

Wprowadzenie

W laboratorium badawczym DESY¹ w Hamburgu powstał w latach 1984–1992 pierwszy na świecie i jak dotąd jedyny akcelerator przeciwbieżnych wiązek elektronów² i protonów HERA³. Zaprojektowany on został w celu dokładniejszego poznania struktury protonu i natury oddziaływań jego składników – kwarków i gluonów. Badania te prowadzone były w nowym zakresie kinematycznym niedostępnym dla wcześniejszych eksperymentów rozpraszania leptonów na stałej tarczy złożonej z nukleonów. Posługując się przemawiającą do wyobraźni analogią z optyki, akcelerator HERA można porównać do gigantycznego mikroskopu elektronowego, w którym wiązka elektronów prześwieca wewnątrz protonu. Dzięki wysokim energiom wytwarzanym w tym urządzeniu długości fal cząstek sondujących proton były bardzo małe, co pozwalało na uzyskanie informacji o zjawiskach rozgrywających się w substrukturach protonu o rozmiarze rzędu jednej tysięcznej jego średnicy, czyli około 10^{-18} m.

W celu pełnego wykorzystania potencjału poznawczego, jaki dawał akcelerator HERA, zaplanowano przy nim cztery eksperymenty, zaprojektowane następnie i wykonane przez międzynarodowe zespoły badawcze: H1, ZEUS, HERMES oraz HERA-B. Dwa pierwsze z nich umieszczono wokół punktów przecięcia wiązek i wyposażono w detektory optymalizowane do rejestracji produktów reakcji elektronów z protonami (ep). Dwa pozostałe wykorzystywały tylko jedną z wiązek akceleratora HERA, obserwując produkty jej oddziaływania ze stałą tarczą. Eksperyment HERMES badał reakcje elektron–nukleon, a zastosowanie spolaryzowanej wiązki elektronowej i spolaryzowanej tarczy pozwalało na wgląd w procesy niedostępne przy wiązkach przeciwbieżnych bez polaryzacji protonów. Detektor HERA-B powstał z myślą o badaniu zjawisk z udziałem ciężkich kwarków pięknych, produkowanych obficie w oddziaływaniach wysokoenergetycznych protonów na tarczy w postaci cienkich metalowych drutów umieszczanych w obszarze halo wiązki.

Niemal od początku powstania projektu HERA oraz koncepcji detektorów H1 i ZEUS w prace nad ich konstrukcją włączyli się fizycy, inżynierowie i technicy z polskich ośrodków badawczych z Krakowa (Akademia Górniczo-Hutnicza, Instytut Fizyki Jądrowej PAN, Uniwersytet Jagielloński) i Warszawy (Uniwersytet Warszawski, Narodowe Centrum Badań Jądrowych⁴, Politechnika Warszawska, Instytut Fizyki PAN). Zespół polski z Narodowego Centrum Badań Jądrowych uczestniczył także w eksperymencie HERMES.

¹DESY, Deutsches Elektronen Synchrotron – Niemiecki Synchrotron Elektronowy.

²Akcelerator ten przystosowany był także do przyspieszania wiązek pozytonów. W pracy niniejszej termin „elektron” używany będzie także w odniesieniu do jego antycząstki, pozytonu, o ile nie zaznaczono inaczej.

³HERA, Hadron Elektron Ring Anlage.

⁴Ówczesnie IPJ, Instytut Problemów Jądrowych w Świerku.

Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, wspólnie z Akademią Górniczo-Hutniczą, podjął się w ramach współpracy ZEUS budowy jednego z jego podzespołów, którym był kalorymetr uzupełniający BAC (*Backing Calorimeter*). Przedsięwzięcie to było największym projektem zrealizowanym w dotychczasowej historii uczestnictwa polskich grup badawczych w eksperymentach fizyki wysokich energii. Polski zespół odpowiadał za projekt tego urządzenia, budowę prototypu i jego badanie przy wiązce testowej w ośrodku CERN w Genewie. Następnie przeprowadził wdrożenie na Wydziale Fizyki UW masowej produkcji sześciu tysięcy aluminiowych komór proporcjonalnych stanowiących głównych składników wyposażenia kalorymetru BAC oraz ich instalację w detektorze ZEUS w Hamburgu. Zespół krakowski z AGH zaprojektował i zbudował instalację gazową zaopatrującą kalorymetr w mieszanę 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 służącego do zbierania danych z tego detektora (*on-line*) i rekonstrukcji zdarzeń oraz ich symulacji techniką Monte Carlo (*off-line*). Do ich obowiązków należało także zapewnienie przez piętnaście lat ciągłości pracy tego urządzenia i nadzór nad poprawnym zbieraniem danych. W fazie budowy i uruchamiania kalorymetru BAC zespół specjalistów zaangażowanych w jego powstanie liczył około stu osób, a w końcowej fazie jego eksploatacji kilkanaście osób zapewniało jego serwis i dokonywało kontroli jakości danych.

W roku 1999 autor przedstawionej tu pracy ukończył rozprawę doktorską poświęconą produkcji w zderzeniach ep przy akceleratorze HERA bozonów pośredniczących W i Z z ich następnym rozpadem w dżety hadronowe. W swojej pracy wykorzystywał także dane zebrane przez kalorymetr BAC. Ukończenie tamtej analizy zbiegło się w czasie z długą przerwą techniczną w pracy akceleratora HERA poświęconą podniesieniu jego świetności oraz wprowadzeniu możliwości polaryzacji wiązki elektronowej w eksperymentach H1 i ZEUS. Czas ten wykorzystywany był także na modernizację detektorów pracujących przy akceleratorze. Po podjęciu decyzji o kontynuacji pracy naukowej w eksperymencie ZEUS autor poszukiwał nowej tematyki badawczej. Doświadczenie zebrane przy analizie danych hadronowych kalorymetru BAC skłoniło go do zaproponowania uzupełnienia kalorymetru BAC o własny układ wyzwalania, ze szczególnym zwróceniem uwagi na wykrywanie procesów z produkcją mionów. Umieszczenie kalorymetru BAC daleko od punktu oddziaływania wiązek dysponowało go szczególnie dobrze do tej roli i stwarzało szansę na podniesienie czułości detektora ZEUS na rejestrację mionów, zwłaszcza w obszarach niewyposażonych w dedykowane do tego celu komory mionowe. Projekt ten został dobrze przyjęty przez grupę warszawską, a następnie zaakceptowany przez władze współpracy ZEUS.

Opracowanie niniejsze przedstawia koordynowany przez autora projekt budowy i analizę sprawności działania mionowego układu wyzwalania kalorymetru BAC. 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 z Uniwersytetu Warszawskiego i Politechniki Warszawskiej współrealizujących to przedsięwzięcie. Poza pracą organizacyjną wkład własny autora w realizację tego projektu skupiał się wokół zadań programistycznych. Na etapie uruchamiania warstwy sprzętowej układu wyzwalania były to programy diagnostyczne służące do optymalizacji jego pracy i synchronizacji z układem wyzwalania całego eksperymentu. Autorskim projektem jest także algorytm i implementacja trzeciego poziomu wyzwalania kalorymetru BAC. Szczegóły tych rozwiązań zaprezentowane zostaną w kolejnych rozdziałach. Po uruchomieniu mionowego układu wyzwalania, oprócz pełnienia obowiązków związanych z eksploatacją detektora, autor uczestniczył także w pracach nad udostępnieniem do analizy fizycznej danych uzyskanych przez kalorymetr BAC (projekt *Data Preservation*).

W rozdziale 2 przedstawiony został akcelerator HERA, jego parametry techniczne i uzyskana w okresie jego działania całkowita świetność. Rozdział 3 zawiera opis detektora ZEUS, w tym opis budowy i zasad działania jego najważniejszych podzespołów. W rozdziale 4 opisano kalorymetr BAC,

jego konstrukcję mechaniczną, wyposażenie w systemy elektroniczne i oprogramowanie czasu rzeczywistego służące do zbierania danych. Dalsze rozdziały zawierają podsumowanie stanu detektora po pierwszym okresie zbierania danych (HERA-I) oraz opisują podjęty projekt modernizacji detektora BAC (rozdział 5), którego kluczowym elementem było wyposażenie go w mionowy układ wyzwala-
nia. Następnie szczegółowo opisano projekt i implementację trójpoziomowego układu wyzwala-
nia (rozdział 6) oraz przedstawiono analizę efektywności jego działania w okresie HERA-II (rozdział 7).
Rozdział 8 zawiera przegląd wybranych wyników fizycznych otrzymanych z wykorzystaniem kalory-
metru BAC jako detektora mionowego.