Quark number density in the phase with unbroken center Z2 symmetry [*1]

竹本真平[*2] 原田正康（名古屋大学理学研究科）
佐々木千尋（ミュンヘン工科大学）

2 フレーバー QCD における 2 クォーク状態、4 クォーク状態を表す二種類のスカラーメソンを含む模型の相図を調べる。Ginzburg-Landau ポテンシャルを用いた解析により、カイラル対称性 $SU(2)_L \times SU(2)_R$ が 4 クォークの凝縮によって $SU(2)_V \times (Z_2)_A$ に自発的に破れている相が存在する可能性を示す。

1　カイラル対称性の自発的破れと秩序変数

クォーク質量ゼロの 2 フレーバー QCD はカイラル対称性 $SU(2)_L \times SU(2)_R$ を持つ。クォークと反クォークの間で対凝縮 $\langle \bar{q}q \rangle$（カイラル凝縮）が起きると、カイラル対称性は $SU(2)_V$ に自発的に破れる。したがって、$\langle \bar{q}q \rangle$ はカイラル相転移の秩序変数となる。しかし、これが唯一の秩序変数であるとただちに言うことはできない。例えば、4 つのクォーク（2 つのクォークと 2 つの反クォーク）からなる演算子

$$O_1 = \bar{q}_L \tau_a \gamma_\mu q_L \cdot \bar{q}_R \tau_a \gamma^\mu q_R\,, \qquad O_2 = \bar{q}_R \tau_a q_L \cdot \bar{q}_L \tau_a q_R \qquad (\tau_a \text{ は } SU(2) \text{ の生成子}) \tag{1}$$

が有限の真空期待値を持つと、カイラル対称性は $SU(2)_V \times (Z_2)_A$ に自発的に破れる。したがって、(1) の $\langle O_{1,2} \rangle$ もカイラル相転移の秩序変数となる。このような形のカイラル対称性の自発的破れが起こる可能性は以前より考えられてきたが、バリオンのいないゼロ密度の QCD では QCD 不等式によって厳密に禁止されることが示されている [2]。しかし有限密度においてはこの議論は成り立たず、$\langle \bar{q}q \rangle = 0$ かつ $\langle O_{1,2} \rangle \neq 0$ によってカイラル対称性が自発的に破れている状況が生じる可能性がある。今回は 2 クォーク状態、4 クォーク状態を表す二種類のスカラーメソンを含むカイラル模型を用いて、$SU(2)_V \times (Z_2)_A$ の対称性を持った相がどのようにして現れ、クォーク数密度やハドロンのスペクトルにどのような特徴が見られるかを調べる。

2　Ginzburg-Landau ポテンシャルと相図

1 節の議論に基づき、$(Z_2)_A$ に対し

$$M_{ij} \to -M_{ij}\,, \quad \Sigma_{ab} \to \Sigma_{ab} \tag{2}$$

と変換する 2 クォークの場 $M_{ij}\,(i,j = 1,2)$ と 4 クォークの場 $\Sigma_{ab}\,(a,b = 1,2,3)$

$$\begin{aligned} M_{ij} &\sim \bar{q}_{R,j}\, q_{L,i} \\ \Sigma_{ab} &\sim \bar{q}_L \tau_a \gamma_\mu q_L\, \bar{q}_R \tau_b \gamma^\mu q_R \end{aligned} \tag{3}$$

を導入し場の 4 次まででポテンシャルを書く。安定な解を得るために、場の 4 次の項の係数は正であると仮定する。さらに (3) の場をその期待値

$$M_{ij} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sigma\delta_{ij}\,, \quad \Sigma_{ab} = \frac{1}{\sqrt{3}}\chi\delta_{ab}\,. \tag{4}$$

[*1] この講演は論文 [1] に基づく。
[*2] 講演者, e-mail address: takemoto@hken.phys.nagoya-u.ac.jp

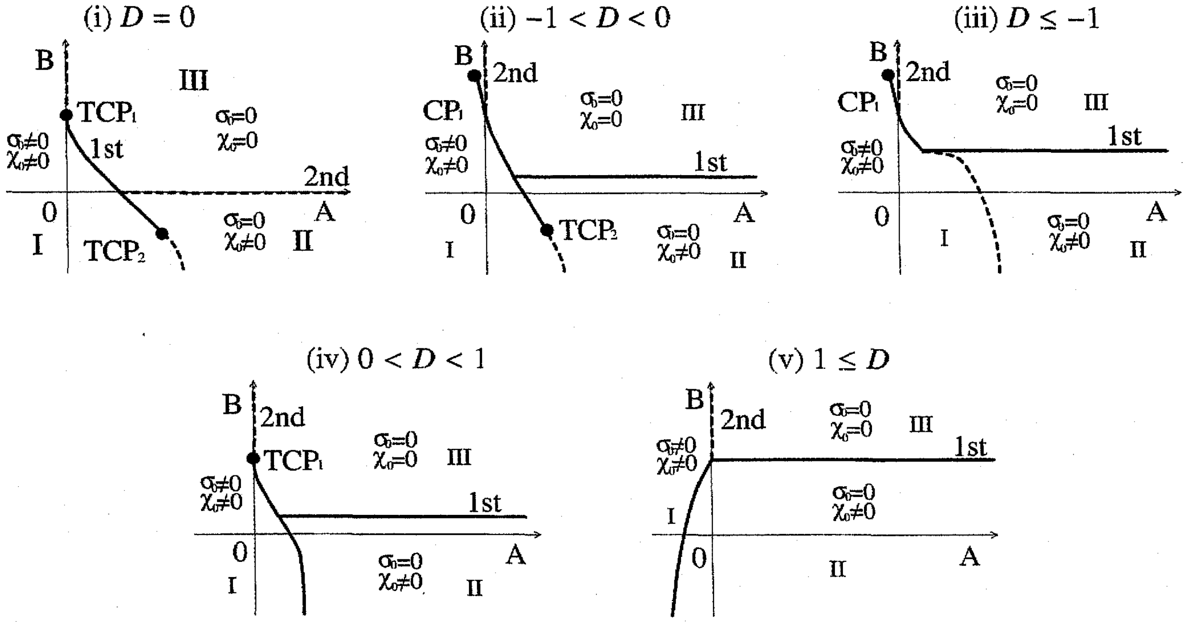

図 1　$F=0$ として D の値を変えた場合の相図。実線は一次相転移線、破線は二次相転移線を表す。また、σ_0,χ_0 は σ,χ の真空期待値である。相 I はカイラル対称性、Z_2 対称性が破れ $SU(2)_V$ の対称性を持つ相、相 II はカイラル対称性は破れているものの Z_2 対称性が回復し $SU(2)_V\times(Z_2)_A$ の対称性を持つ相、相 III はカイラル対称性 $SU(2)_L\times SU(2)_R$ が回復した相である。

に置き換える平均場近似を行うと、Ginzburg-Landau ポテンシャル

$$V(\sigma,\chi)=\sigma^4+A\sigma^2+\chi^4+B\chi^2-\sigma^2\chi+D\chi^3+F\sigma^2\chi^2 \tag{5}$$

が得られる。$F=0$ とし D を変えたときのこのポテンシャルの相図を図 1 に示した。$SU(2)_V\times(Z_2)_A$ の対称性を持つ Z_2 対称相（相 II）は D の値によらずに現れるものの、臨界点の個数や相転移の次数は D の値によって変わりうることが分かる。クォークの質量を入れてカイラル対称性を explicit に破ることなしに三重臨界点だけではなく臨界点が現れる場合 ((ii), (iii)) があることも、この模型のおもしろい特徴である。また、F を入れても相図の構造（相転移の次数や臨界点の有無）を変えることはないことを確かめている。

3　Z_2 対称相の特徴

$SU(2)_V\times(Z_2)_A$ の対称性を持つ Z_2 対称相（相 II）の物理的な特徴を見ていく。

まず、各相におけるクォーク数密度について調べた。ポテンシャル (5) の係数 A,B が温度 T とクォーク化学ポテンシャル μ の関数であると考えると、(5) の A,B についての二階微分はクォーク数感受率に寄与する量となる。この量はカイラル対称性が回復するとき（II → III）よりもむしろ、対称性 Z_2 が回復するとき（I → II）に大きくなる様子が見られた。クォーク数感受率は μ を変えたときのクォーク数密度の変化を表す量であるため、この結果はカイラル対称性が回復するときよりも Z_2 対称性が回復するときにクォーク数密度が大きく増加していることを示している。すなわち、Z_2 対称相はカイラル対称性と Z_2 対称性がともに破れた相（相

I）に比べてクォーク数密度がかなり大きい相となっていることが分かる。最近話題となっている Quarkyonic 相 [3] は large N_c で定義され、Polyakov ループの期待値がゼロであり、かつ有限のバリオン数密度を持つ相である。Z_2 対称相が大きいクォーク数密度を持つという特徴は Quarkyonic 相の特徴の一つと共通であり、Z_2 対称相は $N_c = 3$ の世界における Quarkyonic 相の候補になると考えられる。

次に、スカラーメソンと擬スカラーメソンそれぞれについて 2 クォーク状態、4 クォーク状態を表す場を含む線形シグマ模型を用いてメソンの質量スペクトルについて調べた。その結果、相 I では南部－ Goldstone ボソンである質量ゼロの擬スカラーメソンが 2 クォークと 4 クォークの擬スカラーメソンの混合状態として現れるのに対し、Z_2 対称相では純粋な 4 クォークの擬スカラーメソンが質量ゼロの南部－ Goldstone ボソンとなっていることが分かった。さらに、Z_2 対称相では $\langle\bar{q}q\rangle = 0$ であるにも関わらずスカラーメソンと擬スカラーメソンとの間に質量の縮退はないこと、$\langle\bar{q}q\rangle = 0$ かつ $F_\pi \neq 0$（F_π はパイオン崩壊定数）となっていることも分かった。また、Z_2 対称性により 4 クォークのスカラー場 $\Sigma_{ab}(\sim \chi\delta_{ab})$ と核子の場の間の湯川型結合（$\bar{N} - N - \Sigma$）は禁止されるので、Z_2 対称相で $\chi_0 \neq 0$ となってカイラル対称性が自発的に破れても、相 I のように核子が新たに質量を得ることがないことも分かる。そのため、核子は基底状態では質量ゼロになり、励起状態ではパリティ・パートナー間で質量が縮退する、というスペクトルを示す。

4　まとめと展望

2 フレーバーの QCD 相図の有限密度の領域に、4 クォークの凝縮によりカイラル対称性が $SU(2)_V \times (Z_2)_A$ に自発的に破れている相（Z_2 対称相）が現れる様子を Ginzburg-Landau ポテンシャルを用いた解析により示した。そして、クォーク数密度はカイラル対称性が回復するときよりもむしろ、Z_2 対称性が回復する際に大きく増加していることを示した。また、Z_2 対称相におけるメソンの質量スペクトルについても調べた。

今後取り組むべき課題は、NJL 模型のような微視的な模型を用いて Z_2 対称相が現れるかどうかを調べ、$T - \mu$ を軸とするきちんとした相図を描くことである。それに加え、今回は自由であった Ginzburg-Landau ポテンシャルの係数の値に対する QCD からの制限について考え、どのような相図が可能であるかということをより詳細に見ていきたい。

謝辞

この研究は、名古屋大学 GCOE プログラム (G07)「宇宙基礎原理の探求」の支援の下に行われました。また、発表の場をあたえていただいた、基研研究会「熱場の量子論」の世話人の方々に感謝します。

参考文献

[1] M. Harada, C. Sasaki and S. Takemoto, arXiv:0908.1361 [hep-ph].
[2] I. I. Kogan, A. Kovner and M. A. Shifman, Phys. Rev. D **59**, 016001 (1999).
[3] L. McLerran and R. D. Pisarski, Nucl. Phys. A **796**, 83 (2007), Y. Hidaka, L. D. McLerran and R. D. Pisarski, Nucl. Phys. A **808**, 117 (2008).