

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. Rafała Sikory, zatytułowanej
„Measurement of the diffractive central exclusive production in the STAR
experiment at RHIC and the ATLAS experiment at LHC”**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgra inż. Rafała Sikory dotyczy pomiarów dyfrakcyjnej centralnej produkcji ekskluzywnej (CEP) w zderzeniach p+p przy dostępnych energiach w układzie środka masy 200 GeV oraz 13 TeV. Dane zostały zebrane przez eksperymenty STAR przy akceleratorze RHIC (200 GeV) oraz ATLAS przy akceleratorze LHC (13 TeV). Praca pokazuje pierwsze pomiary procesów CEP przy tak dużych energiach zderzeń z jednoczesnym pomiarem cząstek wiązek rozproszonych w kierunku przednim. Pomiar obu rozproszonych protonów wiązek był możliwy dzięki specjalnym detektorom przednim mierzącym cząstki rozproszone pod małymi kątami.

Analizy skupiały się na oddziaływaniach dyfrakcyjnych (należących do klasy oddziaływań nieelastycznych), które nie są do końca zbadane i opisane teoretycznie/modelowo, a których przekrój czynny bywa istotnym tłem przy poszukiwaniu sygnałów „nowej fizyki”. W języku teorii Regge'go w oddziaływaniach p+p o wysokich energiach procesy dyfrakcyjne zachodzą poprzez wymianę bezbarwnych Pomeronów pomiędzy oddziałującymi hadronami. Proces centralnej dyfrakcji zachodzi, w wiodącym rzędzie, poprzez podwójną wymianę Pomeronu (DPE), natomiast o centralnej produkcji ekskluzywnej (CEP) mówi się wtedy, gdy wszystkie cząstki powstałe z dwóch oddziałujących ze sobą Pomeronów są mierzone oraz są wyraźnie oddzielone od cząstek wiązek lub produktów ich fragmentacji. O zachodzeniu procesu CEP można wnioskować na podstawie dwóch przerw w rozkładzie pośpieszności cząstek obserwowanych w stanie końcowym. Autor pracy doktorskiej zastosował skuteczniejszą i prawie jednoznaczną metodę opartą o dodatkowy pomiar rozproszonych cząstek wiązek oraz bilans pędowy wszystkich cząstek w stanie końcowym. Analiza taka była możliwa dzięki detektorom typu *Roman Pot* (RP), które mierzą cząstki rozproszone pod małymi kątami (obszar dużych wartości bezwzględnych pośpieszności).

Głównym wynikiem pracy są przekroje czynne na proces dyfrakcyjnej CEP dwucząstkowych oraz wielocząstkowych układów zidentyfikowanych hadronów, zmierzone w ograniczonym obszarze przestrzeni fazowej. Pary hadronów z całkowitym ładunkiem równym zero są najprostszymi i najliczniejszymi stanami produkowanymi poprzez proces DPE. Otrzymana precyzja pomiarów jest kilkukrotnie wyższa niż ta uzyskana wcześniej w eksperymentach AFS oraz SFM przy akceleratorze ISR (podobnie jak STAR i ATLAS, eksperymenty AFS i SFM mierzyły procesy dyfrakcyjnej CEP przy użyciu informacji o hadronach rozproszonych do przodu). Wyniki STAR i ATLAS porównane zostały z modelami nierezonansowej CEP.

Praca doktorska mgra inż. Rafała Sikory liczy 273 strony i napisana jest w języku angielskim. Na sporą objętość dokumentu mógł mieć wpływ fakt, że praca pokazuje wyniki z dwóch eksperymentów, a ich „kuchnie eksperymentalne” różniły się od siebie. Praca podzielona jest na cztery główne części: wstęp (25 stron), część związana z eksperymentem STAR (129 stron), część związana z eksperymentem ATLAS (49 stron) oraz wyniki fizyczne (41 stron). W pracy są również streszczenia, krótkie podsumowanie oraz 4 dodatki. Bibliografia obejmuje 220 pozycji.

W części I (wstęp) opisane są niezbędne podstawy teoretyczne, przegląd wyników eksperymentalnych oraz cel pracy. Omówiony jest m.in. Model Standardowy w fizyce cząstek elementarnych, oddziaływania silne, procesy dyfrakcyjne w oddziaływaniach cząstek, proces centralnej produkcji ekskluzywnej oraz modelowanie dyfrakcyjnej CEP (opis fenomenologiczny i dostępne „na rynku” generatory Monte Carlo). Autor pracy omawia podstawy teorii Regge'go (użytej do opisu procesów, w których obliczenia pQCD nie mogą być stosowane) oraz wprowadza pojęcie Pomeronu. Na pochwałę zasługuje bardzo obrazowe (również w sensie dosłownym) przedstawienie klasyfikacji procesów dyfrakcyjnych. W tej części pracy opisany jest również związek Pomeronu z glubolami (egzotyczne mezony składające się wyłącznie z gluonów). Pod koniec części I (rozdział 3) opisane są dostępne wyniki eksperymentalne dotyczące dyfrakcyjnej CEP przy różnych energiach zderzeń, zarówno w eksperymentach na stacjonarnej tarczy, jak i w zderzaczach. Pokazane w pracy rysunki mas niezmienniczych dotyczą układu $\pi^+\pi^-$. Część pierwszą zamyka opis celów pracy.

Część I rozprawy pokazuje, że doktorant dysponuje bardzo dobrą znajomością fizyki zderzeń cząstek elementarnych przy relatywistycznych energiach. Posiada również rozległą wiedzę na temat dotychczasowych pomiarów eksperymentalnych dyfrakcyjnej CEP. Z drobnych uwag technicznych: brakuje powołania się na Rys. 1.5c w tekście pracy. Nie jest też dla mnie jasne co Autor miał na myśli przy równaniu 1.21 pisząc „In the laboratory frame it is often convenient to use the so-called pseudorapidity, defined geometrically as ...”. Czy chodziło może o detektory, które nie mają pola magnetycznego lub/i identyfikacji cząstek? W sekcji 2.2 wspomniano o nowym (z 2019 roku), obiecującym generatorze Monte Carlo GRANIITTI. Czy od czasu zakończenia analiz Autor rozprawy doktorskiej próbował już może porównywać swoje wyniki z jego przewidywaniami? Jestem również bardzo ciekawa jak ilościowo precyzja pomiarów dyfrakcyjnej CEP w eksperymencie ATLAS różni się od precyzji, wspomnianego w rozdziale 3, wspólnego przedsięwzięcia eksperymentów CMS i TOTEM.

Część II (eksperyment STAR) poświęcona jest szczegółom budowy detektora STAR oraz technikom analizy w tym eksperymencie. Oprócz samego układu detektora i jego komponentów (rozdział 5), w tym tych używanych w czasie analiz, Autor pracy opisuje (sekcja 6.1) metodę rekonstrukcji śladów i zderzeń przy użyciu detektorów *Time Projection Chamber* (TPC) oraz *Time of Flight* (TOF). Detektory te służą również do identyfikacji cząstek. Rekonstrukcja danych pochodzących z detektorów RP opisana jest w oddzielnej sekcji (6.2). W części II omówione są również użyte dane i składowe trygera dla pomiarów dyfrakcyjnych (rozdział 7), metody i próbki w symulacjach Monte Carlo (rozdział 8), kryteria wyboru zderzeń i śladów (rozdział 9), sposoby wyznaczania tła (rozdział 10) i liczenia poprawek (rozdział 11). Opisana jest również analiza niepewności systematycznych (rozdział 12).

Moją uwagę zwrócił klarowny opis trygerów, a w szczególności trygera użytego do badania procesów dyfrakcyjnej CEP. Standardowy program symulacyjny eksperymentu STAR (STARsim) nie uwzględnia detektorów RP. Napisanie odpowiedniej samodzielnej aplikacji w środowisku Geant4 było jednym z zadań, w których uczestniczył Doktorant. Używane cięcia są również bardzo dobrze opisane (ich wartości liczbowe zostały wyjaśnione przy użyciu odpowiednich rysunków) a krótki „przewodnik” po nich (strony 57-58) był bardzo trafionym pomysłem. Cięcia w eksperymencie STAR dobrano w ten sposób, aby wybierać jedynie zderzenia centralnej dyfrakcji, w których rejestrowane są obydwa rozproszone protony wiązek. Z kolei w centralnym obszarze produkcji znajdować się mogły tylko dwie cząstki o przeciwnych znakach ($\pi^+\pi^-$ lub K^+K^- lub p anty-p). W analizach została użyta zaawansowana metoda identyfikacji par hadronów na podstawie pomiarów strat jonizacyjnych (dE/dx) oraz informacji z detektorów czasu przelotu (m^2_{TOF}). Bilans pędowy dwóch cząstek w TPC oraz dwóch w detektorach RP, zapewniający „ekskluzywność” procesu, sprawdzany był przy pomocy dodatkowego cięcia (SC9).

Jako przyczynki do tła opisano zderzenia, które naśladują topologię CEP z parą h^+h^- (nieekskluzywne tło) oraz zderzenia z błędną identyfikacją cząstek pary (ekskluzywne tło). Wkład od tych drugich jest dużo mniejszy. Długa lista poprawek zawiera korekcje m.in. na efektywność trygera, efektywności związane z rekonstrukcją i selekcją śladów w detektorach TPC, TOF i RP, efektywności związane z rekonstrukcją i selekcją zderzeń, efektywność związaną z identyfikacją pary cząstek oraz poprawki na „fałszywe” ślady i migrację zrekonstruowanych śladów do/z innego binu akceptancji. Autor pracy przetestował z sukcesem działanie poprawek na danych Monte Carlo. W oszacowywaniu niepewności systematycznych wzięto pod uwagę wiele różnych efektów, m.in. niepewność wyznaczania świetlności, niepewności związane z efektami „spiętrzenia” sygnałów („hitów”) w TPC, niepewności związane z nieelastycznymi oddziaływaniami wiązek z materiałem przed TPC (rura wiązki, detektor HFT), niepewności z powodu zmiany jakościowych kryteriów wyboru śladów w TPC, niepewności związane z efektywnością TOF, efektywnością rekonstrukcji w detektorach RP, etc. Typowe niepewności systematyczne na przekroje czynne CEP (*integrated fiducial cross sections*) par $\pi^+\pi^-$, K^+K^- , p anty- p są rzędu 10–16%.

Szczegóły wszystkich procedur eksperymentalnych opisane są w sposób bardzo dokładny, z pewnością będą niezwykle cenne dla osób planujących w przyszłości podjąć się realizacji podobnej tematyki. Część II (oraz III) pracy pokazuje, że Doktorant dysponuje świetnym warsztatem eksperymentalnym oraz znajomością metodyki pracy w wielkich eksperymentach fizycznych. Autor pracy nie tylko analizował dane, ale zajmował się również hardwarem, softwarem oraz uczestniczył w uruchomieniu detektorów RP w eksperymencie STAR. Analizy fizyczne zostały wykonane niezwykle starannie, a temat poprawek został potraktowany bardzo rzetelnie. Za szczególnie ważną uważam również dyskusję niepewności systematycznych, które w wielu innych analizach są traktowane dużo bardziej powierzchownie.

Z drobnych uwag, pytań i komentarzy: co Autor rozprawy miał na myśli w sekcji 5.1 w zdaniu „Currently the two largest experiments remain active – PHENIX and STAR”? Może warto byłoby również wspomnieć o eksperymencie sPHENIX? Można też dodać wyjaśnienie pojęcia świetlności (użyte np. na stronach 41 i 42). Oznaczenia zmiennych (oś x) na Rys. 8.8 są inne niż w podpisie pod nim lub w tekście. W sekcji 8.3.1 omawiana jest poprawka na wartości dE/dx stosowana dla symulowanych zderzeń. Czy oprócz opisanej transformacji rozważano może prostszą metodę polegającą na zwykłym losowaniu (dla każdej cząstki z MC, uwzględniając jej ID) wartości dE/dx z zadanych rozkładów otrzymanych na podstawie „globalnych” fitów dE/dx wykonanych na danych rzeczywistych? Zielone histogramy (Pythia 8) na Rys. 8.13 nie są opisane/wspomniane w tekście. Jest co prawda odniesienie do sekcji 10.3, ale może warto byłoby wspomnieć o nich wcześniej, tym bardziej że histogramy dla Pythii przewijają się również przez rozdział 9. W podpisie pod Rys. 9.19 trzeba zamienić „(x-axis)” na „(y-axis)” i odwrotnie. Nie mogłam też znaleźć odnośnika w tekście do Rys. 10.5a, 10.6a, 10.7a. Używając podanych liczb przypadków z tabeli 10.1 (strona 88) otrzymuję 11.8% zamiast 12.0% (w tekście oraz tabeli) oraz 3.0% zamiast 3.1% (w tabeli). Czy użycie cięcia na zmienną $\delta^2(\eta, \phi)$ (strona 97) jednoznacznie i definitywnie zapobiega sytuacji „matching’u” dwóch śladów do tej samej cząstki? Czy zamiast, albo oprócz tego, nie można byłoby wybierać jednego, najlepszego (np. używając kryterium liczby „hitów”) śladu? Czym był podyktowany taki, a nie inny wybór wartości cięcia dla próbek „loose” oraz „tight” w sekcji 12.2.3 (strona 140)? Czy można prosić o więcej wyjaśnień na temat tego, jak wartość 1.5% została otrzymana z Rys. 12.17? Z uwag typowo edytorskich: wartości numeryczne wewnątrz Rys. 12.22 są w zasadzie nieczytelne. W pracy byłaby też bardzo przydatna tabela, pokazująca statystyki zderzeń pozostałych po poszczególnych cięciach, począwszy od liczby zderzeń akceptowanych przez tryger. Można byłoby też rozważyć w przyszłości wyrażanie pędu w jednostkach GeV/c zamiast GeV (na nielicznych rysunkach tak zresztą jest – Rys.

11.4, 11.6). Nie jest to w żadnym razie uwaga krytyczna, ale sugestia, która pozwoliłaby być w zgodzie z konwencją używaną przez *Particle Data Group*.

W **części III** dotyczącej eksperymentu ATLAS, omawiane są podobne elementy analiz co w części II dla eksperymentu STAR. Opisano układ detekcyjny ATLAS (rozdział 13), rekonstrukcję śladów i zderzeń w *Inner Detector* (ID) oraz w spektrometrze ALFA (rozdział 14), użyte dane, tryger oraz symulacje Monte Carlo (rozdział 15), cięcia na wybór zderzeń i śladów (rozdział 16), sposoby wyznaczania tła (rozdział 17), poprawek (rozdział 18) oraz niepewności systematycznych (rozdział 19).

Do pomiaru protonów rozproszonych do przodu eksperyment ATLAS może używać dwóch systemów detektorów RP: spektrometru ALFA (zbieranie danych w „specjalnym” trybie) oraz detektora AFP. Autor rozprawy wykorzystywał dane ze spektrometru ALFA. Z kolei *Inner Detector* służył do śledzenia torów cząstek wyprodukowanych w obszarze centralnym oraz do ich identyfikacji przy użyciu dE/dx . Podobnie jak w części II, w części III cięcia zostały również bardzo dobrze opisane i prawidłowo zobrazowane za pomocą odpowiednich rysunków. Ze względu na inną budowę detektora ATLAS różniły się one oczywiście od tych użytych w eksperymencie STAR. Jedną z głównych różnic między analizami w STAR i ATLAS było uwzględnianie w tych drugich więcej niż jednej pary cząstek w centralnym obszarze produkcji, przy czym analizowanymi cząstkami obszaru centralnego były tylko naładowane piony. Wybór jedynie pionów spowodował, że cięcia użyte przy identyfikacji było znacznie prostsze niż cięcia używane w eksperymencie STAR. Podobnie jak w przypadku analiz w STAR Autor pracy używał dodatkowego, zapewniającego „ekskluzywność” procesu, cięcia (AC6) na bilans pędowy wszystkich cząstek w stanie końcowym. Wkład do tła, tak samo jak w STAR, podzielono na dwie klasy: nieekskluzywny (zderzenia przypominające topologię CEP; w rozważanych danych ATLAS były to głównie procesy CD) oraz ekskluzywny (procesy CEP, ale z błędną identyfikacją pionów). Wkład tła ekskluzywnego uznano za zaniedbywalny. Omówiono poprawki związane z efektywnością trygera, efektywnością rekonstrukcji i selekcji śladów w ID oraz detektorze ALFA, efektywnością selekcji zderzeń, efektywnością selekcji pionów (tu założono 100%) oraz poprawki związane z migracją ID oraz ALFA śladów z/do obszaru akceptancji. Podobnie jak część II, część III również zamyka rozdział z omówieniem niepewności systematycznych. Zgodnie z Rys. 19.3 (strona 205) niepewności systematyczne na różniczkowe przekroje czynne (w ograniczonym obszarze przestrzeni fazowej) dla procesów CEP par pionów nie przekraczają 3–4%.

Z drobnych uwag, pytań i komentarzy: czy oszacowano jakie (ilościowo) niepewności systematyczne wprowadza założenie, że rozproszone protony niosą pęd wiązki (strona 168)? Czy wiadomo skąd biorą się różnice w szerokościach rozkładów pierwotnego wierzchołka z_{vtx} dla eksperymentów STAR i ATLAS? W STAR szerokość jest na poziomie kilkudziesięciu cm (Rys. 9.2, strona 59) a w ATLAS na poziomie kilkudziesięciu mm (Rys. 16.2, strona 173). Moim zdaniem bez większej szkody dla statystyki, ale za to z korzyścią dla czystości próbki, cięcia na dE/dx (strona 180 oraz Rys. 16.10) można byłoby obniżyć z $2.6 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$ na $2.0 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$ (a nawet nieco niżej), zwłaszcza że efektywność selekcji pionów (strona 197) została, może nieco zbyt optymistycznie, założona jako równa 100%. Czy w podpisie pod Rys. 17.2 (strona 186) czynnik skalujący nie powinien być 0.4?

Crème de la crème, czyli wyniki fizyczne pracy znajdują się w **części IV**. Główne wyniki (rozdział 20) dotyczą różniczkowych przekrojów czynnych na proces dyfrakcyjnej CEP dla dwucząstkowych i wielocząstkowych układów $\pi^+\pi^-$ (STAR, ATLAS), K^+K^- (STAR), p anty- p (STAR), $2\pi^+2\pi^-$ (ATLAS), $3\pi^+3\pi^-$ (ATLAS) oraz $4\pi^+4\pi^-$ (ATLAS) otrzymane w ograniczonych obszarach przestrzeni fazowej (tzw. *fiducial cross sections*). Obszary te różnią się między STAR i ATLAS ze względu na różnice w

budowie i działaniu obu detektorów. Pokazane są przekroje na zidentyfikowane stany w funkcji zmiennych związanych z centralnym systemem (masa niezmiennicza, pośpieszność) oraz zmiennych związanych z rozpraszaniem protonami (kwadrat przekazu czteropędu, kąt azymutalny). W rozdziale 21 pokazane zostały fity różniczkowych przekrojów czynnych w masie niezmienniczej ($d\sigma/dm$), natomiast w rozdziale 22 fity wykonane na podwójnie różniczkowych przekrojach $d^2\sigma/dt_1dt_2$, gdzie t_1 i t_2 oznaczają kwadraty przekazów czteropędów w wierzchołkach protonowych. Pracę zamyka podsumowanie.

Różniczkowe przekroje czynne (rozdział 20) na ekskluzywną produkcję par $\pi^+\pi^-$ w funkcji masy niezmienniczej pary są większe w ATLAS niż w STAR co wiąże się ze znacznie większą akceptancją geometryczną użytą w eksperymencie ATLAS. W rozdziale 20 Autor pracy omawia kształty rozkładów mas niezmienniczych w kontekście pojawiania się w nich wkładów od rezonansów. Kolejne rysunki dotyczą przekrojów czynnych na CEP pary $\pi^+\pi^-$ w funkcji m.in. pośpieszności pary pionów, rozseparowania w kącie azymutalnym rozproszonych do przodu protonów ($\Delta\phi$), sumy kwadratów przekazów czteropędów w wierzchołkach protonowych. Wyniki STAR i ATLAS zostały jakościowo porównane z przewidywaniami aż trzech modeli kontinuum (nierezonansowej CEP): DiMe, GenEx oraz Pythia MBR. Tego typu informacje zwrotne są zawsze bardzo cenne dla twórców badanych modeli. W rozdziale 20 pokazane i opisane są również przekroje na CEP par K^+K^- i p anty- p z eksperymentu STAR oraz $2\pi^+2\pi^-$, $3\pi^+3\pi^-$, $4\pi^+4\pi^-$ z eksperymentu ATLAS. Wyniki dla K^+K^- zostały porównane z trzema ww. modelami, wyniki dla p anty- p , $3\pi^+3\pi^-$ oraz $4\pi^+4\pi^-$ porównano z modelem Pythia MBR, natomiast układ $2\pi^+2\pi^-$ z modelami DiMe (produkcja dwóch mezonów ρ , a następnie rozpad każdego z nich na dwa piony) oraz Pythia MBR. Produkcja CEP układu $2\pi^+2\pi^-$ może być realizowana na różne sposoby, np. potrójna wymiana Pomeronu, produkcja dwóch rezonansów, z których każdy rozpada się na $\pi^+\pi^-$, produkcja jednego rezonansu rozpadającego się na 4 piony. Autor rozprawy, w oparciu o istniejące wyniki oraz dodatkowe testy, podjął się ciekawej próby wyjaśnienia mechanizmu produkcji układu $2\pi^+2\pi^-$. Poza różniczkowymi przekrojami, w rozdziale 20 znalazły się również scałkowane wartości przekrojów czynnych (*integrated fiducial cross sections*) dla obszarów $\Delta\phi < 90^\circ$ oraz $\Delta\phi > 90^\circ$.

W rozdziale 21 pokazane są fity ekstrapolowanych (do lorentzowsko-niezmienniczego obszaru przestrzeni fazowej) różniczkowych przekrojów czynnych w masie niezmienniczej dla układu $\pi^+\pi^-$. Wyniki te dotyczą eksperymentu STAR, a ich celem było m.in. otrzymanie informacji o produkcji rezonansów w badanym procesie CEP. Otrzymane parametry (przekrój, przesunięcie fazowe i dla dwóch przypadków masa i szerokość) rezonansów $f_0(980)$, $f_2(1270)$ i $f_0(1500)$ podane są z dwiema oddzielnymi niepewnościami systematycznymi – eksperymentalną i modelową. Masy i szerokości mezonów f_0 zostały porównane z wartościami z *Particle Data Group* a różnice są szczegółowo omówione w pracy. Widmo kontinuum masy niezmienniczej $\pi^+\pi^-$, otrzymane z fitu po odcięciu wkładu od rezonansów, zostało porównane z modelami GenEx oraz DiMe. Rozbieżności przy najniższych pokazanych wartościach masy niezmienniczej mogą być wyjaśnione np. przy założeniu istnienia dodatkowego stanu $f_0(500)$. W rozdziale 21 pokazany jest również fit nieekstrapolowanego rozkładu $d\sigma/dm(2\pi^+2\pi^-)$ eksperymentu ATLAS z uwzględnieniem rezonansu $f_1(1285)$. Rozdział 22 pokazuje dopasowania zrobione na podwójnie różniczkowych przekrojach $d^2\sigma/dt_1dt_2$. Otrzymane parametry nachylenia eksponencjalnych fitów (β), dla różnych przedziałów masy niezmienniczej centralnego systemu ($\pi^+\pi^-$ lub $2\pi^+2\pi^-$) oraz różnych wartości kąta pomiędzy rozproszonymi protonami, niosą ważne informacje dla twórców fenomenologicznych modeli CEP.

Z drobnych komentarzy: na Rys. 20.5 pik w STAR dla $\Delta\phi > 90^\circ$ (uwaga, w tekście jest $< 90^\circ$) jest widoczny dla około 2.1–2.2 GeV, natomiast dla ATLAS wzmocnienie przy 1.8–2 GeV jest w zasadzie w granicach niepewności tak samo (nie)widoczne jak, niewspomniane w dyskusji, wzmocnienie między 2.1–2.2 GeV. Brakuje mi próby interpretacji wzmocnienia w obszarze 2.2–2.4 GeV na Rys. 20.18b (strona 225). Na stronie 229 Autor pracy sugeruje, że nie da się wykluczyć, że struktury widoczne na Rys. 20.23 (górnny, lewy, pośpieszność $2\pi^+2\pi^-$) są związane z fluktuacjami statystycznymi. Jako że raczej nie spodziewamy się tego typu struktur w rozkładach pośpieszności, przypuszczenie jest słuszne, a zmniejszenie liczby binów prawdopodobnie rozwiąże problem. Na Rys. 20.27 (lewym) maksima są w tym samym binie (4–5 GeV) a tekst sugeruje pik przy około 4 GeV dla danych i 5 GeV dla Pythii. Na stronie 242 Autor napisał o parametrze P przyjmującym wartości od 2 do 10, a liniijkę niżej o otrzymanej wartości P zgodnej z 1. Można prosić o więcej wyjaśnień? Uwagi edytorskie: pomyłka w opisie osi 'x' w podpisie pod Rys. 20.4. Podpisy pod Rys. 20.2, 20.3, 20.4, 20.6, 20.7, etc. niepotrzebnie sugerują, że obszary akceptacji podane są na rysunkach. Nie mogę się również doszukać w pracy definicji masy niezmienniczej, pośpieszności pary lub układu cząstek, $\cos\theta^{\text{CS}}(\pi^+)$, $\phi^{\text{CS}}(\pi^+)$ na Rys. 20.10 i 20.11 (do tych ostatnich podane są jedynie referencje; na Rys. 11.32 i 18.12 oznaczenia te są podane bez „ π^+ ” w nawiasie, dodatkowo na Rys. 18.12 użyte jest ϕ^{CS} zamiast $\phi^{\text{CS}}(\pi^+)$).

Podsumowując, rozbudowana analiza i dyskusja uzyskanych wyników bardzo dobrze świadczą o Autorze pracy, który skupił się nie tylko na otrzymaniu samych wartości liczbowych, ale ma również świadomość jak wyniki te mogą być interpretowane oraz zastosowane. Jakościowe porównanie z modelami w rozdziale 20 pokazuje, że żaden z nich nie opisuje prawidłowo wszystkich danych we wszystkich pokazywanych zmiennych i kanałach. Otrzymane wyniki mogłyby więc posłużyć do „dostrojenia” modeli lub/i ustalenia ograniczeń dla niektórych parametrów tych modeli (np. Λ^2_{exp} użyty w generatorze DiMe).

Wyniki przedstawione przez mgra inż. Rafała Sikorę zostały zaakceptowane i opublikowane przez Kolaborację STAR w pracy JHEP 07 (2020) 178. Pan Rafał Sikora jest również współautorem dwóch innych publikacji (STAR, Phys. Lett. B 808 (2020) 135663 oraz J. Chwastowski i inni, Acta Phys. Polon. B 26 (2015) 10), w których jego wkład był znaczący. Doktorant prezentował swoje wyniki na wielu spotkaniach grup STAR i ATLAS oraz na 5 konferencjach/warsztatach (wyniki STAR); z trzech z nich powstały odpowiednie artykuły konferencyjne. Na szczególną uwagę zasługuje prestiżowa konferencja *International Conference on High Energy Physics* (ICHEP 2020). Wyniki z eksperymentu ATLAS były pokazywane na dwóch szkołach w postaci plakatów (obydwa plakaty zostały nagrodzone).

Napisanie rozprawy doktorskiej to zawsze duży i pracochłonny projekt. Mimo drobnych niedociągnięć wspomnianych wyżej praca napisana jest na bardzo wysokim poziomie edytorskim z niezwykłą dbałością o wszystkie szczegóły. Opis analiz pokazuje szeroką wiedzę i kompetencje Autora pracy. Z całym przekonaniem stwierdzam, że **rozprawa przygotowana przez mgra inż. Rafała Sikorę nie tylko spełnia, ale wykracza poza wymagania stawiane pracom doktorskim**. Przeprowadzone analizy były technicznie bardzo skomplikowane i z pewnością wymagały ogromnych nakładów pracy. Otrzymane wyniki stanowią **znaczący wkład w zrozumienie mechanizmów dyfrakcyjnej centralnej produkcji ekskluzywnej**. Autor pracy wykazał się bardzo dobrą znajomością metod analizy danych, **uzyskując oryginalne wyniki o wysokiej precyzji**. Dlatego też **wnoszę o dopuszczenie mgra inż. Rafała Sikory do dalszych etapów przewodu doktorskiego i wnioskuję o wyróżnienie jego pracy**.