

# 論文内容の要旨

## Color superconductivity in Schwinger-Dyson approach (シュウィンガー・ダイソン法に基づくカラー超伝導の研究)

阿武木 啓朗

ここ数年間の間に、高バリオン数密度下において量子色力学 (Quantum ChromoDynamics, QCD) が示すカラー超伝導相に対して、膨大な研究が行われ、それらが包含する豊富な物理が明らかにされてきた。カラー超伝導とは、エネルギーギャップの存在によって特徴づけられる秩序状態である。これは、高密度で弱く相互作用するフェルミ面という描像から出発しても、クォーク間に引力が少しでも存在すると、散乱振幅に不安定性が起こりフェルミ面付近のクォーク間のコヒーレントな組み換えが起こった、フェルミガスとはまったく性質を異にする BCS 状態に導かれるという原理によっている (BCS 理論)。ただし、フォノン-電子機構による通常の超伝導と異なり、クォーク系においては対形成に優勢に効く引力が長距離の磁氣的グルーオン交換であることからエネルギーギャップの結合定数依存性が弱結合極限で  $e^{-1/g}$  のような BCS と異なる振る舞いをすることが分っている。これに加え、クォーク系の場合、スピン自由度のみならずカラー・フレーバーの自由度があり、様々な基底状態が提案されている。代表的なものとしては、2 フレーバー超伝導 (2CS)、カラー・フレーバーロッキング (CFL) の2つの秩序状態を上げることができる。これらは、それぞれユニークな状態であるが、特に CFL の秩序変数はカイラル対称性を破っており、それに付随し、擬スカラー八重項に属する南部・Goldstone (NG) ボソンがあらわれる。また、カラーを持った自由度には有限のエネルギーギャップが開き、準クォークモードは破れていない電荷のもとで整数荷電をもつことが示される。これら CFL での諸性質と QCD 真空の性質との類似性から、両者が相転移を隔てずにつながっているというクォーク・ハドロン連続性という興味深い推測 (conjecture) が打ち出された。高密度のクォーク物質をあらゆる仮定のもとに調べることは、QCD の相図を調べるという純粋理論的興味のみならず、中性子星の物理と関連して面白い。

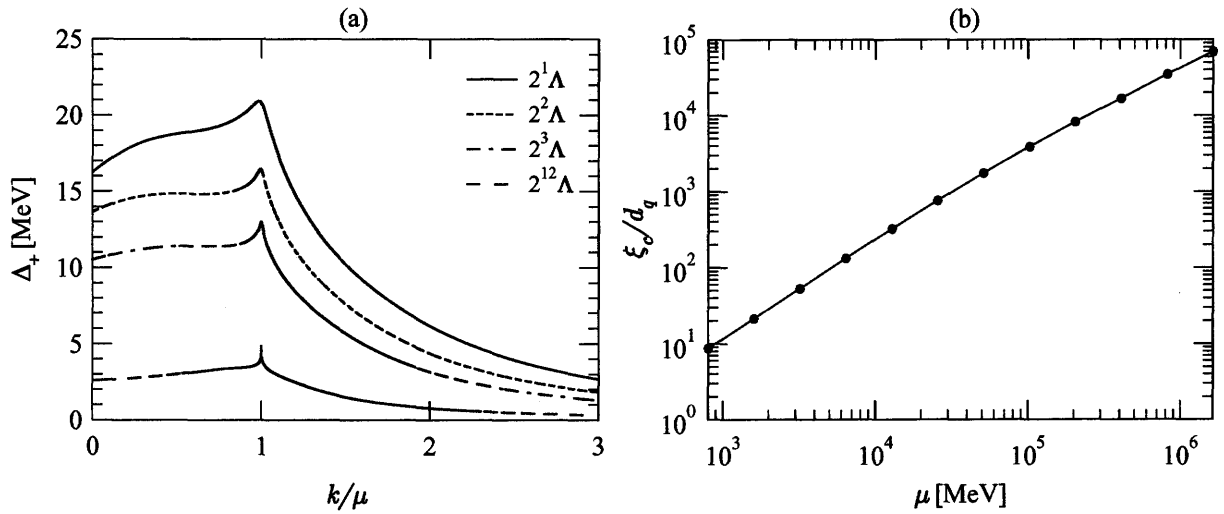


図 1: (a) 上から順に  $\mu = 2\Lambda, 3\Lambda, 8\Lambda, 4096\Lambda$  でのギャップ関数  $\Delta(k)$ 。(b) クォークの化学ポテンシャル  $\mu$  の関数としての、平均クォーク間距離によって規格化されたコヒーレンス長。

特に、最近の報告によれば、天体 RXJ1856.5-3754 はクォーク星の可能性があり、カラー超伝導を含め、高密度クォーク物質が星内に存在することによる観測量への帰結が求められている。

本研究ではシュウィンガー・ダイソン (SD) 方程式の南部-ゴリコフ (NG) 形式への拡張として、非局所相互作用のある系で (2CS) 及び (CFL) 状態のギャップ方程式を与える一般的な枠組みを与える。導出されたギャップ方程式を広範囲の密度 (温度) 領域で解くことにより、有限  $(T, \mu)$ -平面でのカラー超伝導 (2CS, CFL) の性質、及び、両者の競合について調べる。ここで用いた改良型梯子近似に基づく SD 法は低エネルギーでよく真空の物理を再現し、一方高エネルギーでは摂動論的 QCD とコンシステントな結果を与える。従って、このモデルを用いて広範な密度領域におけるカラー超伝導現象を統一的な視点から調べることができる。

得られたギャップ方程式を高密度から低密度まで広い領域で数値的に解き、ギャップ関数、クーパー対の空間的拮りを見ることによって、漸近的高密度領域 ( $\rho \sim 10^{10}\rho_0$ :  $\rho_0$  は通常核物質密度) でのペアリングの性質と、現実的な密度領域  $\rho \sim 10\rho_0$  でのそれが定性的に異なることが分った (図. 1 参照)。高密度領域では、弱結合の BCS 描像が良いが、低密度領域においては、強く束縛したボソニックな自由度のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) のような、BCS の描像とは異なった種類のペアリングが起こり得ることが示唆された。

2CS 及び、CFL から通常相 (QGP) への相転移は通常の BCS と定性的に同じ 2 次相転移の特性を示したが、ギャップ  $\Delta(p_F)$  と転移温度  $T_c$  を関係付ける BCS の普遍的関係式は低密度側で大きなずれを示した。この事実と、低密度でのギャップ、及び臨界温度の解析解からのずれは、この領域における、強結合の効果の重要性、とりわけ、フェルミ面から遠く離れた自由度の対形成への寄与の重要性を示している。

また、ギャップの間には、 $\Delta_1(\text{CFL}) > \Delta(2\text{CS}) > |\Delta_8(\text{CFL})|^1$  の大小関係があるものの、2CS から通常相への転移温度と、CFL から通常相への転移温度は同じであることが結論された (図. 2(a) 参照)。両者の相転移 [(2CS-QGP), (CFL-QGP)] は質的には同じであり、これらの相転移にクーパー対の空間的構造変化は伴わず、コヒーレントな対の数の減少によって特徴づけられていることが分った。

<sup>1</sup> 添え字の 1 と 8 は CFL における準粒子モードの種類を示す。

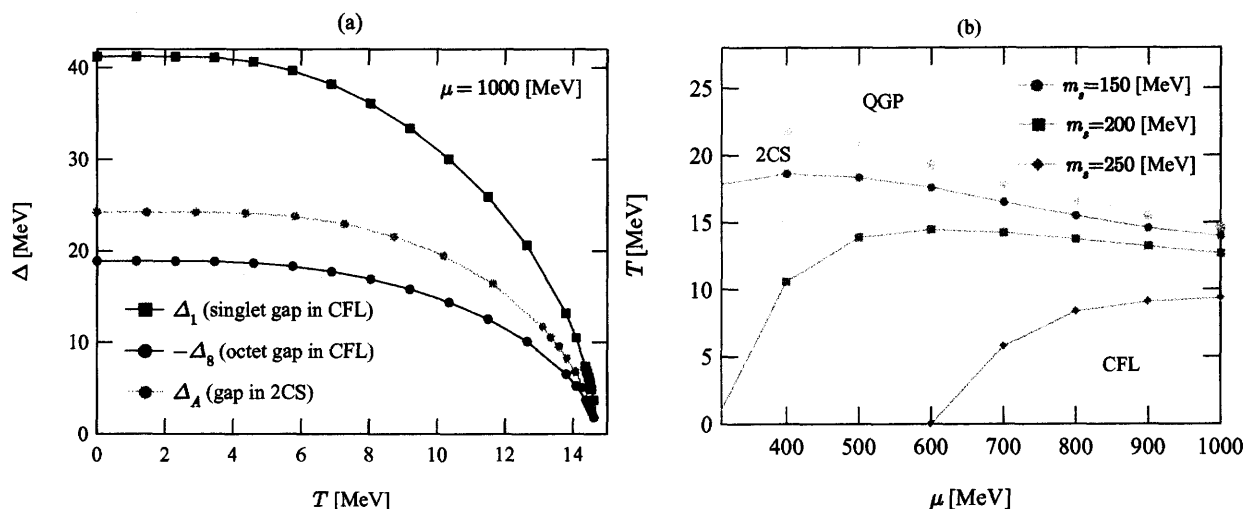


図 2: (a)  $\mu = 1000$  MeV における各ギャップの温度依存性。  $\Delta_8$ (CFL) : カラーフレーバー八重項ギャップ、  $\Delta_1$ (CFL) : カラーフレーバー一重項ギャップ、  $\Delta_1$ (2CS) : 2CS ギャップ。(b) QCD 相図 : 黄線は (2CS,QGP) の相境界。この線は二次相転移で隔てられている。  $m_s$  に依存する青線は (CFL,2CS) の相境界で上から順にストレンジクォーク質量  $m_s = 150, 200, 250$  MeV である。この線はおそらく一次相転移で隔てられている。  $m_s = 0$  のときは青線が黄線に縮退し、2CS 相が締め出される。このとき CFL と QGP との境界線は二次相転移となる。

さらに、CFL と 2CS のどちらがエネルギー的に選択されるのかという問題について、Cornwall-Jackiw-Tomboulis(CJT) の有効作用を用い  $\mu = 300 \sim 1000$  MeV の領域で調べた。その結果、ストレンジクォーク質量  $m_s = 0$  の仮想的状況では、相図において CFL の領域が 2CS を凌駕し、2CS は QCD の相図から締め出されることが結論された。CFL の凝縮エネルギー密度は 2CS 状態の約 2 倍程度である。CFL 状態の熱力学を支配するカラーフレーバー八重項準粒子のギャップ  $\Delta_8$  は 2CS のギャップよりも小さいにもかかわらず、CFL 状態の方が安定であることは興味深い。この 2CS に対する CFL の優位は、ギャップの大きさと、対相関に寄与する自由度との間の微妙な競合の結果であることが分った。

また、ストレンジクォークの質量の効果を運動学的判定基準をもちいて評価を試みた。(図.2(b) 参照)  $\mu \gtrsim 300$  MeV の領域でストレンジクォークの有効質量が  $m_s \lesssim 200$  MeV の場合、2CS は  $T = 0, \mu \gtrsim 300$  MeV の領域に現れない。すなわち、カイラル対称性の破れた真空は、 $T = 0$  において、CFL 相と滑らかにつながっている可能性が示唆される。