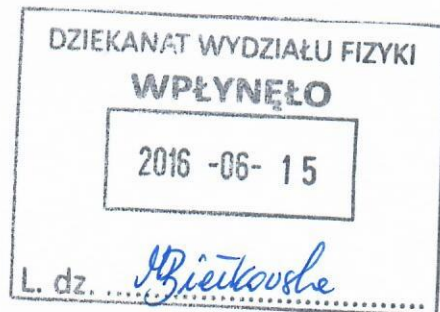




Prof. dr hab. Wojciech Broniowski

Instytut Fizyki Jądrowej im. H. Niewodniczańskiego PAN
ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków

Instytut Fizyki, Uniwersytet Jana Kochanowskiego
al. Świetokrzyska 15, 25-406 Kielce

Kraków, 12 VI 2016

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Arkadiusza Trawińskiego pt.
„Hadron light-front wave functions based on ADS/CFT duality”**

Tematykę pracy doktorskiej Pana mgr. Arkadiusza Trawińskiego, wykonanej na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem Prof. dr. hab. Stanisława Głazka, stanowią teoretyczne aspekty opisu hadronowych stanów związanych przy użyciu technik kwantowania Hamiltonianu oddziaływań silnych na tzw. froncie świetlnym (front-form, FF). Podejście to jest ferowane jako alternatywa do kwantowania przy ustalonym czasie (instant-form, IF) i od ponad 20. lat pokłada się w nim nadzieje na efektywne rozwiązanie problemu stanów związanych w chromodynamice kwantowej (quantum chromodynamics, QCD). Rachunek zaburzeń na froncie świetlnym ma de facto jako punkt startowy model nieoddziałujących konstytuentnych kwarków (constituent quark model, CQM), tak więc podejście stanowi w pewnym sensie pomost między tym prostym i obfitym w sukcesy modelem a nieperturbacyjną QCD. Ponadto, formalizm FF w naturalny sposób opisuje dynamikę w tzw. układzie nieskończonego pędu (infinite momentum frame, IMF), stosowanym rutynowo w perturbacyjnej QCD. Choćby z tych względów technika FF jest istotna dla zrozumienia podstawowych zagadnień oddziaływań silnych.

Jednak mimo wielkich nadziei pokładanych od wielu lat w podejściu FF i intensywnym badaniom rzesz teoretyków, dla sektora lekkich kwarków zadanie uzyskania ilościowych rezultatów w podejściu FF okazuje się bardzo trudne i dotychczas osiągnięto głównie wyniki jakościowe, tudzież rozwijano formalizm. Znane problemy związane są z opisem spontanicznego łamania symetrii chiralnej, wynikające z trywialnej natury próżni w FF. Skomplikowana jest też konstrukcja multipletów symetrii obrotów z uwagi na dynamiczny charakter jej dwóch generatorów (J_x i J_y) w ujęciu FF. Z uwagi na

te i inne trudności, temat pracy Pana mgr. Trawińskiego należy uznać za odważny i ambitny, a także wymagający dużej swobody w poruszaniu się po problemach mechaniki kwantowej i teorii pola.

Praca doktorska Pana mgr. Trawińskiego jest częściowo (rozdziały 2-4) oparta o materiał opublikowany wcześniej w 5. publikacjach (2 artykuły źródłowe w Phys. Rev. D i 3 materiały pokonferencyjne w Few Body Systems). Warto podkreślić, że w 4. pracach mgr Trawiński jest pierwszym autorem przy odwróceniu kolejności alfabetycznej. Dwa materiały pokonferencyjne są samodzielnego autorstwa doktoranta, dwie prace są z promotorem, a jedna w szerszej grupie m.in. z Prof. Brodskim. Ta ostatnia publikacja jest pokłosem 7. miesięcznego pobytu mgr. Trawińskiego na stażu w Stanford University,

Rozdział 5 zawiera nowe dotąd nieopublikowane wyniki dot. obliczenia funkcji falowej pionu, porównane do danych doświadczalnych. Główny tekst pracy zawiera blisko 70 stron, z licznymi rysunkami i wyczerpującą literaturą. Redakcja pracy jest staranna, a język angielski bardzo dobry. W rozdziałach 2-4 tekst jest w licznych fragmentach bardzo bliski wcześniejszym publikacjom mgr. Trawińskiego, co jest naturalne, jednak daje się odczuć pewien brak spojrzenia na te wcześniej opublikowane wyniki z szerszej perspektywy pracy doktorskiej. Rysunki w tej części też pochodzą z wcześniejszych publikacji. Praca porusza kilka wątków, nad którymi autor pracował w czasie swoich studiów doktoranckich od 2011 r. Ich wspólnym elementem jest zastosowanie technik renormalizacji, tj. wyciąłkowania wysokoenergetycznych stopni swobody w formalizmie FF i wyeksponowanie konstytuencyjnych kwarków w dynamice. W oparciu o te techniki podjęta jest próba interpretacji modelu AdS/CFT Brodskiego i de Teramonda (rozdział 4), a także wykonany jest przybliżony rachunek rozpraszania pion-nukleon (rozdział 5), dający informację o tzw. partonowej amplitudzie rozkładu (PDA) kwarków w pionie.

Niżej podpisany ma przyjemność znać osobiście doktoranta z kilku konferencji, gdzie występował jako zdolny młody badacz, znający się na swojej dziedzinie i dobrze prezentujący uzyskane wyniki. Warto też podkreślić, że Pan mgr. Trawiński był w przeszłości laureatem olimpiad fizycznych i różnych nagród i stypendiów edukacyjnych.

Przejdę teraz do bardziej szczegółowego opisu zawartości pracy, jednocześnie przedstawiając moje pytania i pewne krytyczne uwagi, do których doktorant będzie się mógł odnieść podczas publicznej obrony. Część moich uwag dotyczy samej dziedziny, nie stanowią więc one krytyki samej pracy doktorskiej, inne odnoszą się do sposobu przedstawienia wyników w rozprawie i ich dyskusji.

Rozdziały 1 i 2 mają charakter wstępu, wprowadzając notację i podstawowe pojęcia, w szczególności nieperturbacyjną renormalizację wywodzącą

się z koncepcji Głazka i Wilsona (similarity renormalization group). Separacja wiodącego członu nieoddziałujących konstytuentów i ich oddziaływań (connected interactions) jest podstawowym założeniem całego podejścia. Słabe oddziaływanie konstytuentów jest naturalne w podejściu perturbacyjnym z uwagi na asymptotyczną swobodę. W obszarze nieperturbacyjnym jest to robocze założenie, co powinno zostać jasno powiedziane. Co więcej, człony *connected parts* są skomplikowane i z definicji muszą nieść informację o QCD, więc problem poprawek kwantowych pozostaje bardzo trudny.

Rozdziały 2-3 zawierają formalny materiał dotyczący metodologii rozwiniętej wcześniej przez doktoranta i promotora, przedstawiając procedurę nieperturbacyjnej renormalizacji i średniowania po partonowych spektatorach.

Moje ogólnej natury pytanie do rozdziału 2 jest następujące: w wyprowadzeniu nigdzie nie jest zawarta dynamiczna informacja o chromodynamice, tj. szczegóły Hamiltonianu QCD z konkretnym oddziaływaniem kwarków i gluonów. W perturbacyjnej kowariantnej renormalizacji funkcja β w oczywisty sposób zależy od teorii, w szczególności liczby kolorów i zapachów. Rozumiem, że podejście opisane w pracy jakościowo używa faktu asymptotycznej swobody. Czy założenie, że przy małych wartościach skali λ hadron jest skonstruowany z niewielkiej liczby konstytuentów można dokładniej uzasadnić w formalizmie FF? Wiemy, że jest tak w perturbacyjnej QCD, która przy większych skalach energetycznych generuje gluony i kwarki morza. Lektura rozdziału 2 rodzi pytanie, czy chcemy jakoś wyprowadzić model konstytuentnych partonów z QCD, czy też po prostu z niego startujemy. Schematyczny model zawarty w równaniach (2.22-2.25) nie udziela tu odpowiedzi, ponieważ czyni założenie odnośnie elementów macierzowych Hamiltonianu (zaniedbywalność $\hat{H}_{33}$). Skondensowana dyskusja poniżej równania (2.25) jest dla mnie niezrozumiała.

Z późniejszych rozdziałów rozprawy przypuszczam też, że informacja o dynamice QCD pojawia się w postaci potencjału efektywnego oddziaływania między partonami, U_{eff} , który jest przybliżony potencjałem harmonicznym (w równaniu Schroedingera na M^2). Powinno to być jakoś zasygnalizowane/wyjaśnione, gdyż inaczej można odnieść wrażenie, że dostajemy stany związane QCD „z niczego”, jedynie poprzez formalną zmianę skali ale bez specyficznej dynamiki.

Rozwinięcie perturbacyjne w stałej sprzężenia g w rozdziale 2.4 wprowadza specyficzną postać czynników kształtu oddziaływania w równaniach (2.30-2.31). Z przyjętej konstrukcji, dla małych skal kwadraty mas inwariantnych stanów początkowych i końcowych na rys. 2.3 muszą być sobie bardzo bliskie. Wygląda to na bardzo silne założenie, rzutujące na całe podejście. Układowi trudno jest bowiem zmienić liczbę konstytuentów, co jest wykład-

niczo tłumione. Rozumiem, że przyjęta postać czynników kształtu jest po prostu założona. NB, wprowadzenie czynników kształtu zależnych od pędu bardzo istotnie komplikuje cechowanie teorii, nawet dla oddziaływań elektromagnetycznych. W jaki sposób jest ten problem traktowany np. przy analizie elektromagnetycznego czynnika kształtu pionu (rozdział 5.1)?

Formalna transformacja z pracy [47], zmieniająca skalę z λ na λ' i oznaczona jako $\mathcal{W}$, również nie odnosi się do szczegółów QCD, natomiast w istotny sposób zależy od założonych czynników kształtu, które jak rozumiem tłumią przejścia między różnymi składowymi przestrzeni Focka i tym samym gruntują (wbudowują) konstytuentny obraz hadronu. Szkoda, że tekst nie zawiera tutaj obszerniejszej fizycznej dyskusji i pedagogicznych przykładów, co zwiększyłoby jego czytelność.

Począwszy od rozdziału 3, autor używa terminu *Ehrenfest averaging* dla opisu uśredniania po spektatorach czynionego przy rachunkach czynników kształtu hadronów. W mojej opinii nazwisko jednego z ojców mechaniki kwantowej jest tu mocno nadużywane. Gwoli ścisłości, tw. Ehrenfesta dotyczy ewolucji czasowej średniego położenia i średniego pędu, a uogólnienie dla dowolnej obserwabli pochodzi od Heisenberga. Według mnie lepszym terminem byłoby po prostu *spectator averaging*. Jak rozumiem, fizycznie średniowanie po spektatorach pojawia się w naturalny sposób przy obliczaniu obserwabli jednocząstkowych i w ten sposób należy rozumieć zastosowanie tej koncepcji.

Przybliżenie gaussowskie wprowadzone w rozdziale 3.5 jest wg mnie założeniem silnym i wymaga ściślejszej dyskusji. Nie jest bowiem w oczywisty sposób prawdą, że każdy stan związany jest opisywalny tym przybliżeniem (weźmy np. atom wodoru). Wymiana gluonów zawiera człon kulombowski i nie jest dla mnie jasne, w jaki sposób można się go pozbyć dla niskoenergetycznych hadronów, gdzie odległości między konstytuentami nie są duże. Ze względów praktycznych, wiele modeli (np. nierelatywistyczny model kwarków Karla-Isgura) technicznie używa oscylatorowych funkcji falowych jako punktu wyjścia, co niesie istotne uproszczenia rachunkowe, ale pełny potencjał jest użyty poprzez mieszanie konfiguracji. Takie uproszczenia również zachodzą dla postaci (3.38, 3.40) w modelowaniu przy użyciu formalizmu FF, ale założenie harmonicznego nie jest dla mnie jasne.

Rozdział 4 pracy poświęcony jest możliwemu związkowi podejścia ze średniowaniem po spektatorach z modelami typu AdS/CFT. Jako model holograficzny, do którego czynione jest porównanie, wzięty jest model *soft-wall* rozważany przez Brodskiego i de Teramonda [54]. Podejście *soft-wall* prowadzi do równania Sturm-Liouville'a dającego trajektorie reggeowskie dla wzbudzonych hadronów, tj. $m_n^2 \sim n$. Praca doktorska Pana mgr. Trawińskiego nie wzmiankuje o istotnych problemach podejścia AdS/QCD, więc je zasygnalizuję (szczegółową dyskusję można znaleźć np. w pracy *On AdS/QCD*

correspondence and the partonic picture of deep inelastic scattering, B. Pire, C. Roiesnel, L. Szymanowski, S. Wallon, Phys. Lett. B670 (2008) 84). Główne problemy, to niekonsystencja z opisem partonowym, w szczególności niemożność jednoczesnego opisanie skalowania z przekazem czteropędu Q^2 funkcji struktury F_2 oraz elektromagnetycznego czynnika kształtu hadronu. Nie jest też jasna struktura spinowa konstryuentów. Dla pionu, związek Callana-Grossa $F_2 = 2xF_1$ wynika z faktu, że kwarki mają połówkowy spin. Dla AdS/QCD (w podstawowej postaci) zachodzi $F_2 = 0$, co świadczyłoby o bezspinowości konstryuentów. Idąc dalej, statyczne polaryzowalności elektromagnetyczne w AdS/QCD znikają, co jest w sprzeczności z eksperymentem. Te problemy, przy całym szacunku dla nietrywialności i głębi związku AdS/CFT, ukazują jak daleko jesteśmy od zrozumienia nieperturbacyjnej QCD, oraz że równoważność ta ma swoje ograniczenia.

Głównym wynikiem przedstawionym w rozdziale 4 jest identyfikacja potencjału U_{eff} otrzymanego z uśrednienia po spektatorach i potencjału uzyskanego z AdS/QCD, podana we wzorze (4.29). Jak już wspomniałem, w podejściu soft-wall taki potencjał w naturalny sposób prowadzi do trajektorii Reggego $m_n^2 \sim n$, a więc ma istotne uzasadnienie fenomenologiczne. Dyskusja w podrozdziale 4.3 dotycząca identyfikacji tego potencjału w oparciu o podejście FF jest ciekawa.

Istotne pytanie: nie rozumiem notacji wokół równania (4.37). Pole $\vec{A}(r)$ opisuje gluony, powinno więc nieść wskaźnik koloru, a wskaźnika tego nie ma. Wskaźnik koloru jest poprawnie użyty dopiero we wzorze (4.39). Również dyskusja użycia cechowania Focka-Schwingera w tym fragmencie rozprawy jest bardzo pobieżna. Jest to o tyle istotne, że jest to jedyne miejsce, gdzie kluczowy dla rachunków QCD wybór symetrii cechowania jest w ogóle wspomniany.

Porównanie z podrozdziału 4.5 potencjałów dla rachunków z ciężkimi kwarkami na siatkach QCD i z podejścia FF ukazuje, poprzez podniesienie równania Schroedingera do kwadratu, że liniowy potencjał z siatek tłumaczy się w przybliżony sposób na kwadratowy potencjał FF. Jest tak jednak tylko dla ciężkich kwarków, dla których przybliżnie statycznego źródła na siatkach ma sens (dla lekkich dynamicznych kwarków struna pęka poprzez mechanizm tunelowania i opis potencjałowy się załamuje).

Rozdział 5 zawiera nowe, wcześniej nie publikowane wyniki. Dotyczy on struktury pionu, dlatego zacznę od kilku standardowych uwag. W podejściu kowariantnym pion, ze swoją niewielką masą, wyłania się jako pseudo-bozon Goldstone'a spontanicznie łamanej symetrii chiralnej QCD. Łamanie to prowadzi do kondensatu chiralnego w próżni (co widać np. w rachunkach QCD na siatkach). Chiralna algebra prądów (CVC, PCAC) prowadzi do szeregu nietrywialnych związków między amplitudami zawierającymi piony, by wspo-

mniej choćby weinbergowskie długości rozpraszania pion-pion i pion-nukleon. Systematyczny chiralny rachunek zaburzeń ze swoimi licznymi przewidywaniami oparty jest właśnie o zjawisko spontanicznego łamania symetrii chiralnej i jej kardynalnego znaczenia dla struktury pionu.

Ponieważ próżnia w kwantyzacji FF jest trywialna i wyklucza istnienie kondensatów, opis pionu jest tu utrudniony. Jego masę bliską zera można uzyskać przez dopasowanie parametrowi modeli, jednak nie uzyskuje się w ten sposób szeregu innych związków dot. miękkich pionów. Nie pomagają tu ostatnie próby włożenia kondensatów do wnętrza hadronów, ponieważ nie odtwarza to algebry prądów i wiele wyników pozostaje „poza zasięgiem”. Komentarz na stronie 9 dot. obejścia przy trywialnej próżni problemu stałej kosmologicznej jest wg mnie chybiony. W podejściu FF efekty nietrywialnej próżni IF z kondensatami znajdują (zob. np. [29]) odzwierciedlenie w członach wyższego rzędu. Problem ten pozostaje jednak nierozwiązany. Można nawet powiedzieć, że sprawa natury pionu jest główną kością niezgody między protagonistami FF i IF. Niżej podpisany stoi na stanowisku, że pion jest dobrze modelowany jako pseudo-bozon Goldstone’a spontanicznie łamanej symetrii chiralnej, a wyższe stany (tworzące trajektorie reggeowskie) „czują” uwięzienie kwarków, strunę QCD, i mogą być modelowane np. jako wzbudzenia strun w podejściu AdS/CFT.

Powiedziawszy co wyżej, uważam, że dobrze się stało iż Pan mgr. Trawiński przeprowadził rachunek dla pionu, który można porównać do danych doświadczalnych, a konkretnie do produkcji dżetów w zderzeniach pion-jądra (E791 w Fermilabie). Stawia to bowiem cały formalizm bliżej fenomenologii. Rachunek wykonany jest przy użyciu gaussowskiej postaci funkcji falowej (5.1). W dopasowaniu parametrów modelu użyta jest m.in. wartość promienia elektromagnetycznego pionu, r_π , stała rozpadu pionu f_π , i jak rozumiem, masa pionu m_π . Mam tu pytanie, jak masa pionu zależy od masy konstytuentnej kwarku m_c . W rachunkach na siatkach masa pionu jest zazwyczaj większa niż jej wartość fizyczna, więc można rozważać modele z większą wartością m_π . NB, parameter κ można wyrazić poprzez napięcie struny (zob. rys. 4.2), więc dynamika układu w naturalny sposób zależy od tego parametru, określającego oddziaływanie konstytutentów.

W wyniku przyjętej postaci funkcji falowej, elektromagnetyczny czynnik kształtu jest tłumiony wykładniczo dla dużych wartości Q^2 , tj. szybciej niż w eksperymencie czy perturbacyjnej QCD, gdzie zachowanie asymptotyczne ma postać $16\pi f_\pi^2 \alpha(Q^2)/Q^2$. Take więc dla małych odległości model nie jest realistyczny. Powstaje też ogólniejsze pytanie o reguły zliczania QCD (QCD counting rules Brodskiego i Lepage’a), tj. zachowanie asymptotyczne z Q^2 , dla innych wielkości.

Rozdziały 5.2 i 5.3 przedstawiają rachunek rozpraszania pionu na jądrze,

przybliżonym przez rozkład gluonów z superpozycji nukleonów. Szkoda, że doktorant nie wypisał *explicite* reguł Feynmana dla tego rachunku, tj. znaczenia linii oddziaływań $1/(P_0^- - \hat{H}_0)$ (?) i wierzchołków (H_I) w czasowo-uporządkowanych diagramach 5.4-5.7. Rozumiem, że pojawia się tu informacja o QCD zakodowana w postaci potencjału oddziaływania U_{eff} , czy faktycznych parametrów modelu. W szczególności, dynamika musi czuć napięcie struny. Czy jest tak? Pobieżny opis w rozdziale 5 powoduje, że lektura tej części pracy jest trudna, nie ma też wzorów ukazujących pośrednie wyniki. Nie rozumiem też konieczności przybliżenia (5.35), skoro całkowania są liczone numerycznie.

Zwieńczeniem analizy jest rys. 5.9. Uzyskana zgodność jest bardzo dobra. Należy jednak mieć tu na uwadze fakt, że inne podejścia (np. model Nambu-Jona-Lasinio plus ewolucja ERBL do eksperymentalnej skali ~ 2 GeV) też prowadzi do opisu danych. Brakuje mi też dyskusji, że w wiodącym rzędzie FF rachunek daje wynik proporcjonalny do partonowej amplitudy rozkładu pionu (PDA), czy też jej kwadratu. Ciekawe byłoby też zobaczyć wkłady od poszczególnych klas diagramów oraz jak parametry modelu (np. napięcie struny) wpływają na wyniki.

Niezależna informacja o PDA pionu przy niskiej skali energetycznej w ujęciu FF pochodzi też z symulacji na poprzecznych (hamiltonowskich) siatkach QCD [S. Dalley, B. van de Sande, Phys. Rev. D67, 114507 (2003), hep-ph/0212086].

Zbyttnia skrótowość rozdziału 5, bardzo utrudniająca ocenę zawartej w nim fizyki, nie jest skompensowana załączeniem 30 stron dodatku. W mojej opinii dodatek ten, zawierający kod komputerowy, jest zupełnie bezużyteczny i ew. informacja ta mogłaby być zawarta w linku do strony autora. Program jest z punktu widzenia softwarowego dość banalny i po prostu wykonuje poszczególne całki. Jeśli praca ma być w przyszłości opublikowana w sieci, np. w arXiv, sugerowałbym usunięcie tego dodatku.

Podsumowanie wielowątkowej i miejscami zawiłej technicznie rozprawy na zaledwie jednej stronie też nie służy jej lekturze i umniejsza jej znaczenie.

Drobne uwagi: opisy rysunków odnoszą się do kolorów, których w druku czarno-białym nie ma, w opisie rys. 2.1: „he” $\rightarrow$ „The”, w tekście „izospins” $\rightarrow$ „isospins”, w drugiej linii wzoru (2.21) nie powinno być dzielenia przez P_+ , w pracy [148] brak numeru czasopisma.

Jak wspomniałem na wstępie, rozprawa Pana mgr. Arkadiusza Trawińskiego poświęcona jest problemowi ważnemu i zarazem bardzo trudnemu, dotychczas nierozwiązanemu, mianowicie nieperturbacyjnemu mechanizmowi tworzenia hadronowych stanów związanych w chromodynamice kwantowej

i jego opisowi w formalizmie kwantowania na froncie świetlnym. Mimo moich licznych zastrzeżeń dot. głównie sposobu prezentacji i dyskusji oraz licznych pytań, należy mieć uznanie, że autor nauczył się dość swobodnie poruszać po tej zaawansowanej dziedzinie, co z pewnością jest dobrą lekcją przed ew. dalszą karierą w teoretycznej fizyce oddziaływań silnych.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr. Arkadiusza Trawińskiego, mimo niedociągnięć omówionych szczegółowo w niniejszej recenzji a do których doktorant będzie się mógł sumiennie odnieść podczas obrony, spełnia ustawowe wymogi stawiane pracom doktorskim z fizyki. Za dopuszczeniem przemawia też zdecydowanie fakt, że mamy tu do czynienia z uzdolnionym młodym człowiekiem, którego kariera naukowa będzie zapewne z sukcesem kontynuowana, czego mu szczerze życzę.

W związku z tym wnioskuję o dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Prof. dr hab. Wojciech Broniowski

