



Kraków, 4 grudnia 2023

dr hab. Mariola Klusek-Gawenda, prof. IFJ PAN

tel: 12-662-8185

e-mail: mariola.klusek@ifj.edu.pl

Recenzja pracy doktorskiej pana mgr. inż. Krzysztofa Janasa
pt. *Measurement of diffractive jets production in proton-proton*
collisions with ALFA detectors in the ATLAS experiment
wykonanej pod kierunkiem promotorów:
pana prof. dr. hab. inż. Mariusza Przybycienia
i pana dr. inż. Leszka Adamczyka.

Praca będąca przedmiotem recenzji została napisana w języku angielskim i składa się 175 stron. Prezentacja uzyskanych wyników badań została przedstawiona w dziewięciu rozdziałach uzupełnionych jednym dodatkiem, zawierając 150 schematów i wykresów oraz 17 tabel w tekście właściwym (plus 5 tabel w dodatku). Autor przy pisaniu rozprawy korzystał ze 110 źródeł bibliograficznych. Praca jest napisana z dużą starannością.

Głównym celem rozprawy było przedstawienie różniczkowych przekrojów czynnych dla dyfrakcyjnej produkcji dżetów w zderzeniach proton-proton. Otrzymane rozkłady mają stanowić uzasadnienie konieczności korekty modeli Monte Carlo, które implikują oddziaływania dyfrakcyjne. Recenzowane w rozprawie badania stanowią pierwszą analizą wykorzystującą znakowanie protonów w dyfrakcyjnym pomiarze di-dżetów w detektorze ATLAS, co znacząco poprawia selekcję w porównaniu z analizą LRG (ang. Large Rapidity Gap).

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie teoretyczne do tematyki rozprawy. Połączony od przedstawienia kompaktowych informacji o Modelu Standardowym skupiając się na oddziaływaniach silnych, hadronizacji oraz definicji dżetów, doktorant przeszedł do klasyfikacji procesów dyfrakcyjnych. Praca zawiera szczegółowy opis zmiennych kinematycznych, które posłużą w dalszej części rozprawy do prezentacji wyników. Rozdział uzupełniony jest o opis i porównanie trzech fenomenologicznych modeli Monte Carlo, które powszechnie używa się do generacji przypadków z produkcją dżetów. Do tej pory nie określono jednoznacznej definicji dżetów. Powszechnie wiadomo natomiast, że poprawna interpretacja tego obiektu musi zawierać informacje o typie wejścia, schemacie rekombinacji oraz algorytmie dżetu. Typowym schematem rekombinacji jest schemat czterowektorowy, który wyraża czteropęd dżetu jako sumę czte-



ropędów składników. Jednym z najczęściej stosowanych algorytmów do klastrowania dżetów jest algorytm grupowania rekombinacji sekwencji anty- k_t autorstwa M. Cacciari, G.P. Salama i G. Soyez.

Drugi rozdział rozpoczyna się od krótkiego wprowadzenia do układu eksperymentalnego, który zastosowano w trakcie analizy. Dane prezentowane w rozprawie zebrano podczas kampanii dyfrakcyjnej ALFA (ang. *Absolute Luminosity For ATLAS*) w październiku 2015 r. przy użyciu dedykowanej optyki wiązki protonów w detektorze ATLAS, gdzie energia w układzie środka masy: $\sqrt{s} = 13$ TeV. Pomiar przeprowadzono na danych o scałkowanej świetłości równej 725 nb^{-1} . Autor wprowadza przepis na możliwość porównania wyników eksperymentalnych z przewidywaniami z modeli MC. Niektóre wyniki MC używa się do badania akceptancji i efektów detektora. Do przygotowania próbek MC do analizy pojedynczej dyfrakcji użyto dwóch symulacji: Pythia 8 i EPOS. Wszystkie próbki zostały przefiltrowane tak, by jeden proton był w obszarze $\xi^P < 0.2$ i co najmniej dwa dżety z wiodącym dżetem miały $p_T > 12$ GeV. Dodatkowa próbka została przygotowana do analizy dyfrakcji centralnej przy wykorzystaniu generatora Herwig. Tutaj występują dodatkowe wymagania dotyczące pomiaru drugiego protonu.

Rozdział trzeci i czwarty dedykowany jest detektorowi ALFA. Po szczegółowym zaprezentowaniu charakterystyki technicznej detektora, autor skupił się na spisaniu pełnej procedury kalibracji detektora. Pomiar dżetów ograniczony jest przez akceptancję geometryczną detektora. Podano również instrukcję na oszacowanie wpływu niepewności na analizę dyfrakcyjną, gdzie zaleca się przeprowadzenie kompletnej analizy przy użyciu ustawień dla zestawów: horyzontalnego, wertykalnego i rotacyjnego.

W rozdziale piątym czytelnik ma możliwość zapoznania się z opisem poprawek dżetowych bazując na ustawieniu detektora ALFA. Przedstawiono szczegóły kalibracji dedykowanej dżetom, co stanowi autorski pomysł mgr. inż. Pawła Janasa. Algorytm anty- k_t jest używany do formowania dżetów w danych i symulacjach. Zazwyczaj informacją wejściową w algorytmie jest depozyt energii w kalorymetrze. Ze względu na efekty detektora, energia zrekonstruowanych dżetów różni się od energii odpowiadających im dżetów na poziomie stabilnych cząstek. Założono, że mierzone są protony, których względna strata energii mieści się w przedziale: $\xi = (0.002 - 0.16)$ i których kwadrat przekazu czteropędu ma wartość: $0.02 \text{ GeV}^2 < |t| < 1.00 \text{ GeV}^2$. Na podstawie informacji o wydajności zastosowanego trygera dżetowego określono pęd poprzeczny i pseudorapidity dżetów. Dla pierwszego dżetu jest to: $p_T^{LJ} > 30 \text{ GeV}$ i $|\eta^{LJ}| < 3$, a dla drugiego: $p_T^{SJ} > 20 \text{ GeV}$ i $|\eta^{SJ}| < 4$.

W rozdziale szóstym autor skupia się na opisie tła, który towarzyszy analizie produkcji dżetów. Wymodelowany wkład od tła musi być odjęty od rozkładu danych. Autor opisuje dwa źródła tła: (1) tło przypadkowe dotyczy nakładających się dwóch



lub więcej niepowiązanych ze sobą zdarzeń w centralnym detektorze ATLAS i w detektorze ALFA, (2) tło pochodzi od pojedynczych procesów nieelastycznych, takich jak produkcja di-jetów w niedyfrakcyjnym zdarzeniu i w podwójnej dyfrakcji, ze względu na powstanie protonów w kaskadach hadronowych. Ten rodzaj tła obejmuje również tło centralnej dyfrakcji dla analizy pojedynczej dyfrakcji.

W rozdziale siódmym przedstawiono szczegółowy opis selekcji danych za pomocą triggera L1_J12_ALFA_ANY. Rozdział 7.3 zawiera szczegółowe wymagania na selekcję zdarzeń. Jest to 12 różnych wymagań, które ograniczają tło zachowując przy tym niemal pełen sygnał. Selekcja opiera się na warunkach nałożonych na wiązkę, jakość dżetów i pomiarze w samym detektorze ALFA. Analiza skupia się na pomiarze wielu różniczkowych przekrojów czynnych dla produkcji di-dżetów. Kolejno zastosowano procedurę znaną jako dekonwolucja, która umożliwia uzyskać rozkłady na poziomie hadronowym. Zaproponowana procedura pozwala dokonać bezpośredniego porównania wyników uzyskanych z pomiarów z przewidywaniami teoretycznymi lub innymi wynikami eksperymentalnymi.

Na omowienie niepewności systematycznych dedykowano jeden rozdział. Zaprezentowano tutaj metody za pomocą których ocenia się główne źródła niepewności, które autor pogrupował w sześć kategorii: trigger, kalibracja, efektywność, systematyka detektora ALFA, dekonwolucja i inne. Niepewności te nie są ze sobą skorelowane, zatem autor wylicza końcowy błąd jako sumę kwadratów poszczególnych niepewności. Niepewności systematyczne przedstawiono w funkcji: ξ , $-t$, $-\log_{10} \xi^{PP}$ i P_T^{LJ} oraz uwzględniając kilka przedziałów ξ : P_T^{LJ} , η^{LJ} i $\log_{10} \beta^{JJ}$. Dla wszystkich tych zmiennych główny przyczynik do błędu systematycznego pochodzi od kalibracji dżetów ($\approx (15 - 20)\%$). Wyjątek stanowi jedynie rozkład w P_T^{LJ} i $\log_{10} \beta^{JJ}$ gdzie istotna jest również niepewność pochodząca bezpośrednio od systematyki detektora ALFA (β - ułamek pędu Pomeronu unoszonego przez dżety). Tam całkowita niepewność systematyczna sięga 40%.

Kluczowe wyniki analizy zawarto w rozdziale dziewiątym. Dokonano szczegółowego porównania danych eksperymentalnych ATLAS z przewidywaniami Monte Carlo. Wyniki przedstawiono jako różniczkowe przekroje czynne dotyczące zmiennej powiązanej z protonem (ξ i t) oraz dżetem (P_T, η i β). Dane eksperymentalne obarczone błędem statystycznym i systematycznym zestawiono z wynikami MC: Pythia 8, EPOS, Herwig. Dane eksperymentalne i przewidywania teoretyczne wyznaczono dla tego samego zakresu zmiennych ξ, t, P_T i η . W przypadku pojedynczej dyfrakcji dokonano pomiaru całkowitego przekroju czynnego na produkcję dżetów: $\sigma_{JJ}^{SD} = 57.2 \pm 0.8(\text{stat})_{-8.7}^{+9.6}(\text{syst})$ nb. Zestawienie danych eksperymentalnych z modelem Pythia 8 i EPOS nie wskazuje niestety zgodności między wynikami. Wyniki z Pythia 8 są prawie 45% większe od wyniku eksperymentalnego, a wyniki z EPOS są mniejsze o 56%. Dokonano również zestawienia wartości parametru B , który jest proporcjonalny do



rozmiaru przeszkody w procesie rozpraszania i ekstrapolowany jest z funkcji wykładniczej występującej w różniczkowym przekroju czynnym $d\sigma/dt$. Wynik otrzymany z analizowanych danych ATLAS jest większy od przewidywań z EPOS, ale jednocześnie mniejszy od wyników z Pythia 8 i wartości otrzymanej z pomiaru TOTEM. Przedstawione zestawienie wskazuje konieczność korekty modeli zastosowanych w generatorach MC. Analizę wzbogacono dodatkowo o porównanie wyników z inkluzywną produkcją di-dżetu. Stosunek całkowitych przekrojów czynnych równy jest 2.38 %.

Wyniki dla centralnej dyfrakcji są przewidywalnie mniejsze, tj. $\sigma_{JJ}^{CD} = 329 \pm 59(\text{stat})_{-71}^{+61}(\text{syst})$ pb. Najlepszą zgodność z danymi eksperymentalnymi na poziomie różniczkowego przekroju czynnego uzyskano z generatora Herwig ($73\% \sigma_{JJ}^{CD} = \sigma_{JJ}^{CD-\text{Herwig}}$). Jako ciekawy dodatek autor zamieszcza wyniki poszukiwania ekskluzywnej produkcji dżetów, które są specjalnym przypadkiem podwójnej wymiany Pomeronu. Jest to przypadek, gdzie stan centralny tworzony jest przez dwa dżety bez żadnych dodatkowych cząstek. Przewidywania teoretyczne uzyskane z generatora SuperChic wskazują możliwość pomiaru tego typu procesu przez detektor ALFA.

Komentarza wymagają pewne dla mnie niejasności:

1. Dłaczego Rys. 1.14 zawiera na osiach rzędnych jednocześnie dwa określenia różniczkowego przekroju czynnego, tj. (a) $d\sigma/d\log_{10}\psi$ i $d\sigma/d(-t)$, (b) $d\sigma/dp_T$ i $d\sigma/d\eta$, przy czym te drugie nie mają na wykresie odnoszącej się do nich skali.
2. W tekście zaznaczono, że wyniki przedstawione na Rys. 1.14 były wykonane przez inną studentkę jako materiał do pracy inżynierskiej. Wskazaniem wydaje się uzupełnienie rysunków o zestawienie z danymi eksperymentalne. Autor podsumowuje, że wyniki MC (oznaczone jako *sampleType*) przewidują znacznie większy przekrój czynny niż to wynika z eksperymentu, natomiast nie mam pewności, czy zaaplikowano te same cięcia eksperymentalne, by móc uznać tę konkluzję jako prawdziwą.
3. Odnosząc się do Rys. 3.11, 3.12: czy istnieje uzasadnienie dlaczego akceptancja dla ALFA AL i ALFA CL tak bardzo się różni dla różnych zakresów ξ i generalnie dlaczego akceptancja maleje ze wzrostem ξ ?
4. Zapytanie dotyczy wyników zaprezentowanych na Rys. 4.16. Błędy są stosunkowo duże. Z tekstu możemy się dowiedzieć, że niepewności szacuje się za pomocą metody przedziałów międzykwartyłowych. Residua są podobne dla wszystkich stacji po tej samej stronie, dlatego można je wspólnie pogrupować. Proszę wskazać główną wielkość/zmienną/czynnik który odpowiada za tak spore słupki błędów.
5. Spostrzeżenie do Rys. 4.22: jaka jest celowość wskazywania na rysunkach przedziałów $y_2 \in [9, 15]$, skoro zmienna y_2 pokazywana jest w przedziale $(0 - 25)$ mm, a dopasowanie *fit along X, Y* prezentowane na schemacie (b) wydaje się być pokazane w przedziale $y_2 = (-7, -20)$ mm?
6. Pytanie dotyczy wyników zaprezentowanych na Rys. 4.24. Czy zwiększenie liczby iteracji nie poprawi zmniejszeniu czy w ogóle wyeliminowaniu oscylacji w *Up/Low*



Ratio?

7. Za pomocą Rys. 5.20(d) autor rozprawy jednoznacznie wskazuje, że przy dużym pseudorapidity dżetów kluczowym staje się kontrybucja pochodząca od interkalibracji η . Zaskakujący jest jednak dla mnie fakt, że stosunek $u(P_T^{jet})/P_T^{jet}$ gwałtownie rośnie przy $P_T^{jet} = 40$ GeV. Czy istnieje rozsądne wyjaśnienie tego efektu?

Zauważone niedociągnięcia:

- Brakuje odniesienia się w tekście do rysunków 1.5(a), 2.8 oraz 3.7(b)
- Właściwym wydaje się dodanie referencji do publikacji, z której zapożyczono dany schemat. I tak np. Rys. 3.1 zawiera referencje do pracy [78] Phys. Lett. B, vol. 761, pp. 158–178, 2016, a szczegółowe omówienie detektora ALFA z odpowiednim schematem znajduje się w *Nucl. Phys.* **B889** (2014) 486.
- Czytelnik odnosi czasami wrażenie, że opis wyników przedstawionych za pomocą rysunków jest zbyt skąpy. Przykładowo Rysunki 8.7-8.11, gdzie właściwie zaprezentowano aż 16 wykresów, opisane są za pomocą 8 linijek tekstu.

Drobne błędy drukarskie, jak np.

- W rozdziale 1.3: „(...) mass excitation ($1 < \text{GeV}$), which (...)“
- „cross-section“ i „cross section“
- Na Rys. 4.1 użyto innych oznaczeń zmiennych niż w tekście (wielkie i małe litery)
- Na Rys. 4.22 nie ma jednostek długości przy y_2
- Rys. 5.19 nie ma wskazanego opisu do rysunku (d)

Podkreślenia wymaga fakt znakomitego posługiwania się odnośnikami. Autor rozprawy bardzo często przedstawia adnotację, w którym rozdziale czytelnik może zapoznać się z bardziej rozbudowanym opisem danego zagadnienia czy pojęcia. Przykładowo w rozdziale 1.2.1 wspomniano o obszarze detektora bez aktywności hadronowej w danym zakresie rapidity, gdzie czytelnik odsyłany jest do rozdziału 1.2.2, by poznać szczegóły tej zmiennej, w rozdziale 4.3.5 autor wspomina o kryteriach selekcji i zamieszcza informacje, że opisano to już w rozdziale 4.3.3. Na pochwałę zasługuje fakt starannej prezentacji graficznej wyników oraz ilość zamieszczonych wykresów. W przyszłości może to stanowić źródło odtworzenia danego rozkładu w podobnej analizie.

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi autorski wkład pana mgr. inż. Krzysztofa Janasa do analizy dyfrakcyjnej produkcji dżetów w zderzeniach proton-proton. Wyniki omawiane w rozprawie były prezentowane przez mgr. inż. K. Janasa na spotkaniach grupy Roboczej ATLAS Soft QCD, podczas walnych zgromadzeń ARP oraz w formie plakatu podczas siódmej edycji konferencji poświęconej fizyce Wielkiego Zderzacza Hadronów, LHCP2019. Pochodną tego wystąpienia jest opublikowanie streszczenia pokonferencyjnego w Proceedings of Science. Pan Krzysztof Janas jako członek grupy



eksperymentalnej ATLAS jest współautorem 224 opublikowanych publikacji (stan na dzień 2 grudnia 2024 r.).

Rozprawa doktorska mgr. inż. Krzysztofa Janasa przedstawia solidną pracę doświadczalną. Analiza jest bardzo rzetelnie przeprowadzona i poprawnie opisana. Rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu. Wyniki przedstawiają pierwszą analizę pomiaru dżetów w procesach pojedynczej dyfrakcji z oznaczeniem protonu w eksperymencie ATLAS oraz pierwszy pomiar dżetów produkowanych w centralnej dyfrakcji na akceleratorze LHC. Mimo znajdujących się w recenzji kilku uwag krytycznych, uważam, że praca prezentuje bardzo dobrze opracowany materiał analizy.

Recenzowana rozprawa doktorska pana mgr. inż. Krzysztofa Janasa w pełni spełnia warunki ustawowe stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z brzmieniem ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku "Prawo o szkolnictwie wyższym" wraz z jej późniejszymi zmianami. W związku z powyższym stawiam wniosek o dopuszczenie mgr. inż. Krzysztofa Janasa do dalszych etapów postępowania doktorskiego.

Kłusek-Gawenda

Mariola Kłusek-Gawenda