

氏名	はっ た よし たか 八 田 佳 孝
学位の種類	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2749 号
学位授与の日付	平 成 16 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学位論文題目	The QCD phase transition at finite temperature and density (有限温度, 有限密度における QCD 相転移)

論文調査委員 (主査) 教授 国 広 悌 二 教授 中 村 卓 史 助教授 浅 川 正 之

### 論 文 内 容 の 要 旨

強い相互作用を記述する量子色力学 (QCD) は高温, 高密度で多様な相構造を持つことが理論的に予言されている。この「物質の新しい状態」を探るためにアメリカのブルックヘブン国立研究所で RHIC と呼ばれる加速器による超高エネルギー重イオン衝突実験が今日行われており, 近い将来ヨーロッパ原子核研究センター (CERN) でもさらにエネルギーの高い実験が行われる予定である。ここでの基本的な理論的課題は, 様々な環境下における QCD の与える相図と相転移の性質を明らかにすること, また高エネルギー重イオン衝突実験や有限温度, 有限密度での格子 QCD シミュレーションの結果を理解し, 相転移やその臨界現象を検証するための観測量を提案することである。申請者は, 申請論文において「有限温度, 有限密度における QCD 相転移」というテーマで, 場の量子論と統計力学, 多体問題などの解析的な手法, 特に, 相転移の臨界現象の普遍性 (ユニバーサリティ) の議論を用いて上記の基本的課題の総合的な解明を目指した。

(1) 有限温度, 密度において QCD の示す相転移としては「カイラル相転移」と「非閉じ込め相転移」の 2 種類が存在すると考えられてきた。格子 QCD による最近の精密な数値実験により, 両相転移の臨界温度がほぼ一致することが示され, また, それらのクォークの質量  $m$  への特異な依存性も明らかにされつつある。申請論文では, この興味深い「実験」結果をカイラル相転移の秩序変数と非閉じ込め相転移の秩序変数との混合を考慮に入れるというアイデアと相転移の基礎理論に基き理論的に説明する説得力あるシナリオを初めて与え, 現実的なクォーク質量における QCD 相転移が実はただ一つの相転移であるという強い示唆を与えた。また, そのシナリオと描像を検証するための数値シミュレーションで計算すべき量を提案した。

(2) 温度  $T$  とバリオン化学ポテンシャル  $\mu$  を両軸とする  $(T, \mu)$  平面内で描かれた QCD 相転移の相図において, ハドロン相と非閉じ込め相転移後のクォーク・グルオン相を隔てる 1 次相転移線の終点  $E(T_c, \mu_c)$  は QCD 臨界点と呼ばれる。そこでは揺らぎが異常に大きくなることが予想されるので, 有限温度, 有限密度 QCD の相図を実験的に探究する上で非常に重要な役割を果たすと考えられる。申請者は申請論文 (公表論文 1 にもとづく) で, クォークの質量  $m$  をパラメータ空間に加えた 3 次元  $(T, \mu, m)$  空間の中で QCD の相図を考察し,  $m$  がゼロの場合の「カイラル極限」で相転移の臨界点が三重臨界点になり, そこでは平均場近似がよく成立している, という事実に着目した。有限の  $m$  の場合の一般的な場に対しては, 相転移の臨界現象の「普遍性」の議論を適用し, 種々の感受率の振る舞いを系統的に議論した。特に, クォーク数感受率の特異性を与える臨界指数の値が三重臨界点の影響を受けてある特別な値になり得ることを明らかにした。さらに, このことは QCD から出発したモデル計算の結果と整合的であることを示した。

(3) 次に, 超高エネルギー重イオン衝突実験での興味ある観測量について, 申請者は申請論文において次のような興味ある考察を行った (公表論文 2)。QCD 臨界点において電荷揺らぎが発散することを示し, その発散が臨界点近傍での陽子数揺らぎの単調増加として実験的に見えるだろうという予想を行い, その揺らぎの定量的な評価を与えた。陽子数は保存量ではないために, その揺らぎはこれまで理論的にも実験的にも研究されていなかったが, 申請者は, QCD 相転移の秩序変

数であるシグマ中間子場の揺らぎが陽子、中性子に同等に結合するという性質に注目し、陽子数揺らぎを測定することは今の場合物理的に意味があるということを初めて説得的に主張した。

このように申請者は申請論文において、極限環境下におけるQCD相転移の本質とその臨界現象の特質を明らかにし、高エネルギー重イオン衝突実験でそれらを検証するための興味ある新たな観測量を提案した。

### 論文審査の結果の要旨

高温、高密度あるいは強磁場下など外部環境の変化に伴うQCD（量子色力学）真空の様々の相転移あるいはそれらの前駆現象や臨界現象を検証するという課題は現在、ハドロン-原子核の階層の物理学の中心的なテーマになっている。この分野の理論的な基礎的課題は、様々な環境下で相構造を解明し、相図を理論的に確定すること、次に、それらの研究を基に、高エネルギー重イオン衝突実験や計算機上での実験とも言える格子QCDシミュレーションでの興味有る測定量は何かを明らかにし、得られた実験結果や数値結果の解釈を与えることである。申請論文は、申請者のこれまでのこれらの基本課題のほとんどすべてに関わる研究をごく最近のオリジナルな寄与を加えて総合的に解説したものである。

最近の精密な格子QCDによる数値実験により、QCDのカイラル相転移と非閉じ込め相転移というアприオリには異なる二種の相転移の間に非自明な相関があることが明らかになっている。すなわち、両相転移の臨界温度がほぼ正確に一致し、またクォークの質量 $m$ への特異な依存性を持っている。申請論文では、このまったく非自明な「実験」事実を両相転移の秩序変数の混合というアイデアと相転移の統計力学の基礎的理論を結びつけて説得的に説明するシナリオを初めて与えている。また、同時に、現実的なクォーク質量におけるQCD相転移は、実はただ一つの秩序変数で記述される相転移であるということも強く示唆している。そして、格子QCDによる数値シミュレーションにより、ここで提案されたシナリオと描像を検証することができることが注意されている。

QCDの有効模型や格子QCDのシミュレーションは温度 $T$ とバリオン化学ポテンシャル $\mu$ を両軸とする $(T, \mu)$ 平面の相図においてハドロン相とクォーク・グルオン相を隔てる1次相転移線の終点 $E(T_c, \mu_c)$ が存在することを示している。この点はQCD臨界点と呼ばれる。そこではバリオン密度やスカラー密度の揺らぎが異常に大きくなると予想されるので、臨界点付近の物質は有限温度・密度QCDの相図を実験的に探究する上で大きな興味の的となっている。申請論文では、クォークの質量 $m$ を新たに加えた3次元の $(T, \mu, m)$ 空間の中でQCDの相図を体系的に考察し、この課題への独創的な貢献を行っている。まず、 $m=0$ の場合の「カイラル極限」で臨界点が特別な性質を持つ三重臨界点になるという事実に注目している。そこでは平均場近似がよく成立し、相転移のランダウ理論が妥当である。有限の $m$ の場合の一般的な場合に対しては、三重臨界点からの「ずれ」として理解可能かどうかを考察し、クォーク数感受率の特異性を与える臨界指数の値が三重臨界点の影響を受けてある特別な値になり得ることを明らかにしている。さらに、このことはQCDから出発したモデル計算の結果と整合的であることを示した。

超高エネルギー重イオン衝突実験での興味ある観測量についても、申請者は申請論文（公表論文2）において次のようなオリジナルな研究を行っている。まず、QCD臨界点において電荷揺らぎが発散すること、また、保存量ではない陽子数の揺らぎが物理的に有意な情報を与えることを、QCD相転移の秩序変数であるシグマ中間子場の特異な性質に基づいて説得的に示している。さらに、定量的な計算に基づき、臨界点近傍での電荷の揺らぎの発散が陽子数揺らぎの単調増加として実験的に観測されるという予想を行っている。興味深いことに、全電荷数の揺らぎが高密度領域に近づくと増大することは高エネルギー重イオン衝突の実験で観測されており、しかも、その原因はさまざま考えられているが未だに定説には至っていない。申請論文はその原因が臨界点への接近であることを示唆しており、今後のより詳細なデータ解析が望まれている。

このように、本申請論文で報告された研究は、有限温度、有限密度におけるQCD相転移とそれに関連する諸問題についてのオリジナルで基本的な研究であり、この学問分野への重要な貢献である。よって、本申請論文は博士（理学）の学位論文として価値のあるものと認める。

主論文および参考論文に報告されている研究業績を中心として、これに関連した研究分野について口頭試問した結果、合格と認めた。