

学位論文 博士（理学）

極低温 Fermi 原子気体における  
ずり粘性率の理論研究

2020 年度

慶應義塾大学大学院理工学研究科

鏡原大地

報告番号	○甲乙第	号	氏名	鏡原 大地
主論文題名： 極低温 Fermi 原子気体におけるずり粘性率の理論研究				
(内容の要旨)				
<p>本論文では、極低温 Fermi 原子気体の正常相におけるずり粘性率 <math>\eta</math> を理論的に研究し、可変な引力相互作用で制御された対形成揺らぎがこの物理量に与える影響を、Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS)–Bose-Einstein Condensation (BEC) クロスオーバー領域で明らかにする。また、この系のエントロピー密度 <math>s</math> を計算、<math>\eta/s</math> が <math>\hbar/(4\pi k_B)</math> を下回らないとする Kovtun、Son、Starinets らの予想 (KSS 予想) を、この系に対し検証する。</p> <p>第 1 章で当該研究分野を概観、研究の動機を述べた後、定式化の説明を第 2 章で行う。ずり粘性率 <math>\eta</math> について、先ず、対形成揺らぎの効果を自己無撞着 <math>T</math> 行列近似 (SCTMA) で考慮し 1 粒子温度 Green 関数中の自己エネルギーを評価、次に、これを用い <math>\eta</math> の計算に必要な相関関数を計算し、最後にそれを解析接続する、という手順で求めることを説明する。この時、運動量保存則を満たすよう相関関数と自己エネルギーが選ばれていることを強調する。更に、解析接続を数値的に実行する手法についても述べる。また、エントロピー密度 <math>s</math> について、同じ SCTMA の枠組みで、内部エネルギーや圧力、コンタクトを計算することで評価できることを説明する。</p> <p>第 3 章では、前章で説明した強結合理論を用い、BCS-BEC クロスオーバー領域における <math>\eta</math> の温度依存性、および、相互作用依存性を明らかにする。弱結合領域では、高温領域から温度を下げていくと <math>\eta</math> は最初減少するが、Fermi 縮退領域に入ると Pauli ブロッキングにより増大、超流動転移温度近傍で超流動揺らぎの影響により再び減少することを示す。また、低温に向かっている <math>\eta</math> の増大は強結合 BEC 領域でも見られるが、この場合の原因は 2 体束縛状態の形成であることを指摘する。</p> <p>第 4 章では、ずり粘性率とエントロピー密度の比 <math>\eta/s</math> を議論する。BCS-BEC クロスオーバー領域でこの値を評価した結果、ユニタリ極限より少し強結合側で最小となり、その値は KSS 予想の下限値の約 4.5 倍であることを示す。また、対形成に関与する 2 種類の Fermi 原子の質量が異なる場合についても研究、<math>\eta/s</math> の最小値やそれが得られる相互作用強度は、質量比にほとんど依存しないことを明らかにする。更に、Fermi 原子気体では、Pauli の排他律と 2 体束縛状態の形成という 2 つの量子力学的効果が、<math>\eta/s</math> の最小値を得るうえで重要であることを指摘する。</p> <p>第 5 章で、本論文のまとめと今後の展望を述べる。</p>				

Thesis Abstract

No. \_\_\_\_\_

Registration Number	<input checked="" type="checkbox"/> "KOU" <input type="checkbox"/> "OTSU" No. _____ *Office use only	Name	Daichi Kagamihara
Thesis Title			
Theoretical study on shear viscosity in ultracold Fermi gases			
Thesis Summary			
<p>In this thesis, I theoretically investigate the shear viscosity <math>\eta</math> in the normal state of an ultracold Fermi gas, to clarify how strong pairing fluctuations associated with a tunable pairing interaction affect this quantity in the Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS)–Bose-Einstein Condensation (BEC) crossover region. Evaluating the entropy density <math>s</math>, I assess the conjecture by Kovtun, Son, and Starinets (KSS), stating that the ratio <math>\eta/s</math> is lower-bounded as <math>\eta/s \geq \hbar/(4\pi k_B)</math>.</p> <p>After overviewing cold Fermi gas physics and presenting the motivation of my work in Chap. 1, I present the theoretical framework used in this thesis in Chap. 2. Including pairing fluctuations within the self-consistent <math>T</math>-matrix approximation (SCTMA), I evaluate the self-energy corrections involved in the single-particle thermal Green's function. Using this dressed Green's function, I construct the shear-stress response function, to obtain the shear viscosity <math>\eta</math> by executing the analytic continuation of this response function. The entropy density <math>s</math> is obtained from the calculated internal energy, pressure, as well as the Tan's contact, in SCTMA.</p> <p>In Chap. 3, using the strong-coupling theory presented in Chap. 2, I clarify the behavior of <math>\eta</math> in the BCS-BEC crossover region. In the weak-coupling BCS regime, it is shown that, while <math>\eta</math> decreases with decreasing the temperature in the high-temperature classical regime, it exhibits upturn behavior in the Fermi degenerate regime due to the Pauli blocking; however, it again decreases near the superfluid phase transition temperature, reflecting the enhancement of pairing fluctuations there. Similar upturn behavior of <math>\eta</math> is also seen in the strong-coupling BEC regime. Regarding this, I point out that it originates from the formation of two-body bound molecules in this regime.</p> <p>Chapter 4 is devoted to the study of the KSS conjecture. Numerically evaluating the ratio <math>\eta/s</math> in the BCS-BEC crossover region, I find that the lower bound is obtained, not in the unitary limit, but slightly in the BEC side, the value of which is about 4.5 times larger than the KSS bound. I also clarify that this result is universal in the sense that almost the same result is also obtained in mass-imbalanced Fermi gases (where two species contributing Cooper-pair formation have different masses). I further point out that two quantum phenomena, the Pauli exclusion principle and the two-body bound state formation, are crucial keys for the lower bound of <math>\eta/s</math> in ultracold Fermi gases.</p> <p>I summarize this thesis in Chap. 5.</p>			