

Warszawa, 10 kwietnia 2019 r.

dr **Michał Bluj**
Narodowe Centrum Badań Jądrowych
Zakład Fizyki Wielkich Energii
ul. Pasteura 7, 02-093 Warszawa

Autoreferat

Spis treści

1 Dane osobowe	1
2 Dyplomy i stopnie naukowe	1
3 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	2
4 Przebieg pracy naukowej	2
5 Prezentacja osiągnięcia naukowego	6
Literatura	11

1 Dane osobowe

Imię i nazwisko: Michał Bluj

2 Dyplomy i stopnie naukowe

2006: Doktor nauk fizycznych, Instytut Problemów Jądrowych im. A. Sołtana
Tytuł rozprawy: *Poszukiwanie bozonów Higgsa w akceleratorach LEP i LHC*

Promotor: prof. dr hab. Ryszard Sosnowski

Recenzenci: prof. dr hab. Elżbieta Richter-Wąs
dr hab. Aleksander Filip Żarnecki

2000: Magister fizyki, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

Tytuł pracy: *LEP jako narzędzie poszukiwania nowej fizyki*

Opiekun: dr inż. Piotr Zalewski

3 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- X 2006 – obecnie:** Narodowe Centrum Badań Jądrowych, adiunkt
(urlup naukowy w okresie X 2007 – X 2013)
- X 2008 – X 2013:** Laboratoire Leprince-Ringuet (LLR) przy École Polytechnique, Palaiseau, Francja, staż podoktorski
- X 2007 – X 2008:** Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas (LIP), Lizbona, Portugalia, staż podoktorski
- X 2005 – X 2006:** Instytut Problemów Jądrowych im. A. Sołtana, fizyk
(obecnie Narodowe Centrum Badań Jądrowych)
- X 2000 – X 2005:** Instytut Problemów Jądrowych im. A. Sołtana, studia doktoranckie
(obecnie Narodowe Centrum Badań Jądrowych)

4 Przebieg pracy naukowej

Większa część mojej pracy naukowej jest związana z poszukiwaniem bozonu Higgosa (lub bozonów Higgosa), a następnie po jego odkryciu badaniem jego własności.

Podczas moich studiów magisterskich na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego zainteresowałem się poszukiwaniem bozonów Higgosa – ostatniego brakującego elementu Modelu Standardowego oddziaływań fundamentalnych. Istnienie bozonu (lub bozonów) Higgosa jest związane z mechanizmem Brouta-Englerta-Higgosa (BEH), dzięki któremu cząstki elementarne (bozony W i Z oraz fermiony) uzyskują masę przy jednoczesnym zachowaniu symetrii cechowania Modelu Standardowego [1, 2, 3, 4, 5]. Najprostszy wariant tego mechanizmu jest realizowany przy użyciu jednego dubletu zespolonych skalarnych pól i przewiduje istnienie jednego neutralnego bozonu Higgosa, tzw. bozonu Higgosa Modelu Standardowego. Jednakże, nie ma silnego uzasadnienia dla wykluczenia bardziej rozbudowanych scenariuszy. Jednym z częściej rozpatrywanych rozszerzonych scenariuszy, motywowanym z jednej strony przez modele supersymetryczne, a z drugiej przez bogatą fenomenologię wspólną dla wielu modeli rozszerzonych, jest model z dwoma dubletami pól Higgosa (ang. two Higgs doublet model, 2HDM). 2HDM przewiduje istnienie pięciu bozonów Higgosa: trzech neutralnych i dwóch naładowanych.

Aby realizować moje zainteresowania naukowe, podjąłem współpracę z zespołem koordynowanym przez Piotra Zalewskiego zajmującym się poszukiwaniem bozonów Higgosa z modeli rozszerzających Model Standardowy, działającym w ramach Warszawskiej Grupy eksperymentu DELPHI przy zderzaczu e^+e^- LEP w CERN.

Czas moich studiów magisterskich, lata akademickie 1998/1999–1999/2000, przypadł na ostatni okres działania LEP, gdy pracował on przy najwyższej możliwej do osiągnięcia energii zderzeń ok. 200 GeV. Zebrane wówczas przez cztery eksperymenty przy LEP (ALEPH, DELPHI, L3 i OPAL) dane pozwoliły wykluczyć istnienie bozonu Higgosa Modelu Standardowego o masie poniżej 114,4 GeV na poziomie ufności 95% [6].

Równoległe do poszukiwań bozonu Higgosa Modelu Standardowego oraz bozonów Higgosa przewidywanych przez minimalne supersymetryczne rozszerzenie Modelu Standardowego (ang. Minimal Supersymmetric Standard Model, MSSM) prowadzono poszukiwania bozonów Higgosa w ramach uogólnionych modeli rozszerzonych. W eksperymencie DELPHI jedną z wiodących grup się tym zajmujących był zespół P. Zalewskiego, którego byłem członkiem. W ramach pracy magisterskiej, oprócz prac technicz-

nych jak produkcja próbek Monte Carlo, rozwinąłem metodę poszukiwań w topologiach związanych z rozpadami kaskadowymi bozonów Higgosa. Rozpady takie mogą być dominujące, gdy rozpady cięższych bozonów Higgosa na lżejsze są kinematycznie dozwolone. Gdy najlżejsze bozony Higgosa rozpadają się na pary kwarków b (najcięższych dostępnych kinematycznie fermionów), co jest prawdą w szerokim zakresie parametrów 2HDM, otrzymuje się stany końcowe z co najmniej czterema takim kwarkami. Własności kinematyczne (topologia) takich stanów końcowych silnie zależy od mas (i ich różnic) bozonów Higgosa, zatem kluczowe było stworzenie zmiennej czulej na sygnał niezależnie od topologii. Zostało to zrealizowane za pomocą drzewa decyzyjnego¹. Nie zaobserwowano poszukiwanego sygnału, więc wyznaczono ograniczenia na iloczyny odpowiednich przekrojów czynnych i stosunków rozgałęzień dla każdego analizowanego procesu w funkcji masy bozonów Higgosa [7]. Ograniczenia te zostały przedstawione w sposób maksymalnie niezależny od modelu, co umożliwiała ich łatwą interpretację w różnych modelach teoretycznych. Ten uwcześnie nowatorski sposób prezentacji wyników został wypracowany (z moim aktywnym udziałem) w dyskusjach z teoretykami z Uniwersytetu Warszawskiego: Marią Krawczyk i Janem Kalinowskim. Wyniki mojej pracy magisterskiej (z innymi wynikami uzyskanymi przez zespół) zostały upublicznione jako nota eksperymentu DELPHI na letniej konferencji w 2001 r. [8].

Tematykę związaną z poszukiwaniem bozonów Higgosa w ramach uogólnionych modeli przy użyciu danych DELPHI rozwijałem w ciągu pierwszego okresu pracy nad doktoratem [9]. Ukoronowaniem tych badań była nota eksperymentu DELPHI na letniej konferencji w 2003 r. [8], która stała się następnie publikacją tego eksperymentu [10]. Publikacja ta jest jednym z wkładów do końcowej publikacji eksperymentów przy LEP dotyczącej poszukiwań niestandardowych bozonów Higgosa [11] oraz końcowej publikacji DELPHI na ten temat [12]. Praca [10] ma obecnie kilkadziesiąt cytowań.

W czasie moich studiów doktoranckich dołączyłem do Warszawskiej Grupy (projektowanego wówczas) eksperymentu CMS przy zderzacz protonów LHC, który zastąpił LEP. LHC został zaprojektowany tak, by znaleźć (lub wykluczyć istnienie) bozon Higgosa Modelu Standardowego o masie w zakresie od ok. 110 GeV, tj. obszaru wykluczonego przez eksperymenty przy LEP, do ok. 1000 GeV zadanej przez ogólne rozważania teoretyczne nad stabilnością modelu. Związanie się z eksperymentem CMS pozwoliło mi na kontynuację poszukiwań bozonu Higgosa.

W tym okresie włączyłem się w działania międzynarodowej grupy roboczej zrzeszającej fizyków teoretyków i doświadczalników pracujących nad fenomenologią niestandardowych (rozszerzonych) modeli sektora Higgosa i związanymi z nimi strategiami doświadczalnymi. Wynikiem tych prac jest raport, tzw. CERN Yellow report, którego jestem współautorem [13]. W ramach tych prac podjąłem problem wyznaczania parzystości CP bozonu Higgosa przy użyciu korelacji kątowych w procesie $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$ za pomocą detektora CMS. Wyznaczanie parzystości CP polegało na minimalizacji funkcji największej wiarygodności wiążącej mierzone kąty z parametrami lagrangianu. Analiza ta stanowi drugą część mojej rozprawy doktorskiej [9] oraz została zamieszczona w raporcie technicznym prezentującym całościowy potencjał fizyczny eksperymentu CMS (ang. Physical Technical Design Report, PTDR) [14].

Równolegle brałem udział w pracach związanych z rozwojem mionowego układu wyzwalania pierwszego poziomu detektora CMS, za który była odpowiedzialna Grupa Warszawska. Układ ten, nazywany PAC (ang. pattern comparator), dokonywał (w czasie rzeczywistym) rekonstrukcji pędu poprzecznego mionów za pomocą porównania sygnału z komór RPC (ang. resistive plate chambers) do uprzednio wygenerowanych wzorców (ang. pattern)². Dodatkowo PAC zawierał system akwizycji danych ko-

¹Nie było to drzewo decyzyjne w sensie współczesnych technik analizy wielowymiarowej (ang. multivariate analysis, MVA) optymalizowane za pomocą uczenia maszynowego.

²Układ PAC wraz z innymi układami wyzwalania pierwszego stopnia został w latach 2015–2016 zastąpiony przez nowocześniejsze rozwiązania. W szczególności, Grupa Warszawska zaprojektowała i jest odpowiedzialna za jeden z nowych mionowych układów wyzwalania.

mór RPC. Układ PAT był pierwszą częścią układu wyzwiania za pomocą mionów, które są ważną sygnaturą w analizach fizycznych przy akceleratorach hadronowych (w szczególności tych dotyczących bozonu Higgsa).

Największy wkład w rozwój systemu PAC miałem już po obronie doktoratu w latach 2006/2007. Odbyła się wówczas seria testów, nazwanych MTCC (ang. Magnet Test and Cosmic Challenge) przeprowadzonych z użyciem w pełni wyposażonego wycinka detektora CMS umieszczonego na powierzchni, nad docelowym miejscem instalacji, za pomocą mionów z promieniowania kosmicznego [15]. Przeprowadzono wówczas testy zarówno samego układu PAC jak i jego współdziałania z pozostałymi układami CMS. Do testów PAC użyto promieniowania kosmicznego, a także specjalnie przygotowanych danych testowych [16, 17, 18, 19]. Byłem jedną z osób koordynujących udział Grupy Warszawskiej w MTCC. Prace te zostały nagrodzone przed dyrektora Instytutu Problemów Jądrowych jako jedno z najistotniejszych osiągnięć instytutu w 2006 r.

Jesienią 2007 r. zacząłem roczny staż podoktorski w Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas (LIP) w Lizbonie. W tym okresie zajmowałem się przygotowaniem pomiaru przekroju czynnego na produkcję par $t\bar{t}$ używając stanów końcowych z leptonem tau. W ciągu mojego pobytu w LIP udało się stworzyć zrab analizy opublikowanej później jako nota eksperymentu CMS [20]. Dodatkowo zaangażowałem się wówczas w prace nad wspólnymi dla całego zespołu CMS narzędziami do analizy danych, w szczególności związanymi z identyfikacją leptonów tau.

Jesienią 2008 r. zostałem zaproszony na dwuletni staż podoktorski w Laboratoire Leprince-Ringuet (LLR) przy École Polytechnique w Palaiseau (pod Paryżem), przedłużony następnie o kolejne trzy lata. W tym czasie brałem udział w pracach nad algorytmami rekonstrukcji i analizami przy użyciu cząstek dostarczonych przez rekonstrukcję „particle-flow („przepływ cząstek”) [21], w której rozwój zaangażowana była grupa CMS w LLR. W podejściu particle-flow, pomiary wykonane przy użyciu poszczególnych poddetektorów (ślady, depozyty energii w kalorymetrach i sygnał w komorach mionowych) są korelowane ze sobą w celu optymalnej rekonstrukcji i identyfikacji wszystkich cząstek w stanie końcowym. Następnie tak zrekonstruowane cząstki są używane do budowania „obiektów złożonych”: dżetów kwarkowych i gluonowych, leptonów tau rozpadających się na hadrony (i neutrino)³, brakującego pędu poprzecznego (sygnał neutrin lub inne hipotetycznych cząstek, które nie oddziałują z materiałem detektora) oraz do określania izolacji elektronów i mionów.

Kiedy rozpocząłem staż w LLR, pierwsza wersja rekonstrukcji particle-flow była gotowa, ale bez w pełni zintegrowanej rekonstrukcji elektronów. Ponadto podejście particle-flow nie było powszechnie akceptowane w zespole eksperymentu CMS. Dlatego postawiono mi następujące cele: po pierwsze zademonstrować za pomocą realistycznej analizy, że wykorzystanie particle-flow poprawia jej czułość, a po drugie, pomóc zrozumieć rekonstrukcję elektronów. Analizą wybraną w tym celu było poszukiwanie bozonu Higgsa rozpadającego się na pary taonów i produkowanego w procesie fuzji bozonów wektorowych (ang. vector boson fusion, VBF). Stwierdzono, że wykorzystanie rekonstrukcji particle-flow rzeczywiście poprawia czułość tej analizy dzięki lepszej rozdzielczości energetycznej i kątowej brakującego pędu poprzecznego, dżetów i leptonów tau w porównaniu do klasycznej rekonstrukcji opartej na poszczególnych poddetektorach (pomimo prostej rekonstrukcji leptonów tau). W ten sposób rozpoczęło się moje zaangażowanie w poszukiwania rozpadu $H \rightarrow \tau\tau$. Jeśli chodzi o elektrony, to badałem gęstości cząstek wokół elektronów (izolację), które to badania przyczyniły się do lepszego uwzględnienia fotonów hamowania w rekonstrukcji elektronów. Na początku badania te przeprowadzono za pomocą symulowanych przypadków, a następnie (w latach 2009–2010) za pomocą pierwszych danych proton-proton zebranych przez detektor CMS [22, 23, 24].

W trakcie rozwoju poszukiwań rozpadu $H \rightarrow \tau\tau$ brałem udział (i jestem zaangażowany do tej pory)

³Rozpady leptonów tau na elektrony i miony są rekonstruowane przez algorytmy rekonstrukcji tych leptonów.

w opracowywanie algorytmów do identyfikacji hadronowych rozpadów leptonów tau i przygotowania algorytmów układu wyzwalania (trygera) wysokiego poziomu (ang. high-level trigger, HLT) dla stanów końcowych z leptonami tau. W szczególności w latach 2011–2015 byłem koordynatorem (i aktywnym członkiem) grupy „Tau Trigger”, odpowiedzialnej za takie trygery. Był to wymagający okres, w którym świetność zderzeń w LHC wzrosła o rząd wielkości, co wymagało ciągłego i szybkiego dostosowywania i ulepszania algorytmów trygera. Zostało to osiągnięte m.in. dzięki integracji algorytmów opartych na particle-flow na HLT. Natomiast jeśli chodzi o identyfikację taonów to należałem do grona kilku osób, które zaproponowały by rekonstruować poszczególne rozpady leptonu tau przy użyciu cząstek dostarczanych przez particle-flow. Jeden z tak działających algorytmów (łączy pomysły kilku osób), nazwany HPS (ang. hadrons-and-strips, hadrony i paski), stał się oficjalnym algorytmem eksperymentu CMS [25].

Równolegle rozwijano analizę $H \rightarrow \tau\tau$ i analizowano zbierane dane, w czym brałem aktywny udział (byłem koordynatorem zespołu w LLR pracującego nad tym tematem⁴). Rozwój analizy był znaczący przez kolejno osiągnięte kamienie milowe: pierwszy pomiar przekroju czynnego na produkcję bozonu Z w jego rozpadach na pary tau za pomocą danych CMS z 2010 r. [26], przyczynek od poszukiwania rozpadu $H \rightarrow \tau\tau$ do odkrycia bozonu Higgsa w 2012 r. [27], oraz przesłanka (ang. evidence) na istnienie rozpadu $H \rightarrow \tau\tau$ uzyskana za pomocą pełnych danych zebranych w latach 2011–2012 (Run-1) [28]. Moim kluczowym wkładem w te poszukiwania była propozycja (zgłoszona niezależnie przez kilka osób) uwzględnienia w analizie przypadków nie spełniających warunków selekcji specyficznej dla produkcji VBF, a zawierających co najmniej jeden dżet. Takie przypadki są produkowane w procesie fuzji gluonowej (głównym procesie produkcji bozonu Higgsa w LHC), przy czym dżet jest promieniowany ze stanu początkowego. Obecność dżetu zwiększa stosunek sygnału do tła w porównaniu do przypadków wybranych bez wymagania jego obecności oraz powoduje, że układ dwóch taonów jest pchnięty Lorentzowsko, tj. posiada niezerowy p_T , co poprawia rozdzielczość zrekonstruowanej masy tego układu.

W latach 2011–2012 byłem koordynatorem dwustronnej współpracy pomiędzy grupami CMS w LLR i w Warszawie (Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego i Narodowe Centrum Badań Jądrowych) w ramach współpracy francusko-polskiej COPIN (ze strony francuskiej)⁵. Współpraca ta ułatwiła wymianę naukową i osobową między grupami, w szczególności pozwoliła doktorantowi z Warszawy (T. Früobesowi) na kilkumiesięczny staż w LLR.

Jesienią 2013 r. wróciłem do mojego macierzystego instytutu (Narodowe Centrum Badań Jądrowych) kontynuując zaangażowanie zarówno w rekonstrukcję leptonów tau, jak i badania nad rozpadem $H \rightarrow \tau\tau$ za pomocą CMS.

W 2015 r. zostałem wybrany (na dwa lata) na koordynatora tzw. Tau Physics Object Group (Tau POG), tj. zespołu osób opracowujących, utrzymujących w ruchu i weryfikujących działanie algorytmów identyfikacji taonów w CMS. Jako koordynator Tau POG byłem jednym z głównych autorów referencyjnej publikacji na temat algorytmu identyfikacji leptonu tau w CMS w czasie LHC Run-2 [29].

W 2015 r. uzyskałem trzyletni (przedłużony o rok) grant OPUS finansowany przez Narodowe Centrum Nauki, nr 2014/13/B/ST2/02543, zatytułowany „Rozpady na leptony tau – narzędzie do badania własności bozonu Higgsa za pomocą eksperymentu CMS przy LHC”⁵. Powołana w ramach tego grantu grupa badawcza złożona z pięciu osób (z Narodowego Centrum Badań Jądrowych i Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego) opracowywała metody eksperymentalne związane z identyfikacją leptonu tau oraz z trygerami przypadków z leptonami tau, a także brała udział w analizie, która ostatecznie

⁴Zespół składał się z jednego lub dwóch doktorów (postdoc’ów) i dwóch lub trzech doktorantów.

⁵Szczegóły dotyczące projektów, w których uczestniczyłem i prezentacji na międzynarodowych konferencjach znajdują się w załączniku nr 5 zatytułowanym „Informacje dodatkowe o dorobku”, plik: MBluj_DodatkoweInfo.pdf.

doprowadziła do obserwacji rozpadu $H \rightarrow \tau\tau$ przez eksperyment CMS [30].

Równolegle dołączyłem do działalności Warszawskiej Grupy związanej z rozwojem nowego mionowego układu wyzwalania pierwszego poziomu detektora CMS, koordynowanej przez Marcina Koneckiego. W szczególności zaproponowałem algorytm do usuwania duplikatów zrekonstruowanego sygnału pojedynczych mionów.

Wreszcie, warto wspomnieć, że byłem wielokrotnie wybierany, aby przedstawiać w imieniu eksperymentu CMS wyniki analiz fizycznych na międzynarodowych konferencjach. Byłem również aktywny w wewnętrznych komitetach CMS recenzujących wyniki przygotowywane do publikacji, jako ekspert w dziedzinie identyfikacji tau, rekonstrukcji particle-flow i ogólnych metod analizy.

Dodatkowe informacje dotyczące szczegółów moich osiągnięć dydaktycznych, współpracy naukowej na poziomie krajowym i międzynarodowym, prezentacji na konferencjach międzynarodowych itp. są prezentowane są w załączniku nr 5, pt. „*Informacje dodatkowe o dorobku*” (plik: MBluj_DodatkoweInfo.pdf).

5 Prezentacja osiągnięcia naukowego

wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789)

Jako osiągnięcie naukowe przedstawiam monografię pt.:

Od rekonstrukcji leptonu τ do obserwacji rozpadów bozonu Higgsa na pary $\tau\tau$ w eksperymencie CMS przy LHC,

wydaną przez Wydawnictwo Narodowego Centrum Badań Jądrowych, Świerk, 2019, ISBN 987-83-941410-8-0, której jestem jedynym autorem.

Przedstawiona monografia jest poświęcona rekonstrukcji i identyfikacji leptonów tau (w ich rozpadach na hadrony i neutrina) w eksperymencie CMS oraz poszukiwaniom rozpadu $H \rightarrow \tau\tau$ za pomocą tego eksperymentu. Tematyka ta jest odzwierciedleniem prac badawczych jakie podjąłem po uzyskaniu doktoratu.

Monografię otwiera krótki rys historyczny przedstawiający odkrycie leptonu tau przez Martina Perla z zespołem. Jest to podręcznikowy przykład analizy fizycznej, która doprowadziła do odkrycia a następnie potwierdzenia tożsamości nowej cząstki. Dodatkowo detektor Mark I, za pomocą którego odkryto taon (a także mezon J/ψ), był jednym z pierwszych detektorów złożonych z (elektronicznych) poddetektorów różnego typu, które tworzą kolejne warstwy pokrywające pełen kąt bryłowy wokół punktu oddziaływania, co pozwala na identyfikację różnych rodzajów cząstek. Jako taki stał się on protoplastą większości współczesnych detektorów uniwersalnych używanych w fizyce wysokich energii, w tym detektora CMS.

W pierwszej części monografii omówiono konstrukcję detektora CMS (rozdz. 1) oraz rekonstrukcję przypadków zbieranych przez detektor CMS (rozdz. 2). Szczególną uwagę poświęcono nowatorskiej technice „particle-flow” („przepływ cząstek”) [21], w której rozwój miałem wkład. W tym podejściu przepływ cząstek przez detektor jest niejako śledzony od punktu oddziaływania przez detektor śladowy, kalorymetry aż do komór mionowych (stąd nazwa metody), tak by powiązać poszczególne tory z depozytami w kalorymetrach i sygnałami w komorach mionowych w celu optymalnej i spójnej rekonstrukcji

i identyfikacji wszystkich cząstek w stanie końcowym (elektronów, mionów, fotonów oraz naładowanych i neutralnych hadronów). Tak zrekonstruowane cząstki są następnie używane do rekonstrukcji dżetów powstałych z fragmentacji partonów (kwarków i gluonów), leptonów tau w ich rozpadach na hadrony (i neutrina), wyznaczania brakującego pędu poprzecznego oraz do określania izolacji elektronów i mionów.

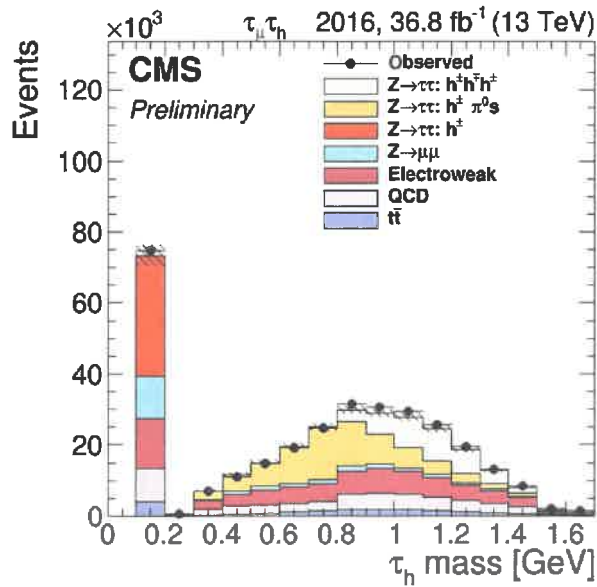
Druga część monografii jest dedykowana rekonstrukcji i identyfikacji leptonów tau w ich rozpadach na hadrony i neutrina (oznaczanym τ_h). Głównym wyzwaniem w identyfikacji τ_h jest ich odróżnienie od dżetów powstałych z fragmentacji kwarków i gluonów, które są obficie wytwarzane w zderzeniach proton-proton. W niektórych analizach błędna identyfikacja elektronów lub mionów jako kandydatów τ_h może również stanowić znaczne tło, które należy stłumić. Dostęp do cząstek zrekonstruowanych przez „particle-flow” umożliwia identyfikację poszczególnych produktów rozpadu τ_h , a następnie definicje dyskryminatorów błędnie zidentyfikowanych dżetów, elektronów i mionów w oparciu o rozkład i własności cząstek wokół tych produktów rozpadu. Podejście to (którego byłem współtwórcą) jest podstawą algorytmu HPS (ang. hadrons-plus-strips) stworzonego w eksperymencie CMS [25, 29], który jest dyskutowany w rozdz. 3.

Algorytm HPS rekonstruuje poszczególne rozpady leptonów τ na hadrony rozpoczynając od składników dżetów zbudowanych z cząstek „particle-flow”. Stany końcowe rozpadów taonów obejmują naładowane hadrony oraz neutralne piony. Te ostatnie natychmiast rozpadają się na pary fotonów, które mają wysokie prawdopodobieństwo konwersji w pary e^+e^- podczas przechodzenia przez materiał detektora śladowego. Silne pole magnesu detektora CMS prowadzi do przestrzennego rozdzielania par e^+e^- w płaszczyźnie η - ϕ (pseudopośpieszność – kąt azymutalny). Zatem aby zrekonstruować pełną energię neutralnych pionów, elektrony i fotony mieszczące się w podłużnym regionie $\Delta\eta \times \Delta\phi$ są klastrowane tworząc „pasek” (ang. strip). Następnie, algorytm HPS tworzy wszystkie możliwe kombinacje naładowanych hadronów i pasek odpowiadające głównym kanałom rozpadu τ : h^\pm , $h^\pm\pi^0$ i $h^\pm\pi^0\pi^0$ (unifikowane do $h^\pm\pi^0$ s) oraz $h^\pm h^\mp h^\pm$. Stanowią one 57% wszystkich rozpadów τ oraz 88% rozpadów na hadrony⁶. Wymagane jest by wszystkie hadrony tworzące kandydata τ_h były skolimowane, tj. zawarte w wąskim stożku, a ich masa niezmiennicza była zgodna z masą rezonansu $\rho(770)$ lub $a_1(1260)$ odpowiednio dla hipotezy rozpadu w kanale $h^\pm\pi^0$ lub $h^\pm\pi^0\pi^0$ i $h^\pm h^\mp h^\pm$. W końcu ze wszystkich stworzonych kombinacji wybierana jest jedna o najwyższym p_T . Rozkład zrekonstruowanej masy kandydata τ_h zmierzony w przypadkach $Z/\gamma^* \rightarrow \tau\tau$ jest pokazany na rys. 1. Na rysunku przypadki z prawdziwymi τ_h są podzielone w zależności od zrekonstruowanego kanału rozpadu: dla rozpadów w kanale $h^\pm\pi^0$ rozkład masy τ_h ma, zgodnie z przewidywaniami, (szeroki) wierzchołek odpowiadający masie $\rho(770)$, a w kanale $h^\pm h^\mp h^\pm$ masie $a_1(1260)$, zaś kandydaci w kanale rozpadu h^\pm mają przypisaną masę naładowanego pionu.

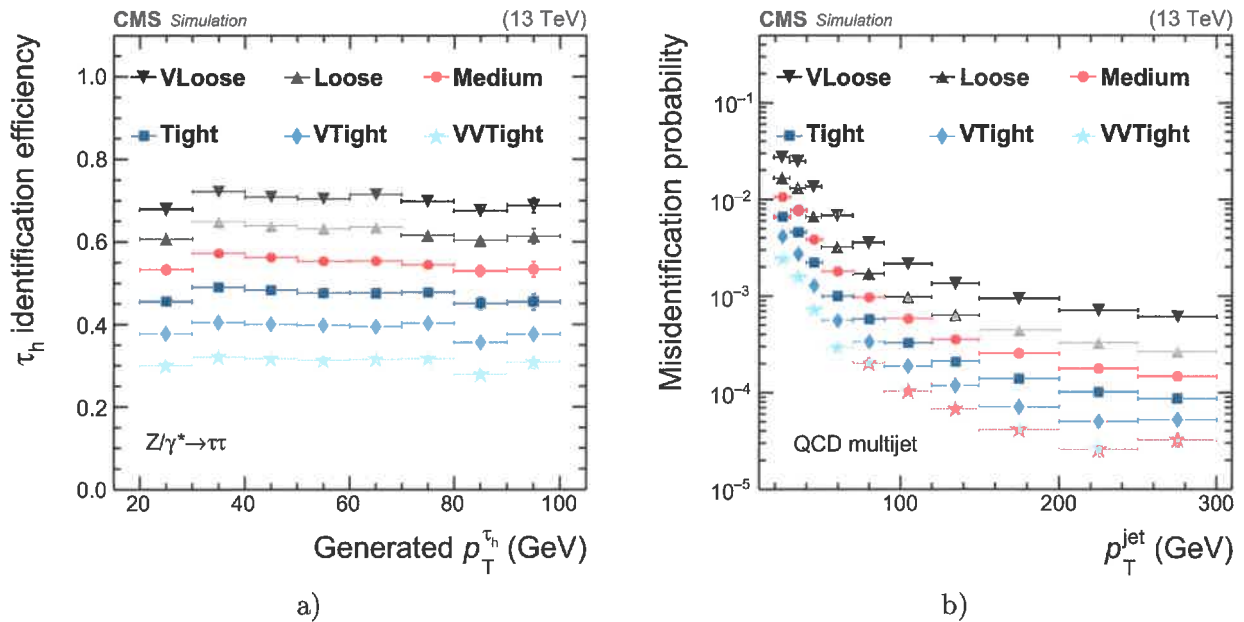
Po rekonstrukcji kanału rozpadu kandydat τ_h przechodzi serię identyfikacji, które mają na celu stłumienie tła pochodzącego od błędnie zidentyfikowanych dżetów, elektronów i mionów. Identyfikacje te bazują na rozkładzie i własnościach cząstek wokół zrekonstruowanego kandydata τ_h . Dyskryminatory błędnie zidentyfikowanych dżetów i elektronów zostały stworzone z wykorzystaniem technik analizy wielowymiarowej (ang. multivariate analysis, MVA). Całkowita efektywność rekonstrukcji i identyfikacji τ_h za pomocą algorytmu HPS wynosi, w zależności wybranego punktu pracy, między 30 a 70% przy prawdopodobieństwie błędnej identyfikacji dżetów, elektronów i mionów jako τ_h na poziomie $\mathcal{O}(10^{-3})$, co ilustruje rys. 2.

Następnie w rozdz. 4 zaprezentowano testy różnych aspektów działania algorytmu HPS przeprowadzone z użyciem danych zebranych przez CMS. Wykazują one dobrą zgodność z oczekiwaniami otrzymanymi za pomocą symulacji. Przykładowo, rys. 3 pokazuje stosunek efektywności powszechnie używanego

⁶Zobacz przypis 3.



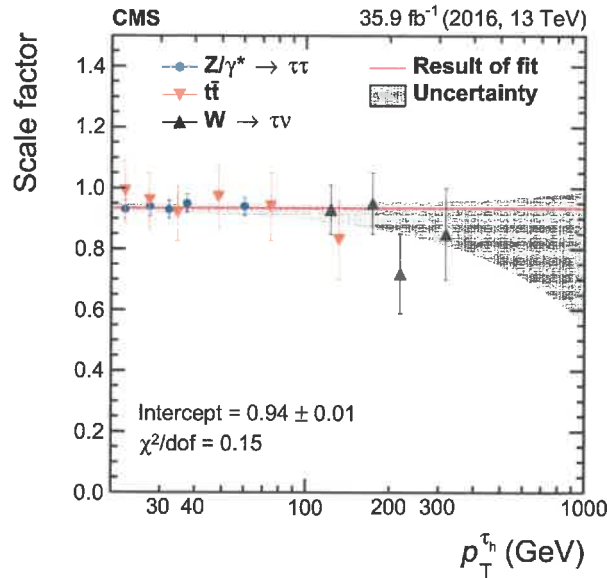
Rysunek 1: Rozkład zrekonstruowanej masy kandydata τ_h zmierzony za pomocą przypadków $Z/\gamma^* \rightarrow \tau\tau$ rozpadających się do stanu końcowego $\mu\tau_h$. Punkty odpowiadają zebranim danym, a wypełnione histogramy symulowanym przypadkom $Z/\gamma^* \rightarrow \tau\tau$ podzielonym w zależności od kanału rozpadu τ_h oraz procesom tła z dżetem lub mionem błędnie zidentyfikowanym jako τ_h [31].



Rysunek 2: Efektywność identyfikacji τ_h , oszacowana za pomocą symulowanych przypadków $Z/\gamma^* \rightarrow \tau\tau$ (a), oraz prawdopodobieństwo błędnej identyfikacji oszacowane za pomocą symulowanych przypadków wielodżetowych (b) dla różnych punktów pracy algorytmu HPS. Efektywność i prawdopodobieństwo błędnej identyfikacji wyznaczono odpowiednio w funkcji p_T generowanego τ_h lub p_T dżetu [29].

[Handwritten signature]

punktu pracy (Tight) identyfikacji τ_h zmierzonej w danych do oczekiwań z symulacji.



Rysunek 3: Czynniki skalujące (ang. scale factor) efektywności identyfikacji τ_h oczekiwaną w symulacji do zmierzonej w danych dla punktu pracy Tight w funkcji $p_T^{\tau_h}$. Pomiarów dokonano przy użyciu przypadków $Z/\gamma^* \rightarrow \tau\tau$, $t\bar{t} \rightarrow \mu\tau + \text{dżety}$ i $W \rightarrow \tau\nu$ [29].

W kolejnym rozdziale (rozd. 5) omówione są algorytmy wyzwalania detektora CMS z leptonami tau w stanie końcowym (za których definiowanie byłem odpowiedzialny) oraz wydajność tych algorytmów zmierzona w rzeczywistych danych zebranych przez CMS.

Rozdział 6 zawiera podsumowanie zawartej w drugiej części monografii dyskusji metod identyfikacji τ_h na poziomie układu wyzwalania i w ostatecznej rekonstrukcji przypadków w CMS.

Trzecia część monografii jest poświęcona analizie danych, która doprowadziła do obserwacji rozpadu bozonu Higgsa na pary taonów w CMS. Kanał rozpadu $H \rightarrow \tau\tau$ jest szczególnie interesujący, ponieważ jest to drugi (po $H \rightarrow b\bar{b}$), pod względem wielkości stosunku rozgałęzień, kanał rozpadu na fermiony. Biorąc pod uwagę fakt, że poszukiwanie rozpadów na pary $b\bar{b}$ za pomocą zderzaczy hadronowych są szczególnie trudne, właśnie w kanale dwu-taonowym spodziewano się pierwszej, bezpośredniej obserwacji sprzężenia bozonu Higgsa do fermionów, co rzeczywiście nastąpiło w 2016 r.⁷

Pierwsze rozdziały tej części monografii wprowadzają w tematykę związaną z bozonem Higgsa: rozdz. 7.1.1 przypomina podstawowe fakty związane z bozonem Higgsa, a rozdz. 7.1.2 prezentuje główne aspekty fenomenologii bozonu Higgsa w LHC wraz z zarysem analiz, które doprowadziły do jego odkrycia w 2012 r. [32, 27].

Następnie w rozdz. 7.2 omówiono strategię poszukiwań rozpadu $H \rightarrow \tau\tau$ w CMS. Strategia ta jest jednej strony zdeterminowana przez fakt, że leptony tau rozpadają się w detektorze w wielu kanałach, produkując zarówno lżejsze leptony naładowane jak i hadrony, co prowadzi do wielu możliwych stanów końcowych. Drugą okolicznością wpływającą na strategię są dodatkowe cząstki (w stosunku do produktów rozpadu taonów) w stanie końcowym związane z mechanizmem produkcji bozonu Higgsa.

⁷Niezależne obserwacje rozpadu $H \rightarrow \tau\tau$ zostały dokonane przez eksperymenty ATLAS i CMS za pomocą danych zebranych w 2016 r. przy czym publikacja CMS jest datowana na rok 2017 a ATLAS na 2018. Jednakże kombinacja danych zebranych przez te eksperymenty w latach 2011–2012 także doprowadziła zaobserwowania tego rozpadu.

Ich występowanie i charakterystyka pozwala na lepsze odróżnianie sygnału (produkcji bozonu Higgsa) od tła, tj. procesów prowadzących do stanu końcowego naśladowującego sygnał. We wczesnych studiach, tj. przed uruchomieniem LHC, strategia poszukiwań w kanale $H \rightarrow \tau\tau$ wykorzystywała jedynie szczególne cechy mechanizmu produkcji bozonu Higgsa w wyniku fuzji bozonów wektorowych (ang. vector boson fusion, VBF): istnienie dwóch dżetów odseparowanych w pseudopośpieszności, z silnie tłumioną aktywnością hadronową między nimi. Później, w czasie analizy wczesnych danych CMS (zebranych w 2011 r.) dodano kategorię przypadków z jednym dżetem oraz dopełniającą ją kategorię bez dżetów. Są one czułe na dominujący proces produkcji bozonu Higgsa – fuzję gluonową ($gg \rightarrow H$). Utworzenie dwóch kategorii czułych na proces $gg \rightarrow H$ zamiast jednej inkluzywnej (czego byłem jednym z autorów) jest motywowane obserwacją, że przekrój czynny na produkcję bozonu Higgsa spada wolniej z p_T dodatkowego dżetu (emitowanego ze stanu początkowego) niż przekroje czynne głównych procesów tła, co daje wyższą czystość (więc i czułość) niż dla kategorii inkluzywnej. Dodatkowo, występowanie dżetu oznacza, że bozon Higgsa ma niezerowy pęd poprzeczny (równoważący p_T dżetu) co poprawia rozdzielczość rekonstruowanej masy pary taonów, która jest główną zmienną odróżniającą sygnał i tło. W końcu, występowanie dodatkowego leptonu (elektronu lub mionu) albo pary leptonów może być sygnałem rozpadów leptonowych bozonów W i Z produkowanych wraz z bozonem Higgsa. Jednakże ze względu na mały przekrój czynny tego procesu produkcji, który jest dodatkowo tłumiony przez wymaganie leptonowych rozpadów bozonów Z i W, jego wkład do ostatecznego wyniku poszukiwań rozpadów $H \rightarrow \tau\tau$ jest mały (zatem niedyskutowany w monografii).

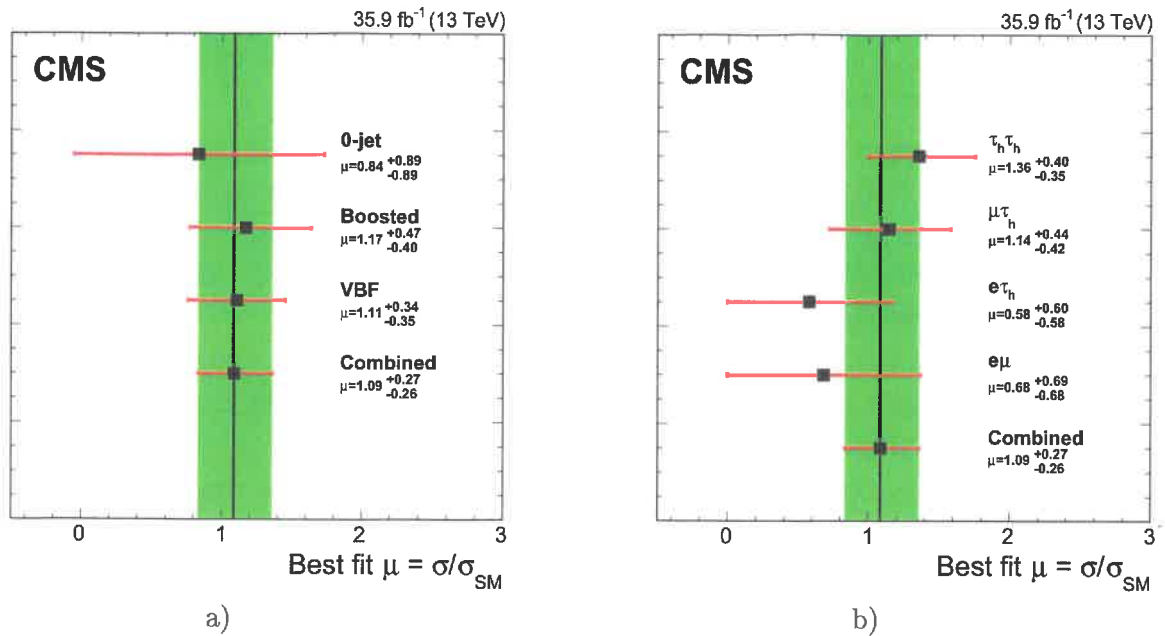
W rozdziale 7.3 omówiono metody wyznaczania masy niezmienniczej pary taonów z użyciem widocznych produktów ich rozpadów i brakującego pędu poprzecznego.

W kolejnych rozdziałach została przedstawiona właściwa analiza danych CMS: rozdz. 7.4 omawia selekcję przypadków, rozdz. 7.5 podział przypadków na kategorie inspirowane procesem produkcji w zależności od liczby i własności kinematycznych dżetów, a rozdz. 7.6 metody wyznaczania oczekiwanego poziomu tła. Dyskusja niepewności systematycznych i wyniki przedstawiają rozdz. 7.7 i 7.8.

W wyniku analizy 36 fb^{-1} danych zebranych przez CMS w 2016 r. zaobserwowano znaczącą nadwyżkę przypadków ponad oczekiwaniami dla tła, na poziomie 4,9 odchylenia standardowych ($4,9\sigma$) dla masy bozonu Higgsa $m_H = 125,09 \text{ GeV}$, przy oczekiwanej istotności $4,7\sigma$ [30]. Siła sygnału, tj. stosunek mierzonego i oczekiwanego iloczynu przekroju czynnego i stosunku rozgałęzień, najlepiej opisująca dane wynosi $\mu = 1,09_{-0,26}^{+0,27}$. Wartości siły sygnału otrzymane niezależnie dla poszczególnych kategorii i stanów końcowych są spójne ze sobą i wartością globalną, co dowodzi zgodności nadwyżki z hipotezą rozpadów $H \rightarrow \tau\tau$ (rys. 4). Gdy wyniki analizy danych z 2016 r. skombinuje się z wynikiem analizy danych Run-1 (2011–2012), w których obserwowano nadwyżkę o istotności $3,2\sigma$, otrzymuje się istotność $5,9\sigma$ co przekracza zwyczajowo przyjęty próg obserwacji ($>5\sigma$). Skombinowanej istotności odpowiada siła sygnału $\mu = 0,98 \pm 0,18$.

W końcu, dzięki kombinacji pomiarów CMS obejmujących wszystkie dostępne w LHC rozpady bozonu Higgsa (w tym rozpad $H \rightarrow \tau\tau$) możliwe było wyznaczenie stosunku mierzonego i oczekiwanego sprzężenia bozonu Higgsa i leptonu tau (κ_τ). Zmierzona wartość tego parametru wynosi $\kappa_\tau = 1,01_{-0,20}^{+0,16}$ i jest zgodna z jednością oczekiwaną w Modelu Standardowym [33].

Ostatni rozdział monografii (rozd. 8) zawiera podsumowanie oraz kreśli kierunki rozwoju analiz rozpadu $H \rightarrow \tau\tau$ i wkład jaki mogą one wnieść do badania własności bozonu Higgsa.



Rysunek 4: Wartości siły sygnału (μ) otrzymane niezależnie w kategoriach (a) i stanach końcowych (b) przy założeniu $m_H = 125, 09$ GeV. Globalna wartość siły sygnału otrzymana we wszystkich kategoriach i stanach końcowych („Combined”) wynosi $\mu = 1, 09^{+0.27}_{-0.26}$ [30].

Literatura

- [1] F. Englert and R. Brout, “Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons”, *Phys. Rev. Lett.* **13** (1964) 321, doi:10.1103/PhysRevLett.13.321.
- [2] P. W. Higgs, “Broken symmetries, massless particles and gauge fields”, *Phys. Lett.* **12** (1964) 132, doi:10.1016/0031-9163(64)91136-9.
- [3] G. S. Guralnik, C. R. Hagen, and T. W. B. Kibble, “Global conservation laws and massless particles”, *Phys. Rev. Lett.* **13** (1964) 585, doi:10.1103/PhysRevLett.13.585.
- [4] P. W. Higgs, “Spontaneous symmetry breakdown without massless bosons”, *Phys. Rev.* **145** (1966) 1156, doi:10.1103/PhysRev.145.1156.
- [5] T. W. B. Kibble, “Symmetry breaking in non-Abelian gauge theories”, *Phys. Rev.* **155** (1967) 1554, doi:10.1103/PhysRev.155.1554.
- [6] LEP Working Group for Higgs boson searches, “Search for the standard model Higgs boson at LEP”, *Phys. Lett. B* **565** (2003) 61, doi:10.1016/S0370-2693(03)00614-2, arXiv:hep-ex/0306033.
- [7] M. Bluj, “LEP jako narzędzie poszukiwania nowej fizyki”, Master’s thesis, Physics Department, University of Warsaw, 2000.
- [8] M. Bluj, M. Boonekamp, J. Hoffman, and P. Zalewski, “Searches for Higgs Bosons in a general Two Higgs Doublet Model”, Technical Report DELPHI-2001-068-CONF-496, 2001. Contributed Paper for EPS HEP 2001 (Budapest) and LP 2001 (Rome), 2001.

Handwritten signature

- [9] M. Bluj, "Poszukiwanie bozonów Higgosa w akceleratorach LEP i LHC. A search for the Higgs bosons with LEP and LHC colliders". PhD thesis, Soltan Institute for Nuclear Studies, Poland, 2006. <http://cds.cern.ch/record/1446585>.
- [10] DELPHI Collaboration, "Searches for neutral higgs bosons in extended models", *Eur. Phys. J. C* **38** (2004) 1, doi:10.1140/epjc/s2004-02011-4, arXiv:hep-ex/0410017.
- [11] ALEPH, DELPHI, L3, OPAL, LEP Working Group for Higgs Boson Searches Collaboration, "Search for neutral MSSM Higgs bosons at LEP", *Eur. Phys. J. C* **47** (2006) 547, doi:10.1140/epjc/s2006-02569-7, arXiv:hep-ex/0602042.
- [12] DELPHI Collaboration, "Higgs boson searches in CP-conserving and CP-violating MSSM scenarios with the DELPHI detector", *Eur. Phys. J. C* **54** (2008) 1, doi:10.1140/epjc/s10052-007-0506-1, arXiv:0801.3586.
- [13] E. Accomando et al., "Workshop on CP Studies and Non-Standard Higgs Physics", doi:10.5170/CERN-2006-009, arXiv:hep-ph/0608079.
- [14] CMS Collaboration, "CMS technical design report, volume II: Physics performance", *J. Phys. G* **34** (2007) 995, doi:10.1088/0954-3899/34/6/S01.
- [15] CMS Collaboration, "The CMS Magnet Test and Cosmic Challenge", CMS Note CMS-NOTE-2007-005, 2007. <https://cds.cern.ch/record/1281672>.
- [16] K. Bunkowski et al., "Synchronization methods for the PAC RPC trigger system in the CMS experiment", *Measur. Sci. Tech.* **18** (2007) 2446, doi:10.1088/0957-0233/18/8/020.
- [17] W. M. Zabolotny et al., "Implementation of the data acquisition system for the resistive plate chamber pattern comparator muon trigger in the CMS experiment", *Measur. Sci. Tech.* **18** (2007) 2456, doi:10.1088/0957-0233/18/8/021.
- [18] A. Colaleo et al., "First measurements of the performance of the barrel RPC system in CMS", *Nucl. Instrum. Meth. A* **609** (2009) 114, doi:10.1016/j.nima.2009.07.099.
- [19] G. Roselli et al., "Resistive plate chamber commissioning and performance in CMS", *Nucl. Instrum. Meth. A* **602** (2009) 696, doi:10.1016/j.nima.2008.12.092.
- [20] CMS Collaboration, "Towards the measurement of the $t\bar{t}$ cross section in the $e\tau$ and $\mu\tau$ dilepton channels in pp collisions at $\sqrt{s} = 14$ TeV", CMS Physics Analysis Summary CMS-PAS-TOP-08-004, 2009. <https://cds.cern.ch/record/1198689>.
- [21] CMS Collaboration, "Particle-flow reconstruction and global event description with the CMS detector", *JINST* **12** (2017) P10003, doi:10.1088/1748-0221/12/10/P10003, arXiv:1706.04965.
- [22] CMS Collaboration, "Commissioning of the Particle-flow Event Reconstruction with the first LHC collisions recorded in the CMS detector", CMS Physics Analysis Summary CMS-PAS-PFT-10-001, 2010. <https://cds.cern.ch/record/1247373>.
- [23] CMS Collaboration, "Commissioning of the Particle-Flow reconstruction in Minimum-Bias and Jet Events from pp Collisions at 7 TeV", CMS Physics Analysis Summary CMS-PAS-PFT-10-002, 2010. <https://cds.cern.ch/record/1279341>.
- [24] CMS Collaboration, "Particle-flow commissioning with muons and electrons from J/Psi and W events at 7 TeV", CMS Physics Analysis Summary CMS-PAS-PFT-10-003, 2010. <https://cds.cern.ch/record/1279347>.

- [25] CMS Collaboration, “Reconstruction and identification of τ lepton decays to hadrons and ν_τ at CMS”, *JINST* **11** (2016) P01019, doi:10.1088/1748-0221/11/01/P01019, arXiv:1510.07488.
- [26] CMS Collaboration, “Measurement of the inclusive Z cross section via decays to tau pairs in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV”, *JHEP* **08** (2011) 117, doi:10.1007/JHEP08(2011)117, arXiv:1104.1617.
- [27] CMS Collaboration, “Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC”, *Phys. Lett. B* **716** (2012) 30, doi:10.1016/j.physletb.2012.08.021, arXiv:1207.7235.
- [28] CMS Collaboration, “Evidence for the 125 GeV Higgs boson decaying to a pair of τ leptons”, *JHEP* **05** (2014) 104, doi:10.1007/JHEP05(2014)104, arXiv:1401.5041.
- [29] CMS Collaboration, “Performance of reconstruction and identification of τ leptons decaying to hadrons and ν_τ in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV”, *JINST* **13** (2018) P10005, doi:10.1088/1748-0221/13/10/P10005, arXiv:1809.02816.
- [30] CMS Collaboration, “Observation of the Higgs boson decay to a pair of τ leptons with the CMS detector”, *Phys. Lett. B* **779** (2018) 283, doi:10.1016/j.physletb.2018.02.004, arXiv:1708.00373.
- [31] CMS Collaboration, “Tau-Id performance with full 2016 dataset using $Z \rightarrow \tau_\mu \tau_h$ events”, CMS Detector Performance Note CMS-DP-2017-002, 2017. <https://cds.cern.ch/record/2243476>.
- [32] ATLAS Collaboration, “Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC”, *Phys. Lett. B* **716** (2012) 1, doi:10.1016/j.physletb.2012.08.020, arXiv:1207.7214.
- [33] CMS Collaboration, “Combined measurements of Higgs boson couplings in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV”, *Submitted to: Eur. Phys. J.* (2018) arXiv:1809.10733.

