



Kraków, dn. 07.04.2015

Prof. dr hab. Bogdan Muryn  
muryn@newton.ftj.agh.edu.pl

Ocena dorobku naukowego dr Artura Kalinowskiego związana z procedurą nadania stopnia dr habilitowanego, oparta o monografię pt.

"Wybrane aspekty poszukiwań bozonu Higgsa z Modelu Standardowego w zderzeniach proton-proton w eksperymencie CMS przy LHC".

Niniejsza opinia poświęcona jest osiągnięciom naukowym dr Artura Kalinowskiego (nazywanego w dalszej części recenzji również Autorem), zatrudnionego w charakterze adiunkta w Uniwersytecie Warszawskim i jest związana z procedurą przyznania stopnia doktora habilitowanego. W rozpatrywanym przypadku elementem podlegającym bezpośredniej ocenie, jest autoreferat wraz z monografią. Dr Artur Kalinowski karierę naukową rozpoczął w 2002 roku kontynuując dalszą edukację na poziomie studiów doktoranckich, które zakończył przygotowaniem rozprawy doktorskiej i jej obroną w 2006 roku. Z przedstawionego przez Autora autoreferatu jednoznacznie wynika, że zainteresowania Dr Artura Kalinowskiego, od momentu uzyskania stopnia magistra, poszły w stronę udziału w eksperymentach na zderzaczu LHC co, w przypadku fizyków warszawskich, skutkowało w większości udziałem w Kolaboracji (nazywanej dalej Współpracą) CMS. Nie można w czasach współczesnych przedsięwzięć eksperymentalnych prowadzić analizy danych bez zrozumienia budowy poszczególnych detektorów i ich oprogramowania oraz zasad rządzących rejestracją stanów końcowych zderzeń p-p (nazywanych też kanałami). Myślę, że świadomość tego kierowała również Habilitantem, który z jednej strony zajął się niełatwym problemem częściowego opracowania procedury podejmowania decyzji związanych z wyzwalaniem aparatury zapisu danych (trygery), zaś z drugiej równolegle uczestniczył czynnie w pracach prowadzących do odkrycia obiektu uważanego za cząstkę Higgsa (dalej oznaczanego również jak H).

Na początek chciałbym odnieść się do wyboru tematu przez Habilitanta oraz Jego udziału w realizacji wybranej tematyki, co skutkowało tytułem rozprawy - "Wybrane aspekty poszukiwań bozonu Higgsa z Modelu Standardowego w zderzeniach proton-proton w eksperymencie CMS przy LHC". Sądzę, że jeśli chodzi o wybór tematyki, to jej atrakcyjność była jednym z argumentów pomocnych w podjęciu decyzji, choć w przypadku braku sygnału (zgodnie z przysłowiem, "...a klęska jest sierotą") postawiłoby to Habilitanta w nieco mniej komfortowej sytuacji. Badania zakończyły się sukcesem nie tylko dla Autora rozprawy, ale pośrednio także dla wszystkich polskich zespołów uczestniczących w pracach CERN-u. Nie zamierzam uzasadniać naukowej potrzeby poszukiwań Higgsa, ponieważ argumentacja ta jest znana szerokiemu gronu fizyków, stwierdzam tylko, że odkrycie Nowej Cząstki nie otwiera jeszcze drzwi do tzw. świata Nowej Fizyki ze względu na potrzebę dalszych badań prowadzących do dokładniejszej identyfikacji znalezionej obiektu (spin, parzystości etc.). W tego typu pracach, zgodnie z podaną informacją, Autor bierze udział.

Monografia oparta jest o dane zarejestrowane w latach 2011 – 2012, odpowiadające scałkowanym świećnościom  $4.9 \text{ fb}^{-1}$  i  $19.7 \text{ fb}^{-1}$ , odpowiednio przy energiach zderzeń  $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$  oraz  $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ . Praca składa się z kilku zasadniczych części - podstaw fizycznych koniecznych do zrozumienia fizyki bozonu Higgs'a, opisu detektora CMS, krótkiego przeglądu zastosowanych procedur statystycznych oraz najobszerniejszej części składającej się z opisu analiz dotyczących poszczególnych stanów rozpadu bozonu H: ( $H \rightarrow b\bar{b}$ ,  $H \rightarrow \tau\tau$ ,  $H \rightarrow \gamma\gamma$ ) oraz  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ ,  $H \rightarrow WW \rightarrow 2l + 2\nu$ ). Autor kończy monografię rozdziałem pt. "Wyniki zbiorcze".

W tak dużych zespołach, których łączna liczba członków wyraża się w tysiącach, wkład do opracowywanej analizy poszczególnych uczestników z osobna wymaga specyficznej oceny. Sądzę, że dlatego też dr Artur Kalinowski zaczyna Monografię od przedstawienia wkładu własnego, w którym określa zarówno swój bezpośredni przyczynek do analizy odkrycia bozonu H, jak i też długofalową działalność prowadzoną od początku konstrukcji detektora CMS (2002 r.), którą to działalność traktowałbym jako pośredni, ale też ważny wkład Autora w omawiane odkrycie.

Pierwszy rozdział traktujący o "Mechanizmie Higgsa w Modelu Standardowym", jest napisany zwięźle a pomimo to nie pomija żadnego istotnego w tym względzie szczegółu. Autor wyjaśnia zależności sprzężeń od mas stanów końcowych, a posługując się niezbędnymi dla wyjaśnienia rozkładami prezentuje przekroje czynne dla produkcji H wraz ze stosunkami rozgałęzień dla poszczególnych stanów końcowych jego rozpadu. Jest to informacja, nawiązująca do omawianych później analiz kanałów rozpadu H. Czasem w ferworze opisu Habilitant używa "slangu fizycznego" (np. "... złamane są trzy generatory związane z bozonami W oraz Z"), ale to nie umniejsza merytorycznej wartości napisanego rozdziału.

W drugim rozdziale zawarty jest opis detektora CMS. Suchy, z racji tematu, opis detektorów zakończony jest bardzo dobrze napisanym rozdziałem traktującym o "Rekonstrukcji obiektów fizycznych". W rozdziale tym Autor szczegółowo zdaje relację z przebiegu detekcji cząstek użytych w analizach rozważanych potem kanałów rozpadu H. Nie do końca zgodziłbym się z wyjątkowością techniki "Particle Flow". W różnych technicznie wydaniach jest to technika stosowana przez wiele zespołów pracujących na zderzaczu LHC i ze względu na różnice budowy detektorów, różnie stosowana.

Rozdział trzeci szkicuje metody statystyczne używane w ustaleniu stopnia prawdopodobieństwa pojawienia się w analizie badanego sygnału. Prezentowana procedura zawiera podstawowe elementy testowania hipotez ze względu na tło, sygnał etc. Autor wspomina zgrabnie o efekcie LEE, uwzględnianym od niedawna w ocenach statystycznych, polegającym na uwzględnieniu prawdopodobieństwa tego, że fluktuacja przypadków określonego typu może się zdarzyć dla dowolnego zakresu wartości badanej zmiennej. W trakcie dyskusji dotyczącej wykluczenia sygnału opis dotyka problemu tzw. Nuisance Parameters, który pośrednio związany jest z błędem systematycznym. W ogólności jest to dość skomplikowany problem, którego wyjaśnienie należało może bardziej rozwinąć, ze względu na wagę techniki wyznaczania błędu systematycznego. Nie jest wyjaśnione, jaki jest związek pomiędzy wektorem parametrów nuisance  $\theta_\mu$  a wektorem maksymalizującym funkcję największej wiarygodności (oznaczonym jako  $\hat{\theta}_\mu$  we wzorze na str. 38), bo we wspomnianym wzorze symbol  $\theta_\mu$  w ogóle nie występuje. Autor wyjaśnia metody weryfikacji na przykładzie rozkładu jednego parametru, choć najczęściej zarówno dopasowanie do postaci sygnału jak i ocena "znaczącości" jest procedurą kilku, na dodatek skorelowanych ze sobą, wielkości. Myślę, że celem Autora było przedstawienie złożoności takiej oceny bez wchodzenia w szczegóły.

Pozostała część rozprawy (rozdziały 4-8) dotyczy analiz poszczególnych kanałów rozpadu bozonu H. Użycie liczby mnogiej "analiz" wiąże się z faktem, że różne stany końcowe rozpadu Higgsa



wymagają odmiennych technik detekcyjnych, raz, ze względu na identyfikację stanu końcowego, a dwa, ze względu na różny udział tła. Rozdział odnoszący się do rozpadu  $H \rightarrow \tau\tau$ , będący często występującym kanałem, ze względu na wartość rozgałęzienia, jest najobszerniejszy, co wydaje się być zrozumiałe ze względu na bezpośredni w tej analizie udział Habilitanta. Jak rozumiem Autor opracował metodę selekcji dla rozpadu  $H$  powstałego w wyniku fuzji gluonowej oraz w wyniku fuzji bozonów pośredniczących. Opis postępowania zawiera sporo, skondensowanych czasem, informacji. W kontekście poszukiwań bozonu Higgsa, obszar wykluczenia był definiowany w przestrzeni parametru wzmocnienia  $\mu$  oraz masy bozonu H. Autor dokładnie analizuje kontrybucję różnego rodzaju tła, biorąc również pod uwagę tło pochodzące od innych, nie rozważanych w tym przypadku, rozpadów bozonu H. Daje to niebagatelny przyczynek nawet na poziomie do 45%. Wszystkie rodzaje niepewności są przytoczone w Tabeli 4.2. Analizując jej zawartość miałem trudność w interpretacji kolumny "zmiana akceptancji". Niepewność wyznaczenia akceptancji ma oczywisty wpływ na niepewności systematyczne wyniku, niemniej nie rozumiem, skąd niekiedy tak duży zakres zmiany wartości akceptancji (np.  $Z$ +jety, 2%-80%) i względem jakiego etapu selekcji są one wyznaczone (Autor co prawda powołuje się na odpowiednią publikację), ale pobieżny jej ogląd też niczego nie wyjaśnia).

W rozdziale 4.5 "Wyniki" przedstawione jest porównanie otrzymanych rezultatów z przewidywaniami wynikającymi z SM wraz ze znormalizowanymi odpowiednio przyczynkami pochodzącymi od tła. Analiza poparta wieloma rozkładami wykazuje nadmiar przypadków względem tła na poziomie 3 standardowych odchyłeń zaś minimum funkcji największej wiarygodności pozwala na oszacowanie masy obserwowanego obiektu, rozpadającego się na parę leptonów, wynoszącej  $122 \pm 7 \text{ GeV}$ . Jeśli chodzi o tzw. znaczącość statystyczną otrzymany wynik plasuje się poniżej ogólnie przyjętej wartości  $5\sigma$ , ale poparty jest przez obserwowaną nadwyżkę przypadków w innych rozpatrywanych kanałach.

W następnych rozdziałach 5-8 dr Artur Kalinowski zaznajamia nas z poszukiwaniami H w konkurencyjnych stanach rozpadów  $H \rightarrow b\bar{b}$ ,  $H \rightarrow \tau\tau$ ,  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ ,  $H \rightarrow WW \rightarrow 2l + 2\nu$  oraz  $H \rightarrow \gamma\gamma$ . Sposób przedstawienia analizy poszczególnych rozpadów wydaje się być przemyślany i podobny do prezentacji rozpadu  $H \rightarrow \tau\tau$ , w którym Autor rozprawy brał bezpośredni udział. Habilitant porównuje dwie zasadnicze wielkości decydujące o ewentualnym pozytywnym wyniku badań – pierwszy, to wartość rozgałęzienia, a drugi, to eksperymentalna możliwość odkrycia uwzględniająca możliwości detektora oraz wielkość i łatwość separacji tła. W każdym z wymienionych przypadków omówiona jest zasadność analizy, strategia badań wraz z graficznym uwidocznieniem zasadniczych dla omawianej detekcji elementów detektora, selekcja, wpływ tła, oraz dyskusja wyników. Autor omawia równoległe również rezultaty Współpracy eksperymentu ATLAS porównując je z wynikami Współpracy CMS. Nie widzę potrzeby szczegółowego omawiania każdego z podobnie zbudowanych rozdziałów, podkreślając w każdym przypadku szeroką wiedzę i kompetencję Autora.

Rozdziały 9 i 10 stanowią całościową analizę otrzymanych rezultatów. Podane są parametry wzmocnienia, wraz z ich niepewnościami dla każdego kanału z osobna, uzyskane zarówno przez CMS jak ATLAS. Swoją drogą dobrze by było, gdyby Habilitant umieścił uwagę odnoszącą się do klasycznie pojętych niepewności statystycznych. Rozumiem, że jest to oczywisty proceder wynikający z metody ekstremalizacji funkcji wiarygodności, ale dla niektórych wyników ciekawe byłoby oszacowanie wzajemnego udziału systematyki względem niepewności statystycznej (nazwanej w pracy błędem). Bodajże raz Autor odnosi się do tego typu niepewności (błędu) przy omawianiu rozpadu  $H \rightarrow \gamma\gamma$ . Poruszam ten problem ze względu na rys. 10.1, w którym zawarte są prognozy precyzji wyznaczenia sprzężeń, a cytowana jest tylko niepewność systematyczna, co oznaczałoby niezależność wyniku od liczebności danych eksperymentalnych. Dr Artur Kalinowski analizuje również wartości sprzężeń (poprzez współczynniki wzmocnienia) dzieląc je na dwie klasy (zawierające wszystkie badane kanały rozpadu) w zależności od procesu produkcji H oraz jego rozpadu (rys 9.2). Oba, komplementarne względem siebie wyniki, umieszczone są na dwuwymiarowym diagramie, na którym zaznaczony jest również punkt odpowiadający



przewidywaniom Modelu Standardowego. Końcowa konkluzja stwierdza, że przy możliwej w najbliższym czasie 10% precyzji, wszystkie teoretyczne scenariusze przewidujące masę Higgsa w okolicy 122 GeV są w zasadzie równouprawione.

Ocena tego typu monografii powinna składać się z oceny wyboru tematyki, stopnia udziału Habilitanta, o ile możliwe, oceny poprawności otrzymanych wyników oraz sposobu ich prezentacji. Ocena wyboru tematyki została omówiona na początku recenzji, przejdę zatem do stopnia udziału dr Artura Kalinowskiego. Z informacji Autora oraz z listu referencyjnego sporządzonego przez szefa współpracy CMS dr Tiziano Camporesi wynika, że bezpośrednim wkładem do analizy był zasadniczy udział w opracowaniu metody poszukiwań Higgsa poprzez proces jego produkcji przez parę bozonów pośredniczących (WW i ZZ) z emitowanych kwarków, rozpadającego się następnie na lepton  $\tau\tau$  ze stanem końcowym składającym się z muonu, dwóch neutronów oraz tzw. jetu pochodzącego z hadronowego rozpadu pozostałego leptonu  $\tau$ . Dr Artur Kalinowski opracował kryteria uwzględnienia tła pochodzącego z niezwiązanych z produkcją Higgsa procesów chromodynamicznych wraz z tłem mającym dominujący wkład do stanu końcowego  $V_{W,Z} + Jet$ . Nie należy zapominać, że w dużej mierze ogólne prace nad systemami wyzwalającymi zapis przypadków (zarówno trygerów 1-go stopnia jak i trygerów wysokiego stopnia HLT) były również ważnym, choć pośrednim, przyczynkiem do odkrycia H. W dość zresztą dokładnym wyszczególnieniu swojej działalności, (łącznie z odnośnikami do odpowiednich artykułów), Autor nie podaje stopnia swojego wkładu, ponieważ ustalenie tego nie jest łatwym zadaniem. Rekomendacyjny list szefa zespołu CMS w kilku celnych zdaniach podkreśla niebagatelny udział Habilitanta w przedstawianej analizie.

Jeśli chodzi o ocenę metod użytych w analizie oraz samej analizy i jej wyników, to znając procedury obowiązujące w tego typu zespołach zakładam, że każdy, nawet pośredni wynik, podlegał weryfikacji przez inny zespół (osobę), a poszczególne etapy analizy zostały finalnie ukierunkowane oraz zaakceptowane decyzją całej Współpracy CMS. Korzystając z takiego komfortu pominię próby dyskusji odnoszącej się do zasadności wyboru kryteriów selekcji, wybranych zmiennych, prawdziwości ich rozkładów, poprawności wyciąganych wniosków etc. Myślę, że Autor musiał trzymać się pewnego schematu wypracowanego nie tylko przez zespół CMS, ale określonego w pewnej mierze przez wszystkie zespoły pracujące na zderzaczu LHC. Jeśli chodzi o sposób przedstawienia wyników to, pomimo hermetycznego miejscami opisu, oceniam go wysoko. Podoba mi się konstrukcja rozprawy oraz dobrane, starannie przygotowane rysunki, uzupełnione często odpowiednimi odnośnikami.

Do oceny osiągnięć naukowych Habilitanta należy dodać również inne aspekty działalności naukowej i organizacyjnej. Dr Artur Kalinowski jest autorem/współautorem ponad 310 publikacji naukowych w recenzowanych czasopiśmie o światowym zasięgu. Reprezentował Współpracę CMS uczestnicząc czynnie w 10 międzynarodowych konferencjach. Formalne parametry oceny, takie jak łączna liczba cytowań (bez samo-cytowań) i index Hirscha zamykają się odpowiednio wysokimi wartościami 7790 oraz 37. Zgodnie z informacją Autora wygłosił on około 70 referatów związanych z działalnością w eksperymentach LHC, a osiągnięcia Habilitanta na polu dydaktycznym, wyrażające się promotorstwem 3 prac magisterskich oraz dwoma dalszymi w przygotowaniu (w ciągu 4 lat) wraz z szeregiem popularyzatorskich referatów, propagujących dziedzinę Fizyki Wysokich Energii, dodatkowo pozytywnie wartościują Habilitanta. Niezależnie od uczestnictwa w 4 grantach w charakterze wykonawcy, dr Artur Kalinowski był również kierownikiem dwuletniego grantu poświęconego hadronowym rozpadom taonu w ramach SM.

Podsumowując, zarówno przedstawiona do recenzji monografia jak i dorobek naukowy dr Artura Kalinowskiego świadczą o jego dużych kompetencjach i dojrzałości badawczej. Uważam, że jest on bardzo dobrym fizykiem i zasługuje na dopuszczenie do dalszego etapu procedury habilitacyjnej.

