

# 実時間形式硬熱ループ近似DS方程式に基づく熱QCDの 温度・密度に依存するカイラル相転移機構の研究

中川 寿夫\*

Hisao Nakkagawa

教養部教授

本研究で、我々は実時間閉経路形式における硬熱ループ近似でのダイソン-シュヴィンガー (DS) 方程式を用いて熱QCD/QEDのカイラル相転移機構を調べることを行った。主たる理由は次の3点である；

- (1) DS方程式は解析的な処方でもってゲージ場理論の相転移現象を調べるための強力な手法であること、
- (2) 硬熱ループ近似は、有限温度QCD/QEDにおいて主要な温度効果を、ゲージ不変性と無矛盾かつ系統的に、抜き出して計算することを可能にする近似法である。従って、この近似の下でDS方程式を解析すれば熱QCD/QEDの相転移機構を理解することが可能になると考えられること、
- (3) これまでに行われてきた同種の研究には多くの重大な欠陥があって、そこで得られたカイラル相転移に関する結果は熱ゲージ場理論の真の結論であるとは考えにくい。熱ゲージ場理論の教える真の結論を知るためには再分析が必要である。

本研究の目的は熱QCD/QEDのカイラル相転移機構を明らかにすることであるが、一方でその主たる関心事は、熱的相転移を支配する本質的な熱的効果は何であるのかを明確にすること、かつ如何にすればその効果をきちんとDS方程式の（積分）核に取り込んだ分析を実行できるかを見い出すことにある。

上に述べた理由、目的、関心事を考慮して、今回は以下の処方で分析を実行した；

1. 実時間閉経路形式を用いて、遅延フェルミオン伝播関数の極である物理的質量関数 $\Sigma_R$ を正しく扱う。その際、熱場理論では $\Sigma_R$ は不安定な準粒子の質量関数であること、即ち、 $\Sigma_R$ は本質的な虚部を有することを正しく考慮する。
2. ゲージボゾン伝播関数については硬熱ループ予加算形を正しく用いる。頂点関数につい

ては、今回は特に、点 (point vertex) 近似を用いて、硬熱ループ予加算形は用いない。従って、分析するDS方程式は、 $\Sigma_R$ に対する改善された梯子近似 (improved ladder approximation) ということになる。

3. ゲージについては、ランダウゲージ、および非線形ゲージの2種の固定で分析する。

上記2および3に関しては若干の補足説明が必要であろう。まず2について：硬熱ループ近似の下で厳密な議論をするためには、ゲージボゾン伝播関数と同時に、頂点関数についても硬熱ループ予加算形を正しく用いる必要がある。しかし、前記理由の(1)で述べたごとくDS方程式は解析的な処方でもって分析ができるということ、そして、本研究の主たる関心事が、熱的相転移を支配する本質的な熱的效果は何であるのかを明確にすることにあるということ、を合わせ考慮すれば、step-by-step approachで、主要な熱的效果を逐次取り込みつつ分析を実行していくことにも重要な意味があることが理解出来るであろう。更に、頂点関数にまで硬熱ループ予加算形を用いた「正しい」硬熱ループ近似DS方程式には、グラフの「重複足し上げ (double counting)」問題という、厄介な問題が存在する。この重複足し上げ問題は、摂動計算の範囲では比較的容易に解決出来るが、DS方程式の分析においては、これを回避する適切な処方箋を、数値的解析処方まで含めて、構築することは今のところなかなか困難であるという事情もある。従って、これは今後の課題として、取り敢えず今回は改善された梯子近似の下での分析を実行する。

しかしながら、頂点関数にも硬熱ループ予加算形を用いた「正しい」硬熱ループ近似を実行した時初めて、少なくとも摂動領域での範囲内では、得られた結果がゲージ不変な物理的結果であることが保証されることになる。逆にいえば、今回の改善された梯子近似での分析では、得られた結果のゲージ不変性は (結果を先取りして言うなら) 陽に破れていることになる。これはやはり由々しき問題で、決して看過出来るものではない。というわけで、上記3で述べたように2つのゲージ固定を用いて分析を実行する。ランダウゲージでの分析は終了し、既に学術雑誌に投稿中である；正確な硬熱ループ予加算ゲージボゾン伝播関数の考慮は、物理的質量関数 $\Sigma_R$ を「正しく」取り扱うこととともに極めて重要であることがわかった。一方で、結果がゲージ不変性を陽に破っていることもまた明らかになった。そこで、改善された梯子近似の下で理論的枠組み (従って、得られた結果) のゲージ不変性を最大限保持し得る処方として、非線形ゲージの下での分析を現在鋭意実行中で、興味深い結果が得られつつある。完成し次第学術雑誌に投稿し公表する予定である。

詳細については、Y.Fueki, H.Nakkagawa, H.Yokota and K.Yoshida, Chiral Phase Transitions in QED at Finite Temperature: Dyson-Schwinger Equation Analysis in the Real Time Hard-Thermal-Loop Approximation, submitted for publication, を参照のこと。また、以下も参照；

①Y.Fueki, H.Nakkagawa, H.Yokota and K.Yoshida, Prog. Theor. Phys. **107**, 759 (2002).

②H.Nakkagawa, H.Yokota, K.Yoshida and Y.Fueki, Pramana - J. Phy. **60** (2003), 1029.

中川：実時間形式硬熱ループ近似DS方程式に基づく熱QCDの温度・密度に依存するカイラル相転移機構の研究

Proceedings of the 4th Int'l Conference on Physics and Astrophysics of Quark – Gluon Plasmas (ICPAQGP – 2001) .

③H.Nakkagawa, H.Yokota and K.Yoshida, Dyson-Schwinger Equation Analysis of the Chiral Phase Transitions in Thermal QED: Resolving the Problem of Gauge Dependence, to appear.