

## Approach to QCD phase diagram and quark-hadron transition by a crossover model

宮原, 昌久

<https://hdl.handle.net/2324/2236023>

---

出版情報 : 九州大学, 2018, 博士 (理学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :

氏 名 : 宮原昌久

論 文 名 : Approach to QCD phase diagram and quark-hadron transition by a crossover model  
(クロスオーバー模型による QCD 相図とクォーク・ハドロン転移へのアプローチ)

区 分 : 甲

## 論 文 内 容 の 要 旨

物質を構成する最小単位はクォークとグルーオンであると考えられている。クォークはハドロンに閉じ込められていると考えられており、実際、現在に至るまで単一で存在しているものは観測されていない。その一方で、宇宙初期のような高温状態、または、中性子星などの高密度天体の中心部のような高密度状態では、クォークはハドロンにとらわれることなく動ける状態になると考えられている。このようなクォーク状態とハドロン状態間の状態遷移をクォーク・ハドロン転移と呼ぶ。有限温度・有限密度において、物質がクォーク状態とハドロン状態のどちらにあるかを描いた図は量子色力学(QCD)相図と呼ばれる。QCD 相図を明らかにすることで、宇宙初期や高密度天体の中心部などの極限状態におけるクォークやハドロンの存在形態を解明できる。よって、QCD 相図の解明は宇宙、原子核、素粒子の分野にまたがって重要な課題と言える。しかし、QCD は低エネルギー領域で強い非摂動性を示すため、QCD 相図におけるクォーク・ハドロン転移線の位置は未解明である。

QCD 相図の解明に向けたアプローチとして、QCD の第一原理計算(lattice QCD ; LQCD)を用いた数値シミュレーションが盛んに行われている。近年の高精度な LQCD 計算によると、有限温度・低密度におけるクォーク・ハドロン転移は連続で滑らかな状態遷移(クロスオーバー)であることが示唆されている。二つの状態が明確に区分できる一次相転移とは異なり、クロスオーバーではハドロン状態とクォーク状態の中間状態が存在する。

また、クォーク・ハドロン転移に伴って、様々な現象(カイラル対称性・フレーバー対称性・ $\overline{U}_A(1)$

対称性などの回復、および、 $\overline{Z}_3$ 対称性の破れ)が同じ温度領域で起こると考えられている。過去の研究においては、これらの現象がクォークからハドロンへの状態遷移の指標とされてきた。しかしながら、上記の指標は物質の状態がクォークかハドロンかを直接的には取り扱っていない。物理量におけるハドロンまたはクォークの寄与の温度依存性を見ることで、クロスオーバーにおけるクォークとハドロン間の状態遷移を直接的に取り扱うことができる。LQCD 計算の結果はクォーク・ハドロン転移に伴う現象を全て含んでいるので、クォークの寄与とハドロンの寄与に区別することが困難である。

本研究では、クォーク状態とハドロン状態を陽に取り扱ったクォーク・ハドロン転移を基に QCD 相図を描くことを目指す。そこで我々は、ハドロン状態をよく記述する Hadron Resonance Gas (HRG) 模型とクォーク状態をよく記述する Independent Quark (IQ) 模型という 2 つの有効模型を組み合わせて、LQCD 計算の結果を再現する「Hadron quark crossover (HQC) 模型」を構築

し、クォーク状態とハドロン状態間の遷移を調べた。HQC 模型は物理量におけるクォーク状態とハドロン状態の寄与を容易に区分できる。

クォーク状態とハドロン状態の状態数の比からクォーク・ハドロン転移を定義し、その温度・密度依存性を解析した。クォーク・ハドロン転移とカイラル転移および $\sqrt{Z}$ 転移を比較し、カイラル転移と $\sqrt{Z}$ 転移はハドロン状態において起こることを示した。

QCD 相図を描くに当たって、HQC 模型の密度依存性を定義するためにバリオン数  $B$ 、アイソスピン数  $I$ 、超電荷数  $Y$  に対する感受率を計算した。この時、LQCD 計算を再現するように  $B$ 、 $I$ 、 $Y$  の密度依存性を定めた。計算結果から得られた  $B$ 、 $I$ 、 $Y$  の密度依存性をもとにフレーバーの感受率をアウトプットとして計算した。その結果は LQCD 計算の結果をよく再現し、さらにフレーバーの非対角感受率（異なるフレーバー間の相関）がハドロンの寄与のみで表せることがわかった。これは、フレーバーの非対角感受率の大きさがハドロン生存の度合いを示している。つまり、ハドロンの寄与を明確に分別することが難しい LQCD 計算においても、フレーバーの非対角感受率はクォーク・ハドロン転移の指標となることを明示した。

最後に、HQC 模型によって QCD 相図を描いた。この時、QCD 相図における密度について  $B$ 、 $I$ 、 $Y$  の数密度に対する結果を比較したとき、ある温度以上ではクォーク・ハドロン転移の  $B$ 、 $I$ 、 $Y$  依存性が同じであることが新たにわかった。このうち、 $B$ 、 $Y$  依存性の一致については正味のストレンジネスの消失によって理解される。 $I$  と  $B$ 、 $Y$  の依存性一致については原因が定かではなく、未発見の新たな対称性の回復と見なすことが出来る。

以上のように、本研究からクォーク・ハドロン転移に関して新たな見解を得られた。