

Prof. dr hab. Anna Maciołek
Instytut Chemii Fizycznej
Polskiej Akademii Nauk
ul. Kasprzaka 44/52
01-224 Warszawa

Warszawa, 05 luty 2024

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr Andrzeja Chlebickiego
pt. „ $O(N)$ Models and their anisotropic extensions”,
wykonanej w Instytucie Fizyki Teoretycznej na Wydziale Fizyki
Uniwersytetu Warszawskiego
pod kierunkiem dr hab. Pawła Jakubczyka

Rozprawa doktorska mgr Andrzeja Chlebickiego przedstawia wyniki badań o charakterze czysto teoretycznym dotyczące klasycznych przejść fazowych w izotropowych i anizotropowych modelach posiadających symetrię N -wymiarowej grupy ortogonalnej $O(N)$. Zarówno sieciowe jak i ciągłe modele $O(N)$ są absolutnymi klasykami jeśli chodzi o badanie przejść fazowych, a w szczególności zjawisk krytycznych i ich uniwersalnych własności takich jak wykładniki krytyczne, uniwersalne amplitudy, czy też uniwersalne funkcje skalujące. Pierwotnie zostały one wprowadzone jako minimalne modele opisujące realne układy fizyczne w określonej skali długości i czasu. W zależności od wymiaru N parametru uporządkowania do najstynniejszych zaliczają się: model Isinga ($N=1$) i Heisenberga ($N=3$), które opisują przejścia fazowe w ferromagnetykach, czy też model XY ($N=2$) dla przejścia fazowego do nadciekłości w helu. Wraz z pojawieniem się teorii grupy renormalizacji ciągłe, teorio-polowe modele $O(N)$ nabrały dużego znaczenia, również ze względu na równoległy rozwój koncepcji renormalizacji w kwantowych teoriach pola. Techniki grupy renormalizacji umożliwiają głębsze zrozumienie zjawisk krytycznych, wyprowadzenie pewnych ogólnych wyników, a w szczególności rozwój teorii zaburzeń w małym, zależnym od wymiaru przestrzennego parametrze dzięki czemu udało się, między innymi, i przewidzieć wykładniki krytyczne i ich zależność od wymiaru przestrzennego d i wymiaru parametru uporządkowania N .

Oczywiście, literatura dotycząca modeli $O(N)$ jest olbrzymia i różnorodna, jako że znane są one już od zeszłego stulecia. Ponadto, równowagowe zjawiska krytyczne, może poza kilkoma nierozwiązanymi jeszcze problemami, nie są już przedmiotem największego zainteresowania teoretycznego ani eksperymentalnego. Rodzi się tu więc naturalne pytanie: czy jest jeszcze cokolwiek nowego i naukowo ważnego do badania w tym temacie? Okazuje się, że tak, skoro Doktorantowi i współautorom jego artykułów udało się przekonać edytorów i recenzentów prestiżowych czasopism naukowych do przyjęcia do publikacji ich manuskryptów.

Rozprawa doktorska Pana mgr Andrzeja Chlebickiego została przygotowana w oparciu o trzy prace teoretyczne opublikowane w latach 2021, 2022 i 2023.

Trzeba podkreślić, że wszystkie prace zostały opublikowane w renomowanych międzynarodowych czasopismach z listy filadelfijskiej o dużej liczbie punktów MNiSW.

Dwie prace zostały opublikowane w Physical Review E o wartości współczynnika wpływu (Impact Factor) $IF=2,707$ i 140 pkt MNiSW za rok 2023. Jedna praca została opublikowana w czasopiśmie SciPost Phys o wartościach $IF=4,99$ i 100 pkt MNiSW za rok 2023.

We wszystkich publikacjach będących podstawą rozprawy, Pan mgr Chlebicki jest pierwszym autorem co wskazuje na bardzo duży udział w tworzeniu tych publikacji. Dwie publikacje powstały we współpracy jedynie z promotorem, jedna we współpracy z dwoma innymi, poza promotorem, autorami. Zgodnie z zamieszczonym oświadczeniem do tego właśnie artykułu, udział Kandydata można ocenić na bardzo znaczący, z pewnością powyżej 50%.

Dla wszystkich recenzowanych prac, Pan mgr Chlebicki zarówno dokonywał numerycznych obliczeń jak i opracowywał i analizował wyniki przedstawione w postaci wykresów, co świadczy o bardzo dużym zaangażowaniu Autora. Dodatkowo, sposób prezentacji tematu i wyników w rozprawie doktorskiej wskazuje na osiągnięcie przez Kandydata pewnej już dojrzałości i samodzielności naukowej.

Podobnie jak opublikowane artykuły, rozprawa doktorska jest dobrze napisana i starannie przygotowana, co wskazuje na posiadanie przez Kandydata ogólnej wiedzy teoretycznej z zakresu fizyki materii skondensowanej i fizyki statystycznej zjawisk krytycznych, teorii pola i grupy renormalizacji. Autorowi udało się w dość przystępnej a zarazem syntetycznej formie przedstawić całość zagadnienia, naświetlić cele i przebieg badań oraz podkreślić ważność uzyskanych wyników. Wyniki przedstawione zostały w formie wykresów i tabel. Cały materiał graficzny został wyraźnie opisany. Pan mgr Chlebicki zacytował 146 publikacji w tym, oprócz klasycznych już podręczników, około 25 prac powstałych w ostatnich 5 latach, co wskazuje na ciągły rozwój tematyki prezentowanej w pracy doktorskiej.

Układ rozprawy doktorskiej Pana mgr Chlebickiego jest zgodny z normami przyjętymi dla tego typu opracowań. Recenzowana rozprawa doktorska składa się ze streszczeń w języku angielskim i polskim, podziękowań i czterech rozdziałów: wstępu, rozdziału poświęconemu technice nieperturbacyjnej grupy renormalizacji, oraz dwóch rozdziałów, w których przedstawione są oryginalne wyniki badań (rozdziały 3 i 4). Pracę kończą dwa dodatki i bibliografia. W dodatku A przedstawione są równania grupy renormalizacji użyte do obliczeń prowadzących do wyników zamieszczonych w rozdziale 3. W dodatku B opisane są główne techniki numeryczne użyte do rozwiązywania cząstkowych i zwykłych równań różniczkowych pojawiających się w podejściu funkcjonalnym do nieperturbacyjnej grupy renormalizacji. Wyzwaniem jakie stawia użycie rozwinięć w pochodnych jest znalezienie schematu dyskretyzacji przestrzeni, który można dobrze kontrolować. Dodatek B. 1 szczegółowo omawia to zagadnienie i analizuje błędy obliczeń dwóch wiodących wartości własnych grupy renormalizacji związane ze schematem dyskretyzacji. W mojej ocenie, jest to bardzo ważna analiza, bez której trudno byłoby ocenić, czy numeryczne wyniki pracy są wiarygodne.

Dla wygody czytelnika, Autor rozprawy zebrał osobno informacje dotyczące notacji i konwencji użytych w tekście a także zamieścił listę skrótów.

W pierwszym podrozdziale wstępu, Kandydat pokrótce przedstawia rodzinę modeli $O(N)$ i ich znaczenie w układach fizycznych materii skondensowanej. Autor słusznie zauważa, że modele te charakteryzują się niezwykle prostym sformułowaniem, które zapewniło podatny grunt dla rozwoju wielu technik grup renormalizacji i teorii pola konformalnego. Jest to powód dla którego modele $O(N)$ pozostają przedmiotem ciągłego zainteresowania. Autor omawia współczesne kierunki rozwoju badań, które są

zaskakująco obszerne. Jednym z takich kierunków jest aplikacja nieperturbacyjnej grupy renormalizacji w celu zarówno testowania tej metody jak również w celu porównania i weryfikowania wyników uzyskanych przy jej użyciu z przewidywaniami analizy standardowych metod perturbacyjnych. Recenzowana rozprawa doktorska stanowi ten właśnie kierunek badań. Dalsza część wstępu przybliży czytelnikowi metody perturbacyjne takie jak rozwinięcie $4-\varepsilon$, gdzie $\varepsilon=4-d$, dla $O(N)$ symetrycznego modelu ϕ^4 , rozwinięcie $2+\varepsilon$ dla $O(N)$ symetrycznego nieliniowego modelu σ , czy też rozwinięcie dla dużych wartości N . Autor przedstawia słabości i sprzeczności tych metod a szczególnie ich nieadekwatność do opisu roli wirów w tak interesujących przejściach jak przejście Kosterlitz-Thoulessa, motywując w ten sposób konieczność użycia metod nieperturbacyjnych. Kolejne sekcje wstępu omawiają fazy i przejścia fazowe w zależności od parametrów (d,N) poświęcając dużo uwagi przejściu Kosterlitz-Thoulessa realizowanemu w pojedynczym punkcie $(d,N) = (2,2)$ i rozszerzeniu perturbacyjnej analizy Kosterlitz-Thoulessa (za którą otrzymali Nagrodę Nobla) poza ten punkt. Rozszerzenia tego dokonali Cardy i Hamber w 1980 roku a uzyskane wyniki przewidują ciekawe zachowania fazowe w płaszczyźnie (d,N) w pobliżu punktu $(2,2)$. W moim przekonaniu sekcje te dobrze przygotowują czytelnika do sformułowania pierwszego celu szczegółowego rozprawy (przedstawionego w sekcji 1.1.5) jakim jest lepsze zrozumienie scenariusza przedstawionego przez Cardy-Hambersa (CH) jeśli chodzi o kolizję punktów stałych grupy renormalizacji.

Drugim celem wytyczonym przez Pana mgr Chlebickiego jest zrozumienie jak punkty stałe grupy renormalizacji dla izotropowych modeli $O(N)$ reagują na zaburzenia o charakterze anizotropowym. Oczywiście temat ten nie jest nowy co Autor dyskutuje w sekcji 1.2 wstępu. Najwięcej uwagi badawczej skupia się na rozszerzeniach anizotropowych modelu $O(N)$ zawierających oddziaływanie o N -wymiarowej symetrii kubicznej. Ten typ anizotropii może występować w realnych układach fizycznych, takich jak na przykład kryształy magnetyczne. Efekty związane z anizotropowym zaburzeniem o symetrii sześcienną mogą być analizowane w ramach rachunku zaburzeń $4-\varepsilon$. Autor przedstawia wiedzę dotyczącą możliwych punktów stałych i przepływów grupy renormalizacji, które wskazują gdzie w płaszczyźnie (d,N) zaburzenie anizotropowe jest ważne. Szczególna uwaga Autora poświęcona jest dwuwymiarowemu modelom $O(2)$ z sześciennym zaburzeniem i bardzo ciekawym pytaniu czy faza Kosterlitz-Thoulessa wykazująca kwazi-długozasięgowe uporządkowanie może być stabilna w obecności zaburzenia o symetrii sześcienną. Pan mgr Chlebicki formułuje szczegółowy cel badań jakim jest uzyskanie nowej perspektywy na model $O(2)$ z anizotropią kubiczną używając metod nieperturbacyjnej grupy renormalizacji i zmieniając w sposób ciągły wymiar przestrzenny w kierunku dwóch wymiarów.

Dążąc do osiągnięcia postawionych celów Kandydat wykorzystał podejście efektywnej średniej akcji do nieperturbacyjnej grupy renormalizacji. Metodologia omówiona jest szczegółowo w rozdziale 2. Na uwagę zasługują zaawansowany formalizm matematyczny, którego opanowanie było niezbędne do zrealizowania postawionych celów naukowych.

Dyskusja wyników badań zawarta w rozdziałach 3 i 4 pozwala ocenić najważniejsze osiągnięcia recenzowanej rozprawy doktorskiej. Są to bez wątpienia wyniki dotyczące izotropowych modeli $O(N)$ kwestionujące przewidywania teorii Cardy'ego i Hambera i pokazujące, że w wymiarach przestrzennych wyższych niż dwa nie występuje linia na płaszczyźnie (d,N) nieanalitycznych zachowań wykładników

krytycznych. Raczej, nieperturbacyjne metody przewidują gładkie przejścia pomiędzy dwoma różnymi reżimami zachowań wykładników krytycznych długości korelacji v i wymiaru anomalnego η . Z drugiej strony metody nieperturbacyjne są zgodne z teorią Cardy'ego i Hambera poniżej $d=2$ i $N=2$.

W podsumowaniu stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska Pana mgr Andrzeja Chlebickiego zatytułowana „ $O(N)$ Models and their anisotropic extensions” prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie fizyki materii skondensowanej oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr Andrzeja Chlebickiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.