

Warszawa, 10 marca 2017

dr Grzegorz Grzelak
Wydział Fizyki
Uniwersytet Warszawski
ul. Pasteura 5, 02-093 Warszawa
e-mail: grzelak@fuw.edu.pl
telefon: 88 55 29 238

Autoreferat

Spis treści

1	Dane osobowe	1
2	Wykształcenie	1
3	Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	2
4	Przebieg pracy naukowej	2
4.1	Okres związany z pracą magisterską i doktoratem	2
4.2	Okres po doktoracie i obecna działalność naukowa	3
5	Prezentacja osiągnięcia naukowego	6

1 Dane osobowe

Imię i nazwisko: Grzegorz Grzelak
Data urodzenia: 1 kwietnia 1966

2 Wykształcenie

- magister nauk fizycznych, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski
tytuł pracy magisterskiej: *Badanie własności kalorymetru BAC detektora ZEUS*
opiekun: dr Roman Walczak
rok uzyskania: 1990
- doktor nauk fizycznych, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski
tytuł rozprawy doktorskiej: *Production of Intermediate W and Z Bosons in ep Interactions at 300GeV Centre of Mass Energy (Experiment ZEUS at the HERA Accelerator)*
promotor: dr hab. Jacek Ciborowski
recenzenci: prof. dr hab. Danuta Kisielewska, prof. dr hab. Krzysztof Doroba
rok uzyskania: 1999



3 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

1. 1 X 1990 – 30 IV 1991, Laboratorium Fizyki Wzrostu Kryształów, Warszawa
2. 1 V 1991 – 30 IX 1991, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, etat inżyniersko-techniczny
3. 1 X 1991 - 30 IV 2006, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, asystent (urlop naukowy 1 II 2002 – 31 I 2005)
4. 1 II 2002 – 31 I 2005, Wydział Fizyki, Uniwersytet Oksfordzki, *Post-doctoral Research Assistant*
5. 1 V 2006 - obecnie, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, adiunkt

4 Przebieg pracy naukowej

4.1 Okres związany z pracą magisterską i doktoratem

W roku 1988, na czwartym roku studiów, zaangażowałem się w prace warszawskiej grupy konstruującej kalorymetr BAC (*Backing Calorimeter*) dla eksperymentu ZEUS powstającego w tamtym czasie przy akceleratorze HERA w ośrodku badawczym DESY w Hamburgu. W okresie przed pracą magisterską włączyłem się w opracowywanie danych kalibracyjnych uzyskanych podczas testów prototypu kalorymetru BAC przeprowadzanych za pomocą wiązki testowej w ośrodku CERN w Genewie. W ramach pracy magisterskiej zbudowałem stanowisko testowe złożone z kilkudziesięciu komór proporcjonalnych kalorymetru BAC przeznaczone do badania odczytu analogowego kalorymetru BAC (testy wzmacniaczy, układów kształtujących (*shapers*) oraz prototypu przetwornika analogowo-cyfrowego FADC, wykonywane przy użyciu danych pochodzących z promieniowania kosmicznego). W zakresie tematycznym pracy magisterskiej znalazły się także testy jednorodności komór proporcjonalnych wykonywane przy użyciu źródła promieniotwórczego strontu oraz badanie wzmocnienia gazowego i zdolności rozdzielczej komór w funkcji wysokiego napięcia za pomocą kalibracyjnego izotopu żelaza ^{55}Fe . W roku 1990 obroniłem pracę magisterską zatytułowaną „*Badanie własności kalorymetru BAC detektora ZEUS*”.

Od roku 1990 jestem członkiem współpracy ZEUS. W okresie budowy detektora uczestniczyłem w pracach instalacyjnych kalorymetru BAC w hali eksperymentalnej detektora ZEUS, w szczególności w zaprojektowaniu i ułożeniu jego okablowania (magistrale zasilające detektora BAC, kable sygnałowe i połączenia monitorujące). Na wczesnym etapie włączyłem się także w prace programistyczne nad tworzonymi wówczas algorytmami rekonstrukcji oraz symulacji Monte Carlo dla kalorymetru BAC. Obejmowały one między innymi procedury eliminacji szumów w odczycie analogowym (*noise suppression*) na podstawie analizy kształtów impulsów pochodzących z przetworników FADC oraz opracowanie schematu indeksowania wież kalorymetrycznych dla odczytu energetycznego i pozycyjnego wykorzystywanego następnie do tłumaczenia adresów sprzętowych na adresy fizyczne. W okresie tym uczestniczyłem także w pracach nad definicją geometrii detektora używaną w oprogramowaniu *off-line*.

W roku 1992 włączyłem się w prace grupy analizy fizycznej „*Exotic Physics*” zajmującej się badaniem rzadkich procesów oraz poszukiwaniem nowych zjawisk spoza Modelu Standardowego. W jej ramach przeprowadziłem pierwszą w eksperymencie ZEUS analizę produkcji bozonów pośredniczących W i Z z ich następnym rozpadem w kanale hadronowym na parę wysokoenergetycznych dżetów. W okresie tym zaadaptowałem do pracy w środowisku symulacji Monte Carlo eksperymentu ZEUS generator EPVEC [1, 2] opisujący produkcję bozonów W/Z w zderzeniach elektron-proton (ep). W

Gregor Guck

szczegółności dołączyłem do niego symulację procesów hadronizacji kwarków będących produktem rozpadu bozonów W i Z za pomocą generatora JETSET [3]. Studia tego procesu związane były także ze szczegółową analizą procesów tła QCD w przypadkach z dużą energią poprzeczną, które wykonywałem za pomocą generatorów PYTHIA [4] oraz HERWIG [5]. W miarę nagromadzenia przez akcelerator HERA wystarczającej statystyki danych analiza ta doprowadziła do wyznaczenia górnych limitów na wartość przekroju czynnego na ten proces w zderzeniach ep przy akceleratorze HERA (z uwzględnieniem efektów statystycznych i systematycznych): $\sigma_W < 9.9$ pb, $\sigma_Z < 3.3$ pb pozostających w zgodzie z przewidywaniami Modelu Standardowego wynoszącymi około $\lesssim 1$ pb. Wyniki te stały się podstawą przygotowanej przeze mnie rozprawy doktorskiej zatytułowanej *“Production of Intermediate W and Z Bosons in ep Interactions at 300GeV Centre of Mass Energy (Experiment ZEUS at the HERA Accelerator)”* [6].

W roku 1994 wykonałem konfigurację klastra stacji roboczych Silicon Graphics pracujących na Wydziale Fizyki UW i zainstalowałem na nim “produkcyjne” oprogramowanie służące do generacji przypadków Monte Carlo dla eksperymentu ZEUS (system “funnel”). Do roku 1998 prowadziłem nadzór nad ciągłością pracy tego systemu. W początkowej fazie wygenerowane przypadki MC przesyłane były do centralnego archiwum w ośrodku w DESY za pomocą pamięci taśmowej typu DLT, a z chwilą podwyższenia przepustowości sieci za pomocą łącz internetowych. W okresie tym brałem także udział w pracach nad programami identyfikacji mionów w kalorymetrze BAC.

4.2 Okres po doktoracie i obecna działalność naukowa

Po zakończeniu pracy nad doktoratem w roku 1999 podjąłem decyzję o kontynuacji działalności naukowej w eksperymencie ZEUS i kierowałem projektem wyposażenia kalorymetru BAC w mionowy układ wyzwalań. Przedsięwzięcie to opisane zostało bardziej szczegółowo w następnym rozdziale autoreferatu (Prezentacja osiągnięcia naukowego).

W latach 1999–2002 pełniłem również obowiązki *on-line* eksperta kalorymetru BAC oraz reprezentanta warszawskiej grupy ZEUS w DESY. Okres ten zbiegł się z długą przerwą techniczną w pracy akceleratora HERA (2000–2001) przeznaczoną na podniesienie jego świetlności oraz dostarczanie spolaryzowanej wiązki elektronowej do eksperymentów H1 i ZEUS. Czas ten wypełniony był także intensywnymi pracami związanymi z modernizacją detektorów pracujących przy akceleratorze HERA. W okresie tym nadzorowałem program “remontu kapitalnego” kalorymetru BAC mający na celu podniesienie jego niezawodności w związku z planowanym włączeniem go do układu wyzwalań eksperymentu ZEUS. Prace te obejmowały między innymi poprawę dystrybucji zasilania elektroniki odczytu energetycznego oraz pozycyjnego, budowę systemu chłodzenia dla modułów odczytu pozycyjnego *hitbox* oraz naprawę uszkodzonych układów kształtujących. W okresie tym, poza pracami związanymi bezpośrednio z mionowym układem wyzwalań kalorymetru BAC, pracowałem między innymi nad uruchomieniem i oprogramowaniem systemu iniekcji pulsów testowych w kalorymetrze BAC oraz wdrożeniem nowego elementu protokołu zbierania danych (tzw. mechanizm “Fast Clear”), implementowanego w okresie HERA-II w związku ze spodziewanym zwiększeniem strumienia danych dostarczanych przez zmodernizowany akcelerator. W czasie tych prac ujawniła się nieprawidłowość w pracy starego modułu elektronicznego (płyta GFLTBI: GFLT *Borad Interface*) pośredniczącego w transmitowaniu sygnałów sterujących pomiędzy kalorymetrem BAC a globalnym procesorem pierwszego poziomu układu wyzwalań GFLT (*Global First Level Trigger*). Moduł ten nie obsługiwał specyficznej sekwencji sygnałów *Accept – Busy – Fast Clear* prowadząc do desynchronizacji kalorymetru BAC z resztą eksperymentu. Pełne rozwiązanie tego problemu wymagało zaprojektowania nowego modułu GFLTBI wykonanego przy użyciu programowalnych układów klasy FPGA.

Kolejnym projektem realizowanym równolegle z budową mionowego układu wyzwalań było usprawnienie diagnostyki kalorymetru BAC. W jego ramach koordynowałem dalszy rozwój monitorowania jakości danych (*off-line DQM: Data Quality Monitoring*) oraz stworzenie od podstaw systemu monitorowania danych w czasie rzeczywistym (*on-line DQM*) wraz z mechanizmem generacji alarmów dla dyżurujących *on-call* ekspertów. Autorskim projektem była samodzielna implemen-

tacja autonomicznego programu diagnostycznego BAC_DIAG gromadzącego dane o stanie detektora, wspomagającego proces synchronizacji układu wyzwalania oraz automatycznie konstruującego pliki konfiguracyjne dla potrzeb układu wyzwalania oraz zbierania danych (*setup files*). Wszystkie te elementy zostały bardziej szczegółowo opisane w rozprawie habilitacyjnej.

W latach 2002–2005 odbywałem staż naukowy na Wydziale Fizyki Uniwersytetu w Oksfordzie na stanowisku *Post-doctoral Research Assistant*. W zakres moich obowiązków wchodziła praca nad projektem pozycjonowania elementów przyszłego akceleratora liniowego (projekt LiCAS: *Linear Collider Alignment and Survey*) oraz analiza danych pochodzących z laserowego systemu monitorowania pozycji detektora wierzchołka MVD w eksperymencie ZEUS, za który odpowiadała grupa oksfordzka uczestnicząca w projekcie ZEUS. Fakt pozostania nadal częściowo zaangażowanym w eksperyment ZEUS i częste wizyty w ośrodku DESY w celu odbywania dyżurów przy zbieraniu danych pozwoliły mi także podtrzymywać kontakt z macierzystą grupą kalorymetru BAC i kontynuować prace nad uruchomieniem oddawanych wówczas do użytku pierwszych poziomów mionowego układu wyzwalania tego detektora.

Projekt LiCAS w latach 2002–2005 obejmował prace studyjne i prototypowe nad koncepcją nowatorskiego systemu metrologicznego dedykowanego do pozycjonowania i monitorowania mechanicznej stabilności elementów przyszłego liniowego akceleratora liniowego e^+e^- . Wedle rozwijanej koncepcji autonomiczny, samobieżny pojazd (“pociąg”) RTRS (*Rapid Tunnel Reference Surveyor*) [7, 8] zawieszony na szynie biegnącej wzdłuż tunelu akceleratora i składający się z szeregu modułów (“wagonów”) dokonywać miał precyzyjnego pomiaru położenia markerów referencyjnych zakotwiczonych w betonowych ścianach tunelu. Pozycja każdego markera miała być mierzona wielokrotnie przez każdy z modułów co pozwalało uzgodnić ich wzajemne położenia i minimalizować niepewności pomiarowe. Procedura ta pozwalała na zdefiniowanie lokalnego układu odniesienia związanego z tunelem, aktualizowanego w odpowiednich odstępach czasu w celu wyeliminowania efektów związanych z ewentualną długookresową niestabilnością geologiczną podłoża. W kolejnym kroku, względem tak zdefiniowanego układu odniesienia, dokonywać miano wyznaczenia pozycji elementów akceleratora i w razie potrzeby dokonywać ich korekty. Każdy z modułów wyposażony był w podukłady pomiarowe służące do interferometrycznego pomiaru absolutnej odległości (techniką FSI: *Frequency Scanning Interferometry* [9, 10]) oraz laserowego definiowania referencyjnej linii prostej (“laserowa linijka” – LSM: *Laser Straightness Monitor*). Układ FSI dokonywał pomiaru wzajemnej odległości między “wagonami” podczas każdego postoju “pociągu” w pobliżu kolejnych markerów oraz pomiaru odległości od “wagonów” do markerów na ścianie tunelu. Układ LSM wyposażony był w szereg kamer CCD, na które za pomocą półprzepuszczalnych płytek kierowano referencyjną wiązkę laserową. Poprzez odpowiedni dobór konfiguracji geometrycznej kamer CCD uzyskiwano czułość pomiarową na przesunięcia i obroty w kierunkach prostopadłych do osi wiązki. Przewaga zaproponowanego rozwiązania nad tradycyjnymi technikami geodezyjnymi polegała na zwiększeniu precyzji pomiarów poprzez eliminację źródła niepewności związanego z refrakcją światła w powietrzu (główna wiązka laserowa układu LSM biegła w rurze próżniowej umieszczonej wzdłuż “pociągu”) oraz na istotnym skróceniu czasu całej procedury pomiarowej dzięki jej automatyzacji.

W ramach projektu LiCAS odpowiadałem za analizę efektów propagacji niepewności pomiarowych podczas konstrukcji referencyjnego układu odniesienia wzdłuż tunelu. W swoich obliczeniach stosowałem pakiet SIMULGEO [11] zaprojektowany do modelowania układów opto-geometrycznych i śledzenia propagacji promieni świetlnych (*ray tracing*). Pozwalał on również na numeryczną analizę propagacji niepewności położenia i kątów poszczególnych obiektów z uwzględnieniem korelacji wynikających z zamocowania ich na wspólnych mechanicznych stelażach. Równolegle rozwijałem też własny opis propagacji niepewności stosujący technikę Monte Carlo w modelu “błądzenia przypadkowego” (*random walk*) jaki można zastosować przy próbie wytyczenia długiej linii prostej za pomocą szeregu odcinków konstruowanych przy użyciu znacznie krótszej “linijki”. W obu tych podejściach uzyskałem spójne rezultaty, które zostały zaprezentowane na szeregu konferencji międzynarodowych poświęconych tematyce pozycjonowania akceleratorów (cykl konferencji IWAA: *International Workshop on Accelerator Alignment*) oraz na konferencjach poświęconych projektom przyszłych akceleratorów li-

niowych [13–18]. Potwierdzały one możliwość uzyskania tą metodą współosiowego pozycjonowania elementów akceleratora z precyzją rzędu $\mathcal{O}(200)$ μm (stat.) na odcinku 600 m bieżących akceleratora, co było wówczas obowiązującą wielkością zakładaną dla projektu TESLA [12]. Zastosowanie techniki Monte Carlo w modelu błędzenia przypadkowego w połączeniu z pakietem SIMULGEO pozwoliło także skonstruować realistyczny model propagacji niepewności systematycznych wynikający ze skończonej znajomości stałych kalibracyjnych rozważanego urządzenia. Wnioski uzyskane w tej fazie analizy wskazywały na potrzebę znacznego powiększenia odległości między sąsiednimi “wagonami” w układzie RTRS.

Podczas pobytu na stażu naukowym zajmowałem się również analizą danych pochodzących z laserowego układu monitorowania pozycji detektora wierzchołka MVD w eksperymencie ZEUS. Był to nowy detektor, zainstalowany w okresie modernizacji detektora ZEUS na potrzeby fazy HERA-II zbierania danych. Grupa oksfordzka zaprojektowała i zbudowała omawiany układ oraz odpowiadała za nadzór nad jego działaniem. Składał się on z zespołu sześciu wiązek laserowych biegnących wzdłuż powierzchni bocznej beczki, jaką tworzył obrys detektora wierzchołka MVD. Na drodze każdego z promieni lasera umieszczono siedem par półprzepuszczalnych paskowych detektorów krzemowych (*semi-transparent silicon sensors*). Paski detektorów w każdej parze były skrzyżowane pod kątem prostym pozwalając na pomiar dwóch współrzędnych przestrzennych plamki laserowej. System ten uruchamiany był rutynowo w przerwach między kolejnymi cyklami pracy akceleratora HERA dostarczając bogatych danych na temat stabilności mechanicznej detektora MVD. Poprzez długookresowy pomiar pozycji referencyjnych promieni laserów można było wnioskować o względnych przesunięciach i obrotach detektora wierzchołka względem centralnego detektora śladowego CTD eksperymentu ZEUS. Uzyskane dane pozwoliły na określenie “okresów stabilności” detektora MVD dla których generowane były zestawy stałych kalibracyjnych pozwalających na precyzyjne “zszycie” (*matching*) danych z detektorów MVD oraz CTD. Rezultaty uzyskane w tej analizie weszły w skład publikacji w czasopiśmie *Nuclear Instruments and Methods* opisujących konstrukcję i działanie detektora MVD [19, 20].

Po powrocie ze stażu naukowego w roku 2005 kontynuowałem współpracę z oksfordzką grupą Li-CAS, w szczególności w tamtym okresie powstały opisane powyżej studia dla propagacji niepewności systematycznych zaprezentowane na konferencji IWAA-2008. W czasie tym włączyłem się także w rozpoczęte w międzyczasie w Warszawie studia nad nową technologią pikselowych sensorów krzemowych (MIMOSA) dla zastosowań w przyszłym detektorze wierzchołka przy projektowanym akceleratorze liniowym w ramach współpracy EUNET. Dotyczyły one opracowywania danych uzyskanych za pomocą wiązki testowej w DESY, w szczególności rekonstrukcji kształtu klastrów pochodzących od elektronów penetrujących pod różnymi kątami powierzchnię sensora. Zagadnienie to ma duże zastosowanie praktyczne przy odróżnianiu depozytów pochodzących od cząstek emitowanych z punktu oddziaływania e^+e^- oraz pochodzących od cząstek tła powstającego w tzw. procesie *beamstrahlung*. Prace te zostały zaprezentowane w publikacji w czasopiśmie *Nuclear Instruments and Methods* [21].

W okresie po powrocie ze stażu dalej uczestniczyłem aktywnie w pracach współpracy ZEUS, gdzie doprowadziłem do pełnego uruchomienia wszystkich trzech poziomów mionowego układu wyzwalania kalorymetru BAC. Do zakończenia zbierania danych w czerwcu roku 2007 pełniłem obowiązki eksperta, nadzorując proces zbierania danych przez to urządzenie i uczestnicząc w bieżących naprawach serwisowych. W okresie swego pełnego funkcjonowania mionowy układ wyzwalania kalorymetru BAC zarejestrował dane odpowiadające świetlności 200 pb^{-1} co stanowiło około 60% świetlności zarejestrowanej przez detektor ZEUS w okresie HERA-II.

W okresie od połowy roku 2007 do końca 2008 odpowiadałem za przygotowanie planu oraz nadzór nad demontażem kalorymetru BAC, jego ponad pięć tysięcy aluminiowych komór proporcjonalnych oraz systemów elektronicznych. W czasie tym zorganizowałem transport części tych urządzeń do Warszawy, gdzie wykorzystywane są na Wydziale Fizyki UW służąc studentom na Pracowni Fizycznej dla Zaawansowanych.

Od zakończenia demontażu kalorymetru BAC do chwili obecnej uczestniczę w analizie danych zebranych przez eksperyment ZEUS. Zainteresowania moje koncentrują się na procesach z udziałem mionów w stanie końcowym, w szczególności na procesach ekskluzywnej produkcji mezonów

wektorowych w zderzeniach ep. W celu pełnego włączenia do tych analiz danych zebranych przez kalorymetr BAC zająłem się zagadnieniem opisu mionowej efektywności detektora BAC, którą wyznaczyłem dla poszczególnych okresów zbierania danych, dla trzech poziomów układu wyzwalania oraz dla rekonstrukcji *off-line* przy użyciu przypadków elastycznej produkcji par mionów. Wyniki te zaprezentowane zostały w dedykowanym tej analizie rozdziale monografii habilitacyjnej. Włączyłem się także do projektu „Data Preservation” [22] realizowanego w eksperymencie ZEUS a mającego na celu zachowanie dziedzictwa tego eksperymentu w postaci umożliwiającej dalszą analizę danych w momencie gdy wygaśnie już szczegółowa wiedza ekspertów odpowiedzialnych za poszczególne komponenty detektora. W związku z tym projektem, współpraca ZEUS zdecydowała o zmianie formatu przechowywanych w archiwach danych fizycznych (oraz symulacji MC) i przejście z bazy danych ADAMO [23] oraz tzw. ntupli w formacie PAW do ntupli w formacie ROOT [24]. Na potrzeby tej konwersji zaprojektowałem procedury tworzące nowe banki danych zawierające informacje pochodzące z kalorymetru BAC dotyczące odczytu energetycznego oraz pozycyjnego (m. in. dane o segmentach drutów anodowych i klastrów katodowych będących podstawą do rekonstrukcji kandydatów mionowych w kalorymetrze BAC). Dane te weszły w skład archiwum (tzw. Common Ntuples) zawierającego ostateczny zbiór danych (a także symulacji MC) uzyskanych w eksperymencie ZEUS w okresach HERA-I oraz HERA-II.

Jako redaktor prowadzący uczestniczyłem w opracowaniu publikacji dotyczącej ekskluzywnej produkcji mezonów Υ w eksperymencie ZEUS „*Measurement of the t dependence in exclusive photo-production of $\Upsilon(1S)$ mesons at HERA*” [33]. Na jej potrzeby przeprowadziłem także, na wniosek recenzentów, analizę uzupełniającą dotyczącą zdolności rozdzielczej rekonstrukcji zmiennych kinematycznych. W analizie tej po raz pierwszy wyznaczono parametr nachylenia b rozkładu zmiennej t ($\sim \exp(-b|t|)$) w modelu dyfrakcyjnym produkcji mezonu Υ , gdzie t jest kwadratem przekazu czteropędu w wierzchołku protonowym. Uzyskana wartość $b = 4.3^{+2.0}_{-1.3}$ (stat.) $^{+0.5}_{-0.6}$ (syst.) GeV^{-2} pozostaje w zgodzie z przewidywaniami opartymi na perturbacyjnych rachunkach chromodynamiki kwantowej QCD oraz z w zgodzie z wcześniejszymi pomiarami dla innych ciężkich mezonów wektorowych. Szacowany na jej podstawie tzw. gluonowy promień protonu ($R_p^{\text{gluons}} \approx 0.6 \text{ fm}$) jest mniejszy od ładunkowego promienia protonu ($R_p^{\text{em}} \approx 0.8 \text{ fm}$). Fakt ten sugeruje ciaśniejsze upakowanie gluonów w protonie niż obdarzonych ładunkiem elektrycznym kwarków. Wyniki dotyczące produkcji mezonów wektorowych w zderzeniach ep prezentowałem kilkakrotnie na konferencjach międzynarodowych, występując w imieniu współpracy ZEUS oraz łącznie H1 i ZEUS w tym wygłaszając także referaty zaproszone [25–28]. Swoim doświadczeniem na temat analizy produkcji mezonów wektorowych dzieliłem się także ze studentami i doktorantami przebywającymi w ośrodku w DESY uczestnicząc w latach 2013–2015 w cotygodniowych konsultacjach ich analiz odbywających się za pośrednictwem łączy internetowych.

5 Prezentacja osiągnięcia naukowego

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

Jako osiągnięcie naukowe przedstawiam monografię pt.:

Mionowy układ wyzwalania kalorymetru BAC

wydaną nakładem Wydawnictw Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 2017, ISBN 978-83-235-2735-0, której jestem jedynym autorem. Przedstawiona monografia opisuje projekt implementacji trójpoziomowego mionowego układu wyzwalania (*trigger*) dla kalorymetru uzupełniającego BAC (*Backing Calorimeter*) pracującego w eksperymencie ZEUS przy akceleratorze wiązek elektron-

proton HERA w ośrodku DESY w Hamburgu.

Budowa kalorymetru BAC [29], zrealizowana na początku ostatniej dekady XX wieku, była największym projektem aparaturowym przeprowadzonym w dotychczasowej historii uczestnictwa polskich grup badawczych w eksperymentach fizyki wysokich energii i cząstek elementarnych. Realizowany był on we współpracy Wydziałów Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego oraz Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Polski zespół odpowiadał za projekt tego urządzenia, konstrukcję prototypu i jego testy przy wiaźce w ośrodku CERN w Genewie. Następnie zrealizował wdrożenie na Wydziale Fizyki UW masowej produkcji sześciu tysięcy aluminiowych komór proporcjonalnych będących podstawowym składnikiem wyposażenia kalorymetru BAC oraz ich instalację w detektorze ZEUS w Hamburgu. Zespół krakowski z AGH był autorem instalacji gazowej zaopatrującej kalorymetr w mieszaninę argonu i dwutlenku węgla. Polski zespół wykonał także projekt, budowę i instalację elektroniki odczytu kalorymetru BAC, jej części analogowej oraz cyfrowej. Fizycy i informatycy z Warszawy byli również autorami oprogramowania czasu rzeczywistego służącego do zbierania danych z tego detektora (*on-line*) oraz oprogramowania *off-line* używanego do rekonstrukcji zdarzeń oraz ich symulacji techniką Monte Carlo. Do ich obowiązków należało także zapewnienie przez piętnaście lat (1992–2007) ciągłości pracy tego urządzenia i nadzór nad poprawnym zbieraniem danych.

Głównym zadaniem kalorymetru BAC, które stanowiło motywację do podjęcia decyzji o jego konstrukcji był pomiar energii kaskad hadronowych (dżetów) wpływających z centralnego kalorymetru uranowego eksperymentu ZEUS [30] oraz wspomaganie identyfikacji mionów. Detektor ZEUS posiadał wysokiej klasy, kompensujący, centralny kalorymetr opisany w monografii habilitacyjnej. Jego głębokość mierzona w drogach absorpcyjnych zapewniać miała dla 90% dżetów o maksymalnie kinematycznie dostępnej energii deponowanie 95% ich energii. Pomiar pozostałej energii wpływającej z części kaskad przewidziany był w obszarze kalorymetru uzupełniającego. Jak przedstawiono to szczegółowo w monografii, doświadczenie uzyskane w pierwszym okresie zbierania danych do roku 1999 (HERA-I) zweryfikowało te przewidywania. W miarę gromadzenia coraz większej statystyki danych nie obserwowano spodziewanej liczby przypadków zawierających istotne wpływy energii hadronowej do kalorymetru BAC. Po upływie czasu jaki minął od fazy projektowania detektorów dla eksperymentów przy akceleratorze HERA, można dziś stwierdzić, iż dostępne wówczas “na rynku” w formie symulacji Monte Carlo modele hadronizacji nie doceniały roli gluonów. Ich udział w ewolucji tzw. *parton showers* (zamianie stanu partonowego na hadrony w stanie końcowym) okazał się istotnie większy, prowadząc do podziału energii wiodących kwarków na znacznie więcej cząstek wtórnych o niższej energii i krótszym zasięgu. Skutkiem powyższego, pod koniec fazy HERA-I, kalorymetr BAC był największym podzespołem detektora ZEUS z najmniejszym udziałem w jego programie fizycznym. Spowodowało to palącą potrzebę przeformułowania zadań tego urządzenia, tak aby lepiej spożytkować jego potencjał badawczy.

W roku 1999 autor przedstawionej tu pracy obronił rozprawę doktorską poświęconą produkcji w zderzeniach ep przy akceleratorze HERA bozonów pośredniczących W i Z. Ukończenie tamtej analizy zbiegło się w czasie z długą przerwą techniczną w pracy akceleratora HERA przeznaczonej na modernizację akceleratora i pracujących przy nim detektorów. Po podjęciu decyzji o kontynuacji pracy naukowej w eksperymencie ZEUS autor poszukiwał nowej tematyki badawczej. Doświadczenie uzyskane podczas doktoratu przy analizie danych hadronowych kalorymetru BAC skłoniło go do zaproponowania uzupełnienia kalorymetru BAC o własny układ wyzwiania, ze szczególnym zwróceniem uwagi na wykrywanie procesów z produkcją mionów. Umieszczenie kalorymetru BAC daleko od punktu oddziaływania wiązek predysponowało go szczególnie dobrze do tej roli i stwarzało szansę na podniesienie czułości całego detektora ZEUS na rejestrację mionów. Możliwość taką stwarzał system odczytu pozycyjnego kalorymetru BAC, który znakomicie nadawał się do rejestracji mionów, a którego pełną instalację ukończono pod koniec okresu HERA-I. Wyposażenie go w układ wyzwiania stwarzało okazję do poprawy czułości całego eksperymentu na badanie procesów z mionami w stanie końcowym, szczególnie w obszarze nieobjętym komorami mionowymi w podstawie jarzma detektora i na granicy między przednimi detektorami mionowymi FMUON i obszarem beczki BRMUO.

W okresie od roku 1999 do zakończenia zbierania danych przez eksperyment ZEUS w roku 2007

autor kierował kilkunastoosobowym zespołem fizyków, inżynierów mechaników i elektroników oraz techników, a także studentów i doktorantów współrealizujących to przedsięwzięcie. Zrealizowanie tego ambitnego projektu jakim była zmiana profilu kalorymetru BAC w kierunku jego wykorzystania jako detektora mionowego i włączenia go do globalnego układu wyzwalania eksperymentu ZEUS wymagało w pierwszym rzędzie podniesienia niezawodności pracy tego urządzenia. Na potrzeby przeprowadzonego w okresie długiej przerwy technicznej w pracy akceleratora HERA (2000–2001) remontu kapitalnego kalorymetru BAC autor opracował szczegółowy plan określający zakres prac i odpowiedzialności poszczególnych osób. Samodzielnie włączył się także w prace nad usprawnieniem systemu dystrybucji zasilania niskonapięciowego dla modułów odczytu pozycyjnego *hitbox* oraz w prace nad projektem i instalacją systemu chłodzenia modułów *hitbox*. Zaprojektował także relacyjną bazę danych kalorymetru BAC i pozyskał do niej informacje o poszczególnych jego podzespołach. Opracował założenia systemów diagnostycznych kalorymetru BAC (specyfikacja programów monitorowania jakości danych *on-line* i *off-line* DQM, samodzielna implementacja autonomicznego systemu diagnostycznego i konfiguracyjnego BAC_DIAG, współudział w opracowaniu specyfikacji systemu iniekcji ładunku testowego (PULSER), a także jego oprogramowaniu i testowaniu). Planowane przeniesienie “środka ciężkości” tego detektora z funkcji kalorymetrycznej na rzecz rejestracji mionów wymagało także udostępnienia oprogramowania przeznaczonego do rekonstrukcji mionów w detektorze BAC w formie dostępnej dla końcowych użytkowników wykonujących analizy fizyczne w eksperymencie ZEUS (pakiet MuBAC).

Równolegle z pracami nad “rewitalizacją” kalorymetru BAC autor uczestniczył w tworzeniu specyfikacji technicznej płyt pierwszego poziomu układu wyzwalania FLT i płyty GFLTBI oraz ich testowaniu w laboratorium elektronicznym a następnie okablowaniu i uruchamianiu na detektorze. Współpracował także przy tworzeniu bibliotek oprogramowania dla płyt BAC FLT w języku programowania transputerów OCCAM. Koordynował i uczestniczył w pracach nad synchronizacją poziomu BAC FLT z głównym procesorem GFLT, w tym nad uruchomieniem protokołu *Fast Clear*. Koordynował proces włączenia kalorymetru BAC do drugiego poziomu układu wyzwalania eksperymentu (GSLT). Samodzielnie wykonał projekt i implementację algorytmu trzeciego poziomu (TLT) układu wyzwalania kalorymetru BAC oraz koordynował jego integrację z układem wyzwalania eksperymentu ZEUS.

Warstwa sprzętowa i programistyczna projektu mionowego układu wyzwalania kalorymetru BAC zostały szczegółowo przedstawione w odrębnym artykule [31] oraz w monografii habilitacyjnej. Poniżej zamieszczono krótki opis podstawowej idei leżącej u podstaw działania tego urządzenia.

Podstawą konstrukcji kalorymetru BAC były aluminiowe komory proporcjonalne wyposażone w druty anodowe i płaszczyzny katodowe, z których zbierano informacje ładunkowe pochodzące od cząstek jonizujących gaz wypełniający komory (mieszaną argonu i dwutlenku węgla). Kalorymetr BAC składał się łącznie z około 5200 komór, pogrupowanych w warstwy, zawierających w sumie 40 tysięcy drutów anodowych i 45 tysięcy płaszczyzn katodowych. Struktura ta podzielona była na większe jednostki zwane wieżami (około 200 wież drutów anodowych i około 1500 wież katodowych). W płaszczyźnie prostopadłej do drutów ich wzór tworzył siatkę umożliwiającą dwuwymiarową rekonstrukcję trajektorii przechodzącej cząstki. Pomiar trzeciej współrzędnej przestrzennej umożliwiały płaszczyzny katodowe ułożone wzdłuż drutów.

Detektor ZEUS wyposażony był w trójstopniowy układ wyzwalania o wzrastającej selektywności. Wszystkie elementy aktywne (sensory) detektora poprzez wzmacniacze podłączone były do przetworników analogowo-cyfrowych. Dokonywały one w sposób ciągły odczytu danych synchronizowanego wspólnym zegarem o częstotliwości 10 MHz wyznaczającym jednocześnie odstęp czasowy między kolejnymi przecięciami wiązek akceleratora HERA. Uzyskane w ten sposób cyfrowe dane umieszczane były w podręcznych rejestrach przesuwnych (*pipeline*) typu FIFO (*First In First Out*) gdzie oczekiwały na pozytywną decyzję pierwszego stopnia układu wyzwalania GFLT (*Global First Level Trigger*). Równocześnie części danych (tzw. dane decyzyjne układu wyzwalania) przetwarzane były przez lokalne procesory FLT a wyniki ich obliczeń przekazywane do globalnego układu GFLT. Układ ten dokonywał korelacji informacji pochodzących od różnych komponentów i generował decyzję globalną.

Poziom ten zrealizowany był sprzętowo za pomocą dedykowanych układów logicznych i redukował strumień danych do natężenia 1 kHz. W razie nadejścia pozytywnej decyzji GFLT, dane przepisywane były do pamięci typu DMP (*Dual Port Memory*) stanowiącej bufor drugiego stopnia. Część z nich przetwarzana była przez lokalne procesory SLT (*Second Level Trigger*) i przekazywana dalej do globalnego procesora GSLT. W razie pozytywnej decyzji drugiego stopnia (o maksymalnym natężeniu rzędu 100 Hz) dane z pamięci DPM przepisywane były do pamięci RAM i za pomocą sieci pracujących równolegle procesorów (transputerów) przekazywane do układu scalającego przypadek EVB (*Event Builder*). Stamtąd dane trafiały do trzeciego poziomu układu wyzwalania TLT (*Third Level Trigger*) zrealizowanego programowo na farmie szybkich stacji roboczych wykonujących uproszczone wersje algorytmów rekonstrukcji *off-line*. Dokonywały one fizycznej klasyfikacji przypadków wybierając zdarzenia o poszukiwanych sygnaturach. Końcowy strumień danych o natężeniu około 10 Hz trafiał do archiwum stanowiąc zasób tzw. surowych danych (*Raw Data*).

W przypadku pierwszego poziomu mionowego układu wyzwalania kalorymetru BAC dla każdej wieży drutowej wyliczana była sprzętowo suma aktywnych warstw i suma aktywnych komór. Proces ten odbywał się w 356 modułach odczytu pozycyjnego (*hitbox*) umieszczonych bezpośrednio na powierzchni detektora. Moduły te wyposażone były także w programowaną pamięć typu LTM (*Look-up Table Memory*) realizującą prosty algorytm rozpoznawania wzorców (*pattern recognition*). Pozwalał on na wybór trajektorii zgodnych z przejściem mionu (cząstki minimalnie jonizującej MIP). W razie jej wykrycia, w danej wieży kalorymetru ustawiany był tzw. bit mionowy $X=1$ ("mion w wieży"). Dla potrzeb układu wyzwalania kalorymetr BAC podzielony został na 13 obszarów, każdy z nich obsługiwał maksymalnie do 16 wież. Na poziomie obszarów możliwa była także korelacja odczytu pozycyjnego z odczytem energetycznym. W razie potwierdzenia na poziomie obszaru przejścia cząstki typu MIP o zadanych parametrach generowany był bit mionowy $b0=1$ ("mion w obszarze"). Końcową decyzją dostarczaną przez kalorymetr BAC do procesora GFLT było trzynastobitowe słowo zawierające (dla każdego taktu zegara) na kolejnych pozycjach kolekcję bitów $b0$ pochodzących z poszczególnych obszarów. Na poziomie GFLT informacja ta była dodatkowo korelowana z danymi pochodzącymi z kalorymetru CAL oraz detektora śladowego CTD. W ramach opisanego tu projektu wykonano płyty zbiorcze gromadzące informacje mionowe z 13 obszarów (XYREC oraz BMBAC) oraz dokonano ich połączenia z modułami odczytu pozycyjnego *hitbox*. Płyta główna BMBAC (*Bits Main BAC*) gromadziła informacje z poszczególnych obszarów i przekazywała je do procesora GFLT. Płyty powyższe dokonywały także względnej synchronizacji sygnałów pochodzących z różnych regionów detektora i realizowały bogate funkcje diagnostyczne, w tym przeprowadzały pomiar natężenia poszczególnych decyzji mionowych dla każdej wieży kalorymetru. Na drugim poziomie wyzwalania GSLT decyzje kalorymetru BAC uzupełniane były o dodatkowe informacje mające na celu odrzucanie przypadków nie pochodzących od oddziaływań ep (ich źródłem było głównie oddziaływanie protonów z gazem reszkowym w rurze akceleratora oraz promieniowanie kosmiczne).

Na potrzeby trzeciego poziomu układu wyzwalania kalorymetru BAC zaprojektowany został kod rekonstrukcyjny który dokonywał klastryzacji drutów anodowych oraz wież katodowych i następnie przeprowadzał dopasowane trajektorie mionowych do wstępnie zidentyfikowanych segmentów mionowych. Trajektorie te były kojarzone z torami w detektorze śladowym CTD co pozwalało na wyznaczenie pędu mionów oraz z wyspami energii typu MIP w kalorymetrze CAL. Ten ostatni warunek służył podwyższeniu czystości selekcji w przypadkach produkcji ekskluzywnej.

Mionowy układ wyzwalania oraz cały detektor BAC działały bezawaryjnie w okresie HERA-II i dostarczyły dane odpowiadające świetlności prawie 200 pb^{-1} w okresie pełnego funkcjonowania wszystkich trzech poziomów układu wyzwalania. Konkurował on skutecznie z komorami mionowymi eksperymentu ZEUS dedykowanymi wyłącznie do rejestracji mionów. Na najniższym, sprzętowym poziomie wyzwalania, w przednim obszarze beczki kalorymetr BAC dorównywał swą wydajnością komorom BRMUO a na trzecim poziomie wyzwalania oraz w rekonstrukcji *off-line* przewyższał we wszystkich obszarach efektywność komór FMUON oraz BRMUO. Dzięki pozyskanym przez niego danym kalorymetr BAC został aktywnie włączony do analiz fizycznych [32–35], wnosząc największy wkład w badanie procesów z produkcją cząstek zawierających ciężkie kwarki piękne b rozpadające

się następnie na miony obecne w stanie końcowym. Dla przykładu, w analizie [32], wyznaczono całkowity przekrój czynny na ekskluzywną produkcję mezonu $\Upsilon(1S)$ w oddziaływaniach γp , który wyniósł w całym objętym analizą obszarze energii w układzie środka masy systemu γp , $60 < W < 220$ GeV: $\sigma(\gamma p \rightarrow \Upsilon(1S)p) = 235 \pm 47_{-40}^{+30}$ pb. Dostępna statystyka mezonów Υ pozwoliła także na wyznaczenie po raz pierwszy zależności całkowitego przekroju czynnego w funkcji zmiennej W parametryzowanego zależnością $\sim W^\delta$ i oszacowanie wartości parametru $\delta = 1.2 \pm 0.8$. Jest to jedna z największych wartości tego parametru zaobserwowana w badaniach ekskluzywnej produkcji mezonów wektorowych. Wzrost wykładnika δ obserwowany wraz ze wzrostem masy mezonu wektorowego wiąże się z charakterem rozkładu gluonów we wnętrzu protonu i szybko wzrastającym udziałem gluonów o mniejszych wartościach zmiennej Bjorkena x , dominujących w tym obszarze kinematycznym, dla dużych wartości zmiennej W . W opisie tego zjawiska bazującym na teorii Reggego obserwowany wzrost określany jest jako przejście od wymiany „miękkiego” do „twardego” Pomeronu (IP) pomiędzy protonem a powstającym mezonem wektorowym. Więcej szczegółów na temat wyników fizycznych uzyskanych przy użyciu danych zebranych przez kalorymetr BAC przedstawione zostało w monografii habilitacyjnej.

Literatura

- [1] U. Baur, J. A. M. Vermaseren, D. Zeppenfeld: EPVEC 1.1: *A parton level Monte Carlo simulation package for W and Z production in ep collisions*
- [2] U. Baur, J. A. M. Vermaseren, D. Zeppenfeld: *Electroweak vector boson production in high-energy ep collisions*; Nucl. Phys. **B 375** (1992), 3.
- [3] T. Sjöstrand: JETSET 7.4: *Lund Monte Carlo for jet fragmentation and e^+e^- annihilation*; CERN TH-7112-93 (1994), Comp. Phys. Comm. **82** (1994), 74.
- [4] T. Sjöstrand: PYTHIA 5.7: *Lund Monte Carlo for high p_T hadron-hadron scattering*; CERN TH-7112-93 (1994), Comp. Phys. Comm. **82** (1994), 74.
- [5] G. Marchesini et al.: HERWIG 5.8: *A Monte Carlo event generator for simulating Hadron Emission Reactions With Interfering Gluons*; Comp. Phys. Comm. **67** (1992), 465.
- [6] G. Grzelak: *Production of Intermediate W and Z Bosons in ep Interactions at 300 GeV Centre of Mass Energy*, PhD Thesis, University of Warsaw 1998.
http://zeusdp.desy.de/physics/exo/ZEUS_PUBLIC/exo_theses.html
- [7] M. Schlösser: *The Rapid Tunnel Reference Surveyor for a future linear collider*, International Workshop of Accelerator Alignment (IWAA2004), CERN, Geneva, 4-7 October 2004.
- [8] A. Reichold et al.: *The LiCAS Rapid Tunnel Reference Surveyor. The status after commissioning*, International Workshop of Accelerator Alignment (IWAA-2008), KEK, Tsukuba, Japan, 11-15 February 2008.
- [9] P. A. Coe, D.F. Howell and R.B. Nickerson: *Frequency scanning interferometry in ATLAS: remote, multiple, simultaneous and precise distance measurements in a hostile environment*, Meas. Sci. Technol. **15** (2004), 2175-2187.
- [10] A. F. Fox-Murphy et al.: *Frequency scanned interferometry (FSI): the basis of the survey system for ATLAS using fast automated remote interferometry*, Nucl. Inst. Meth. **A 383** (1996), 229-237.
- [11] L. Brunel: SIMULGEO: *Simulation and reconstruction software for optogeometrical systems*, CERN CMS Note 1998/079.

- [12] TESLA, *The Superconducting Electron-Positron Linear Collider with an Integrated X-Ray Laser Laboratory*, Technical Design Report, DESY 2001-011.
- [13] G. Grzelak: *Linear Collider Alignment and Survey at the University of Oxford*, 26th Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop on nanometre-Size Colliding Beams, Lozanna, Szwajcaria, 2-6 wrzesień 2002.
- [14] G. Grzelak: *Study of the performance of the LiCAS Train*, 8th International Workshop on Accelerator Alignment (IWAA04), CERN, Genewa, Szwajcaria, 4-7 październik 2004.
- [15] G. Grzelak: *Performance Simulation of the LiCAS-RTRS Survey Train*, 2005 International Linear Collider Physics and Detector Workshop and 2nd ILC Accelerator Workshop; 14-27 sierpień 2005, Snowmass, Colorado, USA.
- [16] Grzegorz Grzelak et al.: *Simulation of the LiCAS Survey System for the ILC*, 9th International Workshop on Accelerator Alignment (IWAA06), Menlo Park, California, USA, 26-29 September 2006.
- [17] G. Grzelak: *Simulation of LiCAS error propagation*, International Linear Collider Workshop LCWS07/ILC07, 29 V – 4 VI 2007, DESY, Hamburg.
- [18] G. Grzelak: *Global simulation of the LiCAS/RTRS survey system for the ILC*, 10th International Workshop on Accelerator Alignment (IWAA08), KEK, Tsukuba, Japan, 11-15 February 2008.
- [19] K. Korcsak-Gorzo, G. Grzelak, K. Oliver, M. Dawson, R. Devenish, J. Ferrando, T. Matsushita, P. Shield, R. Walczak: *The optical alignment system of the ZEUS microvertex detector*, Nucl. Instrum. Meth. A **580** (2007), 1227-1242.
- [20] I. Brock et al.: *The design and performance of the ZEUS Micro Vertex detector*, Nucl. Instrum. Meth. A **581** (2007), 656-686.
- [21] Ł. Mączewski, M. Adamus, J. Ciborowski, G. Grzelak, P. Łuźniak, P. Nieżurawski, A. Żarnecki: *Study of cluster shapes in the Mimosa-5 pixel detector*, Nucl. Instrum. Meth. A **610** (2009), 640-643.
- [22] A. Verbytskyi: *The ZEUS long term data preservation project*, Proceedings of XXIV International Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects 11-15 April, 2016 DESY, Hamburg.
arXiv:1607.01898 [hep-ex]
- [23] S.M. Fisher, P. Palazzi: ADAMO 3.2: *Entity-Relationship Programming and Data System*, CERN Programming Techniques Group, ECP Division, CERN, Geneva 1992.
- [24] R. Brun, F. Rademakers: *ROOT – An object oriented data analysis framework*, Proceedings AIHENP'96 Workshop, Lausanne, Sep. 1996, Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. A **389** (1997), 81. <http://root.cern.ch>
- [25] G. Grzelak: *Measurement of the t -dependence in exclusive photoproduction of Υ mesons at HERA*, XIX International Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects (DIS 2011) April 11-15, 2011, Newport News, Virginia, USA.
- [26] G. Grzelak: *Vector meson production at HERA* (referat zaproszony), XI Conference on the Intersections of Particle and Nuclear Physics, May 29 - June 3, 2012, St. Petersburg, Florida, USA.

- [27] G. Grzelak: *New results on vector meson production at HERA* (referat zaproszony), XXII Low-x Meeting 2014, June 17-21 2014, Yukawa Institute, Kyoto, Japan.
- [28] G. Grzelak: *ZEUS measurement of the cross-section ratio $\psi(2S)$ to $J/\psi(1S)$ in deep inelastic exclusive ep scattering at HERA*, XXIII Low-x Meeting 2015, 1-5 September 2015, Sandomierz, Poland.
- [29] I. Kudła et al.: *Test of a prototype of the ZEUS backing calorimeter*, Nucl. Inst. Meth. **A 300** (1991), 480.
- [30] H. Abramowicz et al.: *Intercalibration of the ZEUS high resolution and backing calorimeter*, Nucl. Inst. Meth. **A 313** (1992), 126.
- [31] G. Bałuka i in.: *System odczytu i układ wyzwalania kalorymetru wspomagającego BAC dla detektora ZEUS*, Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji **48 z. 2** (2002), 359.
- [32] ZEUS Collab.; S. Chekanov et al.: *Exclusive photoproduction of Υ mesons at HERA*, Phys. Lett. **B 680** (2009), 4.
- [33] ZEUS Collab.; H. Abramowicz et al.: *Measurement of the t dependence in exclusive photoproduction of $\Upsilon(1S)$ mesons at HERA*, Phys. Lett. **B 708** (2012), 14.
- [34] ZEUS Collab.; S. Chekanov et al.: *Measurement of beauty production from dimuon events at HERA*, JHEP **02** (2009), 032.
- [35] ZEUS Collab.; H. Abramowicz et al.: *Measurement of beauty production in DIS and $F_2^{b\bar{b}}$ extraction at ZEUS*, Eur. Phys. J. **C 69** (2010), 347.

Gregor Kudła