

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	冷却フェルミ気体の輸送的性質の理論研究
Title(English)	Transport Properties of Resonant Fermi Gases
著者(和文)	藤井啓資
Author(English)	Keisuke Fujii
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11878号, 授与年月日:2021年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:西田 祐介,笹本 智弘,古賀 昌久,石塚 大晃,上妻 幹旺
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11878号, Conferred date:2021/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

(博士課程)

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	藤井 啓資		
論文審査 審査員		氏名	職名		氏名	職名
	主査	西田 祐介	准教授		上妻 幹旺	教授
	審査員	笹本 智弘	教授	審査員		
		古賀 昌久	准教授			
石塚 大晃		准教授				

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「Transport Properties of Resonant Fermi Gases」と題され、共鳴的に相互作用するフェルミ気体（以下、共鳴フェルミ気体）の輸送係数に現れる普遍的な性質を理論的に解明することを目的としており、6章と付録から構成されている。

第1章「Introduction」では、本論文の背景となる基礎的事項について述べている。まず、共鳴フェルミ気体がフェッシュバハ共鳴を用いて冷却原子実験において実現されることを述べた後、共鳴フェルミ気体が微視的な詳細に依らない普遍的な性質を示すことを述べている。特に、共鳴フェルミ気体の熱力学的性質においてコンタクトと呼ばれる物理量が重要な役割をすることを述べ、輸送的性質に関しては、散乱長が発散するユニタリー極限では共形不変性のため体積粘性がゼロとなり、また、強相関性から剪断粘性が小さくなることを述べている。最後に本論文の目的と構成について概観している。

第2章「Review for transport of resonant Fermi gases」では、共鳴フェルミ気体の輸送的性質についての前提事項についてレビューしている。まず、量子力学的二体問題から散乱長を導入し、散乱長によって特徴付けられる共鳴フェルミ気体の普遍的性質が接触型相互作用によって記述できることを解説している。次に、体積粘性、剪断粘性、熱伝導率といった輸送係数を微視的な理論から求めるための久保公式を導出するとともに、希薄気体の輸送を記述するボルツマン方程式の一般的な性質や輸送係数の計算方法を解説している。

第3章「Hydrodynamics with spacetime-dependent scattering length」では、時空に依存する散乱長を持つ共鳴フェルミ気体を考え、その流体力学についての研究成果を報告している。まず、散乱長が時空に依存する場合に、質量、運動量、エネルギーに関する連続の方程式など種々の恒等式を導出している。これらの恒等式と散乱長の変分を含む熱力学関係式を用いてエントロピー増大の法則を課すことで、散乱長の時空に関する微分が体積粘性を伴ってストレステンソルやコンタクト密度に現れることを示している。さらに熱力学関係式を用いることで、散乱長が時空に依存することによるエネルギー密度やエントロピー密度の増加率が体積粘性に比例することを示し、これらの結果は冷却原子実験において体積粘性の測定に利用できることを指摘している。

第4章「Bulk viscosity in the quantum virial expansion」では、量子ビリアル展開を用いた共鳴フェルミ気体の体積粘性についての研究成果をレビュー部分も含めて報告している。まず、高温領域ではフガシティが小さくなるため、フガシティによる展開（量子ビリアル展開）が有効になることを述べ、この量子ビリアル展開を熱力学量に適用した結果について解説している。次に、体積粘性の久保公式がコンタクト同士の相関関数に書き換えられることを述べ、この相関関数に量子ビリアル展開を適用した結果についてレビューしている。こうして得られた共鳴フェルミ気体の体積粘性は、ボルツマン方程式から計算された体積粘性と一致しないが、それはボルツマン方程式において仮定されている準粒子近似が成り立たないことに原因があると結論している。

第5章「Shear viscosity and thermal conductivity in the quantum virial expansion」では、量子ビリアル展開を用いた共鳴フェルミ気体の剪断粘性と熱伝導率についての研究成果を報告している。まず、高温領域を含む弱結合領域では、久保公式を評価する際にピンチ特異性が現れ、単純な展開が破綻すること、従って、再総和が必要となることを指摘している。次に、高温領域においてフガシティの最低次に寄与する項を再総和するために、頂点関数に関する自己無撞着方程式を導出した上で、この方程式が線形化したボルツマン方程式に帰着することを示している。最後に、線形化したボルツマン方程式を解くことで、高温領域における共鳴フェルミ気体の剪断粘性と熱伝導率を散乱長の

関数として求めている。また、剪断粘性 η と熱伝導率 κ の比で与えられるプラントル数が緩和時間近似のもとでの一定値から外れ、散乱長に依存して変化することを指摘している。

第6章「Summary and prospects」では、共鳴フェルミ気体の輸送的性質に現れる普遍性を理解するために、体積粘性、剪断粘性、熱伝導率といった輸送係数に焦点を当てて研究を行ったことを述べ、これまでの各章で得られた主要な研究成果についてまとめている。また、今後の研究の方向性について複数述べるとともに、共鳴フェルミ気体の普遍性により、本論文の成果が中性子星内部の希薄核物質など強相関フェルミ系の理解に幅広く役立つことへの期待も述べている。

最後に付録では、共鳴フェルミ気体の対称性、共形不変性に基づく流体力学の構築、剪断粘性と熱伝導率の久保公式の導出、三点相関関数のスペクトル表示の導出、など本論文に関連する補足的事項について解説している。

以上のように、本論文は、共鳴フェルミ気体の輸送的性質について流体力学から種々の輸送係数まで、多面的かつ包括的に解明したものである。ここで明らかにされた普遍的性質は、今後の冷却原子系における研究の発展に大いに資するだけでなく、他分野における類似の系にも適用できる可能性もあり、その学術的価値は高く評価できる。従って、本論文は博士（理学）の学位論文として十分に価値があるものと認められる。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。