

Approach to QCD phase diagram based on the imaginary chemical potential method

管野, 淳平

<https://doi.org/10.15017/1931695>

出版情報 : 九州大学, 2017, 博士 (理学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏名	管野 淳平
論文名	Approach to QCD phase diagram based on the imaginary chemical potential method (虚数化学ポテンシャル法に基づく QCD 相図の研究)
論文調査委員	主査 九州大学 教授 八尋 正信 副査 九州大学 教授 橋本 正章 副査 九州大学 准教授 清水 良文

論文審査の結果の要旨

自然界に存在する極限状態の代表の一つとして、中性子星内核の状態がある。この状態では、低温(T)、高クォーク化学ポテンシャル (μ)、高電価化学ポテンシャル (μ_{iso}) が実現しており、新しい物理法則を見つける上で重要である。中性子星の質量の大半を担う核子の性質は強い相互作用、すなわち、量子色力学(QCD)によって記述される。日常の状態では、QCDは「閉じ込め」や「カイラル対称性の自発的破れ」のような非摂動的性質をもっている。 T 、 μ 、 μ_{iso} を変化させると、これらの非摂動的性質は大きく変化する。その結果、種々の相転移が現れる。この変化を「 T - μ - μ_{iso} を変数とする3次元平面上」で表した図をQCD相図と呼ぶ。

QCDの第一原理計算である格子QCD計算は $\mu/T > 1$ で深刻な符号問題をもち、実行できない。このため、基本法則を仮定した有効モデルによるQCD相図の解明が頻繁に行われている。上記の「カイラル対称性の自発的破れ」を考慮した有効モデルとして、著名なNambu-Jona-Lasinio (NJL)モデルがある。その後、「閉じ込め」を付加した、Polyakov-loop-extended Nambu-Jona-Lasinio (PNJL)モデルやEntanglement-PNJL (EPNJL)モデルが提案された。PNJLとEPNJLモデルは、符号問題も待たない純虚数 μ 領域や有限 μ_{iso} での格子QCD計算結果を、300MeV程度まで、よく再現する。この成功は、純虚数 μ 領域や有限 μ_{iso} 領域で発現されるRoberge-Weiss (RW) 周期性を記述できることに、起因する。

中性子星内核では、s-quarkから構成されるハイパー核が出現する可能性がこれまでに指摘されているが、この出現は理論と観測データとの整合性を難しくしている。この問題を考えるためには、 μ を軽クォーク化学ポテンシャル (μ_L) とストレンジクォーク化学ポテンシャル (μ_s) に分ける必要があり、ハイパー核出現がない場合とそうでない場合の二種類を考える必要がある。前者の場合は、軽化学ポテンシャル (μ_L) は有限に、ストレンジクォーク化学ポテンシャル (μ_s) はゼロになる。後者の場合では、 μ_L と μ_s の両方が有限になる。

本研究者は、以下の三つの領域に分けて、重要な結果を得た。

(1) T - μ_L 領域 (この時、 $\mu_s=0$ 、 $\mu_{\text{iso}}=0$)

- EPNJLモデルにベクトル型相互作用を付加して、符号問題がない $\mu_L=0$ 領域の格子QCDデータをより高温まで再現することに成功した。
- 上記の有効モデルを用いて、 T - μ_L 平面上のQCD相図を解明した。
- ベクトル型相互作用の強さは中性子星内核の状態変化に敏感である。このことを利用して、ベクトル型相互作用の強さを決定した。
- 中性子星内部にクォーク物質が存在するための条件を確定した。

(2) $T\text{-}\mu_L\text{-}\mu_{iso}$ を変数とする3次元領域 (この時、 $\mu_s=0$)

a) 従来の解析的方法 (QCD不等式) を用いて、領域(2)の定性的性質を明らかにした。

b) 上記の解析的方法を符号問題がない虚数 μ_{iso} 領域に適用し、パイオン凝縮がないことを証明した。

(3) $T\text{-}\mu_L\text{-}\mu_s$ を変数とする3次元領域 (この時、 $\mu_{iso}=0$)

a) QCD不等式を符号問題がない領域(3)に適用し、パイオン凝縮がないことを証明した。

b) μ_L と μ_s の何れかが固定された時、RW周期性が破れることを解析的に証明した。

これらの結果は、ハドロン・天体物理学の分野において価値ある業績と認められる。よって、本研究者は博士 (理学) の学位を受ける資格があるものと認める。