



Prof. dr hab. Andrzej Rybicki
Instytut Fizyki Jądrowej im. H. Niewodniczańskiego PAN
ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków

Kraków, 13 grudnia 2022 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Ingi Łakomic pt. „The measurement of $\phi(1020)$ meson production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector at the LHC”

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Ingi Łakomic zawiera wyniki badań produkcji mezonu $\phi(1020)$, zwanego w dalszej części tej recenzji mezonem ϕ , w trzech typach nieelastycznych oddziaływań proton-proton: pojedynczej dyfrakcji ($pp \rightarrow pX$), centralnej dyfrakcji ($pp \rightarrow pXp$), oraz w zdominowanej przez procesy niedyfrakcyjne próbce „minimum bias”. Przeanalizowane przez Doktorantkę dane doświadczalne pochodzą z eksperymentu ATLAS na LHC. Analiza trzech próbek eksperymentalnych przeprowadzona jest łącznie w sześciu konfiguracjach, gdyż zestaw danych $pp \rightarrow pX$ jest przebadany zarówno w całym rozpatrywanym zakresie względnej straty energii protonu ξ , $10^{-5} < \xi < 0.16$, jak i w trzech odrębnych przedziałach wspomnianej zmiennej. Mezon ϕ jest badany poprzez analizę widm masy niezmienniczej produktów jego rozpadu, czyli przeciwnie naładowanych mezonów K. Ostatecznym wynikiem analizy są jednowymiarowe rozkłady pędu poprzecznego i pospieszności ϕ w określonych zakresach obu wspomnianych zmiennych, z dodatkowym ograniczeniem na pęd poprzeczny i całkowity produktów rozpadu. Uzyskane wyniki są porównane z przewidywaniami dwóch różnych modeli teoretycznych, oraz z opublikowanymi przez współpracę ATLAS danymi na produkcję mezonu ϕ w zderzeniach proton-proton przy niższej energii.

Temat pracy jest ważny i ciekawy. Ze względu na swoją strukturę kwarkową, $\phi(\bar{s}s)$ jest uważany za dobre „narzędzie” do weryfikacji przewidywań modelowych dla nieperturbacyjnych oddziaływań silnych, oraz dodatkowo do potencjalnego rozróżnienia pomiędzy partonową a hadronową naturą systemu tworzonego w wysokoenergetycznych zderzeniach jądrowych. Wspomniana weryfikacja jest w pracy wykonana dla modeli PYTHIA 8 i EPOS. Nawet jeśli praca dotyczy wyłącznie zderzeń protonów, jest oczywiste że dostarcza ona ważnych danych referencyjnych również dla fizyki ciężkich jonów na LHC.

Rozprawa składa się z dziewięciu rozdziałów z dwoma dodatkami. Rozdział pierwszy opisuje w przystępny sposób związaną z pracą teorię i fenomenologię. Rozdział drugi omawia części układu eksperymentalnego ATLAS istotne dla prowadzonej analizy. Kolejno następuje pięć rozdziałów poświęconych poszczególnym etapom pracy eksperymentalnej, do których odniosę się poniżej. W rozdziale ósmym następuje omówienie uzyskanych wyników, porównanie z przewidywaniami teoretycznymi i wcześniejszymi danymi ATLAS. Rozdział dziewiąty stanowi zwarte podsumowanie pracy. Dodatki dokumentują istotne szczegóły analizy eksperymentalnej. Praca zawiera spis licznych stosowanych skrótów, a także tabele z pełnym spisem wartości numerycznych uzyskanych końcowych wyników, z wyszczególnieniem kolejnych przyczynków do niepewności systematycznej. Bibliografia liczy 173 pozycje. Rozprawa jest napisana w języku angielskim.

Stanowiąca trzon rozprawy analiza doświadczalna jest złożona i wielostopniowa. Składają się na nią:

(a) selekcja przypadków i odpowiadających im „śladów” cząstek naładowanych, omówione w rozdz. 4. Selekcja śladów odbywa się osobno dla Detektora Wewnętrznego (Inner Detector) oraz, w zależności od badanego procesu, również dla rejestrującego protony pod małymi kątami detektora ALFA (Absolute Luminosity for ATLAS);

(b) ekstrakcja sygnału pochodzącego od rozpadu $\phi \rightarrow K^+K^-$ z widm masy niezmienniczej par przeciwnie naładowanych „kandydatów” na mezony K, omówiona w rozdz. 5. Selekcja wspomnianych kandydatów dokonywana jest poprzez cięcia na odpowiednio obliczone straty energii cząstek na jonizację w Detektorze Pikselowym (Pixel Detector). Samo przygotowanie wspomnianych cięć wymaga uprzedniego opracowania metody określania prawdopodobieństwa i „czystości” (purity) selekcji na podstawie widm strat energii na jonizację zarówno dla danych fizycznych, jak i dla przypadków symulowanych (danych Monte Carlo).



Zagadnienia te omówione są osobno w rozdz. 3 pracy. Procedura wymaga też oszacowania wydajności identyfikacji kaonów. Wobec opisanych przez Autorkę różnic w widmach jonizacji w przypadkach symulowanych i w danych fizycznych, na uwagę zasługuje tu zastosowanie dla tych ostatnich metody „tag-and-probe” oraz jej uwiarygodnienie za pomocą danych Monte Carlo (rozdz. 6);

(c) oszacowanie poprawek na kolejne efekty detektorowe (wydajność rekonstrukcji wierzchołka i rekonstrukcji śladów, warunki narzucone na sygnał z sub-detektora MBTS - Minimum Bias Trigger Scintillators, problem migracji, problem przypadkowego tła), omówione w rozdz. 6-7;

(d) wielostopniowe „testy domknięcia” (closure tests), uwiarygodniające kolejne stosowane poprawki na poziomie ilościowym (rozdz. 7);

(e) oszacowanie błędów systematycznych, wynikających z niepewności niektórych spośród zastosowanych wydajności i poprawek (rozdz. 7).

Wykonanie przez Doktorantkę tak pracochłonnej analizy, *de facto* dla sześciu próbek eksperymentalnych biorąc pod uwagę wspomniane powyżej rozdzielenie próbki $pp \rightarrow pX$, budzi uznanie. Również przeprowadzona przez nią dyskusja uzyskanych wyników dotyczących produkcji mezonu ϕ , jest ciekawa poznawczo pomimo narzuconych analizie ograniczeń kinematycznych. Autorka przeprowadza szczegółową analizę porównawczą pomiędzy wynikami eksperymentalnymi a przewidywaniami zastosowanych modeli teoretycznych, wskazując na zaobserwowane niezgodności. Stwierdza też skalowanie rozkładów mezonu ϕ z liczbą zmierzonych cząstek naładowanych (przynajmniej dla procesów pojedynczej dyfrakcji i próbki „minimum bias”). Przeprowadza też, z korektą na różnice w odpowiednich ograniczeniach kinematycznych, porównanie wyników uzyskanych dla dwóch różnych energii zderzenia proton-proton. Wszystko to dobrze ilustruje wartość otrzymanych w pracy nowych danych na produkcję ϕ w trzech typach procesów nieelastycznych. Tak więc zarówno proces uzyskania wyników, jak i same wyniki eksperymentalne stanowią mocną stronę rozprawy.

Słabszą stroną rozprawy stanowi kwestia jej klarowności, zwłaszcza w oczach czytelnika niezwiązanego ze współpracą ATLAS. Rozprawy doktorskie związane z doświadczalną fizyką wysokich energii wykonywaną w wielkich międzynarodowych eksperymentach są zawsze owocem trudnego kompromisu: pomiędzy koniecznością dokładnej dokumentacji przeprowadzonej analizy, bardzo uzasadnionym dążeniem do zachowania rozsądnej objętości samej rozprawy (praca wraz z dodatkami i spisem literatury liczy 128 stron), czasem realizacji i wreszcie klarowności opisu. Niemniej w przypadku niniejszej rozprawy należy stwierdzić, że wspomniana klarowność pozostawia sporo do życzenia przynajmniej w niektórych szczegółowych kwestiach. Dlatego też zawarte poniżej uwagi krytyczne (1)-(3) dotyczą w co najmniej równym stopniu klarowności opisu co kwestii merytorycznych.

(1) w rozdziale 5, na rys. 5.3, 5.4 Autorka porównuje między innymi czystości związane z identyfikacją dodatnio i ujemnie identyfikowanych kaonów. Dla pierwszego z badanych warunków $P_K > 0.1$, $P_\pi < 0.9$ czystość dla cząstek dodatnich jest znacznie (bywa że i dwukrotnie) gorsza niż dla cząstek ujemnych w zakresie niskich pędów. Biorąc pod uwagę stosowanie wspomnianego warunku w całej prowadzonej analizie, fakt ten może u nie-eksperta budzić wątpliwości, których raczej nie rozwiewa odpowiadający tej sytuacji rys. 3.1 (prawy panel) przedstawiający odpowiednie straty energii na jonizację. Autorka pozostawia ten wynik bez komentarza który moim zdaniem byłby tutaj bardzo wskazany. Wszystkie wspomniane rysunki pochodzą z danych Monte Carlo, więc uzyskanie odpowiedzi na pytanie co właściwie powoduje wspomnianą różnicę pomiędzy K^+ a K^- wydaje się możliwe do uzyskania.

(2) w rozdziale 6, opisując poprawkę związaną z systemem MBTS, Autorka przedstawia odpowiednie widma z danych Monte Carlo na rys. 6.7 w zakresie $\xi < 0.16$. Równocześnie Autorka stwierdza, że poprawka dla analizy SD (pojedynczej dyfrakcji) została zastosowana tylko w zakresie $\xi < 0.035$ (tu pomijam mało znaczący błąd redakcyjny) gdyż dla wyższych wartości ξ jest ona zanedbywalna. Skojarzenie rysunku 6.7 z powyższym stwierdzeniem budzi zakłopotanie. Stwierdzenie zdaje się sugerować, że rys. 6.7 może podawać dane w nieodpowiednim zakresie ξ , że w zakresie stosowania



poprawki jest ona większa niż sugerowałyby wspomniany rysunek, i w związku z tym rodzi w końcu pytanie jak duża jest ostatecznie wartość poprawki w zakresie $\xi < 0.035$.

(3) w rozdziale 7 Autorka szacuje błąd systematyczny związany z identyfikacją dodatnio i ujemnie naładowanych kaonów, zmieniając współczynniki analitycznej parametryzacji wyników uzyskanych metodą tag-and-probe w granicach określonych przez błędy wynikające z dopasowania (fitu) odpowiedniej funkcji. Biorąc pod uwagę że wynikające z tej procedury błędy systematyczne są znaczące (4-16%), nasuwa się pytanie w jakim stopniu jest ona jednoznaczna. Nie jest dla mnie oczywiste w jakim stopniu ostateczna wartość uzyskanego błędu systematycznego zależy od postulowanej postaci funkcji $\epsilon_{TP}(p)$, i czy uzyskana wartość niepewności systematycznej pozostałaby podobna gdyby założono jakąś inną, na przykład nie-monotoniczną postać tej funkcji.

Na osobny komentarz zasługuje wykonane w rozdziale 8 porównanie wyników otrzymanych przez Autorkę z wcześniejszymi wynikami eksperymentu ATLAS, uzyskanymi przy energii zderzenia $\sqrt{s}=7$ TeV. W tym celu Autorka wprowadza odpowiednią korektę na różne dla obu pomiarów ograniczenia kinematyczne na kaony pochodzące z rozpadu $\phi \rightarrow K^+K^-$. W przeciwieństwie jednak do cytowanej pracy współpracy ATLAS, Autorka nie dokonuje próby ekstrapolacji swojego wyniku do całkowitego rozkładu ϕ , już bez ograniczeń kinematycznych na produkty rozpadu. Budzi to oczywiście pewien niedosyt, ale biorąc pod uwagę już i tak szeroki zakres i pracochłonność analizy zaprezentowanej w rozprawie nie sposób tego oceniać jako wadę. Stosownym jest jednak zadanie pytania, czy takie rozszerzenie analizy jest planowane w przyszłości i jakich spodziewać się należy w takim wypadku niepewności. W szczególności, czy możliwe jest oszacowanie pełnej wartości $dn/dy(y=0)$ dla badanych procesów? Jej uzyskanie pozwoliłoby na dokonanie cennych porównań z innymi eksperymentami nie tylko na LHC, ale też na przykład z precyzyjnymi danymi z eksperymentu NA61/SHINE przy znacznie niższych energiach akceleratora SPS w CERN.

Rozprawa doktorska zawiera dość liczne niedociągnięcia na szeroko pojętym poziomie redakcyjnym, co może świadczyć o pośpiechu na ostatnich etapach jej realizacji. Nie najlepiej użyte określenia w języku angielskim czy też nawet proste błędy w konstrukcji zdania, niedoróbki, jawne powtórzenie jednego z ważniejszych równań i inne tego rodzaju problemy nie mają jednak istotnego znaczenia jeśli chodzi o jej wartość poznawczą.

Podane powyżej uwagi krytyczne (1)-(3) wraz z dodatkowymi komentarzami w żaden sposób nie podważają merytorycznej wartości zaprezentowanej rozprawy doktorskiej. Wymienione przykłady niedoskonałości opisu i niedociągnięcia redakcyjne tylko w bardzo niewielkim stopniu ograniczają jej wysoką wartość poznawczą i edukacyjną. Dlatego podsumowując, uważam że rozprawa doktorska Pani mgr inż. Ingi Łakomiec zatytułowana „The measurement of $\phi(1020)$ meson production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector at the LHC” zawiera nowe, bardzo ciekawe i ważne wyniki dotyczące produkcji mezonu ϕ w nieelastycznych oddziaływaniach proton-proton przy energiach LHC. Autorka wykazała się wysokim poziomem wiedzy i dogłębną znajomością różnych aspektów analizy doświadczalnej, a także dużą biegłością w jej zastosowaniu w praktyce.

Recenzowana rozprawa doktorska spełnia zwyczajowe i ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie Pani mgr inż. Ingi Łakomiec do dalszych etapów postępowania doktorskiego.

