

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)

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

強い相互作用は自然界に存在する基本的な相互作用の一つであり、量子色力学(QCD)によって記述される。QCD のラグランジアンにはクォークおよびグルーオンが自由度として含まれ、クォーク間にはたらく強い相互作用はグルーオンによって媒介される。QCD は非可換ゲージ理論であるが故に漸近自由性を持ち、このため、クォークの取りうる状態は外部変数の増加・減少に伴って様々に変わることが予想されている。

中性子星内部においては高密度かつアイソスピン非対称度が非常に高い環境が実現しており、軽クォーク化学ポテンシャル(μ_1)のみならず、アイソスピン化学ポテンシャル(μ_{iso})やストレンジ(s)クォーク化学ポテンシャル(μ_s)も有限となる状況が発生する。よって、中性子星の内部構造を理解するにはこれら 3つの化学ポテンシャルが有限の場合におけるクォーク物質の性質を理解する必要がある。最も強力とされる理論的手法は、QCDの第一原理計算である格子 QCD 計算であるが、符号問題が起こる場合には実行が困難になる。そこで本研究では、符号問題が発生しない以下の 3つの領域(A), (B), (C)を考え、下記に示す研究成果を得た。

領域(A) 虚数軽クォーク化学ポテンシャル領域 (2 フレーバーQCD)

軽クォークである u, d クォークのみを含む 2 フレーバーQCD においては虚数 μ_1 領域での格子 QCD 計算の実行が盛んに行われており、実数 μ_1 領域に向かって解析接続することによって様々な結果が得られてきた。しかし、虚数領域では、この領域固有の性質である Roberge-Weiss 周期性や一次相転移(Roberge-Weiss 相転移)のために引き出せる実数領域の情報は低密度に限られてしまう。そこで、格子 QCD 計算の結果と整合する有効模型を構築し、その模型を用いて高密度領域を解析することを目指した。本研究では有効模型として entanglement Polyakov-loop extended Nambu-Jona-Lasinio (EPNJL)模型を用いた。

まず、 $\mu_1 = 0$ において、クォーク数密度に対する格子 QCD 計算の結果から、EPNJL 模型に含まれるクォーク間ベクトル相互作用の強さを決定した。こうして得られた EPNJL 模型とバリオンを記述する相対論的平均場理論を組み合わせていくつかの 2 相模型を構築し、QCD 相図を描いた。

最後に、中性子星内部にクォーク物質が存在すると仮定して 2 相模型による解析を行った。その結果、クォーク物質が存在するにはベクトル相互作用の強さに μ_1 依存性があることが重要であるが、中性子星観測データとの整合性まで考慮すると μ_1 依存性が相対論的平均場理論のパラメータの取り方にあまり依存しないことが示唆された。

領域(B) 虚数軽クォークかつ虚数 s クォーク化学ポテンシャル領域 (2+1 フレーバーQCD)

領域(A)と同様に、領域(B)においても μ_1 と μ_s を虚数化することで符号問題を避けることができる。近年、虚数領域における 2+1 フレーバー系の格子 QCD 計算が進んできており、個々の物理量の計算は行われている一方、相構造そのものに関する計算は存在していなかった。本研究では 2+1 フレーバーPolyakov-loop extended Nambu--Jona-Lasinio (PNJL) 模型を用いて相構造を描いた。

2 フレーバー系とは違い、2+1 フレーバー系では μ_s も独立変数として扱える。そこで 2 つの条件 (1) $\mu_1 = \mu_s$, (2) $\mu_1 \neq 0$ かつ $\mu_s = 0$ を考え、それぞれの場合で虚数領域において相構造を描くことで μ_s の役割を調べた。その結果、後者においては一次相転移が起こる虚数 μ_1 の値が 2 フレーバーの場合よりも大きくなることが分かった。これにより、物理量の解析性が保証される領域が広くなり、解析接続によってより高密度領域の情報が引き出せる可能性があることがわかった。さらに、 μ_1 と μ_s を独立に変化させ、一次相転移が完全になくなる条件を明らかにした。

領域(C) 虚数軽クォークかつ虚数アイソスピン化学ポテンシャル (1+1 フレーバーQCD)

虚数 μ_1 かつ実数 μ_{iso} 領域では符号問題が発生せずに格子 QCD 計算が実行可能であり、実数 μ_{iso} がパイオン質量よりも小さな領域においては計算が行なわれている。しかし、Son 氏と Stephanov 氏は QCD 不等式とカイラル摂動論を用いることで、実数 μ_{iso} がパイオン質量を超えると荷電パイオン凝縮が起こることを証明した。荷電パイオン凝縮相においては符号問題が強くなり、格子計算を実行できる領域は限られている。そこで、アイソスピン化学ポテンシャルの情報を含み、かつ符号問題・荷電パイオン凝縮が起こらない領域を探すのが重要となる。

境氏らは $\mu_1 = 0$ のとき、虚数 μ_{iso} 領域では符号問題に加えてパイオン凝縮も起こらないことを示し、虚数 μ_{iso} 領域が格子 QCD 計算の観点から好都合であることが示唆された。本研究では QCD から解析的に導出可能な QCD 不等式を用い、虚数 μ_1 が有限の場合にも境氏らの結果が正しいことを示した。これにより、虚数 μ_{iso} かつ虚数 μ_1 が有限の場合のクォーク物質の性質を格子計算から引き出せることが示唆された。