

Kraków, 07.09.2019

JAGIELLONIAN
UNIVERSITY
IN KRAKOW

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Kamila Serafina

Faculty
of Physics,
Astronomy
and Applied
Computer Science

Rozprawa doktorska Pana mgr Kamila Serafina nosi tytuł „Bound states of heavy quarks in renormalization group procedure for QCD” I została przygotowana na Uniwersytecie Warszawskim pod kierunkiem prof. dr hab. Stanisława Głazka.

Praca dotyczy fundamentalnego problemu Chromodynamiki Kwantowej, a mianowicie wyznaczania mas i innych charakterystyk, jak np. momentów magnetycznych, dla hadronów. Ten problem dotyczy obszaru tak zwanego silnego sprzężenia, gdzie standardowe metody rachunku zaburzeń są nieskuteczne.

Historycznie, zaproponowano cały szereg podejść do tego problemu, od prostych modeli fenomenologicznych, po zaawansowane konstrukcje teoretyczne, od metod holograficznych (dualnych) po wielkoskalowe symulacje Monte Carlo (sieciowe).

Autor zastosował w swojej pracy sformułowanie hamiltonowskie na froncie świetlnym, czyli metodę od kilku dekad skutecznie rozwijaną przez grupę prof. Głazka. Rolę czasu pełni w tym formalizmie składowa $x_+ = x_0 + x_3$, i fakt ten w kluczowy sposób wpływa na formę reprezentacji grupy Poincare, a w szczególności, powoduje że próżnia w zregulowanej teorii jest trywialna. Powoduje to trudności, aby uwzględnić dynamikę lekkich kwarków, poddanych ograniczeniom wynikającym ze spontanicznego łamania symetrii chiralnej. Natomiast w przypadku ograniczenia się wyłącznie do hadronów zbudowanych z ciężkich kwarków uwzględnianie efektów symetrii chiralnej jest zbędne. Problem mas takich hadronów nie jest problemem akademickim - bardzo dobrze znane są widma kwarkoniów na poziomie kwarków c i b. Co prawda, do tej pory nie zaobserwowano potrójnie ciężkich barionów, ale istnieje szereg obliczeń sieciowych dostarczających przewidywań dla mas i momentów magnetycznych dla takich obiektów.

Rozprawa liczy 95 stron i napisana jest w bardzo dobrym języku angielskim. Ma formę tradycyjnej pracy doktorskiej, a nie tzw. „zszywki”, czyli cyklu prac oryginalnych poprzedzonych krótkim autorskim wstępem. Praca ma także niewątpliwy walor pedagogiczny. Po krótkim wstępie, Autor przedstawia podstawy sformułowania dynamiki hamiltonowskiej na froncie świetlnym. W kolejnym rozdziale tłumaczy koniecznej regularyzacji, na podstawie przykładu równania Schroedingera w potencjale $1/r^2$, oraz wyjaśnia użytą metodę renormalizacji. Ukoronowaniem tego rozdziału jest przedstawienie zrenormalizowanego Hamiltonian dla Chromodynamiki Kwantowej z dokładnością do wyrazów drugiego rzędu w stałej sprzężenia.

ul. prof. Stanisława
Łojasiewicza 11
PL 30-348 Kraków
tel. +48(12) 664-48-90
fax +48(12) 664-49-05
e-mail:
wydzial.fais@uj.edu.pl

Główne wyniki pracy przedstawione są w rozdziałach 4 i 5. Rozdział 4 wprowadza kluczowy *ansatz* dla efektywnej masy gluonu i tłumaczy sposób uniknięcia rozbieżności tzw. małego x . Otrzymany w ten sposób Hamiltonian zawiera zarówno wyraz kulombowski, jak i potencjał uwięzienia. W odróżnieniu od popularnych modeli fenomenologicznych, potencjał wiążący nie jest liniowy, lecz harmoniczny. Rozdział 5 to przedstawienie rozwiązań takiego Hamiltonianu dla stanów dwu i trzykwarkowych, przy zastosowaniu standardowych metod mechaniki kwantowej. Konkretnym przewidywaniem jest tabela mas mezonów i barionów.

Rzwiązując równanie Schoedinegra, Autor otrzymał także funkcje własne. Naturalne jest więc, że wykorzystał tę informację dla obliczeń promieni ładunkowych i momentów magnetycznych dla opisywanych hadronów. Te właśnie informacje zawiera rozdział 6. Kolejny rozdział (7), przedstawia ideę jak można wykorzystać zaproponowany formalizm do obliczeń funkcji struktury w rozpraszaniu głęboko nie elastycznym. Rozdział ten przedstawia jedynie pierwszy krok w tym kierunku, będąc odpowiednikiem podejścia w modelu partonów, ale ciekawe są koncepcje Autora, jak wyobraża On sobie uwzględnienie łamania skalowania w swoim podejściu.

Ostatni rozdział pracy to podsumowanie wyników, zawierające także interesujący program przyszłych badań i rozszerzenia zaproponowanego podejścia. Prace kończą trzy dodatki, uzupełniające obliczenia pracy, oraz bardzo obszerna i starannie wyedytowana bibliografia, licząca 114 pozycji. Oryginalne wyniki Autora, przedstawione w rozprawie, stały się podstawą czterech publikacji naukowych. Od strony edytorskiej, dodam, że szkoda że prace te są ukryte w 114 referencjach, a nie wymienione na osobnej stronie, jak jest to często spotykane w wielu dysertacjach.

Pełne rozwiązanie problemu mas w Chromodynamice Kwantowej w jakiejkolwiek metodzie teoretycznej stosowanej *ab initio*, wymaga przyjęcia szeregu upraszczających założeń i metod kontroli poprawności tych założeń. Tak jest też w metodzie grupy renormalizacji Hamiltonianu na froncie świetlnym. Chronologicznie, pierwszym założeniem Autora jest wybór metody regularyzacji. W celu uniknięcia nieanalityczności regularyzuje On tzw. rozbieżności w x za pomocą rozkładu Gaussa. Następnym krokiem jest renormalizacja – tutaj Autor nie wyciąłkuje stopni swobody odpowiadającym wysokim energiom, ale raczej wyciąłkowyuje oddziaływania które są źródłem wielkich zmian mas niezmienniczych używanych stanów. Kolejnym, fundamentalnym założeniem jest przyjęcie *ansatzu*, że wszystkie efekty obecności więcej niż jednego gluonu mogą być zredukowane do dwukomponentowego stanu Focka (minimalny skład kwarkowy oraz jeden gluon) za pomocą nadania gluonowi efektywnej masy. Forma tego *ansatzu* jest wymuszona warunkiem znikania rozbieżności w małym x . Kolejnym założeniem jest redukcja nierelatywistyczna. W przypadku hadronów o różnych zapachach, efektywne równanie Schroedingera zależy od dodatkowego, wydaje się nie fizycznego parametru, będącego najprawdopodobniej wynikiem *ansatzu* dla masy gluonu. Otrzymane równania nie biorą także pod uwagę oddziaływania spinów ciężkich kwarków. Ponieważ częstości harmoniczne w otrzymanych równaniach



JAGIELLONIAN
UNIVERSITY
IN KRAKOW

Faculty
of Physics,
Astronomy
and Applied
Computer Science

Schroedingera zależą od parametru grupy renormalizacji, Autor dokonuje kolejnego upraszczającego założenia, polegającego na tym, że wartość tego parametru skaluje się w specyficzny sposób jako funkcja masy i stałej sprzężenia.

W końcowych równaniach traktuje On także potencjał Coulomba jako zaburzenie. To założenie wydaje się w pełni uzasadnione, co pokazuje dodatek B.

Otrzymane w ten sposób masy kwarkoniów w najniższych falach S,P,D są w zgodności z eksperymentem, lecz stany w wyższych pasmach oscylatora harmonicznego są zawyżone w stosunku do danych. Może to być zarówno konsekwencją faktu, że wiążący potencjał jest harmoniczny a nie liniowy, jak również faktu, że redukcja efektów wielogluonowych do jednego dla wzbudzonych stanów jest zbyt upraszczającym założeniem. W przypadku barionów, otrzymane wyniki mogą być jedynie porównane z wynikami obliczeń sieciowych, gdyż potrójnie ciężkie bariony nie zostały do tej pory zaobserwowane. Bardzo ciekawym wynikiem Autora jest zastanawiająca zgodność jego przewidywań z obliczeniami sieciowymi dla barionów o tym samym składzie zapachowym. Dla różnych zapachów, pojawia się zależność od niefizycznego parametru będącego konsekwencją przyjętego ansatzu na masę gluonu – Autor przyjmując ten parametr równy zero, uzyskuje zadowalającą zgodność z przewidywaniami sieciowymi dla bcc, ale przestrzeliwuje o ponad 300 MeV dla ccb. To dość zastanawiający wynik, bo wydaje się opis za pomocą diquarku jest bardziej uzasadniony w przypadku b. Autor tłumaczy to faktem, że Jego ansatz na masę gluonu być może nie uwzględnia w sposób wystarczający możliwości obecności dwu różnych skal (masy c i b) równocześnie.

Biorąc pod uwagę jak gorącym tematem są teraz cząstki egzotyczne, chętnie poznałbym także przewidywania Autora dotyczące istnienia lub nieistnienia ciężkich tetrakwarków, pentakwarków czy też barioniów (heksakwarków).

W rozdziale 6 Autor studiuje czynniki kształtu. Ze względu na fakt, że Autor pracuje w przybliżeniu nierelatywistycznym dla względnego ruchu kwarków, może jednoznacznie zdefiniować jedynie promienie ładunkowe. W przypadku mezonowym (cząstki wektorowe) wyniki obliczeń są zgodne z wynikami doświadczalnymi, i są, ponownie, w bardzo dobrej zgodności z symulacjami sieciowymi (różnice poniżej 5 %). Podobną, dobrą zgodność Autor otrzymuje w przypadku momentów magnetycznych barionów, porównując obliczenia do wyników innych prac teoretycznych. W przypadku barionów o różnym składzie zapachów, przyjęte założenia są prawdopodobnie zbyt restrykcyjne, bo otrzymywane wyniki są systematycznie wyższe (poziom 20%) w porównaniu do obliczeń w innych podejściach.

Rozdział 7 zawiera wyniki formalizmu Autora zastosowane do rozpraszania głęboko nieelastycznego kwarkoniów i ciężkich barionów. Rozdział ten ma charakter spekulacyjny. Po pierwsze, nie istnieją dane eksperymentalne, jak również symulacje sieciowe w tej dziedzinie. Po drugie, Autor pracuje w granicy Bjoerkena, nie dziwi więc, że otrzymuje relacje Callana-Grossa, która jest po prostu konsekwencją faktu, że spin kwarku wynosi $\frac{1}{2}$. Ze względu na przyjęte założenia, Autor nie otrzymuje łamania skalowania, ale za oryginalne uważam Jego spekulacje, jak można ten problem zaatakować w Jego podejściu używając równań RGPEP.

ul. prof. Stanisława
Łojasiewicza 11

PL 30-348 Kraków

tel. +48(12) 664-48-90

fax +48(12) 664-49-05

e-mail:

wydzial.fais@uj.edu.pl

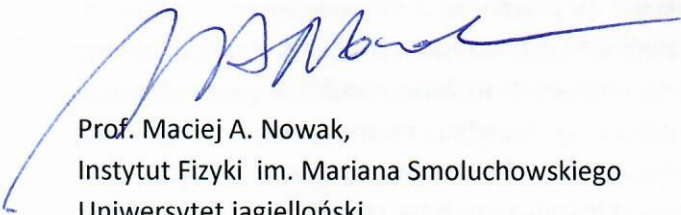
Za bardzo cenne uważam rozważania Autora, przedstawione w podsumowaniu, jak można systematycznie sprawdzać poprawność przyjętych założeń i rozszerzać stosowany formalizm. Najważniejsze wydaje się otrzymanie Hamiltonianu z dokładnością do czwartego rzędu, co pozwalałoby lepiej kontrolować konsekwencje przyjętego ansatzu na masę gluonu. Równie istotna jest modyfikacja podejścia w celu poprawnego opisywania stanów wzbudzonych.

Wreszcie, fakt że w przypadku rozpraszania głęboko nieelastycznego występują dwie dramatycznie różne skale (skala wiązania kwarków oraz formalnie nieskończona wirtualność fotonu) implikuje konieczność sformułowania transformacji ewolucji w formalizmie zrenormalizowanego Hamiltonianu na froncie świetlnym.

Autor wykazał się bardzo dobrym opanowaniem bardzo trudnego formalizmu matematycznego procedury grupy renormalizacji dla hamiltonianów na froncie świetlnym. W pełni też panował nad przyjmowanymi uproszczeniami, wynikającymi albo z konieczności systematycznej budowy kontrolowalnego formalizmu, bądź z pragmatycznej konieczności umożliwienia przeprowadzenia obliczeń. Także przedstawiony program dalszego rozwijania zastosowanego formalizmu jest konsystentny, choć, w mojej opinii, wymaga ogromnego nakładu pracy.

Otrzymane do tej pory wyniki są generalnie w zgodności z analogicznymi wynikami innych grup i/lub danymi (jeśli takowe są dostępne). Intrygująca jest także częsta, choć nieoczekiwana zgodność ze znacznie bardziej skomplikowanymi obliczeniami na sieci. Od strony edytorskiej praca jest bez zarzutu, jak również spełnia wszelkie wymogi formalne wynikające z obowiązującej ustawy o stopniach naukowych i tytule.

Reasumując, oceniam pracę jako **bardzo dobrą** i wnoszę o dopuszczenie pracy do dalszych etapów procesu doktorskiego.



Prof. Maciej A. Nowak,
Instytut Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego
Uniwersytet Jagielloński