

Prof. dr hab. Krzysztof Doroba
Wydział Fizyki
Uniwersytetu Warszawskiego
00-681 Warszawa
ul. Hoża 69

Marzec 2013

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Tomasza Früboesa pod tytułem "Search for neutral Higgs boson in $\tau\tau \mapsto \mu + \tau_{jet}$ final state in the CMS experiment"

W lipcu 2013 upłynie rok od momentu ogłoszenia przez dwie niezależne grupy eksperymentalne działające przy Wielkim Zderzaczu Hadronów LHC w Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych CERN w Genewie odkrycia nowej cząstki o masie około 126 GeV. Odkryta przez współpracę ATLAS i CMS cząstka jest znakomitym kandydatem na poszukiwaną od wielu lat cząstkę (bozon) Higgsa. Zaprezentowane w marcu 2013 na konferencji w Moriond wyniki eksperymentów ATLAS i CMS, oparte na prawie całej próbce zebranych dotychczas zdarzeń ($\sim 25/\text{fb}$ /eksperyment) wydają się tę kandydaturę potwierdzać. Otrzymanie tego oczekiwanego od kilkudziesięciu lat wyniku jest rezultatem wieloletniej pracy zespołów fizyków i inżynierów zarówno w zakończonych już eksperymentach w CERNie i FERMILABie jak przede wszystkim wysiłkowi włożonemu w budowę, uruchomienie i utrzymanie w ruchu akceleratora LHC i związanych z nim detektorów, w tym detektorów ATLAS i CMS. Bardzo istotną częścią tego wysiłku było (i jest nadal) przygotowanie odpowiednich metod analizy danych; jest to zadanie szczególnie istotne w poszukiwaniu cząstki Higgsa. Podstawą jest opracowanie metod określenia tła do poszukiwanych procesów. Pomimo ogromnego rozwoju metod Monte-Carlo w szacowaniu tła dla bardzo rzadkich procesów ze zrozumiałych powodów najwyżej cenione są metody oparte o rzeczywiste dane zebrane przez detektor. Właśnie tego typu metoda określania tła dla poszukiwanego procesu rozpadu $H \rightarrow \tau\tau$ jest głównym wątkiem recenzowanej rozprawy mgr Tomasza Früboesa.

W swojej rozprawie doktorskiej mgr Tomasz Früboes przedstawił opracowaną przez siebie dla potrzeb detektora CMS metodę wyznaczenia tła pochodzącego od wyprodukowanej w procesie Drella-Yana pary leptonów $\tau\tau$ do procesu, w którym rozpadający się na dwa leptony τ bozon Higgsa daje ostatecznie w stanie końcowym mion i dżet pochodzący z rozpadu leptonu τ : $H \rightarrow \tau\tau \rightarrow \mu + \tau_{jet}$. Korzystając z uniwersalności leptonowej Tomasz Früboes wykorzystał zarejestrowane w detektorze CMS przypadki produkcji pary mionów do określenia wspomnianego tła taonowego. Metoda ta, nazywana osadzaniem (*embeddingiem*), jest podstawą kilku publikacji współpracy CMS. Jako członek współpracy CMS Tomasz Früboes oczywiście działał jako członek zespołu, który badał ten kanał rozpadu higgsa. Warto więc w tym momencie zaznaczyć, że recenzent jako członek Warszawskiej Grupy CMS przez szereg lat mógł obserwować działalność autora

rozprawy i może z całym przekonaniem stwierdzić, że wkład mgr Tomasza Früboesa w opracowanie i zastosowanie przedstawionej w rozprawie metodzie osadzania był bardzo duży i decydujący.

Recenzowana praca doktorska oparta jest na analizie 5 fb^{-1} danych pp zebranych przy energii $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ przy użyciu detektora CMS w roku 2011. Ze względu na zasady obowiązujące we współpracy CMS autor nie umieścił w niej wyników, które nie były opublikowane w chwili ukończenia rozprawy. Praca liczy nieco ponad sto stron i składa się z Wstępu, czterech Rozdziałów, Podsumowania oraz trzech Dodatków. Napisana jest w bardzo dobrym języku angielskim. We Wstępie autor bardzo zwięźle charakteryzuje Model Standardowy oraz główne testy tego modelu, które prowadzone są (bądź będą) przy wykorzystaniu akceleratora LHC. Następnie autor szczegółowo określa swój wkład w eksperyment Compact Muon Solenoid. Wkład ten obejmuje poza wspomnianym już opracowaniem metody osadzania udział w konstrukcji i uruchomieniu opartego o komory RPC układu wyzwalającego detektora (RPC TRIGGER), odpowiedzialność za istotną część oprogramowania *offline* tego układu jak i system wzorców (*patterns*), na którym ten układ jest oparty. Recenzent ocenia ten wkład jako duży i bardzo istotny.

Rozdział 1 poświęcony jest wprowadzeniu do Modelu Standardowego (SM) i roli w nim bozonu Higgsa. To krótkie i eleganckie wprowadzenie w połączeniu z Dodatkiem A podkreśla wiedzę autora ale nie wykracza poza zakres podręcznikowy. Zawiera jednak istotne z punktu rozprawy informacje o kanałach produkcji i rozpadu standardowego bozonu Higgsa podane w zakończeniu tego Rozdziału. Na pięciu stronach przedstawione są tu wiodące diagramy Feynmana dotyczące produkcji i rozpadu higgsa oraz przedstawione oczekiwane w MS wielkości przekrojów czynnych na produkcje oraz stosunki rozgałęzień dla różnych kanałów rozpadu bozonu Higgsa.

W Rozdziale 2 przedstawiony jest detektor CMS. Swoją opis autor rozprawy słusznie rozpoczyna o przedstawienia celów eksperymentu i strategii ich osiągnięcia. Następnie krótko omawia kolejne główne elementy detektora: nadprzewodzący magnes solenoidalny, półprzewodnikowy detektor śladowy, kalorymetry elektromagnetyczny i hadronowy. Nieco więcej uwagi autor poświęca detektorom mionowym i układowi wyzwalającemu detektora. W dalszej części Rozdziału omówiony jest bardzo krótko oparty na sieci GRID system rekonstrukcji zdarzeń zarejestrowanych przez detektor. Algorytmy rekonstrukcji zdarzeń są omówione bardziej szczegółowo, zwłaszcza te, które związane mogą być z rekonstrukcją i identyfikacją leptonu τ . Przykładem może być algorytm rekonstrukcji przypadku nazywany *Particle Flow*, w którym odpowiedzi detektorów śladowych i kalorymetrycznych są łączone.

Rozdział 3 pracy stanowi jądro rozprawy. Autor przedstawia dokładnie w nim metodę osadzania czyli zastąpienia zarejestrowanej odpowiedzi detektora dla pary pochodzących z procesu Drelli-Yana mionów przez symulowany rozpad dwóch leptonów τ . Tak otrzymany przypadek służy do oszacowania tła od procesów Drelli-Yana do produkcji higgsa rozpadającego się w kanale $H \rightarrow \tau\tau \rightarrow \mu + \tau_{jet}$. Ta prosta ideowo metoda wymaga użycia odpowiedniej informacji z przetworzonych już danych oraz wielokrotnego sprawdzenia poprawności stosowanej procedury. Autor oparł swoje postępowanie o dostępną informację z algorytmu *Particle Flow* łączącą informacje o zarejestrowanych cząstkach z detektorów śladowych i kalorymetrów. Dokonał też wielu testów metody: sprawdził wpływ niepewności systematycznych takich jak efektywność wyboru przypadków mionowych Drelli-Yana, promieniowania hamowania emitowanego przez miony, błędu pomiaru pędu mionu. Ostatecznym testem metody jest dokonane przez autora

porównanie rozkładu masy efektywnej końcowego układu $\mu\tau_{jet}$ dla próbki symulowanych przypadków DY z stanem końcowym $\tau\tau$ i z takim samym stanem końcowym otrzymanym metodą osadzania. Do obu próbek zastosowano te same cięcia służące do wyboru przypadków $H \rightarrow \tau\tau \rightarrow \mu\tau_{jet}$. Zgodność otrzymanych rozkładów jest w pełni zadawalająca. Pozwala to uznać opracowaną przez mgr Tomasza Früboesa metodę *embeddingu* za w pełni poprawną.

Rozdział 4 zawiera omówienie wyników poszukiwań bozonu Higgsa w kanale $H \rightarrow \tau\tau \rightarrow \mu + \tau_{jet}$. Jak pisze sam autor, jest to uproszczona wersja analizy przedstawionej w opartej na prawie identycznej statystyce publikacji współpracy CMS z roku 2012. Autor wykonuje zatem samodzielnie i omawia poszczególne kroki tej analizy. Przedstawione są cięcia zastosowane *online* oraz *offline*. Metoda osadzania pozwala określić liczbę nieredukowalnego tła pochodzącego z procesów Drella-Yana prowadzących do produkcji pary $\tau\tau$. Uwzględnione jest również tło pochodzące od procesów QCD, produkcji $W+d\bar{z}$, wzięte jest pod uwagę zjawisko nakładania się przypadków (*pileup*). Standardowy obecnie wykres wzmocnienia oczekiwanego sygnału higgsa w stosunku do Modelu Standardowego pokazuje, że zgodnie z oczekiwaniami dla badanej przez autora rozprawy liczby przypadków sygnał świadczący o produkcji bozonu Higgsa nie jest widoczny.

Nie bez znaczenia dla oceny pracy doktorskiej mgr Tomasza Früboesa jest zawartość Dodatków. Dodatek A jest uzupełnieniem Rozdziału I. Dodatek B przedstawia wykonane przez autora oszacowanie efektywności wyszukiwania przypadków hadronowych rozpadów leptonu τ . Dodatek C zawiera szczegółowy opis opartego o komory RPC układu wyzwalającego (RPC TRIGGER), w tym opis algorytmów stosowanych przez układ porównujący wzorcowe tory z obserwacją doświadczalną. Wkład autora rozprawy w utworzenie sprawnego systemu wzorców był bardzo duży. Dodatek ten zawiera również wyniki przeprowadzonych przez autora rozprawy studiów nad możliwością wykorzystania detektorów GEM w układzie wyzwalającym.

Mgr Tomasz Früboes napisał bardzo dobrą rozprawę doktorską. Opracował metodę, która pozwoliła oszacować tło do produkcji bozonu Higgsa, stała się narzędziem wykorzystywanym przez współpracę CMS w analizie danych i ostatecznie przyczyniła się do odkrycia przez współpracę CMS nowej cząstki. Błędów merytorycznych w pracy nie stwierdziłem. Strona edytorska pracy sprawia bardzo dobre wrażenie, nie zmienia tego kilka literówek. Przykładowo na stronie 39 pojawia się *inverse mass* (zamiast *invariant mass*), na stronie 44 odnośnik w nawiasie powinien być do *Figure 3.2* a na stronie 47 mamy rezultat złej składni LaTeX'a). Z pewnością nie zmniejsza to wartości pracy.

Uważam, że recenzowana praca w pełni spełnia warunki stawiane przez ustawę pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgr Tomasza Früboesa do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

