

Prof. dr hab. **Stanisław Mrówczyński**

13 września 2019 rok

Instytut Fizyki, Uniwersytet Jana Kochanowskiego
ul. Świętokrzyska 15, 25-406 KielceDepartament Badań Podstawowych, Narodowe Centrum Badań Jądrowych
ul. Pasteura 7, 00-681 Warszawa

Ocena rozprawy doktorskiej mgr. Kamila Serafina
Bound states of heavy quarks in renormalization group procedure for QCD
przygotowanej pod kierunkiem prof. dr hab. Stanisława Głazka

Recenzowana rozprawa dotyczy teoretycznego opisu struktury hadronów, czyli stanów związanych kwarków, antykwarków i gluonów, w ramach chromodynamiki kwantowej przy zastosowaniu hamiltonowskiego formalizmu na stożku świetlnym, wykorzystującego metody grupy renormalizacji. Podstawę rozprawy stanowią cztery oryginalne artykuły, których Kamil Serafin jest współautorem, opublikowane w renomowanych czasopismach.

Zawartość rozprawy

Rozprawa napisana w języku angielskim liczy blisko sto stron; składa się poza krótkimi wstępem i podsumowaniem z sześciu rozdziałów, trzech dodatków i spisu literatury.

Po krótkim omówieniu zamysłu rozprawy we wstępie, znajdujemy w drugim rozdziale wprowadzenie do teorio-polowego hamiltonowskiego formalizmu na stożku świetlnym. Przedstawione są tutaj równania chromodynamiki kwantowej w zmiennych stożka, przy czym formalizm ograniczony jest do pól gluonowych i pól ciężkich kwarków c i b . Pominięcie lekkich kwarków u , d , i s jest kluczowym uproszczeniem całego podejścia. Autor wprowadza ważne rozróżnienie wielkości polowych na dynamiczne i te będące jedynie więzami, definiuje kanoniczny hamiltonian, wypisuje relacje komutacyjne pól wykorzystywane przy kanonicznym ich kwantowaniu. Rozdział zamyka dyskusja potrzeby renormalizacji hamiltonianu ze względu na występujące w nim rozbieżności.

Rozdział trzeci poświęcony jest renormalizacji hamiltonianu przy zastosowaniu metod grupy renormalizacji. Jako ilustracyjny przykład omówiony jest tutaj na początek bardzo ciekawy nierelatywistyczny problem równania Schrödingera ze sferycznym potencjałem przyciągającym typu $-g/r^2$. Powyżej pewnej krytycznej wartości stałej sprzężenia g pojawia się tutaj anomalia: cząstka utrzymywana w takim potencjale spada na centrum. Na przykładzie tym, rozpracowanym w publikacji, której Kamil Serafin jest współautorem, pokazano jak dokonać renormalizacji poprzez modyfikację oddziaływania, eliminującą sukcesywnie stany o energii powyżej pewnego obciążenia. Metody grupy renormalizacji pozwalają uzyskać widmo stanów ostatecznie niezależne od wielkości obciążenia. Procedura wypracowana na kwantowo-mechanicznym przykładzie jest następnie zastosowana do teorio-polowego hamiltonowskiego problemu na stożku świetlnym. Jej efektem jest uzyskanie zrenormalizowanego hamiltonianu.

Rozdział czwarty jest kluczowy dla całej rozprawy. Wprowadzone są tutaj przybliżenia i modyfikacje, które umożliwiają lub ułatwiają zastosowanie wyprowadzonych wyrażeń na hamiltoniany do fenomenologicznego opisu mezonów i barionów tworzonych przez ciężkie kwarki c i b . Bodaj najważniejszym krokiem, poza przyjęciem już wcześniej założenia o małości stałej sprzężenia, jest nadanie gluonom masy, co symuluje uwzględnienie efektu uwięzienia kolorowych stopni swobody. Ponadto przestrzeń Focka ograniczona jest do zaledwie dwóch sektorów. W pierwszym sektorze mamy stany kwarka i antykwarka

w przypadku mezonów i trzech kwarków w przypadku barionu. W drugim sektorze mamy stany kwarka i antykwarka lub, odpowiednio, trzech kwarków z dodatkowym masywnym gluonem. Poprzez odpowiednią renormalizację owe dwa sektory sprowadza się do jednego, w którym występują jedynie kwarki i antykwarki, z tym że efektywne. Pojawiają się również tutaj efektywne hamiltoniany. Kolejnym uproszczeniem jest zastosowanie przybliżenia nierelatywistycznego do opisu ruchu kwarków i antykwarków. Ostatnim ważnym założeniem jest przyjęcie, że pęd gluonów względem kwarków jest dużo mniejszy od względnego pędu kwarków, co poprzez rozwinięcie funkcji falowej do drugiego rzędu w pędzie gluonu względem kwarków prowadzi do harmonicznego potencjału wiążącego kwarki.

W rozdziale piątym model sformułowany w poprzedzających rozdziałach zastosowany jest do obliczenia masowego widma mezonów i barionów tworzonych przez ciężkie kwarki. Parametry modelu uzyskane są poprzez dopasowanie przewidywań modelu do danych eksperymentalnych dotyczących spektroskopii kwarkonii $c\bar{c}$ oraz $b\bar{b}$. Uzyskane widma porównane są z wynikami innych modeli, a także przewidywaniami chromodynamiki na sieci.

W rozdziałach szóstym i siódmym ten sam model zastosowany jest do wyznaczenia czynników kształtu i, odpowiednio, funkcji struktury mezonów i barionów tworzonych przez ciężkie kwarki.

Rozprawę zamyka krótkie podsumowanie uzyskanych wyników i omówienie możliwości poprawienia wyprowadzonego modelu. Na końcu mamy jeszcze trzy dodatki, w których zebrano i systematycznie przedstawiono zbiory pewnych formuł, wykorzystywanych w rozprawie, i spis literatury liczący 114 pozycji.

Najważniejsze wyniki rozprawy

Nie jest całkiem oczywiste, co wskazać jako najważniejsze wyniki rozprawy. W najprostszym sensie są nimi wyliczone masowe widma mezonów i barionów tworzonych przez ciężkie kwarki przedstawione w rozdziale piątym oraz czynniki kształtu i funkcje struktury z rozdziałów, odpowiednio szóstego i siódmego. Wyniki te są z pewnością oryginalne i ciekawe z fenomenologicznego punktu widzenia. Zostały one porównane z dostępnymi danymi doświadczalnymi, których jednak jest niewiele, z wynikami innych modeli, a także z przewidywaniami chromodynamiki na sieci. Myślę jednak, że nie te wyniki stanowią o wartości ocenianej rozprawy, choć pokazują one możliwość sprowadzenia czysto teoretycznych rozważań do poziomu konkretnych wielkości dostępnych, przynajmniej w zasadzie, doświadczeniu.

Najważniejsza i najciekawsza w rozprawie jest, w moim przekonaniu, procedura wyprowadzenia fenomenologicznego modelu. Punktem wyjścia jest hamiltonowski formalizm chromodynamiki kwantowej na froncie świetlnym. Następnie przy użyciu metod grupy renormalizacji wprowadzone są efektywne stopnie swobody i efektywny hamiltonian. Do tego momentu mamy do czynienia z ambitną próbą sformułowania ścisłej teorii struktury hadronów. W rozdziale czwartym następuje swoiste załamanie przyjętej strategii. Okazuje się, że doprowadzenie wypracowywanego podejścia do stanu, który pozwoliłby wykonać praktyczne rachunki i otrzymać wyniki mające odniesienie do danych doświadczalnych wymaga przyjęcia licznych upraszczających założeń i przybliżeń. Uważam za istotny walor rozprawy, że owe założenia i uproszczenia są dosyć szczegółowo omówione. Ujawniają one jak odległe są fenomenologiczne modele od ścisłej teorii struktury hadronów, która jest wciąż daleka od sformułowania. Należy pamiętać, że problem uwięzienia koloru i ściśle z nim związana kwestia struktury hadronów należą do najtrudniejszych zagadnień nie tylko fizyki cząstek elementarnych, ale i całej fizyki teoretycznej. Matematyczna wersja problemu

uwięzienia jest pośród siedmiu *Problemów Tysiąclecia*, za rozwiązanie którego Instytut Matematyczny Claye wyznaczył nagrodę miliona dolarów.

Ocena rozprawy i uwagi krytyczne

Bardzo dobrze oceniam rozważania przedstawione w drugim i trzecim rozdziale rozprawy, chociaż wkład Kamila Serafina w ukształtowanie podejścia opisanego w rozdziale drugim jest niewielki. Inaczej jest w przypadku rozdziału trzeciego, gdyż mgr Serafin jest współautorem oryginalnej publikacji o renormalizacji hamiltonianu z potencjałem $-g/r^2$.

Przyznam, że przejście od teorii do fenomenologii w rozdziale czwartym jest pewnym rozczarowaniem i można zapytać, czy warto było poświęcić tyle energii na wyłożenie teorii, skoro model fenomenologiczny z niej wywiedziony pomija efekty, na których obecność teoria wskazuje (np. wielogluonowe stany), lub uwzględnia je w sposób nie wynikający z teorii (np. uwięzienie przez nadanie masy gluonom). Myślę co więcej, że można było skonstruować model fenomenologiczny o walorach podobnych do przedstawionego w rozprawie, nie odwołując się do wyrafinowanego formalizmu chromodynamiki na stożku świetlnym.

A jednak uważam, jak już wspomniałem pisząc o najważniejszych wynikach rozprawy, że podjęta próba systematycznego wyprowadzenia fenomenologicznego modelu jest bardzo cenna i w niej upatruję główną wartość rozprawy.

Przechodząc do bardziej szczegółowych kwestii, nie bardzo rozumiem powtarzany kilkakrotnie postulat, że fizyczna masa kwarku ma być niezależna od parametru skali renormalizacji. W standardowym perturbacyjnym podejściu taka zależność masy efektywnej (podobnie jak stałej sprzężenia) występuje i ma ona dobre fizyczne uzasadnienie – masa cząstki zależy od przekazu pędu w oddziaływaniu, w którym ową masę mierzymy. Rozumiem też, że takie jest właśnie standardowe tłumaczenie dużej różnicy mas tzw. prądowych i składnikowych kwarków u i d . W miękkich oddziaływaniach ujawniają się one jako obiekty o masie rzędu 300 MeV, natomiast w twardych oddziaływaniach są praktycznie bezmasowe.

Bardzo ciekawy wydaje mi się sposób w jaki pojawia się w modelu harmonicznym potencjał uwięzienia kwarków. Jest to skutek założenia, że pęd gluonu względem kwarków jest dużo mniejszy od względnego pędu kwarków i zastosowania rozwinięcia (4.74). Przyznam, że nie całkiem rozumiem uzasadnienie tego założenia, tak jak nie bardzo widzę dlaczego człon liniowy nie odgrywa żadnej roli. Warto wspomnieć, że rozwinięcie (4.74) przypomina teorię małych drgań, w której również pojawia się potencjał harmoniczny, a człon liniowy znika, gdyż rozwinięcia dokonuje się wokół minimum potencjału.

Wydaje mi się, że coś jest niedobrze w formule (4.90), będącej trójciałowym odpowiednikiem rozwinięcia (4.74). Po prawej stronie równania inny powinien być, jak myślę, argument funkcji falowej.

Trochę mnie zaskoczyło, że w przedstawionym podejściu wiodący efekt, określający widma masowe mezonów i barionów tworzonych przez ciężkie kwarki c i b , pochodzi od potencjału harmonicznego, a potencjał coulombowski jest jedynie zaburzeniem. W tradycyjnym potencjalnym modelu kwarkonium o charakterze widma praktycznie decyduje potencjał coulombowski, a liniowy potencjał uwięzienia jest jedynie zaburzeniem. Takie podejście, które dosyć dobrze odtwarza rzeczywiste widmo stanów kwarkonium, ma proste uzasadnienie – średnie odległości kwarku i antykwarku są w kwarkonium tak małe, że potencjał coulombowski dominuje nad liniowym potencjałem uwięzienia. Nie bardzo

wiem, jak przenieść to rozumowanie na stożek świetlny, lecz kwestia jest pewnie warta przedyskutowania.

Na omówienie zasługiwałaby też formuła (5.3) określająca efektywną stałą sprzężenia. Przyjęto tutaj, że liczba zapachów kwarków wynosi dwa. Owa liczba w wyrażeniu (5.3) mówi jaka jest liczba lekkich zapachów kwarkowych, o masach dużo mniejszych niż Λ_{QCD} . Jeśli trzymać się logiki modelu, w którym lekkie kwarki nie występują, należałoby przyjąć $n_f = 0$. Mogę się tylko domyślać, że przyjęto $n_f = 2$ dla potrzeb fenomenologicznego modelu.

Co do formy rozprawy, to chcę podkreślić, że praca Kamila Serafina ma klarowną strukturę, jest jasno, bardzo starannie napisana, jest wolna od literówek. Strona edytorska nie budzi najmniejszych zastrzeżeń. Myślę jedynie, że publikacje będące podstawą rozprawy można było wskazać na wstępie, a nie jedynie umieścić w obszernym spisie literatury.

Podsumowanie i konkluzja

Mimo pewnych zastrzeżeń bardzo dobrze oceniam recenzowaną pracę. Spełnia ona merytoryczne, formalne i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę więc o dopuszczenie mgr. Kamila Serafina do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

