

Structure of the Thermal Quasi-Particle

奈良大学教養部

中川 寿夫, 横田 浩, 吉田 光次

熱 QED と QCD について, 特に熱 QCD の温度・密度に依存する相構造と相転移現象の研究は, 現在理論と実験の両面から注目されている。過去において, 主として Lattice Simulation, Dyson-Schwinger (DS) 方程式によるフェルミオンの質量項の分析がなされてきた [1]。我々は, 解析的な分析を可能にして, なおかつ先行する数々の分析結果と比較検討がしやすい, 熱場理論の硬熱ループ (Hard Thermal Loop: HTL) 再加算を考慮した DS 方程式を用いて分析をしてきた [2-4]。本稿では, これらと関係する分析として熱的準粒子構造について行った結果を報告する。

フェルミオンに対する硬熱ループ再加算を考慮した DS 方程式は, 次のように与えられる [2]。

$$\begin{aligned}
 -i\Sigma_R(P) = & -\frac{e^2}{2} \int \frac{d^4 K}{(2\pi)^4} \\
 & \times [* \Gamma_{RAA}^\mu(-P, K, P-K) S_{RA}(-K, K) * \Gamma_{RAA}^\nu(-K, P, K-P) * G_{RR, \mu\nu}(K-P, P-K) \\
 & + * \Gamma_{RAA}^\mu(-P, K, P-K) S_{RR}(-K, K) * \Gamma_{AAR}^\nu(-K, P, K-P) * G_{RA, \mu\nu}(K-P, P-K)]
 \end{aligned}$$

ここで, $* G_{\alpha\beta}^{\mu\nu}(-K, K)$ は HTL 近似のゲージ粒子の伝播子, $S_{\alpha\beta}(-P, P)$ は full のフェルミオンの伝播子である。具体的な表式は論文 [3] に与えられているが, 以下に必要な $S_R(P)$, $\Sigma_R(P)$ および HTL 近似での頂点関数 $* \Gamma_{\alpha\beta\gamma}^\mu$ の表式のみ与える。

$$\begin{aligned}
 S_R(P) & \equiv S_{RA}(-P, P) = \frac{1}{\not{P} + i\epsilon\gamma_0 - \Sigma_R} \\
 \Sigma_R(P) & = (1 - A(P))\not{p}_i\gamma^i - B(P)\gamma^0 + C(P) \\
 * \Gamma_{\alpha\beta\gamma}^\mu & \equiv \gamma_{\alpha\beta\gamma}^\mu + \delta\Gamma_{\alpha\beta\gamma}^\mu \quad (\gamma_{RAA}^\mu = \gamma_{AAR}^\mu = \gamma^\mu, \text{ その他はすべて } 0)
 \end{aligned}$$

本稿での解析は, ladder 近似 ($\delta\Gamma_{\alpha\beta\gamma}^\mu = 0$), MIE 近似¹, Landau ゲージの下で行った。

準粒子構造を調べるために, ここでは $\text{Im}[B(p_0, p)]$ および symmetric phase でのスペクトル関数 $\rho_\pm(p_0, p)$ [5,6]

$$\begin{aligned}
 \rho_\pm(p_0, p) & = -\frac{1}{\pi} \text{Im} \frac{1}{D_\pm(p_0, p)} = -\frac{1}{\pi} \text{Im} \frac{1}{p_0 + B(p_0, p) \mp pA(p_0, p)} \\
 S_R & = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{D_+} \left(\gamma^0 + \frac{p_i\gamma^i}{p} \right) + \frac{1}{D_-} \left(\gamma^0 - \frac{p_i\gamma^i}{p} \right) \right]
 \end{aligned}$$

の振る舞いを調べた。Symmetry phase ($C = 0$) では, A, B および ρ_\pm は Charge Conjugation

$$\begin{aligned}
 \text{Re}[A(p_0, p)] & = \text{Re}[A(-p_0, p)], \quad \text{Im}[A(p_0, p)] = -\text{Im}[A(-p_0, p)] \\
 \text{Re}[B(p_0, p)] & = -\text{Re}[B(-p_0, p)], \quad \text{Im}[B(p_0, p)] = \text{Im}[B(-p_0, p)] \\
 \rho_-(p_0, p) & = \rho_+(-p_0, p)
 \end{aligned}$$

¹ゲージ粒子の transverse mode に Instantaneous Exchange (IE) 近似を施すと, 制御できない発散が生じる [3]。そこで, 一部 IE 近似をしない部分がある。この近似を MIE 近似と表記する。

を満足すべきである [5] が, 得られた解は上記の関係を満足している (逆に, 満たさないときは収束解が得られない)。

初めに, $\text{Im}[B(p_0, p)]$ の一定温度での結合定数に対する振る舞いをみる (図 1)。 $p_0 = 0, p = 0.1\Lambda$ でのデータを与えたのは, 相転移を調べるために質量をこのエネルギー・運動量で調べているためである [3,4]。ある結合定数のところで, 大きく振る舞いが変わる。この結合定数は, 相転移を起こす結合定数に他ならない。すなわち, $\text{Im}[B]$ は, symmetric phase と broken phase で振る舞いを変えることがわかる。broken phase でも $C = 0$ の解はある (真の解ではない) が, このとき $\text{Im}[B]$ は, symmetric phase での値をそのまま延長した値になっている (一部, 図 1 に示してある)。

$\text{Im}[B]$ の温度依存性を見るために, $\text{Im}[B]/T$ をプロットすると, $0.10 \leq T < 0.20$ ($3.5 < \alpha < 7.5$) では symmetric phase の部分はほぼ同じ線上に乗る。 α 依存性も考えるとこの範囲では

$$\text{Im}[B(p_0 = 0, P = 0.1\Lambda)] \propto \frac{\alpha T}{\log e}, \quad \alpha \equiv \frac{e^2}{4\pi}$$

という関係を満たしている (図 2)。弱結合 ($\alpha \ll 0.1$) については, 計算精度の関係でまだ解析ができていない。紙面の関係で, 固定した結合定数での温度に対する振る舞いについては省略する。

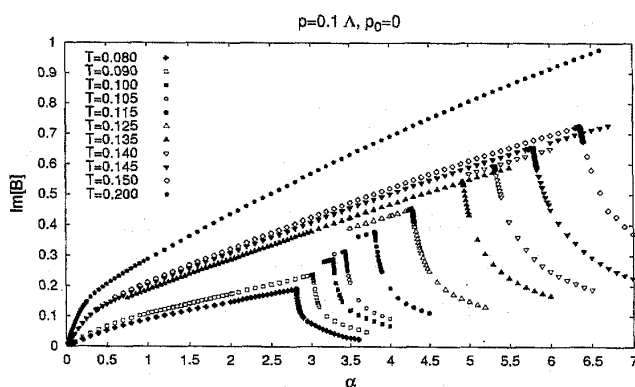


図 1:

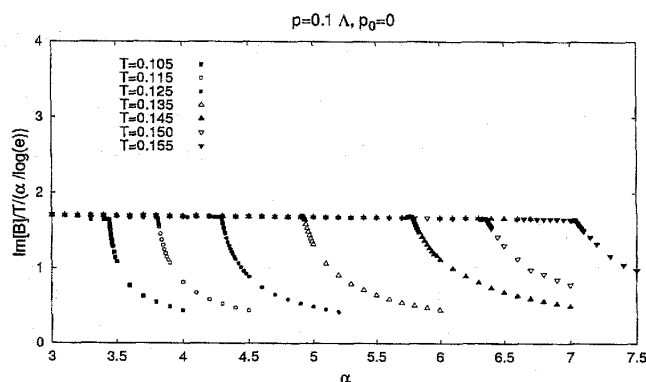


図 2:

次に, スペクトル関数 $\rho_+(p_0, p)$ の振る舞いを調べる。 $p = 0$ での値を求めるには, プログラムの変更が必要であるので, $p \neq 0$ の場合を示す。最初に高温かつ弱結合の場合を図 3 に示す。一般に, two peaks 構造を持ち, $p \sim 0$ では, three peaks 構造を持つことがわかる。これは, 名古屋グループの結果 [6] と一致する。一方, 強結合では, one peak 構造である (図 4)。

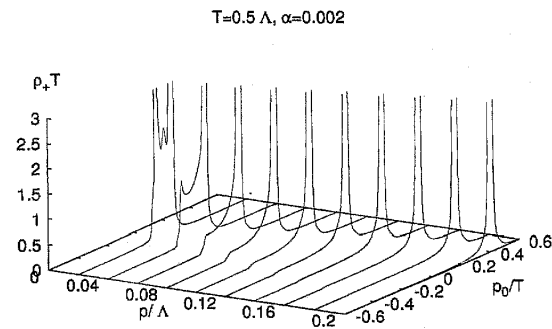


図 3:

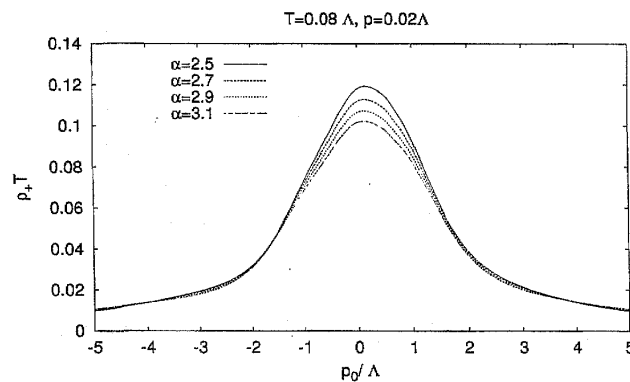


図 4:

今後、

- a) スペクトル関数の $p=0$ での振る舞い (現在, 解析中)
- b) symmetric phase での $\text{Im}[B]$ の温度・結合定数依存性

などを解析し準粒子構造の理解を深める必要がある。

[1] 例えば,

- K.-I. Kondo and K. Yoshida, Int. J. Mod. Phys. **A10** (1995) 199;
- M. Harada and A. Shibata, Phys. Phys. D **59** (1999) 014010;
- K. Fukazawa, T. Inagaki, S. Mukaigawa and T. Muta, Prog. Theor. Phys. **105** (2001) 979.
- [2] Y. Fueki, H. Nakkagawa, H. Yokota and K. Yoshida, Prog. Theor. Phys. **107** (2002) 759.
- [3] Y. Fueki, H. Nakkagawa, H. Yokota and K. Yoshida, Prog. Theor. Phys. **110** (2003) 777.
- [4] H. Nakkagawa, H. Yokota and K. Yoshida, in: Nagoya Mini-workshop on "Strongly Coupled Quark-Gluon Plasma: SPS, RHIC and LHC" (2007), p.173; in: The Origin of Mass and Strong Coupling Gauge Theories (2008), p.220.
- [5] H. A. Weldon, Phys. Rev. D **61** (2000) 036003.
- [6] M. Harada, Y. Nemoto and S. Yoshimoto, Prog. Theor. Phys. **119** (2008) 117.
- M. Harada and Y. Nemoto, Phys. Rev. D **78** (2008) 014004.
- M. Harada and S. Yoshimoto, arXiv:0903.5495.