

Autoreferat

Michał Szleper
Narodowe Centrum Badań Jądrowych
Zakład Fizyki Wielkich Energii
ul. Hoża 69, 00-681 Warszawa

1 Dane osobowe

Imię i nazwisko: Michał Szleper

2 Wykształcenie

- **1996: doktor nauk fizycznych**, Instytut Problemów Jądrowych im. A. Sołtana
Tytuł rozprawy doktorskiej: *Precision measurement of the structure function ratio F_2^{Sn}/F_2^C*
Promotor: prof. dr hab. Jan Nassalski
Recenzenci: prof. dr hab. Andrzej Eskreys, prof. dr hab. Jan Królikowski
- **1990: magister fizyki**, specjalizacja: fizyka cząstek elementarnych, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski
Tytuł pracy magisterskiej: *Study of nuclear effects in deep inelastic muon scattering on ${}^6\text{Li}$, ${}^{12}\text{C}$ and ${}^{40}\text{Ca}$*
Opiekun: dr Jacek Ciborowski

3 Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu

w odwrotnym porządku chronologicznym

- **2012-dzisiaj** - Adiunkt, Narodowe Centrum Badań Jądrowych;
- **2001-2007** - Research Associate, Northwestern University, USA;
- **1996-2012** - Adiunkt, Instytut Problemów Jądrowych im. A. Sołtana;
- **1996-1997** - Postdoctoral Fellow, University of Edinburgh, UK;
- **1991-1996** - Fizyk (doktorant), Instytut Problemów Jądrowych im. A. Sołtana.

4 Życiorys naukowy

4.1 Okres do doktoratu

Moja praca magisterska związana była z eksperymentem NA37 w CERN, bardziej znanym jako Nowa Współpraca Mionowa (NMC). Po egzaminie magisterskim, w 1991 r., zostałem zatrudniony w Instytucie Problemów Jądrowych na stanowisku fizyka (nie istniała wówczas w IPJ instytucja studium doktoranckiego) i związałem się z grupą warszawską pracującą przy NMC w celu uzyskania stopnia doktora. Tematyka mojej pracy dotyczyła pomiarów funkcji struktury protonu związanego w ciężkich jądrach atomowych w procesie głęboko nieelastycznego rozpraszania mionów na jądrach. Temat ten związany był ściśle z zaobserwowanym kilka lat wcześniej i będącym wówczas jednym z głównych punktów zainteresowania tej części fizyki tzw. efektem EMC. Dotyczył on pytania, dlaczego i w jaki sposób funkcja struktury nukleonu F_2 mierzona na jądrze różni się od mierzonej na swobodnym nukleonie. W okresie mojego doktoratu eksperyment NA37 już nie brał danych; trwała natomiast analiza danych zebranych w poprzednich latach. Eksperyment poznałem praktycznie dopiero w trakcie naświetleń dla NA47, czyli następcy NA37 (bardziej znanym jako Spinowa Współpraca Mionowa, SMC), w których również brałem udział. Wynikiem mojej pracy był m.in. pomiar stosunku F_2^{Sn}/F_2^C w funkcji zmiennej skalującej Bjorkena x i jego zależności od Q^2 (kwadratu przekazu czteropędu w oddziaływaniu mion-jądro), oraz wykazanie, że zależność ta jest tego rzędu, jakiego należy się spodziewać z równań ewolucji Chromodynamiki Kwantowej (QCD). Do dnia dzisiejszego jest to jedyny pomiar o wystarczającej precyzji do stwierdzenia takiej zależności. Mój doktorat był ostatnim doktoratem w NMC, przez co na mnie w dużym stopniu spadło zadanie doprowadzenia do wyników końcowych i przygotowania publikacji. Byłem także w Komitecie redakcyjnym innej publikacji związanej z jądrowymi funkcjami struktury.

W ramach doktoratu byłem trzykrotnie, na miesięczne pobyty, zaproszonym gościem Instytutu Maxa Plancka w Heidelbergu. Wraz z miejscową silną grupą zaangażowaną w analizę danych NMC, pracowałem tam m.in. nad wprowadzeniem nowych formatów danych dla NMC, ułatwiających analizę przy bardzo wysokich (jak na ówczesne czasy) statystykach. Wyniki związane z moim doktoratem dwukrotnie prezentowałem na konferencjach międzynarodowych i dwukrotnie na krajowych seminariach. Jestem współautorem 12 publikacji współpracy NMC i 12 publikacji współpracy SMC.

4.2 Pierwszy okres po doktoracie: działalność związana z badaniem łamania symetrii CP w kwarkach i neutrinach

Po zrobieniu doktoratu objąłem stanowisko adiunkta w Instytucie Problemów Jądrowych im. A. Sołtana. Po ukończeniu ostatnich prac w NMC, zmieniłem główny nurt moich zainteresowań w stronę szeroko pojętych oddziaływań elektroślabych. O łamaniu symetrii CP w połowie lat 90-tych nie było wiadomo praktycznie nic poza oryginalną obserwacją rozpadu K_L na dwa piony z roku 1964 i pomiarami ściśle związanej z tym asymetrii ładunkowej w półleptonowych kanałach rozpadu K_L . W 1996 r., wraz z grupą fizyków z IPJ przystąpiłem do eksperymentu NA48, którego główna tematyka dotyczyła łamania CP „wprost” (czyli poprzez rozpad zachodzący pomiędzy stanami o dobrze określonym, przeciwnym CP) w układzie neutralnych kaonów.

Od listopada 1996 do listopada 1997 przebywałem na Uniwersytecie w Edynburgu jako Post-doctoral Fellow, przy czym około połowę tego czasu spędziłem fizycznie w CERN przy eksperymencie NA48, który wówczas wchodził w swój pierwszy rok zbierania danych. Przez ten czas byłem odpowiedzialny za działanie systemu monitorującego liczniki mionowe przy NA48 i byłem autorem zasadniczej części kodu monitorującego, który używany był potem przez następne lata w postaci praktycznie niezminionej¹. Uczestniczyłem także w analizie danych fizycznych związanej z najważniejszym celem eksperymentu, jakim był precyzyjny pomiar stosunku parametrów ϵ'/ϵ , liczby charakteryzującej łamanie CP wprost w układzie neutralnych kaonów. Moja praca dotyczyła badania efektów systematycznych związanych z akceptacją detektora poprzez mierzone rozkłady czasów życia K_S i K_L . Działalność tę kontynuowałem po powrocie do Warszawy, a jej produktem ubocznym była publikacja precyzyjnego pomiaru czasu życia K_S ze wszystkich danych NA48 (ponieważ ja sam byłem już wówczas zaangażowany w inne projekty, pracę tę dokończyli inni fizycy).

Przejęciowym epizodem mojej działalności w ramach NA48 było także poszukiwanie lekkich gluino, czyli supersymetrycznych partnerów gluonów, w zakresie mas rzędu paru GeV. Takie gluino żyłoby wystarczająco długo, aby utworzyć stan związany z gluonem, tzw. R^0 , przed rozpadem. Możliwość ta, wynikająca z możliwej interpretacji danych z LEP została w tym czasie zauważona przez Farrar [1] i stała się przedmiotem znaczącej kontrowersji. Eksperyment NA48 okazał się idealnym miejscem do doświadczalnego sprawdzenia tego wariantu Supersymetrii. Byłem jedną z dwóch osób, które doceniły potencjalną rolę NA48 w rozwiązaniu tej zagadki i przeprowadziły stosowne symulacje oraz szybką analizę zebranych już danych (reguły wewnętrzne w NA48 narzucały wymóg istnienia conajmniej dwóch niezależnych analiz w celu publikacji wyniku). Nasza publikacja na wiele lat zamknęła dyskusję nt. istnienia tzw. "light gluino window", czyli niezbadanego doświadczalnie obszaru przestrzeni parametrów w Supersymetrii, w którym gluino może być bardzo lekkie. Publikacja nt. lekkich gluino była pierwszą publikacją NA48 dotyczącą fizyki.

W latach 2001-2002 byłem kierownikiem grantu KBN pt. *Eksperyment NA48 w CERN: opracowanie danych i analiza fizyczna*, który był podstawą finansowania działalności grupy warszawskiej w NA48. Działalność ta obejmowała: udział w symulacjach Monte Carlo do pomiaru ϵ'/ϵ , pomiary czasów życia K_S i K_L , oraz badanie rzadkich rozpadów $K_{S,L} \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$ i $K_{S,L} \rightarrow \pi^+\pi^-e^+e^-$.

Druga faza mojej aktywnej działalności w NA48 przypada na lata 2003-2005 i związana była z projektem NA48/2, o czym będzie jeszcze mowa poniżej. Wyniki z NA48 (łącznie z NA48/2) prezentowałem kilkakrotnie na międzynarodowych konferencjach i wewnętrznych seminariach².

Koniec lat 90. w fizyce cząstek elementarnych to także pierwsza obserwacja zjawiska oscylacji neutrin w Super-Kamiokande. Począwszy od roku 1999, byłem zaangażowany w proces tworzenia w Warszawie silnej grupy neutrinowej. Byłem jedną z pierwszych osób z Warszawy, które przyłączyły się do prac przy projekcie ICANOE/Icarus w Gran Sasso. Pod moim nadzorem przeprowadzone zostały symulacje do projektu zewnętrznego trygera dla detektora Icarus. Tryger miał posłużyć zademonstrowaniu kluczowych zdol-

¹Zob. nota wewnętrzna NA48, "The Muon Veto Monitor", NA48-04/98, mojego autorstwa.

²Pełniejsza informacja o moich wystąpieniach konferencyjnych i seminaryjnych po uzyskaniu doktoratu znajduje się w załączniku nr 4.

ności detekcyjnych długich torów mionowych dla dużego detektora opartego na technologii ciekłego argonu [2]. Następnie parokrotnie przebywałem na krótkich wyjazdach w Gran Sasso we Włoszech oraz w Pawii w celu przeprowadzenia testów i instalacji trygera, a także innych prac związanych z przygotowaniem pierwszej połowy modułu T600. Zaprojektowany i skonstruowany przez nas tryger z powodzeniem używany był do naświetleń testowych w Icarusie w roku 2001³.

Przez cały okres od stycznia 2001 do maja 2007 przebywałem w Stanach Zjednoczonych, gdzie pracowałem na Northwestern University jako Research Associate. Aż do 2005 roku moja główna działalność koncentrowała się wokół projektów neutrinowych oraz NA48.

Wkrótce po pierwszych obserwacjach oscylacji neutrin aktualne stało się pytanie, czy łamanie CP istnieje także w sektorze neutrin i czy może ono pomóc rozwiązać zagadkę asymetrii materia-antymateria we Wszechświecie. Pierwszym krokiem w tym kierunku musiało być stwierdzenie niezerowej wartości kąta θ_{13} w macierzy mieszania neutrin (MNS), a droga do tego wiodła poprzez obserwację szczytkowej oscylacji $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$. W ramach grupy Northwestern nawiązałem współpracę z eksperymentem MINOS, gdzie moim zadaniem było przygotowanie przyszłego pomiaru ν_e -*appearance*. Byłem pierwszą osobą, która rozpoczęła systematyczne prace symulacyjne nad świeżą wówczas koncepcją umieszczenia dalekiego detektora pod niezerowym kątem względem osi wiązki neutrin z NuMI (Neutrino Main Injector w Fermilabie). Projekt ten najpierw znany był pod nazwą NuMI Off-Axis, a ostatecznie stał się działającym obecnie eksperymentem NOvA. Koncepcja Off-Axis była nawiązaniem do znanego faktu, że widmo wiązki neutrin pod niezerowym kątem posiada kilka istotnych zalet w stosunku do wiązki na wprost. W skrócie, detektor Off-Axis pozwalał na znacznie lepszy pomiar ν_e -*appearance* bez konieczności przebudowy linii wiązki. Moim najbardziej osobistym wkładem było zaproponowanie metody obliczenia widma referencyjnego, tzn. spodziewanego przy hipotezie braku oscylacji, w dalekim detektorze. Metoda polegała na jednorazowym wyznaczeniu, na podstawie obliczalnych więzów kinematycznych, tzw. macierzy przejścia, czyli spodziewanego rozkładu energii neutrin w dalekim detektorze przypadającego statystycznie na każde neutrino zarejestrowane w bliskim detektorze, z założenia umieszczonym na wprost. Kluczowym punktem było wykazanie, że niepewności w wyznaczeniu postaci samej macierzy, np. te pochodzące od widma produkcji hadronów w pierwotnym oddziaływaniu proton-tarcza, w dużej mierze upraszczają się przy przejściu od jednego widma neutrin do drugiego. Niezależnie od tych niepewności, jak również od samego położenia dalekiego detektora, technika macierzy przejścia pozwalała na przewidzenie widma referencyjnego z zadowalającą dokładnością. Oryginalną motywacją macierzy przejścia był projekt Off-Axis, ale okazało się, że metoda pozwala na znaczącą redukcję błędów systematycznych także w przypadku detektora ustawionego na osi. Metoda ta, w uaktualnionej wersji, jest obecnie znana jako “Matrix Method” i jest do dzisiaj używana w eksperymencie MINOS. Dwie prace, których jestem jednym z dwóch autorów [3], oraz kolejne, których jestem jednym z kilku autorów [4], wniosły istotne podwaliny pod koncepcję NuMI Off-Axis w jej początkowym okresie i chociaż nigdy nie zostały posłane do publikacji (pozostały jedynie w archiwum arXiv i jako noty wewnętrzne NuMI lub raporty Fermilabu), do dzisiaj zbierają dużo cytowań.

Metodę macierzy przejścia oraz związane z nią studia dla NuMI Off-Axis referowałem na szeregu konferencji i warsztatów roboczych (workshops) w latach 2001-2002. Były to

³Zob. też nota wewnętrzna Icarusa, “An external trigger system for the ICARUS T600 test”, ICARUS-TM/2000-05.

w większości referaty zaproszone. W 2002 roku uczestniczyłem także w studium w Aspen (Colorado, USA) dotyczącym wyznaczenia mapy drogowej dla fizyki neutrin w Stanach Zjednoczonych oraz wyboru lokalizacji dla przyszłych eksperymentów neutrinowych [5].

Po roku 2002 moja działalność w fizyce neutrin osłabła, co było podyktowane wycofaniem się Northwestern University z projektów neutrinowych.

W roku 2003 wszedł w życie projekt NA48/2 w CERN, którego głównym celem było poszukiwanie łamania CP wprost w układzie naładowanych kaonów poprzez precyzyjny pomiar asymetrii w rozpadach $K^\pm \rightarrow 3\pi$. W tym projekcie brałem aktywny udział przez następną parę lat. Mój najbardziej bezpośredni wkład do głównego wyniku NA48/2 polegał na badaniu zapomnianych efektów systematycznych związanych z obecnością pasożytniczych, szczątkowych pól magnetycznych w rurze rozpadowej wiązki. Prawidłowe uwzględnienie tych pól przy rekonstrukcji kinematyki rozpadów K^\pm miało kluczowe znaczenie w uzyskaniu końcowego wyniku zwłaszcza w kanale rozpadu na trzy piony naładowane, którego precyzja statystyczna była najwyższa i który ostatecznie dostarczył najdokładniejszego testu Modelu Standardowego w NA48/2.

Praktycznie rzecz biorąc byłem pomocniczym opiekunem naukowym grupy studentów i doktorantów zajmujących się w ramach NA48/2 różnymi zagadnieniami związanymi z analizą rozpadów półleptonowych K^\pm . Jedną z ważniejszych motywacji tego kierunku działalności była wówczas istniejąca kontrowersja dotycząca elementu V_{us} macierzy mieszania kwarków (CKM), którego średnia wartość światowa według PDG'2002 odstawała od przewidywań Modelu Standardowego, jednakże w stopniu niekonkluzywnym statystycznie [6]. Wstępna, ekspresowa analiza rozpadów $K^\pm \rightarrow \pi^0 e^\pm \nu$ (K_{e3}^\pm) z NA48/2, wykonana została w znacznym stopniu przeze mnie osobiście. Dostarczyła ona nowego wyniku na V_{us} , o precyzji poniżej 1%, i w pełni zgodnego z Modelem Standardowym. Wynik ten ukazał się jeszcze tego samego roku na konferencjach międzynarodowych jako "NA48/2 preliminary" i praktycznie zakończył kontrowersję na temat V_{us} . W następnym kroku, pełna, końcowa analiza, rozszerzona o kanał rozpadu $K^\pm \rightarrow \pi^0 \mu^\pm \nu$, wykonana została w ramach doktoratu wykonywanego na Northwestern University, przy moim znaczącym wkładzie i opiece naukowej⁴.

Do dzisiejszego dnia jestem współautorem wszystkich publikacji NA48/2.

4.3 Działalność związana z badaniem mechanizmu łamania symetrii elektroślabej

4.3.1 Elementy działalności związanej z liniowym zderzaczem elektron-pozyton

Podczas pobytu na Northwestern zetknąłem się z grupą zaangażowaną w różnorakie studia związane projektem budowy przyszłego liniowego zderzacza elektron-pozyton (LC, a obecnie ILC i CLIC). Główne zainteresowania tej grupy dotyczyły opcji zderzacza foton-foton utworzonego na bazie zderzacza e^+e^- i związanej z nim fizyką. LC nigdy formalnie nie był moim głównym projektem, jednakże uczestniczyłem w wielu dyskusjach i byłem często proszony o pomoc merytoryczną w różnych zagadnieniach. Pomoc ta obejmowała m.in. osobiście wykonywane obliczenia, szczegółowe symulacje, oraz kierowanie pracą stu-

⁴Fakt ten nie figuruje wprawdzie w żadnej dokumentacji, ale powyższe twierdzę za wiedzą i zgodą osób zainteresowanych. Zob. też „Prace doktorskie których byłem opiekunem” w załączniku nr 4.

dentów. Z różnym natężeniem moja współpraca z grupą $\gamma\gamma$ trwała przez kilka lat, okresami pochłaniając nawet większą część mojego czasu.

Do moich oryginalnych wyników należy oszacowanie efektów głęboko nieelastycznego rozpraszania (oczywiste odniesienie do mojego doktoratu) elektronów na jądrach siatki krystalicznej w alternatywnej koncepcji wytwarzania wiązek fotonowych. Według tego pomysłu wiązki fotonów miały być uzyskiwane przy pomocy kryształu ustawionego na drodze wiązek e^+e^- . Fizyczny mechanizm wytwarzania kołowo spolaryzowanych fotonów o wysokiej energii przy pomocy sieci krystalicznej został najpierw zaproponowany na gruncie teoretycznym przez Cabibbo [7], a następnie wykazany przez eksperyment NA59 w CERN (R&D) [8]. Jednak wynik mojego obliczenia był dość jednoznacznie negatywny i spowodował odrzucenie tej koncepcji jako opcji dla LC.

Następnie uczestniczyłem w studiowaniu potencjału fizycznego opcji $\gamma\gamma$ jako fabryki Higgsa, ze szczególnym uwzględnieniem scenariuszy niestandardowych, a trudnych do detekcji w LHC. Prace te wykonywałem w ramach współpracy LHC/LC Study Group. Byłem głównym autorem pracy dotyczącej możliwości detekcji bozonu Higgsa w scenariuszu NMSSM (Next-to-Minimal Supersymmetry), gdzie lekki skalar Higgsa rozpadał się na dwa lekkie pseudoskalary ($h \rightarrow aa$), w zderzaczu $\gamma\gamma$ utworzonym przy maszynie typu CLIC [9]. Rozpatrywane przy tym były różne warianty wyjściowego widma $\gamma\gamma$. Konkluzją pracy było, że zaproponowana analiza stanów końcowych złożonych z czterech kwarków b lub dwóch kwarków b i dwóch leptonów τ , praktycznie niemożliwa w LHC, może być istotną motywacją fizyczną zderzacza $\gamma\gamma$, o ile niskoenergetyczna testowa maszyna typu CLIC została uruchomiona jeszcze przed wybudowaniem ILC. W założeniu, analiza tego typu powinna należeć do głównych punktów zainteresowania fizyków w przypadku gdyby LHC nie zobaczyło bozonu Higgsa w conajmniej jednym ze standardowych kanałów rozpadu. Ponieważ ostatecznie stało się inaczej, praca ta w swojej pierwotnej formie straciła obecnie na aktualności. Jednakże wniosłem pewien wkład w rozwój narzędzi do symulacji i technik analizy, który nadal jest aktualny.

Uczestniczyłem w dyskusjach w środowisku fizyków amerykańskich nad możliwymi lokalizacjami przyszłego zderzacza liniowego i w ramach tej dyskusji wykonane zostały pod moim doradztwem naukowym, a w dużej mierze przeze mnie osobiście, pomiary i pełna analiza fourierowska aktywności sejsmicznej na terenie wokół Fermilabu w funkcji głębokości pod powierzchnią ziemi. Możliwość taką stwarzała trójwymiarowa geometria tunelu NuMI przed pełną instalacją infrastruktury związanej z eksperymentem MINOS. Końcowy raport jest dostępny [10].

Moje wyniki były wielokrotnie pokazywane na zebraniach współpracy LC oraz na konferencji APS (American Physical Society). Jestem wymieniony jako współautor czterech tomów *ILC Reference Design Report*, które ukazały się w roku 2007 [11].

4.3.2 Eksperyment CMS przy LHC

Począwszy od 2005 roku moim głównym projektem naukowym jest eksperyment CMS przy LHC. Z ramienia Northwestern University włączyłem się w szeroko zakrojone prace związane z przygotowaniem kalorymetru hadronowego (HCAL) w CMS do pierwszych zderzeń w LHC. W całym tym okresie moja poprzednia działalność dotycząca bezpośrednio fizyki praktycznie ustała z powodu natłoku obowiązków przy HCAL w związku z planowanym startem LHC.

W okresie poprzedzającym uruchomienie detektora uczestniczyłem w konstrukcji modułów odczytu HCAL oraz we wstępnej kalibracji kalorymetru przy pomocy źródła promieniotwórczego podczas jego montażu w hali SX5 w CERN. Przyczyniłem się do stworzenia kodu służącego do kontroli jakości (QC) poszczególnych elementów odczytu HCAL bezpośrednio przed i po ich montażu na detektorze. Byłem jednym z 7 współautorów jednej z pierwszych not technicznych dotyczących HCAL w okresie instalacji detektora, w której doniesiono o pierwszej udanej próbie detekcji mionów kosmicznych przy pomocy kalorymetru hadronowego [12].

W 2006 roku zostałem osobą odpowiedzialną za początkową kalibrację HCAL w warunkach przed pojawieniem się pierwszych danych z LHC. Ostatecznym celem mojej pracy było uzyskanie rozsądnej rekonstrukcji depozytów energii w kalorymetrze w momencie gdy pojawiają się pierwsze dane z kolizji, zanim jeszcze te dane umożliwią dokładniejsze wykalibrowanie. Zadania, które wykonywałem wraz z kilkusobową grupą ekspertów, obejmowały:

- wypracowanie i wprowadzenie do wówczas powstającego oprogramowania CMS (zw. CMSSW) metod indywidualnej kalibracji poszczególnych cel kalorymetru,
- zdefiniowanie formatu danych do przeprowadzania kalibracji w trakcie naświetleń oraz jednolitych stałych kalibracyjnych używanych zarówno przy rekonstrukcji danych jak i do symulacji fizycznych,
- stworzenie kodu do monitorowania stabilności piedestałów HCAL podczas zbierania danych oraz bardziej szczegółowych analiz działania kalorymetru do przeprowadzania w warunkach *off-line*,
- stworzenie kodu do precyzyjnej kalibracji czasowej sygnałów z HCAL przy pomocy wiązki lasera oraz wewnętrznego systemu LED.

Podczas naświetleń części kalorymetru wiązką testową w CERN (2006) oraz podczas globalnych testów znanych pod nazwą MTCC (Magnet Test and Cosmic Challenge, faktycznie pierwszego poważnego testu integracji wszystkich podsystemów detektora CMS) byłem odpowiedzialny za uruchomienie i utrzymywanie software'u kalibracyjnego w stanie ciągłej operacji oraz za komunikację z bazą danych. Pełniłem nadzór nad wyznaczaniem stałych kalibracyjnych i piedestałów, systematycznym uaktualnianiem ich w bazie danych oraz utrzymywanie aktualnej mapy elektroniki HCAL (często w tym czasie zmieniającej się) w formacie gotowym do bieżących analiz robionych przez inne grupy.

Jestem autorem wielu fragmentów kodu w oficjalnym oprogramowaniu CMS w części dotyczącej kalibracji i rekonstrukcji energii w HCAL, który, z rozlicznymi późniejszymi modyfikacjami, jest nadal używany. Od 2006 roku aż do mojego wyjazdu z USA (kwiecień 2007) pełniłem funkcję łącznika pomiędzy zespołem detektora HCAL a zespołem do rekonstrukcji dżetów i brakującej energii poprzecznej (Jet-MET) wewnątrz współpracy CMS. Próbowałem także, aczkolwiek w ramach bardzo skromnych ram czasowych, być łącznikiem z nowo powstałym zespołem Particle Flow (techniki rekonstrukcji stosowanej w CMS, polegającej na jednoczesnym wykorzystywaniu informacji z wielu detektorów w celu identyfikacji cząstek).

Istotną częścią mojej działalności w ramach HCAL-CMS była działalność treningowa i doradcza w zakresie zasad funkcjonowania i obsługi kodu dla HCAL w CMSSW, ze

szczególnym uwzględnieniem tych jego części, których byłem autorem. W lecie 2006 r. zorganizowałem tutorial w CERN-ie ⁵.

Całość mojej działalności jest dobrze udokumentowana licznymi prezentacjami na zebraniach grupy HCAL w latach 2005-2006.

W 2007 roku wróciłem na stałe do Polski i związałem się z warszawską grupą CMS. Przyjąłem na siebie część odpowiedzialności grupy warszawskiej, związanej z uruchomieniem i działaniem trygera mionowego opartego o liczniki RPC (*Resistive Plate Chambers*). Moim wkładem było zdefiniowanie formatu podstawowych obiektów w CMSSW opisujących konfigurację trygera RPC, ich zunifikowanie w ramach szerszej struktury konfiguracji globalnego trygera CMS, oraz komunikacja z bazami danych (obiekty, o których tu mowa, to m.in. aktualna mapa połączeń elektronicznych, używany zestaw wzorców mionowych na podstawie których generowane są trygery, oraz inne parametry opisujące bieżący mod działania trygera). W zasadniczym okresie powstawania koncepcji baz danych w CMS, byłem łącznikiem pomiędzy grupą odpowiedzialną za bazy danych a grupą trygera RPC. Wniosłem także wkład w system monitorowania poprawności działania trygera RPC. Obejmowało to istotne ulepszenie istniejącego kodu emulatora trygera, które ostatecznie dało możliwość pełnego przewidywania wyników poprawnego działania hardware'u trygera, na podstawie równoległego procesowania przez emulator danych napływających z komór RPC.

Wielokrotnie w latach 2008-2012 wyjeżdżałem do CERN jako ekspert *on-call* odpowiedzialny za działanie trygera RPC podczas naświetleń testowych CMS, a następnie podczas zbierania danych z LHC.

Dwukrotnie byłem z ramienia RPC w komitetach redakcyjnych publikacji nt. działania trygera CMS.

W ramach grupy warszawskiej przez okres dwóch lat organizowałem quasi-regularne spotkania dotyczące fizyki, na których członkowie grupy mogli dyskutować swoją bieżącą działalność, oraz inne fizyczne aktualności z CMS.

W części fizycznej moim bezpośrednim zainteresowaniem jest od kilku lat badanie procesu rozpraszania par bozonów pośredniczących VV , gdzie $V = W^\pm, Z$, przy wysokich energiach. Jest to ważny test mechanizmu łamania symetrii elektroslabej w Modelu Standardowym. Historycznie rzecz biorąc, zainteresowanie oddziaływaniem VV związane było początkowo z kwestią istnienia - bądź nie - bozonu Higgsa, następnie zaś stwierdzeniem, czy odkryty już bozon rzeczywiście spełnia do końca swoje zadanie przypisane mu przez Model Standardowy. Według teorii, to bozon Higgsa ma zapewniać zachowanie unitarności w oddziaływaniach bozonów pośredniczących o polaryzacji podłużnej ($V_L V_L$). Pełny przebieg zależności przekroju czynnego na rozpraszanie $V_L V_L$ od masy niezmienniczej pary VV zależy od kilku liczb, które w Modelu Standardowym są jednoznacznie wyznaczone. Jej doświadczalne zbadanie będzie ostatecznym testem zamknięcia Modelu Standardowego lub też teorii, która go zastąpi.

Byłem główną siłą sprawczą w nawiązaniu owocnej współpracy z grupą fizyków teoretyków z UW o ugruntowanej renomie międzynarodowej, oraz przeprowadzeniu szeregu szczegółowych symulacji dotyczących pomiaru rozpraszania WW w eksperymentach przy LHC. Efektem tej współpracy była publikacja fenomenologiczna [13], w której zaproponowaliśmy przeprowadzenie analizy WW w LHC przy energii 14 TeV, według opracowanych

⁵Zob. http://diablo.phys.northwestern.edu/~michals/cmssw_tutorial.html.

przez nas kryteriów selekcji zdarzeń. Celem selekcji była maksymalizacja czułości na ewentualne odstępstwa od Modelu Standardowego, przy zachowaniu wszelkich realistycznych kryteriów analizy danych w rzeczywistym eksperymencie typu CMS. Nowym elementem naszego podejścia było wykazanie, że polaryzacje par bozonów pośredniczących można efektywnie rozróżnić posługując się rozkładami pędu poprzecznego tzw. „dżetów znakujących”, powstałych na skutek procesu fuzji bozonów wektorowych (VBF). Tym samym możliwe jest uzyskanie większej czułości na efekty związane z mechanizmem łamania symetrii elektroślabej (które wpływają jedynie na pary $V_L V_L$) i odseparowanie innych potencjalnych efektów.

Nasza praca już obecnie spowodowała wzrost zainteresowania procesem rozpraszania w kanale $W^\pm W^\pm$ (jednoimiennych bozonów W), którego zalety, zarówno te teoretyczne jak i czysto doświadczalne, przypomnieliśmy i dodatkowo uzasadniliśmy w publikacji. W CMS została już przeprowadzona analiza stanów końcowych $W^\pm W^\pm$ z danych przy 8 TeV i aktualnie czeka na końcową publikację [14], zaś podobna analiza została niedawno opublikowana przez eksperyment ATLAS [15]. Prace te, jakkolwiek nie zawierają na razie zbyt wielu konkluzji fizycznych, kładą pierwsze podwaliny pod przyszłe analizy przy wyższych energiach. Aktualizacji naszej oryginalnej pracy pod wpływem nowych wyników z eksperymentów przy LHC poświęcony był temat pracy licencjackiej na UW, której byłem opiekunem (2013).

W ramach planowania przyszłych analiz przy LHC, nawiązałem luźną współpracę z ośrodkiem Technische Universität w Dreźnie, zaangażowanym w eksperyment ATLAS. W ośrodku tym pracują fizycy, którzy wnieśli bezpośredni wkład w opublikowaną przez ATLAS analizę $W^\pm W^\pm$ przy 8 TeV. Współpraca dotyczy zagadnień koncepcyjnych, jak również technicznych, które są wspólne dla obydwu eksperymentów przy LHC, w szczególności problemu nakładania się produktów z wielu oddziaływań proton-proton w jednym przecięciu wiązek (tzw. *pile-up*) i wynikających z tego ograniczeń praktycznych na możliwość oddzielenia polaryzacji par WW .

Rozpraszanie VV jest także wymieniane wśród najważniejszych motywacji dla budowy przyszłych zderzaczy kołowych (Future Circular Colliders, FCC) o energii wyższej niż dostępna w LHC. FCC oferuje znacznie szersze perspektywy dla fizyki rozpraszania WW i jest pod tym względem logicznym przedłużeniem LHC. Jako jeden z sześciu fizyków z Polski brałem udział w konferencji założycielskiej FCC (FCC Kick-Off Meeting) na Uniwersytecie w Genewie w lutym 2014 [16]. Wraz z grupą współpracowników z Instytutu Fizyki Teoretycznej UW nawiązaliśmy wstępną współpracę z projektem FCC-hh (opcja hadron-hadron). W ramach tejże współpracy prowadzimy pierwsze symulacje oddziaływań proton-proton przy energii w środku masy równej 100 TeV, pod kątem efektów rozpraszania W^+W^+ . Aktualne zagadnienia, nad którymi pracuję, dotyczą następujących kwestii:

- jak zmienia się sygnatura kinematyczna rozpraszania WW (w tym zwłaszcza par podłużnych) przy 100 TeV w porównaniu z 14 TeV,
- jaka jest czułość rozpraszania W^+W^+ przy 100 TeV na sprzężenie Higgsa do WW , sprzężenia potrójne WWZ , $WW\gamma$ i kwartyczne $WWWW$ w ramach obecnie istniejących limitów doświadczalnych,
- jakie jest rozdzielenie kinematyczne par WW spolaryzowanych podłużnie od reszty

par WW i jak to rozdzielanie wpływa na możliwość odseparowania od siebie efektów pochodzących od różnych sprzężeń.

Aktualnie formowana jest grupa robocza, która będzie zajmowała się powyższymi zagadnieniami. Ogólny przegląd zagadnień i nasze pierwsze, fragmentaryczne wyniki zaprezentowałem już na roboczym spotkaniu FCC-hh.

Zagadnieniu rozpraszania par bozonów VV , a w szczególności W^+W^+ , poświęcona jest monografia, której jestem jedynym autorem i którą dołączam jako osiągnięcie naukowe.

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.:

“The Higgs boson and the physics of WW scattering before and after Higgs discovery”,

wydaną przez Narodowe Centrum Badań Jądrowych, ISBN 978-83-934358-7-6, której jestem jedynym autorem. Praca ta została uprzednio umieszczona w internetowym archiwum prac naukowych Uniwersytetu Cornell pod numerem arXiv:1412.8367.

Przedstawiana monografia została pomyślana jako możliwie szeroki przegląd tematyki rozpraszania bozonów pośredniczących, zarówno pod względem teoretycznym, jak i doświadczalnym, w przeddzień rozpoczęcia drugiej fazy naświetleń LHC. Przypomniane są w niej same podstawy fizyczne, historycznie ujęty związek procesu rozpraszania WW z mechanizmem łamania symetrii elektroslabej i z bozonem Higgosa w szczególności, przedstawiony jest przegląd istniejących prac fenomenologicznych oraz najważniejszych danych doświadczalnych dotyczących fizyki bozonu Higgosa i fizyki sektora elektroslabego, które mają ścisły związek z tematyką, wreszcie naszkicowane są perspektywy i znaczenie tego procesu w poszukiwaniu nowej fizyki po odkryciu bozonu Higgosa - zarówno w LHC jak i poza.

Pierwszy rozdział monografii jest krótkim wstępem, który tłumaczy pojęcie spontanicznego łamania symetrii oraz podkreśla jego wyjątkowe znaczenie we współczesnej fizyce cząstek elementarnych, w tym związek z pochodzeniem masy we Wszechświecie, zwłaszcza w świetle niedawnego odkrycia bozonu Higgosa. Głównym zadaniem LHC jest wyjaśnienie mechanizmu łamania symetrii elektroslabej w przyrodzie. Odkrycie bozonu Higgosa daje nam istotną wskazówkę, ale nie stanowi jeszcze odpowiedzi na wszystkie istotne pytania. Te będą tematami badawczymi dla LHC na wiele następnych lat, realizowanymi m.in. poprzez pomiary rozpraszania VV . W rozdziale pierwszym jest także krótkie omówienie treści kolejnych rozdziałów pracy.

Rozdział drugi, “The Higgs boson in the Standard Model”, przedstawia związek rozpraszania WW z bozonem Higgosa od strony teoretycznej. Przedstawiony jest na wpół historyczny zarys genezy współczesnej teorii oddziaływań elektroslabych, począwszy od genezy koncepcji samych bozonów pośredniczących W i Z , aż do koncepcji bozonu Higgosa jako kluczowego składnika Modelu Standardowego cząstek elementarnych. Ukazana

jest dwojaka rola bozonu Higgsa w Modelu Standardowym, którą odzwierciedlają dwa w zasadzie niezależne od siebie sposoby wprowadzenia tej cząstki do teorii. Okazuje się bowiem, że niezerowa masa bozonów pośredniczących W i Z jest źródłem dwóch poważnych problemów w teorii, których bozon Higgsa może być rozwiązaniem. W najbardziej rozpowszechnionym, podręcznikowym wyprowadzeniu koncepcji bozonu Higgsa, pojawia się on w teorii jako cząstka będąca efektem ubocznym spontanicznego łamania symetrii cechowania $SU(2) \times U(1)$, które następuje na skutek kwantowomechanicznego wyboru stanu próżniowego, jeśli założymy *ad-hoc* istnienie pewnego samoodziałującego, zespolonego pola skalarowego, opisanego poprzez potencjał Higgsa. W tym samym procesie mogą być generowane niezerowe masy bozonów pośredniczących poprzez tzw. mechanizm Higgsa (bardziej adekwatnie zwanym mechanizmem Englerta-Brouta-Higgsa-Guralnika-Hagena-Kibble'a), polegający zasadniczo na oddziaływaniu oryginalnie bezmasowych bozonów wektorowych z bezmasowymi polami skalarnymi. Tym samym, równania Modelu Standardowego zachowują niezmienniczość względem cechowania, chociaż ich rozwiązanie (czyli w szczególności masywne bozony W i Z) tej symetrii nie posiada.

Drugim problemem wynikającym z niezerowej masy bozonów pośredniczących jest możliwość ich polaryzacji podłużnej i wynikające z tego pogwałcenie unitarności w procesach rozpraszania VV przy wysokich energiach. Ponieważ związek pomiędzy polaryzacją podłużną bozonów W i Z a problemem unitarności w Modelu Standardowym jest centralnym motywem całej pracy, zamierzeniem rozdziału 2 było przedstawienie dokładnego wyjaśnienia tego związku od samych podstaw fizycznych, unikając jednak charakteru regularnego wykładu z fizyki teoretycznej. Okazuje się, że ten sam bozon Higgsa może spowodować usunięcie wszystkich rozbieżności i przywrócenie unitarności w teorii, pod warunkiem jednak, że jego sprzężenia do bozonów W i Z są dokładnie takie, jak przewidziano w Modelu Standardowym (a także, że sprzężenia samych bozonów pośredniczących są dokładnie takie, jak w Modelu Standardowym). Pełna zależność przekroju czynnego na procesy rozpraszania VV od energii jest wyznaczona przez sprzężenia Higgsa do bozonów pośredniczących oraz potrójne i poczwórne (kwartyczne) sprzężenia pomiędzy samymi bozonami pośredniczącymi. Scenariusze inne niż Model Standardowy będą na ogół skutkowały innym niż w Modelu Standardowym przebiegiem tej zależności.

Pomimo doświadczalnej obserwacji bozonu Higgsa, do dzisiaj naprawdę nie wiadomo, czy rzeczywiście spełnia on to drugie z zadań przypisanych mu w Modelu Standardowym. Jeżeli Higgs nie zapewnia całkowitej unitaryzacji amplitud $V_L V_L \rightarrow V_L V_L$, to w dalszym ciągu możemy mieć do czynienia z częściowo silnym rozpraszaniem VV i dynamicznymi ciężkimi rezonansami, podobnie jak w modelach bez Higgsa. Odpowiedź na to pytanie będzie wymagała precyzyjnego pomiaru rozpraszania VV przy wysokich energiach.

Rozdział 2 zawiera także pojęciowe wprowadzenie do koncepcji Electroweak Chiral Lagrangian (EWChL), zarówno jako historycznej alternatywy dla Modelu Standardowego, ale przede wszystkim jako efektywnego sposobu opisu nieznannej fizyki, wyprowadzonego z ogólnych zasad kwantowej teorii pola. O ile przed doświadczalnym odkryciem Higgsa, formalizm EWChL służył za narzędzie teoretyczne do studiowania fenomenologii związanej z alternatywnymi mechanizmami łamania symetrii elektroślabej (ściśle rzecz biorąc, generacja mas bozonów W i Z poprzez mechanizm Higgsa wymaga koniecznie istnienia tylko trzech pól skalarnych i w ogólnym przypadku nie implikuje istnienia bozonu Higgsa, ale unitarność w oddziaływaniach VV musi wówczas zostać zapewniona w teorii innymi sposobami), o tyle sam formalizm jest dzisiaj nadal użyteczny i z pewnymi mody-

fikacjami jest używany do badania fenomenologii fizyki poza Modelem Standardowym. O tym ostatnim będzie jeszcze mowa w następnym rozdziale.

Rozdział trzeci monografii, “Standard Model experimental status and prospects for BSM”, zawiera aktualny przegląd wyników doświadczalnych dotyczących bozonu Higgsa i innych pomiarów z sektora elektrosłabego, w szczególności tych z danych zebranych w eksperymentach przy LHC w latach 2011-12⁶. Wyniki te mają zasadnicze znaczenie, jeśli chodzi o perspektywy pomiarów rozpraszania VV w LHC lub w planowanych przyszłych zderzaczach.

Fuzja bozonów wektorowych (VBF) jest jednym z mechanizmów produkcji bozonu Higgsa w LHC, zaś w połączeniu z rozpadem Higgsa na parę W^+W^- jest fizycznie tożsama z procesem rozpraszania W^+W^- przy energii odpowiadającej masie Higgsa. Podstawowa topologia procesu rozpraszania WW w detektorze CMS lub ATLAS jest więc dobrze znana pod względem doświadczalnym. Standardowe kryteria wyboru nie różnicują jednak pomiędzy różnymi kombinacjami skrzyżności pary WW .

Masa Higgsa została precyzyjnie wyznaczona z kombinacji danych z dwóch wiodących kanałów rozpadów, $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow l^+l^-l^+l^-$ i $H \rightarrow \gamma\gamma$ i wynosi $M_H = 125.36 \pm 0.37(stat) \pm 0.18(syst)$ GeV (ATLAS) oraz $M_H = 125.03 \pm_{0.27}^{0.26}(stat) \pm_{0.15}^{0.13}(syst)$ GeV (CMS). Porównania mas wyznaczonych przez ATLAS i CMS z obydwu tych kanałów osobno skłaniają do konkluzji, że w granicach wyżej wymienionych niepewności istotnie mamy do czynienia z jednym rezonansem. Znaczący statystycznie sygnał Higgsa zaobserwowano ponadto w kanale rozpadu $H \rightarrow W^+W^- \rightarrow l^+l^-\nu\nu$. Niezależne potwierdzenie istnienia bozonu Higgsa uzyskano także w kanale $H \rightarrow \tau^+\tau^-$, co stanowi najbardziej bezpośredni istniejący dowód na to, że Higgs sprzęga się także do fermionów, jak przewiduje Model Standardowy. Silne przesłanki za istnieniem sprzężeń Higgsa do fermionów uzyskujemy jednak również pośrednio z faktu, że całkowita produkcja bozonu Higgsa, która w Modelu Standardowym jest zdominowana przez proces fuzji gluonowej z kwarkiem t w pętli, jest zgodna z przewidywaniami.

Kluczowe znaczenie dla identyfikacji obserwowanego rezonansu z bozonem Higgsa ma pomiar jego spinu i parzystości - w Modelu Standardowym Higgs jest czystym skalarem, $J^P = 0^+$. Spin i parzystość Higgsa wyznacza się z porównania mierzonych rozkładów kątowych produktów jego rozpadu z przewidywaniami obliczonymi przy różnych roboczych hipotezach. W praktyce każdą hipotezę testuje się względem hipotezy referencyjnej, którą jest $J^P = 0^+$. Wsymulowane rozkłady funkcji największej wiarygodności pozwalają na bezpośrednie porównanie z wynikiem doświadczalnym oraz odrzucenie jednej z hipotez na poziomie ufności zależnym od rozdzielenia obydwu rozkładów. Najbardziej znaczące wyniki uzyskuje się z kanału $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow l^+l^-l^+l^-$, gdzie porównujemy ze sobą rozkłady pięciu różnych kątów opisujących ten rozpad. Pełna kombinacja danych z rozpadów $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow l^+l^-l^+l^-$, $H \rightarrow \gamma\gamma$ i $H \rightarrow W^+W^- \rightarrow l^+l^-\nu\nu$ pozwala obecnie na odrzucenie wszystkich niestandardowych hipotez na poziomie ufności (CL) 99% lub wyższym. Nie można jednakże wykluczyć stanu o mieszanej parzystości, np. $0^+ + 0^-$, o ile niestandardowa domieszka nie przekracza ok. 40% całkowitego przekroju czynnego (limit przy 95% CL).

Największe znaczenie z punktu widzenia fizyki rozpraszania VV ma pomiar sprzężeń Higgsa do bozonów pośredniczących W i Z . W eksperymencie mierzy się bezpośrednio

⁶Obszerny spis odnośników i literatury uzupełniającej zamieszczony jest w samej pracy; ponieważ odnośników tych jest bardzo dużo, w niniejszym streszczeniu nie będą one już powtarzane.

tw. siłę sygnału μ w rozpadzie na konkretny stan końcowy, np. WW lub ZZ . Wyniki pomiarów są obecnie zgodne z przewidywaniem w granicach błędów rzędu 20-30%, np. CMS uzyskał $\mu_{WW} = 0.83 \pm_{0.20}^{0.22}$ i $\mu_{ZZ} = 1.00 \pm_{0.26}^{0.32}$, w jednostkach, gdzie Model Standardowy oznacza w każdym kanale z osobną siłę sygnału $\mu = 1$. Bardziej wyrafinowane analizy klasyfikują dane względem pełnej ścieżki produkcja + rozpad, gdzie różne mechanizmy produkcji są od siebie oddzielane poprzez żądanie charakterystycznych dla siebie cech topologicznych i kinematycznych (np. VBF). Jednakże ze względów praktycznych nie da się w ten sposób wyznaczyć niezależnie wszystkich sprzężeń, a ponadto metoda ta nie jest wolna od pewnych założeń modelowych (z powodów, które zostały wyjaśnione w monografii). Z dopasowań, w których dopuszczono jedynie globalne modyfikacje wszystkich sprzężeń bozonowych i wszystkich sprzężeń fermionowych (a zatem dwa wolne parametry), otrzymuje się zgodność z Modelem Standardowym w granicach ok. 10% dla bozonów i 20% dla fermionów.

Eksperymenty CMS i ATLAS przeprowadziły także dużą liczbę dedykowanych poszukiwań bozonów Higgsa spoza Modelu Standardowego. Dodatkowe Higgisy o sprzężeniach podobnych do Modelu Standardowego zostały wykluczone do masy 710-850 GeV, zależnie od badanego rozpadu. Poszukiwania Higgsów w ramach minimalnego supersymetrycznego rozszerzenia Modelu Standardowego (MSSM) dały negatywne rezultaty i zostały przetłumaczone na silne ograniczenia w płaszczyźnie parametrów sektora Higgsa w MSSM, tj. $M_A/tg\beta$. Jednakże hipotezy, że jedyny odkryty bozon Higgsa jest w rzeczywistości lżejszym z dwóch neutralnych skalarów Higgsa z MSSM, nie można jeszcze całkowicie odrzucić. Poszukiwania różnych niestandardowych sygnatur Higgsa, m.in. przewidzianych w ramach innych modeli supersymetrycznych (NMSSM), lub bardziej egzotycznych modeli, nie doprowadziły do obserwacji i zostały przetłumaczone na odpowiednie ograniczenia na przekrój czynny lub parametry danego modelu.

Równie ważne z punktu widzenia fizyki rozpraszania VV są pomiary sektora elektroslabego (podrozdział 3.2). Eksperymenty przy LHC przeprowadziły precyzyjne pomiary przekrojów czynnych na inkluzywną produkcję dwubozonową, W^+W^- , WZ , ZZ , $W\gamma$ i $Z\gamma$ przy energii 7 i 8 TeV. Szczególnie istotne są dla nas te pomiary, które przekładają się na wartości sprzężeń pomiędzy bozonami W , Z i fotonem. Odstępstwa od Modelu Standardowego, spodziewane w postaci anomalnych sprzężeń potrójnych, w szczególności WWZ i $WW\gamma$, poszukiwane były na podstawie mierzonych rozkładów kinematycznych bozonów w stanie końcowym. Pomiary przy LHC w pełni potwierdziły wcześniejsze wyniki z LEP-u i TeVatronu, wskazujące na zgodność z Modelem Standardowym. Kombinacja wszystkich istniejących danych światowych pozwala na wyciągnięcie uaktualnionych granic na anomalne sprzężenia potrójne. Te ostatnie wyrażane są obecnie najczęściej w języku współczynników, np. c_W , c_{WWW} i c_B , przy operatorach wyższych (niż 4) wymiarów w efektywnym, rozszerzonym Lagrangianie w ramach kwantowej teorii pola. Bardziej szczegółowa dyskusja poszczególnych operatorów wymiaru 6 i wymiaru 8, które mogą być próbkowane w procesach rozpraszania VV , ich formalne definicje i związek z poszczególnymi sprzężeniami oraz - co stanowi oryginalny punkt widzenia przedstawiany w tej monografii - skrętnościami par VV , jest zawarta dalej w podrozdziale 3.4.2. Wyrażone w tym języku aktualne limity doświadczalne na operatory wymiaru 6 modyfikujące sprzężenia potrójne na poziomie ufności 95% plasują się na poziomie $\pm 1-10/\text{TeV}^2$. Podrozdział 3.4 przedstawia pełne przebiegi przekrojów czynnych na rozpraszanie W^+W^+ w funkcji energii, w rozbiciu na polaryzacje W_LW_L i W_TW_X , według rachunków wykonanych w ramach

Modelu Standardowego oraz przy założeniu anomalnych sprzężeń Higgosa i anomalnych sprzężeń potrójnych i kwartycznych. Są to oryginalne obliczenia wykonane przeze mnie na potrzeby prezentowanej monografii.

Sprzężenia kwartyczne, w szczególności $WWWW$, można wyznaczyć poprzez pomiary rozpraszania VV lub produkcji trójbozonowej, jednakże dane przy 7 i 8 TeV nie posiadają wystarczającej statystyki do przeprowadzenia prawdziwie konkluzywnych pomiarów (o pierwszych pomiarach rozpraszania $W^\pm W^\pm$ z danych ATLAS-a i CMS będzie jeszcze mowa później). Sprzężenia kwartyczne są w chwili obecnej praktycznie niezmierzone doświadczalnie.

W rozdziale 3 jest także naszkicowany ogólny obraz jaki wyłania się z różnorodnych pomiarów pochodzących z różnych fragmentów fizyki cząstek elementarnych i astrofizyki, dotyczący możliwych przesłanek na istnienie fizyki poza Modelem Standardowym. Przedstawiona jest szczególna klasa modeli teoretycznych zaproponowanych jako możliwe rozszerzenie Modelu Standardowego, znanych jako teorie z Silnie Odziałującym Lekkim Higglem (SILH). W modelach tych Higgs jest obiektem złożonym, elementem należącym do nowego, nieznanego sektora, oraz - co istotne - nie zapewnia całkowitej unitaryzacji amplitud $V_L V_L \rightarrow V_L V_L$. Teorie te są ważną i całkowicie aktualną motywacją fizyczną do badań nad rozpraszaniem VV . Przewidziane są w nich także sprzężenia Higgosa i bozonów pośredniczących odbiegające od Modelu Standardowego. Jednak istnienie bądź nieistnienie częściowo silnego rozpraszania VV może zostać wykazane jedynie poprzez bezpośrednią obserwację.

Rozdział czwarty monografii, “ VV scattering at the LHC”, przedstawia szczegółową analizę procesu rozpraszania VV w LHC z fenomenologicznego punktu widzenia. Rozpraszanie VV identyfikujemy poprzez obserwację stanu końcowego $jjVV$, tzn. złożonego z dwóch bozonów pośredniczących (ściślej: ich produktów rozpadu) oraz dwóch dżetów tzw. znakujących, skierowanych silnie do przodu/tyłu. Jednakże taki sam stan końcowy dają również zdarzenia, w których do oddziaływania VV wcale nie doszło. Wzięcie ich pod uwagę jest konieczne nie tylko dla prawidłowej oceny fizycznego tła (jest to tzw. tło nieredukowalne, tzn. złożone z tych samych fizycznych cząstek w stanie końcowym), ale ze względów obliczeniowych także dla prawidłowej oceny wielkości samego sygnału. W podrozdziale 4.1 przedstawione i porównane ze sobą są sposoby definiowania sygnału rozpraszania VV : te używane w praktyce w eksperymentach typu CMS, oraz te użyteczne w symulacjach i obliczeniach, zwłaszcza dotyczących fizyki spoza Modelu Standardowego. Ponieważ żaden zestaw kryteriów selekcji opartych na kinematyce zdarzeń nie gwarantuje wyboru czystej próbki zdarzeń, w których proces rozpraszania rzeczywiście zaszedł, zaś rozpraszanie par bozonów o podłużnej polaryzacji jest w Modelu Standardowym niewielką poprawką do całkowitej produkcji VV , wygodne dla celów obliczeniowych jest zdefiniowanie sygnału jako nadwyżki w produkcji par $V_L V_L$ względem przewidywań Modelu Standardowego. Oszacowanie sygnału wymaga więc dwóch obliczeń - jednego w Modelu Standardowym (które jest jednocześnie obliczeniem całkowitego nieredukowalnego tła), oraz drugiego w alternatywnej teorii. Definicję tę można rozszerzyć także na scenariusze, które modyfikują również poprzeczne polaryzacje.

W podrozdziale 4.2 zawarta jest dyskusja metod obliczeniowych i przybliżeń stosowanych często w rachunkach, zwłaszcza w starszej literaturze tematu: przybliżenia efektywnych W , zasady równoważności bozonów Goldstone’a, oraz przybliżenia W na powłoce masy. To ostatnie ma duże znaczenie dla dalszych rozważań.

Podrozdziały 4.3, 4.4 i 4.5 zawierają omówienie pełnego procesu rozpraszania VV , jaki obserwujemy w detektorze CMS, w rozłożeniu na trzy etapy: emisji bozonów pośredniczących z kwarków, samego oddziaływania dwóch bozonów pośredniczących oraz rozpadu bozonów i wynikających z tego możliwych stanów końcowych i doświadczalnych sygnatur. Do bardziej szczegółowej analizy wybrane są rozpady czysto leptonowe ($W \rightarrow l\nu, Z \rightarrow l^+l^-$, gdzie l jest mionem lub elektronem), jako najczystsze doświadczalnie. Kluczowe znaczenie dla przedstawianej koncepcji analizy ma pytanie, czy w procesie rozpraszania VV można poszczególne polaryzacje sensownie od siebie oddzielić. Tezą tej pracy jest, że ma to największy sens fizyczny, a także praktyczny, dla procesu rozpraszania jednoimiennych bozonów W , tzn. $W^\pm W^\pm \rightarrow W^\pm W^\pm$. Pokazane są następujące fakty dotyczące rozpraszania $W^\pm W^\pm$ przy energii znacznie większej od masy Higgsa:

1. bozony W zachowują się w dobrym przybliżeniu jak na powłoce masy, zatem mają dobrze określone skrzyżności (podrozdział 4.2),
2. procesy $W_T^\pm W_X^\pm \rightarrow W_T^\pm W_X^\pm$ i $W_L^\pm W_L^\pm \rightarrow W_L^\pm W_L^\pm$ w Modelu Standardowym dominują o 2-3 rzędy wielkości nad $W_T^\pm W_X^\pm \rightarrow W_L^\pm W_L^\pm$ i $W_L^\pm W_L^\pm \rightarrow W_T^\pm W_X^\pm$ - również żadna fizyka spoza Modelu Standardowego opisywalna poprzez efektywną teorię pola nie powoduje nieograniczonego wzrostu amplitud $W_T^\pm W_X^\pm \rightarrow W_L^\pm W_L^\pm$ i $W_L^\pm W_L^\pm \rightarrow W_T^\pm W_X^\pm$,
3. emisja W_L i W_T z linii kwarkowej różni się rozkładami kątowymi, odbiciem tych różnic są odmienne rozkłady pędu poprzecznego kwarku po akcji emisji (podrozdział 4.3),
4. w/w różnice w rozkładach kątowych powinny być widoczne na poziomie pędów poprzecznych zrekonstruowanych dżetów znakujących po wprowadzeniu zaproponowanych w pracy wstępnych kryteriów selekcji przypadków typu VBF (podrozdział 4.6),
5. jeżeli ponadto pary $W_L W_L$ i $W_T W_X$ populują głównie różne obszary masy niezmienniczej (np. ponieważ jedynie $W_L W_L$ ulegają wzmocnieniu dla dużych mas, jak w przypadku Higgsa o niestandardowych sprzężeniach), wówczas efektywną zmienną dyskryminującą sygnał od tła jest podwójny stosunek pędów poprzecznych, oznaczony jako $R_{p_T} = p_T^1 p_T^2 / (p_T^{j_1} p_T^{j_2})$.

Szczególnie warta podkreślenia jest konkluzja, że pary $W_L W_L$ odpowiadają systematycznie niższemu pędowi poprzecznym dżetów znakujących niż $W_T W_X$. Wynika z tego, że stosowanie wysokich progów na p_T dżetów, podyktowane nakładaniem się produktów wielu zderzeń proton-proton w jednym przecięciu wiązek (tzw. *pile-up*), zmniejsza czułość na fizykę związaną z bozonem Higgsa i potrzebne mogą się okazać dodatkowe metody odnajdywania dżetów znakujących w obecności *pile-up*'u aby radzić sobie z tym problemem. W pracy pokazane są szczegółowe rozkłady kinematyczne, z których wynikają wszystkie powyższe obserwacje, łącznie z uzasadnieniem zmiennej R_{p_T} ; również pokazane jest, dlaczego wszystkie powyższe punkty (z wyjątkiem pierwszego) mają zastosowanie *jedynie* dla procesu $W^\pm W^\pm$.

Podrozdział 4.7 zawiera dyskusję głównych źródeł tła redukowalnego, tj. procesów w których stan końcowy składa się z innych cząstek niż sygnał, ale może spełniać wszystkie

wymagane sygnatury w rzeczywistym detektorze. Potencjalnymi źródłami takich teł w eksperymencie CMS są: inkluzywna produkcja par $t\bar{t}$ (dla $W^\pm W^\pm$ jedynie w połączeniu z rozpadem leptonowym jednego kwarku b albo błędnym wyznaczeniem znaku leptonu), produkcja zdarzeń W +dżety z jednym dżetem błędnie zrekonstruowanym jako lepton, oraz produkcja zdarzeń wielodżetowych (QCD) z dwoma dżetami błędnie zrekonstruowanymi jako leptony. Przypomniane są tu znane już z poprzednich publikacji metody redukcji tła od inkluzywnej produkcji par $t\bar{t}$. Dalej przedstawione są, na podstawie różnych publicznie dostępnych analiz i symulacji, zgrubne oszacowania takich efektów detektorowych jak efektywność znakowania kwarków b w obszarze pokryw, efektywność wyznaczenia znaku leptonów w funkcji pędu poprzecznego, czy prawdopodobieństwo rekonstrukcji dżetu lub hadronu jako lepton, które definiują wielkość wszystkich powyższych teł w przyszłych pomiarach przy energii 13 TeV.

Ostatnim zagadnieniem poruszonym w rozdziale 4 są rozkłady pseudopospieszości dla dżetów znakujących dla sygnału i nieredukowalnego tła. Ukazane jest, że obszar kinematyczny o największej czułości na sprzężenia Higgsa rozciąga się aż do pseudopospieszości dżetów rzędu ± 5 . Ma to istotne znaczenie w kontekście przyszłych planów dotyczących działania kalorymetru hadronowego w obszarze pokryw (HE) i „do przodu” (HF) w detektorze CMS w fazie High Luminosity LHC.

Większość rozdziału czwartego stanowi mój własny koncepcyjny wkład do tematyki rozpraszania VV oraz wyniki wykonanych przeze mnie symulacji. Część tych wyników została opublikowana we wcześniejszej pracy [13], niektóre były też prezentowane na wewnętrznych zebraniach i seminariach.

Piąty rozdział prezentowanej monografii, “Simulation-based studies vs. experimental results”, zawiera przegląd najważniejszych prac fenomenologicznych z dziedziny, poczynając od pierwszych obliczeń wykonanych na potrzeby planowanego zderzacza SSC, poprzez obliczenia i symulacje wykonane specjalnie dla LHC przy energii 14 TeV przed odkryciem bozonu Higgsa, aż po aktualne prace napisane już po odkryciu Higgsa. W przeglądzie tym główny nacisk położony jest na te elementy wszystkich starszych prac, które w pełni zachowują swoją aktualność w zmienionym kontekście fizycznym po 2012 roku. Przytaczanie poszczególnych prac i ich wniosków w niniejszym streszczeniu nie jest konieczne. Jednakże najważniejszą konkluzją rozdziału 5 jest to, że wiele kryteriów selekcji i metod analizy danych zaproponowanych w przeszłości do badania alternatywnych modeli łamania symetrii elektroslabej zostało obecnie niesłusznie zapomniane pod wpływem pojawienia się nowych narzędzi obliczeniowych, a wreszcie pod wpływem odkrycia bozonu Higgsa. Tymczasem można i należy wykorzystać tę wiedzę w przyszłych poszukiwaniach fizyki spoza Modelu Standardowego, a wiele dawnych wniosków i przewidywań można potwierdzić przy użyciu nowoczesnych generatorów zdarzeń i narzędzi do analizy danych. Powyższe pozostaje prawdą nawet wtedy, gdy główna motywacja fizyczna badania procesów rozpraszania WW przesuwa się z próbkowania samego bozonu Higgsa do próbkowania bozonowych sprzężeń kwartycznych. Potwierdzeniu wniosków z wielu pozornie zapomnianych, dawnych prac przy użyciu nowoczesnych narzędzi ma właśnie m.in. służyć przedstawiana monografia.

Podrozdział 5.4 zawiera ponadto szczegółowe omówienie wyników analiz rozpraszania $W^\pm W^\pm$ wykonanych przez zespoły ATLAS i CMS z danych przy energii 8 TeV. Opublikowane wyniki eksperymentów praktycznie nie dają możliwości wyciągnięcia żadnych istotnych konkluzji fizycznych, czy to dotyczących wpływu bozonu Higgsa na rozpraszanie

WW , czy nawet (co jest uwidocznione w dyskusji) sprzężeń kwartycznych. W odróżnieniu od omawianych wcześniej prac fenomenologicznych, dotyczących zawsze wyższych energii niż aktualnie dostępne, obecne doświadczalne wyniki są przedstawione w formie pomiaru wykonanego całkowicie w ramach Modelu Standardowego. Wykonane analizy kładą podwaliny pod przyszłe pomiary przy wyższej energii. Interesujące jest także porównanie wyników z obydwu eksperymentów. Wskazuje ono wyraźnie, że drobne różnice między detektorami mogą być w tym pomiarze źródłem istotnych różnic w ostatecznej wielkości tła oraz jego składu fizycznego. Szczególną uwagę przykłada efektywność rekonstrukcji leptonów z małym pędem poprzecznym i wynikająca z tego skończona efektywność veta na dodatkowe leptony. Efekty te, praktycznie niemożliwe do opisu przy użyciu ogólnodostępnych narzędzi do symulacji, decydują o wielkości tła pochodzącego od produkcji par WZ , w których jeden lepton z rozpadu Z został zgubiony. Te właśnie liczby decydują o głównej różnicy w wynikach ATLAS-a i CMS. Oczywiście, skład fizyczny tła przy energii 8 TeV oraz przyjętych tutaj kryteriach selekcji dla celów pomiaru w ramach Modelu Standardowego jest istotnie różny od spodziewanego składu tła przy wyższej energii i w wyselekcjonowanym obszarze kinematycznym, w którym poszukiwać będziemy odstępstw od Modelu Standardowego.

Idea wykonania analizy nierezonansowego procesu $W^\pm W^\pm$ pojawiła się w CMS w dużej mierze na skutek mojej prezentacji na jednym z zebrań CMS w 2012 r. dotyczącym rozpraszania VV , i następujących po niej dyskusjach. W analizie samych danych z CMS, która była podstawą do omawianej publikacji, nie brałem bezpośredniego udziału.

Szósty rozdział monografii, "What can the LHC measure", zawiera autorską próbę odpowiedzi na pytanie, co będzie można zaobserwować w procesach rozpraszania VV w eksperymentach przy LHC działającym przy energii 13 TeV. Zebrane w całość są tutaj wszystkie dyskutowane w poprzednich rozdziałach kryteria selekcji służące wyizolowaniu zdarzeń najbardziej interesujących z punktu widzenia potencjalnych odstępstw od Modelu Standardowego. W przypadku procesów $W^\pm W^\pm$ i $W^+ W^-$ są to oryginalnie opracowane kryteria selekcji, w przypadku procesów $W^\pm Z$ i ZZ są to kryteria zaczerpnięte z prac innych autorów, niezależnie sprawdzone i potwierdzone własnymi symulacjami.

W kolejnych podrozdziałach 6.1-6.6 przedstawiona jest ogólna metodologia szacowania sygnału (gdzie sygnał należy rozumieć jako efekt niestandardowych sprzężeń Higgsa do bozonów pośredniczących) oraz najważniejszych źródeł tła: nieredukowalnego (które z definicji oznacza Model Standardowy), inkluzywnej produkcji par $t\bar{t}$, zdarzeń typu W +dżety, wielodżetowych zdarzeń typu QCD i produkcji par WZ . Oszacowania te są wykonane w taki sposób, aby wyraźnie oddzielić od siebie efekty związane z samą fizyką od efektów czysto aparaturowych. Te pierwsze można wysymulować przy użyciu publicznie dostępnych generatorów zdarzeń, bez względu na szczegóły konkretnego detektora. Poprawne uwzględnienie tych drugich wymaga pełnej symulacji detektorów CMS lub ATLAS, ale w pierwszym przybliżeniu można je opisać kilkoma najważniejszymi liczbami właściwymi dla danego detektora, przez które wszystkie symulacje fizyczne wystarczy następnie przeskalować. Liczby opisujące: efektywność znakowania kwarku b , efektywność wyznaczania znaku mionów i elektronów o wysokim p_T , oraz prawdopodobieństwo zrekonstruowania dżetu, hadronu lub fotonu jako elektron, przyjęte zostały na podstawie dostępnych analiz wykonanych dla eksperymentu CMS, omawianych w podrozdziale 4.7 (w przypadku gdyby liczby te okazały się błędne, łatwo jest uzyskany wynik odpowiednio przeskalować). Wzięte pod uwagę zostały także efekty rozdzielczości w pomiarze

pędów poprzecznych elektronów, mionów i dżetów. Pozostałe efekty aparaturowe nie zostały uwzględnione. Bazując na powyższych zasadach przedstawione zostały obliczone przekroje czynne na sygnał i poszczególne procesy tła po każdym kolejnym proponowanym kryterium selekcji zdarzeń, oraz przewidywane końcowe rozkłady masy niezmienniczej leptonów (lub masy poprzecznej w przypadkach WZ i $ZZ \rightarrow 2l2\nu$) po wykonaniu pełnej selekcji (podrozdział 6.8). Generalną konkluzją z przedstawionych wyników jest potwierdzenie, że największą czułość na sprzężenia Higgsa posiada proces $W^\pm W^\pm$, jednakże nawet w tym przypadku możliwa będzie jedynie obserwacja stosunkowo dużych odchyżeń od Modelu Standardowego (rzędu 0.8) i to raczej dopiero w fazie High Luminosity LHC.

Podrozdział 6.9 dotyczy spodziewanych efektów związanych z anomalnymi sprzężeniami bozonowymi opisywanymi poprzez efektywne operatory wymiaru 6. Biorąc pod uwagę aktualnie istniejące ograniczenia na powyższe operatory (pochodzące m.in. z pomiarów anomalnych sprzężeń potrójnych wykonanych przez CMS i ATLAS, opisanych w rozdziale 3), okazuje się, iż wielkość spodziewanych efektów jest obecnie na granicy czułości jaką można uzyskać w LHC przy 13 TeV, jednakże conajmniej jeden operator (skalowany współczynnikiem liczbowym c_{WWW}) może spowodować sygnał mierzalny jeszcze przed fazą HL-LHC. Bardziej jednak istotna z perspektywy przedstawianej pracy jest kwestia rozróżnienia od siebie różnych scenariuszy fizycznych - w szczególności sygnału pochodzącego od niestandardowego sprzężenia Higgsa od sygnału pochodzącego z c_{WWW} . Wiąże się to ściśle z kwestią polaryzacji pary $W^\pm W^\pm$, jako że operator przy c_{WWW} modyfikuje jedynie wierzchołki zawierające bozony spolaryzowane poprzecznie, odwrotnie niż w przypadku sprzężenia Higgsa. W podrozdziale 6.9 pokazane jest, że rozdzielanie kinematyczne tych dwóch typów sygnału na podstawie rozkładów pędów poprzecznych zrekonstruowanych dżetów znakujących powinno być wystarczające do określenia właściwego źródła sygnału, o ile tylko same efekty będą znaczące statystycznie i o ile dysponować będziemy scałkowaną świetnością rzędu 3000 fb^{-1} . Przyczynki od innych operatorów mogą jednak ten obraz komplikować.

Wszystkie symulacje, o których mowa jest w podrozdziałach 6.1-6.9, zostały przeprowadzone przeze mnie (lub pod moją naukową opieką). Większość tych wyników nie była przedtem publikowana.

Podrozdział 6.10 dotyczy spodziewanych efektów związanych z anomalnymi sprzężeniami kwartycznymi opisywanymi poprzez efektywne operatory wymiaru 8. Przytoczone tutaj są jedynie wyniki dotyczące procesu $W^\pm W^\pm$. Są to wyniki prac innych autorów, zarówno na poziomie fenomenologicznym, jak i zawierające elementy różnorodnych efektów aparaturowych, a nawet pełną symulację detektora (ATLAS). Przedstawiają one spodziewaną czułość na wybrane operatory wymiaru 8 w LHC przy założeniu scałkowanej świetności 300 i 3000 fb^{-1} . Istniejące wyniki mają na razie charakter mocno wybiórczy, a do pełnego przebadania wszystkich potencjalnych efektów związanych z operatorami rzędu 8 wiedzie jeszcze daleka droga. Jednakże należy podkreślić fakt, iż żadna z istniejących obecnie analiz nie czyni żadnego rozróżnienia polaryzacji par $W^\pm W^\pm$, wszystkie natomiast stosują stosunkowo wysokie cięcia progowe na pędy poprzeczne dżetów znakujących. Ponieważ rozdzielanie kinematyczne $W_L W_L$ od $W_T W_X$ musi być tutaj w dobrym przybliżeniu takie samo jak w przypadku anomalnych operatorów wymiaru 6, zastosowanie technik rozdzielania polaryzacji, opisanych w przedstawianej monografii, a także próba zejścia do niższych pędów poprzecznych niż dotychczas rozważane, może mieć szczególnie duże znaczenie w przypadku operatorów modyfikujących parę $W_L W_L$. Przytoczone anali-

zy warto będzie więc powtórnie przemyśleć pod tym kątem przed rozpoczęciem programu HL-LHC.

Rozdział siódmy monografii, “Beyond the LHC”, szkicuje perspektywy przyszłych pomiarów procesów VBS, a w szczególności $W^\pm W^\pm$, w przyszłych zderzaczach hadronowych, które mogą być następcami LHC. Jako podstawę do wstępnych rozważań przyjęto projekt Future Circular Colliders (FCC) w wersji proton-proton, o energii w środku masy równej 100 TeV. Nie istnieją dotychczas pełne symulacje procesów rozpraszania VV przy 100 TeV, będą one zapewne przedmiotem wyteźonej pracy dla wielu osób przez wiele następnych lat. W rozdziale tym przedstawiony jest pierwszy autorski rzut oka na możliwości FCC na podstawie własnych symulacji. Zaprezentowane są wyniki wstępnych analiz, przeprowadzonych na poziomie fenomenologicznym, zasadniczo w tym samym stylu co opisane wyżej analizy dla 14 TeV, ale z uwzględnieniem najważniejszych różnic kinematycznych wynikających bezpośrednio z wyższej energii wiązek. Nawet mając na uwadze, iż symulacje przeprowadzane w całości w najniższym rzędzie w QCD mogą nie być wystarczające dla tak wysokich energii, z przeprowadzonej bardzo zgrubnej analizy całkiem jasno wynika, że zwiększenie energii daje jakościowy skok w czułości na wszelkie efekty spoza Modelu Standardowego - zarówno te pochodzące od sprzężeń Higgsa, jak i te od sprzężeń pomiędzy bozonami pośredniczącymi. Zakładając scałkowaną świetlność rzędu 1 ab^{-1} , sprzężenia Higgsa będzie można niezależnie wyznaczyć z dokładnością do paru procent. Ponadto, rozdzielenie kinematyczne procesów $W_L W_L$ i $W_T W_X$ na podstawie rozkładów pędów poprzecznych dżetów znakujących jest tutaj tak wyraźne, iż możliwe będzie jednoznaczne określenie fizycznego pochodzenia obserwowanych odchyień. Również próbkowany zasięg masy niezmienniczej pary leptonów w stanie końcowym jest wystarczająco szeroki, aby umożliwić precyzyjne pomiary anomalnych sprzężeń odpowiedzialnych za obserwowane efekty. W odróżnieniu od LHC, które może zaobserwować przejawy fizyki spoza Modelu Standardowego lub też nie, FCC bez wątpienia może być maszyną do badania szczegółów teorii, która w przyszłości Model Standardowy zastąpi.

Rozdział ósmy zawiera krótkie podsumowanie najważniejszych wniosków. Pracę kończy bogaty zestaw literatury tematu.

6 Odnośniki o których mowa w autoreferacie

- [1] G. R. Farrar, arXiv:hep-ph/9408379.
- [2] F. Arneodo *et al.* (Icarus Collaboration), Nucl. Instr. Meth. A508 (2003) 287.
- [3] M. Szleper, A. Para, arXiv:hep-ex/0110001;
A. Para, M. Szleper, arXiv:hep-ex/0110032.
- [4] G. Barenboim, A. De Gouvea, M. Szleper, M. Velasco, arXiv:hep-ph/0204208;
G. Barenboim *et al.*, arXiv:hep-ex/0206025.
- [5] <http://www-lns.mit.edu/~schol/aspen/>.
- [6] K. Hagiwara *et al.* (Particle Data Group), Phys. Rev. D66 (2002) 010001.

- [7] N. Cabibbo, G. da Prato, G. de Franceschi, U. Mosco, Phys. Rev. Lett. 9 (1962) 435.
- [8] A. Apyan *et al.* (NA59 Collaboration), Nucl. Instr. Meth. B234 (2005) 128.
- [9] D. Asner *et al.*, arXiv:hep-ph/0308103;
J. F. Gunion, M. Szleper, arXiv:hep-ph/0409208.
- [10] https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:43083926.
- [11] *ILC Reference Design Report Vol. 1 - Executive Summary*, arXiv:0712.1950 [physics.acc-ph];
ILC Reference Design Report Vol. 2 - Physics at the ILC, arXiv:0709.1893 [hep-ph];
ILC Reference Design Report Vol. 3 - Accelerator, arXiv:0712.2361 [physics.acc-ph];
ILC Reference Design Report Vol. 4 - Detectors, arXiv:0712.2356 [physics.ins-det].
- [12] N. Bakirci *et al.*, CMS Internal Note, CMS IN-2007/059.
- [13] K. Doroba *et al.*, Phys. Rev. D86 (2012) 036011 [arXiv:1201.2768[hep-ph]].
- [14] CMS Collaboration, arXiv:1410.6315 [hep-ex],
- [15] ATLAS Collaboration, Phys. Rev. Lett. 113 (2014) 141803 [arXiv:1405.6241 [hep-ex]],
- [16] <http://indico.cern.ch/e/fcc-kickoff>.

MdP