

2019 -01- 24 *MBint.*

Prof. dr hab. Leszek Roszkowski
Zakład Fizyki Teoretycznej
Narodowe Centrum Badań Jądrowych
oraz
Astrocent
Centrum Astronomiczne im. M. Kopernika

Warszawa, 10.01.2019 r.

OCENA
rozprawy habilitacyjnej pt „Implikacje pomiarów własności bozonu Higgsa dla supersymetrycznych rozszerzeń Modelu Standardowego”

Uwagi wstępne

Dr Marcin Badziak jest fizykiem teoretykiem pracującym w dziedzinie cząstek elementarnych. Od początku swojej drogi naukowej, a właściwie już edukacji akademickiej, był związany z Wydziałem Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, gdzie od 2012 r. jest zatrudniony na pozycji adiunkta. W tym okresie odbył staż podoktorski w University of California at Berkeley oraz Lawrence Berkeley National Laboratory w USA (3/2016-2/2018), który był sfinansowany w ramach programu Mobilność Plus przez MNiSW. Wcześniej (4/2011-9/2012), po uzyskaniu stopnia doktora nauk fizycznych na UW odbył staż podoktorski w University of Cambridge w Wielkiej Brytanii.

Obszarem jego działalności naukowej jest tzw. nowa fizyka czym zwykle określa się teorie i modele wychodzące poza tzw. Model Standardowy (MS) cząstek elementarnych (ang. beyond the Standard Model). Podejście to stwarza szeroką gamę implikacji dla budowania modeli teoretycznych, fenomenologii, kosmologii i astrofizyki cząstek (np. ciemna materia), itd. Modele nowej fizyki przewidują istnienie nowych cząstek oraz nowych wkładów do procesów mierzonych w doświadczeniach w akceleratorach niskich i wysokich i energii, zwłaszcza w LHC.

Szczególne miejsce w obszarze nowej fizyki zajmowały, i nadal zajmują, tzw. modele supersymetryczne lub modele SUSY (od ang. supersymmetry). Ujmując to bardzo ogólnie, w modelach SUSY liczba cząstek podwaja się w stosunku do MS, ale ich masy i inne własności nie są dobrze określone. Ze względu na wiele bardzo atrakcyjnych własności (w tym rozwiązanie problemów hierarchii i ciemnej materii, wielka unifikacja, kosmiczna inflacja, bariogeneza, etc.) podejście SUSY zyskało status niemalże paradygmatu w podejściu nowej fizyki. Z modelami SUSY wiązano wielkie, zapewne nazbyt wielkie, nadzieje na odkrycie nowych cząstek w LHC. Brak ich odkrycia z kolei spowodował, zapewne na zasadzie reakcji, pewne rozczarowanie, a czasami wręcz otwartą krytykę podejścia SUSY. W ocenie tak mojej jak i wielu ekspertów było to nieusprawiedliwione na gruncie argumentów naukowych. Żadna inna zaproponowana w ostatnich latach i dekadach idea nie okazała się równie ciekawa i obiecująca jak podejście SUSY.

2. Ocena rozprawy habilitacyjnej

2.1 Wybór tematyki

Jednym z centralnych aspektów podejścia nowej fizyki jest sektor Higgsa, który zwykle jest bardziej złożony niż sektor Higgsa MS, i gdzie przewidziane jest istnienie większej liczby fizycznych bozonów Higgsa. Należy podkreślić, że historyczne odkrycie bozonu Higgsa w LHC w 2012 r. nadało badaniom nad sektorem Higgsa w modelach nowej fizyki wielkiego impetu. (O ile nie będzie do zaznaczone inaczej, poniżej termin „bozon Higgsa” będzie odnosił się poniżej jedynie do odkrytej cząstki, a nie do innych potencjalnych stanów z sektora Higgsa.) Z drugiej strony ogromny wzrost zainteresowania tematem bardzo zwiększył element rywalizacji, przez co badania te stały się dużo bardziej intensywne.

Sektor Higgsa łączy się ściśle z zagadnieniem mechanizmu łamania symetrii elektroslabej, które jest kluczowym elementem tak w MS jak i w modelach nowej fizyki. Odkrycie w LHC bozonu Higgsa praktycznie potwierdziło zasadniczą słuszność tzw. mechanizmu Higgsa (z niewątpliwym wkładem w jego sformułowanie Brouta, Englerta i innych), ale nie wyjaśniło wszystkich jego zasadniczych aspektów. Kluczowym zagadnieniem pozostaje m. in. sam sektor Higgsa. Nie jest wyjaśnione, czy sektor Higgsa jest minimalny, jak w MS, czy też zawiera więcej pól i oddziaływań, oraz jakie mogą być ich własności. Zmierzone własności odkrytego bozonu Higgsa jedynie dość znacznie ograniczyły swobodę wyboru sektora Higgsa.

Ten właśnie obszar badań, implikacje pomiarów własności bozonu Higgsa dla supersymetrycznych rozszerzeń Modelu Standardowego, wybrany został jako wiodący temat rozprawy habilitacyjnej. Od lat pozostaje on jednym z kilku kluczowych zagadnień fizyki cząstek oraz oddziaływań fundamentalnych.

2.2 Przegląd prac składających się na rozprawę habilitacyjną

Rozprawa habilitacyjna oparta jest na serii 12 artykułów. Wszystkie zostały opublikowane w wiodących czasopismach naukowych w dziedzinie (głównie w JHEP, ale również np. w Phys. Rev. D a jedna praca nawet w Phys. Rev. Lett.). Ich tematem wspólnym jest bozon Higgsa. Prace zostały opublikowane w latach 2012-2018.

Oto krótka charakterystyka załączonych prac:

[H1] W pracy tej zbadana została tzw. odwrócona hierarchia mas sfermionów (czyli supersymetrycznych partnerów fermionów MS), gdzie możliwe jest uzyskanie poprawnej masy bozonu Higgsa (ok. $125 \text{ GeV}/c^2$) dla dość niskiej masy stopów rzędu $1 \text{ TeV}/c^2$. Motywacją dla pracy dostarczył znany już wtedy rezultat, że zmierzona masa bozonu Higgsa wymaga dużego mieszania między stopami, co zwiększa poprawki radiacyjne. Pokazano, że takie duże mieszanie może być uzyskane przez efekty 2-pętlowe w równaniach grupy renormalizacyjnej.

[H2] W autorskiej pracy dr Badziak przedyskutował implikacje znanej już masy bozonu Higgsa dla spektrum mas cząstek SUSY w jednym z wariantów modelu wielkich unifikacji opartym na grupie SO(10) z unifikacją stałych Yukawy dla trzeciej generacji fermionów MS. Pokazał, że typowo cząstki SUSY muszą wtedy być bardzo ciężkie, daleko poza zasięgiem LHC, co było zgodne z rezultatami innych prac. Niemniej zidentyfikował kilka interesujących przypadków kiedy niektóre cząstki SUSY lub Higgsa miałyby szanse być w

LHC odkryte. Daje się to osiągnąć używając pewnego członu łamania SUSY, co prowadzi do pewnego szczególnego scenariusza nieuniwersalnych mas fermionów cechowania (ang. gauginos).

[H3] Model wielkich unifikacji oparty na grupie $SO(10)$ przy założeniu najbardziej ogólnej postaci nieuniwersalnych mas fermionów cechowania był w tej pracy użyty do pokazania, że możliwe jest uzyskanie dużych poprawek do przewidywań MS dla rozpadu bozonu Higgsa na dwa fotony. Pomiar tego procesu w doświadczeniach LHC był obarczony wtedy jeszcze dużym błędem, co inspirowało wielu autorów do badania i testowania z jego pomocą różnych możliwych, a dozwolonych jeszcze wówczas przez inne ograniczenia, scenariuszy nowej fizyki.

[H4] Masa bozonu Higgsa ma ważny wpływ na wiele przewidywań modeli SUSY, w tym nie bezpośrednio, lub bardzo słabo, związanych z sektorem Higgsa. Jest tak dlatego, że w modelach SUSY kilka parametrów wpływa na wiele fizycznych obserwabli. Jednym z nich jest tzw. tangens beta. W pracy pokazano, że przy dodatkowym założeniu, że rozbieżność na poziomie 3 sigma pomiędzy pomiarem i przewidywaniem MS dla anomalnego momentu magnetycznego mionu (tzw. $g-2$ mionu), masa Higgsa implikuje górne ograniczenie na masy stopów. Niemniej są one bardzo duże, rzędu kilkudziesięciu TeV/c^2 . W pracy podkreślono w tym kontekście możliwości planowanych przyszłościowych akceleratorów leptonowych i protonowych, oraz ich komplementarność. Oczywiście kluczową kwestią pozostaje, czy nowe doświadczenie w Fermilabie potwierdzi tzw. anomalie $g-2$ mionu, której istnienie nadal nie jest ogólnie przyjęte.

[H5] Pewne trudności z uzyskaniem poprawnej masy bozonu Higgsa dla stosunkowo lekkich stopów w minimalnym modelu SUSY z dwoma dubletami Higgsa (tzw. MSSM) skłoniły wielu autorów do zbadania w tym kontekście przewidywań modelu nieminimalnego (tzw. NMSSM) z dodatkowym singletem Higgsa. Pojawiają się wtedy nowe wkłady do masy bozonu Higgsa tak na poziomie drzewowym jak i poprawek kwantowych. W pracy wykazano istnienie obszarów parametrów w modelu, dla których nowe wkłady mogą być duże i w ten sposób pozwalają łatwiej uzyskać zgodność z masą bozonu Higgsa i innymi ograniczeniami. Pokazano przy tym kilka testowalnych implikacji dla innych ciekawych obserwabli.

[H6] Pozostając nadal w ramach NMSSM, autorzy rozpatrują w tej pracy pewien szczególny schemat łamania SUSY (tzw. model DGS) w ramach ogólniejszego mechanizmu zwanego po angielsku gauge mediation. Wbrew wnioskowi autorów modelu DGS, pokazano, że masa stopów może być dość niska, na skali $1 TeV/c^2$, jeśli założy się, że masa singletu Higgsa jest około $90-100 GeV/c^2$. Jest to kolejna z prac poszukujących sposobów pokazania, że zmierzona masa bozonu Higgsa dopuszczała (w świetle istniejących w tym okresie danych) istnienie stopów i/lub innych cząstek do potencjalnego odkrycia w LHC. W tym czasie tego typu działalność była dość popularna a motywacja całkiem zrozumiała.

Trzy kolejne prace dotyczyły dalszych szczegółowych studiów fenomenologicznych możliwych sygnałów nowej fizyki w LHC.

[H7] W podejściu DGS najlżejszą cząstką SUSY jest bardzo lekkie gravitino. Implikuje to możliwość potencjalnie mierzalnego przesuniętego wierzchołka w procesie rozpadu następnej w hierarchii mas cząstki SUSY (tu najlżejszego neutralina) na gravitino. Wykonano solidną i detaliczną analizę możliwości pomiarowych w LHC przez optymalizację cięć itd., w czym głównie ekspertami są współautorzy dra Badziaka.

[H8] Motywacją dla tej pracy (i wielu innych prac z tego okresu) były próby zidentyfikowania procesów z udziałem bozonu Higgsa, gdzie możliwe byłoby jeszcze zmierzenie potencjalnych rozbieżności z MS. Zbadano produkcję sygnału top—antytop—Higgs bozon, i pokazano, że w NMSSM (w przeciwieństwie do MSSM) taki efekt może być potencjalnie obserwowalny w drugiej fazie pracy LHC przy energii 13 TeV, przy założeniu dużych wartości masy singletu sektora Higgsa ale jedynie dla tak dużych wartości parametru λ (określającego samooddziaływanie singletu), że model staje się w tym parametrze nieperturbacyjnych już kilka dekad energii powyżej skali elektroslabej.

[H9] W pracy tej pokazano, że problem powyższy nie pojawia się, gdy singlet bozonu Higgsa jest lżejszy od odkrytego bozonu Higgsa, oraz gdy drugi dublet bozonów Higgsa ma masę w obszarze kilkuset GeV/c^2 .

Pozostałe trzy prace zostały napisane podczas stażu dra Badziaka w Berkeley wraz z lokalnym postdokim K. Harigaya. Dotyczyły zastosowania tzw. mechanizmu Twin Higgs (TH) w SUSY.

[H10] Zidentyfikowane zostały warunki pozwalające na uzyskanie poprawnej masy bozonu Higgsa i pokazano, że są one zgodne z ograniczeniami z LHC a dodatkowo poprawione są pewne oczekiwania teoretyczne (tzw. po ang. fine-tuning).

[H11] Zaproponowano tu szczegółowy model w ramach tego samego ogólnego scenariusza, w którym chroniczny problem z perturbacyjnością został rozwiązany przy zachowaniu poprawnej masy bozonu Higgsa, a dodatkowo poprawiony został fine-tuning.

[H12] Model powyższy został tu uogólniony wykorzystując ideę unifikacji oddziaływań. Jako taki ma szereg interesujących własności i został opublikowany w prestiżowym Phys. Rev. Lett.

2.3 Uwagi i podsumowanie

Przedstawiony jako osiągnięcie cykl 12 publikacji ma jeden główny temat wiodący (implikacje bozonu Higgsa). Są to głównie prace współautorskie, w większości ze znacznie bardziej znanymi fizykami (głównie S. Pokorski, ale także B. Allanach, E. Dudas, C. Wagner), ale zgodnie z przedstawionymi oświadczeniami wkład dra Badziaka (poza jedną pracą sześciu autorów) wynosił od 50 do 80%. Według załączonych oświadczeń, dr Badziak był głównym (prace jednoautorska H2 oraz H3, H4, H9) lub współautorem koncepcji (pozostałe poza H5). Na tej podstawie mogę więc stwierdzić, że habilitant wykazał się wymaganą samodzielnością naukową.

Dodatkowo, podczas staży zagranicznych (Cambridge, Berkeley) dr Badziak napisał kilka prac z lokalnymi fizykami (Allanach et al, Harigaya, także Wagner w Chicago), co bardzo dobrze świadczy o umiejętności nawiązywania współpracy poza swoim bezpośrednim otoczeniem i dojrzałości naukowej habilitanta.

Prace wzbudziły dość duże zainteresowanie, chociaż dotychczasowa liczba cytowań (poza H5) nie jest zadziwiająca, w tym tych wcześniejszych, od których opublikowania upłynęło więcej czasu, zwłaszcza biorąc pod uwagę bardzo dużą aktywność w dziedzinie. W pracach dra Badziaka duży nacisk jest położony na wyeksponowanie wpływu zależności fizycznych i matematycznych w ramach założonego scenariusza teoretycznego

na rozpatrywane obserwacje, i vice versa. Rachunki numeryczne są poprawne ale w mojej ocenie służą bardziej do zilustrowania poprawności obliczeń analitycznych niż do zaprezentowania bardziej globalnego spektrum możliwości dla rozpatrywanego scenariusza. Niemniej, wszystkie prace są na wysokim lub bardzo wysokim poziomie naukowym.

Dokumenty przedstawione do przewodu habilitacyjnego są przygotowane bardzo starannie. W szczególności autoreferat jest napisany wewnątrznie spójnym językiem i porusza istotne zagadnienia na odpowiednim poziomie koncepcyjnym i aspektów technicznych zwięźle i jasno. Zauważyłem jedynie kilka drobnych błędów, np. „spektr” zamiast „spektrów”, czy „Higgs i jego bliźniaczy partner są naładowani”, zamiast „Higgs bozon i jego bliźniaczy partner są naładowane”, które przy tak obszernym tekście są prawie nie do uniknięcia.

Podsumowując, w mojej ocenie przedstawione osiągnięcie naukowe w części stanowiącej wkład habilitanta, niewątpliwie stanowi znaczący wkład w rozwój fizyki bozonu Higgsa i spełnia ustawowy wymóg dotyczący oryginalnego wkładu autora w rozwój dyscypliny naukowej.

3 Ocena pozostałej działalności

Dr Badziak w okresie po uzyskaniu doktoratu napisał ponadto 11 innych, współautorskich prac (10 opublikowane w wiodących czasopismach naukowych, 1 wysłana do recenzji). Dotyczą one teorii wielkich unifikacji, ciemnej materii oraz interpretacji potencjalnych sygnałów nowej fizyki w LHC i związanych z tymi tematami innymi aspektami teorii. Prace te, wraz z tymi przedstawionymi jako osiągnięcie, prezentują bardzo szerokie spektrum tematyczne w ramach nowej fizyki, i świadczą o wysokim poziomie i dojrzałości naukowej habilitanta.

W podsumowaniu, stwierdzam, że rozprawa habilitacyjna dra M. Badziaka wyraźnie wskazuje na jego bardzo dogłębną i szeroką wiedzę i znajomość omawianej tematyki nie tylko ze strony teoretycznej, ale także, co nie jest ogólną regułą, ze strony doświadczalnej.

3. Ocena dorobku organizatorskiego, dydaktycznego i popularyzatorskiego

W obszarze projektów badawczych, dr Badziak obecnie kieruje grantem programu Sonata z NCN, a poprzednio uzyskał grant programu Mobilność Plus na wyjazd stażowy w Berkeley, oraz 2 inne mniejsze granty, uczestniczył w 4 innych jako wykonawca, oraz otrzymał 3 znaczące stypendia oraz 1 dyplom.

Dr Badziak wygłosił 30 referatów na krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych, w tym 6 na zaproszenie, co warto podkreślić jako bardzo dobry wskaźnik jego pozycji naukowej. Wygłosił też ponad 20 referatów, w tym około połowę w wiodących ośrodkach w dziedzinie na świecie.

Bardzo owocne dla jego kariery były zwłaszcza staże podoktorskie w Cambridge i Berkeley, oraz wizyty w takich centrach jak CERN, jak również nawiązanie i utrzymanie współpracy z kilkoma znanymi fizykami (np. Allanach, Wagner). Jest niezwykle ważne dla rozwoju młodego naukowca, żeby potrafił wyjść, choć w tym przypadku nie do końca, poza

krąg naukowy określony przez swoich dotychczasowych promotorów i opiekunów naukowych.

Działalność dydaktyczna oraz popularyzatorska habilitanta nie wyróżnia się niczym szczególnym ani na plus ani na minus. Dr Badziak był promotorem jednej pracy licencjackiej i pomagał przy pracy doktorskiej, a także był członkiem komitetu organizacyjnego 3 konferencji na Wydziale Fizyki UW, oraz jest recenzentem publikacji w 3 uznanych czasopismach naukowych.

4. Wnioski końcowe

Podsumowując, w moim przeświadczeniu dr Badziak jest niewątpliwie międzynarodowej klasy specjalistą w dziedzinie fizyki cząstek elementarnych. Jest w pełni samodzielnym badaczem posiadającym bardzo szeroką wiedzę w swojej dziedzinie oraz bardzo dobrą intuicję naukową, co pozwala mu na owocną pracę w bardzo ważnej i aktualnej dziedzinie badań. Przedstawione w pracy habilitacyjnej osiągnięcia stanowią istotny wkład do rozwoju badań nad implikacjami bozonu Higgsa dla nowej fizyki. Osiągnięcie to, wraz z całym pozostałym dorobkiem przedstawionym do oceny spełnia ustawowe wymogi stawiane kandydatom do tytułu doktora habilitowanego. Z pełnym przekonaniem wnioskuję więc o dopuszczenie dra Badziaka do dalszych etapów przewodu habilitacyjnego.

