zmierzonego strumienia antyneutrino w stosunku do przewidywanej wielkości.

Badania przeprowadzono za pomocą specjalnie do tego celu zbudowanego detektora MTAS. Składał się on z 19 dużych kryształów NaI(Tl) ułożonych w strukturę plastra miodu, o wydajności na pochłanianie fotonów gamma o $E_\gamma=1$ MeV wynoszącej 80 %, a dla $E_\gamma=5$ MeV – 72 %. Określona została także wydajność poszczególnych warstw segmentowanego detektora MTAS. Spektrometr ten należy zaliczyć do najefektywniejszych działających obecnie na świecie detektorów pełnej absorpcji.

Na wstępnym etapie badań Autorka przeprowadziła obliczenia symulacyjne dla funkcji odpowiedzi detektora na promieniowanie γ i β na podstawie przyjętych jego parametrów za pomocą pakietu Geant 4. Była to niezwykle istotna praca pozwalająca na zweryfikowanie tych parametrów przy użyciu źródeł kalibracyjnych poprzez porównanie widm promieniowania otrzymanych doświadczalnie z wcześniej obliczonymi. Umożliwiło to w dalszej kolejności na porównanie otrzymanych eksperymentalnie widm z symulowanymi, z zastosowaniem znanych danych jądrowych, jak również przy założeniu istnienia nieznanych wysoko położonych stanów wzbudzonych w jądrach pochodnych. Założenie występowania rozpadów beta jąder-fragmentów rozszczepienia do nie obserwowanych stanów jąder-córek było hipotezą pozwalającą wyjaśnić obserwowane niedoszacowanie ciepła powyłęczeniowego określonego jako Efekt Pandemonium. Bardzo ważną częścią pracy było przygotowanie do analizy widm eksperymentalnych. W rozprawie szczegółowo przedstawiono, z wykazaniem bardzo dobrego zrozumienia omawianych zagadnień problem kalibracji modułów detektora, korekcji czasu detekcji sygnałów, konstrukcji oraz przygotowania symulowanych widm. To ostatnie zagadnienie wymagało dodatkowo wprowadzenia hipotetycznych poziomów

energetycznych w jądrach pochodnych z rozpadów fragmentów rozszczepienia, tak zwanych pseudo-poziomów. Problem przygotowania widm symulowanych jest w pracy bardzo dobrze wyjaśniony.

Kolejna część rozprawy zawiera wyniki badań i przeprowadzoną ich analizę dla ośmiu wcześniej wymienionych nuklidów. Dobór nuklidów wynikał z priorytetu nadanego przez NEA OECD badaniom ich rozpadu przy pomocy detektora pełnej absorpcji. Przykładowo, bromowi-86 (^{86}Br) został przypisany najwyższy, pierwszy priorytet, w celu wyjaśnienia rozbieżności między zmierzoną i obliczoną emisją ciepła powyłączeniowego.

Starannie przeprowadzona analiza wyników pokazała, że umiejętnie skorygowane poziomy i ich zasilanie w badanych jądrach dają dobre dopasowanie symulowanych widm do widm eksperymentalnych. Szczególnym przykładem dobrze dobranych założeń jest zgodność uzyskanych wyników dla $^{90\text{gs}}\text{Rb}$ i $^{90\text{m}}\text{Rb}$ z wynikami pomiarów innej grupy badawczej stosującej detektor pełnej absorpcji TAGS, co uwiarygadnia całość uzyskanych wyników.

W rozdziale *Dyskusja wyników* Autorka rozprawy podkreśla, że uzyskany sumaryczny wpływ rozpadu badanych jąder na elektromagnetyczną składową ciepła powyłączeniowego, obliczony dla ^{235}U , poprawia zgodność obliczonego rozkładu ciepła w funkcji czasu w stosunku do danych doświadczalnych, ukazując największe różnice po czasie ok. 100 s po rozszczepieniu. Czas ten odpowiada czasowi półrozpadu zmierzonych nuklidów. Pani A. Fijałkowska pokazuje jednocześnie, że największy wkład do całkowitego ciepła powyłączeniowego mają $^{90\text{gs}}\text{Rb}$, ^{89}Rb i ^{89}Kr , czyli jądra o stosunkowo wysokiej średniej energii emitowanego promieniowania γ w rozpadzie oraz o dużej obfitości powstawania w reakcji rozszczepienia. Przeprowadzona analiza rozkładu antyneutrino elektronowych powstających w rozpadach β pokazała, że dla każdego z badanych nuklidów zaobserwowano zmniejszenie liczby ich oddziaływań z materią, ze względu na obniżenie się średniej ich energii. Uzyskany zatem wynik to ważny wkład do wyjaśnienia deficytu mierzonego strumienia antyneutrino reaktorowych w stosunku do przewidywanej wcześniej wartości. Uściślenie wartości strumienia, tych ekstremalnie słabo oddziaływujących z materią cząstek pomoże kontrolować stopień wypalenia paliwa jądrowego i jednocześnie nagromadzenia się ^{239}Pu w prętach paliwowych.

Praca napisana jest poprawnym językiem polskim, w sposób przejrzysty i usystematyzowany, z dużą ilością tabel i rysunków.

Jako recenzent mam jednak obowiązek odnieść się do kilku drobnych uchybień.

1. Błąd zawartości Rys.6.5 uznaję jako chochlik edytorski, gdyż przebieg obu krzywych na Rys. 6.5 i 7.8 jest podobny. Nawiasem, z punktu widzenia analizy wzrokowej rysunków, w kilku przypadkach są one zbyt małe.
2. Na s. 17. Autorka pisze o możliwości monitorowania w czasie rzeczywistym ilości produkowanego plutonu poprzez detekcję strumienia neutrin, bez komentarza jak te dwie wielkości ze sobą powiązać.
3. Na s. 30.-31. Autorka pisze o redukcji tła w analizowanych widmach, przez zastosowanie dwóch krzemowych detektorów β , umieszczonych wewnątrz aluminiowej rury w centralnym module detektora pełnej absorpcji, bez wyjaśnienia jak to prowadzi do obniżenia tła.
4. Na s. 35. przedstawiono wzór 4.4 bez podania źródła jego pochodzenia.

W podsumowaniu stwierdzam, że praca doktorska mgr Aleksandry Fijałkowskiej zawiera szczegółową analizę i interpretację badań mających bardzo duże znaczenie poznawcze oraz znaczenie praktyczne dla energetyki jądrowej. Badania zostały przeprowadzone w wiodącym światowym laboratorium w ORNL w Oak Ridge z zastosowaniem jednego z najlepszych detektorów pełnej absorpcji promieniowania gamma. Autorka rozprawy zastosowała z wielkim powodzeniem narzędzia do symulacji działania detektora MTAS i analizy uzyskanych widm. Wnikliwie i systematycznie przeanalizowała otrzymane dane doświadczalne. Uzyskane i opublikowane już wyniki, w tym otrzymane po raz pierwszy wyniki pomiarów rozpadu beta czterech nuklidów z wykorzystaniem detektora pełnej absorpcji, wnoszą ważny wkład w poznanie rozpadu beta jąder fragmentów rozszczepienia i późniejszej deekscytacji jąder pochodnych potwierdzając hipotezę Efektu Pandemonium.

Stwierdzam zatem, że przedstawiona mi do recenzji praca doktorska spełnia wymogi ustawowe i zgłaszam wniosek o dopuszczenie mgr Aleksandry Fijałkowskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

J. A. Fijałkowski