



Prof. dr hab. Krzysztof Redlich
krzysztof.redlich@uwr.edu.pl
Phone: +48 510 05 0835

Recenzja pracy p.t. „Euklidesowe sformułowanie funkcji rozkładu partonów: faktoryzacja, ewolucja i zastosowanie na sieci” w postępowaniu habilitacyjnym pana doktora Yizhuanga Liu

Temat przedstawionej pracy habilitacyjnej dr. Yizhuang Liu dotyczy teoretycznego podejścia i zbadania własności funkcji rozkładu partonów w hadronach i ich zależności od pędu poprzecznego, powszechnie określanych jako rozkłady pędu poprzecznego (TMD) lub TMDPDF. Są to wielkości kluczowe w fizyce wysokich energii. Dają bowiem nie tylko wgląd w wewnętrzną strukturę hadronów i potencjalnie ich spinu, ale są także istotne dla opisu przekrojów czynnych dynamicznych procesów produkcji cząstek elementarnych.

Zrozumienie TMD wymaga zastosowania analitycznych metod perturbacyjnych kwantowej teorii pola, jak i przede wszystkim koncepcyjnie nowatorskich obliczeń nieperturbacyjnych, w tym np. z wykorzystaniem sieciowego sformułowania QCD. Problem określenia różnych rozkładów PDF znalazł się także w kontekście priorytetów badań opisanych w materiałach dotyczących *European Strategy for Particle Physics na lata 2020-2025*. Tematyka habilitacji dr. Yizhuang Liu jest zatem bardzo aktualna.

W przypadku standardowych funkcji rozkładów PDF, wobec dużej ilości informacji eksperymentalnych, mogą być one określone poprzez fenomenologiczną analizę danych przy założeniu faktoryzacji QCD w granicy wysokich energii. W przypadku TMD, sytuacja się znacznie komplikuje ze względu na ograniczoną ilość dostępnych danych. W tym przypadku jedynym sposobem na obliczenie procesów produkcji, z małym pędem poprzecznym, jest podejście nieperturbacyjne pozwalające na znalezienie TMD.

Niniejsza praca habilitacyjna *jest ważnym i w dużej mierze pionierskim wkładem* do teoretycznego opisu TMD w przestrzeni euklidesowej, w tym do określenia własności faktoryzacji i ewolucji jak i obliczeń w oparciu o nieperturbacyjne podejście w ramach sieciowej QCD.

Okazało się, że już właściwe zdefiniowanie TMD w przestrzeni Euklidesowej wymaganej w obliczeniach sieciowych jest głęboko nietrywialne ze względu na konieczną rotację Wicka oraz wynikające rozbieżności. Także, prawidłowy opis faktoryzacji TMD, w tym sama definicja tzw. członu miękkiego nie była właściwie znana w literaturze. Dużym osiągnięciem habilitanta było znalezienie formuły prawidłowej faktoryzacji quasi-TMD i jej udowodnienie, która została także potwierdzona w literaturze przy wykorzystaniu innych metod teoretycznych.

Poprawne równanie faktoryzacji, wyprowadzone po raz pierwszy przez Yizhuang Liu, łączy wprowadzoną quasi-TMD, która może być potencjalnie obliczona na sieci, z fizyczną funkcją rozkładu TMD. Daje ono bezpośredni teoretyczny sposób nieperturbacyjnego znalezienia funkcji rozkładu partonów i jej zależności od transwersalnego pędu. Wymagało to jednak dodatkowego

obliczenia zarówno *czynnika miękkiego* TMD, który jest także wielkością nieperturbacyjną, jak również twardego jądra. Autor pokazał, że wkład twardego jądra jest opisany poprzez iloczyn dwóch czynników Sudakowa ciężko-lekkiego i może być obliczony perturbacyjnie do NNLO. Wyprowadził także interesujące równania grupy renormalizacyjnej dla twardego jądra.

Prawdziwym wyzwaniem pozostało obliczenie czynnika miękkiego, a jego rozwiązanie, zaproponowane w pracach autora, jest znaczącym i nowatorskim wynikiem i wkładem do dziedziny. Dr. Yizhuang Liu pokazał bowiem, że *miękką funkcję* w równaniu faktoryzacji może być opisana jako formfactor pary poruszających się ciężkich kwarków co potencjalnie umożliwia jej opis w oparciu o Lagrangian efektywnej teorii ciężkich kwarków. Dr Liu sformułował także metodę obliczenia miękkiego czynnika poprzez wyprowadzenie jego związku z formfactorem mezonów lekkich o dużych pędach, tzw. formalizm miękkiego mezonu. W tym przypadku, konieczne było również euklidesowe sformułowanie quasi-amplitud funkcji falowych mezonu na froncie świetlnym i ich faktoryzacji, oraz faktoryzacji formfaktora mezonu.

Wprowadzony i udowodniony formalizm teoretyczny przez dr Liu jest potężnym narzędziem, które poprzez obliczenia sieciowe pozwala na wyznaczenie nieperturbacyjnego wkładu do TMD pochodzącego od miękkich gluonów. Zatem przy założeniu faktoryzacji QCD, pozwala to na pełny opis funkcji rozkładu TMDPDF.

Pierwsze obliczenia rozkładów TMD na sieci oraz amplitud funkcji falowej mezonu, jak również zredukowanego czynnika miękkiego zostały także przeprowadzone przez autora i są częścią tej pracy habilitacyjnej. Dr Liu korzystając z konfiguracji pól cechowania generowanych na sieci, w oparciu o ulepszone działanie dla $(2+1)$ -fermionów Wilsona z gluonowym działaniem Luscher-Weisza, obliczył zależność zredukowanego czynnika miękkiego w funkcji poprzecznej odległości sprzężonej z transversalnym pędem partonów, dla różnych wartości pędu mezonu. Okazało się, że jest on niezależny od pędu mezonu, natomiast w obszarze perturbacyjnym na małych odległościach jest konsystentny z 1-pętlowym wynikiem. Powyższe symulacje sieciowe pozwoliły także na wyznaczenie quasi-TMD amplitudy funkcji falowej oraz jądra Collinsa-Sopera. Wyniki dr. Liu zainspirowały szereg badań i obliczeń sieciowych w literaturze, w tym np. ostatnio w oparciu o formalizm lekkiego mezonu przedstawiono wyniki sieciowe TMDPDF nukleonu.

Widać zatem, że sformułowanie euklidesowe TMD przez dr Liu połączone z symulacjami na sieci, pozwalają na znalezienie funkcji rozkładu partonów i w konsekwencji na kompletny opis przekrojów czynnych procesów produkcji opisywanych Chromodynamiką Kwantową, w tym także procesu Drell-Yan czy DIS. **Jest to niewątpliwie szczególnie mocny i wartościowy wynik tej pracy habilitacyjnej.**

Praca habilitacyjna doktora Liu opiera się na siedmiu opublikowanych pracach w wiodących czasopismach fizycznych, takich jak: Phys. Rev. Lett, JHEP, Phys Rev D, Phys. Lett., czy Nucl. Phys.B. Prace te były opublikowane we współautorstwie. Z przedstawionych materiałów jasno wynika, że istotny wkład dr. Liu jest dobrze udokumentowany.

Wysoka wartość naukowa przedstawionych wyników tej habilitacji jest także poparta dużym zainteresowaniem w literaturze. Świadczy o tym fakt, że są one bardzo dobrze cytowane. Według HEP-InSPIRES siedem przedstawionych publikacji dra Liu uzyskało już łącznie blisko 600 cytowań, w tym pięć ponad 70-, a praca przeglądowa *Large momentum effective Theory* ponad 230-cytowań.

Warto podkreślić, że siedem prac będących podstawą tej habilitacji, to zalewie część wszystkich publikacji autora. Według HEP-InSPIRES dr. Liu jest współautorem 62 publikacji, cytowanych 1034 razy z indeksem $h = 19$.

Według materiałów habilitacyjnych, dr Liu opublikował 30 prac po uzyskaniu tytułu doktora. Na uwagę zasługują jego prace napisane wspólnie z prof. Ismailem Zahedem oraz prof. Maciejem Nowakiem dotyczące teorii macierzy przypadkowych i nowego podejścia do kwantowego splątania w rozprośzeniach o wysokiej energii, w tym rozkładów krotności w zderzeniach elementarnych. Dr. Liu był współautorem trzech obszernych artykułów przeglądowych, w tym jednego opublikowanego w wydaniu książkowym.

Dr Yizhuang Liu tytuł doktora otrzymał w 2018 roku w Uniwersytecie Stony Brook w USA na podstawie pracy p.t. *Non-perturbative studies in QCD*, napisanej pod kierunkiem znanego fizyka prof. Ismaila Zaheda. Odbił trzy staże podoktorskie, w Instytucie T. D. Lee w Szanghaju, w Uniwersytecie Regensburg oraz w Uniwersytecie Jagiellońskim. Od 2021 roku jest adiunktem w Uniwersytecie Jagiellońskim. Był laureatem nagrody Silsbeea w Uniwersytecie Stony Brook. Otrzymał także Nagrodę Rektora UJ za wybitne osiągnięcia naukowe w 2022 roku.

Badania Yizhuang Liu były wspierane grantami naukowymi. Był wykonawcą w 4 grantach naukowych: w USA, Chinach, RFN i w Polsce. Ostatnio otrzymał grant w ramach *Inicjatywy Doskonałości*, którego jest kierownikiem. Był wykładowcą na 13 konferencjach międzynarodowych potwierdzonych publikacjami w materiałach konferencyjnych, oraz w 2023 roku członkiem komitetu organizacyjnego konferencji organizowanej w Krakowie.

Dotychczasowa działalność dr. Yizhuang Liu i jego staże podoktorskie miały charakter głównie naukowy. Jest zatem zrozumiałe, że jego działalność dydaktyczna nie jest rozbudowana. Jak dotychczas, prowadził cykl wykładów dla doktorantów dotyczących teorii pól kwantowych oraz wykładów na temat metod macierzy przypadkowych.

Podsumowując, uważam, że wyniki badań przedstawionej pracy habilitacyjnej doktora Yizhuang Liu oraz ich szczególnie wysoki i wyróżniający się poziom merytoryczny, jego dorobek naukowy jak również jego uznany status w fizyce cząstek elementarnych poparty już licznymi cytowaniami w literaturze, w pełni odpowiadają wymogom oczekiwanym od kandydata do uzyskania tytułu doktora habilitowanego. **Dlatego też szczególnie mocno popieram wniosek o nadanie tytułu doktora habilitowanego panu doktorowi Yizhuang Liu.**

Krzysztof Redlich

Krzysztof Redlich

Wrocław 10 Maja 2024

Krzysztof Redlich