

**Recenzja pracy habilitacyjnej**  
***“Measurements of electroweak bosons in lead-lead collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=2.76$  TeV***  
***using the ATLAS detector at the LHC”***  
**oraz dorobku naukowego dr Iwony Grabowskiej-Bold**

W eksperymencie ATLAS przy zderzaczu LHC w CERN realizowany jest program związany z analizą zderzeń protonów, ale także badane są zderzenia jąder ołowiu, a ostatnio również zderzenia układów niesymetrycznych tj. jąder ołowiu z protonami. Treść fizyczna „ciężkojonowego programu” dotyczy wyprodukowania i badania własności niezwyklego stanu materii, w którym uwolnione są kwarkowe stopnie swobody, co odtwarza również procesy wczesnej ewolucji Wszechświata. Tym właśnie zagadnieniom poświęcona jest omawiana tu rozprawa habilitacyjna.

Wśród eksperymentów realizowanych przy LHC, tylko eksperyment ALICE dedykowany jest badaniom zderzeń ciężkich jonów, a rejestrowane zderzenia protonów traktowane są jako źródło danych referencyjnych. Eksperymenty ATLAS i CMS mają za główny cel weryfikację modelu standardowego i poszukiwanie tzw. „nowej fizyki” poprzez analizę zderzeń protonów, ale mają też programy badania reakcji ciężkich jonów, a ze względu na dużą akceptancję dotyczącą wielkich pędów poprzecznych i pospieszności, stanowią niezwykle cenne źródło informacji. Odnosi się to w szczególności do produkcji elektroślabych bozonów ( fotonów oraz bozonów  $W^\pm$  i  $Z$ ). Dlatego tematyka omawianej tu rozprawy dotyczy jak najbardziej aktualnych zagadnień fizyki reakcji relatywistycznych ciężkich jonów, a zastosowana metodyka jest adekwatna do postawionych celów.

Rozprawa ma formę liczącej 133 strony monografii, wydanej przez Instytut Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH. Składa się z 7 rozdziałów i zawiera 183 referencje. Tematyka rozprawy stanowi element badań prowadzonych przez wielonarodową kolaborację ATLAS liczącą ok. 3000 członków. Na początku monografii Autorka precyzuje więc jakie zagadnienia stanowią jej wkład do prac i wyników eksperymentu ATLAS.

Struktura i treść rozprawy ma klasyczną formę, gdzie po krótkim wstępie najpierw przedstawiona jest aktualna sytuacja w dziedzinie badań reakcji relatywistycznych ciężkich jonów, potem zaprezentowany jest eksperyment ATLAS, następnie bardziej szczegółowo opisana jest selekcja i identyfikacja cząstek istotnych dla treści rozprawy. Dalsze rozdziały zawierają informacje o uzyskanych wynikach oraz dyskusję ich znaczenia fizycznego. Podsumowanie i wnioski stanowią ostatni element rozprawy.

We wstępie Autorka ukazuje bezprecedensowy charakter badań, w których uczestniczy. Dotyczy to zarówno tematyki, gdzie badania najmniejszych obiektów materii wiążą się z najbardziej zagadkowym elementem ewolucji Wszechświata tuż po Wielkim Wybuchu, jak i możliwości badań eksperymentalnych. LHC jest bowiem największym akceleratorem na świecie i to takim, w którym osiągnęte w zderzeniach ciężkich jonów energie przekraczają więcej niż o rząd wielkości energie uzyskiwane dotychczas z pomocą zderzacza RHIC. Energie te umożliwiają także po raz pierwszy rejestrację procesów niemożliwych do zaobserwowania przy energiach niższych. Dotyczy to w szczególności produkcji „bozonów słabych”, stanowiących przedmiot analizy w rozprawie. Bozony te jednak właśnie poprzez brak ich

udziału w oddziaływaniach silnych stanowią sondę dostarczającą niezniekształconych informacji o pierwotnym stanie kreowanej w badanych zderzeniach materii umożliwiając „kalibrację” początkowych energii obiektów w tej materii oddziałujących np. dżetów. Z kolei eksperyment ATLAS poprzez możliwość rejestracji elektronów i mionów o wysokich pędach umożliwia rejestrację i poprawną identyfikację tych rzadko produkowanych cząstek.

Drugi rozdział zatytułowany „Physics motivation” stanowi w rzeczywistości przegląd aktualnego stanu wiedzy i badań w dziedzinie fizyki reakcji relatywistycznych ciężkich jonów oraz na tym tle określa motywację fizyczną dla badań stanowiących przedmiot pracy. Przedstawiony jest diagram fazowy materii jądrowej zgodny z opisem kwantowej chromodynamiki (QCD). Omówione są warunki przejścia fazowego, w którym uwolnione zostają kwarkowe stopnie swobody oraz kolejne etapy rozwoju reakcji i odpowiadające im stany materii: przdrównowagowy, plazmy kwarkowo-gluonowej, faza mieszana i hadronowa. (Można tu było wspomnieć o hydrodynamicznym charakterze procesu ekspansji.)

W rozdziale tym wprowadzone są też podstawowe pojęcia i wielkości, które określają charakterystyczne cechy badanych reakcji bazujące na formalizmie modelu Glaubera, a pozwalające określić zasadniczą wielkość stanowiącą punkt odniesienia większości analiz tj. centralność zderzenia. Zwrócono uwagę na konieczność znalezienia sygnałów przejścia fazowego, bowiem stan materii kwarkowej nie może być identyfikowany bezpośrednio. Omówiono niektóre z tych sygnałów, jak czynnik modyfikacji jądrowej dla różnych centralności zderzenia oraz proces gaszenia dżetów.

Szczególne uwagę zwrócono na produkcję oraz warunki identyfikacji elektroślabych bozonów, co stanowi przedmiot dalszych analiz. Tzw. „fotony bezpośrednie” produkowane w procesach zachodzących na poziomie partonowym mogą być bardzo użyteczną sondą wczesnych etapów reakcji ciężkich jonów. Ich wydzielanie spośród tła fotonów emitowanych w procesach wtórnych w szczególności rozpadach neutralnych mezonów nie jest jednak zadaniem prostym i wymaga zdefiniowania i sprawdzenia specjalnych procedur poszukiwania „fotonów izolowanych”.

„Słabe bozony”, czyli  $Z$  oraz  $W^\pm$  stanowią także wyjątkowo „czyste” sondy stanów początkowych bowiem tworzone są w procesach twardych, jeszcze przed uformowaniem stanu plazmy kwarkowo-gluonowej (QGP), a leptonowe produkty ich rozpadów nie uczestniczą w oddziaływaniach silnych i są efektywnie rejestrowane oraz identyfikowane w detektorze. Produkcja tych cząstek może być także ważnym sprawdzianem przewidywań QCD w których istotną rolę odgrywa funkcja rozkładu partonów dla zderzających się nukleonów (PDF) i potencjalnie możliwa modyfikacja tej funkcji dla nukleonów związanych w jądrach atomowych. Znaczenie rejestracji bozonów słabych powiększa także fakt, że nie były dotychczas rejestrowane w eksperymentach przy niższych energiach.

Rozdział trzeci prezentuje detektor ATLAS jako jeden z czterech dużych detektorów działających przy Wielkim Zderzaczu Hadronów (LHC) w CERN. Na początku podane są informacje odnoszące się do samego akceleratora oraz jego krótkiej, ale burzliwej historii zawierającej zarówno poważną awarię jak i epokowe odkrycie bozonu Higgsa. Następnie omówiona jest konstrukcja i działanie detektora wraz z bardziej szczegółowym zaprezentowaniem ważniejszych i mających znaczenie dla tej rozprawy elementów. Dotyczy to w szczególności detektora wierzchołkowego, spektrometru mionów, detektorów rejestrujących cząstki emitowane w kierunkach do przodu oraz systemu wyzwalania. Ten ostatni element jest dla treści tej pracy szczególnie ważny bowiem konieczne jest wydzielenie procesów, w których produkowane są cząstki o wielkich pędach poprzecznych i pospiesznościach. Opis kończy omówienie technicznych aspektów analizy danych i zapisu informacji w ramach światowej sieci komputerowej GRID. Elementem istotnym dla prawidłowej analizy danych jest także wykonanie symu-

lacji komputerowej odpowiedzi detektora na zachodzące w nim procesy fizyczne umożliwiające określenie jego podstawowych charakterystyk.

Rekonstrukcji i identyfikacji cząstek w detektorze ATLAS poświęcony jest rozdział następny. W pierwszej kolejności omówione jest wyznaczanie centralności zderzenia, które bazuje na pomiarach pełnej energii poprzecznej w detektorze FCal rejestrującym cząstki emitowane w kierunku do przodu. Zderzenia podzielono na 5 klas centralności i określono dla nich liczbę zderzeń binarnych oraz liczbę uczestników reakcji w ramach formalizmu modelu Glaubera. Następnie opisano szczegółowo metody rekonstrukcji dżetów oraz rejestracji fotonów bezpośrednich. Są to wielostopniowe procedury wymagające znajomości specyfiki oddziaływania rejestrowanych cząstek z poszczególnymi elementami układu detekcyjnego. Wspomagające informacje czerpane są z modelowania MC, np. w przypadku kształtu kaskad elektronowo-fotonowych. Także w przypadku rejestracji mionów i elektronów stosowano złożone procedury identyfikacji i selekcji, które szczegółowo opisane są w tym rozdziale.

W rozdziałach: piątym i szóstym zaprezentowana jest analiza danych pomiarowych oraz uzyskane rezultaty fizyczne. Już na wstępie zwraca się uwagę, że fotony bezpośrednie oraz bozony  $W$  i  $Z$  jako obiekty niekolorowe nie powinny oddziaływać z kolorowym ośrodkiem QGP. Także leptonowe produkty niemal natychmiastowych rozpadów  $W$  i  $Z$  powinny swobodnie przez ten ośrodek przenikać, dostarczając (prawie) niezaburzoną informację stanowiącą punkt odniesienia do efektów wywołanych przez silnie oddziałujące składniki materii kwarkowej. Poprawne wydzielenie interesujących nas cząstek nie jest jednak zadaniem prostym, a wyniki niekoniecznie muszą być jednoznaczne. W pracy opisane są poszczególne elementy subtelnej analizy eksperymentalnej.

Uzyskane wyniki pozwalają na wyciągnięcie bardzo wartościowych wniosków. Pierwszym jest liniowe skalowanie produkcji elektrosłabych bozonów w funkcji centralności zderzenia. Ten doświadczalny fakt będzie miał reperkusje we wszystkich dalszych badaniach materii kwarkowej, stanowiąc punkt odniesienia do analizy efektów oddziaływań silnych w egzotycznym ośrodku, jakim jest QGP. Uzyskany został po raz pierwszy i z dużą precyzją oraz dla różnych kanałów rozpadu bozonu  $Z$  i różnych zakresów pędu poprzecznego. Pozwala to na badanie korelacji z produkcją dżetów stanowiąc zarazem punkt kalibracyjny w bezwzględnej skali energii.

Pomiary takie wykonane zostały także w omawianej tu pracy. Uzyskano potwierdzenie efektu tłumienia produkcji dżetów oraz asymetrii w pędzie poprzecznym. Wyniki na razie mają charakter tylko jakościowy, ale to ze względu na stosunkowo niewielką statystykę zarejestrowanych zdarzeń co łatwo może być poprawione, kiedy LHC zacznie znów pracować z większą energią i świetlnością.

Badania produkcji i identyfikacja bozonów  $W^\pm$  w oparciu o leptonowe kanały rozpadu wymaga analizy brakującego pędu poprzecznego, w związku z brakiem możliwości rejestracji produktu rozpadu, jakim jest neutrino. Wprowadzono cały szereg warunków selekcji i wykonano subtelną analizę uzyskując spójne wyniki dla obu znaków bozonów  $W$ . Rezultaty porównano z obliczeniami teoretycznymi. Wyniki eksperymentalne nie są zgodne z obliczeniami wykonanymi w oparciu o wiodący rząd (LO) rachunku zaburzeń QCD, a stają się zgodne po wprowadzeniu poprawek pierwszego rzędu (NLO). Zaobserwowano też różnicę w produkcji dodatnich i ujemnych bozonów  $W$  w funkcji pseudorapidity, co jest wynikiem mechanizmu ich produkcji i równocześnie poprawności ich rejestracji i identyfikacji.

Pomiar produkcji fotonów bezpośrednich wymagał analiz z użyciem zarówno kalorymetru elektromagnetycznego, jak i hadronowego w celu wyeliminowania/obniżenia tła pochodzącego od procesów z produkcją wielu dżetów. Wyizolowane fotony analizowano też w układach foton-dżet, a wyniki porównano z przewidywaniami teoretycznego modelu PYTHIA. Uzy-

skano dobrą zgodność dla zderzeń peryferycznych i rozbieżności dla przypadków zderzeń centralnych. Rozbieżności te stanowią pośrednie potwierdzenie tłumienia dżetów w zderzeniach centralnych, bowiem efekt ten nie jest uwzględniony w modelu teoretycznym.

W podsumowaniu zebrane są informacje odnoszące się do całości monografii. Zwrócono uwagę, że program ciężko-jonowy LHC jest kontynuacją wcześniejszych badań prowadzonych z pomocą zderzacza RHIC, a eksperyment ATLAS jest jednym z trzech prowadzących na LHC takie badania. Podkreślono, że właściwości detekcyjne detektora ATLAS czynią go szczególnie do tego celu użytecznym, co w szczególności odnosi się do badania procesów twardych. Energie LHC o wiele większe niż w RHIC wysoka świetlność oraz możliwości detekcyjne umożliwiły po raz pierwszy zbadanie produkcji bozonów elektrosłabych w zderzeniach ciężkich jonów. Do ich poprawnej identyfikacji i wyznaczenia ich charakterystyk konieczne było jednak opracowanie dedykowanych algorytmów i procedur pomiarowych. Zebrano także krótko podstawowe wyniki, które omówione są powyżej. Na zakończenie stwierdzono, że uzyskane rezultaty można traktować jako „punkt startowy” do kontynuacji badań gorącego i gęstego ośrodka tworzonego w zderzeniach relatywistycznych ciężkich jonów. Oceniono, że nowe warunki dotyczące większych energii i świetlności LHC, które uzyskane zostaną po aktualnej przerwie, doprowadzą do zwiększenia tempa zbierania danych o czynnik około osiem. Umożliwi to uzyskanie ilościowej informacji dotyczących efektów które zostały zauważone w badaniach przeprowadzonych dotychczas i przedstawionych w recenzowanej tu monografii.

Ocena dorobku naukowego oparta jest głównie na lekturze autoreferatu. Z lektury tej wyłania się sylwetka osoby, która z pełnym zaangażowaniem, zaczynając od okresu studiów, realizuje swoje powołanie życiowe, jakim jest praca naukowa. Nie ma potrzeby powtarzać tu wielu faktów tam zawartych. Zarówno udział w wydarzeniach na uczelni i promowanie badań naukowych, jak i aktywność w działalności naukowej za granicą, liczba referatów na konferencjach, tych z „najwyższej półki”, gdzie referaty prezentowały wyniki analiz całej kolaboracji, kierowanie zespołami badawczymi i odpowiedzialność za kluczowe układy pomiarowe w eksperymentach – to wszystko nie może być dziełem przypadku, ale charakteryzuje osobę, która osiągnęła wysoki poziom naukowy oraz odpowiadającą temu pozycję w środowisku naukowym. Świadczą o tym także liczne wyróżnienia i nagrody. Potwierdzają to również dane liczbowe dotyczące liczby i rangi dorobku naukowego.

Stwierdzam jednoznacznie, że przedstawiona do recenzji monografia oraz dorobek naukowy dr Iwony Grabowskiej-Bołd spełniają wszystkie wymagania stawiane w przewodach habilitacyjnych i wnoszę o dopuszczenie jej do dalszych etapów przewodu habilitacyjnego.



Jan Pluta