

研究計画

(1) 4成分スピノル表現を用いた3次元 Gross Neveu モデルのクォーク-反クォーク凝縮とダイクォーク凝縮の相図

量子色力学の相図の研究に注目が集まっている。量子色力学は漸近的自由性を持つ理論であり、クォークとグルーオンの相互作用は高エネルギーでは弱くなる。従ってクォークとグルーオンは高温・高密度では自由粒子として振る舞うが、この状態のことをクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 状態と呼ぶ。しかしこれとは反対にクォークとグルーオンは低温・低密度ではハドロンと呼ばれるクォーク数個からなる合成粒子の中に束縛されており、単体で観測されることはない。このようにクォーク物質の相図中では、低温・低密度側に「ハドロン相」と呼ばれるクォークが閉じ込められている相が、高温・高密度ではクォークとグルーオンが自由となる QGP 相が見られる。この描像が 1970 年代、1980 年代に受け入れられてきた QCD の相図である。

しかしながら、1975 年に「カラー超伝導」と呼ばれる新しいクォーク物質の状態の可能性が示唆され、この相は 1990 年代の終わりごろに広く受け入れられるようになった。カラー超伝導とはクォーク同士がカラー反対称のチャンネルからの引力を介してクーパー対と呼ばれるペアを作っている状態を指す。1998 年にフェルミオンのスペクトルにおけるエネルギーギャップの程度が 100MeV 程度であるという指摘がなされたが、これは当時の予想を遥かに上回るオーダーであった。このことはカラー超伝導状態が相図の中で無視できない範囲を有することを意味している。従って今日では量子色力学の相図の低温・高密度の範囲でこのカラー超伝導状態が実現されていると考えられている。

この量子色力学の相図の特徴は Nambu Jona-Lasinio (NJL) モデルと呼ばれる量子色力学の低エネルギー有効理論により首尾よく再現される。NJL モデルは量子色力学と同じ対称性を示す理論であり、その性質は詳細に調べられている。

論文「Phase diagram of quark-antiquark...」において私は NJL モデルの低次元のモデルである Gross Neveu モデルに着目しその相図を調べた。3次元ではスピノルの表現として2成分表現と4成分表現が存在するが、上述の論文で私は2成分の表現を採用し解析を行った。同様の解析を4成分のスピノル表現を用いて行うことが可能であり、私は現在このモデルでのクォーク-反クォーク凝縮とダイクォーク凝縮の相図を調べている。

解析は以下のように行う。まず3次元 Gross Neveu モデルで4成分スピノル表現を用いたラグランジアン密度を採用し、それに平均場近似を適用する。そして分配関数を評価し、熱力学的ポテンシャルを求める。得られる熱力学的ポテンシャルは紫外発散を含むが、これは繰り込みを適用することにより除去される。最後に熱力学的ポテンシャルの最小点を探すことにより、実現されるクォーク-反クォーク凝縮とダイクォーク凝縮を求め相図を構築する。

(2) 2次元 Gross Neveu モデルのクォーク-反クォーク凝縮とダイクォーク凝縮の相図

2次元 Gross Neveu モデルを用いてクォーク-反クォーク凝縮とダイクォーク凝縮を調べることは興味深い研究である。上述で説明された手順を用いて相図を構築することが可能で、2次元の Gross Neveu モデルの相図の研究を行う予定である。2次元 Gross Neveu モデルの相図の結果と、上で述べた3次元での結果が得られればそれらと比較することが可能で、次元によりどのように相の構造が変わるかを確かめることが出来る。更に、現実のクォーク物質を説明する4次元 NJL モデルの結果と比較することが出来、これは理論的にも現象論的にも極めて興味深い研究である。