

Kraków 29.08.2013

Dr hab. Lidia Görlich, prof. IFJ PAN
Instytut Fizyki Jądrowej
im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
w Krakowie

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Grzegorza Gacha
zatytułowanej

**Measurement of Exclusive Diffractive Dijet Production
in Deep Inelastic Scattering at ZEUS Experiment**

Mgr inż. Grzegorz Gach jest członkiem międzynarodowej współpracy ZEUS, badającej szeroką klasę procesów zachodzących w wysokoenergetycznych oddziaływaniach elektronów i protonów w oparciu o dane zebrane na zderzaczu HERA w DESY (Hamburg). Przedmiot jego pracy doktorskiej stanowi kontynuację badań nt. końcowych stanów hadronowych kreowanych w procesach dyfrakcyjnych, w których specjalizuje się krakowska grupa eksperymentu ZEUS z Akademii Górniczo-Hutniczej.

20 lat temu na zderzaczu HERA zaobserwowano, że duża część przypadków rozpraszania głęboko nieelastycznego (Deep Inelastic Scattering-DIS) (ok. 10%) charakteryzuje się brakiem produkcji cząstek w obszarze pseudorapidity wokół kierunku protonu. Są to tzw. przypadki z dużą przerwą w rapidity (Large Rapidity Gap - LRG), będące wynikiem procesów zachodzących poprzez wymianę kolorowego singletu, interpretowanych jako procesy dyfrakcyjne. Dyfrakcja w rozpraszaniu głęboko nieelastycznym na HERA zachodzi w obecności twardej skali, związanej z wirtualnością fotonu, co pozwala na badanie dynamiki procesu w ramach współczesnej teorii oddziaływań silnych czyli chromodynamiki kwantowej (Quantum Chromodynamics - QCD). Studia na HERA przyczyniły się do renesansu badań nad dyfrakcją, która uprzednio była badana głównie w miękkich procesach w oddziaływaniach hadron-hadron i miały istotny wpływ na jej zrozumienie w ramach QCD.

Szczególnie interesujące są pomiary końcowych stanów hadronowych z dyfrakcyjną produkcją mezonów wektorowych, ciężkich kwarków lub dżetów z dużym pędem poprzecznym, ponieważ obecność dodatkowej twardej skali stanowi podstawę do stosowania technik obliczeniowych perturbacyjnej QCD.

Recenzowana rozprawa została napisana po angielsku, zawiera 8 rozdziałów oraz dwa dodatki i liczy 120 stron. Jej tematyka jest bardzo ciekawa. Autor uczestniczył

w badaniach ekskluzywnej produkcji dwóch dżetów w dyfrakcyjnym procesie DIS i skoncentrował się na pomiarze rozkładu kąta pomiędzy płaszczyzną wyznaczoną przez początkowy i rozproszony elektron i płaszczyzną wyznaczoną przez parę dżetów. Zgodnie z przewidywaniami teoretycznymi kształt rozkładu kąta azymutalnego znacząco się różni dla procesu z wymianą twardego Pomerona będącego kolorowym singletem dwóch gluonów i "miękkiego" procesu, w którym dyfrakcyjna wymiana zachodzi poprzez rozwinięty Pomeron (resolved Pomeron) posiadający strukturę partonową. Na zderzaczu HERA tego typu badania nie zostały jeszcze systematycznie przeprowadzone na danych o dużej statystyce.

W rozdziale 2 przedstawiony jest formalizm teoretyczny służący do opisu głęboko nieelastycznych oddziaływań ep , ze szczególnym uwzględnieniem procesów dyfrakcyjnych. Autor wprowadza zmienne kinematyczne ważne w opisie badanych procesów oraz podaje ich interpretację fizyczną. Dla wielu wzorów w pouczający sposób pokazane są kolejne kroki przekształceń. Wprowadzenie do dyfrakcji w fizyce cząstek zawiera nawiązanie do dyfrakcji w optyce i omawia elementy teorii Reggego opisującej miękką dyfrakcję. Przedstawione są również modele używane do opisu dyfrakcyjnej produkcji pary kwark-antykwar, używane przez autora w analizie rozkładów azymutalnych dżetów. W końcowej części rozdziału autor przedstawił motywację fizyczną dla przeprowadzonych pomiarów oraz kompetentnie przedyskutował istotne dla tej analizy kryteria selekcji względem zmiennej dyfrakcyjnej β .

Rozdział 2 napisany jest zwięźle i rzeczowo. Mam jednak kilka uwag dotyczących tej części rozprawy. W rozdziale 2.2 stwierdzenie, że w procesie DIS składniki protonu z którymi oddziałuje wirtualny bozon są swobodne jest pewnym uproszczeniem, prawdziwym w prostym modelu kwarkowo-partonowym. W pełnym opisie teoretycznym konieczne jest uwzględnienie wzajemnych oddziaływań kwarków i gluonów, co prowadzi do łamania skalowania Bjorkena, potwierdzonego przez pomiary funkcji struktury protonu. W rozdziale 2.4.1 przy omawianiu modelu z rozwiniętym Pomeronom warto byłoby wspomnieć nie tylko o założeniu faktoryzacji Reggego, ale również o faktoryzacji QCD, która dla dyfrakcyjnych procesów DIS została ściśle udowodniona przez Collinsa *et al.* Przytaczając formułę (rozdział 2.4.2, wzór 2.95) na przekrój czynny w modelu z saturacją partonową Golca-Biernata i Wüsthoffa dobrze byłoby dodać, że dotyczy ona przekroju czynnego na rozpraszanie dipola kwark-antykwar na nukleonie.

W rozdziale 3 opisano krótko akcelerator HERA oraz detektor ZEUS, w szczególności te jego elementy które są istotne dla przedstawionej analizy.

Rozdział 4 zawiera informacje nt. symulowanych próbek Monte Carlo, otrzymanych przy użyciu generatorów opartych na różnych modelach fizycznych i zastosowanych w analizie do odwikłania zmierzonych rozkładów do poziomu hadronowego oraz do dostarczenia teoretycznych przewidywań w celu porównania z końcowymi wynikami. Warto zauważyć, że Pan Gach był odpowiedzialny w eksperymencie ZEUS za przygotowanie symulowanych próbek danych dla dyfrakcyjnych procesów DIS.

W kolejnych rozdziałach są przedstawione poszczególne etapy analizy danych doświadczalnych. W rozdziale 5 autor opisuje ogólną rekonstrukcję przypadków DIS obejmującą identyfikację i rekonstrukcję rozproszonego elektronu przy użyciu sieci neuronowych oraz rekonstrukcję końcowego stanu hadronowego przy użyciu tzw. obiektów EFO (Energy Flow Objects). Jakość rekonstrukcji podstawowych zmiennych kinematycznych otrzymanych przy zastosowaniu różnych metod rekonstrukcji jest zilustrowana

rozkładami odpowiednich względnych zdolności rozdzielczych oszacowanych w oparciu o dane Monte Carlo.

W tej części rozprawy omawiając metodę rekonstrukcji "poprzez dwa kąty" (double angle method) napisano, że nie korzysta się w niej z pomiarów energii. Nie jest to prawdą, natomiast metoda ta jest niezależna od absolutnej kalibracji energii w detektorze. Opisując algorytm Durham do rekonstrukcji dżetów autor podkreśla, że jego zaletą jest m.in. możliwość użycia w obliczeniach teoretycznych, po czym dyskutuje kilka mniej lub bardziej osobliwych członów. Brakuje tutaj informacji, że te rozważania dotyczą obliczeń przekroju czynnego na produkcję dżetów.

Autor przeprowadził szczegółową analizę wpływu wypromieniowania fotonu przez początkowy i/lub rozproszony elektron na parametry dżetów zrekonstruowanych w układzie środka masy $\gamma^* - Pomeron$ przy użyciu algorytmu k_T . Pokazał, że efekty promieniowania QED mają istotny wpływ na migracje przypadków dwudżetowych do obszaru, w którym kąt azymutalny dżetów jest bliski 0 lub π i wpływają na pogorszenie zdolności rozdzielczej pomiaru kąta azymutalnego dżetu i jego pędu poprzecznego. Określił także obszar przestrzeni fazowej, zdefiniowany przez cięcia względem zmiennej Bjorkena y , w którym niekorzystne wpływy promieniowania QED można zminimalizować. Szkoda tylko, że tej części analizy nie opatrzone komentarzem, czy tego typu selekcja byłaby zasadna w przedstawionej analizie.

Rozdział 6 zawiera szczegółowy opis analizowanego materiału doświadczalnego z całego okresu HERA II, warunków selekcji przypadków DIS i kryteriów wyboru próbki dyfrakcyjnej z produkcją dwóch dżetów. Dokumentacja dotycząca selekcji sygnału i redukcji tła jest przedstawiona logicznie i jasno. Zgodnie ze standardową procedurą eksperymentu ZEUS autor przestawił rozkłady kontrolne, na których są porównane zmierzone rozkłady różnych wielkości fizycznych istotnych dla selekcji danych z analogicznymi rozkładami dla symulowanych przypadków Monte Carlo. Użyty model MC dobrze lub zadowalająco opisuje surowe dane na poziomie detektora, co uzasadnia jego zastosowanie w procedurze odwikłania rozkładów doświadczalnych będących przedmiotem analizy do poziomu hadronowego.

Procedura ta została opisana w rozdziale 7. Zmierzone rozkłady kąta azymutalnego dżetów, zrekonstruowanych przy użyciu algorytmu k_T , oraz wirtualności wymienianego fotonu zostały odwikłane do poziomu hadronowego przy zastosowaniu zaawansowanych metod analizy statystycznej, stających się standardem w fizyce wysokich energii w szczególności w pomiarach, w których efekty migracji przypadków zarówno w obszarze przestrzeni fazowej analizy jak i spoza niej są znaczące. Autor zastosował algorytm TUnfold opracowany w DESY i znajdujący się w pakiecie oprogramowania ROOT, bazujący na metodzie najmniejszych kwadratów i regularyzacji Tikhonova. W ramach tej procedury Pan Gach przeprowadził także bardzo staranną analizę niepewności systematycznych, wynikających z wielu źródeł, która jest dość szczegółowo przedstawiona w rozprawie. Ciekawy byłby komentarz, czy analiza doświadczalna przy użyciu innego algorytmu do rekonstrukcji dżetów mogłaby mieć wpływ na otrzymane wyniki. Lektura tej części i poprzedniego rozdziału przekonuje, że autor posiada wiedzę i umiejętności potrzebne do uzyskania wyniku fizycznego z surowych danych doświadczalnych.

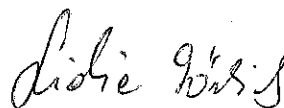
W dalszej części tego rozdziału otrzymane na poziomie hadronowym kształty rozkładów kąta azymutalnego dżetu oraz wirtualności Q^2 , wyznaczone dla dużych wartości zmiennej dyfrakcyjnej β , zostały porównane z przewidywaniami dwóch modeli: mo-

delu z rozwiniętym Pomeronom, w którym para dżetów produkuje się w procesie fuzji bozonowo-gluonowej oraz modelu z wymianą dwugluonową. Dane obarczone dużymi niepewnościami systematycznymi preferują opis teoretyczny zgodny z twardym procesem wymiany dwugluonowej. Jest to ciekawy wynik fizyczny. Konkluzja ta jest potwierdzona testem zgodności χ^2 wykonanym przy użyciu pełnej macierzy kowariancji dla rozkładów na poziomie hadronowym. Szkoda, że duże błędy pomiarowe analizowanej próbki danych zdominowane przez niepewności systematyczne nie pozwalają na bardziej precyzyjne testy QCD.

Posumowując, rozprawa doktorska mgr inż. Grzegorza Gacha została napisana rzeczowo i kompetentnie i oceniam ją pozytywnie. Jej ogólny układ jest typowy i sensowny. Pomiary doświadczalne zostały przeprowadzone bardzo starannie z zastosowaniem zaawansowanych metod analizy statystycznej. Tekst zawiera pewne pomyłki edytorskie nie wpływające na zawartość merytoryczną, wymienię tylko kilka bardziej szczegółowych uwag:

- rozdział 2 : brak definicji pseudorapidity, wzór 2.95 brak definicji zmiennej r i innych parametrów, rozdział 2.4.2 wyrażenie leading-log powinno być uzupełnione do leading-log $(1/x)$ approximation, wzór 2.88 wymaga drobnych poprawek
- rozdział 3 :nieprecyzyjna informacja o budowie tarczy eksperymentu HERMES
- Fig. 5.3 niewidoczna przerywana linia, Fig. 7.17 brak opisu linii

W konkluzji stwierdzam, że przedstawiona rozprawa spełnia ustawowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Grzegorza Gacha do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Lidia Görlich