

prof. dr hab. Wiesław Andrzej Kamiński
Wydział Matematyki, Fizyki i Informatyki
Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej

O P I N I A

o rozprawie doktorskiej p. mgr. **Tomasza Golana**

Modeling nuclear effects in NuWro Monte Carlo neutrino event generator

I. Treść i układ rozprawy

Rozprawa doktorska p. mgr. Tomasza Golana została poświęcona jednemu z ważniejszych zagadnień fizyki neutrin: opisowi symulacji ich oddziaływań z materią jądrową w rzeczywistych sytuacjach eksperymentalnych. Wykorzystuje się w tym celu różnego rodzaju generatory umożliwiające bezpośrednią interpretację obserwowanych cząstek powstających w oddziaływaniu neutrin z materią. Należy do nich stworzony i rozwijany przez fizyków wrocławskich generator typu Monte Carlo o nazwie NuWro.

Użycie podobnych symulatorów ma kluczowe znaczenie dla rozstrzygnięcia zasadniczych pytań dotyczących charakteru oddziaływania neutrin z materią z jednej strony, zaś z drugiej dla pośredniego wnioskowania o naturze samego neutrina. Zadanie to jest bardzo trudne zważywszy, że precyzyjny opis oddziaływania neutrin z materią wymaga uwzględnienia zarówno aspektów oddziaływań słabo-elektromagnetycznych, jak również skomplikowanych aspektów struktury jądrowej i oddziaływań jądrowych. Wyniki przedstawione w recenzowanej rozprawie świadczą dowodnie, że wrocławski generator NuWro stał się narzędziem tego typu badań.

Rozprawa liczy 129 stron i została podzielona na 4 rozdziały, zawiera wprowadzenie i dwa dodatki, a także spis cytowanych źródeł. Odwołuje się do 165 pozycji literaturowych, w tym do 6 artykułów autorstwa i współautorstwa doktoranta. Zamieszczono w niej również 49 oryginalnych rysunków oraz 21 tabel odnoszących się do prezentowanych wyników badań. Lista stosowanych skrótowców bardzo ułatwia czytanie rozprawy napisanej solidnie po angielsku, z bardzo dobrą znajomością złożonego słownictwa specjalistycznego. Być może był to podstawowy argument za zaprezentowaniem wyników właśnie po angielsku, gdyż wykład po polsku oznaczałby konieczność spolszczenia zbyt wielu terminów i niełatwych określeń. Redakcja rozprawy, kompletność tez i sposób wykładu nie budzą zastrzeżeń i świadczą dowodnie o dobrym opanowaniu przez doktoranta warsztatu pisania prac badawczych.

Rozdział pierwszy *Introduction* (3 strony) omawia bardzo skrótowo podstawy fizyki neutrin i główne wyniki ostatnich lat w zakresie oddziaływania neutrin z materią. Wskazano tu również rolę symulatorów oddziaływań, w tym szczególnie generatorów Monte Carlo, jako narzędzi analizy danych eksperymentalnych. Na tym tle zarysowano wkład doktoranta do rozwoju generatora NuWro odnoszący się do implementacji różnorodnych mechanizmów efektów struktury jądrowej. Oczywiście na rynku badawczym używa się wielu innych generatorów, opartych o podobne założenia modelowe i oddziaływania, prowadzących jednak do znacznych różnic przewidywań na poziomie rzędu 10 %. Potrzeba zatem poważnych i szczegółowych studiów porównawczych by zrozumieć źródła tych rozbieżności i praca doktorska wnosi w tym zakresie do takiej dyskusji istotne wątki.

W rozdziale drugim (65 stron) zatytułowanym *NuWro* dokonano prezentacji wrocławskiego generatora, rozwijanego przez 9 ostatnich lat i angażującego grupę teoretyków wrocławskich pod kierunkiem dobrze znanego w środowisku fizyków neutrinowych profesora Jana Sobczyka. Doktorant omówił tu implementację podstawowych oddziaływań (z udziałem prądów naładowanych i nienaładowanych), w tym w stanie końcowym. Szczegółowo i z wieloma detalami teoretyczno-technicznymi zaprezentował dynamikę włączonych procesów (przybliżenie impulsowe, rozpraszanie kwazielastyczne, rezonansowa oraz koherentna produkcja pionów, rozpraszanie głębokonieelastyczne, udział prądów dwuciałowych). Znajdujemy tu również omówienie stosowanego w generatorze modelu struktury jądrowej (przybliżenie gazu Fermiego, funkcji spektralnej, uwzględnienie blokowania Pauliego) oraz oddziaływań cząstek wygenerowanych w podstawowym zderzeniu propagujących przez otaczającą materię jądrową – oddziaływania w stanie końcowym ze stosowanym we Wrocławiu modelem wewnętrznej kaskady nukleonów, pionów oraz mechanizmem Stodolsky'ego dla hadronów. Autor odnosi się do stosowanych uproszczeń i przybliżeń wskazując na ich wpływ na wiarygodność opisu oddziaływań. Pokazuje szczegółowe wyniki otrzymywane w symulacjach *NuWro* odnoszące się także do wprowadzonych przez niego nowych mechanizmów i efektów jądrowych (model oddziaływań w stanie końcowym). Udowadnia jednoznacznie wartość wrocławskiego generatora dla badań oddziaływania neutrin z materią i jego wiarygodność w takich badaniach. Zaprezentowane wyniki mają bez wątpienia charakter oryginalny i zasadniczy dla uczynienia z *NuWro* narzędzia przynajmniej porównywalnego z innymi używanymi generatorami Monte Carlo.

Pełnego uzasadnienia dla tej tezy dostarcza kolejny rozdział *The comparison of MC generators* (7 stron), w którym doktorant dokonał systematycznego porównania i oceny będących na rynku generatorów: FLUKA, GENIE (NEUGEN), NEUT, NAUNCE z NuWroc. Badania sięgają roku 2009, gdy na 45 Zimowej Szkole w Karpaczu dokonano pierwszego z porównań siłami jeszcze studentów (w tym obecnego doktoranta) przewidywań związanych z rozpraszaniem neutrin na tlenie. Wyniki były bardzo dla wrocławskiego generatora zachęcające, chociaż jednocześnie pokazywały duże rozbieżności przewidywań otrzymanych z zastosowaniem różnych

generatorów (FLUKA, GENIE, NEUT, NuWro) na obu poziomach: oddziaływania pierwotnego oraz w stanie końcowym. Ze względu na „gorący temat” produkcji pionów w oddziaływaniu neutrin z jądrem atomowym w kontekście obserwacji oscylacji neutrino mionowe – neutrino elektronowe oraz neutrino mionowe – neutrino mionowe (wyniki eksperymentu MiniBooNE), doktorant przeprowadził również porównanie przewidywań tych zdarzeń otrzymywanych w symulacjach GENIE, NEUT i NuWro. W przypadku pionów nienaładowanych wszystkie generatory przewidują podobną i zgodną z eksperymentem produkcję, podczas gdy dla produkcji pionów naładowanych NuWro wyraźnie niedoszacowuje przekrój czynny na ten proces (podobnie jak NEUT). Doktorant upatruje źródła tej niekonsystencji w innym podejściu do oddziaływań w stanie końcowym. Podobne różnicowanie obserwuje się w przypadku różniczkowego przekroju czynnego w tych procesach oraz rozkładów kątowych produkowanych pionów neutralnych.

Ważne dla zastosowań generatorów są dalsze porównania przeprowadzone przez doktoranta w tym rozdziale, motywowane zainteresowaniem zespołów badawczych prowadzących inne eksperymenty neutrinowe. W przypadku produkcji protonów w rozpraszaniu neutrin na argonie z udziałem prądów naładowanych obserwuje się duże rozbieżności między przewidywaniami różnych generatorów dla kilku badanych obserwabli (krotność protonów z energią większą niż 50 MeV dla dwu energii neutrin: 1 GeV i 3 GeV, rozkład pędu w procesie z 3 protonami i wieloprotonowym, całkowita energia pionu naładowanego w funkcji kosinusa kąta rozpraszania). Ogólnie wynika z nich, co konkluduje doktorant, że porównywane generatory, w tym NuWro, prowadzą do bardzo podobnych przewidywań dla pionów oraz znacznie się różnią dla protonów. Wynikać to może z faktu znacznie lepszego przebadania oddziaływania pionów w stanie końcowym niż dla podobnego oddziaływania kaskad protonowych. Zatem mimo poczynionych postępów, badania tych ostatnich oddziaływań i ich roli w procesach rozpraszania neutrin na jądrach atomowych stanowią w dalszym ciągu wzywianie dla badaczy zaangażowanych w tworzenie generatorów MC. Czyni to *de facto* użyteczność takich narzędzi w implikowaniu głębszych wniosków dotyczących fizyki neutrin wciąż problematycznym.

W rozdziale ostatnim *The analysis of the MiniBooNE data for NC elastic scattering* (13 stron) analizowane są zmierzone przez wymienioną w tytule rozdziału współpracę przekroje czynne na elastyczne rozpraszanie w procesach z udziałem prądów nienaładowanych. Doktorant stosuje generator NuWro, w którym – inaczej niż w stosowanym przez współpracę MiniBooNE generatorze NUANCE – uwzględnia się wkład prądów dwuciałowych. Pierwsze porównie z wyłączeniem tych wkładów (typu wieloprotonowo-dziurowych np.-nh) pokazuje daleko idącą zgodność przewidywań obu generatorów dla rozkładu energii kinetycznej (*true kinetic energy*) w przypadku rozpraszania elastycznego na wodorze, na protonie w jądrze węgla bez oddziaływania w stanie końcowym i z takim oddziaływaniem, na neutronie w jądrze węgla. Rozbieżności wystąpiły dla tła produkowanych w procesie pionów absorbowanych w stanie końcowym. Podobna bardzo dobra zgodność

została zaobserwowana w przypadku szacowania wkładu kwarków dziwnych do przekroju czynnego na procesy bez udziału prądów nienaładowanych. W kolejnym kroku porównania został oszacowany wkład pochodzący od prądów dwuciałowych w warunkach porównywalnych z modelem używanym przez współpracę MiniBooNE (model TE umożliwiający włączenie procesów np.-nh). W ich rezultacie pokazano, że włączenie zdarzeń z udziałem prądów dwuciałowych pozwala osiągnąć zgodność wartości masy aksjalnej M_A z wartościami tabelarycznymi i wyjaśnia dlaczego wyniki starszych pomiarów prowadziły do niedoszacowania tej masy (pomijaniem w obliczeniach wkładu tych prądów).

Pracę zamyka krótkie *Summary* (1 strona) opisujące najważniejsze cechy generatora *NuWro*.

II. Ocena rozprawy

Rozprawa doktorska p. Tomasza Golana zasługuje na wysoką ocenę. Jej tematyka jest bardzo aktualna, poznawczo istotna, a uzyskane wyniki oryginalne. Należą do nich:

- Uzupełnienie efektów jądrowych uwzględnianych w generatorze NuWroc (oddziaływania w stanie końcowym z udziałem kaskad nukleonów, dodatkowe efekty kwantowe), co podniosło jego wartość jako narzędzia badawczego fizyki oddziaływań neutrin z materią.
- Pokazanie w przeprowadzonych bezpośrednio symulacjach roli wprowadzonych modyfikacji i uzupełnień przez porównanie przewidywań z danymi eksperymentalnymi oraz wynikami otrzymywanymi z użyciem innych generatorów MC.
- Analiza roli wkładów pochodzących od prądów dwuciałowych przy szacowaniu czynników postaci.

Wyniki te świadczą dowodnie o dojrzałości naukowej doktoranta oraz o swobodzie poruszania się w skomplikowanej i zawilej pojęciowo problematyce oddziaływań neutrin z materią. Wskazują, że ich autor opanował również wyrafinowane metody teoretyczne pozwalające praktycznie realizować zawansowane rachunki teoriopolowe i fizyki cząstek elementarnych oraz posługuje się z dużą biegłością technikami komputerowymi.

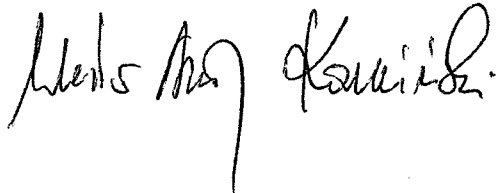
W tym świetle należy stwierdzić jednoznacznie, że przedstawiona rozprawa doktorska ma z jednej strony niewątpliwy walor oryginalnego rozwiązania postawionego przed doktorantem problemu naukowego, a z drugiej wskazuje na obszerną, dobrze ugruntowaną i stosowaną w realizowanych badaniach wiedzę teoretyczną z fizyki, wykorzystywaną efektywnie w prowadzonych badaniach naukowych.

Uzyskane wyniki świadczą, że doktorant posiada umiejętność prowadzenia samodzielnych badań naukowych w stopniu wyróżniającym się. Opublikowanie wyników w specjalistycznych czasopismach o cyrkulacji światowej i powszechnie

cenionych w środowisku fizyków uprawiających podobną tematykę potwierdza tę wysoką ocenę umiejętności badawczych doktoranta.

III. Konkluzja

Przedstawiona do oceny rozprawa p. Tomasza Golana zatytułowana *Modeling nuclear effects in NuWro Monte Carlo neutrino event generator* spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim przez ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, określone w § 13 ust. 1, ust 2 i ust. 6 tej. Wnoszę o dopuszczenie jej autora do dalszych czynności przewodu doktorskiego.



Lublin, 9 września 2014 roku.