

Załącznik nr 2a do “Wniosku o wszczęcie postępowania habilitacyjnego
(plik: AKalinowski_autoreferatPL.pdf)

Warszawa, 1 grudnia 2014

dr Artur Kalinowski
Wydział Fizyki
Uniwersytet Warszawski
ul. L. Pasteura 5, 02-093 Warszawa
e-mail: Artur.Kalinowski@fuw.edu.pl
telefon: +48 668 244 616

Autoreferat

Spis treści

1 Dane osobowe	2
2 Wykształcenie	2
3 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	2
4 Przebieg pracy naukowej	3
4.1 Okres związany z pracą magisterską i doktoratem	3
4.2 Okres po doktoracie i obecna działalność naukowa	4
5 Prezentacja osiągnięcia naukowego	7
Bibliografia	14

1 Dane osobowe

Imię i nazwisko: Artur Kalinowski

2 Wykształcenie

2002: magister nauk fizycznych, Uniwersytet Warszawski, Kolegium międzywydziałowych indywidualnych studiów matematyczno-przyrodniczych (MISMaP)

Tytuł pracy magisterskiej: *Optymalizacja algorytmu trygera mionowego detektora CMS w obecności szumów komór RPC*

Opiekun: dr hab. Grzegorz Wrochna

Data uzyskania: 31.05.2002

2006: doktor nauk fizycznych, Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki,
Tytuł rozprawy doktorskiej: *Search for the heavy, neutral MSSM Higgs particles in the $H/A \rightarrow \tau\tau \rightarrow \mu + X$ channel in the CMS detector at the LHC*

Promotor: prof. dr hab. Jan Królikowski

Recenzenci: prof. dr hab. Jan Kalinowski

prof. dr hab. Elżbieta Richter-Wąs

Data uzyskania: 09.10.2006

3 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- 01.10.2002 – 30.09.2006** Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki,
studia doktoranckie
- 01.10.2006 – 31.01.2007** Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki,
pracownik inżynierjno-techniczny
- 01.03.2007 – obecnie** Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki, adiunkt,
(urlop naukowy w okresie 01.10.2007 – 31.08.2010)
- 01.10.2007 – 30.03.2009** Regina University, Regina, Kanada,
staż po doktoracie (miejsce pracy: CERN, Genewa)
- 01.04.2009 – 31.04.2009** Instytut Nielsa Bohra, Uniwersytet Kopenhaski,
staż po doktoracie
- 17.07.2009 – 31.07.2010** LLR, Palaiseau, Francja,
staż po doktoracie (miejsce pracy: CERN, Genewa)

4 Przebieg pracy naukowej

4.1 Okres związany z pracą magisterską i doktoratem

Na czwartym roku studiów magisterskich na Kolegium międzywydziałowych indywidualnych studiów matematyczno-przyrodniczych (MisMap) rozpocząłem współpracę z Warszawską grupą eksperymentu CMS [1] (dalej w skrócie nazywaną Grupą Warszawską) składającą się z pracowników Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, Narodowego Centrum Badań Jądrowych oraz Politechniki Warszawskiej. Moim zadaniem, w ramach pracy magisterskiej, był rozwój i symulacja algorytmu wyzwiania pierwszego stopnia, opartego na komorach mionowych typu RPC (ang. Resistive Plate Chambers) za który w pełni była i jest odpowiedzialna Grupa Warszawska (dalej nazywanego skrótowo systemem PACT). Wyniki mojej działalności zostały spisane w postaci pracy magisterskiej [2], oraz włączone do dokumentacji eksperymentu w postaci jego wewnętrznych not technicznych [3, 4, 5]. Prace te stanowiły jeden z ważnych kroków rozwoju systemu PACT. Prace przy systemie PACT kontynuowałem w pierwszych latach studiów doktoranckich. Byłem wtedy odpowiedzialny za aktualizację i rozwój kodu napisanego w ramach pracy magisterskiej, służącego do symulacji działania systemu PACT. Pracowałem w tym czasie też nad bazą danych zawierającą informację o topologii systemu. Zwieńczeniem tego etapu był znaczący wkład w testy i uruchamianie systemu PACT, które miało miejsce w 2006 roku w CERNie w ramach pierwszego z serii testów detektora CMS przy użyciu mionów pochodzących z promieniowania kosmicznego (ang. Magnet Test and Cosmic Challenge, MTCC) [6]. W czasie MTCC po raz pierwszy dane były zbierane przez wycinek detektora CMS wyposażony we wszystkie rodzaje poddetektorów (w 2006 roku detektor CMS nie był jeszcze kompletny, a jego elementy znajdowały się na powierzchni, nad docelowym miejscem instalacji). Testy i rozruch układu przeprowadzono zatem na podstawie analizy danych zebranych przy obserwacji mionów pochodzących z promieniowania kosmicznego, oraz poprzez wprowadzanie do systemu trygera specjalnie przygotowanych zestawów danych testowych [7, 8, 9]. Układ wyzwiania pierwszego stopnia jest początkowym etapem całego łańcucha wyzwiania, a wyzwianie zorientowane na obecność mionów w stanie końcowym jedną z podstawowych sygnatur wykorzystywanych w analizach fizycznych w zderzaczach hadronowych.

W czasie studiów doktoranckich pracowałem nad rozwojem algorytmu wyzwiania wysokiego stopnia (ang. High Level Trigger, HLT), dla eksperymentu CMS, opartego o identyfikację leptonów τ [10]. Rozwijałem i testowałem, przy użyciu symulacji Monte Carlo, algorytm, w którym identyfikowano hadronowe rozpady τ . Algorytm ten jest kluczowym elementem poszukiwań bozonu Higgsa w rozpadzie na dwa leptony τ , w którym oba taony rozpadają się hadronowo. Implementacja tego algorytmu w języku C++, w systemie programów komputerowych używanych przez zespół badawczy CMS do symulacji działania detektora CMS stanowiła ważny element na drodze realizacji mojego celu badawczego na etapie doktoratu, czyli oszacowania potencjału odkrywczego detektora CMS, w aspekcie poszukiwań ciężkich, neutralnych bozonów Higgsa w ramach Minimalnego Supersymetrycznego rozszerzenia Modelu Standardowego (MSSM). Prace nad tym

algorytmem prowadziłem w szczególności w czasie trzech letnich pobytów w Paul Scherrer Institute (PSI) w Villigen w Szwajcarii w 2003, 2004 i 2005 roku.

W październiku 2006 roku obroniłem pracę doktorską pod tytułem „*Search for the heavy, neutral MSSM Higgs particles in the $H/A \rightarrow \tau\tau \rightarrow \mu + X$ channel in the CMS detector at the LHC*”, na Wydziale Fizyki UW. Wyniki mojej pracy zostały włączone do Fizycznego Raportu Technicznego (ang. Physical Technical Design Report, PTDR) [11], będącego ważnym dokumentem Współpracy CMS prezentującym jej całościowy potencjał fizyczny. Mój wynik był wielokrotnie prezentowany przez wiele osób w imieniu Współpracy CMS na międzynarodowych konferencjach, w szczególności sam przedstawiałem go na konferencji *Physics at LHC 2006* [12].

Po obronie doktoratu zostałem zatrudniony na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, najpierw na stanowisku inżynierjno-technicznym, a następnie adiunkta.

4.2 Okres po doktoracie i obecna działalność naukowa

W okresie od października 2007 do września 2010 przebywałem na serii staży podoktorskich w trzech instytucjach. Były to: CERN (jako pracownik naukowy Uniwersytetu Regina, Regina, Kanada), Instytut Nielsa Bohra, Kopenhaga, Dania oraz Laboratoire Leprince Ringuet (LLR), Palaiseau, Francja.

W latach 2008 – 2009 przenieśliem się do drugiego, wielkiego eksperymentu działającego przy LHC – eksperymentu ATLAS [13]. W tym czasie pracowałem nad identyfikacją hadronowych rozpadów leptonów τ . Wniosłem znaczący wkład w konstrukcję algorytmu identyfikacji leptonów τ , w oparciu o funkcję największej wiarygodności [14, 15, 16]. W tym okresie, w oprogramowaniu detektora ATLAS służącym do rekonstrukcji przypadków zderzeń proton-proton, istniało kilka wariantów identyfikacji leptonów τ : w oparciu o standardową selekcję, tzw. cięcia, w oparciu o drzewa decyzyjne (ang. Boosted Decision Tree, BDT), oraz, rozwijaną przeze mnie, w oparciu o funkcję największej wiarygodności. Metoda oparta o funkcję największej wiarygodności dawała w tym czasie najlepsze wyniki.

Równolegle z pracami przy algorytmach identyfikacji, byłem zaangażowany w działalność związaną z uruchamianiem algorytmów identyfikacji taonów na poziomie układu wyzwalania, gdzie wniosłem znaczący wkład w rozwój metod kontroli działania układu wyzwalania (ang. Data Quality Monitoring, DQM) [17, 18]. W okresie uruchamiania zderzacza LHC, we wrześniu 2008 roku, byłem kilkakrotnie członkiem zespołu nadzorującego pracę detektora (ang. shift). Pracowałem wtedy na kilku typach stanowisk: kontroli układu wyzwalania wysokiego poziomu, kontroli jakości zbierania danych, oraz obsługi kalorymetru elektromagnetycznego.

Od roku 2009 do chwili obecnej ponownie jestem członkiem zespołu badawczego CMS, najpierw jako pracownik naukowy laboratorium LLR, a następnie jako adiunkt na Wydziale Fizyki UW. W tym czasie kontynuowałem prace związane z rekonstrukcją obiektów fizycznych, oraz powróciłem do prac związanych z poszukiwaniami bozonu Higgsa, tym razem w zakresie przewidywań Modelu Standardowego. W latach 2009 – 2010 brałem udział w uruchamianiu i testowaniu algorytmów rekonstrukcji opartych o przepływ

energii (ang. particle flow) [19, 20]. Ta nowatorska metoda stała się w krótkim czasie podstawową metodą rekonstrukcji obiektów fizycznych w eksperymencie CMS. Od roku 2009 moje zainteresowania skupiają się na poszukiwaniach bozonu Higgsa w kanale rozpadu na dwa leptony τ , w którym jeden z taonów rozpada się na mion i neutrino, a drugi rozpada się hadronowo. Latem 2011 roku wykonałem jeden z pierwszych pomiarów efektywności kombinowanego trygera wykorzystującego rozpad pary leptonów tau na mion i neutrino (jeden z taonów), oraz hadrony i neutrino (drugi taon). Pomiar ten wykonałem przy użyciu pierwszych 700 pb⁻¹ danych zebranych przy energii 7 TeV.

W latach 2009 – 2010 przeprowadziłem optymalizację kryteriów selekcji w analizie poświęconej kanałowi produkcji zachodzącej poprzez fuzję bozonów pośredniczących (ang. Vector Boson Fusion, VBF). Wyniki swych prac prezentowałem wielokrotnie na spotkaniach roboczych zespołu badawczego CMS. W latach 2011 – 2013 rozwijałem metody wyznaczania tła pochodzącego od procesów QCD, oraz przypadków typu W+dżet. Prace te prowadziłem w ramach grantu HOMING PLUS/2010-2/5, finansowanego przez FNP, pt. „*Study of Standard Model processes with a jet identified as hadronically decaying tau and a muon in the final state, using the LHC data collected in 2010/2011 running period by the CMS experiment*”. W ramach grantu, wraz ze studentem, który pod moim kierownictwem wykonał prace licencjacką i magisterską, badaliśmy możliwość wyznaczenia wyżej omówionego tła poprzez odpowiednie przeskalowanie rozkładów uzyskanych w obszarach kontrolnych, zdefiniowanych przez luźne kryteria identyfikacji leptonów τ . Czynnikiem skalującym jest w tej sytuacji prawdopodobieństwo błędnej identyfikacji dżetów hadronowych jako rozpadów leptonów τ . Metoda da dawała porównywalne wyniki, do uzyskanych przez inne grupy badawcze i stanowiła ważny element sprawdzenia poprawności wyznaczenia wyżej wspomnianego tła. Efektem tej działalności jest w szczególności wkład do analizy, która uzyskała pozytywne wyniki poszukiwania bozonu Higgsa w kanale rozpadu na dwa leptony τ [21].

Na przestrzeni lat 2010 – 2014 prezentowałem wyniki poszukiwań bozonu Higgsa uzyskane przy moim udziale przez zespół badawczy CMS przy wzrastającej ilości danych, na międzynarodowych konferencjach [22, 23, 24, 25].

Obok prac przy analizach fizycznych, w latach 2010 oraz 2011, pełniłem obowiązki operatora układu wyzwalania wysokiego poziomu detektora CMS, nadzorując jego pracę w czasie rutynowego zbierania danych. W szczególności, w roku 2010, miałem zaszczyt być w zespole operatorów detektora CMS w wieczór, tuż po ponownym uruchomieniu zderzacza LHC. Niestety w czasie mojej służby obsłudze LHC nie udało się doprowadzić do zderzeń proton-proton (w tym czasie pełen cykl ponoszenia prądu magnesach, uzyskiwania tzw. „flat-top”, a następnie zmniejszania natężenia prądu zabierał kilka godzin, co efektywnie dawało jedną szansę doprowadzenia do zderzeń na zmianę).

Równolegle z działalnością czysto doświadczalną, brałem też udział w aktywnościach na polu fenomenologicznym. W roku 2009 prowadziłem prace nad metodami wyznaczania funkcji struktury w rozpadach τ typu $\tau \rightarrow a_1\nu \rightarrow 3\pi\nu$, wyznaczonych z odpowiednich kombinacji rozkładów kątowych zdefiniowanych w publikacji [26]. Prace te były prowadzone wraz z prof. dr hab. Zbigniewem Wąsem w ramach rozwoju programu TAUOLA [27], oraz stanowiły wkład do raportu [28].

W roku 2010 byłem członkiem *LHC Higgs Cross Section Working Group*, składającej się z fizyków doświadczalnych będących członkami zespołów badawczych ATLAS i CMS, oraz fizyków teoretycznych. Pracowałem tam przy obliczeniach przekroju czynnego na produkcję bozonów Higgsa w modelu MSSM, czyniąc wkład do pierwszego raportu tej grupy [29].

W latach 2011 – 2012, jako członek zespołu badawczego prowadzonego przez dr hab. Leszka Roszkowskiego, w ramach grantu WELCOME/2010-3/1, finansowanego przez FNP, prowadziłem badania związane z wpływem wyników poszukiwań cząstek supersymetrycznych oraz bozonów Higgsa w LHC, na ograniczenie dozwolonej przestrzeni parametrów modeli supersymetrycznych. Moim wkładem była interpretacja wyników uzyskanych przez eksperyment CMS, w sposób, który pozwalał na zastosowanie podejścia Bayesowskiego. Wynikiem tych badań była publikacja [30].

Obecnie, od drugiej połowy 2014 roku, przygotowuję się do prac związanych z wyznaczeniem spinu i parzystości bozonu Higgsa w rozpadzie na dwa leptony τ . Liczby kwantowe cząstki o masie $m = 125 \text{ GeV}/c^2$, obserwowanej przez eksperymenty ATLAS [31] i CMS [32], identyfikowanej jako bozon Higgsa, zostały zanalizowane w rozpadach na bozony pośredniczące, WW , ZZ oraz $\gamma\gamma$ [33, 34, 35, 36], z wynikiem wskazującym na stan $J^P 0^+$, ale analogiczny pomiar nie został jeszcze przeprowadzony w rozpadzie bozonu Higgsa na leptoni. Jestem głównym wykonawcą w projekcie (ruszającym w styczniu 2015) „*Rozpady na leptoni tau – narzędzie do badania własności bozonu Higgsa za pomocą eksperymentu CMS przy LHC*” zaakceptowanym do finansowania w ramach konkursu OPUS rozpisanego przez NCN. Wraz z przygotowaniem do badania własności bozonu Higgsa biorę udział w rozbudowie detektora CMS. W latach 2013 – 2014 są prowadzone intensywne prace modernizacyjne detektorów i samego LHC. Jako główny wykonawca w projekcie „*Nowy mionowy system wyzwiania detektora Compact Muon Solenoid (etap I, 2014-2016)*” pracuję nad algorytmami nowego układu wyzwiania pierwszego stopnia, wykorzystującego wszystkie rodzaje detektorów mionowych.

5 Prezentacja osiągnięcia naukowego

zgodnego z wymogiem Art 16. ust. 2 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz.U nr 65 poz. 595 z późniejszymi zmianami).

Jako osiągnięcie naukowe przedstawiam monografię pt.:

Wybrane aspekty poszukiwań bozonu Higgosa z Modelu Standardowego w zderzeniach proton-proton w eksperymencie CMS przy LHC

wydaną nakładem Wydawnictw Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 2014, ISBN 978-83-235-1708-5, której jestem jedynym autorem.

Przedstawiona monografia opisuje aspekty poszukiwania bozonu Higgosa pojawiającego się w Modelu Standardowym (MS) w wyniku mechanizmu spontanicznego łamania symetrii, nazywanego mechanizmem Brouta-Englerta-Higgosa (BEH).

Moja dotychczasowa praca badawcza była głównie poświęcona różnym aspektom poszukiwania bozonu Higgosa w rozpadzie na dwa leptony τ , czego odzwierciedleniem jest rozbudowany rozdział 5 monografii, poświęcony temu rozpadowi. Mój udział w pracach nad układami wyzwalania na różnych poziomach, oraz przy zbieraniu danych stanowi także element prac przy innych kanałach rozpadu, stąd monografia zawiera opis wszystkich istotnych kanałów poszukiwań bozonu Higgosa. Drugim powodem włączenia pozostałych kanałów poszukiwań jest fakt, że identyfikacja nowej cząstki, jako bozonu Higgosa z Modelu Standardowego, wymaga kompleksowego spojrzenia na badaną cząstkę, biorąc pod uwagę wszystkie dostępne kanały rozpadu i wszystkie wielkości jakie można dla niej wyznaczyć, w szczególności sprzężenia do wszystkich cząstek MS, oraz jej liczby kwantowe.

Monografia rozpoczyna się krótkim rysem historycznym przedstawiającym ewolucję ograniczeń na masę bozonu Higgosa, zakończoną odkryciem cząstki, ogłoszonym 4 lipca 2012 roku przez zespoły badawcze ATLAS [31] i CMS [32]. W rozdziale pierwszym przypominam krótko strukturę Modelu Standardowego, oraz podstawy mechanizmu Brouta-Englerta-Higgosa. W rozdziale tym przedstawiam także wartości stosunków rozgałęzień bozonu Higgosa na cząstki MS, oraz główne mechanizmy produkcji bozonu Higgosa w LHC. Ponieważ sprzężenie bozonu Higgosa jest proporcjonalne do masy cząstki, bozon Higgosa będzie się najczęściej rozpadał na najcięższe możliwe cząstki. Dla $m_H < 2 \cdot m_W$, gdzie m_W to masa bozonu W, dominują rozpady na najcięższe dostępne fermiony, czyli kwarki b, potem następuje nagły wzrost szerokości na rozpady $H \rightarrow WW$ i $H \rightarrow ZZ$, a po przekroczeniu progu na rozpad na parę kwarków top, także rozpad $H \rightarrow t\bar{t}$ staje się istotny. Lista podstawowych kanałów produkcji bozonu Higgosa w LHC jest zdeterminowana przez rodzaje cząstek występujące w stanie początkowym, a więc gluony lub kwarki z jednej strony, a z drugiej przez fakt sprzęgania się bozonu Higgosa do masy cząstek. W tej sytuacji dominującym kanałem produkcji jest fuzja gluonowa (ggH): $gg \rightarrow H$, następnym procesem produkcji jest proces zachodzący poprzez fuzję bozonów pośredniczących (ang. vector

boson fusion, VBF), gdzie bozony pośredniczące są emitowane z kwarków występujących w stanie początkowym. Kolejnym procesem jest tzw. *Higgs-strahlung* (VH), gdzie bozon Higgsa jest emitowany z propagatora bozonu pośredniczącego (V) powstałego w anihilacji kwarków ze stanu początkowego. Ostatni na liście jest proces produkcji stowarzyszonej z parą kwarków t (ttH). Schemat rozpadów, dopiero w połączeniu w kanałami produkcji determinuje możliwe kanały poszukiwań i badań nowych cząstek. Rozpad, który jest najczęstszy dla średnich mas, $H \rightarrow b\bar{b}$, jest bardzo trudnym kanałem badań w zderzaczach hadronowych z powodu gigantycznego tła pochodzącego od produkcji par $b\bar{b}$ oraz jeszcze bardziej licznych par lekkich kwarków, które mogą być błędnie zidentyfikowane jako kwarki b. Jedynie w połączeniu z cząstkami ze stanu końcowego procesu produkcji, w szczególności z leptonami, można było myśleć o użyciu tego kanału do poszukiwań bozonu Higgsa w zderzaczach hadronowych. Takich dodatkowych możliwości identyfikacji dostarcza w szczególności proces VH, w którym leptonowy rozpad bozonu W lub Z pozwala na bardzo efektywną selekcję sygnału. Podobnie proces VBF pozwala na wydajną selekcję sygnału, dzięki obecności rozproszonych kwarków ze stanu początkowego do końcowego. Kwarki te hadronizując tworzą dzęty znakujące (ang. tagging jets), których obecność i własności kinematyczne stanowią ważny dodatkowy warunek selekcji we wszystkich analizach poświęconych poszukiwaniom bozonu Higgsa w LHC.

Rozdział drugi przedstawia pokrótce budowę detektora CMS oraz metody rekonstrukcji i identyfikacji cząstek używane w opisywanych w kolejnych rozdziałach analizach, w szczególności metodę rekonstrukcji „particle flow”, do której rozwoju wniosłem wkład. Rozdział trzeci przedstawia metody statystyczne używane w celu wyznaczania poziomów wykluczeń, w przypadku braku obserwacji, lub znaczącości statystycznej, w sytuacji gdy następuje obserwacja oczekiwanego sygnału. W rozdziale tym wyjaśniono także podstawowe konwencje statystyczne, typu „poziom 5σ ”, lub p-wartość (ang. p-value), oraz zdefiniowano parametr wzmocnienia μ .

Kolejne rozdziały, od czwartego do ósmego, opisują poszukiwania bozonu Higgsa w poszczególnych kanałach odpowiednio $H \rightarrow \tau\tau$, $H \rightarrow b\bar{b}$, $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$, $H \rightarrow WW \rightarrow 2l2\nu$, $H \rightarrow \gamma\gamma$.

Poszukiwania bozonu Higgsa w kanale rozpadu $H \rightarrow \tau\tau$ są szczególnie interesujące, ponieważ jest to drugi, pod względem wartości stosunku rozgałęzień, kanał rozpadu na leptony. Zważywszy, że rozpad na parę kwarków b jest szczególnie trudny w środowisku zderzacza hadronowego, właśnie w kanale $\tau\tau$ spodziewano się pierwszej, bezpośredniej obserwacji sprzężenia bozonu Higgsa do fermionów. Eksperymenty ATLAS i CMS opublikowały wyniki poszukiwań w tym kanale oparte na danych zebranych w latach 2011 – 2012. Oba eksperymenty zaobserwowały znaczącą nadwyżkę przypadków ponad oczekiwaniami dla tła, na poziomie 4.1σ [37] (ATLAS) oraz 3.2σ [21] (CMS), dla $m_H = 125 \text{ GeV}/c^2$. Oba eksperymenty obserwują nadwyżkę o znaczącości statystycznej poniżej zwyczajowego progu na odkrycie (5σ), ale w połączeniu z np. bardzo silnym sygnałem w kanale $H \rightarrow ZZ$ [38, 35] stanowiącą bardzo wiarygodną przesłankę o istnieniu sprzężenia $H\tau\tau$. Wynik eksperymentu CMS jest oparty na analizie 4.9 fb^{-1} danych zebranych przy energii $\sqrt{s}=7 \text{ TeV}$, oraz 19.7 fb^{-1} przy energii $\sqrt{s}=8 \text{ TeV}$, co stanowi całość danych zebranych w latach 2011 – 2012. W monografii przedstawiłem zasadnicze aspekty poszukiwań w kanale

$H \rightarrow \tau\tau$. Ograniczyłem się do opisanego analiz opartych o produkcję poprzez fuzję gluonów oraz mechanizm VBF w których brałem bezpośredni udział.

Kanał $H \rightarrow b\bar{b}$ jest kolejnym, obok kanału taonowego, fermionowym rozpadem bozonu Higgsa dostępnym w LHC. Ewentualna obserwacja tego rozpadu potwierdzałaby bezpośrednio sprzężenie bozonu Higgsa do kwarków (pośrednio sprzężenie do kwarków top jest testowane przez jego wkład do mechanizmów produkcji, np. w kanale $gg \rightarrow H$). Kanał ten jest jednak bardzo trudny z powodu występowania tła w postaci produkcji par dżetów pochodzących z fragmentacji nie tylko kwarków b, ale także lekkich kwarków i gluonów. Eksperymenty ATLAS i CMS opublikowały wyniki poszukiwań oparte o całość danych zebranych w trakcie pierwszej fazy działania LHC w latach 2011 – 2012. Eksperyment ATLAS nie zaobserwował sygnału, otrzymując ograniczenie na parametr wzmocnienia μ na poziomie 1.4 dla $m_H = 125 \text{ GeV}/c^2$ [39]. Analiza przeprowadzona przez zespół badawczy CMS wykazała natomiast obecność nieznacznej nadwyżki przypadków ponad oczekiwaniami dla tła, której znaczącość statystyczna wynosi 2.1σ dla $m_H = 125 \text{ GeV}/c^2$, przy parametrze wzmocnienia $\mu = 1.0 \pm 0.5$ [40]. Wynik ten zgadza się z oczekiwaniami dla bozonu Higgsa z Modelu Standardowego. W monografii przedstawiłem zasadnicze aspekty poszukiwań w kanale $H \rightarrow b\bar{b}$, których szczegóły można znaleźć w publikacji [40].

Kanał rozpadu, $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e/4\mu/2e2\mu$, określanym mianem „złotego”, dostarczył bardzo wyraźnego sygnału, który jest widoczny „gołym okiem” na rozkładach masy układu czterech naładowanych leptonów wybranych w analizach prowadzonych przez eksperymenty ATLAS i CMS. Oba zespoły badawcze zaobserwowały oznaki sygnału już po analizie pierwszych, około 5 fb^{-1} danych [41, 42]. Eksperyment ATLAS ostatecznie zaobserwował znaczną nadwyżkę przypadków, ponad oczekiwaniami dla samego tła, na poziomie odpowiadającym 6.6σ , przy masie $m_{4l} = 124.51 \pm 0.52(stat) \pm 0.06(syst) \text{ GeV}/c^2$ [38]. Analogiczna analiza przeprowadzona przez zespół badawczy CMS wykazała obecność sygnału o masie $m_{4l} = 125.6 \pm 0.4(stat.) \pm 0.2(syst.) \text{ GeV}/c^2$ na poziomie 6.8σ [35]. W monografii naszkicowałem strategię poszukiwań w kanale $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e/4\mu/2e2\mu$, zrealizowaną w analizie opublikowanej w pracy [35].

Rozpad bozonu Higgsa na parę bozonów W ma stosunkowo wysoki stosunek rozgałęzień. Już dla $m_H > 115 \text{ GeV}/c^2$ jest to drugi, po rozpadzie na dwa kwarki b, kanał rozpadu. Niestety jest to dosyć trudny kanał poszukiwań w zderzaczach hadronowych, ponieważ 44% par WW rozpada się w kanale hadronowym, niezwykle trudnym do wyselekcjonowania spośród tła produkcji wielodżetowych w procesach rozpraszania partonów. Kanałem, który dostarcza wystarczająco silnej sygnatury, jest rozpad na lekkie leptony, elektron lub mion i neutrino, zachodzącym jedynie w 4.5% przypadków. Analiza danych zebranych w latach 2011 – 2012 przez oba eksperymenty, ATLAS i CMS pod kątem tej sygnatury, wykazała obecność nadwyżki nad tłem, zgodnej z oczekiwaniami dla sygnału bozonu Higgsa z Modelu Standardowego o masie około $125 \text{ GeV}/c^2$. Nadwyżka obserwowana przez eksperyment ATLAS ma znaczącość statystyczną odpowiadającą 3.8σ [43], a obserwowana przez eksperyment CMS 4.3σ [34]. Rozdział poświęcony temu kanałowi pokazuje elementy analizy, której wyniki zostały opublikowane w pracy [34].

Rozpad na dwa kwanty γ był postrzegany jako jeden z dwu, obok kanału czteroleptonowego, kanałów w którym miało nastąpić odkrycie bozonu Higgsa i tak się w istocie

stało. Eksperymenty ATLAS i CMS zaobserwowały nadwyżkę przypadków, ponad oczekiwaniami tła, zgodną z przewidywaniami dla bozonu Higgsa z Modelu Standardowego. Analiza danych zebranych przez ATLAS wykazała obecność rezonansu w rozpadzie na dwa fotony o masie $m_{\gamma\gamma} = 125.98 \pm 0.42(\text{stat}) \pm 0.28(\text{syst}) \text{ GeV}/c^2$ [38]. Znaczącość statyczna tej obserwacji wynosiła 7.4σ [44]. Analogiczna analiza przeprowadzona przez zespół badawczy CMS wykazała obecność lokalnego maksimum w rozkładzie masy dwu fotonów dla $m_{\gamma\gamma} = 124.70 \pm 0.31(\text{stat.}) \pm 0.15(\text{syst.}) \text{ GeV}/c^2$, którego znaczącość statystyczna wynosiła 5.7σ [36]. W monografii opisałem zasadnicze aspekty poszukiwań w kanale $H \rightarrow \gamma\gamma$, szczegóły analizy można znaleźć w cytowanej powyżej publikacji [36].

Na początku każdego z rozdziałów przypominam, znane już, wyniki poszukiwań uzyskane przez eksperymenty ATLAS i CMS, a następnie przedstawiam strategię, elementy selekcji, metody szacowania tła, niepewności systematyczne oraz wyniki poszukiwań.

Ostatnie dwa rozdziały pokazują wyniki dla masy i sprzężeń nowej cząstki oparte o całościową analizę wyników poszukiwań w głównych kanałach rozpadu, opisanych we wcześniejszych rozdziałach, oraz podsumowanie całości. Podsumowanie zawiera prognozy dotyczące precyzji z jaką mogą być wyznaczone sprzężenia bozonu Higgsa do cząstek Modelu Standardowego. Po etapie poszukiwań samego bozonu Higgsa, który efektywnie rozpoczął się w latach 90-tych XX wieku, a zakończył się 4 lipca 2012 roku, nastąpił etap badania właściwości nowej cząstki, którego kluczowym elementem jest właśnie precyzyjne wyznaczenie wartości sprzężeń do cząstek MS (lub innych, jeżeli te zostaną odkryte).

Literatura

- [1] **CMS** Collaboration, S. Chatrchyan *et al.*, “The CMS experiment at the CERN LHC,” *JINST* **3** (2008) S08004.
- [2] “Optymalizacja algorytmu trygera mionowego detektora CMS w obecności szumów komor RPC,” praca magisterska, Warszawa, 2002.
- [3] **CMS** Collaboration, “Sorting Tree and Ghostbuster for RPC Muon Trigger,” raport techniczny CMS IN-2001/007, CERN, Geneva, 2001.
- [4] **CMS** Collaboration, “Muon Trigger Algorithms Based on 6 RPC Planes,” raport techniczny CMS IN-2001/045, CERN, Geneva, 2001.
- [5] **CMS** Collaboration, “RPC Pattern Comparator Trigger Simulation In CMSIM 121-123 and ORCA 4-5,” raport techniczny CMS IN-2001/054, CERN, Geneva, 2001.
- [6] **CMS** Collaboration, “The CMS Magnet Test and Cosmic Challenge,” raport techniczny CMS-NOTE-2007-005, CERN, Geneva, Mar, 2007.
- [7] K. Bunkowski, K. Doroba, A. Kalinowski, K. Kierzkowski, M. Konecki, *et al.*, “Synchronization methods for the PAC RPC trigger system in the CMS experiment,” *Measur.Sci.Tech.* **18** (2007) 2446–2455.

- [8] A. Colaleo, F. Loddo, M. Maggi, A. Ranieri, M. Abbrescia, *et al.*, “First measurements of the performance of the barrel RPC system in CMS,” *Nucl.Instrum.Meth.* **A609** (2009) 114–121.
- [9] G. Roselli, M. Abbrescia, G. Iaselli, B. Marangelli, S. Natali, *et al.*, “Resistive plate chamber commissioning and performance in CMS,” *Nucl.Instrum.Meth.* **A602** (2009) 696–699.
- [10] S. Gennai, F. Moortgat, L. Wendland, A. Nikitenko, S. Wakefield, G. Bagliesi, S. Dutta, A. Kalinowski, M. Konecki, and D. Kotlinski, “Tau jet reconstruction and tagging with CMS,” *Eur. Phys. J. C* **46** (2006) 1–21.
- [11] **CMS** Collaboration, G. Bayatian *et al.*, “CMS technical design report, volume II: Physics performance,” *J.Phys.* **G34** (2007) 995–1579.
- [12] **CMS** Collaboration, A. Kalinowski, “MSSM H/A in tau tau final state at CMS,” *Acta Phys.Polon.* **B38** (2007) 599–606.
- [13] **ATLAS** Collaboration, G. Aad *et al.*, “The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider,” *JINST* **3** (2008) S08003.
- [14] A. Kalinowski and K. Benslama, “Tau identification with the logarithmic likelihood method,” raport techniczny ATL-PHYS-INT-2008-037, CERN, Geneva, 2008.
- [15] A. Christov, Z. Czychula, L. Janyst, A. Kaczmarska, A. Kalinowski, S. Lai, N. Meyer, E. Richter-Was, C. Ruwiedel, and M. Wolter, “Performance of the tau reconstruction and identification algorithm with release 14.2.10,” raport techniczny ATL-COM-PHYS-2008-196, CERN, Geneva, 2008.
- [16] A. Kalinowski, “Tau Lepton Reconstruction and Identification with the ATLAS Detector at the LHC,” *NUCLEAR PHYSICS B-PROCEEDINGS SUPPLEMENTS* **189** (APR, 2009) 305–310. 10th International Workshop on Tau Lepton Physics, Novosibirsk, RUSSIA, SEP 22, 2008.
- [17] K. Benslama, A. Kalinowski, C. Belanger-Champagne, R. Brenner, M. Bosman, *et al.*, “Tau trigger at the ATLAS experiment,” [arXiv:0810.0465](https://arxiv.org/abs/0810.0465) [[hep-ex](https://arxiv.org/abs/0810.0465)].
- [18] M. P. Casado, C. Belanger-Champagne, K. Benslama, M. Bosman, R. Brenner, Z. Czychula, M. Dam, S. Demers, S. Farrington, O. Igonkina, A. Kalinowski, N. Kanaya, C. Osuna, E. Pérez, E. Ptacek, A. Reinsch, A. Saavedra, A. Sfyrla, M. Shamin, A. Sopczak, D. Strom, E. Torrence, S. Tsuno, V. Vorwerk, A. Watson, and S. Xella, “The ATLAS tau trigger,” *Nuclear Physics B Proceedings Supplements* **189** (Apr., 2009) 291–298.
- [19] **CMS** Collaboration, “Particle-flow commissioning with muons and electrons from J/Psi and W events at 7 TeV,” raport techniczny CMS-PAS-PFT-10-003, 2010. CMS-PAS-PFT-10-003.

- [20] **CMS** Collaboration, “Commissioning of the Particle-Flow reconstruction in Minimum-Bias and Jet Events from pp Collisions at 7 TeV,” raport techniczny CMS-PAS-PFT-10-002, 2010. CMS-PAS-PFT-10-002.
- [21] **CMS** Collaboration, S. Chatrchyan *et al.*, “Evidence for the 125 GeV Higgs boson decaying to a pair of τ leptons,” *JHEP* **1405** (2014) 104, arXiv:1401.5041 [hep-ex].
- [22] **CMS** Collaboration, A. Kalinowski, “The LHC potential for MSSM Higgs boson searches,” raport techniczny CMS-CR-2010-170, CERN, Geneva, Oct, 2010.
- [23] **CMS** Collaboration, A. Kalinowski, “CMS potential for the Higgs boson searches with 1 fb⁻¹,” raport techniczny CMS-CR-2011-039, CERN, Geneva, Feb, 2011.
- [24] **CMS** Collaboration, A. Kalinowski, “Combined results of SM Higgs searches at CMS,” raport techniczny CMS-CR-2012-198, CERN, Geneva, Aug, 2012.
- [25] **CMS** Collaboration, A. Kalinowski, “SM and BSM Higgs Results from the CMS Experiment,” *Acta Phys.Polon.* **B45** (2014) 1415–1426.
- [26] J. H. Kuhn and E. Mirkes, “Semileptonic tau decays, structure functions, kinematics and polarization,” *Nucl.Phys.Proc.Suppl.* **40** (1995) 181–189, arXiv:hep-ph/9411418 [hep-ph].
- [27] S. Jadach, Z. Was, R. Decker, and J. H. Kuhn, “The tau decay library TAUOLA: Version 2.4,” *Comput. Phys. Commun.* **76** (1993) 361–380.
- [28] **Working Group on Radiative Corrections and Monte Carlo Generators for Low Energies** Collaboration, S. Actis *et al.*, “Quest for precision in hadronic cross sections at low energy: Monte Carlo tools vs. experimental data,” *Eur.Phys.J.* **C66** (2010) 585–686, arXiv:0912.0749 [hep-ph].
- [29] **LHC Higgs Cross Section Working Group** Collaboration, S. Dittmaier *et al.*, “Handbook of LHC Higgs Cross Sections: 1. Inclusive Observables,” arXiv:1101.0593 [hep-ph].
- [30] A. Fowlie, A. Kalinowski, M. Kazana, L. Roszkowski, and Y. S. Tsai, “Bayesian Implications of Current LHC and XENON100 Search Limits for the Constrained MSSM,” *Phys.Rev.* **D85** (2012) 075012, arXiv:1111.6098 [hep-ph].
- [31] **ATLAS** Collaboration, G. Aad *et al.*, “Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC,” *Phys.Lett.* **B716** (2012) 1–29, arXiv:1207.7214 [hep-ex].
- [32] **CMS** Collaboration, S. Chatrchyan *et al.*, “Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC,” *Phys.Lett.* **B716** (2012) 30–61, arXiv:1207.7235 [hep-ex].

- [33] **ATLAS** Collaboration, “Study of the spin of the new boson with up to 25 fb⁻¹ of ATLAS data,” raport techniczny ATLAS-CONF-2013-040, CERN, Geneva, Apr, 2013.
- [34] **CMS** Collaboration, S. Chatrchyan *et al.*, “Measurement of Higgs boson production and properties in the WW decay channel with leptonic final states,” *JHEP* **1401** (2014) 096, arXiv:1312.1129 [hep-ex].
- [35] **CMS** Collaboration, S. Chatrchyan *et al.*, “Measurement of the properties of a Higgs boson in the four-lepton final state,” *Phys.Rev.* **D89** (2014) 092007, arXiv:1312.5353 [hep-ex].
- [36] **CMS** Collaboration, V. Khachatryan *et al.*, “Observation of the diphoton decay of the Higgs boson and measurement of its properties,” arXiv:1407.0558 [hep-ex].
- [37] **ATLAS** Collaboration, G. Aad *et al.*, “Evidence for Higgs Boson Decays to the $\tau^+\tau^-$ Final State with the ATLAS Detector,” raport techniczny ATLAS-CONF-2013-108, ATLAS-COM-CONF-2013-095, 2013.
- [38] **ATLAS** Collaboration, G. Aad *et al.*, “Measurement of the Higgs boson mass from the $H \rightarrow \gamma\gamma$ and $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ channels with the ATLAS detector using 25 fb⁻¹ of pp collision data,” arXiv:1406.3827 [hep-ex].
- [39] **ATLAS** Collaboration, “Search for the bb decay of the Standard Model Higgs boson in associated W/ZH production with the ATLAS detector,” raport techniczny ATLAS-CONF-2013-079, ATLAS-COM-CONF-2013-080, 2013.
- [40] **CMS** Collaboration, S. Chatrchyan *et al.*, “Search for the standard model Higgs boson produced in association with a W or a Z boson and decaying to bottom quarks,” *Phys.Rev.* **D89** (2014) 012003, arXiv:1310.3687 [hep-ex].
- [41] **ATLAS** Collaboration, G. Aad *et al.*, “Search for the Standard Model Higgs boson in the decay channel $H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4\ell$ with 4.8 fb-1 of pp collision data at $\sqrt{s} = 7$ TeV with ATLAS,” *Phys.Lett.* **B710** (2012) 383–402, arXiv:1202.1415 [hep-ex].
- [42] **CMS** Collaboration, S. Chatrchyan *et al.*, “Search for the standard model Higgs boson in the decay channel H to ZZ to 4 leptons in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV,” *Phys.Rev.Lett.* **108** (2012) 111804, arXiv:1202.1997 [hep-ex].
- [43] **ATLAS** Collaboration, “Measurements of the properties of the Higgs-like boson in the $WW^{(*)} \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ decay channel with the ATLAS detector using 25 fb⁻¹ of proton-proton collision data,” raport techniczny ATLAS-CONF-2013-030, ATLAS-COM-CONF-2013-028, 2013.
- [44] **ATLAS** Collaboration, “Measurements of the properties of the Higgs-like boson in the two photon decay channel with the ATLAS detector using 25 fb⁻¹ of

proton-proton collision data,” raport techniczny ATLAS-CONF-2013-012,
ATLAS-COM-CONF-2013-015, 2013.

A. Kellogg