



UNIwersytet Śląski, Instytut Fizyki
Zakład Fizyki Jądrowej i Jej Zastosowań
ul. 75 Pułku Piechoty 1, 41-500 Chorzów
tel.: (+48) 32 349 3, e-mail: Jan.Kisiel@us.edu.pl

Chorzów, dnia 30.04.2019r.

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr Marcina Kasztelana pt. Oddziaływania neutronów, porównanie pomiarów z symulacjami.

Poszukiwanie rozpadu protonu czy ciemnej materii, a także badanie własności neutrin (m.in. poszukiwanie podwójnego bezneutrinowego rozpadu beta) to przykłady rzadkich procesów, które są w centrum zainteresowań fizyków, i to zarówno teoretyków jak i eksperymentatorów. Eksperymenty, w których bada się tak rzadkie procesy są zwykle przeprowadzane w podziemnych laboratoriach fizyki, aby zminimalizować niepożądane tło, którego źródłem są oddziaływania cząstek promieniowania kosmicznego, głównie mionów. W laboratoriach podziemnych oprócz „szczętkowego” tła pochodzącego z oddziaływań cząstek promieniowania kosmicznego, mamy do czynienia z tłem, którego źródłem są promieniotwórcze pierwiastki będące składnikiem skał otaczających halę pomiarową. Nie trzeba nikogo przekonywać, że precyzyjna znajomość tła jest niezwykle istotna dla powodzenia wszystkich eksperymentów niskotłowych, do których zaliczają się w/w przykłady badania rzadkich procesów. Jednym z najważniejszych, a jednocześnie najtrudniejszych do precyzyjnego oszacowania czynników tła jest promieniowanie neutronowe. Ze względu na charakter oddziaływania neutronów, silnie zależny od ich energii, wyeliminowanie tła pochodzącego od ich oddziaływań jest niezwykle trudne. Podobnie trudne jest precyzyjne oszacowanie tła pochodzącego od oddziaływań neutronów. Do oszacowania tła neutronowego wykorzystuje się obecnie zarówno pomiary jak i symulacje. Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr M. Kasztelana dotyczy obu metod wyznaczania tła neutronowego, przy czym zdecydowanie więcej miejsca poświęcono symulacjom komputerowym. Rozprawa doktorska powstała w łódzkim Zakładzie Fizyki Promieniowania Jądrowego Narodowego Centrum Badań Jądrowych. Kilkuosobowa grupa fizyków z tego Zakładu specjalizują się m.in. w pomiarach neutronów z wykorzystaniem liczników helowych. Chciałbym podkreślić niewielką liczebność grupy fizyków, która zbudowała układ pomiarowy, wykonała pomiary i symulacje oraz przeprowadziła analizę wyników. Z lektury rozprawy doktorskiej wnioskuję, że udział mgr M. Kasztelana w wykonaniu symulacji był zdecydowanie wiodący. Ponadto brał on udział w pomiarach i analizie wyników.

Rozprawa doktorska Pana mgr M. Kasztelana składa się z pięciu rozdziałów, streszczenia, wstępu, podsumowania, pięciu dodatków, bibliografii liczącej 37 pozycji, oraz spisów rysunków i tabel. Pierwsze dwa rozdziały można traktować jako wprowadzenie, ponieważ przedstawiono w nich metody detekcji neutronów oraz opisano pakiet Geant4 – narzędzie do symulacji oddziaływań neutronów używane przez autora rozprawy. Obszerny, ponad 50-cio stronicowy, rozdział trzeci poświęcono weryfikacji działania pakietu symulacyjnego Geant4 w odniesieniu do oddziaływań neutronów. Autor sprawdzał wyniki symulacji różnymi wersjami Geant4 włączając/wyłączając różne procesy fizyczne. Bardzo cenne jest porównanie nie tylko wyników symulacji różnymi wersjami Geant4, ale także porównanie symulacji z eksperymentem wykorzystującym źródło neutronów AmBe. Ponadto doktorant porównał symulacje i pomiar dla linii promieniowania gamma generowanych oddziaływaniami neutronów z izotopami germanu (reakcje $Ge(n,\gamma)$). Kolejny, nieco mniej obszerny bo 34-ro stronicowy rozdział czwarty poświęcony jest zastosowaniu pakietu Geant4 do znajdowania widma energetycznego neutronów zarejestrowanego z wykorzystaniem metody sfer Bonnera. Zakładam, że autor uznał symulacje oddziaływań neutronów Geant4 za poprawne i dlatego stosuje ten pakiet do *rozwikłania* widma energetycznego neutronów, przy czym porównywane są wyniki otrzymane trzema metodami: macierz odwrotna, pakiet MINUIT oraz klasa TUnfold. MINUIT i ROOT (TUnfold to część ROOT-a) to pakiety napisane w CERN-ie i szeroko stosowane w eksperymentach z fizyki jądrowej i cząstek elementarnych. Ostatni rozdział, piąty, to krótkie posumowanie dwóch pomiarów (w podziemnych laboratoriach w LNGS Gran Sasso we Włoszech i Slanic w Rumunii) strumienia neutronów z wykorzystaniem detektorów helowych, w których brał udział Pan mgr M. Kasztelan. Pracę kończy jednostronicowe podsumowanie. Najważniejsze wyniki rozprawy zawarte są w rozdziałach trzecim i czwartym, gdzie przedstawiono porównanie wyników symulacji oddziaływań neutronów z pomiarami. Jest to moim zdaniem bardzo wartościowy materiał dotyczący trudnego i ważnego zagadnienia jakim niewątpliwie jest wyznaczenie strumienia i widma energetycznego neutrin. Opisane testy poprawności działania pakietu Geant4 świadczą z jednej strony o dogłębnej znajomości symulacji oddziaływań neutronów jaką posiadał doktorant, a z drugiej zwracają uwagę na konieczność starannego wyboru procesów fizycznych uwzględnianych w symulacjach.

Do najważniejszych osiągnięć Pana mgr M. Kasztelana przedstawionych w rozprawie doktorskiej zaliczam:

1. Napisanie własnego programu do analizy widm gamma zbieranych przez detektor HPGe firmy Canberra. Program ten został przedstawiony w podrozdziale 3.5.3 rozprawy, w którym pokazano także przykładowe widmo energetyczne promieniowania gamma i jeden zrzut ekranu. Producent dołącza do spektrometru oprogramowanie do zbierania i analizy widm pozwalające na identyfikację linii. Oprogramowanie stworzone przez doktoranta zostało napisane w języku C++ z wykorzystaniem pakietu ROOT. Po wczytaniu liczby zliczeń w poszczególnych kanałach ADC mamy dostęp do wielu funkcji niedostępnych w oprogramowaniu *fabrycznym* Canberra. Przykładowo, mamy możliwość rozmycia pików funkcją Gaussa, co zostało wykorzystane do porównania wyników pomiarów z symulacjami. Oczywiście mając własne oprogramowanie można jest rozwijać dodając funkcjonalności w zależności od potrzeb. Napisanie takiego nowoczesnego (C++ oraz ROOT) programu wymaga dużej wiedzy zarówno programistycznej jak i metod analizy danych, którą niewątpliwie posiada Pan mgr M. Kasztelan.

2. Dogłębną analizę oddziaływań neutronów z izotopami germanu, co ma kluczowe znaczenie w pomiarach wykonywanych detektorami germanowymi. W tablicach C.2 i C.3 (str. 141 i 142) zamieszczono zarejestrowane linie gamma pochodzące od reakcji typu (n,γ) na różnych izotopach germanu, dla kilku grubości parafiny. Ponadto w tablicy 3.9 (str. 76) porównano rejestrowane linie gamma z oddziaływań neutronów emitowanych ze źródła AmBe z izotopami germanu z liniami otrzymanymi z symulacji programem Geant4. Niewielkie różnice wartości całkowitego przekroju czynnego, otrzymane przy pomocy pakietu Geant4, na oddziaływanie neutronów z różnymi izotopami germanu są widoczne na rysunku 3.28. Ze względu na powszechne wykorzystywanie detektorów germanowych (np. przenośny HPGe Canberra) uważam wyniki uzyskane przez Pana mgr M. Kasztelana za bardzo wartościowe.
3. I oczywiście porównanie wyników symulacji oddziaływań neutronów z danymi, które zostały zebrane w dedykowanych pomiarach.

Kilka uwag/zapytań do sposobu przeprowadzenia symulacji, pomiarów, analizy wyników i ich interpretacji zamieszczam poniżej:

1. Na rysunkach 3.2 i 3.3 (strony 36 i 37 rozprawy) zostało przedstawione porównanie wartości całkowitego przekroju czynnego na oddziaływanie neutronów z wodorem. Pokazano dane tablicowe (*Nuclear Data Sheets*, 112 (2011) 2887) i wyniki symulacji uzyskane różnymi wersjami Geant4 i programem FLUKA (wersja z 08.04.2014). Różnica pomiędzy wartościami przekroju czynnego uzyskanymi Geant4 w wersji 10 z modyfikacjami i włączonymi modelami oddziaływań, a danymi tablicowymi jest niewielka (na ogół poniżej 10%) w szerokim zakresie energii neutronów od 10^{-3} do 10^6 eV. Natomiast różnica pomiędzy wartością przekroju czynnego z symulacji programem FLUKA a wartościami tablicowymi jest powyżej 50% (maksymalnie aż 85%) w zakresie energii neutronów od ok. 10^{-2} do ok. 10^{-1} eV. Autor rozprawy nie komentuje szerzej tej tak dużej rozbieżności ograniczając się jedynie do jej odnotowania. Uważam, że rozprawa sporo by zyskała gdyby zostały w niej przedstawione porównania wyników oddziaływań neutronów różnymi programami symulacyjnymi, nie tylko Geant4. Wiem, że jest to ogromna praca i dlatego rozumiem ograniczenie się doktoranta do jednego, szeroko stosowanego w fizyce jądrowej pakietu symulacyjnego jakim jest Geant4. Rozprawa zyskałaby gdyby zamieszczono porównanie symulacji z wynikami pomiarów otrzymanymi innymi metodami niż liczników helowe. Jednakże i tutaj rozumiem ograniczenie się autora do metody pomiaru neutronów dobrze opanowanej przez fizyków z łódzkiego oddziału NCBJ.
2. Na rysunkach 4.18 i 4.19 (str. 120) pokazano wynik rozwikłania widma energii neutronów dla dwóch konfiguracji: źródło AmBe umieszczone prostopadle do licznika helowego i umieszczone w osi licznika. Rozwikłane widno energii neutronów zostało porównane ze wzorcowym kształtem widma dla źródła AmBe. Na osi pionowej są jednostki umowne (j.m – takie wyjaśnienie znajdujemy w podpisie rysunku 4.7 na str. 106), ale chciałbym się dowiedzieć o nich czegoś więcej. Ponadto poszczególne punkty mają różne wartości „błędów”, co jest szczególnie widoczne dla wyników rozwikłania otrzymanych Minuit-em dla źródła umieszczonego w osi licznika. Jaka jest przyczyna takich różnic? Będę prosił o dokładniejsze wyjaśnienie tych kwestii w trakcie publicznej obrony.

3. Niejasne jest dla mnie ostatnie zdanie na str. 114, w którym autor stwierdza, że oświetlenie długiego licznika wiązką neutronów z kierunku prostopadłego do licznika, pozwala na traktowanie takiego układu jako przybliżenie geometrii sfery Bonnera, z wyłączeniem cechy jej izotropowości. Tymczasem izotropowość jest bardzo istotną cechą standardowego spektrometru typu sfery Bonnera, którym jest zestaw kul wykonanych z materiału moderującego neutrony z centralnie umieszczonym detektorem neutronów. Brakuje mi tutaj szerszego uzasadnienia zasadności takiego przybliżenia. Będę o nie prosił w trakcie publicznej obrony.

Rozprawa doktorska Pana mgr M. Kasztelana jest napisana w języku polskim, w sposób prosty i zrozumiały. Jednakże autor nie ustrzegł się sporej ilości zwrotów czy sformułowań żargonowych. Listę kilku najbardziej, moim zdaniem, rażących przedstawiam poniżej:

1. ... tzw. „zero crossing”, str. 22,
2. „... gdy neutron *oddziała* z materiałem ...”, str. 73,
3. „złe rezultaty”, str. 119,
4. „... metody rozwikłania widma energii neutronów *pracują* lepiej”, str. 119,
5. „... tło promieniotwórcze wewnątrz kopalni jest *naprawdę* niskie.” str. 125,
6. „*tonietenpik*”, Tablica C.2, str. 141.

Autor nie kończy wzorów przecinkiem bądź kropką, a przecież wzory stanowią część tekstu i powinno się do nich stosować zasady interpunkcji. Tabele i rysunki zamieszczone w rozprawie są czytelne i dobrze uzupełniają tekst. Praca została starannie zredagowana.

Podsumowując, uważam, że zawarte w rozprawie doktorskiej Pana mgr M. Kasztelana wyniki symulacji oddziaływań neutronów i ich porównanie z pomiarami są wartościowe i interesujące. Doktorant wykazał, że w bardzo dobrym stopniu opanował technikę symulacji komputerowych metodami Monte Carlo, które obecnie są nieodłącznym składnikiem badań w fizyce jądrowej i cząstek elementarnych. Uważam, że ponadto znakomicie opanował technikę pomiaru niskich wartości strumienia neutronów z wykorzystaniem liczników helowych. Są to pomiary trudne, a ich wykonanie wymaga dużej wiedzy, którą posiadał Pan mgr M. Kasztelan.

Na podstawie przedłożonej do recenzji pracy doktorskiej Pana mgr Marcina Kasztelana pt. *Oddziaływania neutronów, porównanie pomiarów z symulacjami* stwierdzam, że rozprawa spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Prof. Jan Kisiel