

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26400241

研究課題名（和文）宇宙・素粒子・物性・原子物理での自発的対称性の破れ

研究課題名（英文）Spontaneous Symmetry Breaking in astro, particle, condensed matter, and atomic physics

研究代表者

村山 斉（Murayama, Hitoshi）

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任教授

研究者番号：20222341

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：「自発的対称性の破れ」とは南部陽一郎のノーベル賞に結びついた概念で、宇宙・素粒子・物性・原子物理などの幅広い分野で現れる。しかし、今まですべての分野で通用する定量的な定式化がなかった。本研究では、ギャップのない南部・ゴールドストーン粒子がいくつ、どのような性質で現れるのかについて、有効場の理論を使って一般論を確立した。また、ゲージ化された対称性の場合についても考察し、空間の回転対称性が破れる可能性を指摘した。そして宇宙の暗黒物質や、素粒子の標準模型への応用も展開し、有効場理論の構築について、共形微分展開という新しい手法を提案した。さらに、超対称性が破れる新しい機構を提案した。

研究成果の概要（英文）：I established a general theory of spontaneous symmetry breaking, Nobel-prize-winning theory by Yoichiro Nambu, in a broad area of astro, particle, condensed matter, and atomic physics. I formulated an effective field theory that can predict unambiguously how many gapless Nambu-Goldstone bosons are there, and how they behave. I extended the case to gauged symmetries, and showed that spatial rotational symmetry can be spontaneously broken. In addition, I developed applications to the cosmic dark matter as well as standard model of particle physics, and proposed a new methodology dubbed covariant derivative expansion to construct effective field theories. I also proposed a new mechanism for spontaneous breaking of supersymmetry.

研究分野：素粒子物理

キーワード：対称性 素粒子物理 暗黒物質 物性物理 等質空間 宇宙物理 原子物理

1. 研究開始当初の背景

「自発的対称性の破れ」(Spontaneous Symmetry Breaking=SSB)は物理学一般、更に化学や生物と言った広い分野に跨がって適用される重要な概念である。1957年に発表された超伝導の Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) 理論に始まり、Anderson が発展させ、南部陽一郎らが素粒子物理学に持ち込み、大きな流れを作った。

一般に系の Hamiltonian や Lagrangian がある対称性 G を持っていて、系の基底状態はその部分群 H でしか不変でないということがある。この場合対称性 G が「自発的」に H に破れたという。すると系の基底状態は商空間 G/H を張ることになる。物理学の例では強い相互作用の π 中間子(素粒子)、結晶の格子振動、超流動、強磁性体、反強磁性体(物性)、中性子星(天体・原子核)、冷却原子系(原子)、cosmic string, domain wall(宇宙)などがある。更に光学異性体(化学)、生体の非対称性(生物)など他の分野にも広がる。また、gauge 理論の場合は Higgs 粒子(素粒子)、超伝導(物性)などの例もある。

Lorentz 不変な系では、Goldstone の定理がある。対称性 G が連続な内部対称性の場合、 H に含まれない G の生成子、つまり破れた対称性一つ一つに対応して、質量ゼロの scalar 粒子があることを予言する。質量ゼロとは、分散関係が $E = p$ と線形である。そして Coleman-Wess-Zumino の有効場理論により、これは商空間 G/H の構造、特に計量さえ与えれば幾何学的に理解できることがわかっている。これは非常に重要な定理であるものの、面白いことにこの定理をそのまま具現化している物理系は見つかっていない。 π 中間子の場合是对称性 $G = \text{SU}(3) \times \text{SU}(3)$ があらわに破れているし、ヒッグス粒子の場合そもそも Goldstone の定理を回避して、質量ゼロの粒子が現れないようにできる、ということが Englert-Brout、Higgs らの論文であった。つまり SSB の具体的な応用を考える際は、Goldstone の定理の仮定を緩める必要がある。

実際に SSB を示す系の殆どは、Lorentz 不変性がない。例えば強磁性体を考えてみると、Heisenberg の Hamiltonian は回転対称性 $G = \text{SO}(3)$ は持つが、Lorentz 変換 $\text{SO}(3,1)$ の対称性はない。基底状態でスピンの向きが揃うと、対称性は $H = \text{SO}(2)$ に自発的に破れる。そのため基底状態は商空間 $\text{SO}(3)/\text{SO}(2) = S^2$ をなし、二つの対称性が破れている。実は50年以上に亘って知られていたことだが、質量(ギャップ)のない励起は一つしかなく、しかも分散関係が二次 $E = p^2$ である。しかしなぜ破れた対称性の数よりもギャップのない励起の個数が少ないのか、なぜ分散関係が線形でないのか、一般論はなかった。

研究代表者村山は共同研究者で物性理論を研究している渡辺悠樹氏とともに、Lorentz 不変性がない場合の Goldstone 定理の一般化を行い、有効場の理論の枠組みを活

用して、対称性の破れの数とギャップのない励起の個数、そして基底状態の電荷密度(の一般化)の間に厳密な等式を証明した。また fine-tuning がない限り、どの場合が線形、または二次の分散関係になるかを示した。

更に内部対称性でなく時空の対称性を含む場合にも考察を進め、かなり理解が進んでいる。残る問題は具体的な応用と数学的な基礎付けである。

既に具体的な応用例として、冷却原子系の Bose-Einstein 凝縮での量子渦の格子がある。この場合は破れた対称性が二つの並進、一つの回転、粒子数の $U(1)$ 、と4つあるが、ギャップのない励起は Tkachenko モード一つしかない。このことを有効場の理論を使って具体的に示した。

加えて、ドイツ Bielefeld の Tomáš Brauner 氏とともに、対称性があらわに破れている場合でも、破れの項が群の生成子である場合は、ギャップが対称性だけから決められることを示した。

こうした実績を踏まえて、SSB の概念がどのようにさまざまな物理系に現れ、数学的にどう定式化されるのかを深めることを研究した。

2. 研究の目的

「自発的対称性の破れ」は素粒子、原子核、物性、原子、天体、宇宙物理学、更には化学、生物にもまたがる重要な概念である。特に2012年のヒッグス粒子の発見はこの概念の重要な実証であった。しかしその具体的な予言については近年まで実ははっきりしていなかった。代表者はローレンツ不変性を仮定せずに、幅広く応用できる定式化を発見、既に原子・物性系への応用を行って来た。しかしこれはまだ氷山の一角であり、更に様々な系に適用して具体的な現象を予言することが出来るはずである。本計画では時空の対称性を含め、「自発的対称性の破れ」の概念の具体的な帰結を研究した。

3. 研究の方法

まず有効場の理論の理論的基礎を明らかにした。

数学的構造に着いては、 G と H が semi-simple な場合、等質空間上の presymplectic structure は、symplectic homogeneous space へ射影できるファイバー束の構造があることが、Borel の定理と Alan Weinstein の助けによって証明できた。一方、semi-simple でない場合、特に central extension がある場合については、1974年に Bon-Yao Chu が反例を見つけている。反例が起きるのは Lie 環のコホモロジー群 $H_2(\mathfrak{g})$ が非自明な場合のみである。これは物理的には起こりそうもない例であるが、局所的・摂動論的には矛盾はなく、物理として問題ない。

また、時空の対称性を含む場合の inverse Higgs mechanism は純粹に経験則であり、その理論的背景ははっきりしていない。我々の研究で Noether current の間に線形関係があり、ギャップのない励起状態が独立でなく、線形従属になることがわかった。

Presymplectic structure がある場合、位相欠陥等のソリトン解の準古典量子化を行う際、moduli 空間に presymplectic structure が入り、量子化されたヒルベルト空間に違いが出るはずである。特に多重度や対称性の元での変換性に興味がある。これは強磁性体 (presymplectic structure が或る場合) と反強磁性体 (presymplectic structure がない場合) の Skyrmion について具体的にその違いを調べた。その結果、強磁性体の場合は空間並進の演算子の交換関係が中心拡大をおこし、交換しなくなることで、そして交換子が Skyrmion の winding number、つまりトポロジー不変量で決まることを示した。これは拡大超対称性で Witten と Olive が示したものとよく似ている。

対称性をあらわに破ると Goldstone モードが pseudo-Goldstone モードになるが、一般的にはそのギャップを正確に計算することはできない。しかし、Nicolis と Piazza がローレンツ不変な場合について、ギャップを正確に計算できる場合があることを指摘した。化学ポテンシャルのように、摂動が対称性の生成子の一つになっている場合である。我々は既に、この点がローレンツ不変性に関係なく成り立つことを示している。

素粒子物理学ではヒッグス粒子の性質について LHC の 13TeV のデータが出始める。現在よりも制限が厳しくなるか、標準模型からのずれも見え始めるかもしれない。特に semi-soft SUSY breaking とデータを照らし合わせて、検証可能性を詰めた。特に宇宙論からくるグラビティーノの質量への制限が強くなっており、LHC の結果との整合性が厳しい。この点新しい超対称性を破る機構を探し、整合性の高い模型を構築した。

また、もともとの南部理論である π 中間子は、あらわな破れによって質量を持った南部・ゴールドストーン粒子であるが、この考え方を宇宙の暗黒物質の候補に応用できることがわかった。その具体的な性質と、実験・観測での検出方法を研究した。

4. 研究成果

原子核、物性、原子物理学の関係では、非相対論的な非可換ゲージ理論が自発的に破れた際のヒッグス機構を一般的に考察した。ゴールドストーン粒子が Type-B である場合は、破れた対称性の数よりもゴールドストーン粒子が少ないため、ヒッグス機構に矛盾があることがわかるが、ゲージ場自身が凝縮することにより、足りないゴールドストーン粒子をゲージ場自身が生み出し、無矛盾な基底

状態があることを発見した。この時ゲージ場の凝縮から、回転対称性が必然的に破れ、これに対応する新たなゴールドストーン粒子が出ることも興味深い。

そして一般論を完成することができた。対称性 G が部分群 H に破れる際、群 G の Lie 環のホモロジー群が自明 $H_2(\mathfrak{g})=0$ の場合、 G/H から symplectic な G/K に射影が可能で、 G/K 上の symplectic form の pullback が G/H 上の presymplectic form になっていることがわかった。これを使うと、一般の G/H について、presymplectic structure を完全に分類する方法を編み出した。

素粒子・宇宙物理分野では、プリンストン高等研究所のポスドク Anson Hook と共同で、超対称性の自発的な破れについて、新たな機構を発見した。LHC での制限と、宇宙論におけるグラビティーへの制限が矛盾することがわかり、これを解決するため、超対称性の破れが $U(1)$ ゲージ対称性の D-term と呼ばれる項を通じて超対称性粒子の質量を生む機構である。これによりスピン 0 の超対称性粒子は数十 TeV と重くなり、ヒッグス粒子が予想よりも重かったことを自然に説明する。この機構は、以前 no-go theorem として、あり得ないとされていた新しいものである。一方スピン 1/2 の超対称性粒子は TeV 程度であり、今年からの LHC Run2 で発見される可能性を残す。同時にグラビティーノは非常に軽く宇宙論の制限を満たすことが同時にできる。粒子の質量の間の関係が既存の模型と異なるので、発見されれば模型を区別できる。これを「ベクトル・メディエーション」と呼んだ。

また、宇宙の暗黒物質が自発的対称性の破れで生まれる模型を提案した。QCD をコピーし、クォークの質量を縮退させると、 π 中間子が安定粒子となる。Wess-Zumino 項による 3^2 消滅によって熱的残存量が決まり、質量も QCD と似た 300MeV が適当である。暗黒物質の今までのパラダイムであった Weakly Interacting Massive Particle に反し、Strongly Interactive Massive Particle (SIMP) と呼んでいる。自己相互作用があるため、矮小銀河や合体銀河の質量分布の謎を自然に説明できる。特に標準模型との相互作用が、光子と kinetic mixing を持つ dark photon である場合について、競合するグループの論文の様々な間違いを指摘し、現在の制限を満たすパラメータを定めた。そして将来的な検証としては、現在建設中の SuperKEK-B では、monophoton 信号で missing mass を測定することにより、原理的に強い相互作用による共鳴状態を観測して spectroscopy が可能であることを指摘した。

さらにすばる望遠鏡に現在製作中の多天体分光器 PFS を取り付けて矮小銀河の質量分布を精密測定し、暗黒物質の自己相互作用を測ることが決定的な検証となるが、その第

一步として HSC による撮像観測から、今まで最も暗い矮小銀河を発見した。将来の分光観測の候補となる。現在さらにアキシオンによる相互作用の場合、また SIMP がスピン 1 のゲージ粒子である場合にも考察を進めている。加えて、こうした軽い暗黒物質の、質量パワースペクトルへの影響も調べて、出版済みである。

一方、標準模型での電弱対称性の破れにまつわる有効場の理論を構築する一般論を構築した。重い粒子を積分する際、今までの手法では計算後ゲージ不変な演算子の形にまとめるのが煩雑であった。共変微分展開によって有効演算子の一般的な公式を導いた。加えて物理観測量へのマッチングの方法を明確化した。

更に有効場理論についても、有効演算子の系統的な分類の方法を考察し、簡単な場合について出版した。現在一般論を構築し、100 ページに迫る論文を執筆中である。線形表現の場合は共形場理論、非線形表現の場合にはホッジ理論が使えることがわかった。また有効場の理論を構築する際、軽い粒子と重い粒子が両方飛ぶループのグラフからくるマッチングが必要な場合についても、昨年度提案した共変微分展開の方法が使えることを示し、関連論文の誤りを指摘し、現在投稿中である。

他にも、標準模型の電弱対称性の破れを起こすメカニズムを高ルミノシティ LHC で探索するため、WZ 終状態の再散乱による位相のズレを見る方法を提案した。以前提案した超対称性の自発的な破れが余剰次元の境界条件で起きる理論では、ヒッグス粒子の質量が自動的に大きくなることを発見した。超対称大統一理論の自発的な破れによる質量スペクトルを用い、ゲージ・メディエーションが自然に起こるモデルを提案した。また、以前提唱したニュートリノの混合角は群のハール測度で分布するというアナーキー理論が、現在の実験データと全く無矛盾であることを示した。

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 25 件)

Yonit Hochberg, Eric Kuflik, Hitoshi Murayama, SIMP Spectroscopy, *JHEP* **1605** (2016) 090, 1-36, 査読あり

DOI: [10.1007/JHEP05\(2016\)090](https://doi.org/10.1007/JHEP05(2016)090)

Brian Henning, Xiaochuan Lu, Tom Melia, Hitoshi Murayama, *Commun.Math.Phys.* **347** (2016) 363-388, 査読あり

DOI: [10.1007/s00220-015-2518-2](https://doi.org/10.1007/s00220-015-2518-2)

Anson Hook, Hitoshi Murayama, *Phys.Rev.* **D92** (2015) 015004, 1-5, 査読あり

り

DOI: [10.1103/PhysRevD.92.015004](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.92.015004)

Brian Henning, Xiaochuan Lu, Tom Melia, Hitoshi Murayama, *JHEP* **1601** (2016) 023, 1-95, 査読あり

DOI: [10.1007/JHEP01\(2016\)023](https://doi.org/10.1007/JHEP01(2016)023)

Yonit Hochberg, Eric Kuflik, Hitoshi Murayama, Tomer Volansky, Jay G. Wacker, *Phys.Rev.Lett.* **115** (2015) 021301, 1-5, 査読あり

DOI: [10.1103/PhysRevLett.115.021301](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.021301)

Haruki Watanabe, Hitoshi Murayama, *Phys.Rev.* **D90** (2014) 121703, 1-6, 査読あり DOI: [10.1103/PhysRevD.90.121703](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.90.121703)

Xiaochuan Lu, Hitoshi Murayama, *JHEP* **1408** (2014) 101, 1-22, 査読あり

DOI: [10.1007/JHEP08\(2014\)101](https://doi.org/10.1007/JHEP08(2014)101)

Haruki Watanabe, Hitoshi Murayama, *Phys.Rev.* **D89** (2014) no.10, 101701, 1-6, 査読あり

DOI: [10.1103/PhysRevD.89.101701](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.89.101701)

Haruki Watanabe, Hitoshi Murayama, *Phys.Rev.* **X4** (2014) 031057, 1-36, 査読あり

DOI: [10.1103/PhysRevX.4.031057](https://doi.org/10.1103/PhysRevX.4.031057)

Haruki Watanabe, Hitoshi Murayama, *Phys.Rev.Lett.* **112** (2014) 191804, 1-5, 査読あり

DOI: [10.1103/PhysRevLett.112.191804](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.191804)

[学会発表](計 43 件)

村山 齊, “SIMP dark matter and EFT”, Duham-KEK-KIPMU-KIAS Workshop (招待講演)(国際学会), 2016 年 10 月 28 日, KIAS, Seoul (Korea)

村山 齊, “Dark Pions as Dark Matter”, CERN Theory Institute (国際学会), 2016 年 8 月 4 日, CERN, Geneva (Switzerland)

村山 齊, “Particle physics beyond Higgs”, TeVPA2015 (招待講演) 2015 年 10 月 29 日, 柏の葉カンファレンスセンター(千葉県柏市)

村山 齊, “Beyond the Standard Model”, 2015 年 06 月 17~20 日, Invisibles school 2015 (招待講演)(国際学会), La Cristalera, Miraflores de la Sierra, Madrid (Spain)

村山 齊, “Higgs and Goldstone bosons with and without Lorentz invariance”, Higgs Modes in Condensed Matter and Quantum Gases (招待講演)(国際学会), 2014 年 06 月 25 日, 京都大学基礎物理学研究所(京都府京都市)

村山 齊, “What’s wrong with Goldstone?” Low Energy Challenges for High Energy Physicists (招待講演)(国際学会), 2014 年 05 月 26 日, Perimeter Institute, Ontario (Canada)

村山 齊, “磁石からヒッグス粒子まで”, 南部コロキウム(招待講演) 2014 年 05 月 22 日, 大阪大学(大阪府豊中市)

〔図書〕(計1件)

村山斉、集英社新書、「宇宙を創る実験」、
2014、253

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

報道関連情報

(1) SIMP 関連合計 70 件

2015 年 7 月の IPMU 記事「新理論が示す、
ダークマターは湯川粒子に瓜二つ」

<http://www.ipmu.jp/ja/node/2217>

海外 WEB news 61 件 (Science World
Report 他 60 件)

国内 WEB news 7 件 (NIKKEI NET 他 6 件)

国内雑誌 2 件

主なものでは、

2015 年 8 月 25 日 日経サイエンス(日本経済
新聞出版社) : 10 月号

「WIMP ではなくて SIMP」インタビュー
p40-p43

2015 年 8 月 26 日 Newton(ニュートンプレ
ス)「ダークマターの正体にせまる新たな理
論」p136

2015 年 11 月 5 日 NHK BS コズミックフロ
ント NEXT 「ダークマター 謎の物質の正体
は？」(60 分)

(2) 矮小銀河関連合計 2 件

2016 年 11 月の IPMU 記事 「銀河系に付随
する極めて暗い衛星銀河の発見」

<http://www.ipmu.jp/ja/20161122-FaintDwarf>

海外 WEB news 2 件(Big Island Now 他 1 件)

アウトリーチ活動情報

年に 20 回ほどアウトリーチの一般向け講演
など。テレビでの科学啓蒙活動の主なものは

(1) NHK 総合テレビ ドキュメンタリー

「村山斉の宇宙をめぐる大冒険」

2017 年 1 月 6 日, 2 月 5 日(再) (60 分)

(2) NHK BS コズミックフロント NEXT

「村山斉の宇宙をめぐる大冒険 宇宙の始
まりを探る」2017 年 2 月 9 日 (60 分)

「村山斉の宇宙をめぐる大冒険 宇宙に終
わりはあるのか？」2017 年 2 月 16 日 (60
分)

ホームページ情報

<http://hitoshi.berkeley.edu>

<http://www.ipmu.jp/ja>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村山斉 (MURAYAMA, Hitoshi)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・

特任教授

研究者番号 : 2 0 2 2 2 3 4 1