

dr hab. Katarzyna Grebieszkow, prof. uczelni
Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej
Zakład Fizyki Jądrowej

Warszawa, 29 marca 2021

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Marka Walczaka, zatytułowanej
„Analysis of the ultra-peripheral events in heavy-ion collisions in the CMS
experiment at the Large Hadron Collider”**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgra Marka Walczaka dotyczy pomiaru całkowitego przekroju czynnego na koherentną ultra-peryferyczną fotoprodukcję mezonu Upsilon, oznaczenie $\Upsilon(1S)$, w zderzeniach Pb+Pb przy najwyższej dostępnej obecnie energii akceleratora LHC (5.02 TeV w układzie środka masy na parę zderzanych nukleonów). Dane do analiz pochodziły z eksperymentu CMS (*Compact Muon Solenoid*) w CERN. Mezon Υ (tzw. ukryte piękno, kwark b, anty-b) badany był w kanale rozpadu na dwa naładowane miony ($\mu^+\mu^-$). Omawiany proces jest czuły na jądrowe funkcje rozkładu partonów (*nuclear Parton Distribution Functions*, nPDF) dla gluonów.

Głównym powodem badania zderzeń jądrowych w akceleratorze LHC jest dokładne poznanie stanu plazmy kwarkowo-gluonowej (QGP), czyli gorącej materii o wysokich gęstościach energii, w której kwarki i gluony zostają uwolnione z hadronów. Badanie efektów pochodzących od QGP wymaga jednak dogłębnego zrozumienia stanu początkowego, czyli m.in. rozkładu partonów w zderzanych jądrach atomowych. Uzyskany w pracy wynik przyczynia się więc do zrozumienia stanu początkowego w zderzeniu jądrowym.

Zderzenia ultra-peryferyczne jądro-jądro, które były przedmiotem analiz, są to oddziaływania, w których odległość między środkami zderzanych jąder (parametr zderzenia) jest większa niż suma promieni tych jąder. W zasadzie oddziaływania takie ciężko w ogóle nazwać zderzeniami, ponieważ jądra atomowe jedynie przelatują blisko siebie. Mamy natomiast do czynienia z silnymi polami elektromagnetycznymi które są źródłem fotonów. Taki foton wyprodukowany przez jedno jądro może oddziaływać np. z fotonem z drugiego jądra (oddziaływanie $\gamma\text{-}\gamma$) albo z całym jądrem atomowym (oddziaływanie $\gamma\text{-}$ jądro). W pracy analizowano mezony Υ powstałe w wyniku koherentnej ultra-peryferycznej fotoprodukcji, co oznacza, że zostały one wyprodukowane w oddziaływaniach fotonu (fotoprodukcja) produkowanego przez jedno z jąder a długość fali fotonu była na tyle duża, że oddziaływał on z całym, nienaruszonym jądrem atomowym (koherentność). Mając tu miejsce ekskluzywna fotoprodukcja mezonów wektorowych (np. Υ) może być wrażliwa na funkcje rozkładu partonów w jądrze (nPDF), a konkretnie na gęstości gluonów w obszarze małych wartości zmiennej 'x' Bjorkena. Ekskluzywność oznacza, że w stanie końcowym produkowany był wyłącznie rozważany mezon, czyli np. Υ .

Rozprawa doktorska pokazuje pierwszy pomiar całkowitego przekroju czynnego na koherentną ultra-peryferyczną fotoprodukcję mezonu wektorowego $\Upsilon(1S)$ w zderzeniach Pb+Pb. Otrzymane wyniki zostały porównane z przewidywaniami teoretycznymi.

Praca doktorska mgra Marka Walczaka liczy 104 strony (plus strona tytułowa, spis treści, streszczenie, dedykacja) i napisana jest w języku angielskim. Praca podzielona jest na pięć głównych rozdziałów

zawierających: wstęp teoretyczny (rozdział 1), opis akceleratora LHC (*Large Hadron Collider*) oraz eksperymentu CMS (rozdział 2), ostatnie wyniki dotyczące pomiaru mezonów wektorowych w zderzeniach ultra-peryferycznych (rozdział 3), szczegóły techniczne analiz (rozdział 4), końcowe wyniki analiz, porównanie z przewidywaniami teoretycznymi oraz podsumowanie (rozdział 5). W pracy znajduje się również jeden dodatek. Bibliografia obejmuje 65 dobrze dobranych pozycji.

Rozdział 1 opisuje podstawy teoretyczne niezbędne do zrozumienia dalszych części pracy. Omówiony jest m.in. Model Standardowy w fizyce cząstek elementarnych, podstawy chromodynamiki kwantowej, funkcje rozkładu partonów w nukleonie oraz jądrze. W rozdziale 1 Autor pracy wprowadza również pojęcia fotoprodukcji i zderzeń ultra-peryferycznych oraz opisuje ultra-peryferyczną produkcję mezonów Upsilon w zderzeniach Pb+Pb.

Rozdział 1 rozprawy pokazuje, że Doktorant ma szeroką wiedzę z zakresu fizyki zderzeń cząstek elementarnych oraz zderzeń jądrowych przy wysokich energiach. Na pochwałę zasługuje dydaktyczny i obrazowy opis procesu głęboko nieelastycznego rozpraszania (*Deep Inelastic Scattering*, DIS), chociaż opis zmiennej 'y' ze wzoru 3 mógłby być bardziej szczegółowy. Autor rozprawy słusznie podkreśla duże znaczenie wyznaczania funkcji rozkładu partonów w swobodnym nukleonie i jądrze (PDF, nPDF). Jednym z powodów jest poszukiwanie sygnałów „nowej fizyki” przy którym niezbędne jest dokładne zrozumienie stanu początkowego w zderzeniu. Zagadnienia związane z fotoprodukcją oraz ze zderzeniami ultra-peryferycznymi zostały również klarownie wyjaśnione w pracy.

Z uwag technicznych: w podrozdziale 1.1 pojawia się sporo specjalistycznych pojęć z zakresu fizyki cząstek elementarnych i fizyki zderzeń ciężkich jonów. Większość z nich jest prawidłowo wyjaśniona w kolejnych podrozdziałach, ale brakuje zdefiniowania pojęcia pomeronu. Czy można prosić o podanie referencji (lub obliczeń) do ostatniej kolumny tabeli 1? D. H. Perkins (2004 rok) podaje względne siły czterech typów oddziaływań (rzędy wielkości sił działających między dwoma protonami w bezpośrednim kontakcie) jako: 1 (silne), 10^{-2} (elektromagnetyczne), 10^{-7} (słabe) oraz 10^{-39} (grawitacyjne). Wiele innych źródeł również podaje czynnik 100 jako stosunek sił oddziaływania silnego i elektromagnetycznego (na podstawie wartości α_s/α). Masy cząstek elementarnych można byłoby wziąć z aktualnej listy *Particle Data Group* (PDG), dodatkowo jest pomyłka w masach kwarku 'u' i 'd' (wpisane odwrotnie). Mając na uwadze rysunek 1 z liczbą kwantową dziwności $S=-1$ dla kwarku 's' aż się prosi, żeby podać liczby kwantowe powabu, piękna i prawdy dla kwarków 'c', 'b' i 't'. We wzorze 5 brakuje mi liczby masowej. W tabeli 3 i w tekście pojawia się nazwa *dijet*, a o ile czegoś nie przeoczyłam, pojęcie *jetu* nie zostało wcześniej zdefiniowane. W podpisie pod rysunkiem 9 jest mowa o rozkładach kwarków 'u' i 'd', natomiast sam rysunek (i tekst) wskazuje na to, że dwa pierwsze rozkłady dotyczą kwarków 'u' i 'd' walencyjnych. W zdaniu: „*In case of the sea quarks (u,d,s)...*” kwarki trzeba zamienić na antykwarki. W podpisie pod rysunkiem 11 nie wyjaśniono pojęcia parametru zderzenia 'b' (pewnie wystarczyłoby odnieść się do rysunku 13) oraz parametru 's_g'. Z kolei sam rysunek 13 mógłby być lepiej opisany np. przez podanie co oznaczają strzałki góra-dół, falki, 'Z', etc. W podpisie pod rysunkiem 12, zgodnie z przyjętą wcześniej konwencją, powinno być PbPb zamiast Pb+Pb.

Rozdział 2 poświęcony jest głównie szczegółom budowy detektora CMS. W pierwszym podrozdziale znajduje się również opis akceleratora LHC, z którego pochodzą wiązki zderzane w eksperymencie. Autor pracy zaznajamia czytelnika z etapami uzyskiwania i przyspieszania wiązek protonowych, ołowiowych oraz z wartościami świetlności dla różnych lat zbierania danych oraz różnych zderzanych

systemów. Dalsze podrozdziały dotyczą samego detektora CMS oraz jego poszczególnych składowych. Opisano magnes nadprzewodzący, krzemowy detektor śladowy, kalorymetr elektromagnetyczny (ECAL), kalorymetr hadronowy (HCAL), kalorymetry przednie (HF), system mionowy (kluczowy z punktu widzenia analiz przedstawionych w pracy) oraz detektory przednie (CASTOR, ZDC). Autor pracy opisał również użyty system trygerów oraz miejsca i (dla mionów) sposoby rekonstrukcji cząstek różnego typu.

Rozdział 2 pracy jest szczegółowy a informacje w nim zawarte z całą pewnością ułatwiają zrozumienie technicznych aspektów analiz opisanych w dalszej części pracy. Rozdział ten pokazuje, że Autor rozprawy jest znakomicie zaznajomiony z budową i działaniem detektora CMS.

Jeśli chodzi o uwagi to na stronie 27 (pod wzorem 11) definicja barna jest nieprawidłowa. Brak jest również informacji o pochodzeniu rysunku 23. Czy dobrze rozumiem, że zmienna E_t^{miss} (strona 32) uwzględnia nie tylko energie cząstek, które nie mogą być zarejestrowane w detektorze (neutrina), ale również energie cząstek naładowanych, które z różnych powodów (niepełna akceptancja, nieefektywności rekonstrukcji) nie zostały zrekonstruowane? Jeśli w podpisie pod rysunkiem 25 wspomniane są poszczególne komponenty funkcji fitującej to może warto podać i sam wzór funkcji (równanie 1.1 w pracy 30). W podrozdziale 2.2.6 nie widzę nigdzie opisu detektorów RB1/2/3/4 i nie bardzo jestem w stanie z rysunku 32 odczytać podanego pokrycia w pseudopośpieszności ($|\eta| < 1.6$) dla detektorów RPC. Nie ma też referencji do rysunków 32 i 34. Czy były wykonane przez Autora pracy?

Przegląd ostatnich wyników na temat produkcji mezonów wektorowych w zderzeniach ultra-peryferycznych pokazany jest w **rozdziale 3**. Wyniki te dotyczą m.in. ekskluzywnej fotoprodukcji mezonów Υ (3 stany) w zderzeniach p+Pb przy energii akceleratora LHC. Zbadaną reakcją było oddziaływanie $\gamma p \rightarrow \Upsilon p$, gdzie mezony Υ , tak samo jak w analizach Autora rozprawy, poszukiwane były w kanale rozpadu na dwa miony. Dla reakcji $\gamma p \rightarrow \Upsilon(1S)p$ pokazano również wyniki z eksperymentów ZEUS i H1 (zderzenia e+p w akceleratorze HERA) oraz z eksperymentu LHCb (zderzenia p+p w akceleratorze LHC). W rozdziale 3 omówione są również wyniki eksperymentów CMS i ALICE dotyczące ultra-peryferycznej koherentnej fotoprodukcji J/ψ w zderzeniach Pb+Pb. Wyniki te są zgodne z modelem uwzględniającym efekty jądrowe (tzw. jądrowy efekt „przesłaniania” gluonów, *nuclear gluon shadowing effect*).

Autor rozprawy jest bardzo dobrze zaznajomiony z dotychczasowymi dostępnymi wynikami eksperymentalnymi oraz ze szczegółami technicznymi analiz przeprowadzonych w CMS.

W **rozdziale 4** opisana jest cała „kuchnia eksperymentalna” analiz. Generatorem *Monte Carlo* (MC) używanym do symulowania procesów sygnału i tła był *STARlight*. Autor analiz generował sygnał, czyli koherentną fotoprodukcję Υ i niekoherentną fotoprodukcję Υ oraz tło QED, czyli ekskluzywną produkcję mionów w procesie $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$. Dla tych trzech próbek pokazano rozkłady pędu poprzecznego mionów, par mionów oraz pośpieszności pojedynczych mionów i dimionów. W analizach do wyznaczenia akceptancji mionów użyto próbki *Monte Carlo* $\gamma\gamma$. Do dalszych analiz wybrano obszar kinematyczny, w którym stosunek liczby mionów zrekonstruowanych do symulowanych był większy niż 10%. W podrozdziale 4.4 Autor pracy opisuje kryteria selekcji oddziaływań. Zapewniają one m.in. ekskluzywność, czyli wybór takich zderzeń, dla których w stanie

końcowym produkowana jest wyłącznie para $\mu^+\mu^-$. Dodatkowe cięcia zwiększają prawdopodobieństwo, że dimiony pochodzą z koherentnej fotoprodukcji mezonów Υ . Po zastosowaniu cięć rozkład masy niezmienniczej dimionów dla danych pokazuje wyraźny pik przy $\Upsilon(1S)$, natomiast wyższe stany nie są widoczne. Fit w masie niezmienniczej $\mu^+\mu^-$ pozwala na otrzymanie liczby $\Upsilon(1S)$ z koherentnej i niekoherentnej fotoprodukcji. Celem wydzielenia wkładu od produkcji koherentnej Autor analiz użył rozkładów pędu poprzecznego dimionów z danych oraz z próbek *Monte Carlo*. Do obliczenia efektywności selekcji mionów Autor rozprawy użył coraz popularniejszej ostatnio (eksperymenty LHCb, ATLAS, CMS, NA61/SHINE) metody „tag and probe”. W rozdziale 4 znajduje się również omówienie siedmiu wkładów do niepewności systematycznej.

Rozdział 4 pracy pokazuje, że Doktorant dysponuje bardzo dobrym warsztatem eksperymentalnym oraz znajomością metodyki pracy w wielkich eksperymentach fizycznych. Przeprowadzone obliczenia efektywności selekcji mionów mogą być pomocne również w innych ultra-peryferycznych analizach wykorzystujących zderzenia Pb+Pb zebrane przez CMS w 2018 roku. Przykładem jest ultra-peryferyczna fotoprodukcja mezonu J/ψ .

Z drobnych uwag: w podrozdziale 4.1.1 w trzech miejscach QCD powinno być zmienione na QED. Na opisach osi rysunków 47, 48 i 49 widać pośpieszność, a tekst pracy mówi o pseudopośpieszności. Czy wiadomo jak duży jest i ewentualnie jak wpływa na wyniki efekt tzw. migracji zrekonstruowanych śladów do/z innego binu akceptancji (rysunki 47, 48, 49)? Chodzi o potencjalne różnice (w pośpieszności i p_T) dla cząstek wygenerowanych i zrekonstruowanych. W okolicy rysunków 55–57 brakuje, zapowiadanego w tekście (na stronie 65), rysunku masy niezmienniczej dla niekoherentnej produkcji $\Upsilon(1S)$ z MC. Czy przy fitach masy niezmienniczej (rysunek 60) próbowano może również innej funkcji dla sygnału (np. Breit-Wigner)? Metoda ekstrakcji wkładu od produkcji koherentnej może być modelowo zależna. Czy jest szansa, żeby w przyszłości, jako dodatkowy wkład do niepewności systematycznej, użyć jakiegoś innego niż *STARlight* modelu zderzeń ultra-peryferycznych? Czym był podyktowany taki a nie inny wybór zmian energii w detektorach HF przy oszacowywaniu niepewności systematycznej? Czy były to zmiany symetryczne (± 0.5 GeV od nominalnej wartości)?

Końcowy wynik pracy pokazany jest w **rozdziale 5**. Całkowity przekrój czynny na koherentną ultra-peryferyczną fotoprodukcję $\Upsilon(1S)$ w zderzeniach Pb+Pb przy energii $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV został podany z niepewnością statystyczną i systematyczną. Wzór na przekrój uwzględnia otrzymaną liczbę przypadków koherentnej ultra-peryferycznej produkcji $\Upsilon(1S)$, poprawkę na efektywność procesu (z *Monte Carlo*), poprawkę na efektywność selekcji mionów (z metody „tag and probe”), świetlność oraz stosunek rozgałęzień dla rozpadu $\Upsilon(1S)$ w kanale mionowym. Wynik został porównany z kilkoma obliczeniami teoretycznymi, zakładającymi różne parametryzacje rozkładu gluonów oraz „przesłaniania” gluonów w jądrze. Ograniczone w pseudopośpieszności przewidywania teoretyczne musiały zostać odpowiednio znormalizowane przez Autora rozprawy tak, żeby można było je porównać ze zmierzonym w CMS całkowitym przekrojem czynnym. Na końcu rozdziału 5 znajduje się również krótkie podsumowanie pracy.

Rozdział 5 pokazuje, że Doktorant nie tylko potrafił przeprowadzić analizy i otrzymać wynik końcowy, ale również wie jak taki wynik może być interpretowany oraz zastosowany. Na podstawie przekroju otrzymanego w CMS można z dużym prawdopodobieństwem wykluczyć kilka pokazanych w pracy przewidywań teoretycznych.

Z drobnych uwag: czy jest jakiś powód, dla którego użyto zaokrąglonej wartości poprawki z MC (0.29 zamiast 0.290448) czy jest to tylko kwestia zapisu w rozdziale 5?

Poza wymienionymi wcześniej uwagami w pracy jest również trochę niedociągnięć typowo edytorskich. Referencje nie zawsze pojawiają się w odpowiedniej kolejności, w referencji 1 (PDG) jest błędny rok (2019 zamiast 2018), brakuje numeru tomu i artykułu w pracy 3, po poprawce do referencji 1 praca 5 przestanie być potrzebna, brakuje autorów w referencji 61, referencje 21 i 48 odbiegają formatem od przyjętej konwencji, prace 11 i 12 zostały opublikowane. Na początku pracy Model Standardowy jest pisany dużymi literami, na stronie 13 małymi. Na stronie 20 pojawia się *center-of-mass*, a następnie (strona 23) *center of mass*. W dokumencie są również powtórzenia tych samych słów obok siebie (w kilku miejscach) oraz spora liczba drobnych literówek.

Oprócz przedstawionych w rozprawie prac nad mezonem Upsilon Doktorant zajmował się wcześniej bardzo podobną analizą mezonów J/ψ w ultra-peryferycznych zderzeniach p+Pb oraz Pb+Pb w eksperymencie CMS. Świadczy to o dużej wiedzy eksperckiej dotyczącej tego typu analiz. Mgr Marek Walczak jest współautorem wielu publikacji eksperymentu CMS oraz autorem (w imieniu Współpracy CMS) czterech artykułów pokonferencyjnych w *Acta Physica Polonica B*. W dwóch z nich omawiana jest m.in. strategia analiz mezonu Υ w ultra-peryferycznych zderzeniach Pb+Pb. Możliwość wystąpienia na konferencji w imieniu tak dużej Współpracy jest zawsze wyróżnieniem i wyrazem zaufania do prelegenta. Wyniki dotyczące analiz mezonu Υ były dotychczas pokazywane na wewnętrznych spotkaniach CMS. Mijmy nadzieję, że zostaną niedługo opublikowane jako oficjalny rezultat Współpracy.

Przygotowanie rozprawy doktorskiej to duży i pracochłonny projekt. Pomimo wymienionych w recenzji niedociągnięć, dokument wskazuje na to, że analizy zostały przeprowadzone starannie i rzetelnie, zgodnie z regułami sztuki. Opis analiz pokazuje szeroką wiedzę i kompetencje Autora pracy. Mgr Marek Walczak wykazał się bardzo dobrą znajomością metod analizy danych, uzyskując oryginalny wynik o dobrze określonej precyzji. Wynik ten znacząco przyczynia się do zrozumienia funkcji rozkładu gluonów w jądrze, czyli również do zrozumienia stanu początkowego w zderzeniu jądrowym. **Rozprawa przygotowana przez mgra Marka Walczaka spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim, dlatego też wnoszę o dopuszczenie mgra Marka Walczaka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

Kotlyarski Grigoriy