

氏 名 佐藤 智実

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1826 号

学位授与の日付 平成28年3月24日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 素粒子原子核専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Revisiting chiral phase transition of two flavor QCD with
effective theory approach

論文審査委員 主 査 講師 金児 隆志
講師 山田 憲和
教授 橋本 省二
准教授 森松 治
講師 板倉 数記
教授 金谷 和至 筑波大学

論文内容の要旨
Summary of thesis contents

We study a linear sigma model (LSM) with broken axial $U(1)$ ($U_A(1)$) symmetry as an effective theory describing the chiral phase transition of Quantum Chromo-Dynamics (QCD) at vanishing density. This system is an extreme case of real QCD with massive quarks. Deep understanding of this system is therefore of basic importance towards clarification of the phase diagram of real QCD in terms of many parameters, e.g. chemical potential, quark masses, and so on.

Despite a number of analytical and numerical studies, the nature of the chiral phase transition is not yet clear: even the order of chiral phase transition has not been determined. In 1983, Pisarski and Wilczek studied a renormalization group (RG) flow of the LSM with arbitrary number of flavors of massless quarks in the ϵ expansion. They showed that fate of this flow depends on the presence of axial $U_A(1)$ symmetry at the critical temperature T_c .

When $U_A(1)$ symmetry is largely broken, this model is reduced into $O(4)$ LSM. It is well established by many analytical and numerical studies that $O(4)$ LSM has an infrared fixed point (IRFP), or the Wilson-Fisher fixed point. On the other hand, when $U_A(1)$ symmetry is effectively restored at T_c , the model is reduced into the $U(2) \times U(2)$ LSM. Presence of an IRFP in the $U(2) \times U(2)$ LSM is still under debate. The $U_A(1)$ broken model with finite $U_A(1)$ symmetry breaking bears more practical importance. The Lagrangian of this model is constructed by the $U(2) \times U(2)$ symmetric terms of the $U(2) \times U(2)$ LSM, and the $U_A(1)$ breaking terms. This model contains eight degenerate real scalar fields, which are massless at T_c . Half of them become massive with $U_A(1)$ breaking. Thus there are four massless and four massive fields.

An interesting issue on this $U_A(1)$ broken model is that different theoretical approaches lead to conflicting predictions about the existence of IRFP. Based on the functional RG, it has been shown that there is no IR stable fixed point in this model unless the limit of infinitely large $U_A(1)$ breaking is taken. In this point of view, the phase transition of this model should not be second order: it should be first order phase transition. On the other hand, since the typical mass scale of second order phase transition is zero, we may consider that all the finite quark masses are infinitely large compared to the scale of second order phase transition. Based on this approximation, all the massive fields decouple from the IR physics. The model is reduced into the $O(4)$ LSM, and ends up to be second order.

In this study, we investigate the RG flow of this system in the ϵ expansion in order to clarify the nature of the phase transition with massive fields. To trace the effect of the mass accurately, we take a mass-dependent scheme in this analysis. The consistency with other scheme (the MS scheme) is checked through a detailed comparison of four point correlation function. From the beta functions calculated in the leading order of the ϵ expansion, we find the attractive basin flowing into the $O(4)$ IRFP in a space of the initial parameters of the RG flow.

We discuss the decoupling of the massive fields and the order of the phase transition in the

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

$U_A(1)$ broken model by a detailed investigation of correlation functions. These functions indeed converges to those in the $O(4)$ LSM, and therefore we conclude that the $U_A(1)$ broken model ends up with second order chiral phase transition.

Finally, we calculate the critical exponents in the $U_A(1)$ broken model and the $O(4)$ LSM to compare the detail of critical phenomena in these models. We note that there is a discrepancy in the exponent characterizing the sub-leading behavior of the critical phenomena between these models, even though parameters of the $U_A(1)$ broken model are located in the $O(4)$ attractive basin. This suggests that the IR nature is affected by the existence of fields with small but non-zero masses.

(別紙様式 3)
(Separate Form 3)

博士論文の審査結果の要旨

Summary of the results of the doctoral thesis screening

本学位論文では、質量の無い 2 フレーバー QCD の有限温度カイラル相転移について、軸性 U(1) 対称性の破れとの関係に注目して研究した成果がまとめられている。

QCD の豊かな相構造の解明は宇宙史や爆発的天体現象などと関連する重要な研究課題であり、有限温度カイラル相転移の諸性質の研究はその主要テーマの一つである。質量の無い 2 フレーバー QCD は、現実世界の良い近似を与えるとともに、系の単純さから、解析的、及び、数値的解析が比較的容易である。このため、数十年に渡る研究が行われてきたが、未だに相転移の次数すら決定されていない。これは、ゼロ温度では量子異常によって破れている軸性 U(1) 対称性が臨界温度で回復するか否かという問題と、カイラル相転移の諸性質が密接に関係しているためである。近年、格子 QCD の数値シミュレーションによって、軸性 U(1) 対称性の破れの大きさの研究が急速に進んでいる。一方、その破れと相転移の諸性質との関係は、対称性が大きく破れている場合と完全に回復している場合という両極端の場合について主に研究され、概ね理解されている。本研究は、その中間領域、即ち、軸性 U(1) 対称性の破れが有限の場合の相転移の性質を調べている。

具体的には、質量の無い 2 フレーバー QCD と同等の対称性を持つ有効模型を構成し、その結合定数の β 関数を ϵ 展開で求め、繰り込み群の流れを追った。その結果、少なくとも、 ϵ 展開の最低次では、この系には赤外固定点は存在しないという結論を得た。素朴には、この結果は、2 次相転移が起こらないと予想させる。しかし、繰り込み群の流れと低エネルギー極限での相関関数を詳細に調べることにより、軸性 U(1) 対称性の破れの大きさには臨界値が存在し、それより小さい時にカイラル相転移は 1 次となり、大きい場合には 2 次となることを示唆する結果を得た。

次に 2 次相転移が起こると期待されるパラメタ領域に注目し、 ϵ 展開の最低次で臨界指数を求めた。その結果、 ν や η など、臨界現象を記述する最主要項の指数は 0(4) Heisenberg 模型のものと一致することを見た。一方で、最主要項への補正項を記述する指数 ω は異なり得ることを示唆する結果を得、高次元演算子の影響の可能性が議論されている。

本論文では、冒頭で、学術的背景と先行研究をレビューし、次いで、有効理論の構成と ϵ 展開の計算結果が丁寧に説明されている。臨界指数の諸性質などの基礎知識、 ϵ 展開の詳細なども、補遺としてまとめられている。汎関数繰り込み群を用いたこれまでの研究と比べて、相転移の詳細に一步踏み込んだ研究が展開されており、博士論文として新たな知見を十分に含んでいる。さらに、 ϵ 展開の収束性の問題から、数値シミュレーションによって解析的計算を検証する内容も盛り込まれている。

よって、本論文は総合研究大学院大学の学位論文にふさわしい内容を持つと認め、論文審査を合格とした。