

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

Recenzja rozprawy doktorskiej:
Rafał Masełek

“Prospect for detecting long-lived particles at the Large Hadron Collider”

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 precyzji, poziomu promili, 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 hierarchia mas cząstek elementarnych, czy skąd pochodzą bariony, ostatecznie szeregowi pytań współczesnej kosmologii.

Jednym z kierunków badań poświęconych odpowiedziom na te pytania jest poszukiwanie (bądź wykluczanie czyli ograniczanie dopuszczalnych regionów w przestrzeni parametrów) hipotetycznych długożyjących naładowanych elektrycznie cząstek. Ten kierunek badań jest realizowany przez eksperymenty na akceleratorze LHC: przede wszystkim ogólnego zastosowania (ATLAS CMS LHCb i ALICE) ale i mniejsze takie jak MoEDAL.

Analiza perspektyw przeprowadzania takich poszukiwań i sposobów ich interpretacji jest tematem rozprawy pana Rafała Masełka. Zainteresował się możliwością zaobserwowania raczej egzotycznych sygnatur (długo żyjące naładowane cząstki) z pomocą detektora MoEDAL. Ten pasywny detektor (nie ma w nim odczytu elektronicznego, odczyt następuje po rozmontowaniu), oferuje wyjątkowe warunki pomiarowe, wolne od tła procesów Modelu Standardowego. W fazie budowy nie planowano użytkowania detektora MoEDAL do obserwacji długożyjących naładowanych cząstek. Należało więc najpierw sprawdzić czy istnieją modele przewidujące istnienie takich cząstek, czy są one obserwowalne i jak przygotować przewidywania modeli i odpowiedzi detektora, aby wyniki pomiarów mogły być prawidłowo zinterpretowane. Temu celowi poświęcone są publikacje stanowiące bazę rozprawy i które pozwoliły też kształtować program badawczy detektora MoEDAL. Wpłynęły one też na plany przebudowy tego detektora pomiędzy etapami zbierania danych: Run2, Run3 HL- akceleratora LHC.

Pomimo, że w zasadzie rozprawa jest poświęcona zagadnieniom teoretycznym, autor wykazał się dobrym zrozumieniem potencjału detektora i wykorzystał tę wiedzę do opracowania wyników: oszacowania zdolności detektora do uzyskania tych wyników.

Rozprawa zawiera 2+134 strony, wiele rysunków i tabel. Składa się z pięciu rozdziałów. Pierwsze dwa, zawierają omówienie istotnych w dalszych częściach rozprawy; własności Modelu Standardowego i fizyki modeli wychodzących poza Model Standardowy. Rozdział trzeci to przegląd poszukiwań długożyjących cząstek w eksperymentach ATLAS CMS i MoEDAL. Wyniki badań autora są zebrane w rozdziale czwartym. Rozdział piąty zawiera podsumowanie.

Zebrana literatura zawiera 254 pozycji. Rozprawa jest napisana klarownie, wkład pracy Rafała Masełek jest wystarczająco oznaczony i może być wyodrębniony od wyników uzyskanych przez współautorów i treści będących przeglądem literatury.

Rozprawa opiera się na czterech publikacjach autora w czasopiśmie Eur. Phys. J. C. Publikacje te mają co najwyżej kilku współautorów. Są one wymienione na początku opisującego główne wyniki rozdziału 4. Omówię teraz indywidulanie kolejne rozdziały rozprawy.

Rozdział pierwszy wprowadzenie, zawiera opis Modelu Standardowego oddziaływań cząstek elementarnych, podkreśla jego sukces, zdolność do opisu wszystkich oddziaływań niegrawitacyjnych, zaznacza też ograniczenia, które są motywacją dla szukania alternatyw bądź rozszerzeń. Rozdział stanowi klarowne wprowadzenie, jest zaznaczone, że opiera się na referencji [1] – książce autorstwa Profesora Wróblewskiego. Natknąłem się tylko na drobne niedokładności (być może wynikające z mojej nieuwagi przy czytaniu). Skrót “vev” wydawał mi się niezdefiniowany, ale jego znaczenie można było łatwo odczytać z kontekstu. W zdaniu przed formułą 1.72 zamiast ‘no interaction between’ powinno być ‘only diagonal interactions’. W moim odczuciu warto było wspomnieć, już na końcu sekcji 1.3, że pomimo wątpliwości i pojawianiu się kilkakrotnie obserwacji, które mogły wskazywać, że Model Standardowy wymaga przebudowy, po kontynuacji pomiarów, okazywało się, że przewidywania są prawidłowe w każdym przypadku. Wprowadzenie zamyka lista eksperymentów LHC i omówiony jest ich potencjał. Przedstawione są główne eksperymenty, ale też eksperyment “*Monopole an Exotic Detector At the LHC*” (MoEDAL), który zainteresował autora i skupił jego uwagę w przygotowaniu publikacji na których opiera się rozprawa. Należy podkreślić, że sekcja jest napisana jasno i stanowi znakomite wprowadzenie dla dalszych rozdziałów.

Rozdział drugi wprowadza scenariusze rozszerzenia Modelu Standardowego, których obserwowalne sygnatury są w dalszych rozdziałach używane do oceny potencjału detekcji. Baza są rozszerzenia oparte o supersymetrie bądź o tak zwany mechanizm “seesaw” pozwalający na wprowadzenie i powiązanie ze sobą cząstek o bardzo różnych masach. Również i ten rozdział cechuje klarowność i charakter pedagogiczny. Jest też zademonstrowane, że w takich scenariuszach mogą pojawiać się w naturalny sposób długożyjące egzotyczne cząstki. Rozdział jest krótki, ale wystarczający, tym niemniej nie w pełni objaśnia wszystkie aspekty przedstawianych modeli. Dlatego autor wymienia referencje [111,112] dla mechanizmu ‘seesaw’ i modeli neutrin. Dla modeli supersymetrycznych wymienione jest wiele referencji. Rozdział jest zrównoważony i przejrzysty przy czytaniu.

Rozdział trzeci jest poświęcony opisowi detektorów LHC. Przede wszystkim detektorów ATLAS, CMS i MoEDAL. Wybór jest dobrze uzasadniony. Rozprawa koncentruje się na wielkościach mierzalnych w eksperymencie MoEDAL, który pozwala na alternatywne pomiary względem pomiarów głównych detektorów LHC, czyli ATLAS i CMS. Eksperymenty te mają szeroki zakres zastosowań. Brakuje mi stwierdzeń na temat możliwej złej identyfikacji cząstek w tych wielkich eksperymentach. Takie stwierdzenie, n.p. pod koniec sekcji 3.1.1 mogło by podkreślić dlaczego brak tła Modelu Standardowego jest tak wyjątkowy i wartościowy w wypadku detektora MoEDAL. Opis działania detektora MoEDAL jest wystarczający. Warto podkreślić, że autor samodzielnie przygotował program szybkiej symulacji tego detektora. Program ten pozwalał oszacować liczbę spodziewanych przypadków dla rozważanych w następnej sekcji modeli Nowej Fizyki. Oszacowanie takie zostało wykonane w wystarczająco realistycznym przybliżeniu. Sekcja nie stanowi więc tylko opisu detektorów, ale omawia też istotny wkład autora w przygotowanie narzędzi potrzebnych do uzyskania wyników opisanych w kolejnej sekcji. Ten aspekt pracy wychodzi poza czysto teoretyczne ramy i poszerza ją o wyniki, które można zakwalifikować do dziedziny fizyki eksperymentalnej.

Rozdział czwarty poświęcony głównym wynikom, zawiera listę czterech publikacji autora, na których opiera się rozprawa. Wszystkie cztery prace są opublikowane w Eur.Phys.J.C.

i zawierają bogate wyniki. W dobrym przybliżeniu podsekcje 4.1 – 4.4 odpowiadają tym publikacjom. Głównym celem rozprawy jest zidentyfikowanie tych obszarów parametrów oddziaływań Nowej Fizyki w których detektor MoEDAL może dokonać pomiarów konkurencyjnych z pomiarami detektorów ATLAS i CMS. Detektor MoEDAL pozwala ominąć problem polegający na tym, że gdy wolno poruszające się produkty rozpadu cząstek Nowej Fizyki osiągają odpowiednie rejony detektora, równocześnie z nimi znajdują się tam już produkty kolejnych zderzeń pp (consecutive bunch crossing). Również detektorowy algorytm ATLAS i CMS (tzw trigger) odrzucania nieinteresujących przypadków może nieprawidłowo oceniać pęd poprzeczny stanów o wysokim ładunku elektrycznym, jeśli takie stany są produkowane. Skutkiem tego, takie cenne przypadki mogą być odrzucone i nie zostaną zarejestrowane. Autor koncentruje się głównie dla przygotowań faz działania LHC o nazwie RUN 3, oraz następnej tzw. HL-LHC.

Ze względu na sporą ilość szczegółów, wersji spodziewanych sygnatur i rozważanych modeli, sekcja jest znacznie mniej jednolita i trudniejsza do czytania. Ogólny przekaz jest jednak klarowny. Istnieją obszary parametrów modeli gdzie detektor MoEDAL jest skuteczniejszy niż np. ATLAS bądź CMS. Można to zrozumieć również dlatego, że procesy poziomu partonowych zderzeń $\gamma\gamma$ o stosunkowo dużym przekroju czynnym dla produkcji wolnych długożyjących naładowanych stanów Nowej Fizyki są łatwiej mierzalne przy braku tła Modelu Standardowego. Wyniki pracy nie zostały osiągnięte bez wysiłku. Autor nie tylko musiał zrozumieć i przygotować sygnatury dla analizowanych modeli Nowej Fizyki ale też i odpowiedzi detektora. Nawet etap hadronizacji wymagał uwagi. Różnorodność rozważanych aspektów jest bardzo bogata: fizyka niskich energii, programowanie, fizyka detektorów, aż w końcu fizyka Modelu Standardowego i jego rozszerzeń o efekty Nowej Fizyki.

Obliczenia teoretyczne i ich wyniki są wykonane w wiodącym rzędzie, ale nie powinno to zmieniać istoty przewidywań, główne konkluzje nie są z tej przyczyny istotnie ograniczone.

Nie byłem w stanie sprawdzić wzorów i wyników numerycznych, jedno z miejsc, które wzbudziło mój niepokój to warunek $Z/\beta \leq \sim 7$ (strona 65). Najprawdopodobniej jest to trywialna literówka, albo otaczający go tekst był dla mnie niejasny i odczytałem go nieprawidłowo.

Rozdział piąty podsumowuje główne rezultaty rozprawy. Lista analizowanych modeli i odpowiadających im sygnatur jest imponująca. Dla mnie osobiście, wyniki wskazujące, że procesy poziomu partonowego związane z kolizją fotonów niemal na powłoce masy były szczególnie interesujące, ponieważ przyczyniają się do większego potencjału detektora MoEDAL w poszukiwaniu nowych cząstek. W niektórych przypadkach takie procesy powodują lepszą zdolność detekcji detektora MoEDAL niż głównych eksperymentów LHC. W szerszym zakresie parametrów, ze względu na wyjątkowe o zupełnie innym charakterze niedokładności pomiarowe detektora MoEDAL niż eksperymentów takich jak ATLAS czy CMS pomiary MoEDAL przestają być konkurencyjne, ale ciągle są względem nich komplementarne.

Z perspektywy teoretyka, osiągnięte wyniki można by uznać jako wartościowe, ale raczej nie wyjątkowe. Jednakże ponieważ są wsparte dość kompletną analizą warunków eksperymentalnych ich wartość staje się wyjątkowa. Wymagało to oczywiście znaczne szerszego spojrzenia, również takiego, które jest wymagane dla prac eksperymentalnych. Ostatecznie wymagane było uwzględnienie obu aspektów. Praca jest napisana bardzo czytelnie i interesująco. To jeszcze bardziej podkreśla jej wartość. Uważam że praca spełnia wszystkie warunki stawiane rozprawom doktorskim. Moim zdaniem, z wymienionych powyżej powodów praca kwalifikuje się do wyróżnienia.

Zbigniew Wąs

Zbigniew Wąs