

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：16401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740166

研究課題名(和文) 強相関量子多体系における輸送現象の理論的研究

研究課題名(英文) Theoretical study on transport phenomena in strongly correlated systems

研究代表者

仲野 英司 (Nakano, Eiji)

高知大学・教育研究部自然科学系・講師

研究者番号：70582477

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,400,000円、(間接経費) 420,000円

研究成果の概要(和文)：有限密度・温度におけるQCDやユニタリティ近傍における冷却原子多体系などの強く相関する系の輸送現象を非摂動的に定式化する方法の開発を行った。低エネルギー及び長波長極限の非平衡状態を特徴づける輸送係数を評価するために、微視的な自由度から出発するより一般的な方法として汎関数繰り込み群の方法を適用した。また、相補的な手法として対称性を基にした有効理論を用いて、カイラル凝縮やボーズ凝縮の相転移近傍における輸送係数の評価を試みた。主に自発的対称性の破れを示す相で有効な定式化を行ったが、有効な低エネルギー自由度が繰り込み群において自動的に生成されることを確かめるに至らず、いくつかの課題が残った。

研究成果の概要(英文)： We have attempted to construct a non-perturbative formula for description of transport phenomena in strongly correlated systems, such as finite-temperature and -density QCD and many-body systems of cold atoms around the unitary limit. Transport coefficients, which characterize non-equilibrium state at low energy and long wave-length limit of the systems, are evaluated by the Functional renormalization group method, in which we can start from microscopic Lagrangian and integrate out high energy modes to get low energy effective theories. Also, as a complementary method, we have employed effective field theories on basis of symmetries and their spontaneous breaking.

In formulation for spontaneous symmetry breaking phases, we are left with some problems, e.g., to see if the renormalization group method automatically produces effective degrees of freedom at low energies.

研究分野：物性物理 核理論

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：輸送現象 強相関系 カイラル相転移 ボーズ・アインシュタイン凝縮

1. 研究開始当初の背景

気相や液相といった水の相図と同じように、ハドロン物質にも相図(QCD相図)がある。ハドロンとは、核子や中間子などの強い相互作用をする粒子であり、我々の物質世界を形成している。温度や密度などの熱力学的パラメタを非常に大きくしたときハドロン物質にどのような相が現れるかを探索する研究が現在、理論的、及び実験的に進められている。実験では、米国ブルックヘブン国立研究所において2000年から相対論的重イオン衝突実験が行われた。この実験では、重イオン同士を核子あたり約200 GeVの高エネルギーで衝突させ、その中心部に高温(約200 MeV以上)のクォークとグルオンのプラズマ状態(QGP)を生成する。クォークとグルオンは、ハドロンを形成する微視的自由度である。欧州原子核研究機構においても更に衝突エネルギーを高めた同様の実験が計画されている。また、ドイツの重イオン科学研究所においても高密度領域に重点を置いた衝突実験(FAIR/CBM)が計画されている。これらの実験において生成された高温のプラズマ(QGP)は、膨張冷却しながら熱平衡化に向かい、ハドロン相へと非平衡状態を経由して相転移すると予想されている。この一連の非平衡過程の後半において系が平衡状態から僅かにずれた状態であるならば、その動的振舞いは輸送係数によって決定される。例えば、熱伝導度やずり粘性などである。輸送係数は一般に相転移近傍において特異な振舞いを示すので、実験において観測されるハドロンのエネルギー・運動量分布などから相転移の情報を引き出せる可能性がある。

以上は、大型加速器を用いた実験との関連であるが、最近発展している冷却原子の多体系を用いた実験においても相転移と輸送係数の関係が研究されている。冷却原子多体系は、多数のアルカリ原子などを、レーザーを用いてトラップ及び冷却したもので、更に外部磁場を調節することによって粒子間相互作用を変化させることが出来る。特に2体束縛状態が現れる程に引力相互作用を大きくした系(ユニタリティ極限)の研究が注目を集めており、輸送係数をはじめ種々の物理量の変化が理論的、実験的に研究されている。

このような実験で得られるデータから輸送係数などを通して系の相構造をある程度探ることができる。しかし、輸送係数を温度や密度などの熱力学的パラメタの関数として理論的に評価することは、その非摂動性によって一般に困難である。系の相互作用が小さい場合でも通常の摂動論が破綻し、摂動の

最低次を得るためにある種の再加算法などの手法が必要となる。

2. 研究の目的

本研究では、強い多体相関を示す系における輸送現象を記述するための非摂動的な定式化を行う。特に、相転移やクロスオーバー、束縛状態形成による自由度の変化をとともなう系における輸送係数を、有効理論や繰り込み群の手法を用いて定性的かつ定量的に評価する枠組みを構築する。また、対称性に基づく有効理論を用いた結果との比較検討を行う。得られた定式化を適用し、主に以下の課題に取り組む：

- (1) 有限密度・温度QCDにおける相転移(カイラル及び閉じ込め非閉じ込め転移)近傍での輸送係数の振る舞いの解明
- (2) 冷却アルカリ原子多体系におけるユニタリ極限近傍(クロスオーバー)での相図及び輸送係数の評価

実験において蓄積されたデータから、ハドロン物質の相構造を探る試みが盛んに行われているが、ここで重要なのは、相境界の情報をいかにして抽出するかである。実験系は時間発展しており、QGPからハドロン相への相転移のシグナルを観測量において評価するには、相転移近傍における動力学を有効に扱う理論を用いなければならない。解析を行うための理論的な道具の一つとして、相対論的流体方程式が用いられている。これは衝突の初期状態において系がほぼ熱平衡化し、後の過程は流体的/集団的運動として良く記述できると考えられるからである。流体方程式は、エネルギー・運動量など、系の保存量の局所的な時空間発展を記述する。ただし、流体方程式には、幾つかの重要なパラメタがある：①状態方程式と②輸送係数である。①はエネルギーと圧力の関係であり、相転移に対する熱力学的情報を含む。②は粘性や熱伝導度などの系の動的な性質を表す。両方とも温度や密度などの熱力学的パラメタの関数であり、系によってその振る舞いは異なる。これらのパラメタは、原理的に微視的立場から求めることが出来る。本研究では、特に輸送係数を相図の全域において定性的かつ定量的に求めることを目的とする。

一方、磁気トラップされた原子気体のレーザー冷却技術の発展により、アルカリ原子のボーズ・アインシュタイン凝縮やフェルミ縮退が実験室で実現できるようになった。この

系の特徴は、トラップ形状を自在に変えられることと、外部磁場によってフェッシュバッバ共鳴を調整し原子間相互作用の大きさを、引力と斥力を問わず、自在に変化させられることにある。これらの発展により、近年、フェルミ原子多体系におけるBCS-BECクロスオーバー、エフィモフ状態、ボソン・フェルミオン混合系などが実験室で実現されるようになった。特に、2体束縛状態が形成し始める点は、ユニタリー極限と呼ばれる。この極限は、相転移の臨界点と同様のスケール不変性を示し、物理量に系の詳細に依存しない普遍性が見られる。これらの系は、また、強結合であることや、束縛状態の形成など、QCDにおける相転移との類似性も指摘されている。本研究では、特にボソン・フェルミオン混合多体系のユニタリー極限近傍における相図を明らかにし、輸送係数の振る舞いを理論的に評価する。相構造や束縛状態形成など系の状態の変化が輸送係数に与える影響やメカニズムを明らかにする。

3. 研究の方法

各種運動モードの実時間相関関数に関する生成汎関数（経路積分表示）に対して、汎関数繰りこみ群（FRG）の処方を用い、その運動方程式に対する非摂動的なフロー方程式を導出する。この定式化を具体的な物理系に適用する。その際、フロー方程式を解くために幾つかの実践的な近似法を施すと同時に、系の対称性に基づく要請との整合性を図る。フロー方程式を通して相関関数の満たす運動方程式を解くことで、相転移やクロスオーバー近傍における各運動モードに対応する輸送係数の振る舞いを解析的・数値的に評価する。QCDの閉じ込め非閉じ込め相転移及びカイラル相転移に対する有効理論に適用する。大きな散乱長を考慮した種々の冷却原子多体系に対する低エネルギー有効理論に適用する。

- (1) 本研究では、系がわずかに平衡からずれた非平衡状態を扱うので、輸送係数を求める前にまず平衡状態の相図を求める必要がある。QCDの相構造は、温度と密度の異なる領域において様々な相を示すので、これまでの研究で得られている知見をもとに有効ポテンシャルを導入する。
- (2) 輸送係数は、通常関連する運動モードの実時間相関関数の低エネルギー・運動量リミットで与えられる。流体方程式が記述する運動モード（保存量）であるから、

例えば、エネルギー・運動量テンソルの自己相関関数は粘性係数、カレントのそれは伝導度など、各種の輸送係数を与える。それらの生成汎関数に対して厳密な非摂動的フロー方程式を導く。一方、相転移やクロスオーバーの情報は、秩序変数やそれと結合するモードに対する有効ポテンシャルが内包している。経路積分表示から出発することで、有効ポテンシャルを自然に運動方程式に取り入れる。

- (3) フロー方程式に近似法を施すことで実践的に閉じた形にしなければならない。本研究では、以下の2つ方法を適用する：

- ① 1つ目はローカル・ポテンシャル・近似を用いる。これは通常、生成汎関数からルジャンドル変換して得られる有効作用を評価する際に用いられるもので、任意のN点関数を微分展開の最低次までで評価する。低エネルギー極限で定義される輸送係数の評価と相性が良い。
- ② 他の方法は、相関関数の方程式が持つ無限の階層を有限個で打ち切り、フロー方程式を閉じるというものである。ただし、高次の相関関数を完全に無視している訳ではなく、それらが低次の相関関数の汎関数微分で与えられる。また、打ち切る階層への依存性（収束性）を調べる。

4. 研究成果

本研究では、QGP-ハドロン相転移やアルカリ原子多体系などの強相関多体系の相図とそこにおける輸送係数を評価するための一般的な定式化を試みた。また、その具体的な応用と比較を行うために、これまで理論的に予想されてきた様々な相における低エネルギー有効理論を構築した。

- (1) 本研究では、従来の通常相における定式化を対称性が自発的に破れた相に一般化することを試みた。一般に繰り込み群によって種々の相関関数を評価するには、形式的なフロー方程式に対して実践的な近似法を見つけることが必要である。このとき、系の持つ対称性が近似においても保たれる必要がある。これは輸送係数の評価に必要な低エネルギーモードが主に対称性由来する保存モードによって構成されるからである。これ

に加えて、対称性が自発的に破れた相では、破れた対称性に伴う南部・ゴールドストーンモードが出現する。これはエネルギーギャップのない低エネルギーで有効な自由度なので、輸送係数を含め種々の物理量の評価において系統的に取り入れる必要がある。これらの自由度は汎関数繰り込み群においても自動的に取り入れられるはずであるが、近似を施した後の低エネルギーモードにおいてこれらの有効自由度が出現することを一般的に確認することが出来なかった。そこで、従来の対称性に基づく有効理論の方法を用いて、種々の相における南部・ゴールドストーンモードに対する有効理論の構築を試みた。この分野は最近一般的な記述に向けての理論的な発展が成されており、それらの成果を取り入れながら分散関係の決定やモード間の縮退がどのような機構で起こるかを理解し、繰り込み群の方法に組み込む方法を模索した。その結果、研究計画において想定していた方法では明確に有効自由度を同定することが難しく、新たな方法が必要であることが解った。

- (2) 本研究では、ボソン・フェルミオン原子気体混合系における相図を調べた。特にボソンとフェルミオン間の相互作用が引力の場合を扱った。この系はQCD相図との類似点においても注目されている。まず、ユニタリティ近傍を含む散乱長と温度に対する相図を得るために、ボソン・フェルミオン対の揺らぎを取り入れたT行列を評価し、それに用いて系統的にボソンに対するボーズ・アインシュタイン凝縮温度を散乱長の関数として求めた。同時に、ボソンの密度揺らぎによる不安定性も考慮に入れた。ただ、繰り込み群に適用するには、ユニタリティ近傍において出現するボソン・フェルミオンの束縛状態を自動的に導入できる近似法の開発が出来ず、今後の課題となった。
- (3) QCD-ハドロン相図において、低温・超高密度領域はこれまでの研究からある種の超伝導相であることが理論的に予想されている。この相は、中性子星パルサーなどのコンパクト星内部の構造とも密接に関係している。このような系は回転系であり、超伝導相に対しては特殊な渦糸を生成する。本研究では、この渦糸多体系（渦糸格子系）における輸送的性質を理解するために、まず、系の低エネルギー有効理論を構築した。
- (4) QCD-ハドロン相図における中間的な密度領域は、これまでに様々な相が想定されており、結論が出ていない。我々は

以前その一つの候補としてカイラル凝縮が空間的に非一様に広がった相を提案した。現在、同様の非一様相が様々なシナリオの基に再び提案されている。本研究では、これらの相における有効理論を構築した。そこでは、内部対称性であるカイラル対称性と空間並進対称性が同時に破れている。このような系では、南部・ゴールドストーンモードの分散関係が空間非等方になり、ソフトな方法が現れる。このソフトモードが低エネルギー領域において有限温度不安定性や冪相関などの異常効果をもたらすことが解った。しかし、このような系を記述するには、非一様性のために高次微分項が必要であり、汎関数繰り込み群を適用するには、従来のローカル・ポテンシャル近似では困難であることが解った。この解決には一通りの解決方法を得たが、本質的に新しい近似法を一般的に再構築する必要があり、今後の課題とした。

以上の成果は論文としてまとめている。本研究期間内に解決できなかった問題が多くあったが、これは今後の研究の指針としたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

著者 D. MOMENI, EIJI NAKANO, M. R. SETARE, and WEN-YU WEN, 題名「ANALYTICAL STUDY OF CRITICAL MAGNETIC FIELD IN A HOLOGRAPHIC SUPERCONDUCTOR」, 雑誌名 International Journal of Modern Physics A, 査読有り, 28 2013年 1350024-1 -10

[学会発表] (計 3 件)

- ① 仲野英司, 小林未知数, 新田宗土, 「非アーベル型渦糸格子におけるカラー強磁性」, 日本物理学会第69回年次大会, 2014年3月27日(木) ~ 2014年3月30日(日) 東海大学湘南キャンパス
- ② 白崎恭子, 仲野英司, 「ボソン・フェルミオン混合多体系の強結合領域におけるボーズ・アインシュタイン凝縮」, 日本物理学会第68回年次大会, 2013年03月26日~2013年03月29日, 広島大学東広島キャンパス
- ③ 仲野英司, 李東奎, 津江保彦, 「非一様相における有効理論」, 素粒子論グループ四国セミナー, 2012年12月15日~2012

年 12 月 16 日，高知大学理学部朝倉キャンパス

〔図書〕（計 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

仲野 英司 (NAKANO EIJI)
高知大学・教育研究部自然科学系・講師
研究者番号：70582477

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

Bengt Friman 博士,
GSI(独)・Theory division・Professor