

Załącznik nr 2a do "Wniosku o wszczęcie postępowania habilitacyjnego"  
(file: Konecki\_autoreferatPL.pdf)

dr Marcin Konecki,  
Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki

Warszawa, 30 grudnia 2014 r.

## **Autoreferat** Opis dorobku i osiągnięć naukowych

### **Spis treści**

<b>1 Dane osobowe</b>	<b>2</b>
<b>2 Dyplomy i stopnie naukowe</b>	<b>2</b>
<b>3 Zatrudnienie i biografia naukowa</b>	<b>2</b>
3.1 Zatrudnienie . . . . .	2
3.2 Edukacja . . . . .	2
3.3 Nagrody . . . . .	2
3.4 Uczestnictwo w konferencjach międzynarodowych, spotkaniach roboczych i kursach . . . . .	3
3.5 Dodatkowe informacje o karierze zawodowej autora . . . . .	4
3.6 Wybór dokumentów charakteryzujących osiągnięcia naukowe . . . . .	7
3.6.1 Wybranie raporty projektu CMS . . . . .	7
3.6.2 Prace dotyczących trygera mionowego (PACT i OMTF) . . . . .	8
3.6.3 Prace dotyczące algorytmów rekonstrukcji . . . . .	8
3.6.4 Wybór najważniejszych wyników eksperymentu CMS . . . . .	9
3.6.5 Publikacje konferencyjne . . . . .	10
<b>4 Prezentacja osiągnięcia naukowego</b> (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)).	<b>11</b>

## 1 Dane osobowe

imię i nazwisko: Marcin Konecki

## 2 Dyplomy i stopnie naukowe

Doktor nauk fizycznych w zakresie fizyki uzyskany na Uniwersytecie Warszawskim, 1998.  
tytuł pracy (rozprawa napisana w języku angielskim): *CP violating effects in B-meson decays with multimuon final states – simulation study in the CMS detector*,  
promotor: prof. dr hab. Jan Królikowski  
recenzenci: prof. dr hab. Danuta Kisielewska, prof. dr hab. Ewa Rondio.

Magister nauk fizycznych uzyskany na Uniwersytecie Warszawskim, 1992  
tytuł pracy: *Badanie systemu wyzwalania detektora CMS przy Large Hadron Collider*,  
opiekun: prof. dr hab. Jan Królikowski.

## 3 Zatrudnienie i biografia naukowa

### 3.1 Zatrudnienie

*Od października 2014:* Pracownik naukowo-techniczny w Instytucie Fizyki Doświadczalnej, Uniwersytet Warszawski,  
*październik 2004 – wrzesień 2014:* Adiunkt w Instytucie Fizyki Doświadczalnej, Uniwersytet Warszawski,  
*sierpień 2002 – wrzesień 2004:* Stażysta (Post-doc) na Uniwersytecie Bazylejskim, Szwajcaria,  
*maj 2000 – Lipiec 2002:* Stażysta (Research Fellow) w CERN, Genewa, Szwajcaria,  
*Lipiec 1998 – maj 2004:* Adiunkt w Instytucie Fizyki Doświadczalnej, Uniwersytet Warszawski, (urlop za względu na wyjazd na staż maj 2000-maj 2002),  
*wrzesień 1997- czerwiec 1998:* Pracownik inżynierjno-techniczny w Instytucie Fizyki Doświadczalnej, Uniwersytet Warszawski.

### 3.2 Edukacja

*1992-1997* Studia doktoranckie na Uniwersytecie Warszawskim, Wydział Fizyki.  
*1987-1992* Studia magisterskie na Uniwersytecie Warszawskim, Wydział Fizyki.  
Ukończone z wyróżnieniem (*magna cum laude*).

### 3.3 Nagrody

*2014:* Dyplom Dziekana Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego za wyróżniające się prowadzenie ćwiczeń do wykładu Podstawy fizyki I (mechanika).  
*2013:* Nagroda indywidualna II stopnia Rektora Uniwersytetu Warszawskiego za koordynację działań warszawskiej grupy detektora CMS, które przyczyniły się do ważnych odkryć eksperymentalnych w dziedzinie fizyki cząstek elementarnych dokonanych ostatnio w CERN.

2011: Nagroda zespołowa Rektora Uniwersytetu Warszawskiego za cykl pomiarów weryfikujących przewidywania modelu standardowego dla zdarzeń proton-proton przy najwyższych energiach.

1998: Nagroda indywidualna Rektora Uniwersytetu Warszawskiego z okazji święta Uniwersytetu Warszawskiego, za pracę doktorską o wielkim znaczeniu dla działalności badawczej zespołu CMS.

### 3.4 Uczestnictwo w konferencjach międzynarodowych, spotkaniach roboczych i kursach

- “RPC2014: The XII Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors” (konferencja międzynarodowa),  
23-28 Feb 2014, Department of Engineering Physics of Tsinghua University, Beijing, China,  
**prezentacja w imieniu zespołu CMS:**  
*The RPC based trigger for the CMS experiment at the LHC*
- “XXXIV-th IEEE-SPIE Joint Symposium Wilga 2014”, Wilga, Poland,  
**prezentacja:** *The Muon Trigger of the CMS experiment - Warsaw Group Activities*
- “Epiphany 2014: XX Cracow Epiphany Conference on the Physics at the LHC” (konferencja międzynarodowa),  
8-10 Jan 2014, Cracow, Poland,  
**prezentacja w imieniu zespołu CMS:**  
*CMS: Performance, Physics, Perspectives*
- “XXX-th IEEE-SPIE Joint Symposium Wilga 2012”, Wilga, Poland,  
**prezentacja:** *The CMS performance in 2011 with an emphasize on Higgs searches*
- “Epiphany 2011: Cracow Epiphany Conference on the First Year of the LHC” (konferencja międzynarodowa),  
10-12 Jan 2011, Institute of Nuclear Physics PAN, Cracow, Poland,  
**prezentacja w imieniu zespołu CMS:**  
*CMS overall performance and physics results in 2010*
- “EPS-HEP2009: The 2009 Europhysics Conference on High Energy Physics” (konferencja międzynarodowa)  
16-22 Jul 2009, Cracow, Poland,  
**prezentacja w imieniu zespołu CMS:**  
*Muon Reconstruction and Identification in CMS*
- “XXIV-th Symposium Wilga 2009”, Wilga, Poland,  
**prezentacja:** *The RPC trigger for the CMS experiment at the LHC*
- “Vertex 2007: 16th International Workshop on Vertex detectors” (konferencja międzynarodowa),  
23-28 Sep 2007, Lake Placid, NY, USA,  
**prezentacja w imieniu zespołu CMS:**  
*Vertex reconstruction and tracking in the trigger algorithm for CMS*
- “CMS Pixel Software Workshop”, 11-15 Jan 2007, Johns Hopkins University, Baltimore, MA, USA,  
**prezentacje dotyczące rekonstrukcji w detektorze pikselowym oraz konwersji formatu danych**

- “Physics at LHC” (konferencja międzynarodowa),  
3–8 Jul 2006, Cracow, Poland  
**członek Komitetu Organizacyjnego**
- “EPS-HEP2003: European Physical Society International Europhysics Conference on High Energy Physics”  
17-23 Jul 2003, Aachen, Germany
- “BEAUTY 2003: The 9th International Conference on B-Physics at Hadron Machines” (konferencja międzynarodowa), 14 - 18 Oct 2003 at Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA,  
**prezentacja w imieniu zespołu CMS:**  
*Online Event Selection at the CMS Experiment*
- “4th CMS Pixel Workshop”, 22-26 Oct 2002, CERN/PSI,  
**prezentacje dotycząca  $H \rightarrow \tau\tau$  oraz generacji ziarna w rekonstrukcji pikselowej**
- “International Conference on CP Violation Physics”  
Sep 2000, Ferrara, Italy  
**prezentacja w imieniu zespołów ATLAS i CMS:**  
*Prospects for CP violation measurements with ATLAS and CMS*
- “28th International Conference in High Energy Physics” (konferencja międzynarodowa),  
Warsaw, Poland 1996
- “BEAUTY 94” (konferencja międzynarodowa),  
Mont Saint-Michel, France 1994  
**prezentacja w imieniu zespołu CMS:**  
*A study of Control Channels for CP Violation*
- “1993 European School of High-Energy Physics”  
Zakopane, Poland 1993
- “XVI Kazimierz Meeting on Elementary Particle Physics” (konferencja międzynarodowa)  
Kazimierz Dolny, Poland 1993  
**prezentacja:** *CP violation studies with CMS*

### 3.5 Dodatkowe informacje o karierze zawodowej autora

W eksperymencie CMS (ang. Compact Muon Solenoid) uczestniczę od roku 1991. Wtedy to Grupa Warszawska, łącząca fizyków i inżynierów, wyraziła zainteresowanie uczestnictwem w budowie mionowego systemu wyzwiania (trygera mionowego) dla eksperymentu CMS [5]<sup>1</sup> przy planowanym wówczas akceleratorze LHC (ang. Large Hadron Collider – Wielki Zderzacz Hadronów), usytuowanym w laboratorium CERN w Genewie (Szwajcaria). Zacząłem wówczas pracę w przedsięwzięciu trygera mionowego, którą kontynuuję do dziś. Celem mojej pracy jest zarówno uczestnictwo w budowie detektora CMS, jak i analizach fizycznych, w szczególności w rozwoju rekonstrukcji przypadków z mionami.

Przy moim skromnym współudziale detektor CMS został zaprojektowany i zbudowany. Uczestniczyłem w realizacji programu fizycznego CMS w czasie pierwszego okresu działania akceleratora LHC (2010–2013), w tym, w odkryciu bozonu Higgsa [17]. Główne aspekty mojej pracy i zarys kariery zawodowej przedstawione są poniżej. Informacja o karierze zawodowej zwyczajowo dzielona jest na okres przed oraz po doktoracie. Tak też czynię poniżej, z zastrzeżeniem, że moja działalność przed doktoratem znacznie wykraczała poza studia nad fizyką mezonów B, których dotyczył mój doktorat.

<sup>1</sup>Odnosi się do ważnych dokumentów dla mojej kariery zawodowej, patrz sekcja 3.6.

**Okres przed doktoratem** Początkowo moja praca dotyczyła możliwości użycia komór RPC (ang. Resistive Plate Chamber) do szybkiego wyzwalania na miony w środowisku LHC. W latach 1991–1992 napisałem uproszczony program symulujący detektor CMS. Najpierw był to program samodzielny, później zaimplementowany w środowisku programu symulacji GEANT. Te wstępne studia zostały podsumowane w pracy magisterskiej wykonanej pod opieką prof. dr. hab. J. Królikowskiego.

W 1991 r. uczestniczyłem w dwumiesięcznym stażu w ośrodku DESY w Hamburgu (Niemcy) jako tzw. student letni (ang. summer student). Brałem udział w pracach nad rozwojem oprogramowania kalorymetru BAC eksperymentu ZEUS, w szczególności nad opisem modułu testowego kalorymetru BAC w środowisku GEANT.

W roku 1992 przez kilka miesięcy brałem udział w testach prototypu warszawskiego komór RPC. Napisałem wtedy samodzielny pakiet do akwizycji danych i obsługi stacji testowej w standardzie CAMAC.

Pracę nad projektem i wykonaniem mionowego systemu wyzwalania opartego o komory RPC, a także nad algorytmami trygera kontynuowałem do roku 2001. Jestem jednym z autorów systemu trygera RPC, w szczególności – algorytmu trygera. Algorytm ten związany jest z porównywaniem wzorców, dlatego też tryger RPC nazywany jest również PACT (ang. PAttern Comparator Trigger). W opisywanym okresie byłem osobą odpowiedzialną za symulację detektora oraz trygera RPC w środowisku symulacji eksperymentu CMS. Utworzone przeze mnie programy do symulacji systemu były napisane początkowo w języku programowania Fortran a następnie C++. Ten okres mojej pracy udokumentowany został m.in. w [9,10,11]. Wniosłem także istotny wkład oraz byłem jednym z redaktorów rozdziału dotyczącego trygera RPC w Raporcie Technicznym Projektu CMS (ang. Technical Design Report - TDR) przeznaczonego dla pierwszego stopnia wyzwalania (Level-1) : Level-1 TDR [2] (rozdział 9).

Między rokiem 1993 a 1998 byłem aktywnym członkiem grupy fizycznej CMS, skoncentrowanym na fizyce mezonów B. Moje działania dotyczyły symulacji procesów powiązanych z łamaniem symetrii CP oraz możliwości ich pomiarów przez eksperyment CMS. Rekonstrukcja mionów w stanie końcowym oraz aspekty związane z wyzwalaniem detektora były mi szczególnie bliskie. Badania nad tym zagadnieniem zaowocowały pracą doktorską napisaną pod kierunkiem prof. J. Królikowskiego. Rezultaty moich obliczeń włączono do Wniosku Technicznego eksperymentu (CMS Technical Proposal) a ich podsumowanie można znaleźć w [25].

W latach 1992–2000 byłem także aktywnie zaangażowany w zarządzanie klastrem komputerowym grupy Fizyki Wysokich Energii na Uniwersytecie Warszawskim. Klaster ten zbudowano z komputerów różnych typów, włączając SGI, Sun oraz PC. Byłem jednym z administratorów klastra, promotorem, oraz jednym z pierwszych użytkowników systemu Linux w grupie.

**Okres po doktoracie** W okresie 2000–2002 pracowałem jako stażysta badawczy (ang. research fellow) w CERN. Działałem w grupie PRS (ang. Physics Reconstruction and Selection) kierowanej przez prof. P. Sphicasa. Moja aktywność dotyczyła algorytmów rekonstrukcji mionów dla trygera wyższego stopnia HLT (High-Level Trigger). Prace, które wykonywałem, ogniskowały się wokół szacowań częstotliwości wyzwoleń trygera w mieszanych przypadkach mionowo-kalorymetrycznych oraz wokół rozwoju algorytmów izolacji mionów. Algorytmy izolacji mionów bazowały na danych z kalorymetrów, uproszczonej rekonstrukcji śladów w detektorze pikselowym CMS oraz na pełnej rekonstrukcji śladów z całego detektora śladowego. Rezultaty moich studiów są podsumowane w dokumencie zespołu CMS Data Acquisition and High-Level Trigger TDR [3] w rozdziałach 15.3.2–15.3.4 oraz przedstawione szczegółowo w nocie [15]. Wyniki te zostały później przeze mnie uaktualnione na potrzeby CMS Physics TDR, Vol. I (Detector Performance and Software) [4], rozdział 9.3.

W czasie stażu byłem także odpowiedzialny za analizę możliwości wyzwalania dla cząstki Higgsa (model MSSM) rozpadającej się w kanale  $A/H \rightarrow \tau\tau \rightarrow \mu + \tau_{JET} + X$ . Działalność ta, podsumowana w rozdziale 15.5.9 TDR HLT [3], zapoczątkowała zaangażowanie Grupy Warszawskiej w badania kanału

$H \rightarrow \tau\tau$ , które trwa do dziś. Byłem też promotorem pomocniczym w przewodzie doktorskim, w którym praca jednego z członków zespołu dotyczyła tego kanału. Wczesne studia nad rekonstrukcją leptonów tau, w których brałem udział, są udokumentowane w [14].

Po zakończeniu stażu w CERN pracowałem jako stażysta (post-doc) dla Uniwersytetu Bazylejskiego (Szwajcaria), w grupie prof. L. Tauchera. Grupa ta we współpracy z Paul Scherrer Institute (PSI) w Villigen (Szwajcaria) uczestniczyła w przedsięwzięciu budowy detektora pikselowego (mozaikowego) (ang. Pixel Detector) dla eksperymentu CMS. Detektor pikselowy, umiejscowiony tuż przy miejscu zderzania wiązek, dostarcza pomiary o najwyższej rozdzielczości i jest ważną częścią systemu rekonstrukcji torów cząstek naładowanych w CMS.

Działalność w grupie detektora pikselowego była przeze mnie kontynuowana również po zakończeniu pracy dla Uniwersytetu Bazylejskiego. Byłem osobą współodpowiedzialną za oprogramowanie rekonstrukcji torów cząstek. W ramach mojej działalności utworzyłem grupę pakietów w komputerowym środowisku rekonstrukcji CMS, której głównym zadaniem jest samodzielna rekonstrukcja torów cząstek naładowanych w detektorze pikselowym. Zadanie to składa się z kilku etapów. Najpierw znajdowane są trafienia (depozyty) w detektorze pasujące do zadanej specyfikacji kinematycznej, później budowane są obiekty odpowiadające śladom cząstek, a następnie przypisuje się im wyliczone wielkości kinematyczne. Utworzone przeze mnie oprogramowanie znajduje bezpośrednie zastosowanie m.in. do: szybkiej rekonstrukcji wierzchołków pierwotnych, algorytmów izolacji oraz - przede wszystkim - do znajdowania tzw. ziarna (ang. seed) umożliwiającego rozpoczęcie pełnej rekonstrukcji torów. Kod komputerowy utworzony przeze mnie, którym częściowo ciągle się opiekuję, jest używany przez CMS w rekonstrukcji w czasie rzeczywistym (w algorytmach trygera) oraz w analizach fizycznych. Rozwój metod rekonstrukcji w ramach detektora pikselowego podsumowany został w nocie [12] i jest moim istotnym wkładem do CMS Physics TDR Vol.1 [4] oraz do rekonstrukcji torów cząstek naładowanych w CMS. Dodatkowo brałem udział w testach detektora pikselowego na wiązce (np.: [13]). Rozwinąłem także oprogramowanie do konwersji detektorowego zapisu danych do formatu używanego w rekonstrukcji. Oprogramowaniem tym opiekowałem się do roku 2010. W związku z moją działalnością dla detektora pikselowego, kilka razy byłem zapraszany przez ośrodek PSI w celach konsultacji (pobyty miesięczne).

Od roku 2004 ponownie pracuję na Uniwersytecie Warszawskim. Jestem odpowiedzialny za znaczną część aktywności związanych z trygerem RPC. Lista moich zadań zawiera: uruchamianie systemu, utrzymanie systemu w ruchu i opiekę nad systemem, analizowanie jakości pracy trygera, monitorowanie jakości danych, w trybie rzeczywistym, a także (podobnie jak dla danych pikselowych) konwersję danych detektorowych RPC do formatu używanego w rekonstrukcjach.

Dodatkowo w czasie działania LHC uczestniczyłem w licznych dyżurach (ang. shifts) trygera RPC, detektora RPC oraz trygera pierwszego stopnia CMS. W tym ostatnim przypadku byłem bezpośrednio odpowiedzialny za sterowanie trygerem całego eksperymentu CMS. Brałem również udział w dyżurach eksperta trygera stopnia pierwszego, pomagając osobom bezpośrednio wykonującym dyżury a także kontrolując ich pracę.

Od roku 2007 jestem koordynatorem aktywności Grupy Warszawskiej oraz zastępcą kierownika grupy w strukturze CMS. W trudnym okresie uruchamiania detektora byłem także zastępcą kierownika grupy RPC DPG (ang. Detektor Performance Group) - grupy analizującej działanie i jakość zbierania danych detektora RPC. Teraz jestem odpowiedzialny w strukturze CMS za kierowanie trygerem RPC.

Obecnie moim głównym zajęciem są prace nad modernizacją pierwszego stopnia wyzwalania na miony. Modernizacja ta polega na budowie nowego systemu znajdującego ślady mionów, MTF (ang. Muon Track Finder) [6], używającego danych ze wszystkich dostępnych poddetektorów mionowych. System znajduje się w końcowej fazie budowy prototypów i projektów algorytmów. Grupa Warszawska, kierowana tu przeze mnie, uczestniczy w budowie MTF, biorąc odpowiedzialność za jego działanie w obszarze pośrednich pseudopospieszności detektora  $0.8 < |\eta| < 1.25$  [7].

Swoją pracę nad rekonstrukcją mionów, trygerem mionowym, izolacją mionów, rekonstrukcją w

detektorze pikselowym oraz wykonane przeze mnie analizy fizyczne prezentowałem wielokrotnie w czasie wewnętrznych spotkań współpracy CMS, prestiżowych spotkaniach specjalnych CMS (tzw. CMS weeks) a także na konferencjach międzynarodowych.

### 3.6 Wybór dokumentów charakteryzujących osiągnięcia naukowe

Pełna lista moich publikacji, oparta o Web of Science podana jest w dodatku 3. Zważywszy na dużą liczbę publikacji, będącą pokłosiem długotrwałej pracy w eksperymencie CMS, aby lepiej scharakteryzować moje zainteresowania oraz zagadnienia, którymi się bezpośrednio zajmowałem, i które opisuję w rozprawie habilitacyjnej, wyselekcjonowałem najważniejsze dla mnie publikacje i zamieściłem je w liście poniżej. Ponieważ baza danych Web of Science nie zawiera wszystkich publikacji, lista ta została uzupełniona. W szczególności listę uzupełniłem o bardzo istotne raporty techniczne eksperymentu CMS, będące właściwą dokumentacją rozwoju projektu detektora. Listę też rozwinąłem o spis moich raportów konferencyjnych wygłoszonych w imieniu CMS.

Dla każdej z pozycji w liście podaję jej krótki opis oraz ewentualnie mój wkład jakościowy. Dla publikacji z Web of Science podana jest ich pozycja na liście w załączniku nr 3. W pozostałych przypadkach (nie dotyczy raportów projektu CMS) podaję mój "wyliczony wkład", zdefiniowany jako odwrotność liczby autorów.

#### 3.6.1 Wybranie raporty projektu CMS

1 **CMS** Collaboration, *CMS: The Compact Muon Solenoid: Letter of intent for a general purpose detector at the LHC*", CERN/LHCC CERN-LHCC-92-03, CERN-LHCC-I-1, CERN, Geneva, 1992. Dokument powstały na etapie zatwierdzania eksperymentu CMS. Zawiera rezultaty moich wczesnych studiów nad trygerem RPC.

2 **CMS** Collaboration, *CMS. The TriDAS project. Technical Design Report, Volume 1: The Trigger Systems*. CERN/LHCC 2000-038, CMS TDR 6.1 in Technical Design Report CMS. CERN, Geneva, 2000.

Główny dokument zespołu CMS przedstawiający projekt trygera stopnia pierwszego. Jestem (współ)edytorem rozdziału dotyczącego trygera RPC, autorem oprogramowania emulującego działanie trygera oraz współautorem studiów nad jego działaniem.

3 **CMS** Collaboration, *CMS. The TriDAS Project. Technical Design Report, Volume 2: Data Acquisition and High-Level Trigger*, CERN/LHCC 2002-026, CMS TDR 6.2 in Technical Design Report CMS. CERN, Geneva, 2002.

Główny dokument zespołu CMS przedstawiający projekt trygera wyższego stopnia (HLT). Najważniejszym moim wkładem są zamieszczone w raporcie badania izolacji mionowej i ich użycie w HLT. Jestem też autorem podsumowanych w pracy studiów nad możliwościami wyzwania na przypadki  $A/H \rightarrow \tau\tau \rightarrow \mu + \tau_{\text{JET}} + X$ . Wniosłem też wkład do rekonstrukcji mionów i metod analizy. Dokument został też opublikowany i znajduje się jako pozycja 342 w załączniku nr 3.

4 **CMS** Collaboration, *CMS Physics: Technical Design Report Volume 1: Detector Performance and Software*. CERN-LHCC-2006-001, CMS-TDR-8-1 in Technical Design Report CMS. CERN, Geneva, 2006

Główny dokument zespołu CMS przedstawiający narzędzia programistyczne zespołu. Najważniejszym moim wkładem jest zaprojektowana i zaimplementowana przeze mnie samodzielna rekonstrukcja torów w detektorze pikselowym. W oparciu o nią konstruowane są ziarna stanowiące początek rekonstrukcji torów. W dokumencie zawarte zostały też dodatkowe studia, mojego autorstwa, nad izolacją mionową.

- 5 CMS Collaboration, S. Chatrchyan *et al.*, *The CMS experiment at the CERN LHC*, JOURNAL OF INSTRUMENTATION, **3**, (AUG 2008).

Podstawowa pozycja przedstawiające opis detektora, przed uruchomieniem programu fizycznego. Pozycja 350 w załączniku 3.

- 6 CMS Collaboration, *CMS Technical Design Report for the Level-1 Trigger Upgrade*. No. CERN-LHCC-2013-011. CMS-TDR-12 in Technical Design Report CMS. CERN, Geneva, 2013.

Dokument zespołu CMS przedstawiający plan modernizacji trygera mionowego. Grupa Warszawska, kierowana tu przeze mnie, projektuje i buduje część nowego systemu.

### 3.6.2 Prace dotyczących trygera mionowego (PACT i OMTF)

- 7 W. M. Zabołotny, D. Bartkiewicz, M. Bluj, K. Buńkowski, A. Byszuk, K. Doroba, M. Górski, A. Kalinowski, K. Kierzkowski, M. Konecki, J. Królikowski, W. Okliński, M. Olszewski, and K. Poźniak, *FPGA Implementation of Overlap MTF Trigger - preliminary study*, Proc. of SPIE 9290 (2014).

Wyliczony wkład własny: 7%.

Wstępny dokument opisujący OMTF. Jestem współautorem koncepcji nowego systemu oraz algorytmu.

- 8 K. Buńkowski, K. Poźniak, M. Bluj, K. Doroba, M. Iskanus, A. Kalinowski, K. Kierzkowski, M. Konecki, J. Królikowski, I. Kudła, F. Loddo, W. Okliński, A. Ranieri, G. de Robertis, T. Tuuva, G. Wrochna, W. Zabołotny, *Synchronization methods for the PAC RPC trigger system in the CMS experiment*, MEASUREMENT SCIENCE & TECHNOLOGY, **18**, 8, (AUG 2007),

Pozycja 353 w załączniku 3.

Dokument podsumowujący rozwój metod synchronizacji systemu RPC przed uruchomieniem CMS.

- 9 G. Bruno and M. Konecki, *Simulation of the baseline RPC trigger system for CMS : Efficiency and Output Rates in Single Muon Topology*, CMS note CMS-NOTE-2001-012, CERN, Geneva, 2001

Wyliczony wkład własny: 50%.

Dokument podsumowujący studia symulacyjne nad trygerem RPC. Jestem autorem oprogramowania emulującego działanie trygera RPC oraz wielu narzędzi użytych do studiów.

- 10 M. Andlinger, A. Kluge, F. Szoncsó, G. Walzel, C.E. Wulz, P. Gorodenski, F. Klefenz, R. Manner, G. L. Bencze, A. Csilling, H. Czyrkowski, R. Dąbrowski, W. Dominik, M. Konecki, J. Królikowski, M. Lewandowski, Z. Mazur, K. Sulowski, M. Górski, M. Szeptycka, M. DellaNegra, I. Kudła, M. Pimia, E. Radermacher, C. Seez, G. Wrochna, *Pattern Comparator Trigger (PACT) for the muon system of the CMS experiment*, NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A-ACCELERATORS, **370**, 2-3, (FEB 21 1996),

Pozycja 366 w załączniku 3.

Przedstawienie koncepcji trygera RPC. Dokument podpisany przez całą grupę trygera RPC. Jestem autorem oprogramowania oraz współautorem algorytmu trygera.

- 11 M. Konecki, J. Królikowski, G. Wrochna, *Simulation study if the RPC based, single muon trigger for CMS*, CMS technical note CMS-TN-1992-039, CERN, Geneva, 1992

Wyliczony wkład własny 33%. Jestem głównym autorem analiz przedstawionych w pracy.

### 3.6.3 Prace dotyczące algorytmów rekonstrukcji

#### Prace z detektorem pikselowym

- 12 S. Cucciarelli, M. Konecki, D. Kotlinski, and T. Todorov, *Track reconstruction, primary vertex finding and seed generation with the Pixel Detector*, CMS note CMS-NOTE-2006-026, CERN, Geneva, 2006  
 Wyliczony wkład własny: 25%,  
 Główna nota eksperymentu CMS dokumentująca samodzielną regionalną rekonstrukcję śladów i wierzchołków w detektorze pikselowym.  
 Wkład własny: wiodący wkład w rozwój algorytmów rekonstrukcji śladów cząstek w detektorze pikselowym (75%).
- 13 Y. Allkofer, C. Amsler, D. Bortoletto, V. Chiochia, L. Cremaldi, S. Cucciarelli, A. Dorokhov, C. Hoermann, R. Horisberger, D. Kim, M. Konecki, D. Kotlinski, K. Prokofiev, C. Regenfus, T. Rohe, D. A. Sanders, S. Son, M. Swartz, T. Speer, *Design and performance of the silicon sensors for the CMS barrel pixel detector*,  
 Pozycja 349 w załączniku 3.

### Algorytmy rekonstrukcji leptonu tau

- 14 S. Gennai, F. Moortgat, L. Wendland, A. Nikitenko, S. Wakefield, G. Bagliesi, S. Dutta, A. Kalinowski, M. Konecki, D. Kotlinski, *Tau jet reconstruction and tagging with CMS*, EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL C, **46**, (JUL 2006),  
 Praca podsumowująca wczesne studia nad metodami rekonstrukcji taonu w rozpadach hadronowych.  
 Pozycja 355 w załączniku 3.

### Izolacja mionowa

- 15 N. Amapane, M. Fierro, and M. Konecki, *High Level Trigger Algorithms for Muon Isolation*, CMS note CMS-NOTE-2002-040, CERN, Geneva, 2002.  
 Wyliczony wkład własny: 33%,  
 Główna nota eksperymentu CMS dokumentująca rozwój metod izolacyjnych na potrzeby TDR HLT. Wniosłem wiodący wkład w rozwój algorytmów izolacji (60%).

### 3.6.4 Wybór najważniejszych wyników eksperymentu CMS

- 16 CMS Collaboration, S. Chatrchyan *et al.*, *Measurement of the  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  branching fraction and search for  $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  with the CMS experiment*, PHYSICAL REVIEW LETTERS, **111**, 10, (SEP 5 2013).  
 Pozycja 78 w załączniku 3.  
 Ważny pomiarów dla fizyki mezonów B.
- 17 CMS Collaboration, S. Chatrchyan *et al.*, *Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC*, PHYSICS LETTERS B, **716**, 1, (SEP 17 2012),  
 Pozycja 182 w załączniku 3.  
 Jedna z najważniejszych publikacji CMS, dotycząca odkrycia bozonu Higgsa.
- 18 CMS Collaboration, S. Chatrchyan *et al.*, *Transverse-momentum and pseudorapidity distributions of charged hadrons in pp collisions at root s=0.9 and 2.36 TeV*, JOURNAL OF HIGH ENERGY PHYSICS, **2**, (FEB 2010).  
 Pozycja 344 w załączniku 3.  
 Jedna z pierwszych analiz CMS. Analiza ta szczególnie bazuje na samodzielnej rekonstrukcji śladów w detektorze pikselowym.

### 3.6.5 Publikacje konferencyjne

- 19 M. Konecki, *The RPC based trigger for the CMS experiment at the LHC*, JOURNAL OF INSTRUMENTATION, **9**, (JUL 2014), The XII workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors.  
Pozycja 18 w załączniku 3.  
Raport na podstawie prezentacji przedstawionej przeze mnie w imieniu współpracy CMS. W pracy szczególnie uwypuklone są zagadnienia, którymi bezpośrednio się zajmowałem.
- 20 M. Konecki, *CMS: Performance, Physics, Perspectives*, ACTA PHYSICA POLONICA B, **45**, 7, (JUL 2014), 20th Cracow Epiphany Conference on the Physics at the LHC.  
Pozycja 17 w załączniku 3.  
Raport na podstawie prezentacji przedstawionej przeze mnie w imieniu współpracy CMS.  
Przegląd najważniejszych wyników eksperymentu CMS w LHC Run-1.
- 21 M. Konecki, *CMS overall performance and physics results in 2010*, ACTA PHYSICA POLONICA B, **42**, 7, (JUL 2011), Cracow Epiphany Conference on the First Year of the LHC.  
Pozycja 279 w załączniku 3.  
Raport na podstawie prezentacji przedstawionej przeze mnie w imieniu współpracy CMS.  
Przegląd najważniejszych wczesnych wyników eksperymentu CMS po pierwszym roku działania.
- 22 M. Konecki, *Muon reconstruction and identification in CMS*, PoS EPS-HEP2009 (2009) 131.  
Wyliczony wkład własny: 100%,  
Raport na podstawie prezentacji przedstawionej przeze mnie w imieniu współpracy CMS. W pracy szczególnie uwypuklone są zagadnienia, którymi bezpośrednio się zajmowałem.
- 23 M. Konecki, *Vertex reconstruction and tracking in the trigger algorithm for CMS*, W pracy szczególnie uwypuklone są zagadnienia, którymi bezpośrednio się zajmowałem. PoS VERTEX2007 (2007) 033.  
Wyliczony wkład własny: 100%,  
Raport na podstawie prezentacji przedstawionej przeze mnie w imieniu współpracy CMS. W pracy szczególnie uwypuklone są zagadnienia, którymi bezpośrednio się zajmowałem.
- 24 M. Konecki, *Online event selection at the CMS experiment*, AIP Conf.Proc. 722 (2004) 207–213.  
Wyliczony wkład własny: 100%,  
Raport na podstawie prezentacji przedstawionej przeze mnie w imieniu współpracy CMS. W pracy szczególnie uwypuklone są zagadnienia, którymi bezpośrednio się zajmowałem.
- 25 M. Konecki, *Prospects for CP violation measurements with ATLAS and CMS*, NUCLEAR PHYSICS B-PROCEEDINGS SUPPLEMENTS, **99B**, (MAY 2001), International Conference on CP Violation Physics.  
Pozycja 363 w załączniku 3.  
Raport na podstawie prezentacji przedstawionej przeze mnie w imieniu współpracy CMS. W pracy szczególnie uwypuklone są zagadnienia, którymi bezpośrednio się zajmowałem.

## 4 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 zatytułowaną:

### *The Muon Trigger of the CMS experiment – design, performance, upgrade*

Praca napisana zaostała w języku angielskim, tłumaczenie tytułu na język polski: „Tryger mionowy eksperymentu CMS - projekt, działanie, modernizacja”.

autor: Marcin Konecki

praca została opublikowana przez Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, 2014, ISBN 978-83-235-1670-5.

W monografii przedstawione jest działanie mionowego systemu wyzwalania detektora CMS (ang. Compact Muon Solenoid). Moja aktywność w ramach grupy zajmującej się trygerem mionowym, uczestnictwo w projektowaniu systemu, utrzymaniu go w ruchu oraz modernizowanie systemu zmotywowały mnie do podkreślenia tych działań w tytule pracy. Praca zawiera także subiektywny przegląd głównych rezultatów fizycznych eksperymentu CMS, włączając te, do których kontrybuowałem, i te, które szczególnie używają przygotowane przeze mnie narzędzi rekonstrukcji.

Monografia składa się z pięciu rozdziałów. W pierwszym zaprezentowany jest detektor CMS, jego działanie oraz wczesne wyniki. W drugim rozdziale opisany został pierwszy stopień trygera (ang. Level-1) eksperymentu, z wyróżnioną częścią mionową i analizami dokumentującymi jej jakość działania. Wyższy stopień trygera (ang. High-Level Trigger - HLT) dyskutowany jest w rozdziale trzecim. Przedstawione są metody rekonstrukcji mionów oraz śladów cząstek naładowanych a także jakość tej rekonstrukcji. Kolejny rozdział to przedstawienie rezultatów badań fizycznych zespołu CMS, w tym analiz związanych z odkryciem cząstki Higgsa. Perspektywy modernizacji eksperymentu zaprezentowano w podsumowaniu. Do pracy załączone są dodatki. W trzech z nich przedstawione są aspekty rekonstrukcji, dla których mój wkład był szczególnie istotny i stanowią rozwinięcie rozdziałów głównych pracy. W pierwszym dodatku zawarte jest rozwinięcie opisu trygera RPC oraz analiza jego działania. Przegląd uproszczonej rekonstrukcji torów w oparciu o detektor pikselowy, dyskutowanej również w rozdziale 3, przedstawiony jest w dodatku drugim. Dodatek trzeci zawiera studia nad rozwojem metod izolacji mionowej. W czwartym dodatku dołączony został słowniczek akronimów.

Monografia oparta jest na: uaktualnionych sprawozdaniach z konferencji, na których wygłaszałem referaty w imieniu zespołu CMS; moim wkładzie do raportów technicznych projektu CMS (ang. Technical Design Report – TDR); notach eksperymentu, które powstały przy moim wiodącym współudziale. Każdy z rozdziałów jest poprzedzony krótką informacją o moim wkładzie wniesionym do tematu dyskutowanego w danym rozdziale. Poniżej podaję najważniejsze zagadnienia dyskutowane w każdym z rozdziałów pracy.

### **Rozdział 1: Eksperyment CMS - projekt i początkowa jakość działania**

Eksperyment CMS jest jednym z dwóch eksperymentów ogólnego przeznaczenia przy akceleratorze LHC (ang. Large Hadron Collider – Wielki Zderzacz Hadronów). Bardzo dobra rekonstrukcja mionów, odzwierciedlona w nazwie eksperymentu, była jedną z wytycznych przy projektowaniu detektora. Elementem wyróżniającym detektor CMS jest długa cewka nadprzewodząca. W obszarze, który otacza cewka, znajdują się detektor śladowy oraz kalorymetry. Na zewnątrz cewki, w jarzmie mag-

nesu, umieszczono system mionowy. Detektory otaczające cewkę, ułożone równolegle do cewki i do rury wiązki, tworzą tzw. obszar beczki detektora (ang. barrel). Dla polepszenia hermetyczności detektora obszar beczki uzupełniony jest dwoma tzw. pokrywami (ang. endcaps), w których detektory ułożone są prostopadle.

System mionowy detektora CMS składa się z trzech typów poddetektorów: DT (ang. Drift Tube) w obszarze beczki, CSC (ang. Cathode Strip Chamber) w obszarze pokryw oraz RPC (ang. Resistive Plate Chamber), zarówno w obszarze pokryw jak i beczki. Pokrycie w pseudopospieszności ( $\eta$ ) systemu mionowego sięga  $|\eta| \approx 2.4$ . W czasie pierwszego okresu działania LHC (tzw. LHC Run-1, 2010–2013), akcelerator działał stabilnie, dostarczając w swoim głównym trybie pracy blisko  $30 \text{ fb}^{-1}$  scałkowanej świetlności do eksperymentu CMS. Dane te zostały zapisane i zatwierdzone pod względem jakości z wysoką efektywnością, osiągającą w każdym z tych kroków ponad 90%. Na potrzeby większości głównych analiz dostępna jest scałkowana świetlność  $5.1 \text{ fb}^{-1}$  przy energii  $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$  zapisana w latach 2010-2011 oraz  $19.7 \text{ fb}^{-1}$  przy  $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$  z roku 2012.

Eksperyment CMS wyposażony został w dwustopniowy system trygera. Zadaniem stopnia pierwszego jest redukcja częstotliwości przypadków z 40 MHz, zadanych przez docelową częstotliwość przecięć wiązek akceleratora, do częstotliwości poniżej 100 kHz. Pierwszy stopień trygera zbudowany został w oparciu o specjalne zaprojektowane moduły elektroniczne, częściowo wykorzystujące urządzenia programowalne. Zmniejszenie częstości przypadków odbywa się poprzez analizę zgrubnych danych z kalorymetrów i systemu mionowego. Na tym stopniu dane z detektora śladowego nie są używane. W czasie przetwarzania sygnału przez stopień pierwszy, dane z detektora są przetrzymywane w buforach i odczytywane w przypadku otrzymania sygnału wyzwolenia pierwszego stopnia (ang. Level-1 accept). Następnie dane są analizowane przez tryger wyższego stopnia HLT. Selekcja HLT wykonuje się na klastrze komputerów. Przypadki są tu rekonstruowane z użyciem pełnej rozdzielczości danych ze wszystkich składowych detektorów eksperymentu CMS, łącznie z detektorem śladowym. Grupa algorytmów wykorzystywana w przetwarzaniu danych przez tryger nazywana jest „menu trygera”. Przypadki wyselekcjonowane przez HLT są grupowane w strumieniu. W strumieniu danych przeznaczonych do analiz fizycznych przypadki zapisywane są z częstością około 1000 Hz. Przypadki te są dalej grupowane w dane przeznaczone dla głównego programu fizycznego oraz uzupełniające dane przeznaczone do dodatkowych analiz, których rekonstrukcja może zostać opóźniona.

Detektor CMS został przetestowany już przed uruchomieniem LHC. Dla sprawdzenia wydajności detektora użyto zarówno danych z wiązek testowych, jak i danych z działań detektora, w których zbierano sygnały promieniowania kosmicznego. Proces sprawdzania detektora był kontynuowany z użyciem wczesnych danych z LHC. Głównymi zagadnieniami były: kalibracja oraz korekty pozycji poddetektorów, sprawdzenie algorytmów rekonstrukcji, porównanie odpowiedzi detektora z przewidywaniami symulacji, sprawdzenie i korekty algorytmów trygera. Udana przygotowanie detektora do pracy zostało pokazane przez pomiary znanych procesów fizycznych. Ilustracją tego może być rekonstrukcja rozpadów kaskadowych barionów, która korzysta zarówno z rekonstrukcji śladów, jak i rekonstrukcji wierzchołków wtórnych. Przykładem obrazującym dobrą rekonstrukcję mionów przez CMS może być rozkład masy niezmienniczej dwóch mionów, w którym łatwo widoczna jest struktura cząstek rodziny  $\Upsilon$ . Pomiary kaskad elektromagnetycznych oraz dżetów są kolejnym ważnym aspektem w rekonstrukcji zdarzeń w CMS. Ilustracją jakości działania CMS na tym polu mogą być rozkłady masy w kanale  $Z \rightarrow e^+e^-$  oraz widma  $p_T$  dżetów. Rekonstrukcja cząstek w CMS jest wspierana przez metodę przepływu cząstek (ang. particle-flow). W ramach tej metody próbuje się identyfikować i rekonstruować wszystkie cząstki wyprodukowane w zderzeniu, używając danych ze wszystkich poddetektorów CMS.

## Rozdział 2: Tryger pierwszego stopnia. Jakość działania

System wyzwalania stopnia pierwszego ma budowę hierarchiczną oraz wydzielone części: mionową i kalorymetryczną. Tryger kalorymetryczny składa się z dwóch stopni - RCT (ang. Regional Calorimeter Trigger – Regionalny (miejscowy) Tryger Kalorymetryczny) oraz GCT (ang. Global Calorimeter Trigger – Globalny (całościowy) Tryger Kalorymetryczny). Danymi wejściowymi są dane wstępne trygera (ang. Trigger Primitives) rekonstruowane z depozytów w wieżach kalorymetrycznych. W RCT rekonstruowani są lokalnie kandydaci na obiekty elektron/foton, składniki dżetów oraz taonów. Informacja z RCT jest analizowana przez GCT, gdzie obiekty rekonstruowane przez tryger kalorymetryczny są ostatecznie budowane. Lista obiektów budowanych przez GCT rozszerzona jest o informacje o całkowitej zmierzonej energii i bilansie energetycznym (brakującej energii).

Kandydaci na miony pierwszego stopnia trygera budowani są najpierw przez podtrygery detektorowe. DTTF (ang. DT Track Finder - poszukiwacz torów w DT) rekonstruuje kandydatów na miony w oparciu o sygnały z komór DT, zaś CSCTF (ang. CSC Track Finder - poszukiwacz torów w CSC) – w oparciu o sygnały z komór CSC. Trzecim składnikiem jest PACT (ang. PAttern Comparator Trigger – tryger w oparciu o porównanie wzorców), nazywany również trygerem RPC, używający danych z komór RPC. W przypadku DTTF oraz CSCTF dane wejściowe są zorganizowane w formie wstępnie zrekonstruowanych tzw. segmentów. Segment budowany jest z sygnałów z jednej komory, przez lokalną elektronikę trygera umieszczoną przy komorach. Każdy segment zawiera informację o lokalnej pozycji mionu oraz kierunku jego ruchu. W przypadku trygera RPC nie ma wielowarstwowych komór, dlatego pojedyncze sygnały z komór nie są dalej grupowane, tylko bezpośrednio kierowane do PACT.

W przypadku DTTF oraz CSCTF najpierw poszukuje się segmentów ze sobą zgodnych, które następnie łączy się, i które w ten sposób tworzą kandydata na mion. W przypadku DTTF pęd poprzeczny mionu  $p_T$  oraz ładunek jest wyznaczany poprzez umiejscowienie dwóch najbardziej wewnętrznych segmentów. Przypisanie wartości odbywa się poprzez tablicowanie (ang. look-up tables). W przypadku CSCTF pomiar pędu bazuje na tablicowaniu adresowanym położeniem segmentów w określonym przedziale pseudospieszości oraz położeniu azymutalnym (aż do) trzech segmentów łączonych w kandydata na mion. W algorytmie PACT wybierane są najpierw sygnały z określonego fragmentu detektora. Konfiguracja przestrzenna sygnałów z komór, pojawiająca się w danym zdarzeniu, porównywana jest ze wzorcami zaimplementowanymi w układach elektronicznych. Wzorce te są uzyskiwane z symulacji metodami Monte-Carlo, opartymi na dużej liczbie generowanych mionów. Dla zrekonstruowania kandydata na mion wymagane są sygnały z przynajmniej 3 komór mionowych. PACT dostarcza również specjalne trygery umożliwiające wyzwalanie detektora na przewidywane przez niektóre modele supersymetryczne tzw. cząstki HSCP (ang. Heavy Stable Charged Particles – Stabilne Cząstki Długożyciowe). Cząstki te dostarczają sygnały podobne do sygnatury mionowej, lecz część sygnałów jest opóźniona. W przypadku każdego z podtrygerów rekonstruowani kandydaci na miony mają przypisaną jakość rekonstrukcji związaną z liczbą i układem komór uczestniczących w pomiarze. Kandydaci z DTTF, CSCTF i PACT są zbierani przez GMT (ang. Global Muon Trigger – Globalny Tryger Mionowy). GMT łączy kandydatów z różnych podsystemów, sortuje ich i przypisuje im pęd poprzeczny w oparciu o ich jakość i kinematykę.

Kandydaci na miony utworzeni przez GMT i obiekty kalorymetryczne zrekonstruowane przez GCT, a także informacje z trygerów technicznych CMS, dostarczone są do GT (ang. Global Trigger - Globalny Tryger). Jest to miejsce, gdzie podejmowana jest decyzja stopnia pierwszego o usunięciu przypadku lub o jego przesłaniu do HLT w celu dalszej analizy. Algorytm używany do podejmowania tej decyzji uwzględnia topologię przypadku, kinematykę kandydatów, zarejestrowane energie, jakości kandydatów mionowych oraz dodatkowe informacje z trygerów technicznych. Selekcja oparta jest o progi energetyczne zdefiniowany w menu trygera. W końcu roku 2012 progi  $p_T$  dla przypadków jednomionowych wynosiły 16 GeV/c dla pełnego zakresu  $\eta$  oraz 12 GeV/c dla  $|\eta| < 2.1$ . W przypadku elektronów/fotonów progi

na energię poprzeczną wynosiły 20 GeV, dla kandydatów izolowanych próg ten był mniejszy i wynosił 18 GeV.

Jakość działania trygera wyraża się poprzez efektywność oraz częstotliwość wyzwoleń. Dodatkowym wymaganiem jest dobre uzgodnienie czasu. Efektywność trygera mierzy się metodą oznacz-i-zbadaj (ang. tag-and-probe). Metoda ta pozwala na pomiar efektywności bez obciążeń spowodowanych selekcją bądź rekonstrukcją. Oparta jest ona na przypadkach dwumionowych pochodzących z rezonansów  $Z$  lub  $J/\psi$ . Jeden z mionów odpowiedzialny jest za wyzwalenie przypadku. Dla drugiego mionu – mierzonego przez detektor śladowy – wyznaczana jest efektywność trygerowania. Identyfikacja przypadków dwumionowych pochodzących z rezonansu odbywa się przez masę niezmienniczą pary. Krzywe efektywności GMT mają plateau na poziomie około 95%. Poziom plateau nie spada ze wzrostem progu trygera. Pomiar częstotliwości wyzwoleń odbywa się dzięki analizie specjalnego strumienia danych, zawierającego tylko dane z trygera. Z analiz wynika, że częstotliwości wyzwoleń przypadków jednomionowych mogą być kontrolowane dla pożądaných progów trygera  $p_T$  poniżej 20 GeV/c. Powyżej tej wartości, krzywe częstości wyzwoleń się nasycają i zmniejszenie częstotliwości poprzez podniesienie progu wyzwiania staje się nieefektywne. Zjawisko to jest niepożądaną cechą trygera i jest widoczne szczególnie dla zakresu  $|\eta| > 2.1$ . Analizy uzgodnień czasu pozwalają stwierdzić, że zanieczyszczenie odpowiedzi trygera spowodowane złym przypisaniem przecięcia wiązek jest na poziomie promila.

### Rozdział 3: Rekonstrukcja mionu przez tryger wyższego stopnia

Klaster komputerów, na którym są wykonywane algorytmy HLT, ewoluował w czasie działania LHC. Pozwoliło to na zwiększanie czasu przeznaczanego na przetwarzanie przypadku wraz ze wzrostem świetlności akceleratora. Algorytmy HLT są zgrupowane w moduły nazywane „ścieżkami”. Każda za ścieżek jest sekwencją kroków rekonstrukcji i selekcji. W ramach danej ścieżki, gdziekolwiek to możliwe, prostsze i szybsze kroki wykonywane są przed bardziej zaawansowanymi i detalicznymi. W ten sposób rekonstrukcja z użyciem danych kalorymetrycznych i danych z systemu mionowego poprzedza rekonstrukcję z użyciem danych z detektora śladowego. Progi na pęd poprzeczny mionów zastosowane przez HLT w końcu roku 2012 wynosiły 40 GeV dla pojedynczych mionów, zaś w przypadku mionów izolownych próg cięcia był niższy i wynosił 24 GeV/c.

Pomiar śladu toru mionu odbywa się zarówno w systemie mionowym, na zewnątrz cewki, jak i w wewnętrznym śladowym detektorze krzemowym. Dla najlepszego efektu pomiary te łączy się. Rekonstrukcja w samym detektorze krzemowym jest dokładniejsza i, z wyjątkiem bardzo energetycznych mionów, wyznacza rozdzielczość pomiaru pędu dla mionów z pędami poprzecznymi poniżej około  $\sim 100$  GeV/c.

Rekonstrukcja mionów przeprowadzana jest zarówno w algorytmie HLT wykonywanym w czasie rzeczywistym zbierania danych, jak i w analizach poza czasem rzeczywistym. Obie te rekonstrukcje są bardzo podobne i różnią się głównie konfiguracją. Do rekonstrukcji śladów cząstek w CMS używa się algorytmu CTF (ang. Combinatorial Track Finder – kombinatoryczny poszukiwacz śladów). Łączy on kilka kroków: poszukiwanie ziarna (ang. seeding), rozpoznawanie wzorców (ang. pattern recognition), dopasowanie kinematyki. Dodatkowo, w szczególnie ważnym dla HLT kroku selekcji, rekonstrukcja śladów może zostać zatrzymana w zależności od jakości danych oraz cięć. Pozwala to na tzw. częściową rekonstrukcję torów.

Krok znajdowania ziarna jest szczególnie ważny dla HLT. Pożądaną cechą jest tu czystość. W CMS znajdowanie ziarna jest oparte o algorytmy znajdowania śladów oraz wierzchołków w samodzielnej rekonstrukcji w ramach detektora pikselowego. Rekonstrukcja ziarna może być przeprowadzona w określonym uprzednio fragmencie detektora z nałożonymi warunkami na kierunek ruchu cząstki, jej pęd oraz wierzchołek, z którego pochodzi. Stanowi to podstawę regionalnej rekonstrukcji śladów cząstek w eksperymencie CMS. Ziarna są tworzone na podstawie znalezionych dwóch lub trzech zrekonstruowanych

pomiarów przejścia cząstki przez detektor, zgodnych z zadaną kinematyką cząstki. Dla optymalizacji czasu rekonstrukcji śladów cząstek, rekonstrukcja ta odbywa się iteracyjnie. Najpierw poszukiwane są ślady łatwe do rekonstrukcji. Następnie coraz trudniejsze, wyłączając z rekonstrukcji trafienia pasujące do uprzednio zrekonstruowanych śladów. Powiązane jest to z nakładaniem coraz mniej restrykcyjnych warunków na poszukiwanie ziaren dla każdej z iteracji rekonstrukcji.

Rekonstrukcja mionów w HLT robiona jest etapami. Najpierw rekonstruowane są miony tylko w oparciu o dane z systemu mionowego. Dzieje się to w ramach wirtualnego stopnia drugiego trygera wykonywanego w ramach HLT. Rekonstrukcja, uwzględniająca dane z detektora śladowego, odbywa się w wirtualnym stopniu trzecim trygera. W każdym przypadku rekonstrukcja jest oparta o algorytm CTF. Wynikiem rekonstrukcji na stopniu trzecim może być mion dwóch typów. Pierwszym typem jest mion łączony (ang. global muon), który łączy rezultaty niezależnych dopasowań w systemie mionowym oraz śladu z detektora śladowego. Drugim typem jest tor z detektora śladowego, zidentyfikowany jako mion poprzez zgodność śladu z istniejącym depozytem w systemie mionowym. Każdy z tych typów mionów pochodzi też z rekonstrukcji używającej inny typ ziarna.

Izolacja mionowa jest potężnym narzędziem rekonstrukcji używanym w selekcji mionów w HLT. Pozwala ona na rozróżnienie najbardziej interesujących mionów, potencjalnie pochodzących z rozpadów ciężkich obiektów, od mionów w dżetach QCD. Izolacja mionowa używana w CMS oparta jest o pojedynczy wyróżnik, któremu jest konstruowany w oparciu o sumę pędów cząstek otaczających mion oraz sumę depozytów energetycznych w kalorymetrze dokoła miejsca przejścia mionu przez kalorymetr. Depozyty energetyczne są korygowane o spodziewaną energię pochodzącą z nakładania się różnych przypadków w ramach jednego przecięcia wiązek LHC.

## Rozdział 4: Wybrane analizy fizyczne

Eksperyment CMS realizuje bogaty program fizyczny. Głównym jego rezultatem, jak do tej pory, jest odkrycie nowego bozonu, zidentyfikowanego jako bozon Higgosa. Badane są kanały jego rozpadu oraz sygnatury zdarzeń, co umożliwi również badanie mechanizmów produkcji cząstki Higgosa. Szczególnie ważne są kanały rozpadu na parę fotonów oraz pary elektron/pozyton lub mionowe (łącznie 4 leptony) poprzez bozony Z. Nazywane są one złotymi kanałami, które pełniły w czasie projektowania detektorów rolę wyznaczników jakości działania eksperymentu.

Kanał  $H \rightarrow \gamma\gamma$  charakteryzuje się dwoma wysokoenergetycznymi, izolowanymi fotonami. Głównym źródłem tła jest tu bezpośrednia produkcja fotonów oraz błędna interpretacja dżetów hadronowych. Te obfite tła są jednak efektywnie tłumione przez doskonałą rekonstrukcję fotonów oraz rozdzielczość masową CMS. Specyfiką kanału  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$ , dla którego głównym źródłem tła jest nierezonansowa produkcja par  $ZZ$  oraz  $Z\gamma^*$ , jest niska statystyka przypadków sygnałowych. Analiza tego kanału opiera się w szczególności o izolację elektornów i mionów, które muszą być rekonstruowane z dużą efektywnością i selektywnością, oraz z zastosowaniem optymalnych metod izolacji. Masa bozonu Higgosa zmierzona łącznie w kanale  $\gamma\gamma$  oraz 4 leptonowym wynosi  $m_H = 125.03^{+0.29}_{-0.31} \text{ GeV}/c^2$ . Wśród innych kanałów rozpadu bozonu Higgosa kanał  $H \rightarrow \tau\tau$  jest szczególnie interesujący i ważny dla badania własności cząstki. Liczne kanały rozpadu prowadzą do sygnatur zdarzenia wymagających użycia narzędzi do rekonstrukcji mionów, elektronów, ale także do wąskich dżetów hadronowych powodowanych przez hadronowe rozpady taonów. Rozpady taonów zawierają neutrina w stanie końcowym, zatem masa niezmiennicza produktów rozpadu nie może zostać wyznaczona dokładnie. Głównym źródłem tła w tym kanale są rozpady  $Z \rightarrow \tau\tau$ , które szacuje się, stosując metody osadzania. Wykonane przez CMS analizy umożliwiają wyznaczenie parametru wzmocnienia produkcji (ang. signal strength modifier) cząstki Higgosa na  $1.00 \pm 0.13$ . Analizy własności bozonu Higgosa potwierdzają przewidywane przez Model Standardowy sprzężenia oraz wartości spin-parzystości.

W programie fizycznym CMS ważne miejsce zajmują precyzyjne pomiary i testy zgodności Mo-

delu Standardowego, w które wchodzi badania W, Z, kwarku t, a także pomiary produkcji dżetów i fizyka ciężkich jonów. Między wieloma pomiarami wykonanymi przez CMS analiza krotności cząstek naładowanych, a także korelacje topologiczne w rozkładach dwóch cząstek szczególnie zależą od rekonstrukcji śladów w detektorze pikselowym. Inną ważną analizą przeprowadzoną przez CMS jest pomiar współczynnika rozgałęzienia  $B_s \rightarrow \mu^+\mu^-$ , oraz wyznaczenie limitu na współczynnik rozgałęzienia w rozpadzie  $B \rightarrow \mu^+\mu^-$ . Szeroko prowadzone są również poszukiwania supresymetrii oraz innych modeli egzotycznych, niemniej jednak żadne oznaki fizyki spoza Modelu Standardowego nie zostały dotychczas zaobserwowane.

## Rozdział 5: Perspektywy i podsumowanie

W następnym okresie działania LHC energia akceleratora ma osiągnąć wartości bliskie wartościom projektowanym, podczas gdy świetlność powinna je nawet przewyższyć. Zwiększeniom wydajności LHC muszą towarzyszyć niezbędne ulepszenia aparatury eksperymentu CMS. Jedną z głównych przewidzianych modyfikacji jest wymiana obecnego detektora pikselowego. Motywacją dla tej wymiany jest oczekiwana degradacja działania spowodowana wzrostem świetlności i napromieniowaniem. Ograniczenia obecnego układu odczytu detektora powodują, że musi on zostać zastąpiony ulepszoną wersją. Najważniejszą jednak zmianą w tym detektorze będzie zwiększenie liczby płaszczyzn pomiarowych, tak aby dostarczyć 4 precyzyjne punkty pomiarowe. Ulepszy to jeszcze możliwości rekonstrukcji w ramach detektora pikselowego oraz poprawi czystość generacji ziarna.

Kolejną ważną zmianą dla CMS jest poprawa czystości trygera stopnia pierwszego. Aby to osiągnąć, system ten zostanie przebudowany. W ramach tej modernizacji ważne zamiany wprowadzone będą w działaniu trygera mionowego. Obecnie odpowiedź trygera mionowego jest generowana przez niezależnie działające podtrygery a ich odpowiedź jest łączona przez GMT. W ramach nowego trygera - systemu MTF (ang. Muon Track Finder – poszukiwacz śladów mionowych) - sygnały z detektorów będą łączone na wstępnym etapie przetwarzania danych i kandydaci na miony będą rekonstruowani przy uwzględnieniu całej dostępnej informacji z poddetektorów.

Wszystkie te modernizacje będą prowadzone w kontekście dalszego badania mechanizmu łamania symetrii elektrosłabej, sprawdzania Modelu Standardowego oraz dalszego poszukiwania fizyki poza nim.

M. Kowech