

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)					
論文調査委員	主査	九州大学	職名	教授	氏名	肥山詠美子
	副査	九州大学	職名	教授	氏名	鈴木博
	副査	九州大学	職名	准教授	氏名	清水良文

論文審査の結果の要旨

原子核は、陽子や中性子（総称して核子）が、中間子によって伝達される核力によって結合してできている。しかし、バリオン（核子とその仲間の粒子）と中間子は基本的な粒子でなく、クォークや反クォークが結合してできた複合粒子である。クォークや反クォークは、通常の状態ではハドロン（バリオンと中間子の総称）の中に閉じ込められていて、単体で取り出すことができない。これをクォークの閉じ込めと呼ぶ。一方、クォークは核子の内部では自由で軽い質量の粒子のようにふるまっている。この自由な振る舞いは漸近的自由と呼ばれている。核子はクォーク 3 つよりなっているが、軽いクォークの質量を 3 倍しても、核子の質量に遠く及ばない。この問題は南部陽一郎によって提唱されたカイラル対称性の自発的破れという現象によって定性的に理解できる。

中間子が媒介する核力の基になるっているのはグルーオンによって媒介される強い相互作用であり、それは量子色力学（QCD）によって記述されると考えられている。上記の漸近自由は、低結合領域の現象であり、QCD に摂動論を適用することで説明がなされている。一方、クォークの閉じ込めやカイラル対称性の破れは、強結合領域の現象であり、QCD の摂動論を用いて説明する事ができない。近年、QCD を計算機上の格子空間上でシミュレーションすることで非摂動的計算を行う格子 QCD の計算手法が飛躍的發展を遂げて、これらの非摂動的現象が数値的に再現できるようになってきた。また、同様の手法で有限温度の統計力学的計算を行う事により、高温ではクォークの閉じ込めが破れて、多くの（軽い）クォークやグルーオンがプラズマ状態になるクォーク・グルーオン・プラズマ（QGP）の状態が出現する事がわかってきた。しかし、格子 QCD は計算コストが莫大であり、また、有限バリオン密度（粒子反粒子のアンバランスがある場合）では計算が困難になる事、物理的な解釈が容易でない事などの欠点がある。申請者は、これらの欠点を補うために、格子 QCD の数値計算結果を再現できる現象論的なモデルを構築し、それによってクォーク・ハドロン間の転移を詳しく分析した。

格子 QCD の計算結果は、低温状態では共鳴状態まで含めたハドロンのガス模型、ハドロン共鳴ガス模型（HRG）でかなりよく記述できる事が知られている。一方、高温においては、ポリヤコフグループという秩序パラメータを含むクォーク模型でうまく記述できる。申請者は、QCD の転移が（少

なくとも、零または低バリオン数密度では) 連続的なクロスオーバー転移である事と、エントロピーが系の自由度を反映している事に着目し、HRG とクォーク模型を補間出来る現象論的模型を構築した。この模型にはいくつかの未定パラメータが含まれるが、申請者は、それらを零バリオン密度における 2+1 フレーバーの格子 QCD 計算によるエントロピー計算結果やバリオン感受率等の計算結果を再現するように決定した。

格子 QCD の計算では、ある定まった温度でどの程度のハドロンが QGP に変化したか決定する事ができない。しかし、申請者の構築した現象論模型では、各温度で両者の混合比率を決定する事ができ、混合比率がそれぞれ 50 パーセントとなる点をハドロンからクォークへの転移点と考える事ができる。申請者は転移点の温度が 200MeV を超え、格子 QCD 計算で知られるカイラル対称性の回復温度よりかなり高い事を見出した。この事は、カイラル対称性の回復が、ハドロン相が支配的な状態で既に起こっている事を示しており、重要な結果である。つまり、温度が上がった時に、カイラル対称性の回復の転移は、閉じ込め・非閉じ込めの転移より早く起こるのである。従来、カイラル対称性の回復はクォーク模型単体で議論・説明されてきた事を考えると、この結果は非常に意味深い。

申請者の構築した模型は、格子 QCD の計算が難しくなる有限バリオン密度にも適用できる。申請者は、上記のような解析を有限バリオン (B) 密度や有限アイソスピン (I) 密度、有限ハイパーチャージ (Y) 密度に適用し、ハドロン・クォーク転移温度を求め、それらの領域での相図を作成した。その結果、異なる物理的状況に関する転移温度であるのにも関わらず、低密度ではそれらはほとんど一致する事を見出した。申請者はこの現象を **BIY approximate equivalence** と名付けた。さらに、申請者は、この模型を 2+1+1 フレーバーの場合に拡張し、新たなパラメータ・フィットをせずに、2+1 フレーバーの時に決定されたパラメータのみを使用しても、u、d、s のクォーク・セクターに関する格子 QCD の計算値はよく再現できる事を示した。この事は新たに付け加えた重いチャーム・クォークは軽い 3 つのクォークのクォーク・ハドロン転移には影響しない事を意味しており、これもまた重要な結果である。

以上の結果は、原子核物理学 (ハドロン物理学) 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。