慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	非平衡状態のフェルミ原子ガス超流動を用いて中性子星の冷却機構を解明する理論研究
Sub Title	Theoretical study on neutron-star cooling mechanism by using non-equilibrium Fermi gas superfluids
Author	大橋, 洋士(Ōhashi, Yōji)
Publisher	
Publication year	2019
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2018.)
JaLC DOI	
Abstract	熱平衡状態にあるフェルミ原子ガスの研究で大きな成功を収めた強結合理論を、中性子星の冷却に代表されるような非平衡状態にも使えるよう拡張した。非平衡Keldysh Green関数法を用い、非平衡効果により超流動転移が非常に抑制されることを、BCS-BECクロスオーバー全域で明らかにした。その際、超流動転移にリエントラント現象が見られることを指摘し、その原因がFFLO状態と呼ばれる特殊な超流動状態の対形成揺らぎであることを突き止めた。更に、線形応答領域における強結合フェルミ原子気体の輸送特性を研究、実験結果と比較することで、非平衡状態に拡張した強結合理論の定量的信頼性を検証した。 We have theoretically extended the equilibrium strong-coupling theory developed in cold Fermi gas physics, to the non-equilibrium case, such as cooling process of a neutron star. Using the non-equilibrium Keldysh-Green function method, we clarify the superfluid phase transition is remarkably suppressed in the whole BCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer)-BEC (Bose-Einstein condensation) crossover region, by an non-equilibrium effect. The superfluid phase transition is shown to exhibit a reentrant behavior, originating from FFLO (Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov) type pairing fluctuations. We have also examined transport properties of an ultracold Fermi gas, within the linear response theory, to confirm the quantitative validity of the strong-coupling theory, extended to the non-equilibrium case.
Notes	研究種目：基盤研究 (C) (一般) 研究期間：2016～2018 課題番号：16K05503 研究分野：凝縮系物理学理論
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_16K05503seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　元 年　 ５ 月　 ８ 日現在

機関番号：３２６１２
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2016～2018
課題番号：１６Ｋ０５５０３

研究課題名（和文）非平衡状態のフェルミ原子ガス超流動を用いて中性子星の冷却機構を解明する理論研究

研究課題名（英文）Theoretical study on neutron-star cooling mechanism by uisng non-equlibrium Fermi gas superfuids

研究代表者
大橋　洋士（Ohashi, Yoji）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・教授

研究者番号：６０２７２１３４

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,500,000円

研究成果の概要（和文）：熱平衡状態にあるフェルミ原子ガスの研究で大きな成功を収めた強結合理論を、中性子星の冷却に代表されるような非平衡状態にも使えるよう拡張した。非平衡Keldysh Green関数法を用い、非平衡効果により超流動転移が非常に抑制されることを、BCS-BECクロスオーバー全域で明らかにした。その際、超流動転移にリエントラント現象が見られることを指摘し、その原因がFFLO状態と呼ばれる特殊な超流動状態の対形成揺らぎであることを突き止めた。更に、線形応答領域における強結合フェルミ原子気体の輸送特性を研究、実験結果と比較することで、非平衡状態に拡張した強結合理論の定量的信頼性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
　粒子間相互作用が強い系は学術的興味だけでなく、高温超伝導など我々の未来の科学技術の発展にとっても重要である。こうした系は、これまで主に熱平衡状態の研究が主であったが、近年、実験技術の進歩により、非平衡状態の性質についても関心が持たれるようになってきた。また、宇宙に目を向けると、粒子間相互作用は中性子星と呼ばれる未だ謎に満ちた天体の理解にも重要であり、やはりそこでも系の非平衡効果の問題は避けて通ることができない。本研究は、こうした新しい研究の流れを受け、中性子星の冷却機構の解明の基礎になる強結合・非平衡超流動理論の構築を行ったものであり、その意義は大きいものである。

研究成果の概要（英文）：　We have theoretically extended the equilibrium strong-coupling theory developed in cold Fermi gas physics, to the non-equilibrium case, such as cooling process of a neutron star. Using the non-equilibrium Keldysh-Green function method, we clarify the superfluid phase transition is remarkably suppressed in the whole BCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer)-BEC (Bose-Einstein condensation) crossover region, by an non-equilibrium effect. The superfluid phase transition is shown to exhibit a reentrant behavior, originating from FFLO (Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov) type pairing fluctuations. We have also examined transport properties of an ultracold Fermi gas, within the linear response theory, to confirm the quantitative validity of the strong-coupling theory, extended to the non-equilibrium case.

研究分野：凝縮系物理学理論

キーワード：非平衡状態　フェルミ原子気体　中性子星　BCS-BECクロスオーバー　Keldysh Green関数

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９、ＣＫ－１９（共通）

１．研究開始当初の背景

中性子星は､半径 10km 程度でありながら太陽に匹敵する質量を有する特殊な天体である。その性質は未だ多くの謎に包まれており、中でも、その冷却機構は、この星の形成過程と密接に関連する重要問題である。この問題に対し、URCA 過程と並び候補と目されているのが、「pair-breaking and formation process (PBF)」であり、これは、中性子流体の超流動転移に伴うクーパー対形成により、その結合エネルギーをニュートリノ・反ニュートリノとして放出することで冷却が進む、というメカニズムである。(物質とほとんど相互作用しないこれらの素粒子は中性子星の外に放出されるため、冷却が進行する。) しかし、中性子星の観測から得られる情報が限定的であり、加えて地上実験で検証が困難なことから、この機構の真偽は未だ明らかとなっていない。

この問題の解明に有効であると考えられているのが､冷却フェルミ原子ガス超流動である。中性子星内部は、大きく分けて、中心付近のコア領域と、その外側のクラスト相から成り、後者のクラスト相では、原子核から染み出た中性子がユニタリフェルミガスに近い状況で超流動になっていると考えられている。クラスト相から内部に入るほど、超流動の強結合性は顕著になるが、これは、BCS-BEC クロスオーバー領域にあるフェルミ原子ガス超流動の特徴と酷似している。フェルミ原子気体の超流動は、2004 年に ^{40}K や ^{6}Li の原子種で実現しているが、それ以降、熱平衡状態でのこの系の強結合物性の理解が着実に進んできた。精密な物理量の測定結果を説明すべく、当該研究分野の理論はこの 10 年ほどで大きく発展し、全てではないものの、多くの実験結果をほぼ定量的レベルで説明できる水準にまで達している。最近では、非平衡状態での実験も開始されており、それに対応すべく、当該研究分野の理論も、非平衡系をも扱えるよう発展させるべき段階に来ている。強結合効果と非平衡効果を同時に扱える理論を構築することは、中性子星の冷却機構の 1 つである PBF 機構の解明に冷却フェルミ原子気体を用いて挑むことを可能にするだけでなく、非平衡超伝導や、励起子-ポラリトン凝縮における非平衡量子凝縮の物性解明にも大きく貢献すると考えられる。

２．研究の目的

本研究の目的は、実験的操作性が非常に高い冷却フェルミ原子気体の BCS-BEC クロスオーバー領域の研究で発展してきた強結合理論を、中性子星の冷却問題や、励起子ポラリトン凝縮のおける非平衡凝縮といった非平衡量子多体現象にも使えるよう拡張することである。非平衡定常状態における凝縮状態の物性や、中性子星における PBF 機構をフェルミ原子ガスでシミュレートする際に必要な量子凝縮体の時間発展計算を行うための基礎理論を構築、冷却原子気体という地上実験可能な系を用いての、こうした問題解明への理論的道筋をつける。

３．研究の方法

熱平衡状態にあるフェルミ原子ガスの BCS-BEC クロスオーバー研究で大きな成功を収めた強結合 T 行列理論を、非平衡状態も扱えるよう拡張する。理論の枠組みとしては非平衡 Green 関数（Keldysh Green 関数）を用いる。この理論がターゲットとする中性子星のクラスト領域におけるｓ波中性子超流動に適用可能であることを確認した後､「外から一定量の原子の供給と流出がある非平衡定常状態」を考え、これによる超流動状態の安定性への影響を BCS-BEC クロスオーバー全域で評価、フェルミ原子気体の相図がどう修正されるか明らかにする。その研究過程で、時間依存 Bogoliubov-de Gennes（TDBdG）方程式のような凝縮体の時間発展計算のアルゴリズムに、この非平衡強結合理論をどう適用するか探る。加えて、線形応答領域における強結合フェルミ原子気体の輸送特性（ずり粘性、コンダクタンス）についても研究し、熱平衡状態での強結合理論を非平衡状態に拡張した場合、どの程度、熱平衡状態の場合のような定量的信頼性が理論にあるか、を検証する。

４．研究成果

（１）非平衡定常状態に対する BCS-BEC クロスオーバー理論

熱浴粒子源との接続により連続的な粒子供給、および粒子放出を伴うフェルミ原子気体を考え、非平衡定常状態における超流動転移温度を、BCS-BEC クロスオーバー全領域で明らかにした。可変な引力相互作用に伴う対形成揺らぎは T 行列近似（TMA）で考慮し、熱平衡系で用いていた温度 Green 関数を、Keldysh　Green 関数に置き換えることで非平衡効果を理論的に取り扱った。この結果、系が非平衡定常状態になると、超流動転移温度は急速に減少、粒子の流入と放出で特徴付けられる非平衡性がある程度強くなると、超流動相は完全に消失することを明らかにした。なお、非平衡状態では温度は定義できないが、ここでの超流動転移「温度」とは、熱平衡状態にある熱浴粒子源の温度（環境温度）である。(熱平衡状態では、この温度は着目している系の温度に一致する。)

弱結合側では、超流動転移にリエントラント現象が見られた。この状況が見られる相互作用領域では、フェルミ原子の運動量分布には 2 段の階段構造が現れ、あたかも大きさの異なる２つのフェルミ面が共存するかのような構造をしており、これにより、FFLO（Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov）状態の対応する特殊な対形成揺らぎが増大することでリエントラント現象が生じることを突き止めた。今回考えている連続系では FFLO 状態は揺らぎ

の効果で安定化されないが、この結果は、背景に結晶格子が存在すれば系に磁場をかけずとも、非平衡状態にするだけでこの空間的に非一様なフェルミ超流動状態が実現できることを示している。

上記の研究は非平衡定常状態に対するものであるが、これを非平衡・非定常状態に拡張するには、通常の Schwinger-Keldysh では不十分であり、松原形式と Keldysh 形式を組み合わせた 3×3 行列形式の非平衡 Green 関数理論が必要であることが分かった。ただし、初期状態の効果以外については、今回の定式化の基本構造は依然有効であり、今後、理論をこの形式に拡張することで、PBF 機構をシミュレートすることが可能となると考えられる。

（２）線形応答領域における BCS-BEC クロスオーバーでのフェルミ原子ガスの輸送係数

線形応答理論を用い、フェルミ原子気体の BCS-BEC クロスオーバー領域のずり粘性率、および、コンダクタンスを理論的に研究した。ずり粘性率については、強結合効果を自己無撞着 T 行列近似（self-consistent T-matrix approximation）で扱い、ずり粘性率とエントロピー密度との比に下限値が存在するという KSS（Kovtun-Son-Starinets）予想を検証、ユニタリ極限より強結合側でかつ、超流動転移温度より少し高いところでこの比が最小値をとることや、その値が KSS 予想に近いことを明らかにした。後者のコンダクタンスについては、TMA の範囲で対形成揺らぎを考慮し、接合部分を流れる粒子流を評価、^{6}Li フェルミ原子気体で行われた実験結果を、幅広い温度領域において定量的レベルで説明できることを示した。この結果から、線形応答領域の範囲ではあるものの、熱平衡状態で発展してきた強結合理論をそのまま非平衡状態に拡張した理論が、定量レベルでその信頼性を依然として保っていることが分かった。

（３）励起子（ポラリトン）系における非平衡量子凝縮状態

Keldysh Green 関数を用い、非平衡状態にある励起子凝縮相の安定性を議論した。平均場近似レベルで得られる励起子凝縮相の多くの領域が、超流動揺らぎの効果を GRPA(generalized random phase approximation)の範囲で考慮すると不安定化することを明らかにした。その原因として、非平衡状態で励起された準粒子の存在により、励起子ボソン間に実行的に引力相互作用が発生し、引力ボソン系の不安定性と同じ原因で、系が不安定になることを指摘した。更に、励起子と光との相互作用まで考慮した励起子ポラリトン系に対し、第 2 閾値と呼ばれる現象が、必ずしも相転移を伴わないことを理論的に示した。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 21 件）

① 大橋洋士，“冷却フェルミ原子ガス超流動と中性子星低密度領域への挑戦，”日本物理学会誌，(査読有)，73 巻，2018，842-851.
DOI: なし

② D. Inotani, and Y. Ohashi, “Strong-coupling and finite-temperature effects on p-wave contacts,” Physical Review A, (査読有), 98 巻, 2018, 023603(1-12)
DOI: 10.1103/PhysRevA.98.023603

③ R. Hanai, P. B. Littlewood, and Y. Ohashi, “Photoluminescence and gain/absorption spectra of a driven-dissipative electron-hole-photon condensate,” Physical Review B, (査読有), 78 巻, 2018, 045302(1-22)
DOI: 10.1103/PhysRevB.97.245302

④ P. van Wyk, H. Tajima, D. Inotani, A. Ohnishi, and Y. Ohashi, “Superfluid Fermi atomic gas as a quantum simulator for the study of the neutron-star equation of state in the low-density region,” Physical Review A, (査読有), 97 巻, 2018, 013601(1-13)
DOI: 10.1103/PhysRevA.97.013601

⑤ M. Horikoshi, M. Koashi, H. Tajima, Y. Ohashi, and M. Kuwata-Gonokami, “Ground-State Thermodynamic Quantities of Homogeneous Spin-1/2 Fermions from the BCS Region to the Unitarity Limit,” Physical Review X, (査読有), 7 巻, 2017, 041004(1-15)
DOI: 10.1103/PhysRevX.7.041004

⑥ R. Hanai, P. B. Littlewood, and Y. Ohashi, “Dynamical instability of a driven-dissipative electron-hole condensate in the BCS-BEC crossover region,” Physical Review B, (査読有), 96 巻, 2017, 125206(1-19)
DOI: 10.1103/PhysRevB.96.125206

⑦ H. Tajima, R. Hanai, and Y. Ohashi, “Spin susceptibility and effects of a harmonic trap in the BCS-BEC crossover regime of an ultracold Fermi gas,” Physical Review A, (査読有), 96 巻, 2017, 033614(1-11)
DOI: 10.1103/PhysRevA.96.033614

⑧ M. Ota, H. Tajima, R. Hanai, D. Inotani, and Y. Ohashi, “Local photoemission spectra and effects of spatial inhomogeneity in the BCS-BEC-crossover regime of a trapped ultracold Fermi gas,” Physical Review A, (査読有), 95 巻, 2017, 053623(1-9)

DOI: 10.1103/PhysRevA.95.053623

⑨ T. Yamaguchi, D. Inotani, and Y. Ohashi, “Appropriate conditions to realize a p-wave superfluid state starting from a spin-orbit-coupled s-wave superfluid Fermi gas,” Physical Review A, (査読有), 95巻, 2017, 053609(1-12)
DOI: 10.1103/PhysRevA.95.053609

⑩ H. Tajima, P. van Wyk, R. Hanai, D. Kagamihara, D. Inotani, M. Horikoshi, and Y. Ohashi, “Strong-coupling corrections to ground-state properties of a superfluid Fermi gas,” Physical Review A, (査読有), 95巻, 2017, 043625(1-5)
DOI: 10.1103/PhysRevA.95.043625

⑪ T. Yamaguchi, D. Inotani, and Y. Ohashi, “A Novel Root to Reach a p-Wave Superfluid Fermi Gas,” Journal of the Physical Society of Japan, (査読有), 86 巻, 2017, 013001(1-5)
DOI: 10.7566/JPSJ.86.013001

⑫ 大橋洋士, P. van Wyk, 田島裕之, “フェルミ原子ガス超流動の BCS-BEC クロスオーバー理論と中性子星状態方程式への挑戦,” 原子核研究, (査読有), 61巻, 2016, 70-84
DOI: なし

⑬ D. Inotani, R. Hanai, and Y. Ohashi, “Triplet pair amplitude in a trapped s-wave superfluid Fermi gas with broken spin rotation symmetry. II. Three-dimensional continuum case,” Physical Review A, (査読有), 94巻, 2016, 043632(1-9)
DOI: 10.1103/PhysRevA.94.043632

〔学会発表〕(計 75 件)

① Y. Ohashi, “Feshbach resonance and Fermi condensates,” 第３回「物質階層を横断する会」 ～ハドロン・原子核・原子・分子合同ミーティング（招待講演）, 2019

② Y. Ohashi, “atomic Fermi gas with a Feshbach resonance and effects of pairing fluctuations in the BCS-BEC crossover region,” International Conference on Quantum and Atom Optics (ICQAO2018)（招待講演）, 2018

③ 大橋洋士, “超伝導・超流動と中性子星：地上の星から宇宙の謎への挑戦,” 明治大学科学技術研究所 2018 年度 第１回公開講演会『超伝導：リニアモーターカーから中性子星まで』（招待講演）, 2018

④ D. Kagamihara, D. Inotani, and Y. Ohashi, “Minimum of the ratio of shear viscosity to entropy density in an ultracold Fermi gas,” International Symposium on Quantum Fluids and Solids, QFS2018, 2018

⑤ D. Kagamihara, D. Inotani, and Y. Ohashi, “Shear viscosity of a strongly-interacting Fermi gas,” The 26th International Conference on Atomic Physics, ICAP 2018, 2018

⑥ Y. Ohashi, “Strong-coupling properties of an ultracold Fermi gas in the BCS-BEC crossover region and application to neutron-star equation of state,” International Workshop on Bose-Einstein Condensation and related phenomena (IWBECRP) [A tribute to Professor Satyendra Nath Bose on his 125th birth anniversary]（招待講演）, 2018

⑦ 大橋洋士, “冷却原子気体と原子核で探る中性子星の謎,” AMO 討論会（招待講演）, 2017

⑧ 大橋洋士, “Hierarchical structure of matter states and a unified description on the viewpoint of BCS-BEC crossover physics,” 研究会「クラスターがつなぐクォーク、ハドロン、原子核そして原子」（招待講演） 2017

⑨ Y. Ohashi, “ Many-body quantum corrections to ground state properties of a superfluid Fermi gas and application to neutron star physics,” グローバル創造クラスター「量子コミュニティ」シンポジウム, 2016

⑩ Y. Ohashi, “Strong-coupling properties of a superfluid Fermi gas and application to neutron-star equation of state,” International Symposium on Neutron Star Matter NSMAT2016 （招待講演）2016

〔その他〕

ホームページ等: http://www.phys.keio.ac.jp/faculty/yohashi/index-jp.html

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。