

Kraków, 15.04.22

Prof. dr hab. **Wojciech Broniowski**

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

Instytut Fizyki
Uniwersytet Jana Kochanowskiego
ul. Uniwersytecka 7, 25-406 Kielce

Uniwersytet Wrocławski Wydział Fizyki i Astronomii DZIEKANAT (2)		
Wpłynęło do WFA	22-04-2022	Zał.
Nr z rej. przes. wpływających		
wpl. do jedn. org.	data	symbol
znak sprawy		

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. Michała Szymańskiego
pt. "Investigating QCD phase transitions with effective theory approach"**

Tematem pracy doktorskiej Pana mgr. Michała Szymańskiego, wykonanej w Zakładzie Teorii Cząstek Elementarnych Wydziału Fizyki i Astronomii Uniwersytetu Wrocławskiego pod kierunkiem dr hab. Chihiro Sasaki (promotor) oraz dr. Pok Man Lo (promotor pomocniczy), było zbadanie trzech wzajemnie powiązanych grup tematycznych dot. przejść fazowych w chromodynamice kwantowej:

1. Fluktuacje pętli Polyakowa;
2. Pętla Polyakowa i jej fluktuacje w zewnętrznym polu magnetycznym i niezerowym potencjale barionowym;
3. Fluktuacje liczby barionowej w pobliżu punktu krytycznego QCD.

Praca, napisana po angielsku, zawiera sześć rozdziałów, z czego pierwsze trzy stanowią rozbudowany wstęp z ogólnym omówieniem istotnych dla pracy zagadnień, a kolejne trzy prezentują wyniki, wcześniej opublikowane w pracach [77] (rozdz. 4), [78-81] (rozdz. 5) i [82] (rozdz. 6). Dwie z tych prac zostały opublikowane w Phys. Rev D, jedna w J. Phys. G, a jedna (recenzowana konferencyjna) w Eur. Phys. J. Special Topics (doktorant jest w niej jedynym autorem). W pozostałych pracach współautorami są promotorzy oraz Krzysztof Redlich i (w pracy [82]) Marcus Bluhm. Dorobek, o który oparty jest doktorat, jest zatem silny i pewnie mógłby z powodzeniem stanowić podstawę nawet trzech prac doktorskich (!). W rozdziałach 4-6 fragmenty tekstu pracy oraz rysunki są zaczerpnięte z publikacji źródłowych [77-81].

Zagadnienia poruszane w doktoracie wpisują się w rozwijane intensywnie w ciągu ostatnich lat światowe badania nad fizyką oddziaływań silnych w gorącej i gęstej materii. Waga tego typu badań teoretycznych wynika z jednej strony z coraz pełniejszych danych z chromodynamiki na siatkach dotyczących przejść fazowych (chiralnego i uwolnienia koloru, ang. deconfinement), a z drugiej strony z szeroko zakrojonego programu ultra-relatywistycznych zderzeń ciężkich jąder i poszukiwaniem poszlak punktu krytycznego w korelacjach produkowanych cząstek. Tak więc doktorat porusza bardzo aktualne i ważne problemy współczesnej fizyki oddziaływań silnych. Należy podkreślić, że główne wątki pracy stanowią od lat specjalność grupy wrocławskiej, zatem autor miał okazję zaznajomić się z tą tematyką „u źródła” i uzyskać wyniki na najwyższym poziomie naukowym.

Przejdę teraz do bardziej szczegółowego omówienia pracy doktorskiej Pana mgr. Szymańskiego, jednocześnie przedstawiając moje pytania i uwagi, do których autor będzie się mógł odnieść podczas obrony.

Ogólnie, praca jest napisana klarownie i poprawną angielszczyzną, jednak tu i ówdzie zdarzają się drobne błędy (literówki, użycie rodzajników), co warto poprawić przed upublicznieniem tekstu np. w bazie arXiv.org. Rysunki powinny być powiększone do rozmiaru takiego, w którym opisy w legendach staną się czytelne (obecnie jest to możliwe dopiero po powiększeniu pdf, a na wydruku papierowym bardzo trudno jest przeczytać legendy. Lista literatury zawiera aż 307 pozycji.

Wstęp i rozdziały 2 i 3 to wprowadzenie w fizykę diagramu fazowego QCD. Autor zaczyna od samych podstaw, tj. od lagranżjanu QCD, przechodząc po kolei przez własności takie, jakie symetria chiralna i jej łamanie, uwięzienie koloru, czy teoria przejść fazowych. W podrozdziale 3.2.1 wprowadzona jest pętla Polyakowa, która jest bodaj najważniejszym obiektem pracy, badanym szczegółowo w rozdziałach 4 i 5. Jej rola wynika stąd, że w granicy nieskończonej masy kwarków (teoria pure-gauge), pętla Polyakowa stanowi parametr porządku dla przejścia fazowego uwolnienia kwarków, co jest związane ze spontanicznym łamaniem symetrii centrum $Z(3)$.

Przy omawianiu struktury fazowej QCD wokół rys. 3.5, doktorant mógł dla kompletności wspomnieć o możliwości istnienia faz o złamanej symetrii translacyjnej oraz o koncepcji materii kwarkionowej (quarkyonic matter).

Począwszy od rozdz. 4 omawiane są wyniki badań Pana mgr. Szymańskiego uzyskane w ramach przewodu doktorskiego i opublikowane w literaturze naukowej. W rozdz. 4 badane są fluktuacje rzeczywistej i urojonej części pętli Polyakowa. W prostym modelu gaussowskim jawne łamanie symetrii centrum uzyskane jest przez sprzężenie części rzeczywistej do zewnętrznego pola. Nie jest dla mnie jasne z lektury, dlaczego efekt dynamicznych kwarków można tak prosto modelować. Pełniejsze wytłumaczenie byłoby tu na miejscu. W podrozdziale 4.2.3 autor przechodzi do bardziej zaawansowanego modelu efektywnego dla pętli Polyakowa z pracy [141], omówionego dokładniej w dodatku A. Brakuje mi tutaj opisu fizycznych przesłanek za przyjętą postacią potencjału efektywnego. Końcowa część rozdziału opisuje jeszcze model PNJL – Nambu–Jona-Lasinio z pętlą Polyakowa. Dla stosunków fluktuacji, modele są porównane z symulacjami QCD na siatkach na rys. 4.3, a dla samych fluktuacji na rys. 4.6, gdzie widać rozbieżność. Rozumiem, że obecnie nie ma modelu, który prowadziłby do zgodności z danymi z siatek (?).

Rozdział 5 wprowadza zewnętrzne silne pole magnetyczne, oraz niezerową gęstość barionową. Dla pętli Polyakowa, najciekawszym efektem silnego pola magnetycznego jest zmiana charakteru przejścia fazowego na przejście pierwszego rodzaju (rys. 5.4). Przedstawione są też podatności związane z rzeczywistą i urojoną częścią pętli Polyakowa. Rozumiem, że dla tych wielkości nie ma jeszcze wyników z siatek i przedstawione rezultaty są przewidywaniami modelu rozważanego przez autora, podlegającymi przyszłej weryfikacji.

Od podrozdziału 5.4, obok pętli Polyakowa, pojawia się kondensat chiralny. Jego zachowanie w polu magnetycznym jest, jak wiemy z symulacji QCD na siatkach, wysoce nietrywialne, bowiem przy małych temperaturach mamy do czynienia z tzw. magnetyczną katalizą, a dla większych temperatur ze zjawiskiem odwrotnym (rys. 5.1). Modele typu NJL, czy zastosowany model PNJL, nie opisują odwrotnej katalizy, co uwidocznione jest na rys. 5.11-5.12. Aby otrzymać wyniki dla pola h związanego z pętlą Polyakowa, efektywne masy lekkich kwarków są dopasowywane numerycznie do danych z siatek. Z punktu widzenia modelowania, nie jest to, rzecz jasna, w pełni satysfakcjonujące.

Próba opisania odwrotnej magnetycznej katalizy dla kondensatu kwarkowego jest zastosowanie modelu z pracy [234], gdzie oddziaływanie czterofermionowe jest wynikiem wymiany gluonu w cechowaniu Coulomba. Model prowadzi do nietrywialnej zależności masy kwarku od pędu i od pola magnetycznego, ubranej przez diagram pierścieniowy. Nie jest dla mnie jasne, przy skąpej dyskusji,

czy zastosowany model zachowuje symetrie (np. czy w sektorze próżniowym pion pozostaje bezmasowy w ścisłej granicy chiralnej), oraz czy spełnione są tożsamości termodynamiczne. Model jest następnie uzupełniony o sprzężenie do pętli Polyakowa i poczynione są rozliczne przewidywania dla mas kwarków i pola h .

W dyskusji rys. 5.15 chciałbym zobaczyć modelową wartość nieprzeskalowanego kondensatu chiralnego, tj. $\langle\bar{\psi}\psi\rangle_0$, którą znamy dość dobrze z symulacji na siatkach, podawaną typowo przy skali pędowej 2 GeV. NB, autor stosuje kwarkowe modele efektywne, które typowo działają dla dużo niższych skal (rzędu $\mu_0 = 350$ MeV), więc dla porównania wartości kondensatu w próżni niezbędna jest ewolucja QCD. Dla wiodącego rzędu

$$\frac{\langle\bar{\psi}\psi\rangle(\mu)}{\langle\bar{\psi}\psi\rangle(\mu_0)} = \left(\frac{\alpha_S(\mu)}{\alpha_S(\mu_0)}\right)^{-\frac{4}{\beta_0}} \quad (1)$$

W podrozdziale 5.6 dodany jest efekt niezerowej gęstości barionowej. Powtórzone są wcześniejsze rachunki dla fluktuacji pętli Polyakowa, która w niezerowym potencjale barionowym ulega rozszczepieniu (wartości średnie pętli i jej sprzężenia są różne). Wyniki przedstawione są na rys. 5.20-5.22.

Rozdz. 6 zajmuje się nieco innymi zagadnieniem, kumulantami protonowymi i ich porównaniem do danych doświadczalnych z kolaboracji STAR. Metodologia opiera się tutaj na przynależności do klasy uniwersalności modelu Isinga. Rozumiem, że istotną różnicą w stosunku do wcześniejszych analiz [Blum et al, 2017] jest inny kierunek podejścia do punktu krytycznego, rys. 5.1. Wspomniana niejednoznaczność i zaleta przyjętej obecnie metody powinny być szerzej omówione. Autor pisze, że wyniki modelowe nie działają dla opisu skośności, ale wynik porównania do STARa z rys. 6.2 nie jest taki zły. Jak dobrej zgodności z danymi należy tu oczekiwać?

Poza pytaniami i uwagami poczynionymi powyżej uważam, że szkoda, iż autor nie pokusił się o bardziej wyczerpujące przedstawienie tematów w rozdziałach 4-6 niż jak zostało to zrobione w opublikowanych wcześniej publikacjach w czasopiśmie, które z oczywistych powodów są nader zwarte. Rozprawa doktorska, będąc bardziej kompletną i łatwiejszą w czytaniu, miałaby wówczas większe walory dla studentów wchodzących w tę dziedzinę. Tekst jest bardzo „gęsty” i odsyłający do literatury w wielu istotnych dla narracji i zrozumienia założeniach i szczegółach. Uważam jednak, że praca zawiera wiele cennych wyników i powinna być upubliczniona (po wspomnianych na początku uwagach redakcyjnych) w arXiv.org.

Analizy przeprowadzone przez Pana mgr. Michała Szymańskiego w trakcie przewodu doktorskiego i przygotowywania publikacji oraz niniejszej rozprawy dały mu możliwość gruntownego zapoznania się z najważniejszymi aspektami badanych modeli opisu gęstej i gorącej materii. Z pewnością zaprocentuje to w realizacji jego dalszych planów naukowych.

Niniejszym stwierdzam, że **praca doktorska Pana mgr. Michała Szymańskiego spełnia ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane pracom doktorskim z fizyki**. W związku z tym wnioskuję o dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Prof. dr hab. Wojciech Broniowski

