

Prof. Antoni Szczurek  
Institute of Nuclear Physics (PAN)  
ul. Radzikowskiego 152  
31-345 Kraków

**Recenzja pracy doktorskiej pana Rafała Sikory zatytułowana:  
“Measurement of the diffractive central exclusive production in  
the STAR experiment at RHIC and the ATLAS experiment at  
LHC”**

Praca doktorska poświęcona jest centralnej produkcji kilku hadronów naładowanych w zderzeniach dwóch protonów. Dotyczy głównie eksperymentów wykonanych we współpracy STAR przy akceleratorze RHIC jak i eksperymentów we współpracy ATLAS przy akceleratorze LHC. Pan Rafał Sikora był osobą która brała udział w tych eksperymentach jak również dokonała opracowania danych eksperymentalnych. Praca pana Sikory posłużyła do przygotowania publikacji naukowej grupy STAR jak też będzie podstawą pracy grupy ATLAS.

Przedstawiona do recenzji praca jest bardzo obszerna (273 strony). Składa się z czterech części: Wstępu, części poświęconej eksperymentowi STAR, części poświęconej eksperymentowi ATLAS jak i części w której przedstawiono ostateczne wyniki.

Omówię pokrótce poszczególne części dysertacji.

We wstępie przedstawione podstawy teoretyczne związane z dyskutowaną tematyką takie jak: elementy Modelu Standardowego, niektóre elementy związane z silnym oddziaływaniem, podstawowe elementy teorii Regge. Obszerniejszy rozdział poświęcono tak zwanym procesom dyfrakcyjnym różnego typu. Omówiono rolę tak zwanego pomeronu – obiektu fenomenologicznego używanego do opisu tego typu procesów. Przedstawiono główną klasyfikację procesów dyfrakcyjnych. Skoncentrowano się na tak zwanych procesach centralnej produkcji. Podano roboczą definicję tego typu procesów. Pokrótce omówiono efekty absorpcyjne, które prowadzą do ”zniszczenia” tak zwanej przerwy w pospieszności. Krótko omówiono stany związane zwane kulami gluonowymi oraz poruszono zjawisko mieszania stanów gluonowych i stanów typu kwark-antykwar. Osobny rozdział poświęcono modelom dyfrakcyjnej produkcji kontinuum dwupionowego jak i stanom rezonansowym. Nie do końca poprawny jest wzór (2.5). De facto jest

znacznie więcej niezależnych zmiennych kinemtycznych niż napisano. W rozdziale tym przedstawiono istniejące programy Monte Carlo. Następny rozdział dotyczy odniesienia się do wcześniejszych danych eksperymentalnych. Jest on nieco skrótowy. Na koniec autor przedstawił główne cele przedstawionej do recenzji pracy.

Następna część poświęcona jest eksperymentowi STAR i szczegółom związanym z pomiarem procesów centralnej produkcji. Jest to najobszerniejsza część całej rozprawy. Widać tu ogromne zaangażowanie autora w przedstawione szczegóły analizy. Widać również, że autor był kluczową osobą w analizie danych. Rozdział 5. przedstawia ogólny opis zderzacza RHIC, detektora STAR. Omówiono komorę projekcji czasowej, tak zwanych "beam beam counters", rolę kalorymetrów "zero-degree", metodę czasu przelotu oraz system tak zwanych rzymskich garnków. Rozdział 6. poświęcony jest rekonstrukcji zdarzeń i podzielony jest na krótsze podrozdziały poświęcone detektorowi centralnemu oraz rekonstrukcji w detektorze RP. Rozdział 7. przedstawia warunki logiczne użyte w opracowaniu danych eksperymentalnych. Jak dla teoretyka ten rozdział nie jest zbyt przejrzysty ponieważ używa różnych skrótów i bardzo specyficznego nazewnictwa. Rozdział 8. poświęcony jest symulacjom typu Monte Carlo. Widać z niego że autor wykonał na tym polu ogromną pracę. Przedstawił istniejące narzędzia oraz ich twórcze dostosowanie do przeprowadzonego eksperymentu.

Do zrozumienia eksperymentów (modelowanie sygnału oraz tła) zostało użytych wiele programów. Mam wrażenie, że wkład włożony w tego typu narzędzia umożliwił autorowi znakomite zrozumienie samego eksperymentu oraz umożliwił panowanie nad bardzo dużą ilością szczegółów różnego typu. Specjalny rozdział poświęcony jest identyfikacji cząstek. Warto wspomnieć w tym kontekście, że znakomita identyfikacja cząstek jest mocną stroną prezentowanego eksperymentu. Przedstawiono symulację śladów cząstek. Obszerny rozdział 9. poświęcony jest selekcji zdarzeń. Na wstępie przedstawiono długą listę cięć definiujących zdarzenie. Cięcia te związane są z położeniem pierwotnego werteksu, rekonstrukcją w komorze TPC, rekonstrukcji torów w detektorach RP używanych do pomiaru protonów emitowanych do przodu lub do tyłu. Osobny rozdział poświęcono dopasowaniu werteksów uzyskanych z TPC i RP. Przedstawiono warunki identyfikacyjne związane z typem cząstek. W końcu przedyskutowano cięcia pozwalające na nałożenie warunku na ekskluzywność procesu (cięcia związane z brakiem  $p_T$ ). Ten warunek jest wyjątkowy w porównaniu do

innych tego typu eksperymentów przeprowadzanych wcześniej, czy nawet równoległe. Rozdział 10. poświęcony jest omówieniu różnego rodzaju zanieczyszczeń spowodowanych przez kanały nieinkluzywne, spowodowane złą (błedną) identyfikacją cząstek. Autor próbuje wyznaczyć (oszacować) tego typu efekty. Dla przykładu nieekskluzywne tło może być oszacowane patrząc na rozkład w tak zwanym brakującym pędzie. Ekstrapolacja zachowania z większych brakujących pędów do zera jest proponowaną metodą oszacowania nieekskluzywnego tła. Autor wprowadza również pojęcie tak zwanego ekskluzywnego tła wynikającego ze złej identyfikacji cząstek (na przykład kaony błędnie zidentyfikowane jako piony, itp.). Efekty zilustrowano na dwu-wymiarowych mapach pędów  $\pi^+\pi^-$ ,  $K^+K^-$  czy  $p\bar{p}$ . Zaprezentowany efekt poprawek wydaje się być mały. Wyniki oszacowania tła znalazły się w tabeli 10.1. Zależą one od typu cząstek i są najmniejsze dla kanału  $\pi^+\pi^-$ . W rozdziale 10. sprobowano opisać (zrozumieć) tło przy pomocy symulacji Monte Carlo. Wydaje się więc, że tło jest dobrze zrozumiane. Rozdział 11. jest szerokim omówieniem szeregu poprawek. Dotyczy to wydajności trygera, wydajności rekonstrukcji śladów w TPC i RP, akceptancji systemu TOF i innych. Wszystkie te akceptancje są pokazane osobno w różnych zmiennych kinematycznych, na wykresach jedno- i dwu-wymiarowych. Na ogół nie są one zbyt duże. Trochę brakuje mi podsumowania jak duży jest sumaryczny efekt wszystkich poprawek oraz dyskusji czy są one niezależne. Chętnie usłyszałbym takie omówienie podczas obrony. Chodzi o porównanie zupełnie niepoprawionych danych i danych poprawionych o wszystkie efekty. Niepewności systematyczne dyskutowane są w rozdziale 12. dla różnych indywidualnych procesów. Podsumowanie wszystkich efektów przedstawione jest na rysunku 12.33. Całkowita niepewność jest rzędu 10 % dla kanału  $\pi^+\pi^-$  i 15 % dla kanału  $p\bar{p}$ .

Część III poświęcona jest eksperymentowi ATLAS. W rozdziale 13. omówiono sam zderzacz hadronowy, tak zwany wewnętrzny detektor, absolutny pomiar świetlności i system trygerowania. W rozdziale 14. dyskutowana jest rekonstrukcja zdarzeń dla centralnego detektora i detektora ALFA. W rozdziale 15. omówiono zestaw danych eksperymentalnych i zestaw danych typu Monte Carlo. Szczegóły selekcji danych i zestawienie głównych cięć przedstawione są w rozdziale 16. Zakres w rapidity eksperymentu ATLAS jest znacząco większy niż ten dla eksperymentu STAR. Podobnie jak dla eksperymentu STAR dyskutowane są indywidualne części systemu detekcji. Nieco inny jest zakres cięć na składowe pędów protonów emitowanych do przodu czy do tyłu. W większości przypadków porównano wyniki eks-

perymentalne i wyniki uzyskane w symulacjach Monte Carlo. Uzyskano całkiem niezłą zgodność. Cięcia na brakujący pęd są podobne jak dla eksperymentu STAR. W rozdziale 17. przedyskutowano tło pochodzące od innych procesów. Wyniki wydają się być analogiczne do tych uzyskanych dla eksperymentu STAR. W tabeli 17.1 zestawiono oszacowanie procesów nieekskluzywnych dla różnych kanałów końcowych:  $\pi^+\pi^-$ ,  $2\pi^+2\pi^-$ ,  $3\pi^+3\pi^-$  oraz  $4\pi^+4\pi^-$ . Udział nieekskluzywnego tła silnie zależy od kanału końcowego i jest stosunkowo mały dla kanału  $\pi^+\pi^-$ . Rozdział 18. poświęcony jest poprawkom związanym z różnymi częściami aparatury pomiarowej. Poszczególne poprawki przedstawione są pojedynczo na rysunkach jedno- i dwu-wymiarowych. Rozdział o niepewnościach pomiarowych zamyka część III. Krótko omówiono niepewności związane z kilkoma ważnymi przyczynami. Na rysunku 19.3 przedstawiono zestawienie wszystkich niepewności pomiarowych. O ile dobrze rozumiem ten wynik, niepewności pomiarowe dla eksperymentu ATLAS są mniejsze niż ich odpowiednik dla eksperymentu STAR.

Część IV obejmuje prezentację ostatecznych wyników takich jak rozkłady w masie niezmienniczej wytworzonego centralnie systemu, rozkładu w pospieszności systemu, we względnym kącie azymutalnym pomiędzy protonami, w rozkładzie w  $|t_1 + t_2|$  czy rozkłady kątowe w tak zwanym układzie Collinsa-Sopera. Rozkłady w kącie azymutalnym silnie zależą od akceptancji RP dla eksperymentu STAR i akceptancji detektora ALFA dla eksperymentu ATLAS. Wyniki z eksperymentu STAR dotyczą produkcji par  $\pi^+\pi^-$ ,  $K^+K^-$  i  $p\bar{p}$ . Podrozdział 20.1.1 dotyczy produkcji par  $\pi^+\pi^-$ . W rozkładach masy niezmienniczej wyraźnie widoczne są stany rezonansowe. Dla systemu  $\pi^+\pi^-$  są to  $f_0(500)$ ,  $f_0(980)$ ,  $f_2(1270)$ . Na rysunkach pokazano wyniki obliczeń uzyskanych przy pomocy generatorów GENEX czy DIME. Wyniki tych obliczeń nie tłumaczą skomplikowanych widm masy niezmienniczej centralnego systemu ponieważ nie uwzględniają produkcji stanów rezonansowych. Niektóre rozkłady pokazano w różnych oknach innych zmiennych kinematycznych. I tak rozkłady kątowe w układzie CS, w  $\cos(\theta_{CS})$  i  $\phi_{CS}$ , pokazano dla różnych przedziałów w masie niezmienniczej. Rozkłady te raczej słabo zależą od przedziału masy niezmienniczej. Ciekawi mnie czy oscylacje w  $\phi_{CS}$  mogą być związane z jakąś nieuwzględnioną akceptancją aparatury, czy są efektem związanym z fizyką sprzężenia dwóch pomeronów do stanu  $\pi^+\pi^-$ . Dla różnych stanów rezonansowych te rozkłady mogą w zasadzie być różne. Wobec tego przedstawione rozkłady mogą być użyte do wyznaczenia (zrozumienia) odpowiednich sprzę-

żeń. W podrozdziale 20.1.2 pokazano podobne rozkłady dla produkcji par  $K^+K^-$ . W tym przypadku wyraźnie widać stany rezonansowe  $f_2(1270)$  i  $f_2(1525)$ . W podrozdziale 20.1.3 pokazano rozkłady dla produkcji par  $p\bar{p}$ . Choć statystyka nie jest najlepsza, wyniki te są bardzo ciekawe gdyż nie były dotychczas zmierzone we wcześniejszych eksperymentach. Nie widać tu wyraźnie stanów rezonansowych, choć takie są dopuszczalne z punktu widzenia teorii. Ciekawy jest wynik w masie niezmienniczej dla różnych zakresów  $\Delta\phi$ . Dla rozkładu masy niezmienniczej z ograniczeniem  $\Delta\phi > 90^\circ$  widać podniesienie w okolicach  $M_{p\bar{p}} \sim 2.3$  GeV. Czy widzimy tu ślad kuli gluonowej? Korzystne byłoby dwukrotnie gęstsze binowanie w masie  $M_{p\bar{p}}$ . Być może jest to fluktuacja statystyczna.

Podrozdział 20.2 dotyczy wyników uzyskanych przez grupę badawczą ATLAS na ekskluzywną produkcję kilku naładowanych pionów. Ten rozdział jest bardzo ciekawy ponieważ tego typu wyniki nie były dotychczas prezentowane w literaturze. Dla teoretyka szczególnie ciekawe są wyniki na produkcję centralną  $2\pi^+2\pi^-$  (podrozdział 20.2.1). Widzimy tutaj dwa wyraźne stany rezonansowe:  $f_1(1285)$  (mezon aksjalno-wektorowy) i  $f_0(1500)$  (kandydat na kulę gluonową o spinie 0). Mechanizm ekskluzywnej produkcji czterech naładowanych pionów, w tym wspomnianych stanów rezonansowych, wydaje się być w zasięgu obliczeń teoretycznych. W tym roku nasza grupa pokazała, jak wyliczać przekroje czynne na produkcję mezonu aksjalno-wektorowego  $f_1(1285)$ . Wynik uzyskany i prezentowany w tej dysertacji będzie więc cenny dla weryfikacji naszego podejścia teoretycznego. Żaden z przedstawionych modeli nierezonansowego tła z powszechnie używanych generatorów nie opisuje uzyskanych danych eksperymentalnych. Cenne wydają się też rozkłady różniczkowe w pospieszności systemu czterech pionów, w kącie azymutalnym pomiędzy wychodzącymi protonami czy w  $|t_1 + t_2|$ , przedstawione dla różnych okien masy niezmienniczej systemu czterech pionów. W następnych rozdziałach pokazane są podobne wyniki na produkcję  $3\pi^+3\pi^-$  (podrozdział 20.2.2) i  $4\pi^+4\pi^-$  (podrozdział 20.2.3). Według mojej wiedzy są to zupełnie unikalne dane. Nie widać oczywistych stanów rezonansowych w rozkładach masy niezmienniczej systemu sześciu czy ośmiu naładowanych pionów. Dane te mogą posłużyć do testowania generatorów ogólnego zastosowania takich jak PYTHIA. W tabeli 20.1 zestawiono przeciętne przekroje czynne na produkcję różnych stanów produkowanych centralnie. Przekroje czynne spadają z krotnością stanu centralnego. Ciekawe jednak byłoby porównanie przekrojów czynnych w tym samym oknie masy niezmienniczej, na przykład powyżej 2.5

GeV, gdzie nie oczekujemy stanów rezonansowych.

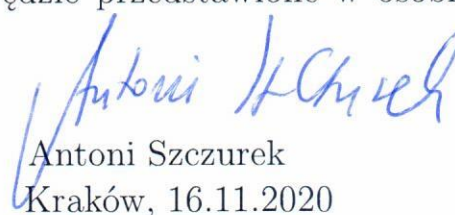
Rozdział 21. poświęcony jest próbie fitowania rozkładów masy niezmienniczej uwzględniając fenomenologiczne tło (prosta parametryzacja) i stany rezonansowe (wzór Breita-Wignera). Ta standardowe podejście nie ma jednak uzasadnienia teoretycznego i sztucznie zwiększa rolę efektów interferencyjnych. Z punktu widzenia teorii trzeba by uwzględnić amplitudy które zależą od wszystkich niezależnych zmiennych kinematycznych, których dla reakcji typu  $2 \rightarrow 4$  jest aż 8. Taka analiza jest jednak praktycznie niemożliwa i zdani jesteśmy na obliczenia modelowe. Zaletą przedstawionej analizy jest możliwość uwzględnienia rozmycia eksperymentalnego. Uzyskano dobre dopasowanie do danych eksperymentalnych na produkcję  $\pi^+\pi^-$ . Wykonano osobne fity dla  $\Delta\phi < 45^\circ$  i  $\Delta\phi > 135^\circ$ . Parametry fitu zestawiono w tabeli 21. Mimo, że nie w pełni poprawna z punktu widzenia teoretycznego, analiza ta jest użyteczna, gdyż pozwala zlokalizować stany rezonansowe. Znalaziono optymalne masy i szerokości rezonansów. Szczególnie ciekawe jest potwierdzenie wystąpienia stanu rezonansowego  $f_0(1500)$  będącego kandydatem na kulę gluonową. Wyniki fitu porównano z obliczeniami przy pomocy istniejących generatorów. Podobną analizę wykonano dla produkcji  $2\pi^+2\pi^-$ . Zidentyfikowano stan rezonansowy  $f_1(1285)$ . Moim zdaniem bardzo cenny jest wynik w tabeli 21.3 gdzie pokazano przekrój czynny na ekskluzywną produkcję  $f_1(1285)$  w dwóch przedziałach  $\Delta\phi$ . Będziemy chcieli uzyskać taki wynik w ramach zaproponowanego przez nas modelu sprzężeń pomeron-pomeron- $f_1$ . Takie porównanie będzie więc znakomitym testem modelu. W rozdziale 22. przedyskutowano jak wyznaczyć efektywną wartość tak zwanego "slope" (nachylenia rozkładu w  $t_1$  czy  $t_2$ ) używając parametryzacji eksponencjalnej. Pokazano jak wartość takiego parametru zależy od  $\Delta\phi$  czy przedziału masy niezmienniczej. Obliczenia modelowe powinny wytłumaczyć przedstawione tu zależności i w tym sensie wyniki te są interesujące i stanowią wyzwanie dla modeli teoretycznych.

Podsumowanie zamyka rozprawę. Podsumowanie jest formą rozszerzonego abstraktu.

Do pracy dołączona jest bogata literatura świadcząca o znajomości tematu i trzy załączniki mające charakter raczej techniczny.

Przechodzę teraz do podsumowania mojej recenzji. Przedstawiona mi roprawa doktorska spełnia z nawiązką wszystkie wymagania ustawowe i zwyczajowe. Praca jest niezwykle bogata. Przedstawione wyniki są moim zdaniem znacząco lepsze niż wszystkie dotychczasowe znane z literatu-

ry i stanowią znakomitą bazę do analiz teoretycznych, które z pewnością zostaną wykonane po ich opublikowaniu. Publikacja dotycząca eksperymentu STAR została już opublikowana i moim zdaniem jest ona w dużej mierze oparta na przedstawionej mi do recenzji dysertacji. Ze swojej strony oczekuję na podobną publikację grupy ATLAS. Z całym przekonaniem wnoszę o dopuszczenie pana Rafała Sikory do dalszych etapów procedury doktorskiej. Ze względu na ogromny wkład pana Sikory w przygotowanie tych znakomitych danych wnoszę jednocześnie o wyróżnienie tej rozprawy doktorskiej. Uzasadnienie wyróżnienie będzie przedstawione w osobnym dokumencie.



Antoni Szczurek

Kraków, 16.11.2020