

Kraków, 11 października 2018 r.

Dr hab. Ludwik Pieńkowski, profesor AGH

Katedra Energetyki Jądrowej
Wydział Energetyki i Paliw
Akademia Górniczo - Hutnicza imienia Stanisława Staszica w Krakowie
30-059 Kraków, al. A. Mickiewicza 30
e-mail ludwik.pienkowski@agh.edu.pl

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pani magister inżynier Ewy Łaszyńskiej
p.t.: "Badania kalibracyjne aparatury przeznaczonej
do aktywacyjnej diagnostyki neutronów z reakcji
syntezy jądrowej D-T w tokamaku JET"**

W rozprawie przedstawiono wykorzystanie neutronowej analizy aktywacyjnej w programie badań fuzji termojądrowej, czyli zastosowanie jednej z najstarszych jądrowych metod pomiarowych dla potrzeb wciąż niespełnionej wizji energetycznej, przed którą nadal stoi wiele wyzwań. Pomiar liczby emitowanych neutronów w jednostce czasu w każdym eksperymencie fuzyjnym jest ważny, gdyż daje ocenę mocy z jaką zachodzi reakcja fuzji, a neutronowa analiza aktywacyjna nadal jest wartościowym narzędziem badawczym, co zostało zaprezentowane w przedstawionej rozprawie doktorskiej.

W recenzowanej pracy postawiono tezę mówiącą, że neutronowa analiza aktywacyjna (NAA) może zostać skutecznie wykorzystana do monitorowania intensywności emisji neutronów pochodzących z fuzji D-T, czyli neutronów emitowanych z energią wynoszącą około 14 MeV. Bez żadnej wątpliwości punktem odniesienia do tak postawionej tezy jest wykorzystanie NAA w badaniach fuzyjnych między innymi w tokamaku JET nad własnościami plazmy D-D, gdy w widmie emitowanych neutronów dominują neutrony o energii znacznie mniejszej, wynoszącej około 2,5 MeV.

Klarowne, logiczne i merytorycznie uzasadnione przedstawienie planu prac badawczych jest jedną z najsilniejszych stron recenzowanej rozprawy. Autorka plan ten przedstawiła w rozdziale 4.2 jako listę 16 działań, które z należytą starannością wykonała i opisała. Do kluczowych elementów planu z punktu widzenia postawionej tezy badawczej należą:

- Wytypowanie i selekcja reakcji jądrowych do analiz aktywacyjnych dla neutronów o energii 14 MeV
- Napromieniowanie próbek neutronami o energii 14 MeV z generatora neutronów
- Wykonanie pomiarów aktywności poprzez pomiary spektroskopowe promieniowania gamma i wyznaczenie wydajności emisji neutronów z generatora neutronów
- Badania aktywacyjne w komorze próżniowej tokamaka JET prowadzące do wyznaczenia współczynników kalibracyjnych

Znaczna część zaplanowanych badań obejmowała też prace typowe przy wykorzystaniu metod aktywacyjnych i w pomiarach spektroskopowych promieniowania gamma. Z treści rozprawy wynika, że Autorka starannie zaplanowała te działania, które między innymi obejmowały:

- Wyznaczenie optymalnej geometrii w pomiarach spektroskopowych dla próbek objętościowych i wykonanie kalibracji wydajnościowych detektorów promieniowania gamma
- Wykonanie obliczeń z wykorzystaniem kodu FISPACT-II celem odpowiedniego zaplanowania pomiarów aktywności oraz porównania wyników pomiarów z wynikami symulacji komputerowej.

Rozprawa podzielona jest na dziewięć rozdziałów i w tej części recenzji zostaną one scharakteryzowane. W pierwszym i drugim rozdziale Autorka starała się wprowadzić czytelnika w obszar swojej pracy badawczej oraz nakreślić obecny stan wiedzy o fuzji. Warto podkreślić, że rozdziały te są dość krótkie, łącznie mają 21 stron i widać, że Autorka starała się w zwięzły sposób przedstawić niesamowicie rozległy obszar badawczy. Wydaje się jednak, że dokonała zbyt drastycznych cięć i rozdziały te niosą mały ładunek dydaktyczny. Poglądowy rysunek tokamaka JET pojawia się już w rozdziale pierwszym na drugiej stronie wprowadzenia (strona 16 dysertacji). Dla czytelników spoza grona ekspertów brakuje dydaktycznego opisu zjawisk fizycznych, wyjaśnienia jak tokamak działa i dlaczego musi być tak wielki. A może nie musi? Na stronach 17 i 18 wymienione są reakcje fuzji z komentarzem, że są to reakcje o kluczowym znaczeniu w eksperymentach fuzyjnych. Wśród nich jest też reakcja $D + D \rightarrow \alpha + \gamma$, o której wiadomo, że może mieć jedynie marginalnie małe znaczenie w porównaniu do dwóch pozostałych wymienionych kanałów reakcji $D + D$. Na stronie 19 w Tabeli 2 podano klasyfikację neutronów ze względu na ich energię kinetyczną wprowadzając takie nazwy jak *neutrony ultra zimne*, *bardzo zimne* i *zimne* tylko po to, aby w opisie zaraz pod Tabelą 2 wprowadzić jedną szerszą kategorię *neutronów powolnych*, do której należą również *neutrony termiczne*. Na tej samej stronie pada też stwierdzenie: „*Neutrony o energiach od 1 eV do 1 keV są pochłaniane przez jądra niektórych pierwiastków w sposób rezonansowy i stąd pochodzi ich nazwa*”, które jednak nie daje żadnego związku pomiędzy procesem rezonansowego wychwytu neutronów, strukturą jąder atomowych i energią kinetyczną neutronów. Niestety trudno znaleźć dobre uzasadnienie dla tak skrótowego sposobu wprowadzania czytelnika w świat neutronów występujących w plazmowych eksperymentach fuzyjnych. Razi też skrótowy tytuł rozdziału 1.3 „*Pomiary neutronów w urządzeniach plazmowych*”. Wiadomo przecież, że mierzy się liczbę emitowanych neutronów, ich energię kinetyczną, rozkłady kątowe, analizuje się widma energetyczne emitowanych neutronów, ale z całą pewnością nie mierzy się neutronów.

Rozdział drugi zawiera opis metod pomiarowych i stanowisk badawczych w tokamaku JET służących do wyznaczenia wydajności emisji neutronów. Mimo, że opis jest bardzo skrótowy, to dzięki odnośnikom literaturowym czytelnik dostaje dobry obraz oprzyrządowania tokamaka JET oraz wykorzystywanych metod pomiarowych i diagnostycznych. Rozdział kończy się opisem metod matematycznych rozwikłujących wyniki pomiarów wykonanych z wykorzystaniem neutronowej analizy aktywacyjnej. Zagadnienie to zostało przedstawione w sposób zdecydowanie zbyt skrótowy i brakuje jednoznacznego związku logicznego pomiędzy kolejno przedstawionymi równaniami (patrz też dalej, pytanie nr 4).

Celem pierwszej części rozdziału trzeciego było wykazanie, że metody aktywacyjne dobrze sprawdziły się w badaniach fuzji D-D, gdy dominująca część emitowanych neutronów ma energię około 2,5 MeV. W Tabeli 6 na stronie 40 w poglądowy sposób przedstawiono wyniki pomiarów wydajności emisji neutronów uzyskane za pomocą różnych metod. Wyniki te w przekonujący sposób pokazują skuteczność zastosowanych kalibracyjnych metod aktywacyjnych.

Wiadomo, że neutrony towarzyszące spontanicznemu rozszczepieniu jąder atomowych izotopu ^{252}Cf są emitowane ze średnią energią kinetyczną wynoszącą około 2,3 MeV, ich

najbardziej prawdopodobna energia wynosi 1 MeV, a maksymalna 13 MeV. Oznacza to, że izotop ^{252}Cf emituje neutrony o podobnym widmie energetycznym do tego, które mają neutrony emitowane w plazmie D-D i dlatego źródło ^{252}Cf często stosuje się w procedurach kalibracyjnych tokamaków. Brak szerszego porównania widm energetycznych neutronów powstających w plazmie D-D i emitowanych ze źródła ^{252}Cf osłabia jednak walory dydaktyczne rozprawy.

Celem skalibrowania aparatury diagnostycznej dla badań plazmy D-T, gdy w widmie energetycznym neutronów dominują te o energii 14 MeV, wymagane jest zastosowanie innego niż ^{252}Cf źródła neutronów. Potrzebny jest generator neutronów, co stwierdzono w rozprawie w dalszej części rozdziału trzeciego. Wykorzystanie w procedurach kalibracyjnych generatora emitującego neutrony o energii 14 MeV jest znacznie trudniejsze niż korzystanie ze źródła izotopowego, takiego jak ^{252}Cf choćby dlatego, że generator neutronów jest większy i cięższy od źródła izotopowego, wymaga zasilania i układu próżniowego, nie pracuje tak stabilnie jak źródło izotopowe, a emisja neutronów nie ma rozkładu izotropowego. Pokonanie trudności związanych z wykorzystaniem generatora neutronów było jednym z wyzwań, któremu Doktorantka sprostała.

W rozdziale czwartym przedstawiono tezę dysertacji, czyli walidację metod aktywacyjnych do monitorowania wydajności emisji neutronów z plazmy deuterowo-trytowej w tokamaku JET. Jak zostało już stwierdzone wcześniej sformułowanie planu prac badawczych jest jedną z najsilniejszych stron recenzowanej dysertacji.

W bardzo krótkim, liczącym jedynie siedem stron rozdziale piątym przedstawiono charakterystykę metod pomiarowych spektroskopii gamma zwracając uwagę na trudności pomiarowe wynikające ze znacznych rozmiarów aktywowanych próbek. Podano rozwiązania kilku problemów, w tym samoabsorpcji kwantów gamma w próbce. Kilka problemów jedynie wymieniono takich jak uwzględnienie wpływu czasu martwego systemu detekcji na wyniki. Niektórych zagadnień jednak nawet nie wymieniono jak na przykład efektu koincydencyjnego sumowanie (coincidence summing) kwantów gamma w detektorze, a jest on szczególnie istotny dla małych odległości pomiędzy próbką a detektorem promieniowania gamma. Taka sytuacja miała miejsce w niektórych pomiarach. Na przykład na stronie 71 w rozdziale szóstym podano, że część pomiarów wykonano, gdy „zакtywowaną próbkę umieszczano w środku polietylowego uchwytu położonego bezpośrednio na pokrywie detektora HPGe”. Co więcej na stronie 72 w tym samym rozdziale szóstym pada stwierdzenie „W obliczeniach zastosowano także szereg innych uproszczeń, które miały wpływ na obliczoną radioaktywność produktów reakcji jądrowych”. Stwierdzenie to pozostawiono jednak bez merytorycznego komentarza. Już na tym etapie recenzji można zatem postawić wniosek, że w pracy brakuje analizy błędów systematycznych.

Pytanie 1: Proszę oszacować jaki wpływ na wyniki przedstawionych analiz aktywacyjnych ma efekt koincydencyjnego sumowania kwantów gamma w detektorze. Jakie inne efekty mogły wprowadzić systematyczny błąd w przeprowadzonych pomiarach aktywacyjnych?

Na początku rozdziału szóstego przedstawiono analizę kryteriów wyboru reakcji jądrowych, które najlepiej wykorzystać do pomiarów kalibracyjnych wydajności emisji neutronów z plazmy D-T, czyli dla aktywacji neutronami o energii około 14 MeV. Wytypowano kilka reakcji o wysokim progu energetycznym, powyżej 2 MeV i o znacznym przekroju czynnym przy energii 14 MeV. Dla wybranych reakcji wykonano dwa eksperymenty sprawdzające. W pierwszym, przeprowadzonym w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku próbki naświetlono za pomocą dostępnego generatora neutronów o energii 14 MeV. Uzyskane wyniki pomiarów aktywności porównano z wynikiem symulacji

komputerowej wykonanej za pomocą kodu FISPACT-II. Wyniki przedstawiono w Tabeli 8 na stronie 73. Zarówno opis części doświadczalnej, jak i symulacji numerycznej nie budzą zastrzeżeń. Natomiast dyskusja wyników eksperymentalnych i symulacji jest zbyt pobieżna. Obserwowanych różnic nie można wytłumaczyć jedynie błędami statystycznymi, co jest stwierdzone na stronie 71, ale dyskusja wyników nie wykracza poza jakościowe argumenty, które bez pogłębionej analizy są mało przekonujące. Z drugiej jednak strony osiągnięty poziom zgodności pomiędzy wynikami obliczeń i pomiarów jest zadawalający w kwestii potwierdzenia słuszności wyboru wytypowanych reakcji jądrowych. W pewnej przesadzie na tym etapie najważniejsze było wykazanie, że pomiar z rozsądną dokładnością jest możliwy do wykonania przy użyciu standardowych metod i w rozsądnym czasie. Teza ta tym lepiej się broni, że w rozdziale siódmym powrócono do eksperymentów w których próbki były naświetlane z generatora neutronów wytypowanego do prac kalibracyjnych w tokamaku JET. Wyniki pomiarów porównano z wynikami kodu FISPACT-II. Tym razem w symulacjach wykorzystano również wyniki uzyskane za pomocą kodu MCNP, gdzie w szczególności można precyzyjnie odwzorować geometrię eksperymentu.

W ostatniej części rozdziału szóstego przedstawiono wyniki eksperymentu, w którym wybrane próbki zostały aktywowane w tokamaku JET neutronami z plazmy D-D w której wiadomo, że w śladowych ilościach emitowane są również neutrony o energii 14 MeV z reakcji D+T. Wyniki pomiarów zamieszczono w Tabeli 9. Widać, że wyniki te nie są wewnętrznie spójne, co jednak umknęło Autorce dysertacji. W szczególności aktywność właściwa ^{24}Na w funkcji całkowitej wydajności emisji neutronów zmierzona dla wyładowania numer 86716 daleko odbiega od linii trendu aktywności tego izotopu dla pozostałych pięciu wyładowań. Jeszcze większą rozbieżność względem trendu danych widać dla aktywności właściwej ^{56}Mn zmierzonej w wyładowaniu numer 90650.

Pytanie 2: Proszę o przedstawienie analizy wewnętrznej niespójności wyników podanych w Tabeli 9.

W rozdziale siódmym przedstawiono wyniki badań kalibracji wydajnościowej generatora neutronów, który został wybrany do prac w tokamaku JET. Duże wrażenie robi wykazana staranność przeprowadzonych badań doświadczalnych przeprowadzonych w National Physical Laboratory w Teddington koło Londynu i ta część nie budzi zastrzeżeń. Zasadnicze wyniki prac przedstawiono na Rysunkach 63 i 64, gdzie widać, że wydajności emisji neutronów uzyskane z pomiaru aktywności ^{56}Mn są systematycznie nieco mniejsze niż uzyskane z pomiarów aktywności pozostałych izotopów, choć mieszczą się w granicach błędu statystycznego. Co może być przyczyną niewielkich systematycznych różnic? Ogólniej, jak już zostało stwierdzone w pracy brakuje analizy błędów systematycznych.

Pytanie 3: Proszę o przedstawienie analizy błędów systematycznych dla wyników pomiarów przedstawionych na Rysunkach 63 i 64.

Pytanie 4: Uzupełnienia wymaga podrozdział 7.4, gdyż przedstawiony tam wzór (32) nie wynika bezpośrednio z równań (14) i (15). Proszę o bardziej szczegółowe wyprowadzenie równania (32)

Pytanie 5: W rozprawie brakuje załącznika, udokumentowania „narzędzia numerycznego”, które bazuje na równaniu (32) i które opracowała Autorka. Proszę o przedstawienie tego narzędzia

W rozdziale ósmym przedstawiono wyniki pomiarów kalibracyjnych przeprowadzonych w komorze tokamaka JET z wykorzystaniem generatora neutronów. Badania te stanowią zwieńczenie całego programu badawczego zrealizowanego przez Doktorantkę. Otrzymane



wydajności emisji generatora neutronów na podstawie pomiarów aktywacyjnych wykonanych przez Autorkę są wewnętrznie spójne i są zgodne z wynikami uzyskanymi za pomocą innych metod. Na Rysunkach 84, 85, 86 przedstawiono porównanie obliczonych wartości szybkości reakcji wynikających ze zmierzonych aktywności z wynikiem symulacji wykonanych za pomocą kodu MCNP. Wyniki te są zgodne w granicach podanych błędów, ale widać niewielkie różnice systematyczne, które jednak pozostawiono bez komentarza.

Podsumowując część merytoryczną rozprawy, należy podzielić wniosek Autorki przedstawiony w rozdziale dziewiątym, że uzyskane wyniki potwierdzają tezę o pełnej przydatności neutronowej analizy aktywacyjnej do monitorowania wydajności emisji neutronów z plazmy deuterowo–trytowej.

Forma redakcyjna dysertacji nie budzi większych zastrzeżeń. Praca liczy 195 stron, jest oparta o klarownie sformowany podział na rozdziały, a brak spisu tabel i rysunków nie utrudnia lektury. Natomiast w sferze językowej praca jest trudna do zrozumienia. Występuje dużo zbyt długich zdań, łatwo gubi się wątek, brakuje związków logicznych pomiędzy kolejnymi zdaniami i akapitami. Nieźle ilustruje to akapit na stronie 49:

Uwzględniając możliwości, jakie stworzył udział pracowników naukowych z Polski w programach Euratom, a następnie Eurofusion, szczególną uwagę autorka tej pracy zwróciła na konieczność dokładnego monitorowania emisji neutronów o energii 14 MeV, pochodzących z reakcji syntezy D-T w eksperymentach plazmowych wykonanych w tokamaku JET oraz zaplanowanych na najbliższą przyszłość. W związku z powyższym autorka skoncentrowała swoją działalność badawczą na zagadnieniach związanych z wykorzystaniem metod aktywacyjnych.

Podsumowując uważam, że przedstawiona rozprawa spełnia wszystkie ustawowe warunki stawiane pracom doktorskim i wnioskuje o dopuszczenie magister inżynier Ewę Łaszyńską do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Ludwik Pieńkowski