

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K17774

研究課題名(和文)多自由度効果-多体効果を取り入れた有限温度BECの理論構築

研究課題名(英文)Development of theory for non-zero temperature BEC including internal degrees of freedom and many-body effect

研究代表者

渡部 昌平(WATABE, Shohei)

東京理科大学・理学部第一部物理学科・助教

研究者番号：90726895

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：ボース・アインシュタイン凝縮体での一粒子励起と集団励起に対する多体効果・多自由度効果について議論した。ボース・アインシュタイン凝縮体に特有と考えられている一粒子励起と集団励起の一致性を有限温度で議論し、その過程でボース・アインシュタイン凝縮体中の多重励起に起因する一粒子励起のサテライトピークを見出した。また、対称性が明示的に破れた多自由度ボース・アインシュタイン凝縮体におけるWard-高橋恒等式を導出した。

研究成果の概要(英文)：We discussed many-body effect and effect of internal degrees of freedom on a single-particle excitation as well as a collective excitation in a Bose-Einstein condensate. We studied the correspondence between the single-particle excitation and the collective excitation at non-zero temperature, which is believed to be characteristic to the Bose-Einstein condensate, and we also found a satellite peak in the single-particle excitation originated from the multi-particle excitation in the Bose-Einstein condensate. For a multi-component Bose-Einstein condensate, we also derive the Ward-Takahashi identity in the case of explicitly broken symmetry.

研究分野：凝縮系物理，冷却原子気体

キーワード：Bose-Einstein凝縮 多体効果 多自由度効果 有限温度効果

### 1. 研究開始当初の背景

Bose-Einstein 凝縮体(BEC)は、巨視的量子現象やそれによる超流動性の発現など凝縮系物性物理において基礎的かつ重要な研究対象である。研究の長い歴史がある超流動液体ヘリウムだけでなく、冷却原子気体、磁性絶縁体のマグノン系、エキシトン-ポラリトン系で BEC は実現しており普遍的な現象である。超流動液体ヘリウムから始まる BEC の多体効果に関する理論は、冷却原子気体の BEC が実現後も発展したが、多体効果、有限温度効果を入れた理論の整備は依然として完成されないし、BEC の理論には問題点が残っていることも指摘されている。また、冷却原子気体では、 $^{52}\text{Cr}$  で spin-3 の higher spin まで BEC が実現しているが、このような多自由度効果を取り入れた BEC の有限温度多体理論も整備されているとは言えないのが現状である。

### 2. 研究の目的

以上の観点から、spin-F spinor BEC を目標に、多自由度効果・多体効果を取り入れた有限温度理論の一般的な枠組みを BEC に対して構築し、有限温度における BEC の応答関数の性質などを明らかにすることが本研究の目的である。

先行研究で、研究代表者は一成分 BEC に対して、有限温度効果・多体効果を取り入れた近似理論を構成し、凝縮体密度の温度依存性やガスパラメータに対する転移温度の変化について調べた。本研究では、研究代表者が構成した理論を拡張・適用し、次の点を明らかにする。

I. 有限温度効果-多体効果を取り入れた理論により、BEC の有限温度における一粒子スペクトル関数と密度応答関数の性質を明らかにする。また、有限温度における一粒子励起と集団励起との関係を明らかにする。

II. 有限温度効果を取り入れた spin-F spinor BEC の多体理論を構築する。特に、研究代表者が共同研究者と構築した一成分 BEC に対する理論を spin-F spinor BEC に拡張する。また、spin-F spinor BEC で成立する厳密な関係式など近似理論によらない本来の性質を明らかにするなど、一般的な理論を構築する。

### 3. 研究の方法

I. まず最初に、研究代表者が構成した有限温度と多体効果を取り入れた一成分 BEC の理論的枠組みを適用・拡張し、一成分 BEC の一粒子グリーン関数と密度応答関数の有限温

度多体効果の性質を調べる。また、数値計算によって得られた BEC におけるスペクトルの構造を解析する。得られたスペクトルの構造の起源を明らかにするため、自己エネルギーや密度バーテックス関数に対して、バーテックス補正の有無による性質の差異を明らかにする。これにより、近似理論に依らない性質、近似理論に依る性質を明確にする。また、数値計算で得られた一粒子スペクトル関数のピークと密度応答関数のピークの性質を解析し、相互の関係を明らかにする。特に、両スペクトルの一致性は絶対零度で言われていたが、有限温度においては議論の余地があるので、この点について調べた。

II. spin-F spinor BEC に対して、多自由度効果・有限温度効果を取り入れた乱雑位相近似などによる多体近似理論を構成する。一方で、近似理論を作ったとしても、一成分 BEC と同様に Hugenholtz-Pines の定理などの条件式が必要になることが予想される。これを解明しないことには、最終的な数値計算に持っていくこともできない。従って、近似によらない厳密な関係式を前もって導出し理解しておく必要がある。このため、spin-F spinor BEC に対する厳密な恒等式(特に Hugenholtz-Pines の定理に相当するもの)を導出する。

### 4. 研究成果

(1) 多体効果を取り入れた有限温度 BEC の研究について、一粒子 Green 関数と密度応答関数に対する多体効果の影響を解析した。超流動液体ヘリウムでは roton や maxon の状態密度が発散するため、これらの素励起の多重散乱により、密度応答関数に多粒子励起構造があらわに効いてくることが知られている。一方、冷却原子気体の s 波相互作用する BEC では、そのような素励起の構造がないため、

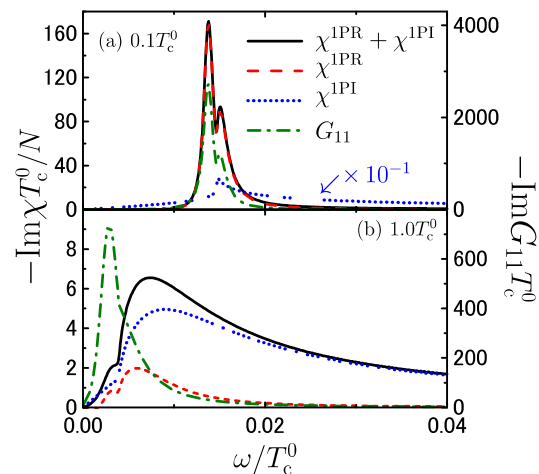


図 1. 有限温度・多体効果を取り入れた BEC のスペクトル関数

多粒子励起は顕著に効いてこないと予想される．本研究では，ボース・アインシュタイン凝縮と密度揺らぎの効果によって，この多粒子励起の影響がまず一粒子励起に繰り込まれ，それがさらに BEC の効果によって集団励起へと効いてくること，そのような効果が両スペクトル関数のサテライトピークとして現れることを示した(図 1)．サテライトピークの起源の解明には，自己エネルギーを選択的に取り入れることで，BEC に特有な自己エネルギーの項がその起源であることを突き止めた(図 2)．

また，多体効果を取り入れたとしても，希薄かつ低温であれば，一粒子励起のメインのピーク位置は平均場近似である Bogoliubov 近似のものをトレースすることもわかった．また，有限温度においても低温側では一粒子励起と集団励起のスペクトルは一致し，高温側でその一致性は消失することを示した(図 3)．

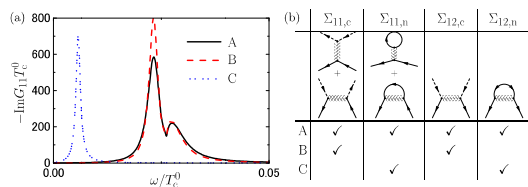


図 2. 自己エネルギーとサテライトピークの関係

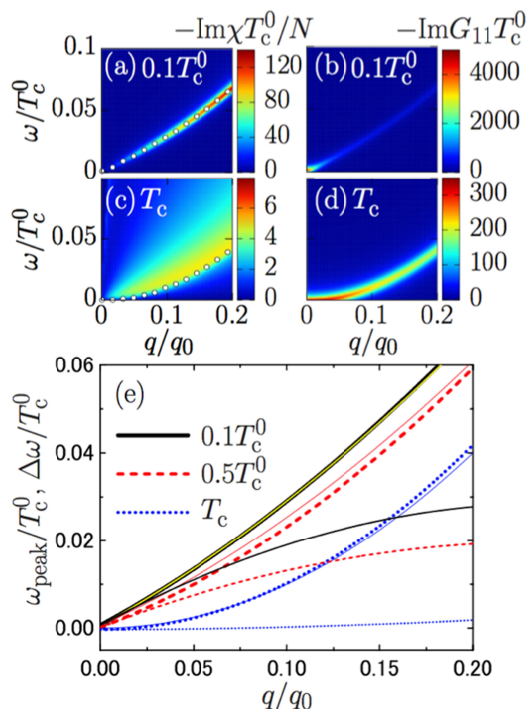


図 3. 一粒子励起と集団励起との関係

(2) 多自由度効果を取り入れた BEC における厳密な関係式を導出した．一成分 BEC では，U(1) 対称性が自発的に破れるという概念の

元，gapless な南部・ゴールドストーンモードが現れる．この gapless 性を満たすための条件式は，Hugenholtz-Pines の定理として知られている．Spinor BEC 系では外部磁場により対称性が明示的に破れ，そのような gapless モードの中には energy gap を獲得するものもある．このような系に対しても適用可能な，多自由度 BEC で成立する Ward-高橋恒等式を導出することに成功した．それを spinor BEC に適用し，spinor BEC における Hugenholtz-Pines の定理を導出した．もともとの Hugenholtz-Pines の定理の証明法では，複雑な対称性を持つ系に適用困難な問題があり，それが多自由度 BEC 系での証明のネックになっていた．本研究では，Hohenberg と Martin が一成分 BEC に対して Hugenholtz-Pines の定理を導出した理論に触発され，対称性が明示的に破れた多自由度 BEC で成立する Ward-高橋恒等式を導出することに成功した．

## 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 5 件)

Shohei Watabe, Hidden multiparticle excitation in weakly interacting Bose-Einstein Condensate, Phys. Rev. A, 査読有, 98, 33606 (2018). DOI:10.1103/PhysRevA.97.033606

Masato Narushima, Shohei Watabe, and Tetsuro Nikuni, Density and spin modes in imbalanced normal Fermi gases from collisionless to hydrodynamic regime, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 査読有, 51, 55202 (2018). <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6455/aaa594/meta>

Hiroki Ohya, Shohei Watabe, and Tetsuro Nikuni, Decay of phase-imprinted dark soliton in Bose-Einstein condensate at non-zero temperature, 査読無, arXiv:1706.09135 (2017). <https://arxiv.org/abs/1706.09135>

Shohei Watabe, Hugenholtz-Pines theorem with broken U(1) x SO(N) or U(1) x SU(N) symmetry, 査読無, arXiv:1709.06319 (2017). <https://arxiv.org/abs/1709.06319>

Takahiro Mizoguchi, Shohei Watabe, and Tetsuro Nikuni, Nonlinear Mixing of Collective Modes in Harmonically Trapped Bose-Einstein Condensates, Phys. Rev. A, 査読有 95, 33623 (2017). DOI : 10.1103/PhysRevA.95.033623

〔学会発表〕(計6件)

麻野曜司, 飯島祐樹, 成島優人, 渡部昌平, 二国徹郎, Bose-Fermi 混合気体の集団励起, 日本物理学会第73回年次大会, 2018年

渡部昌平, 内部自由度を持つ BEC の Hugenholtz-Pines の定理, 日本物理学会第73回年次大会, 2018年

Shohei Watabe, Hugenholtz-Pines theorem for Bose-Einstein condensates with internal degrees of freedom, APS March Meeting 2018 (国際学会), 2018年

麻野曜司, 武田陸歩, 渡部昌平, 二国徹郎, Fermi 超流動気体の BCS-BEC クロスオーバーにおける動的密度・スピン応答関数の性質, 日本物理学会第72回年次大会, 2017年

秋山雅治, 渡部昌平, 二国徹郎, BCS-BEC クロスオーバーにおける質量及び粒子数 Imbalance の解析, 日本物理学会第72回年次大会, 2017年

Shohei Watabe, Density response function in a non-zero temperature Bose-Einstein Condensates, APS March Meeting 2017 (国際学会) 2017年

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕(計0件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

渡部 昌平 (WATABE, Shohei)

東京理科大学・理学部第一部物理学科・助教

研究者番号: 90726895

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし