

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

Kraków, 19-04-2022



JAGIELLONIAN
UNIVERSITY
IN KRAKOW

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Michała Szymańskiego

Faculty
of Physics,
Astronomy
and Applied
Computer Science

Rozprawa doktorska Pana mgr Michała Szymańskiego nosi tytuł „Investigating QCD phase transitions with effective theory approach” i została przygotowana w Instytucie Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Wrocławskiego, pod kierunkiem dr hab. Chihiro Sasaki i dr Pok Man Lo. Praca dotyczy badania jednego z najbardziej fascynujących zagadnień Chromodynamiki Kwantowej, a mianowicie natury dwóch najistotniejszych z eksperymentalnego punktu widzenia przejść fazowych – czyli uwięzienia koloru i spontanicznego łamania symetrii chiralnej. Chromodynamika Kwantowa jest stosunkowo dobrze zrozumiana w szeroko pojętych obszarach perturbacyjnych (słabe sprzężenie), ale proces przejścia od teorii kwarków i gluonów do obserwowalnych w eksperymencie hadronów należy do domeny silnego sprzężenia, gdzie brakuje metod analitycznych pozwalających na kontrolowalny opis takiego zjawiska.

W tej sytuacji możliwe jest kilka podejść. Jednym jest symulacja numeryczna układu silnie oddziałujących kwarków i gluonów na dyskretnych sieciach. Symulacje sieciowe, dzięki ogromnemu postępowi w dziedzinie komputerów i algorytmów, są dziś źródłem cennej informacji na temat przejść fazowych, ale mają swoje ograniczenia – jak artefakty dyskretyzacji i niejednoznaczności związane z renormalizacją w granicy ciągłej, czy fundamentalne problemy wynikające z braku dodatniości miary w niektórych sytuacjach, jak np. w obecności materii barionowej i/lub kąta theta, odpowiedzialnego za potencjalne łamanie symetrii CP w silnych oddziałyvaniach. Inną drogą jest wykorzystywanie dualizmu pomiędzy teoriami cechowania i grawitacją w granicy dużej liczby kolorów, czyli tzw. podejście holograficzne, ale systematyczne kontrolowanie poprawek do wiodących wyników jest poza zasięgiem obecnych technik obliczeniowych.

Jest jednak i trzecia droga – polega ona na konstrukcji stosunkowo prostych modeli fenomenologicznych, oddających jakościowo, a często ilościowo wybrane cechy teorii, przy minimalizacji liczby parametrów.

Jednym z najbardziej znanych pierwowzorów takiego podejścia jest model Nambu-Iona-Lasinio, zaproponowany do wyjaśnienia spontanicznego łamania symetrii chiralnej.

Pomimo że nie definiuje on podstawowych konfiguracji gluonowych odpowiedzialnych za łamanie symetrii chiralnej, jak również ignoruje uwięzienie, od strony fenomenologicznej daje całkiem satysfakcjonujący opis podstawowych obserwabli chiralnych. Istnieje jednak znacznie głębszy powód, dla których używa się modeli efektywnych. W oparciu o teorię fizyki fazy skondensowanej, wierzymy że pewien typ przejść fazowych wykazuje własności uniwersalności, czyli zachowanie krytyczne jest identyczne dla bardzo różnych, pod względem stopni swobody, układów dynamicznych, przy założeniu tej samej symetrii i w bezpośrednim sąsiedztwie punktu krytycznego. Dobór optymalnego modelu efektywnego jest sztuką – w wyidealizowanym przypadku taki optymalny model jest równoważny QCD, jeśli zawiera te same stopnie swobody które opisują przejście fazowe. Wybór

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

modelu jest z kolei weryfikowalny przez symulacje sieciowe oraz wyniki eksperymentalne, co umożliwia dalszą iterację poprzez identyfikowanie kolejnych istotnych typów oddziaływań. Taką właśnie metodologię reprezentuje Pan mgr Szymański w swojej dysertacji.

Praca jest napisana w dobrym języku angielskim. Jest obszerna, liczy 146 stron, a jej rdzeń stanowi 7 rozdziałów. Prace wieńczy obfita bibliografia – 307 pozycji. Jeśli Autor przeczytał te wszystkie prace, to jestem pod wrażeniem. Edycja pracy jest bardzo staranna, znalazłem tylko jeden nieistotny błąd typograficzny w Dodatku A (linia przed A.1) i błędne odniesienie do Fig. 5.10 (zamiast do Fig. 3.4) na stronie 34. Trzy pierwsze rozdziały to wstęp i zgrabne wprowadzenie do Chromodynamiki Kwantowej i jej termodynamiki. Ta część ma niewątpliwie cenny walor pedagogiczny, pomimo że ostatni podrozdział 3.3. pomija pewne, nieistotne dla zakresu doktoratu przejścia fazowe, np. do materii kwarkionowej oraz omija subtelności nadprzewodnictwa kolorowego. Naukowy rdzeń pracy zawierają rozdziały 4,5,6, zakończone podsumowaniem (rozdział 7). Rozdziały te oparte są na oryginalnych, pracach naukowych mgr Szymańskiego. Szkoda, że ta lista prac nie pojawia się explicite w doktoracie, np. jako dodatek, ale uzupełniam poniżej ten brak, bo poniższa lista ułatwi dalszą ocenę doktoratu:

1. Pok Man Lo, Michał Szymański, Chihiro Sasaki, Krzysztof Redlich; Polyakov Loop fluctuations in the presence of external field, Phys. Rev. D 97 (2018) 114006
2. Pok Man Lo, Michał Szymański, Chihiro Sasaki, Krzysztof Redlich; Deconfinement in the presence of a strong magnetic field, Phys. Rev D102 (2020) 034024
3. Pok Man Lo, Michał Szymański, Chihiro Sasaki, Krzysztof Redlich; Polarization effects at finite temperature and magnetic field, e-Print:2107.0552
4. Pok Man Lo, Michał Szymański, Chihiro Sasaki, Krzysztof Redlich; Driving chiral phase transition with the ring diagram, e-Print: 2109.04439.
5. Michał Szymański, Deconfinement of heavy quarks at finite density and strong magnetic field, Eur. Phys. J. ST, 229 (2020) 3387.
6. Michał Szymański, Marcus Bluhm, Chihiro Sasaki, Krzysztof Redlich; Net proton number fluctuations in the presence of the QCD critical point, J. Phys. G47 (2020) 045102.

Praca (1) rozwija wcześniejszą ideę promotorów i ich współpracowników, opartą na pomysłach separacji podłużnej i poprzecznej podatności pętli Polyakova, jako specyficznej miary fluktuacji magnetycznych i elektrycznych tej pętli. Autor formułuje prosty model Gaussowski dla fazy uwięzionej, który pozwala na analityczne obliczenia i wyodrębnia kinematyczne cechy fluktuacji ilorazu modułu do części podłużnej (magnetycznej). Aby zaadresować fluktuacje elektryczne, konieczne jest dodanie typowego potencjału dającego przejście fazowe. Tak sformułowany model pozwala na satysfakcjonujący opis danych sieciowych, co jest niezwykle istotne, biorąc pod uwagę że symulacje sieciowe są rodzajem obliczeń w „czarnej skrzynce”, i jakakolwiek intuicja fizyczna przy interpretacji



JAGIELLONIAN
UNIVERSITY
IN KRAKOW

Faculty
of Physics,
Astronomy
and Applied
Computer Science

wyników sieciowych jest bardzo wskazana. Pokazuje też niedoskonałości naiwnego hybrydowego modelu typu pętla Polyakova + model NJL, mającego na celu równoczesny opis łamania symetrii chiralnej i uwięzienia.

Zachęcony sukcesem takiego podejścia Autor uogólnia w kolejnych pracach (2-5) podejście do fluktuacji pętli Polyakova, poprzez dodanie zewnętrznego pola magnetycznego i/lub barionowego potencjału chemicznego. Autor rozpoczyna od pokazania, jak pole magnetyczne zwiększa łamanie dyskretnej symetrii centralnej, i jak podłużna podatność może być użyta jako sygnatura dla punktu fazowego w którym uwięzienie znika. Następnie wzbogaca model poprzez dodanie dynamicznych fermionów. Efekt pola magnetycznego dla fermionów jest bardzo istotny. Dla słabych pól można zaobserwować tak zwaną ujemną magnetorezystancję, czyli kondensat kwarkowy rośnie wraz z polem magnetycznym. Ta specyficzna kataliza magnetyczna ma proste wytłumaczenie – kondensat jest proporcjonalny do średniej gęstości spektralnej operatora Diraca w punkcie zerowej wirtualności (wzór Banksa-Cashera), a pole magnetyczne zwiększa gęstość spektralną poprzez „ścieśnianie” trajektorii naładowanych kwarków zmuszając je do poruszania się po orbitach Landaua, zagęszczając funkcję spektralną. Dane sieciowe dla pełnej chromodynamiki pokazują jednak nieoczekiwany, przeciwny efekt zwany odwrotną katalizą magnetyczną i obniżają temperaturę przejścia fazowego, w odróżnieniu od modeli typu PNJL. Poprzez pewną modyfikację profilu masowego kwarku Autorowi udaje się odtworzyć jakościowo zachowanie obserwowane na sieci. Ten efekt Autor interpretuje jako konsekwencję braku pewnego typu oddziaływań pomiędzy kwarkami w swoim modelu, i w kolejnej pracy (4) proponuje uwzględnienie diagramu pierścieniowego w prostym modelu oddziaływań czterokwarkowych, co obniża temperaturę chiralnego przejścia fazowego. Cykl prac na temat fluktuacji pętli Polyakova domyka praca (5) gdzie Autor dodaje potencjał chemiczny dla kwarków, w celu przebadania zniszczenia uwięzienia dla ciężkich kwarków. Ta modyfikacja jest nietrywialna, bo w ośrodku gęstym dodanie kwarku ma inną energie swobodną niż w przypadku dodania antykwarku, tak więc pętla Polyakova i ich fluktuacje różnią się dla kwarku i antykwarku. Pozytywnym wnioskiem jest obserwacja, że podatność poprzeczna wykazuje osobliwość typu cusp dla punktu krytycznego.

Ostatnia praca (6) omawiana w dysertacji dotyczy słynnego problemu poszukiwania Świętego Graala materii kwarkowej, czyli punktu krytycznego na wykresie fazowym temperatury i gęstości. Autor wykorzystuje tutaj ideę Bluhma, Nahrganga, Bassa i Thomasa Schaefera (2017), którzy przeprowadzili analizę fluktuacji krytycznych poprzez odwzorowanie parametrów w modelu sigma na parametr porządku w modelu 3d Isinga, charakteryzującym się tą samą klasą uniwersalności. Typową obserwacją są stosunki wyższych kumulant rozkładu ładunków cząstek produkowanych w zderzeniach ciężkojonowych, na ogół, ze względów praktycznych, ograniczanych do protonów. Wspomniany model nie zgadza się jednak z ilorazem dla skośności i kurtozy otrzymanych w eksperymencie STAR. Autor

ul. prof. Stanisława

Łojasiewicza 11

PL 30-348 Kraków

tel. + 48(12) 664-48-96

fax + 48(12) 664-49-05

e-mail:

wydzial.fais@uj.edu.pl

modyfikuje model, poprzez uwzględnienie dodatkowego parametru odpowiadającego odległości pomiędzy punktem wymrozenia a punktem krytycznym. Taka modyfikacja powoduje lepszą zgodność z ilorazem kurtozy C_4/C_2 , ale nie eliminuje niezgodności dla skalowanej skośności C_3/C_2 . Ten wynik zostawia pole do badanie innych, a zaniedbanych efektów, jak np. przyczynki od rozpadu rezonansów.

Reasumując, mgr Szymański wykazuje dużą dojrzałość naukową przy interpretowaniu swoich wyników. Jest świadomy, że np. wyniki sieciowe dla pętli Wilsona zależą od schematu renormalizacji, mogą mieć nietrywialne skalowanie z objętością i dopuszcza a priori możliwość innej renormalizacji niż multiplikatywna. Podobnie jest świadomy, że pomimo tej samej klasy uniwersalności dla modelu Isinga i punktu krytycznego QCD, szczegóły odwzorowania parametrów krytycznych nie są uniwersalne, i zależą od przyjętego modelu. Paradoksalnie, te niejednoznaczności mogą być użyte w celu lepszej interpretacji przyszłych danych sieciowych i eksperymentalnych, ponieważ mogą pozwolić na falsyfikowalność niektórych modeli efektywnych. Wszystkie otrzymane wyniki Autora są więc znaczące. Co więcej, dotyczą one fundamentalnych cech symulacji sieciowych dla materii kwarkowej oraz interpretacji wyników wiodących eksperymentów ciężko-jonowych, a więc podstawowych wyzwań współczesnej fizyki hadronowej.

Nie mam żadnych wątpliwości, że przedstawiona dysertacja spełnia formalne i merytoryczne warunki obowiązującej ustawy o szkolnictwie wyższym i nauce, oceniam pracę bardzo pozytywnie i wnioskuję o przeprowadzenie dalszych etapów procedury uzyskania stopnia naukowego doktora nauk fizycznych dla Pana mgr Michała Szymańskiego.



Prof. dr hab. Maciej A. Nowak
Instytut Fizyki Teoretycznej,
Uniwersytet Jagielloński
e-mail: maciej.a.nowak@uj.edu.pl