

令和元年6月3日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05488

研究課題名(和文) 非一様系におけるゼロモード量子揺らぎの定式化と冷却原子系及び原子核への応用

研究課題名(英文) Formulation of quantum fluctuation of zero mode in inhomogeneous systems and its applications to cold atomic systems and nuclei

研究代表者

山中 由也 (Yamanaka, Yoshiya)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：10174757

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：量子多体系におかれう連続対称性の自発的破れに際して現れるゼロモードは重要な役割を担っている。これまで、場の量子論で一様無限系に定式化していたため、それ自身の量子揺らぎは露わに取り込む必要はなかった。しかし、有限非一様系では無視できない寄与があり、それを取り込んだ定式化が最近提案されていた。本研究ではこの新しい定式化を、冷却原子系やアルファクラスター模型で記述される原子核に適し、ゼロモード量子揺らぎの物理的効果を定量的に解析した。結果は実験での検証が可能である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

微視的世界の対称性のよい単純な理論から現実の多様で複雑な物質状態が説明する際に、量子系の「自発的対称性の破れ」という機構が欠かせない。その破れには「ゼロモード」という自由度が付随するが、これまではその効果が小さいという理由で計算に露わに取り込む必要がなかった。しかし、冷却原子系や原子核のような一様でない有限系ではゼロモードの量子的性質がむしる物理的効果をもたらすようになる。この研究では、ゼロモードを正当に扱う計算に従ってそうした物理的効果を定量的に求めた。重要な自発的対称性の破れ機構の一面を明らかにする、全く新たな方法での研究と位置付けられる。

研究成果の概要(英文)：The zero mode associated with a spontaneous breakdown of a continuous symmetry plays a crucial role. Its quantum fluctuations have not been taken account of explicitly for infinite homogeneous systems. But it is not the case for finite inhomogeneous systems, for which a new consistent formulation to include zero mode fluctuations explicitly has been proposed recently. In this study, we apply it to cold stomic systems and nuclear systems described by the alpha cluster model, and to analyze physical effects of quantum fluctuations of the zero modes qunatitatively. The results can be tested experimentally.

研究分野：数理物理・物性基礎

キーワード：場の量子論 自発的対称性の破れ ゼロモード アルファクラスター模型 冷却原子系 非平衡過程  
開放系 Dicke模型

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

量子多体系における自発的対称性の破れ (spontaneous symmetry breakdown、以下略して SSB) を伴う現象は、物性物理で多数の例が知られている。また、素粒子・宇宙物理の標準統一モデルは内部位相変換に関する SSB である。こうした普遍的概念である SSB は、場の量子論において高い対称性を持つ単純な微視的基礎理論から様々な対称性の破れ方によって現実の多様で複雑な巨視的現象を作り出す機構でもある。連続的変換の SSB では、元の対称性の痕跡として、ゼロモード (南部-Goldstone モード) の存在が要求され、SSB に伴って秩序状態を形成し、維持するという役割を担っている。これまでの SSB に関するほとんどの理論的研究では、専ら並進対称性を持つ空間一様系で平面波による場の演算子の展開が用いられ、そのときゼロモードは連続変数である運動量ゼロの一点であるために単純に無視される Bogoliubov 近似であった。近年トラップされた冷却原子系実験における Bose-Einstein 凝縮 (以下 BEC と略す) の実現によって、並進対称性が陽に破れた有限サイズ系で、場の演算子の展開の中でゼロモードが離散的状態となり、それを無視する Bogoliubov 近似は正準交換関係を明白に破るため許されない状況となった。一方、その展開のゼロモードは、量子座標で表わされ、2 次形式の非摂動ハミルトニアンを採用すると、真空が一意的に定義できない、物理量に発散を生ずるなど深刻な問題が生ずる。我々の研究グループは、ゼロモード間の相互作用を非摂動ハミルトニアンに取り入れるこれまでにない新しい定式化を提案し、上述の困難が全て回避できることを示した。この新たな定式化を現実の様々な系に適用し、理論的検証とゼロモードの物理的影響を明らかにすることが重要な課題となった。また、ゼロモード付随の有無に関わらず、SSB の相が関与する非平衡相転移の理論には未だ多くの課題がある。

### 2. 研究の目的

(1) 背景で述べたように、非一様有限系の SSB に伴って現れるゼロモードに対する新たな場の量子論として矛盾ない定式化 (Interacting Zero-Mode Formulation、IZMF と略す) を現実の系に適用して、ゼロモード量子揺らぎがどのような形で現れ、その効果を定量的に求めることを第一の目的とする。結果は実験で検証可能である。また、SSB のそうした理論的研究を通じて、IZMF の意味するところをより深く明らかにする、あるいはその改善を目指す。

(2) 離散対称性の SSB のようにゼロモード伴わない場合を含めて、非平衡過程での SSB 相が関わる相転移は最も興味深い課題である。本研究では、時間変化しない定常非平衡系を取り上げて、平衡系の熱力学的極限で定義される相が、非一様有限自由度の非平衡系でどのように現れ、変化するかを具体的に調べる。特に、系の開放性や散逸がどのような役割を果たすかに注目して研究する。

(3) 時間依存の非平衡非一様相転移過程を量子輸送方程式によって記述する方法は、有力な方法と期待されるが、そうした場合の量子輸送方程式は満足すべき議論に従って導出されていない。この方向の研究の前段階として、相転移を伴わない非一様系でも量子輸送方程式の導出はなされていないので、その導出のための場の量子論に基づく定式化を試みる。

### 3. 研究の方法

(1) トラップ冷却原子系の BEC を対象に、位相変換に関する SSB に IZMF を適用する。このとき、ゼロモードの自由度は 1 次元量子座標と同等になり、ゼロモード間相互作用からそのハミルトニアンは束縛型の形をとる。その結果、ゼロモード自由度から離散的エネルギースペクトルが与えられる。そのエネルギー間隔は、冷却原子系のパラメータの範囲では Bogoliubov 励起エネルギーに比べてからかなり小さくなる。本研究では、そうしたゼロモードスペクトルが有限温度で、比熱などの物理量に与える影響を定量的に調べる。

IZMF は有限サイズ量子系である原子核にもその応用が存在する。原子核には、粒子の集まりとみなせる状態の存在が知られていて、典型例は  $^{12}\text{C}$  の 閾値以上にある幾つかの状態、ボソンである粒子凝縮の可能性が強く示唆されてきた。その中には、核合成、星の進化、生命の発生に本質的役割を担う Hoyle 状態も含まれる。今回、従来の原子核理論計算とは全く異なるアプローチとして、粒子系の現象論的模型に IZMF を適用して調べる。冷却原子系と異なり相互作用の強い原子核では、ゼロモード励起と Bogoliubov 励起がほぼ同じエネルギースケールで存在することになり、離散準位として現れるゼロモード励起を原子核で観測されている準位と比較できる。

(2) 光学共振器に入った有限個の冷却原子系で超放射相への相転移が観測された実験があり、その系が Dicke 模型で記述されることが知られている。この系を定常非平衡系の例として、本研究の対象とする。離散変換の SSB であるためゼロモードは出現しないが、Dicke 模型は熱力学的極限で量子相転移を示す。有限個の系であるにも拘らず、離散対称性が自発的に破れた超放射相が観測されているという点を解明することが重要である。実験状況に合わせ、Dicke 模型が環境として振る舞う光学共振器外部の光子が対象系である Dicke 模型と相互作用するとして、密度演算子形式で定式化する。有限自由度を有する開放系の動力学の観点から、最終的に

量子マスター方程式を導出し、その解を数値的に調べる。

(3) 非一様系の非平衡過程を記述する量子輸送方程式導出には、長年取り組んできた Thermo Field Dynamics (略して TFD) を用いる。焦点は、場の演算子グリーン関数の自己エネルギーに対して、矛盾なくパラメータが決められる繰り込み条件が設定できるかどうかである。

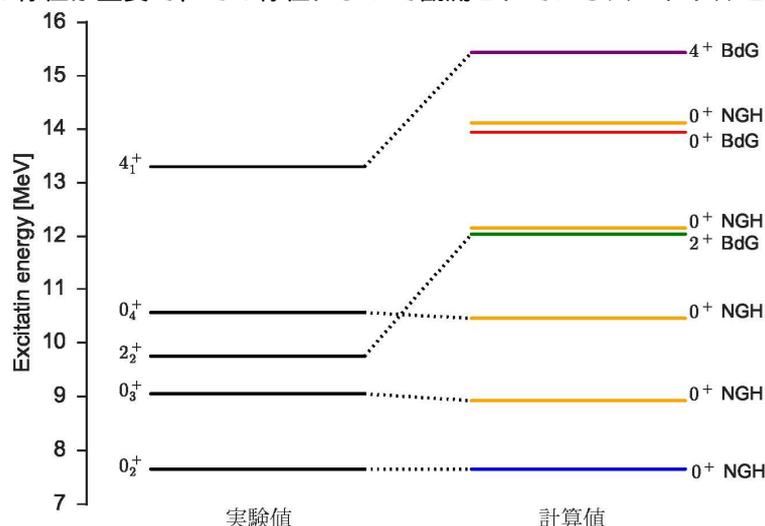
#### 4. 研究成果

(1) ポテンシャルによって閉じ込められた冷却原子が BEC している系に、我々の定式化を有限温度場の量子論に用いて、分配関数を計算することによってゼロモード量子揺らぎがどの程度影響するかを定量的に解析した。こうした系は世界的に実験が盛んに行われており、理論検証が可能である。今回の計算では励起モード間と励起モードゼロモード間相互作用はないという近似計算に限った。効果としては、比較的弱い原子間相互作用の場合ゼロモード量子揺らぎが顕著になり、具体的に凝縮粒子数の減少や比熱の増大ということで観測可能であることを示した。研究成果を学術論文(発表論文 5))として発表した。

原子核  $^{12}\text{C}$  の Hyle 状態を含む アルファクラスター状態について、ポテンシャルによって閉じ込められた 粒子凝縮という描像の下、IZMF 定式化に基づいてエネルギー準位を導出したことである。結果は学術論文(発表論文 6))として発表した。ゼロモード量子揺らぎの自由度に起因するエネルギー準位の存在が重要で、その存在によって観測されているスペクトルとよく一致していることが

示せた。右図のように、NGH がゼロモード由来の準位で、その存在が決定的であることがわかる。従来の

クラスターモデルによる解析とは全く異なる手法で、実験と一致するスペクトルが導出されたことは大きな成果である。 $^{12}\text{C}$  に対する研究を改善しながら、粒子 4 個から 13 個でできた  $^{16}\text{O}$  から  $^{52}\text{Fe}$  の原子核に拡張し、IZMF に特徴的なゼロモード由来の離散的準位を含むエネルギースペクトルとガンマ



崩壊幅を計算で求めた。従来の原子核理論の計算ではアルファ粒子数増加に伴い著しく計算が複雑になって数値結果を求めることが困難であるのに対して、我々の方法では計算の複雑さは粒子数に依らないため計算可能であった。成果は学術論文(発表論文 3))として発表した。また、 $^{16}\text{O}$  については実験データを用いて理論パラメータを調整しながら、詳細な研究を行い、実験で確認されているエネルギー準位が我々の理論計算で説明されることを示した(学会発表 4)及び 5)。

(2) そこで、有限個の系で超放射相が実現されるのは対象系から光子が散逸するという系の開放性にあることを理論的に明らかにした。光学共振器に入った有限個原子の冷却子系の実験での超放射相への相転移が観測されているが、無限個の熱力学的極限で論ぜられる静的性質として相転移とは異なるものである。我々は有限自由度系では定常状態としてではなく、緩和過程で長寿命状態として超放射相構造が現れること、それには散逸の存在が本質的であることを明らかにした。成果は学術論文に発表した(発表論文 2)及び 1)。

(3) 今般、非平衡 TFD で計算される自己エネルギーに対して適切な繰り込み条件を見出し、量子輸送方程式を導出することに成功した。成果は学術論文に纏めて発表した(発表論文 4)。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 6 件)

- 1) R. Imai and Y. Yamanaka, "Dynamical properties of the finite-size Dicke model coupled to a thermal reservoir", J. Phys. Soc. Jpn. **88** (2019) 024401 (7 pages), DOI 10.7566/JPSJ.88.024401 (2019/1).
- 2) R. Imai and Y. Yamanaka, "Stability of symmetry breaking states in finite-size Dicke model with photon leakage", Phys. Lett. **A382** (2018) 3333-3338, DOI 10.1016/j.physleta.2018.09.002 (2018/11).
- 3) R. Katsuragi, Y. Kazama, J. Takahashi, Y. Nakamura, Y. Yamanaka, and S. Ohkubo, "Bose-Einstein condensation of alpha clusters and new soft mode in  $^{12}\text{C}$ - $^{52}\text{Fe}$  4N nuclei in field theoretical superfluid cluster model", Phys. Rev. **C98** (2018) 044303 (18 pages),

DOI 10.1103/PhysRevC.98.044303 (2018/10).

- 4) Y. Kuwahara, Y. Nakamura, and Y. Yamanaka, "Self-energy renormalization for inhomogeneous nonequilibrium systems and field expansion via complete set of time-dependent wavefunctions", *Int. J. Mod. Phys B* **32** (2018) 1850111 (22 pages), DOI 10.1142/S0217979218501114, (2018/1).
- 5) Y. Nakamura, T. Kawaguchi, Y. Torii, and Y. Yamanaka, "Thermal and quantum fluctuations of confined Bose-Einstein condensate beyond the Bogoliubov approximation", *Ann. Phys.* **376** (2017) 484-498, DOI 10.1016/j.aop.2016.12.020 (2017/1).
- 6) Y. Nakamura, J. Takahashi, Y. Yamanaka, and S. Ohkubo, "Effective field theory of Bose-Einstein condensation of  $\alpha$  clusters and Nambu-Goldstone-Higgs states in  $^{12}\text{C}$ ", *Phys. Rev. C* **94** (2016) 014314 (8 pages), DOI 10.1103/PhysRevC.94.014314, (2016/7).

〔学会発表〕(計 29 件)

- 1) J. Takahashi and Y. Yamanaka, "Pair condensation theory for systems of trapped cold fermionic atoms", ICAP2018 (26th International Conference on Atomic Physics) (Barcelona, Spain) (2018/7).
- 2) R. Imai and Y. Yamanaka, "Quantum master equation in paired degenerate subspace of finite-size dissipative Dicke model", ICAP2018 (26th International Conference on Atomic Physics) (Barcelona, Spain) (2018/7).
- 3) T. Oyama, R. Imai, and Y. Yamanaka, "Formulation of quantum field theory for driven-dissipative Bose-Einstein condensation", ICAP2018 (26th International Conference on Atomic Physics) (Barcelona, Spain) (2018/7).
- 4) J. Takahashi, R. Katsuragi, Y. Kazama, Y. Nakamura, Y. Yamanaka, S. Ohkubo, "New description to soft modes in N-alpha cluster states as Bose-Einstein condensation based on quantum field theory with zero mode excitation", State of the Art in Nuclear Cluster Physics, (Texas, USA) (2018/5).
- 5) 高橋 淳一, 山中 由也, 大久保 茂男, 「 $^{16}\text{O}$  の クラスタ構造状態に対する Bose-Einstein 凝縮描像に基づいた場の量子論を用いた解析」日本物理学会 2019 年年次大会 (九州大学 伊都キャンパス) (2019/3).
- 6) 早木 悠斗, 高橋 淳一, 山中 由也, 「トラップされた 2 成分 Bose-Einstein 凝縮体におけるゼロモード間相互作用の解析」日本物理学会 2019 年年次大会 (九州大学伊都キャンパス) (2019/3).
- 7) 中村 祐介, 今井 良輔, 山中 由也, 「位相変換対称性が破れた系に対する 4x4 行列形式の非平衡 thermo field dynamics」日本物理学会 2019 年年次大会 (九州大学伊都キャンパス) (2019/3).
- 8) 山中 由也, 中村 祐介, 今井 良輔, 大山 京尋, 「位相変換対称性が破れた系に対する 4x4 行列形式の非平衡 thermo field dynamics」基研研究会・iTHEMS 研究会「非平衡系の物理学-階層性と普遍性-」(京都大学基礎物理学研究所) (2018/12).
- 9) 今井 良輔, 山中 由也, 「少数原子-光相互作用系の散逸過程」第 8 回 QUATUO 研究会 (高知工科大学永国寺キャンパス) (2018/10).
- 10) 高橋 淳一, 山中 由也, 「ゼロモード由来の量子揺らぎが Bose-Einstein 凝縮系に与える影響」第 8 回 QUATUO 研究会 (高知工科大学永国寺キャンパス) (2018/10).
- 11) 今井 良輔, 山中 由也, 「光子散逸を考慮した有限サイズ Dicke ハミルトニアンに現れる縮退部分空間とマルコフ性」日本物理学会 2018 年秋季大会 (同志社大学京田辺キャンパス) (2018/9).
- 12) 高橋 淳一, 山中 由也, 「非一様冷却フェルミ原子系における対凝縮理論の定式」日本物理学会 2018 年秋季大会 (同志社大学京田辺キャンパス) (2018/9).
- 13) 今井 良輔, 山中 由也, 「散逸 Dicke 模型における緩和現象と spin-boson 模型に対する量子マスター方程式との関係」理研シンポジウム・iTHEMS 研究会「熱場の量子論とその応用」(理化学研究所) (2018/8).
- 14) 高橋 淳一, 山中 由也, 「冷却フェルミ原子系における対凝縮と有限サイズ効果」理研シンポジウム・iTHEMS 研究会「熱場の量子論とその応用」(理化学研究所) (2018/8).
- 15) 今井 良輔, 山中 由也, 「散逸のある有限サイズ Dicke Hamiltonian の対称性を破る定常状態」日本物理学会 2018 年年次大会 (東京理科大学野田キャンパス) (2018/3).
- 16) 山中 由也, 桑原 幸朗, 中村 祐介, 「非平衡過程における時間依存準粒子描像の定式化と繰り込み条件」理研シンポジウム・iTHEMS/iTHEMS 研究会「非平衡物理の最前線 - 素粒子・宇宙から物性まで -」(理化学研究所) (2017/12).
- 17) 今井 良輔, 山中 由也, 「2 モード Dicke 模型による散逸ダイナミクスの解析」第 37 回量子情報技術研究会 (QIT37) (埼玉大学) (2017/11).
- 18) 今井 良輔, 山中 由也, 「有限サイズ Dicke 模型の示す相転移の解釈と測定の影響」, 第 7 回 QUATUO 研究会 (北海道大学札幌キャンパス) (2017/10).

- 19) 今井 良輔, 山中 由也, 「光学共振器中の原子気体 Bose-Einstein 凝縮体のもつ対称性の破れにおける散逸の影響」日本物理学会 2017 年秋季大会 (岩手大学上田キャンパス理化学研究所) (2017/9).
- 20) 今井 良輔, 山中 由也, 「環境と結合した有限サイズ Dicke 模型における量子相転移」基礎物理学研究所・研究会「熱場の量子論とその応用」(京都大学基礎物理学研究所) (2017/8).
- 21) 山中 由也, 桑原 幸朗, 中村 祐介, 「平衡及び非平衡下の非一様量子場系の繰り込み条件」基礎物理学研究所・研究会「熱場の量子論とその応用」(京都大学基礎物理学研究所) (2017/8).
- 22) 山中 由也, 中村 祐介, 高橋 淳一, 永井 康裕, 吉岡 良, 風間 勇輝, 桂樹 玲, 大久保 茂男, 「アルファクラスター構造状態に対する自発的対称性の破れを伴う場の量子論定式化」RCNP 研究会「核子・ストレンジネス多体系におけるクラター現象」(大阪大学 RCNP) (2017/8).
- 23) Y. Yamanaka, "Interpretation of N alpha Cluster States as Bose-Einstein Condensation in Quantum Field Theory with Proper Treatment of Zero Mode Fluctuation", Workshop on Nuclear Cluster Physics (Yokohama) (2016/11).
- 24) 今井 良輔, 山中 由也, 「徐々に駆動される系における時間発展の断熱性」日本物理学会 2017 年年次大会 (大阪大学豊中キャンパス) (2017/3).
- 25) 今井 良輔, 山中 由也, 「Bose-Einstein 凝縮体と光学共振器の相互作用による超流動-超固体転移」ImPACT 未来開拓研究会 2016 (国立京都国際会館) (2016/11).
- 26) 今井 良輔, 山中 由也, 「光共振器中の冷却原子気体系 Bose-Einstein 凝縮体の量子揺らぎ」日本物理学会 2016 年秋季大会 (金沢大学) (2016/9).
- 27) 今井 良輔, 山中 由也, 「冷却原子-共振器系における Dicke 転移の解析」理研シンポジウム・iTHES 研究会「熱場の量子論とその応用」(理化学研究所) (2016/8).
- 28) 桑原 幸朗, 今井 良輔, 山中 由也, 中村 祐介, 「非平衡 Thermo Field Dynamics における非一様系に対するエネルギーカウンター項の繰り込み」理研シンポジウム・iTHES 研究会「熱場の量子論とその応用」(理化学研究所) (2016/8).
- 29) 山中 由也, 中村 祐介, 高橋 淳一, 川口 拓磨, 永井 康裕, 吉岡 良, 鳥居 優作, 大久保 茂男, 「有限サイズ系におけるゼロモードの量子及び熱揺動と不安定性」理研シンポジウム・iTHES 研究会「熱場の量子論とその応用」(理化学研究所) (2016/8).

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.yamanakalab.sci.waseda.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名:

ローマ字氏名:

所属研究機関名:

部局名:

職名:

研究者番号(8桁):

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名: 大久保 茂男, 中村 祐介, 桑原 幸朗, 高橋 淳一, 今井 良輔, 川口 拓磨, 鳥居 優作, 大山 京尋, 桂樹 玲, 風間 勇輝, 早木 悠斗

ローマ字氏名: Shigeo OHKUBO, Yuusuke NAKAMURA, Yukiro KUWAHARA, Junichi TAKAHASHI, Ryousuke IMAI, Takuma KAWAGUCHI, Yuusaku TORII, Takahiro OYAMA, Rei KATSURAGI, Yuuki KAZAMA, Yuuto HAYAKI

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。