

Prof. dr hab. Elżbieta Richter-Wąs
Instytut Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego
30-059 Krakow, ul. Reymonta 4

Recenzja pracy doktorskiej
mgr. Tomasza Fruboesa

‘Search for neutral Higgs boson in
 $H \rightarrow \tau\tau \rightarrow \mu\tau_{jet}$ final state in the CMS experiment’

Tematem przedstawionej rozprawy doktorskiej pana mgr. Tomasza Fruboesa jest analiza dotycząca poszukiwania bozonu Higgsa w eksperymencie CMS na zderzaczu hadronowym LHC w laboratorium CERN. Analiza oparta jest o dane eksperymentalne zebrane w roku 2011 w zderzeniach wiązek proton-proton przy energii $\sqrt{s} = 7$ TeV.

Model Standardowy oddziaływań elektrosłabych opisuje dostępne dane eksperymentalne z imponującą precyzją. Ostatnim brakującym elementem weryfikującym ten model jest potwierdzenie istnienia cząstki Higgsa przewidywanej przez wprowadzony w tym modelu mechanizm spontanicznego łamania symetrii jako formalizmu umożliwiającego nadanie masy fermionom oraz bozonom pośredniczącym. Obserwacja produkcji nowej cząstki o masie ~ 126 GeV, mogącej być poszukiwaną cząstką Higgsa, w kanale rozpadu $H \rightarrow \gamma\gamma$ oraz $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$, została ogłoszona w lipcu 2012 roku przez eksperymenty ATLAS i CMS na akceleratorze LHC w oparciu o dane zebrane w latach 2011-2012. Jak dotychczas wyniki pomiarów, w granicach ich błędu, są konsystentne z przewidywaniami Modelu Standardowego dotyczącymi własności cząstki Higgsa. Ostatnie rezultaty prezentowane na konferencji Moriond EW 2013 przez eksperyment CMS wskazują na obserwację również sygnału $H \rightarrow \tau\tau$ na poziomie 2.9σ . Oczekiwane jest że, po dalszej optymalizacji analizy, będzie możliwe w oparciu o dane z Run I akceleratora LHC potwierdzenie obserwowalności rozpadu cząstki na fermiony tym samym weryfikacja sprzężenia Yukawy.

Przedstawiona rozprawa doktorska dotyczy więc niewątpliwie jednej z najbardziej przełomowych analiz w fizyce cząstek elementarnych w ostatnich latach. Została zrealizowana w ramach udziału autora w przygotowywanym najbardziej istotnym przedsięwzięciu eksperymentalnym ostatnich lat, we współpracy z dużą międzynarodową grupą badawczą. Oryginalne wyniki autora zawarte w przedstawionej rozprawie zostały uwzględnione w publikacjach kolaboracyjnych dotyczących rezultatów otrzymanych z analizy tego sygnału w danych zebranych w roku 2011. Rozwinięte przez niego techniki eksperymentalne dotyczące oszacowania dominującego tła dla poszukiwanej sygnatury $H \rightarrow \tau\tau$ zostały zastosowane do przełomowej analizy danych z roku 2012, po raz pierwszy przedstawionej przez kolaborację CMS na konferencji Moriond EW 2013.

Praca doktorska pana mgr. T. Fruboesa jest napisana w języku angielskim i została starannie wyedytowana zarówno pod względem językowym jak i graficznym. Praca, zawarta na 111 stronach, składa się ze wstępu, 4 rozdziałów oraz 3 dodatków. Praca zawiera w sumie ponad 50 rysunków, ponad 10 tabel oraz odpowiednio obszerny spis literatury (74 pozycji).

Praca została podzielona na kilka części:

- Wprowadzenie do Modelu Standardowego oraz przewidywań dotyczących procesów produkcji i rozpadu bozonu Higgsa (rozdz. 2). Rozdział stanowi klarowne wprowadzenie do tematyki rozprawy doktorskiej i jest udokumentowany odnośnikami do literatury. Rozszerzenie omówienia sektora Higgsa w Modelu Standardowym zostało zawarte w dodatku A.
- Bardzo przejrzysty opis detektora eksperymentu CMS oraz możliwości rekonstrukcji stanów końcowych interesujących dla dyskutowanej analizy. Zakres przedstawionej informacji jest znakomicie wyważony i jest dobrze udokumentowany literaturowo.
- Część zasadnicza pracy składa się z opisu metody oszacowania tła pochodzącego od produkcji pary leptonów τ w procesie Drell-Yan (rozdz. 3) oraz zastosowania jej do danych zebranych w roku 2011 w analizach mających na celu poszukiwanie sygnału cząstki Higgsa w rozpadzie $H \rightarrow \tau\tau$ (rozdział 4). Opracowany został algorytm do tzw. *embedding* symulowanych rozpadów leptonów τ w zarejestrowanych przypadkach $Z \rightarrow \mu\mu$ oraz przeprowadzona została analiza błędu systematycznego tej metody zastosowanej do szacowania tła pochodzącego od procesu produkcji $Z \rightarrow \tau\tau$. Przedstawiona została (rozdz. 4) kompletna, jakkolwiek uproszczona w stosunku do publikowanej przez eksperyment CMS, analiza obserwowalności sygnału $H \rightarrow \tau\tau$ w zakresie masy 110-150 GeV. Otrzymane przez doktoranta wyniki są konsystentne z wynikami otrzymanymi przez kolaborację CMS. Ważny element przeprowadzonej przez autora analizy dotyczący pomiaru efektywności identyfikacji leptonu τ został opisany w dodatku B.
- W dodatku C podsumowany został wkład autora w konstrukcję, integrację i utrzymanie w działaniu RPC triggera za który grupa polska w eksperymencie CMS jest odpowiedzialna. W szczególności przedstawiona została analiza dotycząca możliwości użycia detektora GEM (Gas Electron Multipliers) w trygerze pierwszego stopnia eksperymentu CMS.

Uważam że tematyka przedstawionej pracy doktorskiej jest niezwykle ważna i zawartość merytoryczna pracy zdecydowanie odpowiada wymaganiom stawianym pracom doktorskim. Doktorant miał tę niezwykłą możliwość uczestniczenia i wniesienia swojego wkładu w analizę, która doprowadziła w kolejnym roku do obserwacji sygnału $H \rightarrow \tau\tau$ na poziomie 2.9σ .

Bardzo istotnym elementem rozwoju naukowego doktoranta w tym okresie był także jego udział w przygotowaniu i działaniach związanych ze zbieraniem danych przez eksperyment CMS w trakcie Run I akceleratora LHC. Obejmowało to prace związane z konstrukcją, integracją, testowaniem systemu triggerowania poziomu pierwszego przy pomocy z wykorzystaniem komór RPC. Ta tematyka jest przedstawiona w dodatku C recenzowanej pracy doktorskiej.

Po przeczytaniu pracy, pewnie niedosyt pozostawia jednakże fakt że wyniki analizy przeprowadzonej przez doktoranta są prezentowane bardziej jakościowo niż ilościowo. Mam tu na myśli stosunkowo małą ilość tabel podsumowujących błąd systematyczny niesłyszanie ważnej metody *embedding* prezentowanej w rozdziale 3 oraz nieuwzględnienie na rysunkach w rozdziale 4 rozkładów dane/teoria czy stosunkowo małą ilość szczegółów dotyczących pośrednich wyników doprowadzających do końcowego oszacowania 95% CL prezentowanego na rysunku 4.8. Brak jest np. umieszczenia informacji dotyczących używanych generatorów Monte Carlo, czy tabeli podającej użytą normalizację dla przewidywań przekroju czynnego dla sygnału cząstki Higgsa.

Zdaje sobie sprawę iż reguły wewnętrzne kolaboracji CMS mogły spowodować że niektóre zbyt szczegółowe wyniki nie mogły być upublicznione w prezentowanej rozprawie. Miałam okazję kilkakrotnie dyskutować z mgr. T. Froboesem przeprowadzaną przez niego analizę, w szczególności technikę tzw. *embedding* dla oceny tła pochodzącego od produkcji DY i dyskusja ta znakomicie potwierdziła dużą kompetencję autora rozprawy w zakresie tematyki prezentowanej rozprawy doktorskiej. Tak że brak tych szczegółów nie umniejsza mojego przekonania o dużej wartości merytorycznej i rzetelności przeprowadzonej przez autora analizy, jakkolwiek przedstawiona do recenzji praca doktorska niewątpliwie by zyskała gdyby zostały one w niej zaprezentowane.

Druga podstawowa uwaga krytyczna która nasuwa się po przeczytaniu tej pracy, to że zdecydowanie brakuje w niej odniesienia się do obserwacji ogłoszonych przez obie kolaboracje LHC w lipcu 2012 roku, co niewątpliwie jest bardzo ważnym osiągnięciem w historii Fizyki Wysokich Energii. Brakuje podkreślenia już we wstępie jak, w świetle tych wyników, niesłychanie aktualna jest tematyka rozprawy doktorskiej. Rozprawa doktorska dotyczy przecież analizy w tym zakresie masy w którym nastąpiła obserwacja masywnej cząstki, której dotychczasowo mierzone własności wskazują na konsystencje w przewidywanymi dla bozonu Higgsa. Jakkolwiek rozprawa doktorska dotyczy analizy danych 2011 roku, na ostatnim etapie jej przygotowywania wyniki z lipca 2012 były już publiczne i zdecydowanie należało się do nich odnieść. Szkoda też że podstawowe publikacje obu kolaboracji dotyczące tej obserwacji też nie zostały umieszczone w spisie literatury.

Podsumowując, uważam że przedstawiona rozprawa doktorska jest na wysokim poziomie, dotyczy bardzo istotnej tematyki współczesnej fizyki wysokich energii i została zrealizowana w ramach współpracy z dużym zespołem doświadczalnym. Za podstawowe osiągnięcie autora uważam wiodący udział w przygotowaniu metody dla oszacowania tła pochodzącego od produkcji DY oraz przeprowadzenie kompletnej analizy obserwowalności sygnału zakończonej przedstawieniem limitu w stodunku do przekroju czynnego przewidywanego przez Model Standardowy. Za bardzo znaczący wynik autora uważam również fakt że przedstawiona w rozprawie metoda *embedding* została wykorzystana w opublikowanych w latach 2011-2013 pracach eksperymentu CMS dotyczących poszukiwania cząstki Higgsa w rozpadzie na parę leptonów τ .

Oceniam przedstawioną rozprawę doktorską jako bardzo dobrą, spełniającą wymagania ustawy dotyczące rozpraw doktorskich i wnoszę o dopuszczenie do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

S. Richter-Was

Elzbieta Richter-Was

