

Prof. dr hab. Romuald A. Janik
Zakład Teorii Układów Złożonych
Instytut Fizyki
Uniwersytet Jagielloński
ul. Reymonta 4
30-059 Kraków
e-mail: romuald@th.if.uj.edu.pl

Kraków 1.06.2013

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Jakuba Jankowskiego

Jednym z najbardziej intrygujących problemów stojących przed fizyką silnych oddziaływań jest zrozumienie zachowania teorii kwarków i gluonów w reżimie wysokiej gęstości i/lub temperatury. Fizyka chromodynamiki kwantowej (QCD) w niezerowych gęstościach, poza czysto teoretyczną potrzebą zrozumienia pełnej struktury fazowej tej fundamentalnej teorii, jest również istotna dla zrozumienia fizyki gwiazd neutronowych. Pewne zjawiska mogą też być obserwowane w zderzeniach ciężkich jonów przy pośrednich i niższych energiach. Jednakże odpowiedni obszar diagramu fazowego QCD stanowi szczególne wyzwanie teoretyczne ponieważ najbardziej bezpośrednia metoda badania zachowania nieperturbacyjnej chromodynamiki kwantowej, tzw. QCD na sieci, nie da się zastosować w tym obszarze ze względu na fluktuacje związane z tzw. problemem znaku. Obszar ten jest głównie badany przy wykorzystaniu rozmaitych niskoenergetycznych modeli efektywnych dla chromodynamiki kwantowej. W roku 2007, Pisarski i McLerran zaproponowali że w granicy dużej liczby kolorów, w obszarze dużej gęstości pojawia się nowa faza – tzw. *quarkyonic phase*. Jednym z zasadniczych celów rozprawy doktorskiej było przebadanie czy tego typu fazę można zaobserwować dla teorii cechowania posiadających dualny opis strunowy za pomocą korespondencji AdS/CFT.

Korespondencja AdS/CFT postuluje równoważność pewnej klasy teorii cechowania z teorią strun na odpowiednich zakrzywionych geometriach. Jej główną zaletą jest możliwość przeprowadzania efektywnych rachunków w obszarze odpowiadającym fizyce nieperturbacyjnej w teorii cechowania (w granicy dużej liczby kolorów). Co więcej, ponieważ można ją wykorzystywać bezpośrednio w sygnaturze Minkowskiego, nie ma wielu problemów występujących w QCD na sieci. Z drugiej strony metody korespondencji AdS/CFT nie działają bezpośrednio dla QCD, więc na obecnym etapie możemy za jej pomocą badać teorie cechowania różniące się mniej lub bardziej od QCD. W rozprawie doktorskiej p. mgr. Jakuba Jankowskiego wykorzystuje się tzw. model Sakai-Sugimoto, który jest jedną z najbardziej realistycznych konstrukcji w ramach AdS/CFT i przejawia wiele cech wspólnych z QCD takich jak uwięzienie i spontaniczne łamanie symetrii chiralnej. W rozprawie doktorskiej mgr. Jakub Jankowski bada ten model zarówno w obszarze wysokich gęstości, jak i przy niezerowej temperaturze.

Rozprawa doktorska przedłożona przez p. mgr. Jakuba Jankowskiego zatytułowana "*A holographic perspective on strongly interacting matter properties at finite temperatures and densities*" składa się z czterech rozdziałów, konkluzji i jednego appendiksu, liczy 101 stron oraz zawiera liczącą 170 pozycji bibliografię. Praca doktorska bazuje na wynikach dwóch prac opublikowanych w Phys. Rev. D, pierwszej wykonanej wraz z J. de Boer, B. Chowdhury i M. P. Hellerem, a drugiej wraz z D. Blaschke i M. Spalińskim.

Pierwszy rozdział zawiera krótkie wprowadzenie do tematyki pracy oraz do wykorzystywanej w niej korespondencji AdS/CFT. Drugi rozdział stanowi dość szczegółowe przedstawienie konstrukcji Sakai-Sugimoto, wraz z omówieniem jego zasadniczych cech, takich jak uwięzienie i spontaniczne łamanie symetrii chiralnej, oraz uzyskanych dotychczas w ramach tego modelu rezultatów fizycznych: spektrum mezonów wektorowych, barionów oraz (co było bliżej badane w tej pracy) zależności mas hadronów od mas kwarków.

Zasadnicze wyniki rozprawy doktorskiej zostały przedstawione w dwóch kolejnych rozdziałach. Rozdział trzeci dotyczy fizyki modelu Sakai-Sugimoto w obszarze wysokich gęstości w kontekście badania przejawów fazy *quarkyonic*. Interesująca była konkluzja dotycząca parametrycznie dużej wartości gęstości potrzebnej aby w tym modelu mogła przejawiać się potencjalnie faza *quarkyonic*. Następnie skoncentrowano się na różnych możliwych fizycznych przejawach tej fazy.

W szczególności zbadano możliwość pojawienia się niestabilności łamiącej translacyjną niezmienniczość teorii, której istnienie byłoby jednym z możliwych sygnałów fazy typu *quarkyonic*. Jednak dla konsystentnych parametrów modelu Sakai-Sugimoto nie znaleziono takiej niestabilności. Kolejnym ważnym rezultatem tej części pracy była analiza wpływu niezerowej gęstości na spektrum mezonów wektorowych i pseudowektorowych w kontekście przybliżonego odtworzenia symetrii chiralnej dla nisko leżących stanów. Możliwy efekt tego typu zaobserwowano w dość szczególnym obszarze parametrów modelu Sakai-Sugimoto (zanurzenie D8-bran dalekie od antypodalności). Zbadano też bezpośrednio kondensat chiralny, który okazał się być nieznikający.

Należy nadmienić że powyższe zagadnienia są bardzo trudne do badania, nawet w ramach korespondencji AdS/CFT. Zasadniczy wynik, że faza typu *quarkyonic* nie występuje generycznie w tego typu modelach (przynajmniej w zakresie przyjętych przybliżeń) jest bardzo interesujący i cenny.

Rozdział 4 pracy dotyczy zachowania się kondensatu chiralnego w niezerowej temperaturze w modelu gazu hadronowego (HRG – *Hadron Resonance Gas*). Jest to związane z wyznaczaniem tzw. członów sigma charakteryzujących zmianę masy hadronu w funkcji masy kwarku. Poza dyskutowanymi metodami chiralnej teorii zaburzeń oraz podejściem z równaniami Dysona-Schwingera zbadano konsekwencje holograficznego modelu Sakai-Sugimoto (dla dostępnych stanów hadronowych). Ponadto porównano wyniki dwóch pierwszych metod z wynikami z QCD na sieciach grupy Budapeszt-Wuppertal.

Przedłożona rozprawa doktorska zawiera trudne i interesujące wyniki i jest dobrze napisana. Mam jedynie kilka zastrzeżeń dotyczących głównie prezentacji. Nie umniejszają one bardzo dobrej całościowej oceny rozprawy doktorskiej mgr. Jakuba Jankowskiego.

– W sekcji 2.2 omawiającej sformułowanie modelu, byłoby pomocne jasne sformułowanie, które z wprowadzonych parametrów są niezależne, w szczególności np. wymiarowy parametr L oraz zdefiniowany dalej bezywymiarowy parametr ζ , wyrażony poprzez u_0 . Relacja pomiędzy nimi pojawia się dopiero pod koniec kolejnej sekcji (rys. 2.2).

– Dość zaskakująca jest słaba zależność najniższych mas od odstępstwa od antypodalności (rys. 2.4) wobec różnicy w strukturze potencjałów wokół $z=0$ na rys. 2.3. Czy można ten fakt jakościowo zrozumieć?

– W komentarzu pod wzorem (2.71) dobrze byłoby podać definicję κ .

– W definicji efektywnego działania dla medium barionowego dobrze by było doprecyzować $m_B(z)$ – czy przyjmuje się ją jako masę z $z=0$ z dodanym odpowiednim czynnikiem związanym z $g_\pi(z)$? Czy pole ϕ ma jakąś interpretację fizyczną – wyzerowanie pola ϕ w dalszych rachunkach oznacza wybór odpowiedniego cechowania? Przydałaby się może też nieco rozszerzone wyjaśnienie jaki warunek

determinuje wyznaczenie granicy rozkładu ładunków z_F .

– Pomocne dla czytelnika byłoby też wyspecyfikowanie *explicite* warunku normalizowalności $h(z)$ w sekcji 3.6.

Powyższe uwagi dotyczą przede wszystkim raczej drobnych szczegółów prezentacji, którą w całości oceniam na bardzo dobrą. Materiał przedstawiony w rozdziale trzecim jest trudny zarówno pod względem technicznym jak i koncepcyjnym. Bardzo dobrze oceniam wyważone konkluzje i wnioski płynące z poszukiwania przejawów fazy typu *quarkyonic* w modelu Sakai-Sugimoto. Wyniki otrzymane w przedłożonej rozprawie doktorskiej zostały opublikowane w dwóch pracach w bardzo dobrym czasopiśmie (Phys. Rev. D). Podsumowując obecną recenzję, przedłożoną rozprawę doktorską oceniam bardzo dobrze i wnioskuję o dopuszczenie p. mgr. Jakuba Jankowskiego do dalszych etapów postępowania i do obrony doktoratu.

Z poważaniem,

Romuald Janik

prof. dr hab. Romuald A. Janik