

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 5 月 24 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K17716

研究課題名(和文) 対称性の自発的破れと南部ゴールドストーンモードの一般論の構築

研究課題名(英文) Spontaneous symmetry breaking and Nambu-Goldstone modes

研究代表者

日高 義将 (Hidaka, Yoshimasa)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・専任研究員

研究者番号：00425604

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：対称性は現代物理における最も重要な概念のひとつである。対称性が自発的に破れるとそれとともに南部ゴールドストーン(NG)モードと呼ばれるギャップをもたない励起モードが現れることが知られている。対称性の自発的破れとNGモードの関係は、孤立系において詳細に解析されていた。本研究では、南部ゴールドストンの定理を古典、量子開放系を含む一般的な系への拡張を行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

対称性の自発的破れとそれとともに南部ゴールドストーン(NG)モードの間を関係付ける南部ゴールドストンの定理は、相対論的な系において1960年代に確立していたが時空対称性、開放系といった系においては、対称性の破れとNGモードの関係はよくわかっていなかった。本研究によって内部対称性の破れにおいて開放を含む広い系で適用可能な一般的な定理を導出することができたことで、自然界に存在する様々なギャップレスモードの理解に繋がったという点で学術的意義は大きいと思う。

研究成果の概要(英文)：Symmetry is one of the most important concepts in modern physics. It is known that gapless modes called the Nambu-Goldstone (NG) modes appear when symmetry is spontaneously broken. The relation between symmetry and the NG modes was established in isolated systems. In this work, we generalize the Nambu-Goldstone theory to open classical and quantum systems.

研究分野：ハドロン物理学

キーワード：自発的対称性の破れ 南部ゴールドストーンモード 開放系 超対称性

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

対称性とその自発的破れは、現代物理における重要な基本的概念のひとつである。特に、連続対称性が自発的に破れた場合には、波数がゼロの極限で振動数がゼロになる南部-Goldstone (NG) モードが現れることが知られている。ハドロン物理におけるパイ中間子、強磁性体におけるスピン波、格子結晶におけるフォノンなどがそれにあたる。古典的な系では、水面を広がる波や、固体中の音波もその一種とみなせる。このようなモードは、個々の系では解析されていたが、これらが系の持つ対称性の自発的破れによる普遍的な帰結であるという事が 1960 年代になって南部-Goldstone によって明らかにされ、その後の物理学に大きな影響を与えた。この NG モードの存在を保証する南部-Goldstone の定理は Lorentz 対称性が明白な系に置いて定式化され、連続対称性が自発的に破れると破れた対称性の生成子に一対一対応した線形分散を持つ NG モードが現れる事を示す。しかし、この南部-Goldstone の定理は、Lorentz 対称性という非常に高い対称性の元で成り立つ定理で、温度や密度が存在するようなより一般の系において、対称性の破れと NG モードの関係は最近まで完全には理解されていなかった。近年の研究の進展により内部対称性の自発的破れに伴う NG モードは Type-A 及び Type-B と呼ばれる 2 種類のモードに分類され、対称性の破れと NG モードの関係が明らかになった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、近年の進展を踏まえ、自発的対称性の破れと NG モードの関係をさらに一般化することである。特に、対称性の拡張と理論に課してある制限をはずすという 2 つの方向でこの問題に取り組む。

#### 対称性の拡張

1 つの方向性は対称性を拡張する方向である。内部対称性で議論した対称性を「時空対称性」、「超対称性」、「一般化された対称性」へと拡張する。時空対称性の自発的破れは、液晶、界面や量子渦の励起など応用範囲が広いが内部対称性の破れに比べて理解が進んでいないのが現状である。超対称性に関しては、近年冷却原子気体などにおいて結合定数を調整することで超対称性を持った物性系を実現できるようになってきた。そのような Lorentz 対称性のない系での超対称性の自発的破れとそれに伴う NG モードの関係を明らかにする。

「一般化された対称性」とは通常の点に作用する対称性と異なり、渦系のような広がりを持った物体に作用する対称性を指す。これによってトポロジカルな物体に対する自発的対称性の破れを議論することが可能となる。一般化された対称性の自発的破れと NG モードの数と分散関係の関係を明らかにする。

#### 理論に課してある制限をはずす

もう一つの方向は、理論に課してある制限をはずすことである。Lorentz 対称性という縛りをはずすことで、南部ゴールドストンの定理は物性系を含む広い範囲まで拡張された。本研究では保存則の制限をはずす。ネーターの定理によると対称性と保存則は密接な関係にある。NG モードの存在には保存則はどのような役割を担うだろうか？ 時間発展がハミルトニアンで記述されないような系では、対称性は保存則を意味しない。鳥や魚の群れのように個々が自由な運動するためマクロにはエネルギーや運動量が保存しないような(アクティブマター)系や外界と結合するためにエネルギーが保存しない開放系等がこれにあたる。例えば鳥の群れは、鳥がどこを向きという回転対称性は存在するがそれにとともなう角運動量のような保存則は成り立たないのである。本研究では、このような系の自発的対称性の破れを解析しより一般的な理論へ拡張を試みる。

### 3. 研究の方法

具体的な模型を平均場近似で解析する方法や、射影演算子法や記憶関数法といった非摂動的な方法を用いて解析する。また、開放系にも適用できる経路積分形式を用い、場の理論的手法である有効作用の方法や Ward-Takahashi 恒等式を応用することで低エネルギーにおける系の振る舞いを調べる。

### 4. 研究成果

#### 超対称性への拡張

ボソンフェルミオン混合気体ではフェッシュバツハ共鳴を用いて相互作用を調節することで、ボソンとフェルミオンの間に超対称性を持たせることができるようになってきた。この超対称性は相対論的な超対称性と異なり内部対称性とみなすことができ、ボソンの内部対称性破れと同様の議論をフェルミオンの内部対称性の破れに適用することで解析できる。まず、模型を使った平均場及び乱雑位相近似の範囲内でどのような分散関係が現れるか議論した。我々の解析した系では、超対称性の破れは Type-B に属し、2 乗分散した NG フェルミオンが現れることがわかった。また、現実の冷却原子系では、厳密な超対称性の実現は困難であり、陽な破れの効果を調べることが必要になる。我々は、小さな陽な破れがある場合に陽な破れと NG フェルミオンのギャップの関係性を、記憶関数法を用いて非摂動的に導き、乱雑位相近似の範囲内で、実験で実現されるパラメータ領域について具体的にスペクトルを解析した。

### 散逸系や非平衡定常系での自発的対称性の破れの一般論

自発的対称性の破れの解析を非平衡定常状態のような開放系に拡張した。このような系は、古典系では、ランジュバン方程式またはフォッカープランク方程式で記述され、量子系では、リンドブラッド方程式によって記述される。開放系では、孤立系で保存していた対称性の生成子はもはや保存しない。開放系における対称性を定義するために、我々は、このフォッカープランク方程式または、リンドブラッド方程式に対応した経路積分表示を用いた。経路積分表示に現れる作用を用いることで、作用の対称性を定義し、その自発的破れを議論することができた。さらに有効作用を構築し、Ward-Takahashi 恒等式を詳細に解析することによって内部対称性の自発的破れと NG モードの関係を明らかにした。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Yoshimasa Hidaka and Di-Lun Yang   | 4. 巻<br>98                |
| 2. 論文標題<br>Non-equilibrium Chiral Magnetic/Vortical Effects in Viscous Fluids  | 5. 発行年<br>2018年           |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review D  | 6. 最初と最後の頁<br>016012:1-9  |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1103/PhysRevD.98.016012  | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-                 |
| 1. 著者名<br>Yuki Minami and Yoshimasa Hidaka   | 4. 巻<br>97                |
| 2. 論文標題<br>Spontaneous symmetry breaking and Nambu-Goldstone modes in dissipative systems                                      | 5. 発行年<br>2018年           |
| 3. 雑誌名<br>PHYSICAL REVIEW E  | 6. 最初と最後の頁<br>012130:1-12 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br><a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevE.97.012130">https://doi.org/10.1103/PhysRevE.97.012130</a> | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-                 |
| 1. 著者名<br>Jean-Paul Blaizot, Yoshimasa Hidaka, and Daisuke Satow   | 4. 巻<br>96                |
| 2. 論文標題<br>Goldstino in supersymmetric Bose-Fermi mixtures in the presence of a Bose-Einstein condensate                       | 5. 発行年<br>2017年           |
| 3. 雑誌名<br>PHYSICAL REVIEW A  | 6. 最初と最後の頁<br>063617:1-14 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br><a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevA.96.063617">https://doi.org/10.1103/PhysRevA.96.063617</a> | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>該当する              |
| 1. 著者名<br>Yoshimasa Hidaka, Shi Pu, and Di-Lun Yang  | 4. 巻<br>97                |
| 2. 論文標題<br>Nonlinear responses of chiral fluids from kinetic theory  | 5. 発行年<br>2018年           |
| 3. 雑誌名<br>PHYSICAL REVIEW D  | 6. 最初と最後の頁<br>016004:1-21 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br><a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.016004">https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.016004</a> | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-                 |

|   |                        |
|---|------------------------|
| 1. 著者名<br>Kenji Fukushima and Yoshimasa Hidaka  | 4. 巻<br>2017           |
| 2. 論文標題<br>General formulae for dipole Wilson line correlators with the Color Glass Condensate                            | 5. 発行年<br>2017年        |
| 3. 雑誌名<br>Journal of High Energy Physics  | 6. 最初と最後の頁<br>114:1-20 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br><a href="https://doi.org/10.1007/JHEP11(2017)114">https://doi.org/10.1007/JHEP11(2017)114</a> | 査読の有無<br>有             |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-              |

|  |                          |
|--|--------------------------|
| 1. 著者名<br>Kenji Fukushima and Yoshimasa Hidaka   | 4. 巻<br>120              |
| 2. 論文標題<br>Electric Conductivity of Hot and Dense Quark Matter in a Magnetic Field with Landau Level Resummation via Kinetic Equations | 5. 発行年<br>2018年          |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review Letters  | 6. 最初と最後の頁<br>162301:1-6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevLett.120.162301   | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-                |

|  |                          |
|--|--------------------------|
| 1. 著者名<br>Tomoya Hayata and Yoshimasa Hidaka                                 | 4. 巻<br>95               |
| 2. 論文標題<br>Kinetic derivation of generalized phase space Chern-Simons theory | 5. 発行年<br>2017年          |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review B  | 6. 最初と最後の頁<br>125137-1-6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevB.95.125137                       | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難                                       | 国際共著<br>-                |

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 4件)

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Yoshimasa Hidaka  |
| 2. 発表標題<br>Chiral kinetic theory and magnetic effect                 |
| 3. 学会等名<br>The 7th Asian Triangle Heavy-Ion Conference (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|                                       |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>日高義将                       |
| 2. 発表標題<br>非平衡場の理論と対称性                |
| 3. 学会等名<br>非平衡物理の最前線 - 素粒子・宇宙から物性まで - |
| 4. 発表年<br>2017年                       |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Yoshimasa Hidaka  |
| 2. 発表標題<br>Spontaneous symmetry breaking in open systems                                   |
| 3. 学会等名<br>Workshop of Recent Developments in QCD and Quantum Field Theories (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2017年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Yoshimasa Hidaka   |
| 2. 発表標題<br>Spontaneous symmetry breaking in open systems                              |
| 3. 学会等名<br>Discrete Approaches to the Dynamics of Fields and Space-Time (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2017年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Yoshimasa Hidaka  |
| 2. 発表標題<br>Chiral kinetic equation with a collision term and anomalous transport from quantum field theory             |
| 3. 学会等名<br>Phases of Quantum Chromodynamics (QCD) and Beam Energy Scan Program with Heavy Ion Collisions (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2017年  |

|                                   |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>日高義将                   |
| 2. 発表標題<br>量子散逸系における南部・ゴールドストンの定理 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会                 |
| 4. 発表年<br>2017年                   |

〔図書〕 計1件

|  |                 |
|--|-----------------|
| 1. 著者名<br>日高義将                         | 4. 発行年<br>2016年 |
| 2. 出版社<br>丸善株式会社                       | 5. 総ページ数<br>7   |
| 3. 書名<br>パリティ: 南部-ゴールドストンの定理の半世紀ぶりの一般化 |                 |

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|