

Piotr Bożek
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Akademii Górniczo-Hutniczej

Kraków 5.11.2014

Recenzja rozprawy 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, dydaktycznego i organizacyjnego
dr inż. Iwony Grabowskiej-Bołd

Eksperymenty prowadzone na zderzaczu LHC w CERN-ie stanowią najbardziej zaawansowany obszar badań w dziedzinie fizyki cząstek elementarnych. Wyniki doświadczalne uzyskane przez grupy eksperymentalne na LHC pozwoliły na pełniejsze zrozumienie podstawowych własności cząstek i ich oddziaływań. Budowa akceleratora i współpracujących z nimi detektorów jest rozciągniętym w czasie, często kilkudziesięcioletnim projektem. Skala zaangażowanych środków, a przede wszystkim potencjału i wysiłku ludzkiego, przekracza możliwości pojedynczych państw. Takie projekty powstają w ramach szerokiej współpracy tysięcy znakomitych fizyków i inżynierów. Również na etapie zbierania i analizy danych, konieczna jest sprawnie działająca współpraca wieloosobowych zespołów i komitetów przygotowujących sprzęt i oprogramowanie detektora, czy też prowadzących opracowanie danych. Zakres opublikowanych wyników podlega ścisłym regułom, a publikacje zawierają jako autorów wszystkich członków kolaboracji. W ocenie indywidualnego dorobku członków dużych grup eksperymentalnych bierze się pod uwagę obszar prac, w którym znacząco przyczynili się do przeprowadzenia analizy danych i przygotowania publikacji.

Dr Iwona Grabowska-Bołd jest zaangażowana w pracę grupy eksperymentu ATLAS na LHC, jednego z dwóch największych eksperymentów w świecie. Naturalną kolejną rzeczą jej wyniki i publikacje naukowe są wieloautorskie. Podstawą osiągnięcia naukowego przedstawionego do oceny jest monografia (wydawnictwo Expol, ISBN-978-83-63041-07-6), przedstawiająca zakres analiz eksperymentalnych otrzymanych przy znaczącym współudziale Habilitantki.

Ocena rozprawy habilitacyjnej

Tematem monografii są pomiary produkcji bozonów elektroślabych (γ , Z , W^\pm) w zderzeniach jąder ołowiu przy energii 2.76 TeV na parę nukleonów. Głównym celem badania zderzeń jądrowych przy skrajnie relatywistycznych energiach jest stworzenie materii o bardzo dużej gęstości energii i zbadanie jej własności. Energie osiągnane w zderzeniach na LHC pozwalają na wykorzystanie bozonów elektroślabych jako probierzy dynamiki zderzenia. Materia wytworzona podczas zderzenia w obszarze przekrywania jest gęsta i

silnie oddziałująca. Rozkłady emitowanych hadronów są czułe na własności tej materii, najważniejsze zaobserwowane efekty to asymetria emisji cząstek w kącie azymutalnym i pochłanianie dżetów.

Tematykę rozprawy oceniam jako bardzo ważną i aktualną. Bozony pośredniczące i fotony stanowią specyficzny rodzaj sondy dla zderzeń jądrowych. Jako cząstki słabo oddziałujące opuszczają obszar zderzenia bez wtórnych oddziaływań. Są unikalnymi probierzami wczesnych etapów produkcji cząstek w zderzeniu. Zrozumienie tych mechanizmów i odniesienie do zderzeń elementarnych jest niesłychanie ważnym elementem w analizie zjawisk zachodzących w zderzeniach jądrowych. Innym, nie mniej ważnym aspektem jest możliwość ilościowego określenia modyfikacji elementarnych procesów produkcji dla nukleonów w jądrach. Szczególnie warto podkreślić jest to, że takie procesy mogą być efektywnie badane dopiero przy energiach LHC, stanowią więc jakościowo nowy obszar badań w stosunku do programu zderzeń jądrowych na akceleratorze RHIC w BNL.

Trzy rozdziały rozprawy zawierają obszerny wstęp do fizyki zderzeń ciężkich jonów i opis detektora ATLAS. Autorka przedstawia motywację fizyczną dla badań zderzeń jądrowych przy skrajnie relatywistycznych energiach, poszukiwanie plazmy kwarkowo-gluonowej i badanie jej własności. Przedstawione są pojęcia i modele potrzebne do dyskusji produkcji bozonów elektroślabych w zderzeniach jądrowych, model Glaubera, czynnik modyfikacji jądrowej, asymetria rozkładów pędów poprzecznych par dżetów. Kolejne dwa rozdziały poświęcone są opisowi detektora ATLAS oraz procedury rekonstrukcji zdarzeń. Dla analizy bozonów elektroślabych najważniejsze elementy detektora to kalorymetr argonowy i spektrometr mionów. Wybór zdarzeń do analizy opiera się na selekcji przypadków przez wyzwalacz (trigger). Dla celów poszukiwania bozonów elektroślabych i dżetów, wybierane są zdarzenia zawierające cząstki o dużych pędach, *Hard-Probes*. Dokładnie opisany jest proces rekonstrukcji dżetów. Dżet jest tworzony na podstawie odpowiedzi w kalorymetrze i zrekonstruowanej energii poprzecznej, przy użyciu algorytmu $anti-k_{\perp}$ dla różnych promieni dżetu R . Zsumowana energia poprzeczna jest poprawiana na wkład od tła cząstek w zdarzeniu, z uwzględnieniem asymetrii azymutalnej. W estymacji współczynnika przepływu eliptycznego odrzuca się przyczynki w pobliżu stożka dżetu. Na podstawie rekonstrukcji dżetów symulowanych w programie PYTHIA wyznaczono wydajność i dokładność rekonstrukcji energii dżetu. Dla dżetów o energii > 50 GeV wydajność jest bliska 1. Identyfikacja fotonów w kalorymetrze jest trudnym zadaniem. Kolaboracja ATLAS używa kilku charakterystyk pęku wytworzonego w kalorymetrze dla odróżnienia fotonów od dżetów i hadronów. Wydajność rekonstrukcji fotonów zmienia się z centralnością zderzenia i energią fotonu, osiąga około 80%. Bozony wektorowe Z są identyfikowane przez pary mionów lub elektronów, a bozony W przez lepton w rozpadzie na mion i neutrino lub elektron i neutrino. Spektrometr mionowy pozwala na identyfikację mionów o $p_{\perp} > 4$ GeV, przy korelacji śladu do punktu zderzenia (lub do śladu w detektorze wewnętrznym). W zależności od warunków identyfikacji śladu mionu, wydajność wynosi 90-98%. Bozony Z są identyfikowane przez pary mionów w określonym zakresie masy inwariantnej, wydajność wynosi około 70% i słabo zależy od pędu. Elektrony są identyfikowane w trzech kategoriach selekcji, z wykorzystaniem charakterystyki

depozycji w kalorymetrze oraz śladów w detektorach STC i pixel. Wydajność rekonstrukcji dla par e^+e^- z rozpadu Z wynosi około 50%.

Wyniki fizyczne dla widm fotonów, Z i W produkowanych w zderzeniach Pb-Pb są przedyskutowane w rozdziale 5. Liczba zidentyfikowanych fotonów to kilkadziesiąt tysięcy. Dla fotonów przeprowadzono procedurę korekcji ilości produkowanych fotonów przez oszacowanie kombinatoryczne przypadków o zmienionych kryteriach selekcji. Dla czytelnika spoza grup eksperymentalnych najciekawszy wynik to widma w pędzie poprzecznym dla bezpośrednich fotonów. Liczba produkowanych fotonów skaluje się z liczbą zderzeń binarnych, a kształt widma jest dobrze opisany przez model JETPHOX. Porównano wyniki do obliczeń z użyciem różnych partonowych funkcji rozkładu i w różnych przedziałach pseudorapidity. Niestety niepewność danych eksperymentalnych nie pozwala na potwierdzenie modyfikacji jądrowych funkcji rozkładu w produkcji fotonów.

Bozony Z rekonstruowane są poprzez rozpady na parę leptonów, e^+e^- (772 pary) oraz $\mu^+\mu^-$ (1223 pary). Niepewności systematyczne są rzędu kilku procent. Rozkład produkowanych bozonów Z w rapidity jest doskonale opisany przez obliczenia teoretyczne NNLO przeskalowane przez liczbę zderzeń binarnych. Potwierdza to mechanizm produkcji bozonów Z w elementarnych zderzeniach partonowych i brak oddziaływań z gęstą materią wytworzoną w zderzeniu. Podobne wnioski można wyciągnąć porównując zmierzane widma w pędzie poprzecznym i obliczenia modelowe. Pomiar jest zgodny z hipotezą o zerowej wartości współczynnika przepływu eliptycznego dla bozonów Z. Dla cząstek nieoddziałujących z materią nie spodziewamy się anizotropowej emisji.

Kryteria selekcji dla przypadków z rozpadem W na mion i neutrino eliminują miony z rozpadów ciężkich kwarków. Wydajnie odrzucone są przypadki z rozpadów Z. Otrzymana próbka zawiera po około 3000 przypadków dla każdego z rozpadów W^+ i W^- na mion i neutrino oraz na elektronu i neutrino. Oba kanały rozpadu są ze sobą w zgodności, co pozwala na ich połączenie w widmach. Najważniejsze wnioski są podobne jak dla bozonów Z, liczba produkowanych W skaluje się z liczbą zderzeń binarnych. Rozkłady w pseudorapidity są w dobrej zgodności z obliczeniami NLO. Asymetria leptonowa w pseudorapidity jest zgodna z obliczeniami uwzględniającymi kinematykę rozpadu.

Potwierdzenie skalowania produkcji bozonów elektrosłabych z liczbą zderzeń binarnych i brak modyfikacji jądrowych, pozwalają na użycie tych cząstek jako znaczników w procesach z produkcją dżetów. Skorelowana emisja bozonu i dżetu pozwala na ilościową analizę modyfikacji dżetu w odniesieniu do energii znacznika (γ lub Z). Rozkład x_J , stosunku pędu dżetu do pędu bozonu, zmienia się, jeżeli część energii dżetu jest tracona w ośrodku, średnia wartość x_J maleje. Kolaboracja ATLAS przedstawiła wyniki dla korelacji dżet-foton w czterech klasach centralności. Dla zderzeń peryferycznych nie zauważa się znaczącej modyfikacji rozkładu x_J , natomiast w zderzeniach centralnych widoczne jest przesunięcie ku większej asymetrii energii, odpowiada to zmniejszeniu energii dżetu. Interpretacja tej obserwacji zakłada stratę energii dżetu w gęstym ośrodku, którego rozmiar jest większy w zderzeniach centralnych. Bardzo ciekawy pomiar dotyczy rozkładów kątowych foton-dżet. Nie obserwuje się znaczącej modyfikacji tego rozkładu, nawet dla zderzeń centralnych. Jest to ograniczenie dla modeli strat energii dżetu, strata

energii następuje bez znaczącego poszerzenia jego rozkładu kąтового. Korelacje Z-dżet można analizować w podobny sposób. Wyniki zebrane przez kolaborację ATLAS są bardzo obiecujące, wskazują na zmianę asymetrii energii dżetu i Z w zależności od centralności zderzenia. Zauważalna jest wyraźna różnica zmierzonego pędu dżetu w porównaniu z obliczeniami PYTHIA, które nie zakładają modyfikacji dżetu w ośrodku. Niestety cała próbka zawiera tylko 35 przypadków.

Dr Grabowska-Bołd wniosła znaczący wkład w analizę produkcji bozonów W i Z w zderzeniach jądrowych w eksperymencie ATLAS. Pracowała nad identyfikacją bozonów Z w rozpadach na dwa miony i dwa elektrony. W ramach kolaboracji była bezpośrednią współautorką noty konferencyjnej i ostatecznej publikacji na ten temat. Podobny wkład można przypisać Habilitantce w analizie produkcji bozonów W w zderzeniach ołów-ołów. Wkład dr Grabowskiej-Bołd znajduje potwierdzenie w opinii profesora Davida Charltona (*she is one of the key analyst of W and Z production in heavy ion collisions*). Dr Grabowska-Bołd nie brała bezpośrednio udziału w analizie produkcji fotonów, ale uczestniczyła w przygotowaniu ostatecznych raportów i publikacji dotyczących tego tematu. Poziom naukowy przedstawionej rozprawy potwierdza ekspertyzę Habilitantki w tej dziedzinie. Dla członków dużych kolaboracji, ustalenie zakresu indywidualnego wkładu w pracy zespołu jest niezwykle istotne. W tym przypadku istotny wkład dr Grabowskiej-Bołd w uzyskanie wyników przedstawionych w rozprawie nie ulega wątpliwości. Biorąc po uwagę rangę wyników naukowych zawartych w monografii i znaczący udział habilitantki w ich uzyskaniu zdecydowanie stwierdzam, że Pani dr inż. Iwona Grabowska-Bołd dokonała *znaczącego wkładu w rozwój określonej dyscypliny naukowej*.

Rozprawa jest zredagowana w języku angielskim, na bardzo dobrym poziomie językowym. Błędy są bardzo nieliczne i mało znaczące. Uważam, że wspomnianie o "mixed phase" w opisie fenomenologii zderzeń jest mylące, gdy nie ma żadnych przesłanek w eksperymentach na LHC i w obliczeniach numerycznych QCD na sieciach na obecność przejścia fazowego pierwszego rodzaju. Niektóre rysunki są wydrukowane w dużym pomniejszeniu co utrudnia odczytanie symboli. W dyskusji produkcji bozonów Z w zderzeniach Pb-Pb warto byłoby wspomnieć o wynikach kolaboracji ATLAS dla zderzeń p-Pb : zależność skalowania binarnego od przyjętego scenariusza dla modelu Glaubera oraz odstępstwo w rozkładach Z w rapidity od przewidywań.

W podsumowaniu przypomnę najważniejsze wyniki naukowe przedstawione w rozprawie:

- wyznaczenie widm fotonów i bozonów Z w pędzie poprzecznym,
- potwierdzenie skalowania liczby produkowanych bozonów elektrosłabych z liczbą zderzeń binarnych,
- stwierdzenie braku przepływu eliptycznego dla bozonów Z,
- wyznaczenie rozkładów bozonów W i asymetrii leptonowej w pseudorapidity,
- stwierdzenie modyfikacji energii dżetów znakowanych fotonami i bozonami Z w centralnych zderzeniach jądrowych.

Są to jedne z najważniejszych wyników otrzymanych w programie zderzeń jądrowych na LHC. Użycie bozonów W i Z dla określenia dynamiki zderzenia jest nowym obszarem badań w fizyce relatywistycznych zderzeń jądrowych, są to wyniki unikalne. Środowisko

fizyków zajmujących się zderzeniami ciężkich jonów oczekuje na dalsze wyniki podobnych pomiarów, przy większej energii i świetlności. Mała statystyka jest głównym ograniczeniem dla przedstawionych wyników. Jej zwiększenie wzmocni czułość zmierzonych widm bozonów elektrosłabych na modyfikacje jądrowe funkcji rozkładu.

Ocena dorobku naukowego

Dr Grabowska-Bołd aktywnie prowadzi badania w dziedzinie fizyki cząstek elementarnych w ramach dużych, międzynarodowych kolaboracji eksperymentalnych. Przed doktoratem uczestniczyła w pracach kolaboracji ZEUS, badając głęboko nieelastyczne rozpraszanie Comptona w zderzeniach elektron-proton. Od 2005 roku pracuje w eksperymencie ATLAS. Po uzyskaniu stopnia doktora Pani Grabowska-Bołd przebywała na dwóch kilkuletnich pobytach naukowych w CERN-ie. W początkowym okresie dr Grabowska-Bołd rozwijała system wyzwalania eksperymentu ATLAS. Działalność Habilitantki w grupie wyzwalacza ma zasadnicze znaczenie dla funkcjonowania eksperymentu. Przygotowała szereg algorytmów rekonstrukcji i selekcji śladów w detektorze wewnętrznym i dla przypadków z konwersją fotonu. Od chwili rozpoczęcia pracy przez akcelerator LHC Habilitantka brała udział w zbieraniu danych przez eksperyment ATLAS, gdzie nadzorowała pracę wyzwalacza w zderzeniach proton-proton, następnie uczestniczyła w przygotowaniu wyzwalacza dla eksperymentów ze zderzeniami jądro-jądro i proton-jądro. Po zebraniu danych ze zderzeń ołów-ołów, analizowała produkcję bozonów W i Z.

Dorobek publikacyjny dr Grabowskiej-Bołd jest znakomity, jest to ponad 400 publikacji, ponad 10000 cytowań, indeks $h=45$. Większość publikacji to artykuły wieloautorskie, grupy ZEUS i grupy ATLAS. W większości z nich wkład Habilitantki polegał na rozwoju ogólnych narzędzi używanych w eksperymencie. Kilka publikacji jest wyróżnionych większym wkładem indywidualnym autorki. Są to prace dotyczące głęboko nieelastycznego rozpraszania Comptona w eksperymencie ZEUS oraz produkcji bozonów W i Z w eksperymencie ATLAS. Oprócz artykułów w czasopismach naukowych, są to noty i materiały konferencyjne grupy ATLAS dotyczące produkcji bozonów elektrosłabych w zderzeniach jądrowych. Dokumentacja potwierdza szerokie i istotne zaangażowanie dr Grabowskiej-Bołd w opracowanie tych wyników, prowadziła analizę danych, przygotowała noty wewnętrzne dla kolaboracji, brała udział w przygotowaniu ostatecznych publikacji. Same wyniki były przez nią przedstawiane na szeregu znaczących konferencjach naukowych w tej dziedzinie, m. in. Quark Matter, Moriond QCD, Heavy Quarks. Wielokrotnie przedstawiała swoje analizy na zebraniach i panelach grup analizy kolaboracji ATLAS i ZEUS. W liście publikacji i w autoreferacie, nie zawsze jest jasne jak należy rozumieć deklarowany wkład procentowy autorki. Rozumiem, że duży, deklarowany wkład procentowy 70%-100% dotyczy pewnej konkretnej części wyników i analiz (np. poz. 13 w autoreferacie, poz. 9 na liście publikacji).

W tym miejscu warto uwypuklić znaczący dorobek naukowy dr Grabowskiej-Bołd, niewchodzący w skład osiągnięcia habilitacyjnego. Jest to przede wszystkim wieloletnia praca nad rozwojem wyzwalacza eksperymentu ATLAS. Ten wysiłek zakończył się sukcesem, autorka wdrożyła konkretne algorytmy identyfikacji i selekcji śladów w detek-

torze wewnętrznym, uczestniczy w rozwoju wyzwalacza dla zderzeń ołów-ołów i proton-ołów. W ostatnich latach dr Grabowska-Bołd prowadziła analizę korelacji krotności emitowanych cząstek w różnych przedziałach rapidity. Są to prace dotyczące zderzeń jądrowych i zderzeń proton-proton, a część wyników została opublikowana jako nota wewnętrzna kolaboracji. Obecnie dr Grabowska-Bołd jest zaangażowana w analizę produkcji fotonów i bozonów W w zderzeniach proton-ołów. Habilitantka jest aktywnym członkiem grupy eksperymentalnej, pracuje w wielu panelach analizy i edytorskich, przygotowuje kolejne eksperymenty i analizy danych. W świetle przedstawionego dorobku naukowego oceniam, że Pani dr Iwona Grabowska-Bołd jest aktywną, samodzielną badaczką.

Ocena dorobku dydaktycznego i organizacyjnego

Dr Grabowska-Bołd pracuje jako adiunkt na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH. Prowadzi regularnie zajęcia dydaktyczne ze studentami. Są to ćwiczenia audytoryjne i laboratorium fizyczne dla studentów fizyki i innych wydziałów AGH. W czasie pobytu w CERN-ie sprawowała opiekę nad trzema projektami dla studentów szkoły letniej. W latach 2011-14 pod jej kierunkiem powstały na WFiIS cztery prace magisterskie bądź inżynierskie. Obecnie koordynuje trzy projekty kwalifikacyjne dla nowych członków eksperymentu ATLAS.

Dr Grabowska-Bołd aktywnie uczestniczy w życiu wydziału i środowiska naukowego w Krakowie, poprzez udział w pracach organizacyjnych, promocyjnych i upowszechniających wiedzę o naukach podstawowych. Po otrzymaniu stopnia doktora dr Grabowska-Bołd była wykonawcą w sześciu projektach badawczych MNiSW lub NCN. Jako członek kolaboracji ATLAS była koordynatorem kilku projektów i członkiem komitetów wydawniczych. Oceniam dorobek organizacyjny Habilitantki jako dobry, a dydaktyczny jako bardzo dobry.

Wnioski i opinia końcowa

Na podstawie wyników naukowych przedstawionych w rozprawie i oceny wkładu Habilitantki oceniam, że Pani dr. inż. Iwona Grabowska-Bołd wniosła znaczący wkład w rozwój fizyki cząstek elementarnych. Wyniki dotyczące produkcji bozonów elektrosłabych w zderzeniach jądrowych stanowią pionierskie osiągnięcie naukowe i wejdą na stałe jako metoda badania dynamiki zderzeń jądrowych o skrajnie relatywistycznych energiach. Ocena rozprawy habilitacyjnej, dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego Habilitantki upoważnia mnie do stwierdzenia że Pani dr inż. Iwona Grabowska-Bołd jest dojrzałą, samodzielną uczoną, a jej kompetencje naukowe są bardzo wysokie. Z pełnym przekonaniem wnoszę o dopuszczenie dr Grabowską-Bołd do dalszych etapów przewodu habilitacyjnego.

Piotr Bożek

