

Załącznik nr 2 do "Wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego"
(plik: Brona_autoreferatPL.pdf)

dr Grzegorz Brona
Uniwersytet Warszawski,
Wydział Fizyki
ul. Pasteura 5, 02-093
Warszawa
e-mail: Grzegorz.Brona@fuw.edu.pl
tel: 601-95-03-17

Warszawa, 14 września 2017

Autoreferat

Dane osobowe

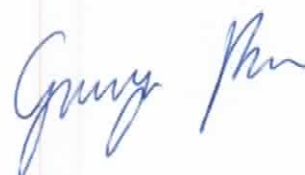
Imię i nazwisko: Grzegorz Brona
Data urodzenia: 26 marzec 1980

Dyplomy i stopnie naukowe

Doktor nauk fizycznych w zakresie fizyki uzyskany na Uniwersytecie Warszawskim
Tytuł rozprawy doktorskiej: „Hadron production and polarisation of gluons in the nucleon in the μN interactions in the Compass experiment at CERN”
Promotor: prof. dr hab. Barbara Badełek
Recenzenci: prof. dr hab. Jacek Turnau, prof. dr hab. Janusz Zakrzewski
Rok uzyskania: 2007

Magister na kierunku fizyka (w systemie Międzywydziałowych Indywidualnych Studiów Matematyczno-Przyrodniczych), Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski
Tytuł pracy magisterskiej: „Search for pentaquark states in the COMPASS experiment”
Opiekun: prof. dr hab. Barbara Badełek
Rok uzyskania: 2004

Dyplom Master of Business Administration w technologiach informatycznych, Wyższa Szkoła Handlu i Finansów Międzynarodowych im. Fryderyka Skarbka
Tytuł pracy: „Filozofia GRID. Od koncepcji do implementacji – przegląd najważniejszych problemów”
Rok uzyskania: 2008



Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

02.2008 - obecnie: Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, adiunkt

03.2009-03.2011: European Organization for Nuclear Research CERN, Szwajcaria, senior fellow

Edukacja

2004-2007: studia doktoranckie na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, rozprawa doktorska z wyróżnieniem

2006-2007: studia Master of Business Administration w Wyższej Szkole Handlu i Finansów Międzynarodowych im. Fryderyka Skarbka

1999-2004: studia magisterskie na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego ukończone z wyróżnieniem

1995-1999: XIV Liceum Ogólnokształcące im. St. Staszica w Warszawie

Nagrody

2016: Srebrny Medal 200-lecia Uniwersytetu Warszawskiego.

2012: Nagroda Indywidualna II stopnia Rektora Uniwersytetu Warszawskiego za badania dotyczące chromodynamiki kwantowej realizowane w zderzeniach proton-proton w LHC w CERN.

2012: Nagroda Naukowa tygodnika Polityka.

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

2004: Nagroda za najlepszą pracę magisterską im. Lecha Michejdy.


Uczestnictwo i organizacja konferencji międzynarodowych i krajowych

1. 46th International Symposium on Multiparticle Dynamics, 2016, Korea Południowa, "Recent results on forward physics and jets at LHC", konferencja międzynarodowa, prezentacja w imieniu zespołu CMS i ATLAS.

2. Low-x Meeting, 2016, Węgry, "Soft QCD measurements and diffraction in CMS", konferencja międzynarodowa, prezentacja w imieniu zespołu CMS.



3. II Sympozjum Sekcji Fizyki Oddziaływań Fundamentalnych PTF "Collider Physics", 2016, "From exclusive production, through diffraction, to jets correlations - forward physics results from CMS", konferencja krajowa.
4. Various faces of QCD 2 3rd Symposium of the Division for Physics of Fundamental Interactions of the Polish Physical Society, 2016, **organizator sympozjum**.
5. Workshop on Forward Physics and High-Energy Scattering at Zero Degree, 2015, Japonia "Diffraction at CMS", konferencja międzynarodowa, prezentacja w imieniu zespołu CMS.
6. 16th conference on Elastic and Diffractive Scattering, 2015, Francja, "Review of CMS and TOTEM results on Multi Parton Interactions, soft QCD and diffraction", konferencja międzynarodowa, prezentacja w imieniu zespołu CMS i TOTEM.
7. XXIII International Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects, 2015, USA, "Diffractive processes in pp collisions at 7 TeV measured with the CMS experiment", konferencja międzynarodowa, prezentacja w imieniu zespołu CMS.
8. LHC Working Group meeting on forward/diffractive physics, 2014, USA, "Recent CMS results on forward physics", warsztaty międzynarodowa, prezentacja w imieniu zespołu CMS.
9. XXII. International Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects, 28.04-2.05 2014, Warszawa, jeden z dwóch **przewodniczących** Lokalnego Komitetu Organizacyjnego.
10. Low-X Meeting, 2014, Japonia, "Multijet correlations at large rapidity intervals at CMS", konferencja międzynarodowa, prezentacja w imieniu zespołu CMS.
11. Workshop on Jet Vetoes and Jet Multiplicity Observables at the LHC, 2014, Anglia, "Latest results on multi-jets production, and beyond-DGLAP (BFKL, saturation) studies with jets", warsztaty międzynarodowe, **prezentacja w imieniu zespołu CMS**.
12. Forward Physics at the LHC, 2013, Włochy, "Forward jets, forward-central dijets and dijets with large rapidity separation", konferencja międzynarodowa, prezentacja w imieniu zespołu CMS.
13. International Conference on New Frontiers in Physics, 2013, Kreta, "Forward physics at the CMS", konferencja międzynarodowa, prezentacja w imieniu zespołu CMS.
14. LISHEP, 2013, Brazylia, "Forward Jets", konferencja międzynarodowa, prezentacja w imieniu zespołu CMS.
15. Low-X Meeting, 2012, Cypr, "Recent CMS results on small-x QCD", konferencja międzynarodowa, prezentacja w imieniu zespołu CMS.
16. International Symposium on Multiparton Dynamics ISMD, 2012, Polska, "Forward jets, dijet correlations at large rapidity separation and V+jets production at the LHC", konferencja międzynarodowa, prezentacja w imieniu zespołu CMS.



17. Low-X Meeting, 2010, Grecja, "Physics of forward jets at CMS", konferencja międzynarodowa, prezentacja w imieniu zespołu CMS.
18. 2nd International Workshop on Multiple Partonic Interactions at the LHC, 2010, Wielka Brytania, "CMS results on diffraction", warsztaty międzynarodowe, prezentacja w imieniu zespołu CMS.
19. The 2009 Europhysics Conference on High Energy Physics, 2009, Polska, "Mini review – hard diffraction and central exclusive production at LHC", konferencja międzynarodowa, prezentacja w imieniu zespołu CMS i ATLAS.
20. Moriond QCD and Hadronic Interactions, 2007, Włochy, "Measurement of the gluon polarization at COMPASS", konferencja międzynarodowa, prezentacja w imieniu zespołu COMPASS.
21. Spin-Praha, Symmetries and Spin, 2006, Czechy, " $\Delta G/G$ measurement at COMPASS", konferencja międzynarodowa, prezentacja w imieniu zespołu COMPASS.
22. Cracow Epiphany –Conference on Hadron Spectroscopy, 2005, Polska, "Search for Ξ^- pentaquark at COMPASS", konferencja międzynarodowa, prezentacja w imieniu zespołu COMPASS.
23. Cascade Physics – A New Window on Baryon Spectroscopy, 2005, USA, "Cascades in COMPASS", konferencja międzynarodowa, prezentacja w imieniu zespołu COMPASS.

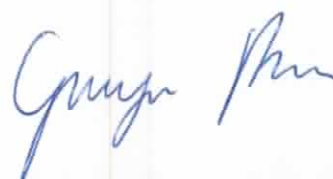
Kierownictwo w grantach naukowych

1. Projekt przyznany przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej, program: HOMMING+, okres: 2012-2014, tytuł: "Forward Physics - a New Window on the Quantum ChromoDynamics".
2. Projekt przyznany przez Narodowe Centrum Nauki, program: Sonata-bis, okres: 2013-2016, tytuł: "Fizyka wysokich prędkości - nowy sposób badania chromodynamiki kwantowej z wykorzystaniem danych z eksperymentu CMS".

Przebieg pracy naukowej

Okres studiów magisterskich

Na trzecim roku studiów magisterskich na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w 2002 roku zaangażowałem się w pracę warszawskiej grupy fizyków pracujących przy eksperymencie COMPASS (NA58) zlokalizowanym przy akceleratorze Super Proton Synchrotron (SPS) w ośrodku CERN. Eksperyment rozpoczął zbieranie danych fizycznych w 2002 roku, a moim pierwszym zadaniem stało się badanie stabilności rejestrowanych przez detektor danych przy wykorzystaniu zrekonstruowanych mezonów K_s^0 w kanale rozpadu na $\pi^+\pi^-$. Równolegle w ramach pobytu latem 2002 roku w CERN współpracowałem z włoską grupą eksperymentu



COMPASS przy obsłudze podsystemu detektora RICH (Ring Imaging Cherenkov detector). Dzięki temu miałem okazję poznać eksperyment COMPASS zarówno od strony analizy danych jak i konstrukcji układów detekcyjnych. W 2003 roku kontynuowałem swoją współpracę w ramach eksperymentu COMPASS. Latem tego roku przebywałem na studiach letnich (program Summer Studies) w ośrodku CERN. W tym czasie pojawiły się pierwsze doniesienia o eksperymentalnych obserwacjach stanu pięciokwarkowego (pentakwarku) zawierającego jeden kwark dziwny [1-3]. Cząstka ta (Θ^+) obserwowana była przy masie około 1540 MeV w kanale rozpadu pK^0 . Dysponując algorytmami rekonstrukcji kaonów neutralnych oraz wiedzą na temat identyfikacji protonów przy pomocy detektora RICH podjąłem się próby potwierdzenia istnienia stanu Θ^+ używając do tego danych eksperymentu COMPASS z lat 2002-2003 (później również z 2004). W 2004 analiza została rozszerzona o poszukiwanie stanów pięciokwarkowych zawierających dwa kwarki dziwne ($\Xi_{3/2}$). Stało się to po publikacji eksperymentu NA49 [4] na temat obserwacji takich stanów przy masie około 1862 MeV. Cząstki te powinny być widoczne w następujących kanałach rozpadu:

$$\begin{aligned} \Xi_{3/2}^{--} &\rightarrow \Xi^- \pi^- \rightarrow \Lambda^0 \pi^- \pi^- \rightarrow p \pi^- \pi^- \pi^- \\ \Xi_{3/2}^0 &\rightarrow \Xi^- \pi^+ \rightarrow \Lambda^0 \pi^- \pi^+ \rightarrow p \pi^- \pi^- \pi^+ \\ \Xi_{3/2}^{--} &\rightarrow \Xi^- \pi^+ \rightarrow \overline{\Lambda^0} \pi^+ \pi^+ \rightarrow \overline{p} \pi^+ \pi^+ \pi^+ \\ \Xi_{3/2}^0 &\rightarrow \Xi^- \pi^- \rightarrow \overline{\Lambda^0} \pi^+ \pi^- \rightarrow \overline{p} \pi^+ \pi^+ \pi^- \end{aligned}$$

Ta część prowadzonej przeze mnie analizy wymagała opracowania optymalnych sposobów rekonstrukcji w eksperymencie COMPASS barionów Λ^0 oraz barionów kaskadowych Ξ^- . Zrekonstruowałem również stan $\Xi^0(1530)$, który rozpada się w kanale identycznym do kanału rozpadu $\Xi_{3/2}^0$. W oparciu o przeprowadzone symulacje Monte Carlo (PYTHIA 6.2) obliczyłem wydajność rekonstrukcji barionu $\Xi^0(1530)$ w eksperymencie COMPASS, co umożliwiło mi oszacowanie przekroju czynnego na produkcję tego stanu hadronowego.

Poszukiwania stanów pięciokwarkowych (Θ^+ i $\Xi_{3/2}$) zakończone zostały wynikiem negatywnym. Nie zaobserwowałem istotnych statystycznie odchyień od przewidywanego rozkładu tła. Bazując na oszacowaniach wydajności rekonstrukcyjnej detektora COMPASS dla stanu $\Xi^0(1530)$, obliczyłem górne ograniczenie przekroju czynnego na produkcję pięciokwarków $\Xi_{3/2}$. Wynosi ono 0.12-0.21 nb i zależy od założonej szerokości hipotetycznego sygnału. Negatywne wyniki poszukiwania pięciokwarków w ramach COMPASS-a zbieżne są z wynikami szeregu innych eksperymentów opublikowanymi w latach 2004-2010. Rezultaty te poddały w wątpliwość obserwacje stanów Θ^+ i $\Xi_{3/2}$ (przegląd np. w [5]). Otrzymane przeze mnie wyniki stały się podstawą przygotowywanej pracy magisterskiej zatytułowanej: „Search for pentaquark states in the COMPASS experiment” [6]. Zostały również zaprezentowane przeze mnie na dwóch konferencjach międzynarodowych (nr 22 i 23 w spisie konferencji) oraz posłużyły do przygotowania dwóch artykułów [7-8].

W ramach prac badawczych związanych z poszukiwaniami pięciokwarków, prowadziłem szeroką analizę wydajności detektora COMPASS. W jej trakcie zrekonstruowałem szereg innych stanów masowych: $\rho(770)$, $f_0(980)$, $f_2(1270)$, $K^*(892)$, $K_2^*(1430)$, $\phi(1020)$. Rekonstrukcja części z tych stanów masowych w

eksperymentem COMPASS była po raz pierwszy dokonana właśnie w ramach prowadzonej przeze mnie pracy.

Okres studiów doktoranckich

Studia doktoranckie rozpocząłem w 2004 roku. W ich trakcie pozostawałem związany z warszawską grupą eksperymentu COMPASS. Moja aktywność w ramach eksperymentu COMPASS związana była z trzema obszarami:

1) Bazując na doświadczeniu zebranych w okresie studiów magisterskich, kontynuowałem analizę produkcji stanów hadronowych w eksperymencie COMPASS w oddziaływaniach mionów z hadronami. W szczególności (oprócz dodatkowych badań nad kanałami rozpadu pięciokwarków) prowadziłem studia nad stanem masowym $f_0(1710)$, który był obserwowany (z niewielką statystyką przypadków) przez inny eksperyment w kanale rozpadu na $K_S^0 K_S^0$. Stan ten jest podejrzany o bycie stanem glueball. Niestety analiza spektrum masowego nie wykazała pojawienia się sygnału stanu $f_0(1710)$ w danych COMPASS-a. Zaobserwowałem za to lżejszy stan masowy $f_2'(1525)$.

2) Warszawska grupa eksperymentu COMPASS odpowiedzialna była za budowę i wdrożenie do operacji nowej płaszczyzny detekcyjnej eksperymentu. Detektor ten bazował na technologii włókien scyntylacyjnych i jego głównym celem było polepszenie rekonstrukcji śladów cząstek naładowanych (w tym rozproszonego w wyniku oddziaływania mionu) w obszarze bliskim osi wiązki. Aby optymalnie wybrać położenie nowej płaszczyzny detekcyjnej w ramach systemu eksperymentu COMPASS potrzebne było wykonanie szeregu studiów na poziomie symulacji Monte Carlo. Studia te wykonywane były dla różnych możliwych położzeń i konfiguracji nowego detektora. Byłem osobą odpowiedzialną za ich przeprowadzenie i rekomendacje dla optymalnej konfiguracji nowej płaszczyzny detekcyjnej.

3) Główną analizą, którą prowadziłem w ramach doktoratu było wyznaczanie polaryzacji gluonów w nukleonie, $\Delta G/G$, posługując się asymetriami spinowymi w rozpraszaniu spolaryzowanych mionów na spolaryzowanej tarczy deuterowo-litowej w eksperymencie COMPASS. Polaryzacja gluonów wyznaczona została dzięki analizie procesu fuzji fotonowo-gluonowej, która wybierana była poprzez żądanie w stanie końcowym mezonu otwartego powabu D^0 . Przeprowadzona przeze mnie analiza dotyczyła danych eksperymentu COMPASS z lat 2002-2004. Wynikiem było uzyskanie wartości $\Delta G/G = -0,57 \pm 0,41(stat) \pm 0,17(syst)$ przy skali 13 GeV^2 i x_g oszacowanym na 0,15. Warto dodać, że analiza prowadzona przeze mnie była jedną z kluczowych analiz eksperymentu COMPASS, a moja rola polegała na przeprowadzeniu wszystkich jej fragmentów (wybór przypadków, optymalizacja metody, studia Monte Carlo, badanie niepewności systematycznych, interpretacja wyniku).

Otrzymane przeze mnie wyniki badań nad produkcją hadronów oraz pomiar polaryzacji gluonów $\Delta G/G$ przy wykorzystaniu kanału z produkcją cząstek D^0 stały się podstawą przygotowanej rozprawy doktorskiej zatytułowanej: „Hadron production and polarization of gluons in the nucleon in the μ -N interactions in the COMPASS experiment at CERN” [9]. Rozprawa została obroniona w październiku 2007 roku po zaledwie trzech latach od rozpoczęcia moich studiów doktoranckich. Uzyskała

wyróżnienie. Wyniki zostały zaprezentowane przeze mnie na dwóch konferencjach międzynarodowych (nr 20 i 21 w spisie konferencji), opublikowane w dwóch artykułach konferencyjnych [10-11] i artykule podsumowującym pomiar [12].

Okres po doktoracie

Od lutego 2008 roku zatrudniony jestem na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego na stanowisku adiunkta. W okresie do końca 2008 roku pozostawałem w grupie eksperymentu COMPASS. W tym czasie kończyłem swoje aktywności w grupie eksperymentu, m.in. przeprowadzając na danych 2002-2004 nowe obliczenia x_g oraz średniej skali reakcji dla analizy polaryzacji gluonów w kanale otwartego powabu używając metody ważenia przypadków, która uwzględnia wszystkie cięcia selekcyjne dla próbki. Przeprowadziłem też istotną część analizy sprawdzającej dla pomiaru $\Delta G/G$ w kanale otwartego powabu dla dodatkowych danych pochodzących z okresu 2006-2007 i uwzględniającego podejście Next-to-Leading Order (NLO). Analizę tą wspierałem jeszcze w ograniczonym zakresie w 2010 roku formalnie nie będąc już członkiem zespołu COMPASS (ostatnia prezentacja na forum eksperymentu COMPASS zawierająca moje nowe wyniki odbyła się w lutym 2011).

W ramach współpracy z eksperymentem COMPASS byłem opiekunem pracy licencjackiej realizowanej przez studenta Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego (p. Maciej Misiura). Tematem pracy była analiza nowych danych COMPASS (2006 rok) w poszukiwaniu potencjalnych stanów glueball rozpadających się w kanale $K^0 K^0$. Praca zatytułowana „Study of the COMPASS spectrometer performance with K_0 s mesons and reconstruction of $K_0 K_0$ pairs mass spectrum” obroniona została w 2010 roku na Wydziale Fizyki UW.

W lutym 2009 roku wyjechałem na dwu letni staż post-doktorski odbywający się w ośrodku CERN w Genewie (pozycja Senior Fellow). Program stażowy pozwala na dowolny wybór eksperymentu, w którym staż będzie realizowany. Mój wybór padł na eksperyment Compact Muon Solenoid (CMS) pracujący przy zderzaczu LHC. Głównym celem CMS było poszukiwanie cząstki Higgsa oraz przejawów oddziaływań i cząstek Nowej Fizyki wykraczającej poza Model Standardowy. Grupy fizyków CMS pracujące w tych obszarach są bardzo liczne i uznałem, że dołączanie się do tak dużych grup badawczych nie pozwoli odegrać w nich istotnej roli. Dlatego zdecydowałem się dołączyć do najmłodszej i najmniejszej grupy badawczej w ramach eksperymentu CMS – tzw. grupy Forward Physics. Aktywność grupy związana była z systemem detektorów CMS, który zlokalizowany jest w bezpośrednim sąsiedztwie wiązki (tzw. detektory „do przodu”). Taka lokalizacja wymusza odpowiednią budowę detektorów (odporność na radiację, duża gęstość rejestrowanych cząstek) i narzuca ograniczenia na techniki analizy danych (np. odrzucenie przypadków z obecnością dodatkowych oddziaływań – pile-up). Grupa Forward Physics jako jedyna w CMS nie była więc definiowana przez konkretną fizykę (np. poszukiwanie bozonów Higgsa), ale przez specyficzny układ detekcyjny, którego dobre zrozumienie pozwala wykorzystać go do szeregu różnych analiz. W moim odczuciu grupa ta działała prawie jak niewielki niezależny eksperyment w ramach dużej współpracy CMS i z tego powodu wydała mi się szczególnie interesująca. Przegląd działalności grupy w czasie tzw. LHC Run1

przedstawiony jest w kolejnym rozdziale autoreferatu – prezentacja osiągnięcia naukowego.

W momencie mojego dołączenia do grupy Forward Physics, była ona na etapie organizowania – aktywnie uczestniczyło w niej jedynie około 15 osób. Analizy fizyczne nie były jeszcze w większości zdefiniowane, zaś detektory nie były przetestowane w warunkach operacyjnych. Pierwsze zbieranie danych fizycznych przez eksperyment CMS planowane było na rok 2008, jednak z powodu poważnej awarii uruchomienie LHC zostało przesunięte na koniec 2009 roku. W momencie przystąpienia do grupy CMS Forward Physics dysponowałem więc okresem około 9 miesięcy, w czasie których mogłem organizacyjnie wesprzeć grupę. Warto dodać, że w czasie większości mojego pobytu w CERN, byłem jedynym pracownikiem CERN, który pracował w grupie Forward Physics. W ramach grupy Forward Physics wydzielone zostały trzy podgrupy – Exclusive Physics, Diffractive Physics i Forward Jets (od końca 2009 roku).

Aktywności w grupie Forward Physics przed początkiem zbierania danych przez CMS:

1. Od czerwca 2009 do listopada 2009 organizowałem podgrupę Exclusive Physics. Zostałem jej pierwszym kierownikiem (tzw. convener). Zaangażowany byłem m.in. w przygotowanie analiz ekskluzywnej produkcji par fotonów oraz ekskluzywnej produkcji hadronów. W tym pierwszym przypadku prowadzona była pod moim kierownictwem analiza wydajności proponowanych trygerów oraz wpływu na nie efektów związanych z pile-up. W tym drugim przypadku zaproponowałem przeprowadzenie analizy ekskluzywnej produkcji par pionów i poszukiwania cząstki $\rho(770)$ w tym kanale rozpadu - na początku 2010 roku, po zebraniu pierwszych danych fizycznych przez eksperyment CMS, byłem pierwszą osobą, która zrekonstruowała w CMS stan $\rho(770)$, a następnie pokazała wpływ cięć ekskluzywnych na jego selekcję. Rozpoczęte w ramach grupy analizy zakończyły się publikacją wyników [13-17]. W trakcie organizowania prac podgrupy zaprezentowałem plan jej działania na jednej międzynarodowej konferencji (nr 19 w spisie konferencji) i przedstawiłem go w publikacji pokonferencyjnej [18].

2. Wykazałem potrzebę wprowadzenia nowych trygerów dedykowanych grupie Forward Physics. Następnie byłem odpowiedzialny za zdefiniowanie i zaimplementowanie w softwarze CMS trygerów wyzwalających zbieranie danych dla przypadków z dużą aktywnością w obszarze detektorów do przodu. W szczególności przygotowałem trygery, które pozwalały na zapis z dużą efektywnością przypadków z dużymi dżetami oraz przypadków, w których występują korelacje między obiektami o dużej separacji w pospieszności. Trygery zostały przeze mnie przetestowane na poziomie Monte Carlo, a ich wdrożenie zaakceptowane przez zespół CMS.

3. Koordynowałem ze strony grupy Forward Physics „ćwiczenia” przeprowadzone w ramach współpracy CMS, których celem było przygotowanie zespołów do podjęcia analiz na rzeczywistych danych fizycznych. W czasie ćwiczeń poddawane były analizie zbiory wygenerowanych przy pomocy generatorów Monte Carlo. Ćwiczenia służyły przede wszystkim sprawdzeniu współpracy pomiędzy różnymi fragmentami globalnej infrastruktury komputerowej (na poziomie Tier2) oraz metod redukcji danych do tzw. podgrup określanych jako skims. Wszystkie cele ćwiczenia, które postawiłem przed

grupą Forward Physics zostały osiągnięte. Dzięki temu pierwsze upublicznienie wyników grupy Forward Physics nastąpiło bardzo szybko (kwiecień 2010).

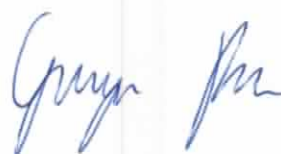
4. W październiku 2009 stworzona została podgrupa Forward Jets, której celem stały się analizy fizyczne, w których obserwuje się dżety w detektorach „do przodu”. Zostałem pierwszym kierownikiem tej grupy (convener) odpowiedzialnym za jej stworzenie i zdefiniowanie analiz, które w jej strukturze będą realizowane. Zaproponowałem, aby działania grupy poszerzyć o pomiar przepływów energii w obszarze do przodu (forward energy flow). Jest to pomiar z jednej strony konieczny, dla dobrego zrozumienia produkcji dżetów, a z drugiej pozwala odnieść się do zagadnień związanych z oddziaływaniami wielopartonowymi (multiparton interactions) i szerzej z tzw. underlying event. Przeprowadziłem pierwsze analizy na poziomie Monte Carlo powyższych zagadnień.

W grudniu 2009 roku zostało przeprowadzone próbne zbieranie danych w kompleksie LHC przy energii 0,9 TeV i 2,76 TeV. Byłem odpowiedzialny za nadzór nad jakością zbieranych danych (Data Quality Monitoring DQM) ze strony grupy Forward Physics, a następnie za zrekonstruowanie i zaprezentowanie pierwszych dżetów, które zarejestrowane zostały w wysokich prędkościach. Okazało się wtedy, że istotna część zrekonstruowanych dżetów nie odpowiada prawdziwym obiektom fizycznym, ale efektom wzbudzenia elektroniki przez samotne cząstki (tzw. fake jets). Efekt ten wprowadzał silne tło do pomiarów dżetów. W jego zrozumienie oraz eliminację poprzez odpowiednie algorytmy rekonstrukcyjne zaangażowałem się w następnych miesiącach.

Na wiosnę 2010 rozpoczęło się zbieranie danych przez CMS przy energii 7 TeV. Moja aktywność w grupie w latach 2010-2011 (okres pozostawania na stażu w CERN) była skoncentrowana na:

1. Przeprowadzeniu pomiaru przepływu energii w obszarze kalorymetru Hadronic Forward (HF) zlokalizowanym w dużych prędkościach. Byłem koordynatorem tej analizy i redaktorem noty podsumowującej, na podstawie której wyniki pomiaru zostały upublicznione. Zdefiniowałem interesujące obserwacje, opracowałem algorytmy analizy i przeprowadziłem szerokie badania błędów systematycznych. Wstępne wyniki analizy były pierwszymi wynikami fizycznymi eksperymentu CMS dla energii zderzeń 7 TeV prezentowanymi przez przedstawiciela współpracy CMS kiedykolwiek na międzynarodowej konferencji (XVIII International Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects w kwietniu 2010). Wyniki zaprezentowałem również osobiście na jednej konferencji międzynarodowej (nr 17 w spisie konferencji) oraz zostały opisane w artykule [19], w którym zamieszczono opis pomiaru przepływu energii w kalorymetrze HF dla energii zderzeń 0,9 i 7 TeV.

2. Przeprowadzeniu pomiaru produkcji inkluzywnej dżetów rejestrowanych w obszarze kalorymetru HF. Byłem koordynatorem tej analizy, bezpośrednio odpowiedzialnym za definicję obserwacji, przeprowadzenie studiów systematycznych, w szczególności związanych z poprawkami uwzględniającymi efekty detektorowe oraz interpretację wyników. Istotna była tutaj moja wiedza związana z wpływem fake jets, które musiały być w analizie usunięte. Ponadto prowadziłem studia efektów związanych z



przekrywaniem się wielu zderzeń (efekt związany z pile-up). Analiza zakończyła się opublikowaniem w 2012 roku artykułu [20].

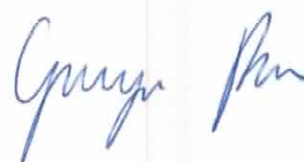
3. Udział w analizie przepływów energii w obszarze kalorymetru CASTOR (detektor zlokalizowany b. blisko wiązki, w obszarze pospieszności wyższym niż detektor HF). Pierwotnie wyniki tej analizy miały zostać upublicznione razem z wynikami analizy dla detektora HF w 2011 roku. Moja rola polegała na ujednoczeniu używanych metod oraz podejścia do błędów systematycznych pomiędzy pomiarem dla HF i dla CASTOR-a. Ostatecznie podjęta została decyzja o przeprowadzeniu dodatkowych studiów nad wydajnością detektora CASTOR i w związku z tym publikacja wyników nastąpiła dopiero w 2013 roku [21].

4. Nadzór nad działaniem trygerów dedykowanych grupie Forward Physics. Wraz ze wzrostem świelności LHC, trygery musiały ewoluować, aby dostosować ilość danych do możliwości Data Acquisition System (DAQ). W latach 2010-2011 byłem odpowiedzialny za monitorowanie i wprowadzanie koniecznych zmian do układu trygerów.

5. Udział w analizie produkcji par dżetów, z których jeden emitowany jest centralnie, a jeden do przodu. Analiza ta pokrywa się w istotnej części z analizą produkcji inkluzywnych dżetów do przodu (punkt 2 powyżej). Moja rola polegała na przygotowaniu części algorytmów selekcyjnych oraz na przeprowadzeniu porównania pomiędzy dwoma analizami. Wyniki analizy opisane są w artykule [20].

6. Udział w analizie dżetów o dużej separacji w pseudospieszności – tzw. dżetów Mullera-Naveleta. Zaproponowane i wprowadzone przeze mnie w 2009 roku trygery pozwoliły w 2010 i 2011 roku zebrać istotną próbkę przypadków z dżetami o dużej separacji w pseudospieszności (do ponad 9 jednostek). Dzięki temu stało się możliwe przeprowadzenie analiz korelacji pomiędzy takimi dżetami. Obserwabla ta jest niezwykle istotna z punktu widzenia QCD [22]. W 2011 roku rozpocząłem analizę danych zebranych przez eksperyment wraz z moim magistrantem Maciejem Misiurą. W 2012 p. Maciej Misiura przedstawił pracę magisterską pt. „Studies of jets production separated by a large rapidity interval with the CMS data”, a następnie został przyjęty na studia doktoranckie, które kontynuuje pod moją opieką (jestem opiekunem pomocniczym) – praca doktorska poświęcona jest rozszerzeniu analizy na przypadki z dżetami Muellera-Naveleta zebranymi w 2015 roku przy energiach zderzeń 13 TeV. Doktorant ma aktualnie otworzony przewód doktorski (temat: „Testy chromodynamiki kwantowej w obszarze wysokich pseudospieszności w eksperymencie CMS przy energiach LHC z wykorzystaniem dżetów o dużej separacji”), a obrona planowana jest na początek 2018 roku. Wyniki rozpoczętej w 2011 roku analizy korelacji pomiędzy dżetami Muellera-Naveleta dla zderzeń przy 7 TeV zostały opublikowane w 2016 [23].

7. Udział w analizie tzw. dijet k-factor, która polegała na porównaniu przekrojów czynnych na produkcję par dżetów o odpowiednio wysokim pędzie poprzecznym bez i z dodatkowym dżetem emitowanym pomiędzy parą. Analiza ta wykorzystywała zarówno dedykowane, opracowane przeze mnie trygery, jak i wybierała przypadki centralne przy pomocy trygerów ogólnego zastosowania. Zaangażowałem się m.in. w przygotowanie metody „sklejania” wyników pochodzących z obu trygerów. Wyniki analizy zostały opublikowane w [24].



8. Współpracowałem blisko z podgrupą Diffractive Physics w szczególności w obszarze badania wydajności detektorów HF. Detektory te, które przebadane zostały przeze mnie w ramach analizy przepływów energii do przodu (punkt 1 powyżej) stanowią podstawowe detektory, dzięki którym możliwe staje się zmierzenie tzw. large rapidity gap definiującej przypadki dyfrakcyjne. Podgrupę Diffractive Physics reprezentowałem w tym okresie na jednej międzynarodowej konferencji (nr 18 w spisie konferencji).

W okresie przebywania w ośrodku CERN pełniłem nieprzerwanie w 2010-11 rolę konwenera grupy Forward Jets. Polegało to m.in. na organizowaniu przynajmniej raz na 2 tygodnie spotkań grupy, przygotowaniu standardowych narzędzi i zalecanych metod korzystania z danych, współpracy z grupami detektorów, w szczególności z osobami odpowiedzialnymi za detektory HF, CASTOR i ZDC (trzeci z kalorymetrów „do przodu”). Zważywszy również na to, że przez znaczną część czasu w okresie 2009-2011, byłem jedynym bezpośrednim pracownikiem CERN zaangażowanym w grupę Forward Physics, a to oznaczało nieprzerwaną obecność w CERN, wielokrotnie reprezentowałem całą grupę osobiście w czasie wystąpień na forum całego eksperymentu. Koordynowałem pierwsze spotkania robocze pomiędzy eksperymentem CMS, a eksperymentem TOTEM, które w dłuższej perspektywie doprowadziły do zintensyfikowania współpracy i szeregu interesujących wyników. Ponadto zarządzałem zasobami ludzkimi grupy Forward Jets i z ramienia grupy Forward Physics opiekowałem się studentami programu CERN Summer Studies przypisanymi do grupy (definiowałem dla nich projekty badawcze). W ośrodku CERN przebywałem do czerwca 2011 roku.

Po powrocie z CERN kontynuowałem współpracę z grupą Forward Physics w ramach warszawskiej grupy CMS. W szczególności do 2012 roku byłem kierownikiem podgrupy Forward Jets, a następnie do 2015 roku byłem przedstawicielem grupy Forward Physics w grupie CMS Physics Validation Team (PVT). Celem grupy PVT było sprawdzenie jakości rekonstruowanych danych (po zakończeniu zbierania danych przez CMS w 2013 roku, zarejestrowane przypadki mogły być poddawane kilkukrotnej rekonstrukcji, która była przeprowadzana po wprowadzeniu istotnych zmian w softwarze rekonstrukcyjnym) oraz sprawdzenie jakości produkowanych próbek Monte Carlo. Moją rolą było sprawdzanie jakości produkowanych przypadków pod kątem ich użyteczności w analizach w grupie Forward Physics. Pracę w grupie PVT zakończyłem wraz z początkiem aktywności PVT przy nowych danych zbieranych w 2015 roku (energia zderzeń 13 TeV).

W okresie po 2012 kontynuowałem współpracę przy trwających analizach fizycznych (większość z wzmiankowanych wcześniej publikacji ukazała się właśnie w tym okresie). Skupiłem się także na pracy ze studentami Wydziału Fizyki UW. W okresie tym (o czym wspomniane było wcześniej) pełniłem opiekę nad pracą magisterską, a następnie nad doktoratem p. Macieja Misiury. Opiekowałem się również pracą licencjacką p. Piotra Olejniczaka pt. „Badania ekskluzywnej produkcji dżetów w eksperymencie CMS przy Wielkim Zderzaczu Hadronów” (praca obroniona w 2011 roku). Praca p. Olejniczaka poświęcona była badaniu możliwości obserwacji ekskluzywnej produkcji par dżetów, temat o tyle ciekawy, że obserwacja ekskluzywnej produkcji dżetów pozwala oszacować spodziewany przekrój czynny na produkcję

ekskluzywną cząstki Higgsa. Praca pokazała, że pile-up obecny w zderzeniach przy LHC skutecznie uniemożliwi obserwację ekskluzywnych dżetów przy użyciu obecnego układu detekcyjnego CMS. Byłem również opiekunem pracy magisterskiej p. Konrada Nesteruka pt. „Measurement of the energy flow at large pseudorapidities in pp and pPb collisions with the CMS at the LHC” (obrona 2013 rok). Praca ta jest rozszerzeniem analizy przepływu energii w obszarze detektora HF o nowe dane. W szczególności odnosi się do danych ze zderzeń asymetrycznych, tzn. proton-ołów. Również p. Marek Walczak przygotowywał pod moją opieką pracę magisterską zatytułowaną: „Search for Resonances in the Forward-Backward Dijet Mass Spectrum from 7 TeV pp Collisions at CMS”. Tematem pracy była analiza spektrum masowego zrekonstruowanego z dwóch dżetów o dużej separacji w pospieszności. Dzięki zaimplementowanemu przeze mnie trygerowi praca mogła zostać oparta o wyjątkowo dużą statystykę par dżetów, a tym samym pozwalała popatrzeć na spektrum masowe znacznie powyżej 1 TeV. Po obronie pracy magisterskiej (2014 rok), p. Walczak został moim doktorantem. Tematem jego pracy doktorskiej (przewód planowany do otwarcia na początku 2018 roku) jest analiza danych CMS ze zderzeń ciężkich jonów w LHC pod kątem rekonstrukcji i badania zderzeń ultraperyferycznych z produkcją ciężkich mezonów (J/psi, Upsilon). Tematyka taka związana jest z nawiązaniem przeze mnie współpracy z podgrupą CMS Heavy Ions Forward Physics.

W okresie 2012-2016 reprezentowałem grupę Forward Physics na czternastu konferencjach międzynarodowych (nr 10-16 i 5-8 i 1-3). Prezentacje obejmowały zarówno aktywność podgrupy Forward Jets (przemianowanej w 2011 roku na grupę Low-x QCD), podgrupy Diffractive Physics, jak i stanowiły przegląd prac całej grupy fizycznej Forward Physics. Ponadto w niektórych przypadkach zostałem wybrany do reprezentowania nie tylko wyników eksperymentu CMS, ale także eksperymentu ATLAS (nr 1 w spisie konferencji) i eksperymentu TOTEM (nr 6 w spisie konferencji). Opublikowałem również pięć artykułów konferencyjnych [25-29]. Byłem współorganizatorem dwóch konferencji: jednej międzynarodowej (nr 9 w spisie konferencji), gdzie byłem jednym z dwóch przewodniczących i jednej polskiej (nr 4 w spisie konferencji).

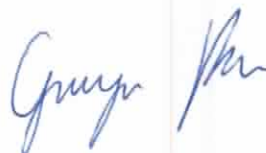
W 2017 roku skupiłem się na przygotowaniu monografii, będącej osiągnięciem naukowym przedstawionym w procesie habilitacji.

Prezentacja osiągnięcia naukowego

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

Jako osiągnięcie naukowe przedstawiam monografię pt.:

„Forward Physics – a new window on high energy interactions. Results from Large Hadron Collider Run 1 data taking obtained with Compact Muon Solenoid experiment”



wydaną nakładem Wydawnictw Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 2017, ISBN 978-83-235-2862-3, której jestem jedynym autorem. Tematem monografii jest całościowy przegląd i omówienie wyników otrzymanych przez grupę Forward Physics w oparciu o dane ze zderzeń proton-proton zebrane przez eksperyment CMS w latach 2009-2013. Przedstawione wyniki publikowane były w okresie 2010-2016. Wybór tematu monografii podyktowany był moją aktywnością w grupie Forward Physics, a w szczególności pozostawaniem na stanowisku kierownika dwóch grup badawczych – Exclusive Physics i Forward Jets (przemianowanej później na Low-x QCD), w ramach których koordynowałem i prowadziłem znaczną część opisanych prac badawczych.

Praca pomyślana została jako kompendium wiedzy na temat fizyki „do przodu”, która badana była w ramach eksperymentu CMS z użyciem danych Run 1 (2009-2013). Rozdziały oprócz opisanych wyników badań, posiadają również wstęp teoretyczno-fenomenologiczny, w którym w przystępny sposób starałem się przedstawić powody, dla których dane obserwowalne są interesujące. Z drugiej strony starałem się opisać podstawowe narzędzia, które stosowane są przez grupę Forward Physics w prowadzonych analizach (np. algorytmy selekcyjne dzety). Celem było stworzenie pracy, która nie tylko zawiera omówienie wyników, ale jest użyteczna dydaktycznie również dla osób nie mających dużego doświadczenia z dziedziną (np. studentów). Realizacja tego celu spowodowała istotny wzrost objętości monografii, dlatego podjąłem decyzję o skoncentrowaniu się tylko na wynikach eksperymentu CMS. Wyniki innych eksperymentów, w tym drugiego dużego eksperymentu przy akceleratorze LHC – ATLAS, a także wyniki związane ze współpracą pomiędzy grupami badawczymi CMS i TOTEM, zostały w związku z tym pominięte. Zgodnie z moją wiedzą praca ta jest najszerszym istniejącym obecnie omówieniem i podsumowaniem działań grupy Forward Physics z wykorzystaniem danych zebranych w LHC Run1.

Praca składa się z siedmiu rozdziałów: 1. Wstęp, 2. Large Hadron Collider, Compact Muon Solenoid i jego detektory „do przodu”, 3. Underlying Event, 4. Dzety do przodu, 5. Miękka i twarda dyfrakcja, 6. Produkcja ekskluzywna, 7. Podsumowanie. Monografia opracowana jest w języku angielskim.

Large Hadron Collider, Compact Muon Solenoid i jego detektory “do przodu”

Rozdział drugi monografii opisuje pracę akceleratora LHC w trakcie tzw. Run 1, od jego rozpoczęcia w 2009 roku do zakończenia na początku 2013. Zaprezentowana jest zmiana warunków pracy akceleratora w tym czasie, m.in. bardzo szybki wzrost świetlności, który bezpośrednio przekłada się na możliwość badań fizycznych w grupie Forward Physics – większość analiz możliwa była jedynie w okresie tzw. niskiej świetlności, a co za tym idzie niskiego pile-up. Następnie opisany jest sam detektor Compact Muon Solenoid, ze szczególnym uwzględnieniem detektorów pracujących w pobliżu wiązki (detektorów „do przodu”). Opisana jest w szczególności konstrukcja dwóch najważniejszych kalorymetrów grupy Forward Physics, mianowicie kalorymetru Hadronic Forward (HF) oraz kalorymetru CASTOR. Dane zebrane przez te detektory są kluczowe dla opisanych w monografii badań. W ramach swojej pracy w grupie Forward Physics współpracowałem blisko z grupami zajmującymi się oboma detektorami. W szczególności związane było to z moim zaangażowaniem w działalność zespołu DQM (Data Quality Monitoring) w 2009 i 2010 roku, w ramach którego prowadzona jest analiza (zarówno on-line jak i off-line) wszystkich



komponentów detektora. Następnie współpracując z ramienia grupy Forward Physics z grupą PVT (Physics Validation Team) nadzorowałem jakość odtwarzanych danych oraz symulacji Monte Carlo, w szczególności uwzględniając dwa kluczowe z punktu widzenia grupy detektory. Ponadto analizy prowadzone w zarządzanej przeze mnie grupie Forward Jets (np. przepływów energii do przodu opisane w rozdziale 3) związane były w znacznej mierze ze zrozumieniem działania detektorów HF i CASTOR w warunkach operacyjnych LHC. Dlatego w przedstawionym opisie obu detektorów uwzględnione zostały również problemy pojawiające się w trakcie zbierania danych – w przypadku HF są to pojedyncze cząstki aktywujące elektronikę detektora i naśladujące przez to duże depozyty energii w obszarze aktywnym HF, a w przypadku CASTOR-a jest to pole magnetyczne CMS, które wnika do wnętrza detektora CASTOR redukując czułość kalorymetru. W rozdziale 2 zostały przedstawione także pozostałe detektory „do przodu”, w tym detektor Zero Degree Calorimeter (który używany był przede wszystkim w czasie zbierania danych z wiązkami ciężkich jonów w LHC), detektory BSC i BPTX (które stanowiły część trygera CMS i układu monitorującego wiązkę), a także systemy eksperymentu TOTEM, który zlokalizowany jest w bezpośrednim sąsiedztwie CMS. W ramach mojego pobytu w ośrodku CERN podjąłem współpracę z ekspertami eksperymentu TOTEM, która doprowadziła do przeprowadzenia wspólnych analiz fizycznych. Ostatnia część rozdziału poświęcona jest systemowi trygerów, systemowi przetwarzania, zapisywania i udostępniania danych. W przypadku grupy Forward Physics w szczególności system wyzwania zbierania danych (trygerowania) jest szczególnie istotny. Powodów jest kilka. W przypadku rejestracji zdarzeń ekskluzywnych (np. ekskluzywna produkcja par leptonów, opisana w rozdziale 6 monografii) system trygerów musi w sposób wydajny doprowadzać do zapisu na dyski przypadki bardzo rzadkie. W przypadku studiów minimum bias (np. analiza przepływów energii „do przodu”), system trygerów nie może zaburzać (wprowadzać bias-u) rejestrowanych oddziaływań. W przypadku studiów korelacji pomiędzy różnymi obiektami (dżety, przerwy energetyczne w pospieszności) konstrukcja trygera musi doprowadzić do wyboru oddziaływań, które posiadają bardzo specyficzne cechy stanu końcowego. Ten ostatni przypadek jest szerzej omówiony w rozdziale 4, w którym opisane są studia korelacji pomiędzy dżetami. Brałem bezpośredni udział w definiowaniu trygerów dla grupy Forward Physics (zarówno w ramach podgrupy Exclusive Physics jak i Forward Jets), a następnie odpowiedzialny byłem za ich implementację. W 2010 i 2011 nadzorowałem również pracę trygerów dedykowanych studiom korelacyjnym.

Underlying event

Rozdział trzeci monografii poświęcony jest studiom tzw. underlying event (UE), które przeprowadzone zostały pod moim kierownictwem w grupie Forward Jets. Na poziomie partonowym UE można zdefiniować jako aktywność występująca w zderzeniu proton-proton, z wyłączeniem tej jej części, która pochodzi bezpośrednio z konkretnego oddziaływania twardego. Aktywność ta jest wynikiem szeregu efektów: oddziaływań wielopartonowych, pozostałości po protonach (proton remnant), początkowych i końcowych emisji (initial i final state radiation). Eksperymentalnie to jednak nie partony, ale hadrony są obiektami obserwowanymi. Hadrony te powstają z partonów w procesie hadronizacji. Hadrony wiążą zarówno partony z twardego oddziaływania, jak i z UE. Eksperymentalnie nie można więc w większości przypadków rozdzielić obserwowanego stanu końcowego na część twardą i UE. Dlatego, aby badać UE oraz poszczególne procesy, które je generują, stosowane są różne modele

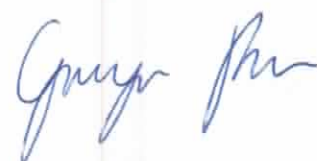


Monte Carlo, których wynik poddawany jest symulowanemu procesowi hadronizacji, a następnie porównywany jest z wynikami eksperymentalnymi. Aby móc powiedzieć więcej o podprocesach tworzących UE, powyżej przedstawiony sposób porównania musi być przeprowadzony dla możliwie szerokiej gamy próbek (definiowanych przez różne energie zderzeń i różne produkty obserwowane w stanie końcowym). Modele, według których w programach PYTHIA i HERWIG symulowany jest UE zostały opisane w ramach niniejszego rozdziału. Modele te zawierają szereg parametrów, które mogą być zmieniane w czasie generacji. Model z zestawem parametrów nosi określenie „tune”. Wyniki eksperymentalne grupy Forward Jets są więc z jednej strony porównywane do konkretnych tune-ów, z drugiej zaś strony pozwalają na otrzymanie przez grupy teoretyków i fenomenologów nowych, lepszych zestawów parametrów. Dobra charakterystyka UE przy energiach LHC jest również konieczna do przeprowadzenia innych studiów w ramach aktywności grupy Forward Physics. W szczególności dotyczy to studiów obserwabli będących dżetami, które to obiekty powinny być odtworzone po odjęciu aktywności UE, a aktywność ta jest szczególnie silna w obszarze blisko wiązki akceleratora, obszarze „do przodu”.

W ramach studiów w grupie Forward Jets (a następnie Low-X QCD) przeprowadzono szereg analiz, których celem był UE. Już w 2009 roku rozpoczęła się analiza związana z przepływami energii w obszarze detektorów HF i CASTOR. Analiza ta (której liderem byłem) miała na celu zbadanie aktywności w obszarze „do przodu” dla różnych rodzajów zderzeń (przy różnych energiach, a także dla różnej średniej centralności, definiowanej poprzez wybór obiektów w stanie końcowym). Aktywność zdefiniowana została poprzez depozyty energii w kalorymetrach (w obszarze tym nie ma detektorów śladowych). Analiza wykazała, że żaden z istniejących modeli, ani ich odmian (tune-ów), nie jest w stanie opisać wyników jednocześnie dla wszystkich badanych próbek. Przy czym lepiej sprawdzają się tune-y, które przygotowane zostały z uwzględnieniem innych równoległych analiz przeprowadzonych przy LHC (np. analiz badających aktywność w obszarze centralnym detektora CMS). Wyniki eksperymentalne zostały przekazane grupom fizycznym poza CMS, które przeprowadzają proces przygotowywania nowych tune-ów. Interesująco wypadło również porównanie z przewidywaniami symulacji Monte Carlo wygenerowanymi przez programy, które powstały dla opisu oddziaływań promieniowania kosmicznego z atmosferą (EPOS, SIBYLL, QGSJETII). Żaden z programów nie dostarczył przewidywań w zadowalający sposób opisujących wyniki CMS. W rozdziale 3 zawarty jest też opis pomiarów UE metodą tzw. obiektów wiodących. Metoda ta polega na znalezieniu obiektu o największym pędzie poprzecznym w przypadku (pojedyncza zrekonstruowana cząstka, dżet), a następnie sprawdzeniu aktywności w różnych obszarach detektora CMS w odniesieniu do kierunku zdefiniowanego przez obiekt wiodący. Metoda ta pozwala na określenie takich obszarów i obserwabli, które czułe są bardziej na konkretną składową UE (np. początkowe i końcowe emisje). Dzięki temu dokładniej można zrozumieć dynamikę UE i wpływ różnych tworzących je procesów. Wyniki analizy zostały szeroko przedstawione w monografii.

Dżety do przodu

Rozdział 4 przedstawia prezentację analiz związanych z obserwacją dżetów rejestrowanych w obszarze „do przodu” w eksperymencie CMS. Głównym celem prowadzonych w ramach grupy Forward Jets analiz były badania QCD w obszarze małego x , w szczególności zaś potwierdzenie pojawienia się efektów, które do swojego



opisu wymagają odwołania się do dynamiki opisywanej przez równania BFKL (Balitsky-Fadin-Kuraev-Lipatov). Wysokie energie zderzeń dostępne w LHC i szerokie eksperymentalne pokrycie w pospieszności zapewniane przez detektor CMS pozwalały spodziewać się pojawienia się efektów związanych z ewolucją BFKL. W monografii przedstawiona jest seria pomiarów związanych z dżetami rejestrowanymi w obszarze „do przodu” detektora CMS (w kalorymetrze HF).

Pierwszym z pomiarów jest inkluzywny pomiar przekrojów czynnych na produkcję dżetów w rejonie pomiędzy 3, a 5 w pospieszności. W wyniku tej analizy, której byłem głównym wykonawcą, przedstawiono spektrum dżetów w tym obszarze i porównano je z szeregiem modeli LO i NLO. Niestety błędy systematyczne, które wynikały z niepewności skali energetycznej kalorymetru HF okazały się na tyle duże, że nie pozwoliły na wykazanie przewagi jednych modeli nad innymi. W ramach analizy przeprowadziłem szereg studiów nad błędami systematycznymi (wynikającymi z różnych aspektów działania kalorymetru HF) oraz błędami teoretycznymi (w szczególności przy oszacowaniach NLO). Ponadto skupiłem się na badaniu różnych metod uwzględniania poprawek na wydajność detektora (poprawki przenoszące rezultaty z poziomu detektora na poziom hadronowy). Dobre zrozumienie zarówno błędów systematycznych, jak i metod redukcji wpływu detektora CMS na wynik pomiaru, okazały się niezwykle cenne przy kolejnych, mniej inkluzywnych pomiarach.

Następnym zaprezentowanym pomiarem jest badanie korelacji między produkcją dżetów w dużych pospiesznościach (odpowiadających detektorowi HF) i w centralnym obszarze detektora. Dzięki wyborowi wiodących dżetów, które odseparowane są istotnie względem siebie w pospieszności, otworzona została przestrzeń, w której mogą pojawić się emisje dodatkowych dżetów lub pojedynczych cząstek, a przez to wystąpi cała grupa efektów mająca swój wpływ na obserwowane wiodące dżety. Dzięki temu należy się spodziewać, że przynajmniej część modeli teoretycznych wykaże znaczące odstępstwa od pomiaru. Rzeczywiście zgodność pomiędzy przewidywaniami modeli i danymi eksperymentalnymi, nawet biorąc pod uwagę znaczący błąd systematyczny, okazuje się istotnie gorsza. W szczególności większość modeli przewiduje znacznie więcej dżetów centralnych niż wynika to z obserwacji.

Trzecim pomiarem jest pomiar polegający na selekcji dwóch wiodących dżetów o dużym pędzie poprzecznym i sprawdzenie dodatkowej aktywności pomiędzy nimi. Dodatkowa aktywność zdefiniowana jest w tym wypadku jako obecność trzeciego dżetu powyżej pewnego granicznego pędu poprzecznego w obszarze pospieszności ograniczonym przez dwa wiodące dżety. Badane są przekroje czynne na produkcję przypadków, w których takie dodatkowe dżety się pojawiają i na produkcję przypadków, gdzie pomiędzy dwoma wiodącymi dżetami takich dodatkowych obiektów nie ma. Dzięki posłużeniu się stosunkiem pomiędzy przekrojami czynnymi obliczonymi dla obu próbek, większość niepewności systematycznych jest minimalizowana i dzięki temu wzrasta możliwość testowania różnych hipotez. Co ciekawe, modele zawierające podejście bazujące na DGLAP (w szczególności PYTHIA), doskonale opisują wyniki pomiaru, natomiast te bazujące na elementach BFKL (HEJ, CASCADE) istotnie różnią się od rzeczywistych wyników.

Ostatnim pomiarem jest analiza dekorelacji kątowych (w kącie azymutalnym) pomiędzy tzw. dżetami Muellera-Naveleta. Dżety te w przypadku przedstawionym są zdefiniowane jako para dżetów o pędzie poprzecznym przekraczającym 35 GeV i



znajdująca się w akceptacji pomiędzy -5 i 5 w pseudospieszczości. Z pośród wielu par dżetów wybierane są takie o największej separacji w pospieszczości. Dekorelacje azymutalne pomiędzy takimi dżetami powodowane są przez dodatkowe miękkie emisje, które opisywane są równaniami BFKL. Finalne wyniki analizy dekorrelacji kątowych opublikowane zostały w 2016 roku. Wyniki eksperymentalne porównane są z przewidywaniami modelowymi (różne generatory Monte Carlo) oraz z przewidywaniami teoretycznymi (opis BFKL). W niektórych aspektach opis bazujący na równaniach BFKL wydaje się najlepiej pasować do wyników eksperymentalnych, natomiast w innych zarówno modele DGLAP jak i BFKL nie dostarczają w pełni satysfakcjonującego opisu. Aby ostatecznie odpowiedzieć na pytanie o istotność efektów BFKL analiza dżetów Muellera-Naveleta jest w chwili obecnej rozszerzana o dane zbierane przy wyższej energii zderzeń (13 TeV). Analiza jest prowadzona przez mojego studenta doktoranta.

Miękka i twarda dyfrakcja

Rozdział piąty poświęcony jest oddziaływaniom dyfrakcyjnym, zarówno dyfrakcji miękkiej, jak i twardej. Przypadki dyfrakcyjne selekcjonowane są w eksperymencie poprzez wybór zderzeń z obecnością dużej przerwy w pospieszczości (large rapidity gap). Przerwa ta wolna jest od rejestrowanej aktywności i powinna odpowiadać wymianie pomeronu niosącego liczby kwantowe próżni. Definicja ta jest definicją eksperymentalną, nie pokrywającą się w pełni z czystą próbką przypadków dyfrakcyjnych. W szczególności przerwa w pospieszczości na poziomie detektora może zostać zamaskowana poprzez inne oddziaływania pojawiające się w trakcie tego samego przecięcia wiązek w CMS (pile-up). Ponadto dodatkowa aktywność może być generowana przez UE w samym przypadku zawierającym oddziaływanie dyfrakcyjne, czy też pochodzić z niedoskonałości (szumów) elektroniki. Z drugiej strony nie wszystkie przerwy w pospieszczości odpowiadają wymianie pomeronu. Część jest produkowana jako fluktuacje w rozkładzie stanu końcowego przypadku nie-dyfrakcyjnego, a część odpowiada niedoskonałościom systemu detekcyjnego, który nie rejestruje cząstek o bardzo niskim pędzie poprzecznym. Dlatego dobre zrozumienie tego w jaki sposób próbka danych z przerwą w pospieszczości obserwowaną na poziomie detektora przekłada się na rzeczywistą próbkę danych dyfrakcyjnych jest jednym z najistotniejszych elementów wszystkich analiz dyfrakcyjnych w CMS (detektor CMS nie zapewnia pokrycia kinematycznego wystarczającego do detekcji protonów wiązki biorących udział w oddziaływaniu dyfrakcyjnym, w związku z tym selekcja musi bazować wyłącznie na dużej przerwie w pospieszczości). Dlatego przy analizie dyfrakcji w CMS istotne okazało się skorzystanie z doświadczenia wypracowanego w grupie Forward Jets (Low-X QCD), w szczególności związanego z pracą z detektorami HF, które stanowią podstawowe narzędzie przy definicji przerwy w pospieszczości.

Próbka przypadków z miękką dyfrakcją wybierana jest żądając obecności jednej (lub kilku) przerwy w pospieszczości. Taka próbka powinna być nazywana w zasadzie dyfrakcyjną próbką minimum-bias, gdyż zawiera również twardą dyfrakcję (przypadki, gdzie oprócz przerwy w pospieszczości zrekonstruowane są obiekty ustalające skalę oddziaływania np. para dżetów o wysokim pędzie poprzecznym). Niemniej przypadki takie są o kilka rzędów wielkości rzadsze niż miękką dyfrakcją i z tego powodu w omawianych analizach są pomijane. W monografii opisane są analizy miękkiej dyfrakcji z uwzględnieniem przypadków z pojedynczą i podwójną dyfrakcyjną

dysocjacja protonu. Przekroje czynne na tego typu przypadki są policzone i porównane z modelami fenomenologicznymi. Przewidywania zgadzają się z obserwacjami.

Następnie przedstawione są trzy analizy dotyczące twardej dyfrakcji. Są to: produkcja par dżetów z dużym pędem poprzecznym wraz z obserwacją dużej przerwy w pospieszności, produkcja bozonów pośredniczących wraz z obserwacją przerwy, analiza przypadków z przerwą w pospieszności obserwowaną pomiędzy dwoma dżetami (topologia dżet-przerwa-dżet). W przypadku pierwszej z powyższych analiz udało się zaobserwować wyraźną obecność oddziaływań z dyfrakcyjnie produkowanymi parami dżetów. Zaobserwowano również silne przesłanki pojawienia się przypadków dyfrakcyjnych w przypadkach produkcji bozonów pośredniczących. Najciekawsze jednak wyniki pochodzą z analizy przypadków dżet-przerwa-dżet. Z punktu widzenia teorii w przypadkach tych pomiędzy dżetami wymieniany jest twardy pomeron, którego opis angażuje równania BFKL. Po wyselekcjonowaniu przypadki te porównano z przewidywaniami Monte Carlo. Jedynie te przewidywania, które uwzględniają wymianę twardego pomeronu opisywanego w reżimie BFKL są w stanie opisać dane eksperymentalne. Wynik ten dostarcza najsilniejszego na chwilę obecną dowodu na pojawianie się w zderzeniach proton-proton w LHC dynamiki, którą trzeba opisywać równaniami ewolucji BFKL.

Produkcja ekskluzywna

W rozdziale 6 przedstawione są wyniki eksperymentalne opracowane przez CMS związane z centralną ekskluzywną produkcją (CEP). Przypadki CEP mogą być zainicjowane przez oddziaływania pomeron-pomeron, foton-pomeron bądź foton-foton. W dwóch pierwszych przypadkach proces ten odpowiada specyficznym oddziaływaniom dyfrakcyjnym z dobrze ustalonym stanem końcowym. Przykładami takich oddziaływań jest m.in. ekskluzywna produkcja par fotonów i ekskluzywna produkcja par pionów. Analizy obu tych kanałów przeprowadzone w grupie Exclusive Physics, której byłem pierwszym kierownikiem, przedstawione są w monografii. W pierwszym przypadku (ekskluzywna produkcja par fotonów) nie udało się odnaleźć ani jednego oddziaływania tego typu. Dlatego postawiono górne ograniczenie na przekrój czynny na ekskluzywną produkcję par fotonów. Limit ten porównywalny jest z limitami teoretycznymi. W przypadku ekskluzywnej produkcji par pionów, udało się zrekonstruować dużą liczbę przypadków, co umożliwiło policzenie przekrojów czynnych, a także pozwoliło na przeprowadzenie poszukiwania w obszarze masy niezmienniczej powyżej 1,5 GeV stanów glueball rozpadających się na parę pionów. W spektrum masowym zauważono dwie struktury (w okolicach 1,6 i 1,9 GeV), jednak ze względu na kłopoty z modelowaniem tła nie było możliwe wyznaczenie znaczącości tych obserwacji. W przypadku oddziaływań foton-foton, mamy do czynienia z praktycznie czystym oddziaływaniem opisywanym przez QED. Dlatego kanały ekskluzywnej produkcji zainicjowanej przez oddziaływanie foton-foton mogą stanowić bardzo dobry test dla wydajności detektorów, pomiaru świetlności w LHC, trygerów CMS. W monografii opisane są dwie analizy – jedna z produkcją par elektronów, a druga par mionów w oddziaływaniach foton-foton. Ostatnią analizą przedstawioną w opracowaniu jest analiza ekskluzywnej produkcji par bozonów pośredniczących W w oddziaływaniach foton-foton. Analiza ta pozwoliła określić najsilniejszy eksperymentalny limity na tzw. anomalne sprzężenie poczwórne (anomalous quartic gauge coupling).



Szeroki program podgrupy Exclusive Physics nie mógłby być realizowany bez doskonałej znajomości poszczególnych detektorów CMS, w tym detektorów „do przodu”, które pozwalają na wczesnym etapie analizy na odrzucenie większości przypadków nieekskluzywnych. Ponadto studia ekskluzywne wymagają dobrej stabilności detektora w czasie i dużej ilości dedykowanych próbek Monte Carlo. Niewielkie wahania w poziomie szumów elektroniki mogą doprowadzić do odrzucenia przypadków ekskluzywnych (szumy elektroniki mogą być wzięte za rzeczywiste dodatkowe cząstki i tym samym przypadek nie spełnia warunków ekskluzywnych). Dlatego istotny był nadzór nad detektorem w ramach grupy DQM, a następnie grupy PVT.

W 2014 roku został zatwierdzony nowy detektor CMS – Precision Proton Spectrometer (CT-PPS). Detektor ten został włączony do systemu CMS w 2016 roku. Poszerza on zdolności detekcyjne eksperymentu o możliwość rekonstrukcji protonów rozproszonych w oddziaływaniach dyfrakcyjnych i ekskluzywnych w obszar bliski wiązce. Dzięki CT-PPS możliwe stanie się przeprowadzenie szeregu analiz dyfrakcyjnych i ekskluzywnych, nawet w sytuacji wysokiego pile-up obecnego w okresie dużej świetlności LHC. Celem jest detekcja ekskluzywnej produkcji bozonu Higgsa, a być może również cząstek supersymetrycznych.

Bibliografia

- [1] SPring-8; T. Nakano et al., Phys. Rev. Lett. 91, 012002 (2003).
- [2] CLAS; S. Stepanyan et al., Phys. Rev. Lett. 91, 252001 (2003).
- [3] DIANA; V.V. Barmin et al., Phys. Atom. Nucl. 66, 1715 (2003).
- [4] NA49; C. Alt et al., Phys. Rev. Lett. 92, 042003 (2004).
- [5] L. Tianbo et al., Int. J. Mod. Phys. A29 no. 13, 1430020 (2014).
- [6] G. Brona, Praca Magisterska (2004)
http://wwwcompass.cern.ch/compass/publications/theses/2004_dpl_brona.ps.gz
- [7] G. Brona, Acta Phys. Polon. B36, 2233 (2005).
- [8] COMPASS; E.S. Ageev ... G. Brona et al., Eur. Phys. J. C41, 469 (2005).
- [9] G. Brona, Rozprawa Doktorska (2007).
http://wwwcompass.cern.ch/compass/publications/theses/2007_phd_brona.ps.gz
- [10] G. Brona, w ramach Proceedings, 42nd Rencontres de Moriond on QCD and High Energy Hadronic Interactions : La Thuile, Italy, March 17-24, 2007, Gioi Publ. (2007).
- [11] G. Brona, Czech.J.Phys. 56 F53 (2006).
- [12] COMPASS; M. Alekseev ... G. Brona et al., Phys.Lett. B676 31 (2009).
- [13] CMS; S. Chatrchyan ... G. Brona et al., JHEP 1211 080 (2012).
- [14] CMS; S. Chatrchyan ... G. Brona et al., CMS PAS FSQ-12-004 (2012)..
- [15] CMS; S. Chatrchyan ... G. Brona et al., JHEP, 1201 052 (2012).
- [16] CMS; S. Chatrchyan ... G. Brona et al., JHEP, 07 116 (2013).
- [17] CMS; V. Khachatryan ... G. Brona et al., JHEP, 1608 119 (2016).
- [18] G. Brona, PoS EPS-HEP2009 327 (2009).
- [19] CMS; S. Chatrchyan ... G. Brona et al., JHEP 1111 148 (2011).
- [20] CMS; S. Chatrchyan ... G. Brona et al., JHEP 1206 036 (2012).



- [21] CMS; S. Chatrchyan ... G. Brona et al., JHEP 1304 072 (2013).
- [22] A.H. Mueller, H. Navelet, Nucl. Phys. B, 282:727 (1987).
- [23] CMS; V. Khachatryan ... G. Brona et al., JHEP 139 08 (2016).
- [24] CMS; S. Chatrchyan ... G. Brona et al., Eur. Phys. J. C, 72 2216 (2012).
- [25] G. Brona, Acta Phys.Polon.Supp. 6 525 (2013).
- [26] G. Brona, EPJ Web Conf. 71 00022 (2014).
- [27] G. Brona, PoS DIS2015 067 (2015).
- [28] G. Brona, Acta Phys.Polon.Supp. 8 763 (2015).
- [29] G. Brona, EPJ Web Conf. 141 03001 (2017).

G. Brona