

INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ im. H. NIEWODNICZAŃSKIEGO POLSKIEJ AKADEMII NAUK

Oddział Fizyki Teoretycznej
ul. Radzikowskiego 152
31-342 Kraków

Tel: +48 12 662 8441
Fax: +48 12 662 8002
E-mail: golec@ifj.edu.pl

prof. dr hab. Krzysztof Golec-Biernat

Recenzja osiągnięcia naukowego i istotnej aktywności naukowej w postępowaniu habilitacyjnym dra Tolgi Altinoluka

1. *Recenzja osiągnięcia naukowego.*

Przedmiotem recenzji jest cykl 9 prac naukowych ([H1-H9] według Autorefratu) opublikowanych po doktoracie w latach 2014-18 w wiodących czasopismach naukowych w dziedzinie fizyki wysokich energii o rocznych czynnikach wpływu powyżej 4. Wszystkie prace są wieloautorskie (od 2 do 5 autorów). Stosowne oświadczenia autorów, łącznie z habilitantem, o wkładzie w ich powstanie zostały dołączone do materiałów habilitacyjnych. Są one konsystentne między sobą i potwierdzają istotny lub dominujący wkład habilitanta w powstanie prac będących podstawą postępowania habilitacyjnego. Dodatkowym elementem jest Autoreferat, który w bardzo jasny omawia cykl prac habilitacyjnych. Nie jest on jednak przedmiotem mojej oceny, gdyż pełni jedynie rolę pomocniczą w przygotowaniu recenzji. Tym niemniej na podkreślenie zasługuje fakt, że jest on przygotowany bardzo starannie i świadczy o dużym talencie pedagogicznym autora.

Recenzowany dorobek naukowy jest poświęcony teoretycznym badaniom oddziaływań silnych przy pomocy chromodynamiki kwantowej (QCD) w granicy wysokoenergetycznej, zwanej również granicą Reggego. Granica ta definiuje szczególnie interesujący obszar kinematyczny, badany obecnie na akceleratorach RHIC i LHC, w którym energia zderzenia jest znacznie większa niż jakakolwiek inna twarda skala występująca w badanych procesach. W obszarze tym zachodzi nasycenie (saturacja) gęstości partonów (głównie gluonów). Efekt ten jest opisywany przy pomocy nieliniowych równań ewolucji dla gęstości partonowych, wynikających z sumowania wkładów do amplitud procesów proporcjonalnych do potęg dużych wartości logarytmów energii. Sumowanie odbywa się dla procesów z twardą skalą Q , dla których można zastosować metody perturbacyjne ze względu na małą wartość biegnącej silnej stałej sprzężenia, $\alpha_s(Q) \ll 1$. Wyniki tych rozważań dostarczają nowego obrazu fizycznego, w którym rozproszenie następuje nie na pojedynczym partonie, jak w standardowym modelu partonowym, ale na gęstym układzie gluonów opisywanych przez teorię *Kondensatu Szkieletu Kolorowego* (o angielskim akronimie CGC, który odtąd będę używał). Jest to efektywna teoria wyprowadzona z QCD, w ramach której otrzymuje się nieliniowe równania ewolucji prowadzące do saturacji partonowej. Prace będące przedmiotem recenzji są poświęcone badaniu i rozwojowi tej teorii.

Teoria CGC jest stosowana do opisu wysokoenergetycznych zderzeń w sytuacji gdy jeden ze zderzających się układów partonów jest rozrzedzony a drugi gęsty. Przykładem są zderzenia protonów z jądrami (pA) traktowanymi jako gęsty układ partonów ze względu na ich wzmocnienie poprzez liczbę masową A . Proton-pocisk jest źródłem ładunków kolorowych partonów, które oddziałują z klasycznym polem kolorowym gęstego układu partonów w jądrze-tarczy. Dla asymptotycznie dużych energii oddziaływanie jest eikonalne, co w przypadku tarczy odpowiada konfiguracji fali uderzeniowej pola kolorowego skoncentrowanego w $x^+ = 0$ ze względu na kontrakcję Lorentza. Nie wiadomo jednak czy energie LHC spełniają warunek asymptotyczności, dlatego niezbędnym jest zbadanie wpływu poprawek subeikonalnych na przewidywania teorii CGC, uwzględniających rozmycie pola kolorowego tarczy wokół $x^+ = 0$. Temu celowi poświęcone są pionierskie prace habilitanta [H1,H4,H6]. Została w nich opracowana systematyczna metoda obliczania poprawek do przybliżenia eikonalnego, polegająca na rozwinięciu eikonalnego propagatora gluonu z pocisku w polu kolorowym tarczy w pewnym dobrze określonym parametrze. Metoda ta została zastosowana w przypadku słabego pola tarczy do obliczenia poprawek do przekroju czynnego dla inkluzywnej produkcji gluonu w zderzeniach pA w obszarze centralnym pośpieszności oraz do analizy asymetrii tej produkcji względem spinu poprzecznego spolaryzowanej tarczy. Okazało się, że poprawki subeikonalne zależą od podłużnych długości korelacji kolorowych w tarczy. Pierwsza z nich znika dla inkluzywnej produkcji gluonu, a druga jest niezerowa, natomiast dla asymetrii wynik jest odwrotny, gdyż znika druga poprawka, a pierwsza jest niezerowa. Dla energii LHC poprawki te mogą stanowić 2 – 10% wyniku otrzymanego w wiodącym przybliżeniu eikonalnym. Bardzo ważnym teoretycznym wynikiem otrzymanym z powyższych rozważań jest postać trójgluonowego wierzchołka Lipatova z poprawkami subeikonalnymi drugiego rzędu (wraz z sugestią o ich eksponencjacji). Wierzchołek ten jest jednym z podstawowych elementów równania BFKL, którego sformułowanie rozpoczęło badania wysokoenergetycznej granicy QCD w latach siedemdziesiątych XX wieku.

Omówione powyżej prace koncentrowały się na produkcji w obszarze centralnym, stosując w podstawowym wyrażeniu na przekrój czynny tzw. faktoryzację k_T , która bierze pod uwagę pęd poprzeczny gluonu z pocisku. Natomiast prace [H2, H8] są poświęcone inkluzywnej produkcji gluonu w zderzeniach pA w obszarze do przodu z dużymi wartościami bezwzględnych pośpieszności. Do obliczeń przekrojów czynnych w tym przypadku stosuje się tzw. formalizm hybrydowy, w którym parton z tarczy jest opisywany standardowymi kolinearnymi rozkładami partonowymi, natomiast jego oddziaływanie jest liczone w ramach teorii CGC w przybliżeniu eikonalnym. Rozwiązuje się w tym przypadku równanie ewolucji Balitskiego-Kovchegova (BK) z niewiodącymi poprawkami radiacyjnymi (poprawki NLO). Okazuje się, że poprawki te są bardzo duże co ma dramatyczne konsekwencje dla liczonego przekroju czynnego, który staje się ujemny już dla stosunkowo niedużych wartości pędu poprzecznego produkowanego gluonu. Problem ten nie istnieje w wiodącym przybliżeniu dla równania BK, co rodzi uzasadnioną obawę o sens podejścia CGC, w którym duże poprawki niewiodące prowadzą do niefizycznego wyniku.

Praca [H2] jest poświęcona zidentyfikowaniu przyczyn tego problemu i zaproponowaniu jego rozwiązania. Zaproponowano w niej właściwy dla obliczeń układ kinematyczny, w którym wyznacza się przedział pośpieszności dla ewolucji BK, oraz uwzględnienie ograniczenia mówiącego, że czas życia (czas Ioffego) pary partonów oddziałujących z tarczą powinien być dłuższy niż czas ich propagacji przez tarczę. Prowadzi to do modyfikacji pól Weiszackera-Williamsa tarczy używanych w rachunkach. Te dwa efekty wymuszają dodanie nowych członów do dotychczas liczonego przekroju czynnego, które usuwają problem jego ujemnych wartości w zakresie pędów poprzecznych mierzonych przez kolaborację BRAHMS. W pracy [H8] przedstawiono została pierwsza w literaturze analiza produkcji trzech cząstek w formalizmie hybrydowym. Są nimi: miękki foton produkowany do przodu z pędem poprzecznym rzędu skali saturacji Q_s oraz dwa twarde dżety z pędami poprzecznymi dużo większymi niż Q_s . Znaczenie tego procesu wynika z faktu, że obserwable z udziałem fotonu są bardzo istotnym punktem programu badań planowanych akceleratorów EIC i LHeC. Ponadto, otrzymany w ramach podejścia CGC wynik można testować porównując go z tzw. granicą korelacyjną dla dwóch dżetów produkowanych do przodu, obliczoną w ramach tzw. faktoryzacji TMD z zależnymi od procesu rozkładami partonowymi będącymi funkcjami pędu poprzecznego partonów. Zgodność otrzymanych rezultatów stwierdzono dotąd dla dwóch cząstek w stanie końcowym, natomiast analiza [H8] z trzema cząstkami dostarcza cennego zrozumienia związków zachodzących pomiędzy oboma formalizmami.

Cztery ostatnie prace recenzowanego osiągnięcia naukowego [H3,H5,H7,H9] dotyczą opisu korelacji produkowanych cząstek w podejściu CGC. Wyniki na temat korelacji mierzonych cząstek w zderzeniach z udziałem jąder na RHICu i LHC dostarczają cennej informacji dla zrozumienia mechanizmów kreacji plazmy kwarkowo-gluonowej. Szczególnie interesujące są wyniki na temat korelacji dwucząstkowych w funkcji pośpieszności i kąta azymutalnego pomiędzy parami cząstek. Stwierdzono bowiem występowanie tzw. grzbietu (ridge) czyli korelacji w dużym przedziale pośpieszności dla kąta azymutalnego bliskiego zeru. Dotyczy to zderzeń pp, pA i AA o dużej krotności i świadczy o istnieniu procesów kolektywnych prowadzących do korelacji długozasięgowej. W przypadku zderzeń jądro-jądro naturalnym wytłumaczeniem są efekty silnych oddziaływań w stanie końcowym prowadzących do ewolucji hydrodynamicznej ze względu na dużą liczbę cząstek w tym stanie. Powstaje jednak pytanie, czy w zderzeniach jąder z pojedynczym protonem lub zderzeń pojedynczych protonów, gdy liczba produkowanych cząstek jest znacznie mniejsza, podejście hydrodynamiczne jest wciąż uzasadnione. Być może obserwowane korelacje są własnością partonowych stanów początkowych zderzających się układów, opisywanych teorią CGC. Wymienione wyżej prace analizują ten problem przy pomocy tzw. diagramów glazmowych.

W pracy [H3] wykazano, że korelacje w stanie końcowym mogą być przejawem wzmocnienia Bosego wynikającego z bozonowego charakteru gluonów w stanie początkowym. W tym celu rozważono inkluzywną produkcję dwóch gluonów opisywaną diagramami glazmowymi, zakładając, że każdy wytworzony gluon jest produkowany przez inny ładunek kolorowy w funkcji falowej pocisku. Po wykonaniu uśrednień po gęstościach ładunków kolorowych i po polach miękkich gluonów otrzymano korelator dwucząstkowy ze wzmocnieniem Bosego dla równoległych pędów poprzecznych gluonów ze stanu początkowego. Dla pędów rzędu skali saturacji Q_s te korelacje przenoszą się na podobne korelacje gluonów w stanie końcowym. W pracy [H7] badania te zostały rozszerzone na produkcję dwóch kwarków - fermionów. Pokazano, że tak jak należało oczekiwać korelacje długozasięgowe w rapidity są eksponencjalnie stłumione ze względu na fermionowy charakter kwarków.

W pracy [H5] pokazano, że diagramy glazmowe prowadzą również do dobrze znanej z fizyki fotonów i pionów korelacji Hanburego-Browna-Twissa (HBT), która jest związana z emisją dwóch bozonów z różnych punktów ich źródła. Mierząc taką korelację można wyznaczyć jego rozmiar. Jednak w przypadku glazmy CGC korelacje Bosego i HBT dodają się i nie można takiego rozmiaru bezpośrednio wyznaczyć. Obie korelacje nie zależą od pośpieszności, są więc efektami długozasięgowymi w pośpieszności. Diagramy glazmowe nie uwzględniają jednak ważnego efektu wielokrotnych rozpraszania partonów pocisku w polu kolorowym tarczy. W pracy [H9] uwzględniono te efekty dla inkluzywnej produkcji pary i trójki gluonów w stanie końcowym. Pokazano, że wkłady do korelacji dwucząstkowych pochodzą od wyrazów z amplitudami kwadrupolowymi, natomiast wkłady do korelacji trójcząstkowej od wyrazów z amplitudami sześcopolowymi. Opracowano też systematyczny sposób identyfikacji wyrazów odpowiadających korelacjom Bosego i HBT w przypadku z wielokrotnym rozproszeniem partonu pocisku.

Prace będące przedmiotem osiągnięcia naukowego stanowią cenny wkład do rozwoju podejścia CGC używanego do opisu oddziaływań silnych przy najwyższych obecnie energiach, gdyż poszerzają one zrozumienie zjawiska saturacji partonowej. W dużej mierze są one pracami pionierskimi, które zapoczątkowały nowe kierunki badań w tej dziedzinie. Dotyczy to prac nad poprawkami subeikonalnymi, a także prac łączących podejście CGC z podejściem opartym o faktoryzację TMD. Praca na temat ograniczeń czasu Ioffego przyczyniła się do sformułowania nowego schematu faktoryzacji dla procesów produkcją cząstek do przodu, natomiast prace poświęcone korelacjom zostały wykorzystane w badaniach numerycznych korelacji dwucząstkowych.

Dr Altinoluk posiada również ważny dorobek naukowy poza jednotematycznym cyklem publikacji [H1-H9], który nie jest jednak przedmiotem mojej oceny. Chciałbym jednak zwrócić uwagę na prace, w których zaproponowany został mechanizm generujący niezerowe nieparzyste składowe przepływu eliptycznego w ramach podejścia CGC. Zerowe wartości tych składowych były jak dotąd najsłabszym punktem przewidywań CGC.

Podsumowując stwierdzam, że prezentowany dorobek habilitacyjny jest znakomity. Świadczy on o dużej dojrzałości naukowej dra Altinoluka, który konsekwentnie realizuje szeroko zarysowany program badań, elementem którego jest przedstawiony dorobek. Parametry bibliometryczne prac z udziałem habilitanta są bardzo dobre. Całkowita liczba cytowań wynosi 530 w/g bazy INSPIRE i 213 w/g bazy WoS, natomiast index Hirscha odpowiednio 13 i 9.

2. Recenzja istotnej aktywności naukowej

Dr Altinoluk jest absolwentem University of Connecticut w USA, gdzie otrzymał stopień magistra (2008) i doktora fizyki (2011). W latach 2011-17 odbył 3 staże podoktorskie w École Polytechnique (Francja), Universidade de Santiago de Compostella (Hiszpania) i Universidade de Lisboa (Portugalia). Od lutego 2017 roku jest adiunktem w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Warszawie.

Był głównym wykonawcą w projekcie Portugalskiej Fundacji na Rzecz Nauki i Technologii (2016-19), którą to rolę zakończył w 2017 roku ze względu na podjęcie pracy w NCBJ w Polsce. Jest wykonawcą w projekcie HARMONIA 9 NCN (2018-21) oraz kierownikiem projektu europejskiego H2020-MSCA-RISE-2018 wspierającego współpracę międzynarodową (2019-21).

Otrzymał stypendium na staż doktorski w Portugalii (2015), Stypendium Rządu Francuskiego na pobyt badawczy (2018) oraz Stypendium dla młodych wybitnych naukowców MNiSW (2017).

Jest uczestnikiem dwóch programów w ramach europejskich sieci badawczych Cost Action (2014-20) i Horizon 2020 Framework Programme (2019-23).

Po doktoracie brał udział z referatami w 22 konferencjach międzynarodowych. Był dwukrotnie organizatorem i prowadzącym sesje dyskusyjne (konferencje w Sandomierzu w 2015 i Bari w 2017 roku) oraz członkiem komitetu organizacyjnego konferencji *Initial Stages in High Energy Collisions (IS 2016)* w Lizbonie.

Jest regularnym recenzentem *Physical Review D* oraz *Physical Review Letters*.

Prowadzi szeroką współpracę międzynarodową z fizykami z Francji, Portugalii, Rosji USA i Izraela, które łączą się z wieloma wizytami krótkoterminowymi do miesiąca czasu.

Jego doświadczenia pedagogiczne są związane z prowadzeniem ćwiczeń laboratoryjnych dla studentów University of Connecticut w trakcie przygotowywania doktoratu (2006-11) oraz wygłoszeniem trzech wykładów dla studentów doktoranckich w ramach *3rd International QCD School 2016* w Orsay we Francji.

Jest promotorem pomocniczym w doktoracie Pedro Agostiniego w Universidade de Santiago de Compostela w Hiszpanii (od 2017 roku).

Podsumowując, stwierdzam, że aktywność naukowa dra Altinoluka jest bardzo wysoka i świadczy o ogromnym doświadczeniu w prowadzeniu badań w różnorodnym środowisku międzynarodowym.

3. Wnioski

Z przedstawionej przeze mnie recenzji wynika, że zarówno dorobek naukowy będący przedmiotem osiągnięcia naukowego jak i istotna działalność naukowa dra Tolgi Altinoluka spełniają z nadmiarem kryteria ustawowe i wnioskuję o nadanie mu stopnia naukowego doktora habilitowanego.



Krzysztof Golec-Biernat

Kraków, 4.11.2019

