

## Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr Arantxy Tymowskiej zatytułowanej  
*"Next-to-eikonal corrections in the Color Glass Condensate"*

Rozprawa doktorska mgr Arantxy Tymowskiej jest poświęcona zagadnieniu rozpraszania wysokoenergetycznych cząstek, w którym podstawową rolę odgrywają oddziaływania silne opisywane przy pomocy chromodynamiki kwantowej (QCD). W szczególności rozważana jest granica, zwana granicą Reggego lub granicą wysokoenergetyczną, w której niezmiennicza energia zderzenia  $\sqrt{s}$  jest dużo większa od tzw. twardej skali procesu  $Q$ . Skala ta jest z kolei dużo większa od  $\Lambda_{QCD}$ , podstawowej skali QCD, co umożliwia stosowanie perturbacyjnej chromodynamiki kwantowej z kwarkami i gluonami jako podstawowymi polami kwantowymi. Warunek  $\sqrt{s} \gg Q$  powoduje, że w fizycznym obrazie procesów rozpraszania pojawia się oddziaływanie pocisku (np. protonu) z klasycznym polem gluonowym Yanga-Millsa (YM) tarczy (np. jądrem atomowym), którego źródłem są klasyczne ładunki kolorowe. Obraz ten jest podstawą opisu zjawiska nasycenia gęstości gluonów w granicy Reggego przy pomocy efektywnej teorii QCD, nazwanej teorią kondensatu szkła kolorowego (CGC). W sytuacji, gdy tarcza jest poddana dużemu boostowi lorentzowskiemu, klasyczne pole gluonowe ulega kontrakcji tworząc falę uderzeniową (shock-wave). Jest to zjawisko analogiczne do kontrakcji Weizsäkera-Williamsa pola kulombowskiego w elektrodynamice. Skontrahowane pole kolorowe YM ma wtedy tylko jedną istotną składową  $\mathbf{A}^-(x^+, \mathbf{x}_\perp)$ , która nie zależy od zmiennej stożkowej  $x^- = (t - x)$ , gdy tarcza porusza się w kierunku ujemnym osi  $x$ . Z polem tym oddziałuje wielokrotnie pocisk (kwark/antykwarik lub gluon), który może być składnikiem hadronu. W pierwszym kroku oddziaływanie to opisuje się w przybliżeniu eikonalnym, w którym klasyczna trajektoria pocisku nie ulega zmianie, a jedynym efektem jest zmiana fazy funkcji falowej pocisku. Rozprawa doktorska poświęcona jest analizie efektów pozaeikonalnych, stosując metody kwantowej teorii pola. Uzyskane rezultaty są istotnie ważne dla analiz fenomenologicznych eksperymentów rozpraszania wysokoenergetycznego na akceleratorach RHIC i EIC w Brookhaven National Laboratory w USA oraz LHC w ośrodku CERN.

Praca doktorska została wykonana w wiodącej w skali światowej grupie fizyków teoretyków w NCBJ. Konieczne do wykonania rachunki wymagają dużej wyobraźni analitycznej oraz pracy zespołowej, aby poprzez niezależne testy być przekonanym o ich prawdziwości. Rozprawa doktorska mgr Arantxy Tymowskiej bardzo dobrze dokumentuje ten wysiłek. Jej zasadnicza część bazuje na wynikach opublikowanych w dwóch artykułach w Physical Review D (104 (2021) 1, 014019 oraz 107 (2023) 7, 074016). Były one także prezentowane przez autorkę na kilku międzynarodowych konferencjach i szkołach. Rozprawa składa się z 5 rozdziałów i konkluzji.

Towarzyszy jej wyczerpująca bibliografia złożona z 75 pozycji oraz dwa krótkie dodatki poświęcone definicji zmiennych stożkowych i wyprowadzeniu ostatecznego wzoru na macierz  $S$  dla procesu produkcji fotonu plus dżetu, opisanego w rozdziale 5. Przed zasadniczymi rozdziałami 3-5 znajdują się stwierdzenia autorki (DISCLAIMER) co do jej wkładu do opisywanych wyników. Mogę z nich wywnioskować, że brała ona udział w najważniejszych krokach obliczeniowych w analizowanych zagadnieniach. Poniżej przedstawię opis poszczególnych rozdziałów wraz z moimi uwagami.

Rozdział 1 jest wstępem do zagadnień opisu zderzeń wysokoenergetycznych przy pomocy chromodynamiki kwantowej. Jest on napisany w sposób zwięzły, ale wystarczający do wprowadzenia do zasadniczego nurtu pracy. Pojawiają się w nim krótkie prezentacje takich zagadnień jak: lagranżjan QCD, asymptotyczna swoboda, rozpraszanie głębokonieelastyczne, równania ewolucji DGLAP oraz wprowadzenie do opisu zjawiska nasycenia gęstości gluonowych (saturacji). W związku z tym ostatnim zagadnieniem mam kilka uwag. Opis liniowych i nieliniowych równań ewolucji jest bardzo skrótowy. Nie pojawia się na przykład wzmianka o równaniu Balitskiego-Kovchegova (BK), które odegrało podstawową rolę w rozwoju opisu saturacji gluonowej. Podobnie, nie ma odniesień do bardzo istotnych analiz fenomenologicznych danych z akceleratora HERA czy późniejszych eksperymentów. Opis modelu McLerrana-Venugopolana jest dokonany z punktu widzenia tarczy poruszającej się w przeciwnym kierunku niż tarcza w oryginalnych rachunkach autorki. Uzgodnienie jest bardzo proste, gdyż polega na zamianie oznaczeń składowych stożkowych z plus na minus i na odwrót. Dobrze by to było zrobić, gdyż praca doktorska powinna posiadać również walor pedagogiczny. Zawiedziony jestem trochę rozdziałem "The Color Glass Condensate", w którym oczekiwałbym więcej szczegółów na temat równania JIMWLK i jego związku z równaniem BK. Odnoszę wrażenie, że aspekt "ewolucyjny" zagadnienia saturacji nie jest silną stroną autorki, co oczywiście nie umniejsza wartości pracy doktorskiej, w której ten aspekt nie był analizowany.

Rozdział 2 jest zasadniczym rozdziałem pracy, w którym zaprezentowany jest przybliżenie eikonalne w QCD oraz metodologia jego rozszerzenia. Udało mi się niezależnie dotrzeć do podstawowego wzoru (2.16) na propagator kwarku/antykwaraku, oddziałującego wielokrotnie w przybliżeniu eikonalnym z nieskończone cienkim polem fali uderzeniowej tarczy. W mojej analizie tego zagadnienia pojawiło się pytanie o to czy początkowe i końcowe "czasy"  $x^+$  i  $y^+$  kwarku znajdują się po przeciwnych stronach chwili oddziaływania  $z^+ = 0$ . Tak nie musi być i wtedy czynniki z liniami Wilsona w propagatorze efektywnym są równe 1. Dobrze jest wtedy pokazać, że otrzymujemy propagator swobodny, którego formę w zmiennych stożkowych łatwo wyprowadzić z postaci kowariantnej. W drugiej części rozdziału przedstawione są trzy elementy przybliżenia pozaeikonalnego, polegającego na uwzględnieniu skończonej szerokości fali uderzeniowej, co powoduje wzięcie pod uwagę odchylenia od prostoliniowej trajektorii kwarku, uwzględnienie poprzecznego pola kolorowego oraz włączenie zależności od zmiennej  $z^-$  pól kolorowych fali uderzeniowej. Jest to kluczowa kwestia w przedstawionej do oceny pracy, dlatego prosiłbym doktorantkę o szczegółową prezentację systematyki pozaeikonalnej w trakcie publicznej obrony.

W rozdziale 3 przedstawione zostały wyniki rachunków biorących pod uwagę poprawki do propagatora kwarkowego wynikające ze skończonej szerokości fali uderzeniowej. Istotnym para-

metrem jest tutaj stosunek  $L^+/k^+$ , którego potęgi, o ile dobrze zrozumiałem, są parametrem kolejnych członów w przybliżeniu pozaeikonalnym. Prosiłbym o szczegółowe wyjaśnienie tej kwestii w trakcie publicznej obrony. Otrzymałem wynik zawiera pierwsze i drugie pochodne po zmiennej poprzecznej czynników z liniami Wilsona. Pytanie, które sobie zadałem w tym miejscu brzmi, czy policzenie poprawek wyższego rzędu może ujawnić ukrytą systematykę prowadzącą do zwartego wzoru? W drugiej części tego rozdziału przedstawiony został rachunek pozaeikonalny, w którym uwzględnione zostało poprzeczne pole gluonowe. Prowadzi to do zastąpienia w otrzymanym już propagatorze zwykłych pochodnych przez pochodne kowariantne. Otrzymujemy w ten sposób składową niespolaryzowaną nowego propagatora, która jest uzupełniona o składową zależną od helicity kwarku, wynikającą z nowej struktury macierzy gamma Diraca, wnoszonej przez sprzężenie z polem poprzecznym.

Wyniki tego rozdziału zostały zastosowane do policzenia amplitudy rozpraszania kwarku lub antykwarku (dżetu) na jądrze w kinematyce do przodu. Przy jej pomocy został wyliczony niespolaryzowany partonowy przekrój czynny, a także przekrój czynny będący różnicą przekrojów czynnych kwarku/antykwarku o przeciwnych wartościach helicity (quark helicity asymmetry). To bardzo ciekawe wyniki które zasługują na szczegółową analizę fenomenologiczną w tzw. faktoryzacji hybrydowej, po dołączeniu konwolucji z kolinearnymi rozkładami partonowymi. Oceniam je bardzo wysoko, czując jednak niedosyt co do szczegółów technicznych rachunków (utknąłem niestety przy wyprowadzeniu wzorów (3.10)-(3.11)). Odnoszę wrażenie, że w oryginalnej publikacji w Phys. Rev. D mogę znaleźć więcej informacji na ten temat.

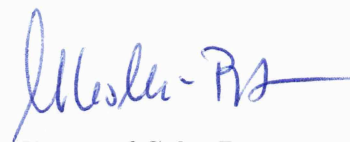
W rozdziale 4 jest zawarty materiał poświęcony poprawkom pozaeikonalnym, wynikających z zależność pól gluonowych (ośrodka) od zmiennej  $z^-$ . Obliczone w poprzednim rozdziale propagatory zostały zmodyfikowane poprzez zachowanie całkowania po zmiennej  $z^-$ , które prowadziło do funkcji delta w pędach  $k^+$  kwarku/antykwarku w przypadku braku zależności pola od  $z^-$ . Jako przykład zastosowania otrzymanych wyników, rozważona została produkcja dwóch dżetów (*dijets*) w rozpraszaniu głębokonieelastycznym (DIS), w której wirtualny foton pęka na parę kwark-antykwark. Uwzględnione zostały propagatory ze wszystkimi rozważanymi poprawkami pozaeikonalnymi, w szczególności tymi, które biorą pod uwagę szerokość pola ośrodka w zmiennej  $z^+$ . Prowadzi to do konieczności analizy dwóch przypadków, w których wirtualny foton pęka na parę kwark-antykwark przed oddziaływaniem z ośrodkiem lub pęka w ośrodku. Rozważone zostały także dwie możliwe polaryzacje wirtualnego fotonu, podłużna i poprzeczna. Ostateczne wyniki prezentują macierze  $S$ , które pozwalają policzyć przekroje czynne na produkcję podwójnych dżetów. Pojawiają się w nich nowe struktury z czynnikami Wilsona różniczkowanymi po zmiennej  $z^-$  (nowe udekorowane czynniki dipolowe i kwadrupolowe). To bardzo interesujący wynik, którego pełne przyswojenie wymagać będzie dalszych prac na poziomie analiz fenomenologicznych.

Rozdział 5 prezentuje wyniki analiz produkcji dżetu oraz fotonu w pełnym przybliżeniu pozaeikonalnym. Podobnie jak poprzednio, foton emitowany przez linię kwarkową w tym procesie może powstawać przed lub po oddziaływaniu z ośrodkiem, a także być emitowanym w ośrodku. Policzone zostały odpowiednie macierze  $S$  oraz partonowe przekroje czynne. Rozdział ten jest w zasadzie tylko prezentacją wzorów i nie zawiera żadnych pogłębionych analiz otrzymanych wyników, które w momencie przygotowywania rozprawy doktorskiej nie były

jeszcze opublikowane. Podobnie jak w poprzednich przypadkach stanowi on punkt wyjścia do analiz fenomenologicznych w faktoryzacji hybrydowej z kolinearnymi rozkładami partonowymi i modelami co do zależności do energii wyśredniowanych czynników z liniami Wilsona. Ten ostatni aspekt jest przedmiotem teorii kondensatu szkła kolorowego. Pozostaje to jednak poza zakresem prac wykonanych w doktoracie.

Podsumowując, przedstawiona rozprawa doktorska prezentuje imponujący wkład do analizy przybliżenia pozaeikonalnego w wysokoenergetycznym rozpraszaniu pocisku na tarczy z gęstym układem gluonowym, opisywanym przy pomocy klasycznego pola Yanga-Millsa. Pracując w bardzo dobrej grupie teoretycznej, doktoranta bez wątpienia zdobyła cenne doświadczenie w wykonywaniu skomplikowanych rachunków w ramach podejścia eikonalnego do rozpraszania w QCD, co bardzo dobrze rokuje na przyszłość.

Stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa spełnia wszystkie ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie mgr Arantxy Tymowskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Krzysztof Golec-Biernat