

Prof. Antoni Szczurek
Instytut Fizyki Jądrowej
im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
ul. Radzikowskiego 152
31-345 Kraków

Recenzja rozprawy habilitacyjnej dra Jakuba Wagnera

Pan dr Jakub Wagner przedstawił rozprawę habilitacyjną zatytułowaną: “Badania ekskluzywnej produkcji cząstek w procesach z dużą skalą czasopodobną” jako jednotematyczny cykl publikacji.

Przedstawiona rozprawa stanowi 7 wybranych prac dotyczących tematyki zawartej w tytule.

I. OGÓLNE INFORMACJE

Pan dr Jakub Wagner ukończył Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w roku 2002 jako magister nauk fizycznych ze specjalnością fizyka teoretyczna.

Jego praca doktorska pod kierunkiem Prof. Piotra Chankowskiego zatytułowana “Naruszanie symetrii elektroslabej i struktura poprawek promienistych w rozszerzeniach Modelu Standardowego” została ukończona w roku 2008.

Po roku 2008, aż do chwili obecnej, pan Jakub Wagner był zatrudniony w Narodowym Centrum Badań Jądrowych na stanowisku adiunkta. W ciągu tych ostatnich 11 lat prowadził badania procesów ekskluzywnych w różnych reakcjach, głównie wywołanych fotonami (rzeczywistymi lub wirtualnymi). Jednym z jego głównych współpracowników z NCBJ był pan profesor Lech Szymanowski, wybitny specjalista z dziedziny chromodynamiki kwantowej.

II. GŁÓWNE OSIĄGNIĘCIE

W przedstawionym jednotematycznym cyklu publikacji habilitant zajmował się procesami ekskluzywnymi z dużą skalą typu czasopodobnego.

Głównym tematem jego zainteresowań było głęboko-wirtualne czasopodobne rozpraszanie Comptona. Chodzi więc o fotoprodukcję par leptonów w zderzeniu foton-proton z protonem w stanie końcowym. Proces ten jest w pewnym sensie komplementarny do procesu DVCS (głęboko-wirtualnego rozpraszania Comptona) często dyskutowanego w literaturze. W tym przypadku obiektami których się używa są uogólnione rozkłady partonów (GPDs). Ważne jest aby udowodnić uniwersalność takich rozkładów. Jest to możliwe pod warunkiem uwzględnienia poprawek wyższego rzędu. Poprawki wyższego rzędu są dość inne w przypadku czaso- i przestrzenno podobnym. Zaprezentowany cykl jest szczegółową analizą z dokładnością do poprawek wyższego rzędu (NLO). Autor bada również konsekwencje fenomenologiczne. Pełny cykl obejmuje kilka zagadnień takich jak:

- (1) wyprowadzenie i analiza struktury analitycznej amplitud
- (2) obliczenia numeryczne poprawek NLO dla procesów DVCS i TCS (time-like Compton scattering).
- (3) przewidywania dla przyszłych eksperymentów
- (4) fotoprodukcja fotonów z dużą masą niezmienniczą

Omówię te tematy w dużym skrócie:

Ad 1) **Struktura analityczna amplitud**

W pracy S2 obliczono poprawki rzędu $O(\alpha_s)$ do amplitudy podwójnie głęboko-wirtualnego rozpraszania Comptona. Chodzi o sytuację kiedy zarówno wchodzący jak i wychodzący foton są silnie wirtualne. Podprocesem partonowym jest wówczas $\gamma^*g \rightarrow \gamma^*g$. Ta ogólna sytuacja została następnie zaadoptowana na przypadek DVCS i TCS. Autor pokazał że poprawki NLO różnią się znacząco dla przypadku DVCS i TCS ze względu na inną strukturę analityczną. Obliczenia zostały wykonane w tak zwanym schemacie \overline{MS} . Rozważane poprawki do tych różnych procesów są podstawą do dalszych badań fenomenologicznych. W pracy S3 dokonano uogólnienia wyniku z S2. Przedyskutowano związek między amplitudami z dużymi skalami czaso- i przestrzenno-podobnymi. W pracy tej przedstawiono przykłady elektroprodukcji fotonu i mezonu oraz fotoprodukcję oraz produkcję par leptonów inicjowaną mezonami. Przedyskutowano własności faktoryzacyjne w tak zwanym wiodącym "twiście". Pokazano pewne związki dla

sytuacji czasowo- i przestrzenno-podobnej, jak również dla różnych wartości parametru ξ oraz część rzeczywistą i urojoną amplitudy. Wiele efektów zobrazowano wykorzystując model Goloskokova-Krolla dla GPD typu H. Autor uwzględnia poprawki NLO zarówno kwarkowe jak i gluonowe. Wyliczone poprawki NLO są duże. Można je sprawdzić poprzez analizę rozkładów kątowych pary leptonów

Ad 2) **Konsekwencje fenomenologiczne**

Fenomenologiczne konsekwencje uwzględnienia poprawek NLO zostały dokładnie przestudiowane w pracy S4. Autor skupia się na obszarze kinematycznym stosownym dla eksperymentów w JLAB-ie i COMPASS-ie. Wyniki pokazano dla dwóch różnych modeli GPD. Rozważane modele odzwierciedlają zwykłe rozkłady partonów w granicy $\xi \rightarrow 0$ i $t \rightarrow 0$ co dodaje im większej wiarygodności. Pokazano, że dla sytuacji eksperymentalnych (JLAB, COMPASS) poprawki NLO są bardzo duże. Według autora przyszły pomiar w obu obszarach (przestrzennym i czasowym) będzie więc świetnym testem poprawek NLO, ponieważ przewidziano ogromne różnice w obu sytuacjach. Eksperymenty powinny to potwierdzić. Będzie to zdaniem habilitanta kluczowy test podejścia kolinearnego. W przypadku produkcji pary $\mu^+\mu^-$ czy e^+e^- (TCS) należy również uwzględnić proces Bethego-Heitlera związany z fuzją $\gamma\gamma \rightarrow l^+l^-$. Zakładając znajomość formfaktorów elektromagnetycznych ten ostatni proces może być policzony w ramach kwantowej elektrodynamiki. Dla niezbyt wysokich energii zderzenia wkład procesu Bethego-Heitlera dominuje nad badanym wkładem TCS. Można jednak wybrać takie obszary przestrzeni fazowej, że oba wkłady są tego samego rzędu. Trzeba uwzględnić też efekty interferencyjne. Autorzy rozważają rozkłady kątowe w układzie środka masy pary l^+l^- . W autoreferencie na rysunku 13 J. Wagner prezentuje asymetrię spinową wiązki (beam spin asymmetry) dla procesu DVCS i kinematyki eksperymentu JLAB12. Autor uważa też za bardzo ciekawą asymetrię ładunkowo-spinową, którą pokazuje dla kinematyki COMPASS-a. Autorzy wprowadzili pewną wielkość odpowiedzialną za odstępstwo od procesu Breita-Heitlera zilustrowaną w przypadku TCS dla bardzo szczególnego wyboru parametrów kinematycznych. Autor argumentuje, że poprawka NLO zmienia nawet znak zdefiniowanej wielkości. Część urojoną CFF można zmierzyć przez pomiar asymetrii ze względu na znak polaryzacji kołowej fotonów. Autor ilustruje to przykładem, ponownie dla JLAB. Pokazuje asymetrię w funkcji specjalnie zdefiniowanego kąta azymutalnego jak i zmiennej Bjor-

kena. Pokazano również efekt poprawek NLO. Autor uwzględnia między innymi wpływ poprawek związanych z gluonami. Recenzent zna ten fakt z podejścia k_t -faktoryzacji w którym gluony są podstawą.

Ad 3) Przewidywania dla przyszłych eksperymentów

Funkcje GPD nie mogą być w zasadzie wyliczone i muszą być wyznaczone z przyszłych eksperymentów. W dwóch pracach (S4 i S5) zamieszczono przewidywania dla konkretnych eksperymentów w JLAB-ie i COMPASS-ie. W pracy S5 zaproponowano jak mierzyć spolaryzowane (nieznane) rozkłady \tilde{H} i \tilde{E} w czasopodobnym rozpraszaniu Comptona. Eksperymentalnie w tym celu należy użyć liniowo spolaryzowanej wiązki fotonów w procesie TCS. Taka wiązka jest możliwa w JLAB. W połączeniu z detektorem CLAS pozwala to na wykonanie pomiarów. W pracy S5 pokazano, że pomiar spolaryzowanych uogólnionych rozkładów kwarków i gluonów będzie możliwy również w eksperymencie GlueX. Pan Jakub Wagner sugeruje pomiar przekroju czynnego w funkcji kąta pomiędzy wektorem polaryzacji a tak zwaną płaszczyzną hadronową. Otworzyło by to możliwość pomiaru słabo znanego rozkładu \tilde{H} . Ilustrację wykonano dla trochę akademickiego rozkładu Goloskokova-Krolla, który jest w tej dziedzinie często punktem odniesienia. Pokazano przykład mierzonych wartości dla różnych normalizacji \tilde{H} (przenormalizowany model Goloskokova-Krolla). Pokazano, że mierzona wielkość (C) jest czuła na wielkość \tilde{H} . Nie dyskutowano czy z eksperymentu można będzie wyciągnąć \tilde{H} , czy tylko testować modele. W eksperymentach w JLAB i w eksperymencie COMPASS używa się w zasadzie wiązek leptonów.

W pracy S1 i S6 rozważono zderzenia ultraperyferyczne typu proton+proton. W tym przypadku jeden z protonów jest źródłem równoważnych fotonów, to znaczy dostarcza strumienia prawie rzeczywistych fotonów. Eksperymenty tego typu mogą być przeprowadzane w RHIC lub w LHC. Mamy tu możliwość badania nieco wyższych energii w systemie foton-proton w porównaniu do eksperymentów w JLAB czy eksperymentu COMPASS. W pracy S1 zasugerowano możliwość takich pomiarów w LHC. Wówczas przekrój czynny jest splotem widma fotonów i elementarnego przekroju czynnego $\gamma p \rightarrow l^+ l^- p$. Autor zwraca uwagę, że przy największych dostępnych energiach wkład procesu Comptona dominuje. Poprawia się więc stosunek sygnału (TCS) do tła (BH). Używając pewnego zakresu zmiennych kinematycznych wkład procesu Bethego-Heitlera jest rzędu pb. Dla procesu TCS jest podobny.

W pracy S6 przebadano możliwość pomiaru par leptonów w proponowanym eksperymencie AFTER@LHC. Chodzi tu o eksperymenty ze stałą tarczą. Planuje się zarówno wiązki protonów jak i ciężkich jonów. Przygotowano szczegółową tabelę w której zestawiono wiele charakterystyk eksperymentów AFTER@LHC oraz dla RHICa i SPS-u. Autor zwraca uwagę że proces Bethego-Heitlera, wyliczalny z kwantowej elektrodynamiki może być użyty do pomiaru świetlności reakcji. W pracy S6 przebadano także możliwość wyznaczania uogólnionych rozkładów partonów w procesie TCS. Rozważono zderzenia pPb , Pbp oraz pp . Pokazano typowe różniczkowe przekroje czynne. Skupiono się na członie interferencyjnym, to znaczy jego względnej wielkości w stosunku do członu Bethego-Heitlera. Stwierdzono, że analiza członu interferencyjnego pozwala wyciągnąć pewne wnioski o uogólnionych rozkładach partonów w protonie. Człon interferencyjny można uzyskać poprzez analizę rozkładów kątowych.

Wyniki uzyskane przez autora doprowadziły do dwóch zaakceptowanych propozycji eksperymentów w JLAB.

Ad 4) **Fotoprodukcja pary fotonów z dużą masą inwariantną**

W pracy S7 rozważono, zdaniem autora po raz pierwszy, reakcję: $\gamma + N \rightarrow \gamma\gamma N$, gdzie $N = p, n$. Skoncentrowano się na raczej dużych masach niezmienniczych pary fotonów w kanale wyjściowym i małych przekazach czteropędu pomiędzy nukleonem w stanie początkowym i końcowym. W przybliżeniu Borna część twarda zawiera tylko oddziaływanie elektromagnetyczne. Taki proces nie jest czuły na uogólnione rozkłady gluonów. Wynik nie zależy od raczej słabo znanych rozkładów GPD o nieparzystej chiralności (chiral-odd GPDs). Rachunku dokonano w podejściu kolinearnej QCD. Zdaniem autora proces jest interesujący ze względu na możliwość badania wpływu skal na strukturę analityczną amplitud. Reakcja ta zawiera zarówno skalę czasopodobną (masa niezmiennicza fotonów) jak i skalę przestrzennopodobną. Wykonano obliczenia rozkładów masy niezmienniczej pary fotonów przy t_{min} dla różnych energii w podsystemie γp . Proces ten, czuły na rozkłady kwarków, maleje z energią, dlatego przekrój czynny na ten proces jest dobry do pomiarów dla niższych energii. Wydaje się, że eksperyment będzie mógł być przeprowadzony w laboratorium JLAB.

W swoim autoreferacie autor przedstawia krótkie podsumowanie jak i perspektywy tej dziedziny. Planowane są między innymi eksperymenty w J-Parc.

Badania grupy autorów, w której uczestniczył pan Jakub Wagner, stworzyły formalizm, który może być użyty do kilku różnych eksperymentów. Danymi wejściowymi dla tego formalizmu są uogólnione rozkłady partonów, które wykraczają poza zaproponowany formalizm i mogą być wzięte z prostych, nie wiem czy realistycznych, modeli. Inna powszechnie akceptowaną opcją dotyczy "pomiaru" uogólnionych rozkładów partonów w różnych eksperymentach. Ten pogląd został sformułowany już dość dawno, ale jak dotąd nie widziałem związanych z tym wyników eksperymentalnych. W moim przekonaniu takie wyciągnięcie rozkładów GPD jest (będzie) bardzo trudne i osobiście nie oczekuję przełomu.

Nie mniej jednak stworzony systematyczny formalizm będzie mógł być użyty do analizy przyszłych eksperymentów w tym eksperymentów które zostały zaprojektowane w oparciu o wstępne analizy pana Jakuba Wagnera. Formalizm powinien być więc użyteczny w interpretacji przyszłych danych eksperymentalnych. Autorzy podkreślają, że będzie można testować również uniwersalność uogólnionych rozkładów partonów. W tej materii nie jestem takim optymistą. Na koniec dodam, że pan Jakub Wagner uczestniczył w przygotowaniu platformy typu softwerowego (zespołu programów komputerowych) do przyszłej analizy danych eksperymentalnych. Doceniam również tę pragmatyczną stronę działalności habilitanta.

III. POZOSTAŁY DOROBEK NAUKOWY

Pan Jakub Wagner napisał ponadto, po doktoracie, 5 innych publikacji nie dołączonych do bezpośredniej oceny. Dwie prace (P1 i P2) poświęcone są reakcjom ekskluzywnej produkcji mezonów z powabem jak i lekkich mezonów w reakcjach wywołanych neutrinami. W ogólności tego typu procesy mogą również być użyte do studiowania rozkładów partonów. Problemem są stosunkowo małe przekroje czynne w reakcjach wywołanych neutrinami. Nie mniej jednak procesy te byłyby bardzo użyteczne do rozplątania partonowej struktury zapachowej protonu w kontekście uogólnionych rozkładów partonów. Reakcje z produkcją mezonów powabnych pozwoliłyby na wyznaczenie nowych rozkładów "transwersity". Pokazano, że porównanie przekrojów czynnych na produkcję D^+ i D^0 pozwoli na oszacowanie między innymi rozkładów gluonowych. Autorzy zasugerowali, że warto pomyśleć o analizie takich procesów w planowanych eksperymentach, takich jak: NOvA, Minerva czy Minos, które skoncentrowane są jednak na badaniach oscylacji neutrin. W pracy P2 rozważano produkcję lekkich

mezonów pseudoskalarnych i spolaryzowanych podłużnie mezonów wektorowych. Uwzględniono również pomijane zwykle w podejściu kolinearnym wkłady gluonowe. Pokazano interesujący związek między amplitudą na produkcję pionu i podłużnie spolaryzowanego mezonu ρ . Reakcje tego typu pomogą rzucić nowe światło na rozdzielanie efektów pochodzących od uogólnionych rozkładów partonów w nukleonie i amplitud rozkładu dla mezonów.


W pracy P3 opisano platformę do badania procesów ekskluzywnych zwaną PARTONS. Jest ona dedykowana badaniu (wyciąganiu z eksperymentów) uogólnionych rozkładów partonów w procesach ekskluzywnych. Pan dr Jakub Wagner odegrał znaczną rolę w przygotowanie ogólnie dostępnego, zarówno dla eksperymentatorów i teoretyków, oprogramowania komputerowego. Program ten może być również użyte do planowania nowych eksperymentów. Prace nad programem PARTONS stały się motywacją do zorganizowania przez pana Jakuba Wagnera warsztatu, na którym dyskutowane były strategie w tej dziedzinie na najbliższą dekadę.

W pracy P4 dyskutowano wyznaczanie tak zwanych Comptonowskich czynników postaci poprzez fity do danych eksperymentalnych dla procesu DVCS uzyskanych w CEBAF (Hall A i CLAS) oraz w eksperymentach HERMES i COMPASS. W tych fitach uwzględniono wiele relacji teoretycznych, które ułatwiają to ambitne zadanie. Praca ma znaczenie jak najbardziej praktyczne, gdyż pokazuje jak wykorzystać własności uogólnionych rozkładów partonów do fitowania Comptonowskich czynników postaci. Analiza ta skupiła się w szczególności na propagacji niepewności pomiarowych. Osiągnięto to dzięki metodzie replikacji danych. Analiza błędów jest bardzo istotna w kontekście stosunkowo ograniczonego zbioru danych eksperymentalnych.

W pracy P5 przedstawiono wyliczenia przekroju czynnego na fotoprodukcję mezonu J/ψ w eksperymencie ze stałą tarczą AFTER@LHC i wiązką protonów o energii 7 TeV oraz wiązką jonów ołowiu o energii 2.76 TeV. Podobne obliczenia wykonano dla energii RHICa. Oszacowano liczbę zdarzeń w eksperymencie. Przedstawiono przewidywania asymetrii spinowej (single transverse spin asymmetry). Przedyskutowano dokładność ewentualnego pomiaru. W konkluzji stwierdzono, że eksperyment AFTER@LHC będzie w stanie zmierzyć uogólniony rozkład partonów zwany w tej dziedzinie E^g .

IV. PODSUMOWANIE

Przechodząc do konkluzji, uważam rozprawę habilitacyjną dra Wagnera za bardzo dobrą, a przedstawione w niej wyniki za wartościowe. Stwierdzam, że spełnia ona kryteria stawiane rozprawom habilitacyjnym. Biorąc również pod uwagę cały dorobek naukowy habilitanta wnoszę o dopuszczenie go do dalszych etapów przewodu habilitacyjnego.



Antoni Szczurek

Kraków, 28 listopada 2019