

Recenzja pracy doktorskiej mgra Tomasza Golana
pt.
„Modeling nuclear effects in NuWro Monte Carlo neutrino event
generator”

Praca doktorska mgra Tomasza Golana poświęcona jest problemowi oddziaływania neutrin z jądrami atomowymi w różnych przedziałach energii. W szczególności jest to przedział energii neutrin w eksperymencie T2K w Japonii, w którym mgr Tomasz Golan uczestniczy. Precyzyjna znajomość przekrojów czynnych na oddziaływanie neutrin z jądrami (detektora) jest bardzo istotna dla zmniejszenia systematycznych błędów w eksperymentach oscylacji neutrin, w chwili obecnej jednych z najważniejszych testów Modelu Standardowego (SM). Aby identyfikować zapach neutrin należy mierzyć produkowane naładowane leptony tej samej rodziny, a więc procesy typu $\nu_l + A \rightarrow l^- + B$. Aby zmierzyć energię neutrin (prawdopodobieństwo oscylacji zależy od na ogół nieznannej energii przylatujących neutrin) potrzebna jest dokładna znajomość możliwych końcowych, zależnych od dostarczonej energii, kanałów tej reakcji. To tylko jeden z aspektów, gdzie znajomość oddziaływań neutrin z jądrami jest bardzo potrzebna. Inne możliwości wykorzystania to astrofizyka, poszukiwanie fizyki poza modelem standardowym, a także badanie samych hadronów czy też jąder. Tematyka recenzowanej pracy doktorskiej jest więc bardzo ważna a zarazem wymagająca znajomości oddziaływań elementarnych i procesów wielocząstkowych.

W pracy mgr Tomasz Golan przedstawił generator Monte Carlo oddziaływań neutrin z jądrami nazwany NuWro, od kilku lat opracowywany i udoskonalany we Wrocławiu. Autor niniejszej pracy doktorskiej brał udział w przygotowywaniu tego generatora. Jest współautorem dwóch ważnych prac opublikowanych w Phys. Rev. C., oraz pięciu wystąpień konferencyjnych. Poza tym jako uczestnik kolaboracji T2K od 2011 roku jest współautorem trzynastu prac oraz trzech innych opublikowanych przez większe grupy badawcze.

Recenzowaną pracę dokorską uważam za bardzo dobrą, chociaż, jak będzie widać, mam parę uwag krytycznych. Uwagi merytoryczne, które będę wyszczególniać nie są na tyle istotne, aby zmieniły moją dobrą ocenę całej pracy.

Praca doktorska jest napisana w języku angielskim na 129 stronach. Zawiera jak zwykle wstęp i krótkie podsumowanie, 3 zasadnicze rozdziały, spis treści, listę

zamieszczonych wykresów, bardzo pomocny spis używanych skrótów, 2 uzupełnienia i bogaty spis literatury.

Trzy rozdziały - drugi, trzeci oraz czwarty to główne rozdziały pracy. Najważniejszy rozdział 2 przedstawia generator Monte Carlo (**NuWro**) pozwalający obliczać przekroje czynne oddziaływań neutrin o różnej energii z jądrami o różnej liczbie masowej. Pozostałe dwa rozdziały są znacznie krótsze. Rozdział 3 porównuje generator powstały we Wrocławiu z innymi podobnymi generatorami znanymi w literaturze. Rozdział 4 przedstawia analizę danych doświadczalnych z eksperymentu MiniBooNE wykorzystującą generatora **NuWro**.

Zasadniczy drugi rozdział pracy zawiera cztery główne podrozdziały, które dzielą się na dalsze bardziej szczegółowe części.

Podrozdział (2.1) ogólnie charakteryzuje opisywany generator. Przedstawia krótką historię jego powstania, udział mgra Golana w przygotowaniu jego obecnej wersji oraz krótko opisuje kolejne trzy części całego rozdziału.

Podrozdział (2.2) przedstawia główne mechanizmy oddziaływania neutrin z nukleonami, a przy niewielkich energiach także z całymi jądrami. Na początku Autor sygnalizuje, że dla większych energii (a dokładniej dla większych przekazów czteropędu) będzie stosować tzw. przybliżenie impulsowe do opisu rozpraszania neutrin na jądram (zbiórce nukleonów). Następnie przedstawia mechanizmy możliwego oddziaływania neutrin z nukleonami i jądrami a więc (i) rozpraszanie elastyczne i quasielastyczne na nukleonach, (ii) produkcję rezonansu Δ i jego rozpad z udziałem pionów, (iii) rozpraszanie głęboko-nieelastyczne, (iv) poprawki do propagatora bozonu $W(Z)$ wewnątrz materii jądrowej oraz (v) koherentną produkcję pionów na jądram.

W podrozdziale (2.3) przedstawione zostały modele materii jądrowej modyfikujące rozpraszanie neutrin na nukleonach uwięzionych wewnątrz jąder, (i) model gazu Fermiego, (ii) model powłokowy jąder uwzględniający oddziaływanie neutronów i protonów oraz (iii) model uwzględniający zasadę wykluczania Pauliego.

Mam kilka uwag dotyczących tej części pracy. Autor przytacza tutaj wzory zaczerpnięte z wielu publikacji stanowiące podstawę pracy generatora **NuWro** nie komentując fizycznych założeń wyboru omawianych mechanizmów oddziaływania neutrin. Różnych mechanizmów jest znacznie więcej. Chętnie widziałbym dyskusję jak zaproponowane mechanizmy są związane z uwarunkowaniami doświadczalnymi. Dlaczego np. warto wydzielić produkcję pojedynczych pionów, skoro ten kanał znajduje się przecież w tzw. rozpraszaniu głęboko nieelastycznym. Często też Autor nie definiuje przyjętych oznaczeń. A teraz parę uwag szczegółowych:

- we wzorze 2.1 brak definicji używanych symboli,
- we wzorach 2.7 i 2.8 zdefiniowane zostały dwa niezmienniki Mandelstama s oraz u . Brak definicji q^2 i połączenie tego kwadratu przekazu czteropędu z niezmiennikiem t ($t = q^2$),

- we wzorze 2.9 i podobnie w 2.14 oraz 2.15 pojawia się nowy symbol „y” (przecież $y = z$ zdefiniowane poprzednio). Poza tym Autor określa (po wzorze 2.11), że symbol „m” oznacza masę naładowanego leptonu lub neutrina. Masa neutrina jest zbyt mała, aby wnieść jakikolwiek zauważalny efekt,
- symbol „v” to w pracy oznaczenie dla neutrina. Po wzorze 2.36 „v” jest także przekazem energii. Po wzorze 2.54 ten sam przekaz energii oznaczony został symbolem „ ω ”,
- podpisy pod rysunkami nie są precyzyjne, np. Autor nie określa gdzie używał generatora NuWro. Niektóre rysunki np. 2.8 są mało czytelne.

Podrozdział (2.4) o oddziaływaniu w stanie końcowym jest najbardziej szczegółowy, Autor bezpośrednio pracował przy implementacji tego problemu w generatorze NuWro. W tej części pracy opisany został, (i) sposób uwzględnienia powstałej kaskady cząstek po pierwotnym zderzeniu neutrina z pojedynczym nukleonem, (ii) sposób opisu kaskady nukleonowej, (iii) pionowej oraz (iv) wpływ wielokrotnego rozpraszania cząstek na przekrój czynny (*formation zone*). Ten podrozdział (i podobnie dwa następne rozdziały) uważam za bardzo dobre. Autor precyzuje dokładniej fizyczne mechanizmy tu opisane.

W rozdziale 3 z generatorem NuWro zostały porównane cztery istniejące generatory Monte Carlo, funkcjonujący od lat 70-tych generator FLUK oraz trzy generatory przygotowane specjalnie dla potrzeb fizyki neutrin, GENIO, NEUT i NUANCE. Na początku (podrozdział 3.1) Autor przedstawia te cztery generatory. Następnie (podrozdział 3.2) porównuje generatory FLUKA, GENIE i NUET oraz NuWro dla przypadków braku i produkcji pionów w rozpraszaniu neutrin mionowych o energii 1 GeV na tlenie ^{16}O . Różnice przewidywań poszczególnych generatorów są duże. Ze względu na różne przyjmowane modele do opisu reakcji jest to zrozumiałe, porównanie pochodzi z 2009 roku i nie prezentuje sytuacji obecnej, po wielu dokonanych zmianach w poszczególnych generatorach. W podrozdziale 3.3 zostały porównane wszystkie generatory desygnowane dla fizyki neutrin w oparciu o dane doświadczalne kolaboracji MiniBooNE dla produkcji pojedynczego pionu. Tutaj zgodność przewidywań poszczególnych generatorów i porównanie z danymi doświadczalnymi nie jest także satysfakcjonujące.

W rozdziale 4 przeanalizowano dane doświadczalne dla elastycznego rozpraszania neutrin z eksperymentu MiniBooNE. Tutaj także zgodność z danymi nie jest bardzo dobra. Sądząc po opublikowanych pracach ten rozdział w dużej mierze jest oparty na pracach wykonanych z udziałem Autora, a także wykonanych na potrzeby tej pracy i jeszcze niepublikowanych. Do tego wniosku trudno dojść, jako że prace Autora w spisie literatury od pozycji [1] aż do [21] (z wyjątkiem prac [7] i [15]) i wyszczególnione na początku spisu publikacji nie są cytowane w tekście.

Jedyne uwagi jakie mam do rozdziału 3 oraz 4 to brak zdefiniowanych niektórych skrótów np. INTRANUKE, NCEL albo NCEL HE. Zdefiniowanie skrótu, niezależnie czy można się domyślić jego znaczenia, powinno się w pracy znaleźć.

Na końcu Autor przedstawia 2 uzupełnienia. Najpierw w uzupełnieniu A przedstawia dokładny opis wszystkich parametrów używanych w generatorze **NuWro**. W uzupełnieniu B przedstawione zostały wykresy dla tzw. macierzy odpowiedzi (*response matrix*). Podobnie jak poprzednio nie mam uwag krytycznych do tej części pracy doktorskiej.

Całą pracę doktorską uważam za bardzo dobrą. Moje uwagi krytyczne nie mają istotnego znaczenia. Autor brał udział w przygotowywaniu generatora **NuWro**. Recenzowana rozprawa doktorska wymagała dobrych umiejętności w posługiwaniu się różnymi komputerowymi programami do analiz numerycznych. Oprócz tego mgr Tomasz Golan udowodnił, że w dobrym zakresie poznał fizykę Modelu Standardowego i parę mechanizmów oddziaływań nukleonów w jądrach.

Pracę oceniam jako bardzo dobrą i wnoszę o dopuszczenie mgra Tomasza Golana do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Marek Zrałek

