

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr Krzysztofa Panasa pt.
„Development of Pulse Shape Discrimination Methods as Tools
for Background Suppression in High Purity Germanium
Detectors used in the GERDA Experiment”**

Eksperymenty z fizyki cząstek elementarnych bądź astrofizyki, poszukujące rzadkich procesów, coraz częściej stają przed problemem wyłowienia ewentualnego *słabego* sygnału, który może być na poziomie tła lub nawet poniżej. Wymaga to zastosowania nie tylko nowatorskich technik eksperymentalnych pozwalających na redukcję tła o wiele rzędów wielkości do poziomu pojedynczych zliczeń z ciągu roku, ale także rozwinięcia zaawansowanych metod analizy sygnału i otrzymanych danych pomiarowych. Należy przy tym uwzględniać nie tylko tło *zewnętrzne*, ale także tło, którego źródłem jest układ detekcyjny. Aby zminimalizować tło *zewnętrzne*, eksperymenty poszukujące rzadkich procesów są zazwyczaj przeprowadzane w podziemnych laboratoriach co znacząco (o kilka rzędów wielkości) obniża poziom sygnałów pochodzących od promieniowania kosmicznego. Do najważniejszych eksperymentów tego rodzaju należy poszukiwanie podwójnego bezneutrinowego rozpadu beta, rejestracja masywnych cząstek słabo oddziałujących (tzw. *WIMPs* – *Weakly Interacting Massive Particles*), poszukiwanie rozpadów protonu/neutronu czy badania własności neutrin, w tym w szczególności neutrin niskoenergetycznych (np. słonecznych). Nie ulega wątpliwości, że takie badania oraz ewentualne odkrycia będą miały fundamentalne znaczenie, ponieważ dotyczą fizyki poza obowiązującym, w fizyce cząstek elementarnych i oddziaływań fundamentalnych, Modelem Standardowym. Mgr Krzysztof Panas, w przedstawionej do recenzji rozprawie pt. *Development of Pulse Shape Discrimination Methods as Tools for Background Suppression in High Purity Germanium Detectors used in the GERDA Experiment*, podjął się opracowania metod analizy kształtu impulsu prowadzących do zmniejszenia tła detektorów germanowych wysokiej czystości (*high purity germanium detectors*). Międzynarodowa współpraca fizyków GERDA poszukuje podwójnego bezneutrinowego rozpadu β izotopu ^{76}Ge , używając matrycy detektorów germanowych znacząco wzbogaconych w ^{76}Ge do ok. 80%. Nie ulega zatem najmniejszej wątpliwości, że rozprawa doktorska

mgr K.Panasa dotyczy aktualnego i ważnego tematu badawczego, a obserwacja podwójnego bezneutrinowego rozpadu beta rozstrzygnie m.in. o naturze neutrin: czy są to cząstki Diraca czy też Majorany. Warto także podkreślić, że opracowane przez doktoranta metody analizy kształtu impulsu zostały z powodzeniem zastosowane do analizy danych z drugiej fazy eksperymentu GERDA oraz do analizy danych zebranych przez spektrometry promieniowania gamma. Nie do przecenienia jest także wkład grupy fizyków z Uniwersytetu Jagiellońskiego w rozwój nowatorskich technik eksperymentalnych, których nadrzędnym celem jest redukcja tła. Rozprawa doktorska Pana mgr K.Panasa stanowi, moim zdaniem, znaczący wkład do dorobku tej grupy.

Rozprawa doktorska Pana mgr K.Panasa składa się ze wstępu, czterech rozdziałów, podsumowania, dwóch dodatków oraz obszernej bibliografii liczącej 120 pozycji. Dla każdej pozycji bibliografii autor podaje numery stron rozprawy na których jest ona przywoływana. Promotorem jest Pan prof. dr hab. Marcin Wójcik, a promotorem pomocniczym dr Grzegorz Zuzel. Układ pracy jest dosyć zaskakujący. Rozdział pierwszy zawiera omówienie eksperymentu GERDA oraz wyników uzyskanych w fazie pierwszej i drugiej (*Phase I* i *Phase II*), w tym także z wykorzystaniem metody PSD (*Pulse Shape Discrimination* - analiza kształtu impulsu). Redukcja i tak niskiego tła detektora GERDA, uzyskana dzięki zastosowaniu metody PSD jest znaczna, co jest dobrze widoczne na rysunkach 1.8 (str. 15) oraz 1.12 (str. 20). Przydatność tej metody do redukcji tła została wykazana także w spektrometrii gamma w rozdziale trzecim rozprawy. Autor pokazał, że można zredukować tło bez modyfikacji detektora, bądź budowy dodatkowych osłon, chociaż nie należy zapominać, że staranna selekcja materiałów pod względem ich czystości, czy umieszczenie detektora w dedykowanej osłonie ma zwykle decydujące znaczenie dla redukcji tła. W rozdziale drugim omówiono powstawanie sygnału w detektorach germanowych oraz podstawy metody PSA. Ostatni, czwarty rozdział rozprawy zawiera szczegółowy opis zastosowania metody PSA do danych zebranych w drugiej fazie eksperymentu GERDA. Po pierwszym przeczytaniu pracy wydawało mi się, że naturalnym byłoby zamieszczenie rozdziału pierwszego jako ostatniego. Tym niemniej, uważam że zaproponowany przez autora układ pracy także ma swoje uzasadnienie.

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

1. Dwa modele geometrii detektora germanowego wysokiej czystości (HPGe), sferyczna (*spherical*) oraz współosiowa (*true-coaxial*) zostały wybrane do porównania z parametrami podanymi na str. 29. Dlaczego takie wartości parametrów były rozważane? Poza tym dla geometrii

sferycznej autor podaje dwie wartości V_{dep} (*depletion volatge*): $V_{dep} = 835$ V (na rysunku 2.3) oraz $V_{dep} = 802$ V (wartość obliczona na str. 29).

2. Na rysunku 3.21 (str. 63) zamieszczono widmo energetyczne promieniowania tła zebrane licznikiem pół-koaksjalnym (*semi-coaxial detector*) dla czterech konfiguracji: (1) bez veta mionowego MV , (2) z vetem mionowym MV , (3) z vetem mionowym i cięciem MSE – *multi-site events*, w którym gamma traci energię w wyniku wielu oddziaływań w detektorze (MV/MSE), oraz (4) z vetem mionowym i cięciem SSE – *single-site events*, w którym gamma deponuje energię w niewielkiej objętości detektora (MV/SSE). Zastosowanie veta mionowego oraz cięć MSE i SSE obniża poziom tła w całym zakresie energetycznym (od ok. 50 keV do 2800 keV), przy czym tło MV/SSE jest niższe w prawie całym przedstawionym zakresie energetycznym od tła MV/MSE oprócz części niskoenergetycznej, tj. od ok. 50 keV do ok. 300 keV. Jaka jest tego przyczyna? Czy tylko różny (w wyniku wielu bądź niewielu, tj. w niewielkiej objętości, oddziaływań w detektorze) sposób tracenia energii przez kwanty gamma?

Rozprawa doktorska Pana mgr K.Panasa jest napisana w języku angielskim, w sposób prosty i zrozumiały. Nie mam uwag do strony językowej pracy, ale jednocześnie nie czuję się w pełni kompetentny do oceny pracy pod tym względem. Chciałbym podkreślić bardzo wysoki poziom edytorski pracy. Zarówno rysunki jak i tabele są czytelne i znakomicie ilustrują tekst. Wiele rysunków ma znakomity walor dydaktyczny, świadczący zarówno o dogłębnym zrozumieniu omawianych przez autora zagadnień jak i inwencji w ich prezentacji. Przykładami mogą być: (1) Rys. 2.8 (str. 32) na którym pokazano widmo promieniowania gamma ^{228}Th zarejestrowane przez detektor germanowy wysokiej czystości (HPGe) wraz topologiami przypadków, które są charakterystyczne dla poszczególnych obszarów energetycznych widma, czy (2) Rys. 2.12 (str. 38) przedstawiający przykład procesu klasyfikacji przy użyciu klasyfikatora rzutowania prawdopodobieństwa (*Projective Likelihood classifier*), który wraz z tekstem znajdującym się w podrozdziale 2.2.3.1 pozwala zrozumieć sposób rozróżnienia sygnału od tła na podstawie analizy kształtu impulsu (*waveform*). Niewiele znalezionych błędów edytorskich zamieszczam poniżej:

1. *decay decay* zamiast *decay*, str.V (Abstract),
2. *abbreviation* zamiast *abbreviation*, str.5,
3. *dispertion* zamiast *dispersion*, str.16,
4. *masss* zamiast *mass*, str. 17,
5. *parameteres* zamiast *parameters*, str. 20 (podpis tabeli 1.4),
6. *nebligable* zamiast *negligible*, str. 45,

7. *datataking* zamiast *data taking*, str. 73,
8. *summerized* zamiast *summarized*, str. 78,
9. *timee* zamiast *time*, str. 82,
10. *discrepancies discrepancies* zamiast *discrepancies*, str. 85,
11. *traning* zamiast *training*, str. 92.

Podsumowując, uważam, że zawarte w rozprawie doktorskiej Pana mgr Krzysztofa Panasa wyniki prac nad rozwinięciem metod analizy impulsu (*PSA*) są oryginalne i stanowią cenne uzupełnienie innych metod (np. redukcja tła pochodzącego od materiałów, z których jest zbudowany detektor czy stosowanie osłon/weta) których celem jest redukcja tła. Wysoko oceniam zastosowanie metod *PSA* „w praktyce”. Autor pokazał ich użyteczność w spektroskopii gamma z wykorzystaniem detektorów germanowych (*BEGe – Broad Energy Germanium*) oraz w analizie danych z eksperymentu GERDA, który poszukuje podwójnego bezneutrinowego rozpadu beta ($0\nu\beta\beta$) jąder ^{76}Ge . Wyniki fazy pierwszej i fazy drugiej eksperymentu GERDA, uzyskane z wykorzystaniem metod *PSA* rozwiniętych przez autora rozprawy, pozwoliły na uzyskanie limitu na $T_{1/2}0\nu\beta\beta$ dla ^{76}Ge wynoszącego prawie 10^{26} lat. Biorąc pod uwagę doniesienie części współpracy fizyków Heidelberg-Moscow o wyznaczeniu $T_{1/2}0\nu\beta\beta = 1.2 \times 10^{25}$ lat należy podkreślić wagę tego pomiaru. Doktorant wykazał bardzo dobrą znajomość zaawansowanych metod analizy sygnału. Na podkreślenie zasługuje także, znakomite opanowanie przez Pana mgr K. Panasa technik pomiarowych wykorzystujących liczniki germanowe.

Po takim podsumowaniu wniosek może być tylko jeden: na podstawie przedłożonej do recenzji pracy doktorskiej Pana mgr K. Panasa pt. *Development of Pulse Shape Discrimination Methods as Tools for Background Suppression in High Purity Germanium Detectors used in the GERDA Experiment* stwierdzam, że rozprawa spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Wnioskuję także o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr K. Panasa.



Prof. Jan Kisiel