

**Autoreferat**

**dr inż. Tomasz Szumlak**

**Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek**

**Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej**

**Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie**

**Kraków 2013**

### 1. Dane Personalne

Imię i Nazwisko: **Tomasz Szumlak**  
Miejsce pracy: AGH - Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica  
w Krakowie  
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej  
Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek  
30-059  
Stanowisko: adiunkt

### 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe

Magister fizyki 2001 - Akademia Górniczo-Hutnicza  
Wydział Fizyki i Techniki Jądrowej  
  
Doktor 2004 - Akademia Górniczo-Hutnicza  
nauk fizycznych Wydział Fizyki i Techniki Jądrowej  
rozprawa pt. „**Pomiar hadronowej składowej funkeji struktury  
elektronu przy energiach LEP2**” (praca wyróżniona)  
promotor: prof. dr hab. Bogdan Muryn

### 3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

2004 - 2005 Akademia Górniczo-Hutnicza  
Wydział Fizyki i Techniki Jądrowej  
Katedra Fizyki Cząstek Elementarnych i Detektorów  
asystent  
  
2005 - 2007 University of Glasgow  
School of Physics and Astronomy  
Particle Physics Experiment Group  
Research Assistant  
  
2007 - 2009 University of Glasgow  
School of Physics and Astronomy  
Particle Physics Experiment Group  
Research Associate (core staff)  
  
2009 - 2010 CERN (*Organisation* Européenne pour la Recherche Nucléaire)  
PH-LHCb  
Long Term Attachment Research Associate (University of Glasgow)  
  
2011 - obecnie Akademia Górniczo-Hutnicza  
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej  
Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek  
adiunkt

#### 4. Wskazanie osiągnięcia stanowiącego podstawę postępowania habilitacyjnego

Osiągnięciem naukowym wynikającym z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65 poz. 595, z późn. zm.) jest dzieło opublikowane w całości.

##### 4.a Dane bibliograficzne

Tomasz Szumlak, „*Performance of the LHCb Vertex Locator and the measurement of the forward-backward asymmetry in  $B_d \rightarrow K^{*0}(892)\mu^+\mu^-$  decay channel as a probe of New Physics*”, Wydawnictwo JAK, Kraków 2013, ISBN 978-83-934620-9-4

##### 4.b Omówienie celu naukowego ww. pracy i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

###### Wstęp

Eksperyment LHCb [1], który działa obecnie przy akceleratorze LHC [2] w instytucie badań jądrowych CERN, dedykowany jest poszukiwaniu Nowej Fizyki w sektorze ciężkich zapachów (kwarki b i c). Główne kierunki badawcze eksperymentu LHCb koncentrują się na obserwacjach rzadkich rozpadów mezonów pięknych ( $B_{d(s)}$ ) i powabnych ( $D^{(*)}$ ) oraz precyzyjnych pomiarach łamania parzystości kombinowanej CP. Zagadnienia te należą do jednego z najbardziej intrygujących i prężnie rozwijających się kierunków współczesnej fizyki wysokich energii. Obserwowana eksperymentalnie lokalna asymetria barionowa (przewaga materii nad antymaterią) nie da się wyjaśnić na gruncie teoretycznym przy użyciu Modelu Standardowego, który stanowi w chwili obecnej obowiązującą teorię oddziaływań cząstek fundamentalnych. Obserwacje astrofizyczne potwierdzają brak makroskopowych ilości antymaterii również w większych skalach odległości, co wskazuje, że asymetria ta może być uniwersalna dla całego Wszechświata. Badania te pozwoliły również na oszacowanie parametru  $\varepsilon$ , wyrażającego stosunek gęstości materii barionowej,  $\rho_B$ , do gęstości promieniowania tła,  $\rho_\gamma$ , który wynosi w przybliżeniu  $10^{-10}$ .

Opis teoretyczny procesu bariogenezy podany został przez Sacharowa w roku 1967 [3]. W zasadzie, Model Standardowy, znany w obecnej formie, wykazuje zgodność z postulatami Sacharowa. Na przykład sektor elektroslaby tego modelu łamie maksymalnie symetrię ładunkową C oraz przestrzenną P jak również symetrię kombinowaną CP. Jednakże obliczenia teoretyczne oparte na Modelu Standardowym przewidują asymetrię barionową, która jest kilka rzędów wielkości mniejsza od tej obserwowanej eksperymentalnie. Fakt ten daje niezwykle silną motywację do poszukiwania nowych procesów, które nie są opisywane na gruncie Modelu Standardowego. Próby odkrycia tej Nowej Fizyki stanowią główny cel działania wielkich eksperymentów korzystających ze zderzacza protonów LHC. Eksperymenty ATLAS [4] i CMS [5] koncentrują się głównie na bezpośrednich obserwacjach nowych cząstek, które przewidywane są przez liczne teorie opisujące fizykę poza Modelem Standardowym. Badania te zaowocowały odkryciem bozonu Higgsa [6, 7], który jest niezbędny do wyjaśnienia mechanizmu nadawania masy cząstkom elementarnym. LHCb reprezentuje z kolei komplementarne podejście do poszukiwania sygnałów Nowej Fizyki w stosunku do eksperymentów ATLAS i CMS. Precyzyjne pomiary prowadzone przez LHCb, stanowiące pośredni sposób odkrycia Nowej Fizyki, są czułe na efekty kwantowe związane z procesami pętlowymi wyższego rzędu, które mogą zachodzić poprzez wirtualną wymianę nowych bardzo ciężkich cząstek. Potencjalnie, jeżeli te nowe stany posiadałyby masę większą niż energia dostępna w zderzaczu LHC, LHCb jest jedynym eksperymentem, który mógłby potwierdzić istnienie Nowej Fizyki na drodze pośredniej.

Z uwagi na subtelny charakter obserwowanych wielkości fizycznych, detektor LHCb musi charakteryzować się wydajnym i precyzyjnym systemem rekonstrukcji śladów cząstek naładowanych, który jest w stanie w czasie rzeczywistym (tzw. tryb 'on-line') dokonać pomiaru wielkości niezbędnych do wypracowania odpowiedzi układu wyzwalania przypadków (tryger). Aby możliwa była realizacja tych celów system śladowy spektrometru LHCb został wyposażony w detektor wierzchołka VELO (VERTex LOcator), który stanowi jego centralną część. Od roku 2005 brałem aktywny udział w pracach związanych z montażem, testami, oprogramowaniem oraz uruchomieniem tego detektora. Głównymi zadaniami VELO jest precyzyjna rekonstrukcja wierzchołków pierwotnych (oddziaływań proton-proton), wtórnych (rozpadów mezonów pięknych i powabnych) oraz trajektorii cząstek naładowanych w pobliżu punktu przecięcia wiązek protonowych. To z kolei, pozwala na dokładne wyznaczenie parametru zderzenia cząstek w odniesieniu do wierzchołka pierwotnego oraz czasu życia mezonów  $B_{d(s)}$  oraz  $D^{(*)}$ . Wielkości te stanowią podstawowy wkład do procesu dyskryminacji tła (wykorzystywanego w algorytmach do selekcji przypadków) dla poszczególnych analiz fizycznych.

**Przedstawiona przeze mnie monografia dotyczy wybranych projektów naukowo-badawczych, które wykonałem jako członek eksperymentu LHCb w latach 2005 - 2013. Monografia podzielona jest na trzy części opisujące kolejne etapy obróbki i analizy danych eksperymentalnych od momentu odczytu układów elektroniki front-end, poprzez rekonstrukcję położenia i trajektorii cząstek naładowanych aż do końcowej selekcji sygnału i pomiaru konkretnych wielkości fizycznych. Przedstawiony opis skupia się głównie na systemie detektora wierzchołka, ze względu na mój udział oraz ze względu na wiodącą rolę tego detektora w dyskutowanej analizie. Wszystkie omówione poniżej wyniki stanowią mój wkład do eksperymentu LHCb.**

#### **Emulacja przetwarzania danych surowych oraz rekonstrukcji położenia cząstek naładowanych dla mikro-paskowego krzemowego detektora wierzchołka VELO**

Proces rekonstrukcji trajektorii cząstek naładowanych uzależniony jest bezpośrednio od jakości rekonstrukcji ich współrzędnych przestrzennych w poszczególnych elementach aktywnych (sensorach) układu śladowego. Procedura ta wykonywana jest w specjalnie do tego celu zaprojektowanych elektronicznych systemach odczytu zwanych Tell1<sup>1</sup> [8], które stanowią część układu wyzwalania przypadku eksperymentu LHCb [9]. Systemy elektroniczne Tell1 przetwarzają sygnały analogowe rejestrowane przez układy front-end detektora VELO, dokonują ich digitalizacji oraz skomplikowanego procesu obróbki, który ma za zadanie selekcję sygnałów pochodzących od cząstek oddziałujących z materiałem czynnym sensorów krzemowych oraz dyskryminację szumów aparaturowych. Selekcja ta odbywa się przy użyciu sekwencji algorytmów skonstruowanych w języku HDL (Hardware Description Language) i wykonywanych przez specjalizowane procesory FPGA<sup>2</sup>, stanowiące podstawowe zasoby obliczeniowe systemów Tell1. Po dokonaniu selekcji sygnałów następuje ich łączenie w klastry, które można traktować jako reprezentację rozkładu ładunku zdeponowanego w sensorze przez oddziałującą cząstkę naładowaną. Wszystkie klastry zrekonstruowane dla danego przypadku zostają następnie zakodowane w specjalnej strukturze, która nazywa się bankiem surowym (RawBank). Bank ten stanowi część zarejestrowanego przypadku i przesyłany jest do dalszej analizy w ostatniej warstwie systemu wyzwalania wysokiego poziomu (High Level Trigger).

Bank surowy jest końcowym wynikiem lokalnej analizy danych pochodzących bezpośrednio z systemów sprzętowych detektora LHCb. Oznacza to, że informacje w nim zawarte nie mogą już zostać zmodyfikowane. Fakt ten nakłada niezwykle wysokie wymagania związane z niezawodnością

<sup>1</sup> Trigger ELectronic L1

<sup>2</sup> Field Programmable Gate Aarray

oraz jakością algorytmów do obróbki i selekcji sygnałów zapisywanych w banku surowym. Wymaga to również stworzenia odpowiednich narzędzi oraz procedur do automatycznej kalibracji, konfiguracji oraz kontroli tych algorytmów podczas zbierania danych fizycznych.

Moja propozycja, którą przedstawiłem na forum eksperymentu LHCb, dotyczyła stworzenia platformy programowej zawierającej pełną emulację procedury selekcji sygnałów pochodzących od cząstek naładowanych oraz umożliwiającej kalibrację algorytmów do rekonstrukcji położenia tych cząstek przy użyciu danych surowych z detektora VELO. Wynikiem działania emulatora jest bank surowy o strukturze identycznej z tą produkowaną przez układ elektroniczny Tell1, dzięki czemu możliwe jest bezpośrednie ich porównanie. Taka funkcjonalność pozwala na badanie działania algorytmów do obróbki danych surowych, wykrywanie błędów oraz opracowanie ich ulepszonych wersji. Projekt ten, nazwany VETRA [10], został zrealizowany oraz wdrożony do użycia pod moim kierownictwem. Dzięki użyciu platformy VETRA możliwe było wykonanie szybkiej kalibracji parametrów konfiguracyjnych algorytmów do obróbki danych surowych. VELO był również dzięki temu pierwszym detektorem w LHCb, który zarejestrował przejście cząstek wyprodukowanych przez wiązki protonowe LHC [11].

Platforma VETRA stanowi zupełnie nowe podejście do emulacji, kalibracji oraz kontroli działania skomplikowanych elementów elektronicznych systemu akwizycji danych stosowanych dla eksperymentów wysokiej energii. Emulator został całkowicie zintegrowany z oficjalnym oprogramowaniem eksperymentu LHCb. Jest w stanie przetwarzać dane zbierane przez eksperyment oraz produkować dane, które mogą z kolei być wykorzystane przez procedurę rekonstrukcji śladów. Dzięki temu grupa VELO może bardzo szybko identyfikować problemy związane z działaniem samego detektora jak również problemy dotyczące skomplikowanego systemu akwizycji. Platforma VETRA jest kluczowym elementem wykorzystywanym w kontroli detektora VELO podczas zbierania danych fizycznych. W chwili obecnej oprogramowanie to obsługuje wszystkie detektory krzemowe (VELO, TT – Trigger Tracker oraz T – Tracking stations) wchodzące w skład spektrometru LHCb.

### **Pomiar przestrzennej zdolności rozdzielczej detektora wierzchołka LHCb VELO**

Przestrzenna zdolność rozdzielcza jest jednym z podstawowych parametrów jaki brany jest pod uwagę przy konstrukcji mikro-paskowych detektorów pozycjoczułych. W przypadku eksperymentu LHCb wybrano zupełnie nowe podejście, w którym sensory krzemowe zorientowane są prostopadle w stosunku do osi wiązki. Poza tym, pierwsze elementy aktywne sensorów znajdują się w odległości zaledwie 8 mm od wiązki protonowej. Z uwagi na specyficzny program fizyczny eksperymentu LHCb, który ma za zadanie pośrednio poszukiwanie nowej fizyki, wymagania dotyczące precyzji rekonstrukcji śladów cząstek naładowanych oraz wielkości pochodnych (wierzchołki pierwotne i wtórne, parametr zderzenia, czas życia i inne) są wyjątkowo ostre. Jednym z kluczowych elementów mających wpływ na wysoką precyzję wymienionych wielkości jest możliwie najwyższa precyzja rekonstrukcji pozycji cząstek naładowanych. W pierwszym rzędzie, aby uzyskać wysoką rozdzielczość przestrzenną należy zastosować odpowiednią segmentację elementu aktywnego detektora. W przypadku sensorów mikro-paskowych segmentacja zdefiniowana jest poprzez odległość pomiędzy poszczególnymi paskami. W przypadku prostego odczytu binarnego, zdolność rozdzielczą<sup>3</sup> zdefiniować można jak poniżej:

$$\sigma^2 = \frac{p^2}{12}$$

<sup>3</sup> Również nazywaną binarną.

gdzie:  $P$  oznacza lokalną odległość pomiędzy paskami. W tym przypadku rozdzielczość przestrzenna zależy jedynie od segmentacji sensora. Aby zwiększyć precyzję pomiaru położenia cząstki możemy zastosować odczyt analogowy (tzn. czuły na amplitudę zarejestrowanego sygnału) oraz, biorąc pod uwagę możliwość współdzielenia ładunku pomiędzy sąsiednie kanały, użyć algorytmu do konsolidacji (klasteryzacji) kanałów, które zarejestrowały przejście tej samej cząstki. Dzięki konsolidacji pozycja cząstki może zostać wyznaczona w oparciu o kształt rozkładu zdeponowanego przez cząstkę ładunku, co pozwala uzyskać znacznie lepszą precyzję pomiaru w stosunku do rozdzielczości binarnej.

W przypadku detektora VELO mamy do czynienia z niespotykanymi wcześniej efektami związanymi z wyznaczeniem zdolności rozdzielczej. Po pierwsze, sensory zastosowane w budowie detektora wierzchołka eksperymentu LHCb charakteryzują się zmienną szerokością pasków (ang. floating pitch), która jest ciągłą funkcją odległości od wiązki. Po drugie, efekty związane z podziałem ładunku pomiędzy sąsiednie paski sensora nie dają się opisać w prosty sposób w funkcji kąta polarnego śladu. Efekt ten związany jest ze skomplikowaną geometrią pasków na sensorach VELO, które mają za zadanie dokonać pomiaru współrzędnej radialnej i azymutalnej danej cząstki (Rys. 1). Aby dokonać poprawnie opisu podziału ładunku na sensorach VELO należy więc zdefiniować nową zmienną – kąt projekcji śladu, która uzależniona jest od lokalnej geometrii pasków, widzianej przez przechodzącą cząstkę.

Moja rola w przypadku badania i pomiaru przestrzennej zdolności rozdzielczej detektora VELO polegała na: zaprojektowaniu algorytmu do konsolidacji (klasteryzacji), opracowaniu modelu podziału ładunku pomiędzy paski (w oparciu o pomiary) oraz wyznaczeniu niepewności zrekonstruowanej pozycji cząstki (zakładamy, że niepewność pomiaru odpowiada zdolności rozdzielczej sensora w danym punkcie). Najważniejszym wynikiem mojej pracy jest oprogramowanie używane do przygotowania tzw. 'pomiarów'<sup>4</sup>, które używane jest podczas rekonstrukcji śladów oraz wyznaczenie funkcji opisującej przestrzenną zdolność rozdzielczą detektora VELO.

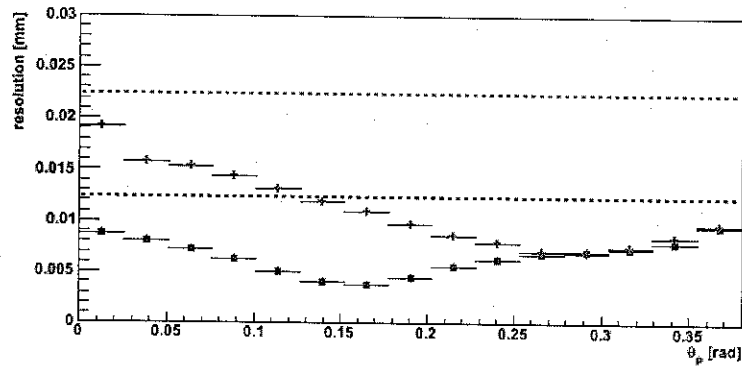
Otrzymane wyniki pokazują, że w przypadku VELO przestrzenna zdolność rozdzielcza zależy, w nietrywialny sposób, od dwóch parametrów – szerokości paska oraz kąta projekcji. Na rysunku 1 przedstawiono zmierzoną rozdzielczość w funkcji kąta projekcji śladu, natomiast na rysunku 2 rozdzielczość w funkcji szerokości paska zmierzoną dla danych fizycznych.

Uzyskana rozdzielczość jest znacznie lepsza od rozdzielczości binarnej (która zdefiniowana jest poprzez segmentację sensora). Detektor VELO charakteryzuje się najlepszą przestrzenną zdolnością rozdzielczą, wynoszącą około  $4 \mu\text{m}^5$ , spośród wszystkich detektorów tego typu pracujących obecnie w eksperymentach przy LHC. Wynik ten przekłada się również na najlepsze, uzyskiwane obecnie na świecie, rozdzielczości rekonstrukcji wierzchołków, parametru zderzenia oraz czasu życia. Ma to z kolei bezpośredni wpływ na najwyższej jakości wyniki fizyczne uzyskiwane przez eksperyment LHCb.

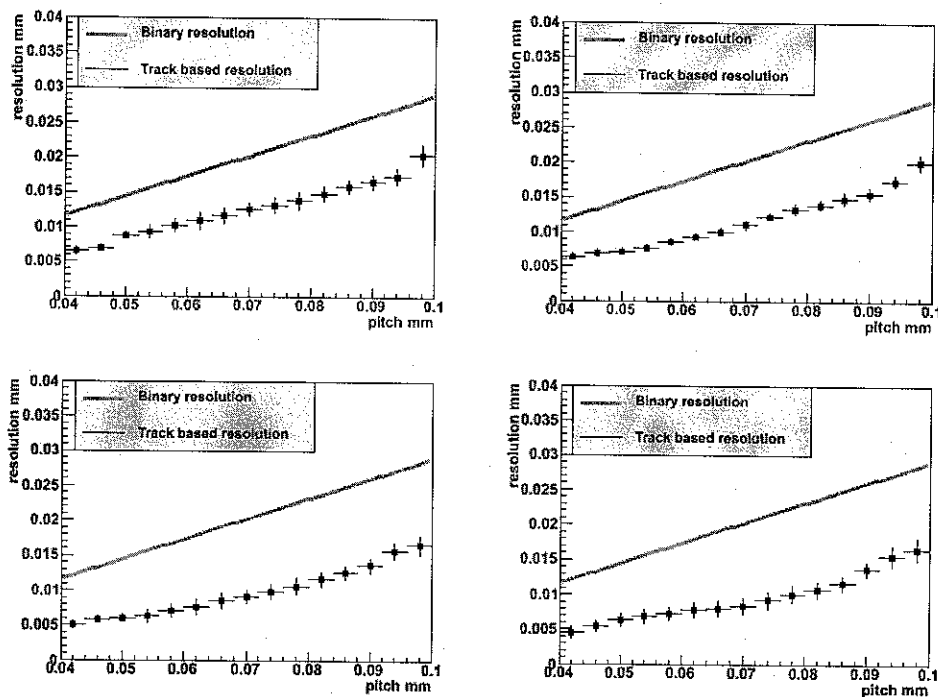
Wykonany przeze mnie pomiar rozdzielczości przestrzennej VELO oraz opracowanie na tej podstawie funkcji reprezentującej precyzję pomiaru pozycji dla pojedynczej cząstki naładowanej, stanowi jeden z najważniejszych czynników umożliwiających wykorzystanie tego detektora do rekonstrukcji parametrów fizycznych o najwyższej jakości.

<sup>4</sup> Pomiar rozumiany jest jako złożony obiekt w skład którego wchodzi: wartość estymatora położenia cząstki, niepewność estymatora położenia oraz informacje topologiczne związane z kanałem (lub kanałami), które doznały rejestracji cząstki.

<sup>5</sup> Wartość rozdzielczości otrzymana dla optymalnego przedziału szerokości paska oraz kąta projekcji śladów.



Rys. 1. Przestrzenna zdolność rozdzielcza w funkcji kąta projekcji śladu cząstki (wyrażonej w radianach). Punkty czerwone odpowiadają szerokościom pasków z przedziału (0.04, 0.044) mm, punkty niebieskie odpowiadają natomiast szerokościom pasków z przedziału (0.08, 0.084) mm.



Rys. 2. Przestrzenna zdolność rozdzielcza w funkcji szerokości paska dla wybranych zakresów kąta projekcji śladu – górny lewy:  $\theta_p \in (0.0, 0.035)$  rad , górny prawy  $\theta_p \in (0.035, 0.07)$  rad, dolny lewy:  $\theta_p \in (0.10, 0.14)$  rad oraz dolny prawy  $\theta_p \in (0.21, 0.3)$  rad. Linia ciągła reprezentuje rozdzielczość binarną.

### Poszukiwanie sygnałów Nowej Fizyki na drodze pomiaru asymetrii ładunkowej przód-tył w rozpadzie rzadkim $B_d \rightarrow K^{*0}(892)\mu^+\mu^-$

Poszukiwanie Nowej Fizyki jest zasadniczą misją eksperymentu LHCb. Jednym z tak zwanych 'złotych' kanałów eksperymentu LHCb, który uważany jest powszechnie za jeden z najbardziej obiecujących procesów jaki może być użyty do poszukiwania odstępstw od Modelu Standardowego, jest rozpad  $B_d \rightarrow K^{*0}(892)\mu^+\mu^-$ . Pomiar prowadzone przez eksperyment LHCb polegają na obserwacji wielkości fizycznych, które są czułe na efekty Nowej Fizyki poprzez poprawki kwantowe (pomiar pośrednie). Dyskutowany rozpad rzadki, można opisać, na poziomie kwarkowym jako przejście  $b \rightarrow s$ , które nie może zająć poprzez diagramy typu "drzewiastego" w Modelu Standardowym. Rozpad ten należy do grupy tak zwanych procesów zmieniających zapach na drodze wymia-

ny prądów neutralnych (ang. Flavour Changing Neutral Currents), które można opisać przy pomocy diagramów pętlowych wyższego rzędu rachunku zaburzeń.

W szczególności, asymetria przód-tył,  $A_{FB}$ , uważana jest za jedną z najlepiej znanych teoretycznie wielkości związanych z kwarkowym sektorem ciężkich zapachów Modelu Standardowego. Pomiar asymetrii  $A_{FB}$  opiera się przede wszystkim na założeniu, że rozpad  $B_d \rightarrow K^{*0}(892)\mu^+\mu^-$  można opisać przy pomocy efektywnego Hamiltonianu proporcjonalnego do liniowej kombinacji odpowiednich elementów macierzy CKM pomnożonych przez tzw. współczynniki Wilsona [12]. Mówimy, że technika efektywnego Hamiltonianu pozwala na rozdzielenie efektów krótko i długo-zasięgowych<sup>6</sup>, przy czym współczynniki Wilsona zawierają wszystkie informacje dotyczące procesów krótko-zasięgowych (np. wymiana cząstek  $W^\pm$  and  $Z^0$ ). Tak więc, jeżeli istnieją nowe, masywne stany nieznanne w Modelu Standardowym, wówczas wartości współczynników Wilsona powinny ulec modyfikacji w stosunku do tych wyznaczonych na gruncie Modelu Standardowego. Potencjalnie każda wielkość, która może być wyrażona teoretycznie jako funkcja współczynników Wilsona powinna być czuła na efekty Nowej Fizyki. W praktyce, wkładu od procesów długo-zasięgowych (np. rozpraszanie kwarków w stanie końcowym) nie da się całkowicie zaniedbać. Składniki, które zawierają informacje dotyczące procesów nieperturbacyjnych obciążone są znacznymi niepewnościami teoretycznymi<sup>7</sup>. Asymetria ładunkowa przód-tył jest w tym przypadku wyjątkowa, gdyż związana jest z pomiarem dotyczącym jedynie mionów obserwowanych w stanie końcowym, co powoduje, że zaniedbanie pochodzące od procesów długo-zasięgowych jest niewielkie.

Asymetrię  $A_{FB}$  można wyrazić przy pomocy następującej formuły:

$$\frac{dA_{FB}}{dq_{\mu\mu}^2} = \frac{1}{\mathcal{N}} \int_{\cos(\theta_l)=-1}^{\cos(\theta_l)=1} \text{sgn}[\cos(\theta_l)] \frac{d^2\Gamma}{dq_{\mu\mu}^2 d\cos(\theta_l)} d\cos(\theta_l)$$

gdzie:  $q_{\mu\mu}^2$  oznacza masę niezmienniczą układu mion-mion obserwowanego w stanie końcowym,  $\Gamma$  jest częstością rozpadu,  $\theta_l$  to kąt pomiędzy wektorem pędu  $\mu^-$  ( $\mu^+$ ), wyznaczonym w układzie środka masy układu mion-mion, oraz wektorem pędu  $\vec{B}_d^0$  ( $B_d^0$ ) oraz  $\mathcal{N}$  oznacza całkowitą liczbę przypadków.

Z eksperymentalnego punktu widzenia opisywana asymetria posiada niezwykle prostą interpretację – wyraża ona różnicę pomiędzy liczbą mionów emitowanych w przednią oraz tylną hemisferę. Dany przypadek klasyfikowany jest na podstawie wartości kąta  $\theta_l$ , przy czym gdy  $\theta_l \leq \pi/2$  przypadek klasyfikowany jest jako ‘do przodu’ natomiast dla  $\theta_l > \pi/2$  mamy do czynienia z przypadkiem ‘do tyłu’. Korzystając z odpowiednich rozważań teoretycznych możemy wyrazić opisywaną asymetrię używając odpowiednich współczynników Wilsona:

$$\frac{dA_{FB}}{dq_{\mu\mu}^2} \propto \left(1 - \frac{q_{\mu\mu}^2}{m_b^2}\right)^2 \frac{q_{\mu\mu}^2}{m_b^2} \mathcal{C}_{10} \left( \mathcal{C}_9 + 2 \left(\frac{q_{\mu\mu}^2}{m_b^2}\right)^{-1} \mathcal{C}_7 \right)$$

gdzie:  $m_b$  jest masą kwarku b, natomiast  $\mathcal{C}_7$ ,  $\mathcal{C}_9$  oraz  $\mathcal{C}_{10}$  są współczynnikami Wilsona. Z powyższego wynika, że zmiana wartości współczynników Wilsona może zasadniczo wpłynąć na kształt asymetrii przód-tył mierzonej przy użyciu przypadków rozpadu  $B_d \rightarrow K^{*0}(892)\mu^+\mu^-$  [13].

Współpraca LHCb dokonała pomiaru asymetrii przód-tył  $A_{FB}$  w analizie opartej o dane zebrane w 2011 roku przy użyciu ‘standardowej’ metody histogramów [14]. Z uwagi na niewielką liczbę możliwych do uzyskania przypadków (około 900 dla całego zakresu zmiennej  $q_{\mu\mu}^2$ ) uzyskane rezulta-

<sup>6</sup> Dystans związany jest tu ze skalą energetyczną odpowiedniego oddziaływania w sensie zasady nieoznaczoności.

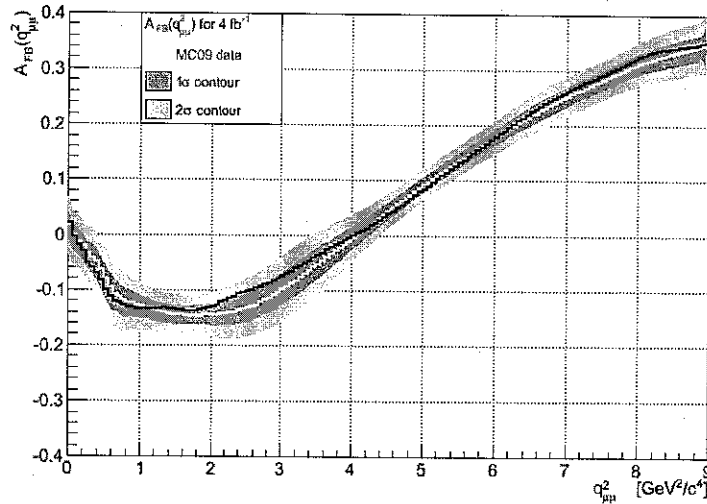
<sup>7</sup> Dotyczy to w szczególności tzw. hadronowych czynników postaci (ang. form factor).



ty obarczone są dość dużymi niepewnościami. W szczególności, dla punktu przecięcia asymetrii otrzymano  $q_0^2 = 4.9 \pm 0.9 \text{ GeV}^2/c^4$  (obliczenia teoretyczne oparte na Modelu Standardowym przewidują wartości punktu przecięcia od  $4.09_{-0.13}^{+0.16}$  do  $4.36_{-0.31}^{+0.33}$  [15]). Znaczna niepewność pomiarowa uniemożliwia jednoznaczne stwierdzenie różnic pomiędzy pomiarem a Modelem Standardowym.

Grupa eksperymentu LHCb w Glasgow, której byłem członkiem, zaproponowała użycie alternatywnej metody analizy danych opartej na technice „okien Parzena” [16], która może zostać użyta do rekonstrukcji asymetrii przód-tył, pozwalając na uzyskanie większej czułości w stosunku do metody histogramów. Zastosowanie tej metody do analizy danych eksperymentalnych jest nowatorskie dla fizyki wysokich energii i nie było wcześniej stosowane.

Głównym celem przeprowadzonych przeze mnie dalszych badań było pokazanie, że metoda ta może zostać zastosowana do analizy danych w eksperymencie LHCb. W tym celu zdefiniowany został algorytm do selekcji przypadków, który sprawdzono przy użyciu odpowiednich próbek Monte-Carlo. Następnie opracowano procedurę optymalizacji parametru wygładzania  $h$  [16] - krok ten jest krytycznym elementem całego procesu rekonstrukcji rozkładu asymetrii przód-tył. Uzyskane rezultaty przedstawione są na rysunku 3.



**Rys. 3.** Asymetria przód-tył zrekonstruowana dla próbki danych Monte-Carlo odpowiadającej scałkowanej świetlności  $4 \text{ fb}^{-1}$  (linia niebieska). Biała linia odpowiada asymetrii wyznaczonej przy pomocy bardzo wielkiej próbki i może być uważana za przybliżenie 'prawdziwego' rozkładu asymetrii. Zielone i żółte wstęgi reprezentują niepewności pomiarowe.

Główną zaletą zaprezentowanej metody rekonstrukcji asymetrii przód-tył w rozpadzie rzadkim  $B_d \rightarrow K^{*0}(892)\mu^+\mu^-$  jest to, że uzyskana asymetria jest funkcją ciągłą. Oznacza to możliwość bezpośredniego porównania tak zmierzonej wielkości z przewidywaniami teoretycznymi uzyskanymi w oparciu o różne modele opisujące Nową Fizykę. Należy podkreślić, że czułość na zmianę kształtu funkcji reprezentującej asymetrię, w przypadku zastosowania metody Parzena, może być potencjalnie znacznie lepsza niż ta uzyskana przy pomocy metody histogramów. Ponadto, wyznaczenie punktu przecięcia (czyli takiego w którym asymetria zanika), w przypadku rozkładu dyskretnego, wymaga stosowania interpolacji pomiędzy odpowiednimi przedziałami rozkładu asymetrii. Powoduje to zarówno zwiększenie niepewności pomiarowych dla tak wyznaczonego punktu zerowego asymetrii, jak również jego obciążenie. Dla pomiaru, który jest funkcją ciągłą, problemy te nie występują. Przeprowadzone badania pokazują więc, że jeżeli procesy Nowej Fizyki powodują modyfikację wartości odpowiednich współczynników Wilsona, to technika Parzena może być jednym z najlepszych narzędzi do odkrycia tego faktu.

## Podsumowanie

W monografii pt. „Performance of the LHCb Vertex Locator and the measurement of the forward-backward asymmetry in  $B_d \rightarrow K^{*0}(892)\mu^+\mu^-$  decay channel as a probe of New Physics” opisałem uzyskane wyniki trzech skorelowanych ze sobą projektów badawczych, które zrealizowałem jako członek współpracy LHCb.

Pierwszy z nich dotyczył zaprojektowania i wykonania platformy do emulacji działania części układu odczytu danych dla detektora VELO. W wyniku tych prac dostarczona została aplikacja VETRA, która stanowi podstawowy element oprogramowania detektora VELO, umożliwiającą odpowiednie jego działanie i zbieranie danych fizycznych o najwyższej jakości. Dzięki platformie VETRA możliwe jest między innymi wykonanie szybkiej kalibracji detektora oraz weryfikacja poprawności jego działania.

Kolejnym projektem było opracowanie algorytmu do precyzyjnej rekonstrukcji pozycji cząstek naładowanych zarejestrowanych przez detektor VELO oraz pomiar i badanie przestrzennej zdolności rozdzielczej tego detektora. W wyniku przeprowadzonej analizy powstało oprogramowanie, stanowiące część procedury rekonstrukcji śladów w detektorze LHCb. Dodatkowo, opracowano dokładną parametryzację niepewności pomiarowych dla wszystkich sensorów krzemowych detektora wierzchołka. W przypadku VELO problem ten jest szczególnie ważny, gdyż precyzja pomiaru jest skomplikowaną funkcją lokalnej szerokości paska jak również kąta projekcji śladu cząstki. Przypisanie odpowiedniej niepewności każdemu z pomiarów położenia cząstki jest krytyczną częścią od której zależy jakość dopasowania trajektorii cząstki.

Ostatnia część monografii opisuje badania możliwości wykorzystania nieparametrycznej i niebinowanej metody rekonstrukcji rozkładów gęstości prawdopodobieństwa (tzw. metoda Parzena). W szczególności opracowano algorytm do rekonstrukcji asymetrii ładunkowej przód-tył zmierzonej przy użyciu rzadkiego kanału rozpadu  $B_d \rightarrow K^{*0}(892)\mu^+\mu^-$ . Asymetria ta stanowi jedną z najbardziej czułych wielkości znanych w Modelu Standardowym (sektor kwarkowy), która może być wykorzystana do wykrycia sygnałów Nowej Fizyki. W trakcie przeprowadzonych prac wykazano, że najważniejszą częścią algorytmu rekonstrukcji jest optymalizacja tzw. parametru wygładzania. Zasadniczo istotną kwestią jest liczba przypadków dostępna do analizy. Studia z użyciem próbek Monte-Carlo wykazały, że metoda ta powinna rozstrzygnąć problem zgodności zmierzonej asymetrii z przewidywaniami Modelu Standardowego po zakończeniu drugiego okresu zbierania danych przez eksperyment LHCb (2015 - 2017).

## Literatura

- [1] LHCb Collaboration, **The LHCb Detector at the LHC**, *J. Instrum.* **3**: S08005, 2008
- [2] Lyndon Evans (ed.), Philip Bryant (ed.), **LHC Machine**, *J. Instrum.* **3**: S08001, 2008
- [3] A. D. Sakharov, **Violation of CP Invariance, C Asymmetry, and Baryon Asymmetry of the Universe**, *JETP* **5**, 1967
- [4] ATLAS Collaboration, **ATLAS detector and physics performance: Technical Design Report: Vol1 and Vol2**, CERN, Geneva, 1999
- [5] CMS Collaboration, **CMS Physics: Technical Design Report Volume 1: Detector Performance and Software**, Geneva, CERN, 2006
- [6] ATLAS Collaboration, **Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC**, *Phys. Lett. B* **716**:1-29, 2012
- [7] CMS Collaboration, **Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC**, *Phys. Lett. B* **716**:30, 2012

- [8] F. Legger, **TELL1: development of a common readout board for LHCb**, CERN, Geneva, LHCb-2004-100, 2004
- [9] R. Aaij et al., **The LHCb Trigger and its Performance**, arXiv:1211.3055 [hep-ex]
- [10] T. Szumlak, **VETRA: Offline analysis and monitoring software platform for the LHCb vertex locator**, J. Phys. Conf. Ser. 219 032058, 2010
- [11] S. Borghi, M. Gersabeck, C. Parkes, T. Szumlak, et al., **First spatial alignment of the LHCb VELO and analysis of beam absorber collision data**, Nucl. Instrum. Meth. A 618 108-120, 2010
- [12] A. J. Buras, **Weak Hamiltonian, CP Violation and Rare Decays**, hep-ph/9806471, 1998
- [13] A. Ali, Patricia Ball, et al., **Comparative study of the decays  $B_d \rightarrow K^{*0}(892)\mu^+\mu^-$  in the standard model and super-symmetric theories**, Phys. Rev. D 61:074024, 2000
- [14] LHCb Collaboration, **Differential branching fraction and angular analysis of the decay  $B_d \rightarrow K^{*0}(892)\mu^+\mu^-$** , J. High Energy Phys. 08 131, 2013
- [15] G. Buchalla et al., **B, D and K decays**, Eur. Phys. J. C57:309-492, 2008
- [16] E. Parzen, **On Estimation of a Probability Density Function and Mode**, Ann. Math. Stat. 33 (3), 1962

## 5. Przebieg pracy naukowej

### 5.1 Okres przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora

Moją działalność naukową rozpocząłem w roku 2000 podczas przygotowywania pracy magisterskiej dotyczącej oddziaływań dwufotonowych, prowadzących do produkcji końcowych stanów hadronowych, w eksperymencie DELPHI działającym przy akceleratorze LEP w ośrodku badawczym CERN. Praca ta dotyczyła analizy danych zebranych podczas drugiego etapu działania eksperymentu. Opis fenomenologiczny tego typu reakcji zakłada, że oddziałujące elektrony emitują fotony, których rozpraszanie prowadzi do produkcji hadronowych stanów końcowych. Stosowana przeze mnie technika tzw. pojedynczego oznaczania polegała na wybraniu przypadków, które zawierały w stanie końcowym jeden wysokoenergetyczny elektron oraz układ hadronowy. Z uwagi na to, że obserwacja wysokoenergetycznego elektronu stanowiła główną sygnaturę poszukiwanych przypadków, równolegle zajmowałem się również badaniem wydajności rejestracji takich elektronów (pozytonów) przez detektor STIC (The Small angle Tile Calorimeter), wyniki mojej analizy wykorzystywane zostały w pracach grupy fizyki dwufotonowej eksperymentu DELPHI.

Po ukończeniu pracy magisterskiej, w roku 2001, podjąłem studia doktoranckie. Moim głównym tematem było wykorzystanie nowatorskiej techniki pomiaru funkcji struktury elektronu, opracowanej przez fizyków z Uniwersytetu Jagiellońskiego (Wojciech Słomiński, Jerzy Szwed). Metoda ta stanowi alternatywne podejście do opisu produkcji wielocząstkowych hadronowych stanów końcowych w reakcjach foton-foton. Technika ta wzbudziła wielkie zainteresowanie w środowisku fizyki dwufotonowej. Umożliwiła przeprowadzenie pomiaru przekroju czynnego reakcji foton-foton jako funkcji zmiennej skalującej  $z$ , do wyznaczenia której używa się wielkości kinematycznych mierzonych bezpośrednio – energia i kąt polarny wysokoenergetycznego elektronu. Dzięki temu możliwe było uniknięcie użycia skomplikowanych metod statystycznych (unfolding) opierających się jedynie na modelach teoretycznych, które stosowane są w klasycznej analizie funkcji struktury fotonu.

Grupa krakowska z AGH, zajmująca się fizyką zderzeń foton-foton, przeprowadziła pomiar wspomnianej funkcji struktury elektronu dla LEPI oraz LEPII. Będąc odpowiedzialnym za analizę danych otrzymanych w LEPII (co stanowiło temat mojej rozprawy doktorskiej) opracowałem algorytm selekcji przypadków pojedynczo znaczonych oraz opracowałem algorytm do rekonstrukcji funkcji struktury elektronu. Przeprowadziłem również dokładną analizę wydajności detekcji przypadków rozpraszania foton-foton przy użyciu próbek Monte-Carlo. Z uwagi na to, że analiza prowadzona przez krakowską grupę była pierwszą tego rodzaju w eksperymencie DELPHI, programy do generacji przypadków musiały zostać odpowiednio zoptymalizowane, tak aby opisywały w jak najlepszy

sposób wyselekcjonowane dane rzeczywiste. Optymalizacja ta, wraz z analizą danych została przeprowadzona przeze mnie a uzyskane wyniki przedstawiłem podczas konferencji Photon 2003, która odbyła się we Frascati. Wstępne wyniki dotyczącej tej analizy zostały opublikowane w artykule konferencyjnym [D1] (numeracja ta została zaczerpnięta z dodatku nr 4, w którym zawarta jest lista moich publikacji). Rozprawę doktorską, związaną z pomiarem funkcji struktury elektronu, będącym pierwszym tego typu pomiarem, obroniłem z wyróżnieniem w roku 2004.

Poza tym brałem również udział, jako członek krakowskiej grupy współpracy DELPHI, w pracach nad analizą produkcji rezonansu hadronowego w zderzeniach foton-foton. Z ramienia krakowskiej grupy, wyniki dotyczące analiz w procesach dwufotonowych, przedstawiłem podczas konferencji ICHEP 2002 w Amsterdamie. Wyniki tych analiz zostały opublikowane jako publikacja konferencyjna oraz publikacja DELPHI [A3, B2].

## 5.2 Okres po uzyskaniu stopnia naukowego doktora

Po obronie doktoratu zostałem zatrudniony na stanowisku asystenta w Zakładzie Fizyki Cząstek Elementarnych i Detektorów Wydziału Fizyki i Techniki Jądrowej AGH. W tym samym czasie dołączyłem również do krakowskiej grupy eksperymentu LHCb. Grupa krakowska zajmowała się między innymi projektowaniem oprogramowania do trygera wysokiego poziomu (High Level Trigger).

W roku 2005 zgłosiłem się do konkursu na stanowisko Research Assistant oferowanego przez Uniwersytet w Glasgow, związanego z pracami dla eksperymentu LHCb. Temat mojej pracy dotyczył projektu i implementacji oprogramowania do symulacji odpowiedzi sensorów krzemowych detektora wierzchołka eksperymentu LHCb VELO. Z uwagi na skomplikowany charakter tego zadania podzieliłem je na kilka etapów. W pierwszym, opracowałem ogólną architekturę aplikacji, która musiała być zgodna z oficjalnym oprogramowaniem eksperymentu LHCb (Gaudi framework). Jednym z krytycznych aspektów tej części projektu było stworzenie odpowiedniego modelu danych, który z jednej strony powinien jak najlepiej odpowiadać obserwowanym w eksperymencie wielkościom, a z drugiej zapewniać komunikację pomiędzy infrastrukturą platformy Gaudi a projektowanym oprogramowaniem. Wyniki dotyczące wstępnego projektu symulacji detektora VELO opisałem w publikacji technicznej [D2] oraz przedstawiłem na spotkaniach roboczych. Po zaakceptowaniu przedstawionych przeze mnie rezultatów przystąpiłem do implementowania części fizycznej symulacji. W szczególności dodałem symulację efektu nakładających się sygnałów rejestrowanych w tych samych kanałach pomiarowych, które pochodzą z różnych przypadków (tzw. spill-over) oraz procedury emulacji działania układu odczytu front-end. Wyniki tych prac zostały opublikowane w pracy [C6].

W tym samym czasie kontynuowałem również analizę danych zebranych przez eksperyment DELPHI oraz opracowałem ulepszony algorytm do rekonstrukcji funkcji struktury elektronu. Zostałem również zaproszony na konferencję HEP 2005 w Lizbonie w celu wygłoszenia referatu plenarnego dotyczącego całokształtu badań oddziaływań foton-foton oraz pomiarów funkcji struktury fotonu i elektronu prowadzonych przez eksperymenty fizyczne działające przy akceleratorze LEP (DELPHI, OPAL i ALEPH).

Po zakończeniu pracy nad symulacją, w roku 2006, zostałem koordynatorem projektu związanego z rekonstrukcją pozycji cząstek naładowanych w detektorze VELO. Jednym z najważniejszych rezultatów mojej pracy było opracowanie narzędzi programowych do tworzenia struktur danych zawierającej wszystkie informacje konieczne do późniejszej rekonstrukcji śladu i dopasowania trajektorii cząstki. Pozostałe wyniki tego projektu opisałem w rozdziale trzecim monografii oraz publikacjach technicznych eksperymentu [D3, D4].

W roku 2007 Uniwersytet w Glasgow zaproponował mi przedłużenie kontraktu na następne dwa lata oraz zmianę stanowiska na Research Associate. W tym samym czasie zaproponowałem

stworzenie oprogramowania do pełnej emulacji działania układu akwizycji danych (DAQ) dla detektora VELO. Po akceptacji mojego projektu przez współpracę LHCb zostałem koordynatorem oraz jednym z głównych wykonawców tego projektu. Szczegóły dotyczące uzyskanych wyników opisane są w przedstawionej przez mnie monografii (rozdział drugi), dodatkowo wyniki tych prac przedstawiono w dodatkach konferencyjnych oraz publikacjach [C9, C10, C26, D5, D6, D8].

W latach 2007-2009 grupa VELO rozpoczęła prace związane z montażem i testami końcowymi detektora VELO. Największym wyzwaniem tego okresu było potwierdzenie możliwości zbierania i analizy danych przez ten detektor. W tym celu opracowano serię eksperymentów (test beam) mających na celu sprawdzenie jakości zasilania wysokiego i niskiego napięcia, systemu uziemienia, pozycjonowania (space alignment), synchronizacji (time alignment) oraz oceny działania systemu DAQ. Po raz pierwszy przeprowadzono również rekonstrukcję trajektorii cząstek oraz wierzchołków. Badania te prowadzone były w ośrodku CERN z użyciem wiązki protonowej oraz elementów składowych samego detektora wierzchołka. Podczas wszystkich tych badań pełniłem rolę jednego z wiodących ekspertów i byłem odpowiedzialny za przygotowanie oprogramowania do emulacji oraz kontroli jakości danych jak również zajmowałem się pozycjonowaniem sensorów VELO. Wynik testów okazały się kluczowe w poznaniu zachowania się systemu jako całości szczegóły wszystkich analiz oraz ich wyniki zostały opisane w odpowiednich raportach technicznych kolaboracji oraz zostały przedstawione na konferencjach [C13, D7].

Doświadczenia zdobyte podczas testów detektora VELO zostały również wykorzystane badaniu możliwości zastosowania zupełnie nowych sensorów „3D” w budowie układów detekcyjnych eksperymentów fizyki wysokich energii. W szczególności aplikacja VETRA została wykorzystana do obróbki oraz kalibracji danych. Wyniki analiz zostały następnie przedstawione na konferencjach oraz opublikowane [C10, D12].

W roku 2010 zostałem skierowany do pracy w CERN aby pełnić rolę jednego z głównych ekspertów odpowiedzialnych za uruchomienie oraz kontrolę detektora wierzchołka LHCb.

W tym samym roku przyjąłem propozycję pracy na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH w grupie LHCb, gdzie zająłem się koordynacją współpracy z innymi ośrodkami zagranicznymi oraz kontynuacją pracy nad projektami dotyczącymi obsługi detektora VELO oraz rekonstrukcją śladów. Grupa krakowska eksperymentu LHCb została również włączona oficjalnie do projektu VELO. Od roku 2012 pełnię rolę kierownika krakowskiej części projektu VELO.

Chcąc wzmocnić pozycję grupy krakowskiej w eksperymencie LHCb rozpocząłem również starania o uczestnictwo w projekcie modernizacji detektora, który jest kluczowy z uwagi na powiększenie potencjału fizycznego eksperymentu. Po przedstawieniu wstępnych propozycji na forum współpracy LHCb kierownictwo eksperymentu wyznaczyło grupę krakowską jako głównego wykonawcę prestiżowego projektu dostarczenia elektronicznego układu odczytu front-end [D11]. W ramach tego projektu odpowiedzialny jestem za przygotowanie algorytmów do obróbki danych surowych i wstępnej rekonstrukcji pozycji zarejestrowanych cząstek. Poza tym biorę udział w pracach związanych z modernizacją detektora VELO. Jego nowa ulepszona wersja – VELOpix – będzie zawierać detektory pikselowe i będzie wymagać opracowania nowych algorytmów do porządkowania oraz przetwarzania danych. Grupa krakowska odpowiedzialna jest za opracowanie oprogramowania dla elektronicznego układu akwizycji danych Tell40, przygotowanie symulacji odpowiedzi detektora oraz wkład w opracowanie procedury do pozycjonowania sensorów (alignment). Grupa krakowska zaproponowała użycie procesorów graficznych GPU do szybkiego wyznaczenia stałych pozycjonowania w czasie rzeczywistym. Propozycja ta jest w chwili obecnej rozpatrywana przez współpracę LHCb.

Z mojej inicjatywy grupa krakowska włączyła się również w prace dotyczące analizy zniszczeń radiacyjnych wykorzystując możliwości jakie oferuje detektor VELO. Grupa krakowska dołą-

czyła do współpracy RD50 w roku 2012, aby umożliwić jej członkom współpracę z ekspertami pracującymi w tym projekcie.

## 6. Szczegółowa lista osiągnięć naukowo-badawczych i dydaktycznych

### 6.a Publikacje

Szczegółowa lista publikacji znajduje się w załączniku nr 4.

Całkowita liczba publikacji: 264

W bazie Journal Citation Reports (JCR): 250 (przed doktoratem 21)

Monografia „*Performance of the LHCb Vertex Locator and the measurement of the forward-backward asymmetry in  $B_d \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$  decay channel as a probe of New Physics*”, Wydawnictwo JAK, Kraków 2013, ISBN 978-83-934620-9-4

Liczba cytowań: 4126

Liczba cytowań bez autocytowań: 3651

Indeks Hirscha:  $h = 25$

Sumaryczny Impact Factor: 576,94 (oraz dla publikacji zamieszczonych w dodatku 4 **94,015**)

Podane informacje pochodzą z bazy ISI Web of Science z dnia 30/11/2013.

### 6.b Staże i wyjazdy zagraniczne

CERN Genewa	2002r., eksperyment DELPHI, 6 tygodni
Uniwersytet w Glasgow	2005-2009r., eksperyment LHCb, 5 lat
CERN Genewa	2008r., ACDC1/2 testy na wiązkę, eksperyment LHCb, 2 miesiące
CERN Genewa	2009r., ACDC3 testy na wiązkę, eksperyment LHCb, 2 miesiące
CERN Genewa	2010r., praca przy eksperymencie LHCb, 11 miesięcy

### 6.c Udział w projektach badawczych

#### Projekty polskie

1) Temat badawczy: „Badanie oddziaływań elektron-pozyton na akceleratorze LEP”

Główny wykonawca.

Projekty wchodzące w skład tego tematu badawczego:

- Specjalny projekt badawczy: „Eksperyment DELPHI - badanie oddziaływań  $e^+e^-$  na akceleratorze LEP przy użyciu detektora DELPHI”, nr 621/E-78/SPUB/P-03/023/97, SPUB/CERN/P-03/DZ 11/99, SPUB/CERN/P-03/DZ 296/2000-2002

- Granty KBN: 2 P03 B 111 16, 2 P03 B 104 19

2) Temat badawczy: „Eksperyment LHCb na zderzacz protonowym LHC w CERN, dedykowany badaniom łamania symetrii kombinowanej CP”

Główny wykonawca.

Projekty wchodzące w skład tego tematu badawczego:

- Projekt badawczy: nr 1P03B 053 28

- Projekt badawczy: nr 112/E-356/SPB/CERN/P-03/109/2003-2005

- Specjalny projekt badawczy: nr 112/E-356/SPUBM/CERN/P-03/DZ 296/2000-2002

### Projekty zagraniczne

1) LHCb e-science workpage 2: VELO software, PP/C000277/1, University of Glasgow, application for £0.17M from UK Particle Physics & Astronomy Research Council (PPARC), 2004

2) Experimental Particle Physics Rolling Grant PP/E000290/1 from UK Science and Technology Facilities Council (STFC), University of Glasgow, application for £7.9M, 2006

3) Experimental Particle Physics Rolling Grant ST/H001077/1 from UK Science and Technology Facilities Council (STFC), University of Glasgow, application for £7.0M, 2009

### 6.d Konferencje i spotkania naukowe

#### Organizacja konferencji i spotkań

- *Workshop on Common ASIC for the LHCb Upgrade*, Kraków 04 - 06/07/2012  
Główny organizator
- *Open Symposium on European Strategy for Particle Physics*, Kraków 10 - 12/09/2012  
Członek Komitetu Organizacyjnego
- *69th LHCb Collaboration Week*, Kraków 09 - 13/09/2013  
Kierownik Konferencji

#### Ważniejsze wystąpienia na konferencjach międzynarodowych

- *International Conference on High Energy Physics CHEP 2002*  
Amsterdam 24 - 31/06/2002 Holandia  
"The  $\eta_c(2980)$  formation in two-photon collisions at LEP energies"
- *International Conference on the Structure and Interactions of the Photon PHOTON 2003*  
Frascati 07 - 11/2003 Włochy  
"The Measurement of Hadronic Structure Function of the Electron  $F_2^e(z)$ "
- *International Europhysics Conference on High Energy Physics HEP 2005*  
Lizbona 21 - 27/07/2005 Portugalia  
"Photon Structure at LEP"
- *42nd LHCb Collaboration Week*  
Heidelberg 11 - 15/09/2006 Niemcy  
"VETRA Project in Testbeam"
- *17th International Workshop on Vertex Detectors VERTEX 2008*  
Uto Stockholm 27 - 01/08/2008 Szwecja

- “Vertex, Track Reconstruction and Luminosity Monitoring at LHCb”
- **Computing in High Energy and Nuclear Physics CHEP 2009**  
Praga 21 - 27/03/2009 Czechy  
“VETRA - offline analysis and monitoring software platform for the LHCb VELO”
- **Krakow Epiphany Conference 2010**  
Kraków 05 - 08/01/2010  
“The LHCb Upgrade”
- **8th International Conference on Radiation Effects on Semiconductor Materials Detectors and Devices RESMDD 2010**  
Florencja 12 - 15/10/2010 Włochy  
“First results from the LHCb Vertex locator”
- **Workshop on Intelligent Tracker WIT 2012**  
“FPGA and ASIC based algorithms for the present and upgraded LHCb silicon vertex detector”  
Pisa 03 – 05/05/2012 Włochy
- **20th RD50 Workshop on Radiation hard semiconductor devices for very high luminosity colliders 2012**  
Bari 30/05 – 01/06/2012 Włochy  
“Request from Krakow group to join RD50 Collaboration”
- **9th International Conference on Heavy Quarks and Leptons 2012**  
Praga 11 - 15/06/2012 Czechy  
„The LHCb Upgrade”
- **8th "Trento" Workshop on Advanced Silicon Radiation Detectors (3D and p-type) 2013**  
“Performance and radiation hardness of the LHCb Velo”  
Trento 18 – 20/02/2013 Włochy

W ramach działalności w kolaboracji DELPHI oraz LHCb wygłosiłem również około **150** referatów na spotkaniach roboczych oraz warsztatach.

#### 6.e Członkostwo w organizacjach międzynarodowych

- Członek panelu koordynującego eksperymentu LHCb - **LHCb Collaboration Board**
- Kierownik krakowskiej grupy współpracy RD50 oraz członek panelu koordynującego współpracy RD50 – **RD50 Collaboration Board**
- Członek panelu odpowiedzialnego za przygotowanie modernizacji eksperymentu LHCb – **LHCb Upgrade Resource Board (Koordynator z ramienia Polski)**
- Kierownik krakowskiej grupy VELO i członek panelu koordynującego **projekt VELO**

#### 6.f Ekspertyzy

Od roku 2011 rozpocząłem współpracę z grupą zajmującą się dostarczaniem infrastruktury obliczeniowej dla polskich grup fizyki wysokiej energii w ramach projektu PL-GRID+. Na zlecenie tej grupy wykonałem dwie ekspertyzy:

- 1) „Sprawdzenie możliwości technicznych wykorzystania maszyn opartych o technologie CUDA do wykonywania aplikacji analizy danych w fizyce wysokich energii”



- 2) „Opracowanie wniosków i rekomendacji umożliwiających pełne wykorzystanie PL-Grid Plus przez środowisko fizyki cząstek - przetwarzanie współbieżne i masowo-równoległe”

#### 6.g Stanowiska honorowe

- “Honorary Fellowship Position with Glasgow University”
- “Honorary Fellowship Position with Manchester University”

#### 6.h Wykłady zagraniczne

W ramach moich obowiązków jako “Honorary Fellowship” w roku 2013 zostałem zaproszony do wygłoszenia dwóch wykładów związanych ze statystyczną analizą danych pochodzących z eksperymentów rozproszeniowych fizyki wysokich energii oraz możliwości zastosowania procesorów graficznych GPU przy rekonstrukcji śladów oraz analizie fizycznej.

#### 6.i Działalność dydaktyczna

Działalność dydaktyczną rozpocząłem podczas odbywania studiów doktoranckich, podczas których prowadziłem zajęcia rachunkowe z fizyki oraz laboratoria komputerowe związane z przedmiotami z zakresu fizyki cząstek elementarnych. W 2004 roku objąłem, na prośbę zarządu Międzynarodowego Koła Naukowego studentów BEST, kierownictwo nad pierwszą edycją konkursu dotyczącego wykonania projektu naukowego.

Po wyjeździe na staż naukowy do Glasgow kontynuowałem pracę dydaktyczną prowadząc początkowo ćwiczenia rachunkowe z podstaw fizyki współczesnej. W roku 2007 zostałem koordynatorem laboratorium zaawansowanych technik programowania, którego głównym celem było kształcenie studentów podejmujących specjalizację "Fizyka Teoretyczna i Obliczenia na Sieciach". Pracami tego laboratorium kierowałem do momentu mojego wyjazdu do CERN. W ramach moich obowiązków mieściła się również opieka nad studentami wykonującymi prace magisterskie oraz doktorskie. W sumie prowadziłem 4 prace magisterskie (MSc) oraz byłem opiekunem pomocniczym dwóch rozpraw doktorskich.

Podczas pobytu w CERN (2010) zajmowałem się koordynacją projektów „Summer Student” oraz uczestniczyłem w brytyjskim programie szkoleniowym „Ask the Expert”, przeznaczonym dla studentów rozpoczynających karierę naukową na polu fizyki wysokich energii.

Po powrocie do Krakowa w ramach wykonywania obowiązków adiunkta odbywam rocznie 230 godzin dydaktycznych. Przygotowałem 5 wykładów monograficznych, z których dwa znalazły się w podstawowym planie studiów:

- *Podstawy statystyki dla inżynierów*
- *Oddziaływanie promieniowania z materią*

Pozostałe trzy wchodzą w skład tak zwanych wykładów obieralnych:

- *Python in Enterprise (advanced techniques)* – język angielski
- *Multicore programming (for C++ developers)* – język angielski
- *Metody doświadczalne fizyki wysokich energii*

Od roku 2011 prowadzę również intensywną pracę ze studentami wykonującymi projekty inżynierskie i magisterskie. Poniżej wymienione są projekty wykonane lub wykonywane pod moim kierunkiem

- „Badanie przestrzennej zdolności rozdzielczej krzemowego detektora wierzchołka VELO eksperymentu LHCb” (zrealizowany, praca inżynierska)
- „Badanie zniekształceń sygnałów w torze pomiarowym detektora wierzchołka w eksperymencie LHCb” (zrealizowany, praca inżynierska)
- „Kalibracja algorytmów do rekonstrukcji śladów dla detektora VELO w eksperymencie LHCb” (zrealizowany, praca inżynierska)
- „Rekonstrukcja śladów przy użyciu GPU w trygerze wysokiego poziomu dla ulepszonego eksperymentu LHCb” (zrealizowany, praca inżynierska)
- „Symulacja rekonstrukcji śladów dla detektora wierzchołka w eksperymencie LHCb” (w trakcie realizacji, praca magisterska)
- „Obróbka danych z detektora wierzchołka w eksperymencie LHCb przy użyciu GPU” (w trakcie realizacji, praca magisterska)
- „Statystyczna analiza jakości dopasowania śladów cząstek naładowanych w eksperymencie LHCb” (w trakcie realizacji, praca magisterska)
- „Automatyczny system do oceny jakości danych dla detektora VELO w eksperymencie LHCb” (w trakcie realizacji, praca magisterska)

Obecnie pełnię również rolę opiekuna pomocniczego rozprawy doktorskiej realizowanej w grupie krakowskiej eksperymentu LHCb dotyczącej przygotowania oprogramowania symulacyjnego dla zmodernizowanego detektora śladowego UT oraz analizy kanałów rozpadu  $B_s \rightarrow D_s X_h$ .

## 7. Podziękowania

Chciałbym podziękować wszystkim Koleżankom i Kolegom pracującym razem ze mną przy eksperymentach DELPHI i LHCb za okazaną mi nieocenioną pomoc. Bez ich poświęcenia i ciężkiej pracy sukces obu eksperymentów nie byłby możliwy. W szczególności chciałbym serdecznie podziękować moim dwóm mentorom prof. dr hab. Bogdanowi Murynowi oraz prof. Chris Parkes. Pierwszemu z nich dziękuję za pomoc we wprowadzeniu mnie w zagadnienia fizyki wysokich energii oraz za rady dotyczące niniejszej monografii. Drugi z nich pokazał mi jak przygotować nowoczesny projekt detektorowy oraz kierować biorącym w nim udział zespołem ludzi.

Chciałbym również wyrazić specjalne podziękowania dla kierownictwa Katedry Oddziaływań i Detekcji Cząstek, prof. dr hab. Danucie Kisielewskiej i prof. dr hab. Władysławowi Dąbrowskiemu, za pomoc w realizacji mojego programu naukowego. Specjalne podziękowania chciałbym również skierować do Panów Dziekanów Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH, prof. dr hab. Janusza Wolnego oraz prof. AGH dr hab. inż. Bartłomieja Szafrana, za duże wsparcie jakie okazali krakowskiej grupie LHCb oraz pomoc w realizacji mojej pracy habilitacyjnej.

Serdeczne podziękowania należą się również całemu eksperymentowi LHCb za stworzenie wspaniałej atmosfery do prowadzenia badań oraz osobom odpowiedzialnym za obsługę zderzacza LHC, bez którego nie było by możliwe uzyskanie przedstawionych przeze mnie wyników.

