

Prof. dr hab. Krzysztof Kutak  
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk

28.08.2024

31-342 Kraków, ul Radzikowskiego 152

Recenzja rozprawy doktorskiej  
mgr. Victor Martinez-Fernandez  
pod tytułem

“Expanding the accessible kinematic domain of generalized parton distributions ”

Rozprawa doktorska pana mgr. Victor Martinez-Fernandez została przygotowana pod kierunkiem pana dr hab. Jakuba Wagnera oraz pana dr Pawła Sznajdera w zakładzie fizyki teoretycznej Narodowego Centrum Badań Jądrowych. Dotyczy teoretycznych i fenomenologicznych aspektów procesów w których próbkowane są rozkłady partonów w protonie.

W zderzeniu elektronu z protonem emitowany foton próbkuje strukturę protonu. W zależności od kinematyki stanu końcowego i mierzonych stanów końcowych badana struktura protonu może zawierać różny rodzaj informacji. W szczególności tzw. rozkłady inkluzywne w ramach faktoryzacji kolinearnej zawierają informację o jednowymiarowej strukturze protonu.

Praca skupia się na tzw. rozkładach Generalized Parton Distributions (GPD). Tego typu rozkłady niosą informacje o całkowitym momencie pędu partonów oraz o rozkładzie przestrzennym partonów. Służą do wykonania tzw. tomografii nukleonowej i mają duże znaczenie w kontekście istniejących danych z eksperymentów prowadzonych przez European Muon Collaboration jak i przyszłego zderzacza Electron Ion Collider. Celem pracy jest rozwinięcie formalizmu pozwalającego na opis danych w szerszym zakresie zmiennych kinematycznych od których zależy rozkład GPD oraz zastosowanie tego formalizmu.

Rozprawa napisana jest jako monografia. Podzielona jest na pięć rozdziałów: wstęp, omówienie procesu DDVCS, analizę twistową; DDVCS na tarczy (pseudo-)skalarnej, podsumowanie najważniejszych wyników, konkluzje, spis literatury zawierający 137 pozycji oraz uzupełnienia od A do E które zawierają techniczne szczegóły pominięte w głównym tekście. Praca została napisana po angielsku, liczy 180 stron. Część wyników doktoratu zostało opublikowanych w pracy „Phenomenology of double deeply virtual Compton scattering in the era of new experiments”, Phys.Rev.D 107 (2023) oraz w publikacjach pokonferencyjnych.

We wstępie pan Martinez-Fernandez streszcza jak odkrycia nowych hadronów i procesów dżetowych doprowadziły do wprowadzenia kwarkowych i gluonowych stopni swobody. Następnie omówione są podstawowe elementy lagranżjanu QCD i faktoryzacja kolinearna oraz inkluzywne kolinearne rozkłady partonów. Opisane są ograniczenia tych rozkładów w uzyskaniu informacji o strukturze protonu. W następnej części wstępu wprowadzone są rozkłady GPD które pojawiają się gdy rozważa się procesy ekskluzywne w których znane są wszystkie stany końcowe i początkowe. Procesem takim jest przykładowo Deeply Virtual Compton Scattering (DVCS).

Autor przedstawia motywację do studiowania GPD i opisuje jak dzięki znajomości GPD można otrzymać informacje o całkowitym momencie pędu hadronu oraz jak rozumiana jest tomografia hadronowa. Wymienione są aspekty teoretyczne oraz eksperymentalne tj. procesy mierzone w



European Muon Collaboration oraz te które będą w przyszłości mierzone w Electron Ion Collider. W ostatniej części tego rozdziału omawiane są programy PARTONS i EpIC w których pan Martinez-Fernandez zaimplementował otrzymane wyniki teoretyczne.

Rozdział drugi skupia się na procesie DDVCS w rzędzie wiodącym w QCD. Celem jest uogólnienie obszaru kinematycznego dla sytuacji w której zmienna określająca podłużny pęd partonu jest różna od tzw. skośności. Rozważany proces sparametryzowany jest poprzez zmienne kinematycznych w układach odniesienia tzw. Trento oraz Berger-Diehl-Pire.

W następnym kroku otrzymane są amplitudy dla procesu DDVCS korzystając z metody Kleiss-Stirlinga co pozwala na optymalizację obliczeń.

Rozdział zawiera cenne wyniki z teoretyczne i fenomenologiczne. W szczególności pan Martinez-Fernandez biorąc granice małych wirtualności w procesie DDVCS odtwarza wyniki dla DVCS/TCS i wykazuje, że różnice wiążą się z tzw. poprawek wyższego twistu. Otrzymane wyniki teoretyczne zostały zaimplementowane w programie PARTONS and EpIC które to programy użyto w celu otrzymania przekrojów czynnych.

Rozdział trzeci dotyczy przygotowania analizy twistowej procesu DVCS, TCS, DDVCS. Analiza twistowa umożliwia analizę rozbieżności funkcji korelacji określonej na stożku świetlnym. Znajomość tych rozbieżności pozwala na otrzymanie wyników na przekroje czynne na rozważane procesy w funkcji potęg stosunków przekazu pędu do wirtualności oraz masy do wirtualności.

Rozdział we wstępie zawiera wprowadzenie do pojęcia twistu. Rozważany jest zarówno twist kinematyczny jak i geometryczny. Analiza jest wykonana przy użyciu metod konforemnej teorii pola a w szczególności zaawansowanego formalizmu shadow-operator.

Rozdział czwarty jest rozdziałem skupionym na fenomenologicznych aspektach DDVCS i zastosowaniu formalizmu wypracowanego w rozdziale trzecim w celu analizy rozpraszania elektronu na tarczy o spinie zero. Otrzymano analityczne rozwinięcia twistowe amplitud oraz ich numeryczne wartości. Na podstawie otrzymanych wyników Autor wnioskuje że poprawki kinematyczne są na tyle duże że mają wpływ na obserwowane i dlatego powinny być mierzone w obecnych i przyszłych eksperymentach.

Rozdział piąty jest podsumowaniem otrzymanych wyników oraz przedstawia potencjalne zastosowania rezultatów pracy w planowanych eksperymentów w Jlab oraz EIC.

Otrzymane wyniki poparte są zaawansowanymi obliczeniami analitycznymi, pokazującymi biegłość w posługiwaniu się formalizmem QCD, konforemnej teorii pola, umiejętność implementacji otrzymanych wyników w programie Monte Carlo EPiC który pozwoli eksperymentatorom wyliczać przekroje czynne. Pokazują również dobre zrozumienie fizyki studiowanych procesów. Praca doktorska rozwija teorię oraz fenomenologię QCD. Otrzymane wartości obliczeń przekrojów czynnych zilustrowane są czytelnymi dobrze opisanymi wykresami. Określone są też następne kroki: wyniki uzyskane w pracy mogą być użyte do otrzymania GPD w szerszym zakresie zmiennej  $t$  oraz wirtualności. Praca jest bardzo dobrze napisana i dobrze się ją czyta.

Sugerowałbym jednak podkreślić we wstępie lub zakończeniu, że praca dotyczy rozkładów kwarkowych oraz krótki komentarz na temat rozkładów gluonowych.

To motywuje moje pytanie. Czy podobne problemy studiowane w doktoracie dotyczą rozkładów gluonowych? Na ile wypracowany teoretyczny formalizm można przenieść na rozkłady gluonowe oraz na procesy gdzie stan początkowy jest określony przez  $p+p$  lub  $p+Pb$ ?

Podsumowując: doktorat podejmuje istotne zagadnienia w QCD o bardzo dużym znaczeniu dla przyszłych pomiarów w EIC. Otrzymane wyniki otrzymane są przy użyciu zaawansowanego formalizmu. Artykuł który jest częścią tego doktoratu opublikowano w bardzo dobrym czasopiśmie. Rozprawa spełnia wszelkie formalne wymogi stawiane pracom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie do jej publicznej obrony.

prof. dr. hab. Krzysztof Kutak

