

Prof. Jacek Ciborowski  
Wydział Fizyki  
Uniwersytetu Warszawskiego  
L. Pasteura 5  
02093 Warszawa

Milanówek, 24 listopada 2023

## **Recenzja**

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Janasa**

**zatytułowanej:**

# **Measurement of diffractive jets production in proton-proton collisions with ALFA detectors in the ATLAS Experiment**

Krzysztof Janas przedstawił rozprawę doktorską na którą składają się wyniki analizy danych zebranych w 2015 roku w eksperymencie ATLAS przy akceleratorze LHC w CERN (13 TeV w środku masy) w warunkach specjalnego ustawienia parametrów wiązek. Tematyką fizyczną badań jest analiza przypadków pojedynczej lub centralnej dyfrakcji z towarzyszącymi dwoma jetami, z warunkiem rejestracji jednego lub dwóch protonów w detektorach ALFA. Jak wyjaśnił to we Wstępie, autor koncentruje się na procesach twardej dyfrakcji, identyfikowanej dzięki pojawieniu się jetów i dokonuje pomiarów przekrojów czynnych różniczkowych i całkowitych.

Po krótkim wstępie, w rozdziale 1 autor przedstawił podstawy teoretyczne tematyki, którą się zajmuje: Model standardowy, Chromodynamikę Kwantową i zagadnienia związane bezpośrednio z tematyką pracy: produkcja hadronów (hadronizacja) oraz wyszukiwanie jetów. Następnie omawia procesy dyfrakcyjne, pokazując ich reprezentację na grafach, definiując charakterystyczne zmienne kinematyczne oraz przybliży pokrótce teorię Reggego. Następnie omawia modele symulacji Monte Carlo, którymi będzie się posługiwał w analizie: PYTHIA 8, EPOS oraz HERWIG. Szczegółowe cele pracy – wspomniane różniczkowe przekroje czynne w funkcji różnych zmiennych - wylicza w podrozdziale 1.4. W podrozdziale 1.5 przedstawia wyniki istniejących światowych analiz w dziedzinie, którą się zajmuje.

W rozdziale 2 opisany jest akcelerator LHC, detektor ATLAS i jego składowe oraz oprogramowanie: system wyzwalania, rekonstrukcja energii i torów cząstek oraz w przygotowane próbki przypadków Monte Carlo. Ten rozdział napisany jest zwięźle i wyczerpująco. Centralną rolę w niniejszej analizie odgrywa detektor ALFA i jemu autor poświęca rozdziały 3 i 4. Rozdział 3 zawiera opis tych detektorów, rekonstrukcję torów i jej wydajność oraz akceptację geometryczną zaś w rozdziale 4 przedstawiona jest procedura alignmentu tych detektorów, umieszczonych w odległości ok. 140 m od punktu oddziaływania. Wyniki ilustrowane są licznymi wykresami. To zagadnienie zostało potraktowane z należytą rzetelnością i w podsumowaniu tego rozdziału autor zamieszcza uwagi o stabilności wyników w czasie zbierania danych i o wystarczającej dokładności tych procedur dla celów jego dalszej analizy.

Rozdział 5 pracy poświęcony jest jetom. Autor omawia i przedstawia na wykresach wyniki wyznaczania wydajności triggera i rekonstrukcji jetów (algorytm anti- $k_t$ ), kalibracji pędu poprzecznego  $p_t$  i rapidity  $\eta$  oraz energii, również w porównaniu z przewidywaniami symulacji. Wszystkie te zagadnienia omówione są szczegółowo. Najważniejsze spostrzeżenia na temat jetowych charakterystyk na poziomie triggera to: (1) wyraźne spadki wydajności triggera dla wartości  $\eta$  odpowiadających obszarom przejściowym między częściami składowymi kalorymetru; (2) potwierdzenie zastosowanych selekcji dla jetów przez testy zgodności - "closure tests"; (3) bardzo dobra zgodność rozkładów zmiennych  $p_t$  i  $\eta$  wyznaczonych z zastosowaniem przyjętych cięć oraz metodą uwzględnienia wydajności (formuła 5.1); idem w przypadku rozkładów zmiennej  $R$  jetów (str. 26 wzór 2.5) oraz zmiennych protonowych  $t$  i  $\xi$ . Pełna rekonstrukcja jetów dokonywana jest oczywiście offline i jej wydajność wyznaczona jest w podrozdziale 5.3. Ostateczne wyniki przedstawione na rys. 5.9 wskazują na doskonałą zgodność danych z symulacjami MC. Szczegóły techniczne kalibracji jetów opisane są w podrozdziale 5.4. (etapy kalibracji danych i MC różnią się nieco z oczywistych względów - rys. 5.11). Wyniki przedstawione są na wykresach 5.13 i 5.14. O ile korelacja zrekonstruowanego i symulowanego pędu poprzecznego jest taka jakiej należy oczekiwać, o tyle w przypadku pospieszności jetów obserwuje się rozbieżność w obszarach przejściowych między składowymi kalorymetru. Przy okazji opisu wyznaczania absolutnej skali energii autor podaje zastosowane cięcia  $|\eta| < 2.1$  co by oznaczało, że ten wątpliwy obszar z rys. 5.13 nie jest uwzględniony w tej procedurze. Nadmienię, że ten fragment analizy ma kluczowe znaczenie dla całości również z tego względu, że niepewność systematyczna kalibracji jetów stanowi wiodący wkład do niepewności całkowitej końcowych wyników.

W rozdziale 6 opisany jest wkład tła do badanych przez autora procesów. Ich źródła autor dzieli na zdarzenia przypadkowe z jednym oraz z dwoma protonami, i na tło pochodzące od oddziaływań nieelastycznych, również j.w. Ten rozdział ma charakter bardzo techniczny i brakuje mi w nim na koniec jakiegoś prostego podsumowania wyników, np. wkładów procentowych źródeł tła, jeśli jest to możliwe.

W rozdziale 7 opisana jest selekcja przypadków czyli cięcia na wcześniej wymienione zmienne, i procedura odplatania prawdziwych rozkładów z danych. Cięcia podsumowane są w podrozdziale 7.3 i są dokonane na podstawie oczywistych warunków. Moją uwagę zwraca cięcie C5 na str. 116 w kontekście omawianego wcześniej rys. 5.13 a ściślej - zmienności rozkładu  $\eta$  w obszarach przejściowych. Zakładam, że autor upewnił się, że włączenie tych obszarów do analizy nie wnosi zaburzeń wynikających z tych efektów. Jeśli chodzi o procedurę odplatania, to zależy ona od zmiennych, do których ma być zastosowana. W przypadku zmiennych  $\xi$  i  $t$  autor stosuje odplatanie w binach gdyż są one o wiele szersze od rozdzielczości danej zmiennej (przydałoby się zacytować tu odpowiednie liczby), a więc można przyjąć, że nie ma istotnych migracji przypadków pomiędzy binami. Wyniki przedstawione są na rys. 7.10 – 7.12. W przypadku pędu poprzecznego jetów tak prosta metoda jest niewystarczająca gdyż skończona rozdzielczość może statystycznie doprowadzać do zmiany uporządkowania jetów względem tej wielkości, więc autor słusznie stosuje iteracyjne odplatanie Bayesowskie (pakiet *RooUnfold*). Ta procedura jest o wiele bardziej skomplikowana matematycznie od powyższej lecz autor radzi sobie dobrze z tym zagadnieniem i na rys. 7.16 – 7.18 pokazuje pozytywne testy zgodności w oparciu o symulacje.

Niepewności systematyczne opisane są w rozdziale 8. Autor wymienia ich 6 kategorii, każda zawierająca kilka źródeł. Wprawdzie ten rozdział jest krótki lecz powszechnie wiadomo jest, że rzetelne wyznaczenie niepewności systematycznych jest równie czasochłonne jak otrzymanie wyniku pomiaru. Autor przedstawia również zależności tych niepewności w funkcji wszystkich używanych zmiennych.

Wyniki analizy danych przedstawione są w rozdziale 9. Autor wyznaczył przekroje czynne drogą całkowania przekrojów różniczkowych (wzory 9.1 i 9.2). Pierwszy wynik to pomiar parametru  $B$  opisującego zależność różniczkowego przekroju czynnego w funkcji przekazu czteropędu,  $t$  (wzór 1.37). Autor otrzymał centralną wartość (ja nie cytuję tu niepewności) w zaokrągleniu  $B=4.2 \text{ GeV}^{-2}$  i skoro sam pisze, że ten parametr ma interpretację (kwadratu) rozmiaru przeszkody, na której zachodzi dyfrakcja, to aż prosi się by podać ten rozmiar (w femtometrach) i ew. go zinterpretować. Zmierzony przekrój czynny w badanym obszarze dla pojedynczej dyfrakcji z dwoma

jetami, wzór 9.7, różni się bardzo znacznie od wyników otrzymanych na bazie symulacji, wzory 9.8 i 9.9. Autor opisał przeprowadzoną procedurę przeważenia MC (zmienne  $\xi$  i  $\beta$ ) tak, aby otrzymać zgodność z danymi dla wszystkich używanych w analizie zmiennych, co przedstawił na rys. 9.5, 9.6 i 9.7, gdzie widać doskonałą zgodność MC i danych. Ponadto autor wyznaczył stosunek przekrojów czynnych dla pojedynczej dyfrakcji i inkluzywnej produkcji dwóch jetów, wzór 9.11. Następnie autor cytuje wynik pomiaru przekroju czynnego dla centralnej dyfrakcji, wzór 9.13, i przytacza analogiczne wyniki otrzymane na bazie symulacji, ponownie uwidoczniające różnice względem wyniku dla danych, wzory 9.14, 9.15 i 9.16. W tym miejscu autor mógłby zakończyć swoją pracę lecz zrobił trochę więcej, dokonując rozeznania w zakresie możliwości analizy rzadkiego procesu ekluzywnej produkcji dwóch jetów. Wnioski płynące z tego rekonesansu są takie, że w swojej próbie danych znajdują się przypadki które mogłyby pochodzić z powyższego procesu oraz że detektor ALFA, kluczowy w analizie będącej przedmiotem niniejszej rozprawy, byłby również przydatny w odnośnej analizie.

Podkreślę językiem potocznym, że autor „wyciągnął z danych ile się dało” na temat, który badał. W rozprawie poprawnie przedstawiona jest zarówno strona teoretyczna badanych zagadnień jak i wszystkie kroki analizy doświadczalnej. Wkład samodzielnej pracy autora jest jasno określony. Metodologia opisanych analiz jest poprawna i typowa dla współczesnych, wielkich experimentów z tej dziedziny. Moje drobne uwagi nie umniejszają wysokiej oceny ogólnej rozprawy i otrzymanych wyników. Rozprawa doktorska Krzysztofa Janasa dowodzi, że autor jest biegły w fizyce i metodologii analizy danych w tak wielkim experimentcie jakim jest ATLAS.

W konkluzji stwierdzam, że przedłożona praca spełnia ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Krzysztofa Janasa do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

*J. J. J.*