

Prof. Zbigniew Wąs
Instytut Fizyki Jądrowej PAN
31-342 Kraków, Radzikowskiego 152

Recenzja rozprawy doktorskiej:

Michał Iglicki

“Collider and early-Universe interactions of dark matter in Higgs-portal models”

Model Standardowy oddziaływań cząstek elementarnych reprezentuje piękną i pełną sukcesów teorię testowaną od dziesięcioleci przez eksperymenty zderzaczy cząstek elementarnych takich jak: LEP, Babar i Belle dla zderzeń e^+e^- oraz CDF, D0, ATLAS, CMS and LHCb dla kolizji $p\bar{p}$ bądź pp . Te różnorodne testy, często oparte na pomiarach o wysokiej, poziomie promili precyzji, pozwalają potwierdzać subtelne efekty, takie jak efekty kwantowe tzw. poprawki radiacyjne.

Obecnie żadne wyraźne niezgodności pomiędzy przewidywaniami teorii, a obserwacjami nie są potwierdzone. Tym niemniej, Model Standardowy nie dostarcza odpowiedzi na szereg fundamentalnych pytań, takich jak: pochodzenie skal energetycznych oddziaływań, skąd pochodzi hierarcha mas cząstek elementarnych, skąd pochodzą bariony, ostatecznie szeregowi pytań współczesnej kosmologii.

Od eksperymentalnego potwierdzenia, że kwantowa elektrodynamika opisuje bardzo szerokie spektrum zjawisk i że do tych precyzyjnych analiz potrzebne są efekty kwantowe a nie tylko przewidywania najniższego rzędu, zasady na których jest zbudowana zostały (po uzupełnieniu) użyte do sformułowania teorii oddziaływań silnych, a także oddziaływań elektroslabych. Model Standardowy (Teoria Standardowa) został sformułowany. Tym niemniej, już od połowy lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku, rozpoczęły się poszukiwania bardziej fundamentalnej teorii, przewidującej obserwację nowych cząstek i tłumaczącej większy zakres zjawisk. Mielśmy do czynienia z szeregiem fał nowych hipotez i nadziei, że przełomowe odkrycia są blisko. Rozczarowania przeszłości nie wykluczają oczywiście możliwości, że taki przełom właśnie teraz następuje. Jeśli to się stanie, będzie to wielki krok w rozwoju nauki, być może największy w całym XXI wieku.

Od czasu odkrycia bozonu Higgsa jedynej elementarnej cząstki o spinie zero, także ponieważ wcześniejsze podejścia nie doprowadziły do przełomu, zainteresowanie kieruje się obecnie w kierunku tak zwanych modeli ‘Higgs-portal’, gdzie kandydatury dla nowych cząstek miałyby oddziaływać ze zwykłymi cząstkami materii tylko poprzez bardzo słabe sprzężenia do pola Higgsa. Rozprawa może więc być rozumiana jako wkład w ten istotny, wręcz fascynujący wysiłek badawczy. Ma charakter pracy teoretycznej, aczkolwiek aspekty eksperymentalne oraz szeroko rozumiane pomiary astronomiczne i ich interpretacja odgrywają istotną rolę. Bez wątpienia rozprawa porusza bardzo istotną tematykę, której poświęcone jest aktualnie wiele dyskusji naukowych.

Rozprawa o 121 stronach, składa się z siedmiu rozdziałów z bardzo licznymi podrozdziałami, a nawet pod-podrozdziałami. Zawiera też 7 apendiksów, również z podrozdziałami. Nie znalazłem w rozprawie klarownych odniesień do własnych prac pana Iglickiego. Jego wkład w przedstawioną niewątpliwie fascynującą tematykę, mogłem wyodrębnić tylko pośrednio i być

może nie zawsze dokładnie. Nie zawsze było dla mnie jasne, jak jego własny wkład przedstawia się na tle wkładu współautorów bądź cytowanej literatury. Spodziewam się, że wynika to tylko z pewnej niedoskonałości edycyjnej. Zakładam, że główne wyniki opierają się na czterech publikacjach w dobrych czasopismach i trzech artykułach konferencyjnych, współautorstwa Pana Iglickiego. Referencje te są zebrane na trzeciej stronie rozprawy. Pozostała część spisu literatury umiejscowiona jest na końcu rozprawy: zebrane są tam pozycje 8-200.

Pierwsze dwa rozdziały stanowią wprowadzenie do modeli typu 'Higgs-portal' i do istotnych z tej perspektywy aspektów kosmologii. Dwa następne to opis spodziewanych własności ciemnej materii i motywacja jej istnienia wynikająca z obserwacji astronomicznych i eksperymentów akceleratorowych. Kolejne dwa przedstawiają główne wyniki rozprawy. Rozdział siódmy, podsumowanie, zamyka pracę. Rozprawa jest klarowna, choć jej szczegóły mogą być nieprzystępne dla osób spoza specjalności szczególnie przy pierwszym czytaniu. Omówię teraz, załączając uwagi, kolejno wszystkie rozdziały.

Przedmowa zawiera listę konwencji, oznaczeń, nazw, akronimów i skrótów. Lista ta ułatwia dalsze czytanie. Wprowadzenie zamyka przedstawienie głównego celu pracy oraz spis własnych publikacji Pana Iglickiego. Niektóre zaproponowane konwencje nie są dla mnie naturalne. Na przykład, wzór (0.3) jest przedstawiony jako element przestrzeni fazowej. Wyrażenie to, zwykle oznacza element całkowania potrzebny do uzyskania wyrażenia na element całkowania przestrzeni fazowej. Przykład elementu całkowania przestrzeni fazowej jest podany, na przykład jako druga i trzecia linia wzoru (2.40). Wprowadzenie jest uzupełnione przez wymieniony w nim apendiks D, zawierający zbiór własności macierzy Diraka. Apendiks E nie jest wymieniony, chyba nie ma też do niego odniesienia w żadnym innym rozdziale.

Rozdział pierwszy, czyli wprowadzenie, jest krótki ale przejrzysty, objaśnia plan i cel dysertacji wskazuje na referencję [8] jako źródło ram, w których praca była rozwijana. Jest to jasno podkreślone i jest użyteczne. Tym niemniej, wskazanie innych scenariuszy niż Higgs-portal i omówienie ich ograniczeń, byłoby pewno na miejscu. Choćby poprzez wskazanie odpowiednich referencji i podkreślenie, że przedstawienie alternatywnych scenariuszy wykracza poza ramy dysertacji. Modele ciemnej materii użyte w pracy, są przedstawione w apendiksach A i B. Apendiks C nie jest wymieniony. Nie bardzo rozumiem dlaczego.

Już w tym rozdziale ujawnia się złożoność tematyki. Każdy z trzech paragrafów (podrozdziałów) wprowadza dalsze rozdziały rozprawy, ale każdy w innym porządku, innym też niż ich kolejność w rozprawie. Można się więc spodziewać, że praca będzie wymagać więcej niż pojedynczego czytania i że związki między rozdziałami są bardziej złożone niż można by oczekiwać z ich kolejności. Takie wrażenie wzmacnia sposób cytowania podrozdziałów i podpodrozdziałów. Nawet z wnętrza rozdziału, jego własne podrozdziały są nazywane rozdziałami. Utrudnia to szczególnie pierwsze czytanie.

Rozdział drugi jest poświęcony tym aspektom kosmologii, które są ważne z perspektywy dalszych części rozprawy. Wymienić można własności geometryczne, termodynamiczne czy rozkład masy Wszechświata. Wskazna jest waga własności oddziaływań. W szczególności rola procesów o osobliwościach w kanale t (procesy te są omawiane w dalszych rozdziałach). Przedstawiona jest parametryzacja przestrzeni fazowej i inne elementy obliczeń, związane z szerokościami rozpadu. Rozdział jest klarowny, aczkolwiek niektóre założenia, jak założenie jednorodności i niezależności od kierunku Wszechświata, są wprowadzone jakby nie mogło być w ich przypadku żadnych wątpliwości. Choćby minimalny komentarz, byłby więc na miejscu. Rozdział ten jest uzupełniony odniesieniem do apendiksu A.

Rozdział trzeci zaczyna się słowami "Dark matter is the component of the Universe", "Ciemna materia jest składnikiem Wszechświata". W moim odczuciu takie stwierdzenie jest zbyt silne, jak dla obiektów, które nie zostały odkryte, a na których istnienie wskazują tylko poszlaki. Tym niemniej, przegląd modeli jest dość szeroki. Na przykład wkład czarnych dziur

które mogły się pojawić od początku istnienia Wszechświata, bądź możliwość że oddziaływania grawitacyjne różnią się od tych przewidywanych przez teorię względności są omówione. Podkreślone są własności jakie powinna mieć ciemna materia, w tym potrzeba oddziaływań nie-grawitacyjnych ciemnej materii samej ze sobą. Pewno byłoby tutaj na miejscu silniejsze podkreślenie że to ogranicza możliwość żeby ciemną materię stanowiła materia barionowa zebrana w nieoddziaływujące (słabo oddziaływujące) obiekty, takie jak brązowe karły czy samotne planety. Rodział ten jest uzupełniony odniesieniami do apendiksów A i B.

Rozdział czwarty jest poświęcony eksperymentalnym poszukiwaniom cząstek, które mogą stanowić ciemną materię. Różnego rodzaju oddziaływania i eksperymenty akceleratorowe, również te planowane, są omawiane. Omawiane są też poszukiwania astrofizyczne z pomocą różnego typu detektorów promieniowania kosmicznego. Wiele wariantów kandydatur ciemnej materii jest rozważanych. Moim zdaniem sekcja całkiem dobrze wyczerpuje tematykę.

Rozdział piąty jest poświęcony tzw. osobliwości kanału t . Nie bardzo odpowiada mi ta nazwa, ponieważ osobliwości pojawiają się gdy wymieniany w kanale t transfer jest czasopodobny. Jest to jednak pewno przyjęta w tej dziedzinie nomenklatura. Znaczenie tej nazwy jest objaśnione w subsekcji 5.1. Rozwiązanie problemu osobliwości jest oparte na wprowadzeniu szerokości (czyli na resumacji urojonych cziczane bądź estymowane. Rozkłady różniczkowe (asymetrie, różnice kształtu sygnału i tła itp.) nie są eksploatowane, bądź są eksploatowane w niejawnym sposób. W każdym razie nie byłem w stanie zidentyfikować odpowiadającym temu stwierdzeń. Gdyby były użyte, konkluzje mogły by być mocniejsze. Alternatywnie, taka możliwość mogła być choćby tylko wskazana jako temat dla przyszłych prac.

Konkluzje są wsparte wynikami obliczeń analitycznych, zakładam że przygotowanych po części przez Pana Michała Iglickiego. Rodział ten jest uzupełniony odniesieniami do apendiksów B, G i H.

Rozdział siódmy zawiera główne wyniki. Liczba używanych modeli, sygnatur i wzorów jest imponująca. Tylko w tym rozdziale znalazłem pośrednie wskazówki, że wcześniejsze dwa rozdziały 5 i 6, w dużym stopniu przedstawiają wyniki własnej pracy Pana Michała Iglickiego. Rozumiem, że główny wynik czyli potwierdzenie fascynującej hipotezy, że cząstki elementarne oddziaływujące ze znanymi tylko poprzez pole bozonu Higgsa, mogą stanowić ciemną materię i ciemną energię wynika po części z własnej pracy Pana Michała Iglickiego.

Apendiksy A-H służą jako dopełnienie rozprawy, są w nich zawarte dłuższe wzory, często także ich wyprowadzenie. Zawarte są tam opisy używanych modeli oddziaływań ciemnej materii czy opisy niektórych z używanych acz mniej ważnych konwencji oznaczeń i funkcji, takich jak funkcje Greena czy funkcje Passarino-Veltmana. Tylko do appendixu E nie ma odniesienia w innych częściach rozprawy. To pewno przeoczenie, autora albo moje. Naturalnym miejscem takiego odniesienia byłaby przedmowa.

Uwagi końcowe

W moim odczuciu przedstawione wyniki są wartościowe. Praca jest interesująca, pomimo tego że niektóre konteksty ujawniały się dopiero przy drugim czytaniu. Aby je zidentyfikować musiałem się zaznajomić najpierw z dalszymi rozdziałami. Ten aspekt konstrukcji rozprawy był pewno jasny dla autora, dlatego w rozdziale pierwszym rozdziały nie są przedstawiane w kolejności. Ich lista jest omówiona w trzech podrozdziałach rozdziału pierwszego. Takie rozwiązanie było, przynajmniej dla mnie, pomocne.

Liczba zebranych i opracowanych wzorów jest imponująca, ale brakowało mi niektórych rozważań o bardziej fundamentalnej naturze, być może w pewnym zakresie wina jest po mojej stronie i po prostu nie zawsze byłem w stanie je zidentyfikować.

Główne konkluzje są oparte na wynikach numerycznych, opartych na wzorach analitycznych

przygotowanych przez Pana Iglickiego. W ich przygotowaniu i omawianiu, w moim odczuciu, brakuje eksperymentalnych detali. Po ich uwzględnieniu wyniki mogły by być silniejsze a przewidywania dla przyszłych pomiarów bardziej użyteczne. Z długiej strony, takie szczegóły mogą być opracowane później, w ramach dalszej pracy badawczej.

Dysertacja, pomimo pewnej hermetyczności okazała się interesująca, szczególnie przy drugim czytaniu. Tym niemniej zrozumienie wszystkich kontekstów wymaga pewno głębszej niż moja, znajomości aktualnego stanu działy fizyki którym zajmuje się rozprawa. To może być też problemem dla czytelnika w przyszłości.

Nie było mi jednak łatwo zidentyfikować wkładu własnego autora rozprawy. Jego własne publikacje, pozycje [1-7] spisu publikacji, nie były w sposób jasny cytowane, prawdopodobnie w większości nie były w ogóle cytowane. Tym niemniej te artykuły są w większości opublikowane w dobrych czasopismach. Dlatego uznałem, że brak cytowań to niedoskonałość edycji, a nie zasadniczy problem. Uważam więc, że praca spełnia wszystkie warunki stawiane rozprawom doktorskim.

Zbigniew Wąs

Zbigniew Wąs