

# Chiral Phase Transition in Strong Coupling Lattice QCD at Finite Temperature and Density for Color SU (3)

(有限温度-有限密度における Color SU (3) 強結合格子 QCD の Chiral 相転移に関する研究)

## 学位論文内容の要旨

本研究では次の様な研究背景に注目した。

- 初期宇宙や高密度天体の物質状態の解明、および QCD の非摂動領域における Hadron 形成や閉じ込めの解明の観点から、「温度や密度の変化による QCD の Chiral 相転移」の研究が重要である。
- 重イオン衝突実験により高温での Chiral 相転移が示唆され、原子核内での Vector・Meson の質量測定により、高密度での Chiral 相転移の兆候が見えつつある。今後 LHC-ALICE での重イオン衝突実験により、Chiral 相転移の理解に発展があると期待される。
- 一方で格子 QCD に基づく Monte-Carlo simulation によって、第一原理から高温-低密度における Chiral 相転移が研究され成果が上っているが、高密度領域は、Dirac determinant の符号問題のため困難である。しかし高密度領域も含めて第一原理の QCD から Chiral 相転移を研究する事が重要である。

この様な背景を受けて、本研究では Monte-Carlo simulation とは方向を異にし、数値計算ではなく「強結合格子 QCD に基いた解析的研究」を行った。以下の様に、大きく 4 つの研究成果が得られた。

- 強結合格子 QCD は本質的に Meson と Baryon の系となるが、有限温度・有限密度においては、強結合極限の場合でさえ Baryon 効果が無視されてきた。Baryon の非線形性の取扱が、Meson に較べて難しい為である。強結合極限での Baryon の非線形性の平均場近似を用いた定式化法を研究し、Baryon により Chiral 相転移の臨界温度に対する臨界化学ポテンシャルの比が大きくなる事が分かった。
- 上記の比は強結合格子 QCD では現象論の予想より遥かに小さくなってしまう。上の研究で少々改善されたが、より大幅な改善は強結合極限から強結合展開へ理論を拡張する事で期待される。強結合展開の次主要項迄考え、「強結合結合 QCD と現実的な連続理論の橋渡し」に光を当てた。Bare Coupling 定数を小さくするほど、臨界温度に対する臨界化学ポテンシャルの比は大幅に大きくなり、現象論の予想の 90% 近くまで大きくなる事が分かった。
- 原子核内での Vector Meson の質量が、密度効果により小さくなる事が、理論と実験の双方で示唆されている。これを第一原理の QCD に基づいて調べる事が期待されているが、有限温度・有限密度・強結合格子 QCD による既存研究はない。本研究では強結合極限の格子 QCD で有限温度-有限密度の効果を考察した。Meson の質量は、Chiral 凝縮を通して間接的に温度や密度に依存し、この構造が有効理論によって指摘されてきた Brown-Rho scaling 則を導く事が分かった。即ち「有限密度中と真空の Meson 質量の比が Chiral 凝縮におけるその

比と等しい」という予言を、強結合格子 QCD から直接的に導いた。また「温度と密度の変化に伴う Chiral 相転移により、Meson 質量が急激に減少する事」、「温度や密度に関係なく PCAC 関係式が見たされる事」を確認した。

- 格子 QCD に基づく Monte-Carlo simulation(MC) と、強結合格子 QCD の接点を見つける事が重要である。素朴な予想として、「Chiral 相転移の転移化学ポテンシャルの 3 倍 (カラー倍)」と「Baryon の質量」が等しいと考えられている。しかし既存の「強結合 Lattice QCD から得られる転移化学ポテンシャル」と「強結合領域の MC から得られる (ゼロ密度における) Baryon 質量」を比較すると、素朴な予想を破ると MC サイドから問題が提示されている。この問題に対し、我々は強結合極限の lattice QCD の枠組で転移化学ポテンシャルと Baryon 質量を関係付ける式を直接的に導いた。これによって、「ゼロ化学ポテンシャルでは Baryon 質量が MC の結果と一致する事」、「Chiral 相転移に伴い転移化学ポテンシャル付近でのみ、上記の素朴な予想が実現する事」を明らかにした。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 河 本 昇  
副 査 教 授 石 川 健 三  
副 査 准教授 中 山 隆 一  
副 査 准教授 大 西 明

学 位 論 文 題 名

## Chiral Phase Transition in Strong Coupling Lattice QCD at Finite Temperature and Density for Color SU (3)

(有限温度-有限密度における Color SU (3) 強結合格子 QCD の  
Chiral 相転移に関する研究)

博士學位論文審査等の結果について (報告)

本論文において申請者は、SU(3) カラー自由度を持つ有限温度有限密度の QCD の系を強結合極限の格子 QCD の手法で分析し、ハドロン・クォーク・グルオンプラズマ相の理解を深めた。

近年有限温度、有限密度のハドロン系の実験が可能になった事によって、実際にクォーク・グルオン相が実験的に実現しているか多くの研究者の注目を集めている。これに対して、理論的数値的にこの系を解析しようとする、いわゆるフェルミオンの積分でのサイン問題が存在し、モンテカルロ法による数値計算が実行出来ない。そこで何らかの方法で、解析的にこれ等の系を解析することが、熱望されている。これに対して強結合極限での格子 QCD は一つの可能な手法を与えており、過去の先行研究で色々な局面での研究が行われてきた。有限温度のみを取り入れた場合、有限密度のみを取り入れた場合、メソンのみ取り入れた場合、バリオンのみを取り入れた場合、或いはこれ等の組み合わせの場合、等色々な試みが行われてきた。これに対して、この研究では、SU(3) カラー自由度を導入し、メソン及びバリオンのフルな自由度を導入した系に対して有限温度、有限密度での有効相互作用を導出し、その相図を明らかにし、更にバリオンの効果及び、強結合展開の初項の効果を取り入れた解析を行った。またハドロンの質量がどの様に温度及び密度の依存性が有るかを調べ強結合領域のゼロ温度モンテカルロの結果とも比較し解析的な手法によりこれらの極限領域でモンテカルロの結果をうまく再現することを確かめた。またメソンの質量はカイラル凝縮を通して間接的に温度や密度に依存し、この構造が有効理論によって指摘されてきた Brown-Rho scaling 則を導く事も明らかにした。

この様に実験が出始めたクォーク・グルオン系に対して解析的な手法で現実が一番近い SU(3) の系の有限温度・有限密度の系の相の理解を深めハドロン及びクォーク・グルオンプラズマ系に対して色々な特性を明らかにした。この様な現実にもっと近い SU(3) の系で解析的に有限温度・有限密度に対して質量依存性までも含め系統的に調べた例はこれまでに無く、この分野の研究に対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士 (理学) の学位を授与されるのに十分な資格あるものと認める。