

Lublin, 16.02.2022

dr hab. Marek Gózdź
Instytut Informatyki
Wydział Matematyki, Fizyki i Informatyki
Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie

Recenzja rozprawy doktorskiej pani Beaty Kowal
Efekty polaryzacyjne w oddziaływaniach neutrin z nukleonami

Oddziaływania fundamentalne pomiędzy cząstkami elementarnymi są podstawowymi siłami działającymi w przyrodzie. Opis sił i cząstek tworzymy posługując się kwantową teorią pola z odpowiednio przyjętym cechowaniem. Oparcie rozważań o teorię pola i symetrie dało możliwość stworzenia modelu, który obecnie nazywamy Modelem Standardowym. Jednymi z ciekawszych cząstek są neutrina. Z jednej strony są to najliczniejsze cząstki masywne we Wszechświecie, z drugiej strony neutrino ma niesłychanie niski przekrój czynny na oddziaływanie z innymi cząstkami. Ich masa jest na tyle mała, że nie da się jej uzyskać korzystając z mechanizmu Higgosa, jednak niezerowa, przez co zaobserwowano oscylacje neutrin pomiędzy ich stanami zapachowymi. Wszystko to powoduje, że neutrina są ważnym i ciekawym obiektem badań.

W konstruowanych obecnie detektorach neutrin istotne jest zrozumienie mechanizmu oddziaływania wiązki neutrin z atomami ośrodka, służącego jako scyntylator. Pośrednia rejestracja neutrina polega na interpretacji obserwowanych rozbłysków promieniowania Cherenkova jako efekt zderzenia neutrina z atomem ośrodka. Aby móc to zjawisko poprawnie opisać, musimy stworzyć wiarygodny model oddziaływania neutrinonukleon.

Praca pani mgr Beaty Kowal dotyczy teoretycznego opisu oddziaływania neutrina z nukleonem. W procesie tym uczestniczy bozon W co powoduje, że wejściowe neutrino (antineutrino) oraz neutron (proton) przechodzą w naładowany lepton oraz proton (neutron), z ewentualną dodatkową emisją pionu. Autorka zakłada energię wiązki neutrin reaktorowych rzędu $E_\nu \sim 1$ GeV i rozważa dwa mechanizmy tego procesu: produkcję pionu oraz tło nierezonansowe. Jeśli na skutek rozpraszania neutrina nukleon przejdzie w stan wzbudzony odpowiadający rezonansowi $\Delta(1232)$, deekscytując wyemituje dodatkowy pion. Jeśli do wzbudzenia rezonansowego nie dojdzie, zachodzi proces bez emisji.

Po informacjach wstępnych Autorka omawia rozpraszanie neutrina bez emisji pionu. Przedstawia przy tym kinematykę procesu oraz wprowadza obserwable jednospinowe, dwuspinowe i trójspinowe opisujące asymetrię polaryzacji cząstek biorących udział w procesie. Następnie wyprowadza wzór na przekrój czynny procesu i dyskutuje postać prądu hadronowego. Ostatecznie przedstawia zależność asymetrii spinowych od parametrów modelu: masy osiowej i energii (anty)neutrino w modelu nierezonansowym. Dokonuje przy tym ciekawej obserwacji, że pomiary odpowiednich asymetrii spinowych w doświadczeniach neutrinowych mogą pozwolić na wyznaczenie masy osiowej M_A . Znalezienie połączenia między parametrami modelu teoretycznego a wielkościami faktycznie mierzalnymi jest cenne i pozwala na potwierdzenie lub obalenie założeń teorii.

W Rozdz. 3 dyskutowane są modele rezonansowe, czyli rozpraszanie neutrina na nukleonie z emisją pionu. Możliwość emisji mezonu π istotnie wpływa na stanowiące tło procesy kwazielastyczne i może zaburzać analizę wyników doświadczeń nad oscylacjami neutrin. Modele z produkcją pionu opisane zostały na bazie liniowego modelu sigma przez Fogli i Nardulli (model FN) oraz na bazie nieliniowego modelu sigma przez Hernandez, Nieves i Valverde (model HNV). Zarówno w FN jak i HNV konstruowane są postaci wierzchołków występujących w diagramach Feynmana opisujących proces. W następnym kroku Autorka wyprowadza wzory na amplitudy wszystkich branych pod uwagę mechanizmów.

Rozdz. 4 poświęcony jest dyskusji asymetrii spinowych i zawiera szeroką analizę wartości składowych polaryzacji końcowego leptonu, końcowego nukleonu oraz tarczy nukleonowej w funkcji kąta rozpraszania. Rachunki przeprowadzone zostały dla różnych typów wierzchołków oddziaływania w modelach FN i HNV.

W końcowej części pracy znalazło się krótkie omówienie stosowanych metod numerycznych oraz podsumowanie. W dodatkach zawarte zostały informacje o stałych i oznaczeniach, konwencji zapisu spinorów Diraca, wyprowadzenie postaci prądu leptonowego oraz zakresy wartości dla poszczególnych parametrów modeli. Rozprawę zamyka bibliografia.

Rozprawa doktorska uzupełnia i rozszerza wyniki Doktorantki opublikowane w sześciu artykułach, cytowanych w rozprawie jako prace [97]–[100], [106], [107]. Są to cztery obszernie artykuły z *Physical Review D* oraz dwa, które ukazały się w *Acta Physica Polonica B*. Nowe wyniki prezentowane w rozprawie dotyczą dyskusji obserwabli dwu- i trójspinowych oraz asymetrii spinowej nukleonów w procesach nierezonansowych, natomiast w procesach z emisją mezonu π opisana została asymetria nukleonów tarczy i polaryzacja wybitego nukleonu. Dokonano też między innymi szczegółowej analizy obserwabli jednospinowych w funkcji parametrów modelu takich jak masa osiowa,

osiowy czynnik postaci i względna faza pomiędzy wkładami od procesów rezonansowych i nierezonansowych.

Prezentacja materiału jest dobrze przemyślana. Podczas czytania zwróciłem uwagę na jeden fakt. Autorka podaje, że wyprowadzenie postaci prądów w modelach HNV i FN przeprowadzone zostało za pomocą języka algebry symbolicznej FORM. Uzyskane wyniki pozwalały na otrzymanie przekrojów czynnych, które jako procedury w C++ były całkowane numerycznie. Pomimo stosowania obliczeń numerycznych, praca doktorska szczegółowo przedstawia założenia użytych modeli i wyprowadzenia poszczególnych formuł. Dodatkowo autorka dyskutuje użyte przybliżenia oraz porównuje swoje podejście z wynikami, jakie można znaleźć w literaturze oraz wynikami eksperymentalnymi. Wszystko to sprawia, że praca jest ładnie domknięta, łącząc teorię z numeryką i pracami doświadczalnymi.

Praca od strony technicznej została napisana poprawnie, z zachowaniem przyjętych w publikacjach naukowych reguł. Dość często natknąć się można jednak na drobne pomyłki językowe, na przykład

- str. 17 neuron \rightarrow neutron
- str. 26 momentu cząstki \rightarrow pędu cząstki
- str. 26 leptonu nukleonu \rightarrow nukleonu
- str. 26 czaszek \rightarrow cząstek
- str. 55 tępo \rightarrow tempo
- str. 62 przyzmować \rightarrow przyjmować
- str. 64 wiązu \rightarrow więzu
- str. 72 leptonu nukleonu \rightarrow nukleonu

Warto też zastanowić się nad doprecyzowaniem niektórych stwierdzeń i fragmentów tekstu:

- Już sam proces rozpraszania, w którym neutrino rozpada się na naładowany lepton i bozon W , przypomina bardziej odwrotny rozpad β . Warto skomentować, że w literaturze przyjęto nazwę rozpraszanie również przy braku neutrino w stanach wychodzących.
- Na str. 23 użyta jest nazwa „granica chiralna” na określenie przybliżenia $m_\pi \rightarrow 0$. Zazwyczaj widziałem w tym przypadku określenie „granica zerowej masy” albo „przybliżenie dużych pędów $p^2 \gg m^2$ ” (por. S.Weinberg, Teoria pól kwantowych tom 1, rozdz. 5.3).
- Na str. 24 pojawia się informacja, że prądy drugiego rodzaju są wykluczone w Modelu Standardowym. Dlaczego?
- We wzorze (2.75) zamiast $c_1 c_1$ powinno być $c_1 c_2$.
- W zdaniu przed wzorem (3.81) należy zamienić $\Psi \rightarrow \psi$.

- W (3.80) wprowadzony został Lagrangian \mathcal{L} , natomiast w (3.83) i (3.85) brana jest pochodna po wielkości L . Dlaczego?
- Na str. 67 można przeczytać, że „dla uproszczenia nie będziemy uwzględniali procesów z pętlami”. Jaki błąd jest popełniany pomijając wkłady wyższych rzędów?
- Na str. 68 pomijane są wszystkie czynniki postaci poza wektorowymi. Dlaczego można tak zrobić i jaki ewentualnie błąd jest popełniany?
- Podając wartości mas cząstek warto podać cytowanie, np. materiałów z Particle Data Group.

Pomimo drobnych niedociągnięć **recenzowaną pracę oceniam pozytywnie**. Ze względu na bardzo dobrą część wstępną, z odniesieniami do opublikowanych prac teoretycznych i doświadczalnych, dyskusją przybliżeń i pokazaniem wyprowadzeń używanych wzorów, stawiam wniosek o **uznanie rozprawy doktorskiej pani mgr Beaty Kowal jako wyróżniającej**.

W związku ze spełnieniem wymogów ustawowych, proszę o dopuszczenie pani mgr Beaty Kowal do dalszych etapów postępowania.

Maciej Góral