

令和元年6月14日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05315

研究課題名(和文)素粒子の標準理論が抱える諸問題を古典的スケール不変性に基づいて解決する

研究課題名(英文)Extension of the standard model based on scale invariance

研究代表者

久保 治輔 (Kubo, Jisuke)

富山大学・大学院理工学研究部(理学)・客員教授

研究者番号：40211213

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：非可換ゲージ理論の非摂動効果によってスケール不変性が自発的に破れ、エネルギースケールが標準理論側に伝達される機構について考察した。スケール不変性の自発的に破れに伴う Nambu-Goldstone 粒子が宇宙の暗黒物質の候補になれば、暗黒物質の質量と標準理論のエネルギースケールの起源を統一的に説明できることを示した。さらに、hidden sectorのカイラル相転移とスケール相転移が将来観測可能な背景重力波を生成することが分かり、研究の重点をこの背景重力波に移し新たな研究の展開を図った。これらの研究結果は多くの関連している海外の研究者からも注目され、国際共同研究を進めるきっかけとなっている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

素粒子の標準模型に登場する素粒子の質量はヒッグス機構を介して生成される。しかし、この質量エネルギーは宇宙全体のエネルギーの約0.1%にすぎない。当研究において、標準模型をスケール不変性に基づき(質量の次元を持ったパラメータが存在しない理論に)拡張することによって暗黒物質の質量も含めた宇宙全体のエネルギーの約30%に相当するエネルギーの起源を統一的に説明できることを示した。また、宇宙初期でのスケール不変性の自発的な破れは相転移として現れ、宇宙背景重力波が生成される。この背景重力波は現在稼働しているKARGA等の実験や将来計画又は思案されているDECIGO等の実験で観測可能であることも指摘した。

研究成果の概要(英文)：Scale invariant extension of the standard model (SM) with a strongly interacting non-abelian gauge hidden sector, in which the scale symmetry or the chiral symmetry is spontaneously broken, has been considered.

The scale, generated in the hidden gauge sector, is transmitted to the SM sector. Because of the SB of the symmetry in the hidden sector there exist pseudo Nambu-Goldstone (NG) bosons, and we have shown that these pseudo NG bosons can be a good dark matter (DM) candidate. In this way we have obtained a unified description of genesis of the EW energy scale and the DM. The SB of the scale symmetry appears as a cosmological phase transition (PT) in the early Universe. We have found that the gravitational wave background produced by this PT can be measured in various experiments that are currently running or planned for the future. These results have attracted many researchers in the field and stimulate international collaborations.

研究分野：素粒子論

キーワード：素粒子の標準理論の拡張 スケール不変性 背景重力波

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

素粒子の標準理論には、近年の観測結果(ニュートリノの質量、暗黒物質の存在、宇宙のバリオン数=宇宙の物質と反物質の非対称性)を説明できないという基本的問題があり、これらの問題は標準理論を拡張することによって解決されると信じられているが、どのように拡張されるべきなのかはいまだに分かっていない。標準理論の拡張の代表的な例として、Higgs 粒子の質量の量子補正が 2 次発散をしているということから、質量の量子補正を抑えるための対称性・超対称性・を導入することによって理論を拡張する研究が多くの研究者によって精力的行なわれてきた。また、Higgs 粒子の質量の 2 次発散を避けるため、標準理論をフェルミオンのみから成る理論に拡張し、標準理論のゲージ対称性は hidden sector の非摂動効果で破り、Higgs 粒子はフェルミオンから成る複合粒子であるとする模型 (technicolor 模型) が考えられた。しかし、最近の CERN の LHC 実験の結果によると、超対称性が低エネルギーで実現しているという兆しがない。同様、CERN の LEP の精密実験の結果は(walking technicolor 模型を除いては)technicolor 模型を実質的に排除している。これとは裏腹に、Higgs の質量の値(126 GeV) とトップクォークの質量の値(173 GeV)は、標準理論の cutoff スケールが少なくとも Planck スケール $\approx 10^{19}$ GeV (つまり、標準理論は少なくとも Planck スケールまで数学的に無矛盾な理論)であることを意味しており、標準理論の基本的構造を大幅に変更することなくこの特徴を保ちながら行なう拡張は再認識されつつあった。このような状況のもとで、古典的にはエネルギースケールの定義できない理論(質量のような次元をもったパラメータを含まない古典的にスケール不変な理論)の最近の研究は、標準理論の(Planck スケールより 16 桁以上も小さい)エネルギースケールの起源(即ち Higgs 粒子の質量の起源)について新たな可能性を与えていた。

2. 研究の目的

素粒子の標準理論に新たに hidden sector を導入し、hidden sector を記述する非可換ゲージ理論の非摂動効果によって生成されたエネルギースケールが標準理論のエネルギースケールの起源であると仮定して、古典的スケール不変性に基づき標準理論の拡張を図る。このエネルギースケール生成機構に伴って存在する暗黒物質の直接・間接観測可能性を調査する等、hidden sector の実験的検証可能性を調べる。更に、高温度における hidden sector の相転移が誘発する弱電相転移は宇宙のバリオン数を説明できるかを調べ、標準理論のエネルギースケール、暗黒物質の質量、宇宙のバリオン数のそれぞれの起源が統一的に理解される模型を構築し、標準理論の抱える諸問題を解決することが目的である。

3. 研究の方法

当研究は、素粒子の理論的・現象論的である。その方法は、素粒子の模型、またはあるクラスの模型を考察し、それらの模型が予言する物理量(素粒子の質量、暗黒物質の性質、背景重力波等)を定量的に評価し、既に知られている実験結果を再現することができるか否か、或いは、まだ実験結果がない場合は、将来の実験で検証可能か否かを調査することである。これによって新しい知見を得ることができると期待している。

4. 研究成果

当研究では、素粒子の標準理論に新たに hidden sector を導入し、hidden sector の非摂動効果によって生成されたエネルギースケールが標準理論のエネルギースケールの起源であると仮定し、標準理論のエネルギースケール、暗黒物質の質量、宇宙のバリオン数のそれぞれの起源が統一的に理解されるように標準理論の拡張することを目指している。エネルギースケールの生成機構については、二つのタイプの非可換ゲージ理論の非摂動効果に基づく機構が提案されており、ここではそれぞれ typeA と B と呼んでいる。

当初、電弱相転移に関する研究とコライダー実験による hidden sector の検証可能性に関する研究を深める計画であったが、hidden sector のカイラル相転移(type A) とスケール相転移(type B)が将来観測可能な背景重力波を生成する可能性があることが分かり、研究の重点をこの背景重力波に移した。このエネルギースケールの生成は初期宇宙に相転移として現れ、相転移が一次相転移の場合、将来観測可能な背景重力波が生じる可能性がある。type A において、初期宇宙に起こる hidden sector のカイラル相転移が一次相転移になるパラメータ領域を考察した。この領域では背景重力波が生成されるので、重力波スペクトルを計算し検出可能性を調べた。その結果、日本で計画が思案されている DECIGO 実験によって観測可能であることが分かった(図1)。

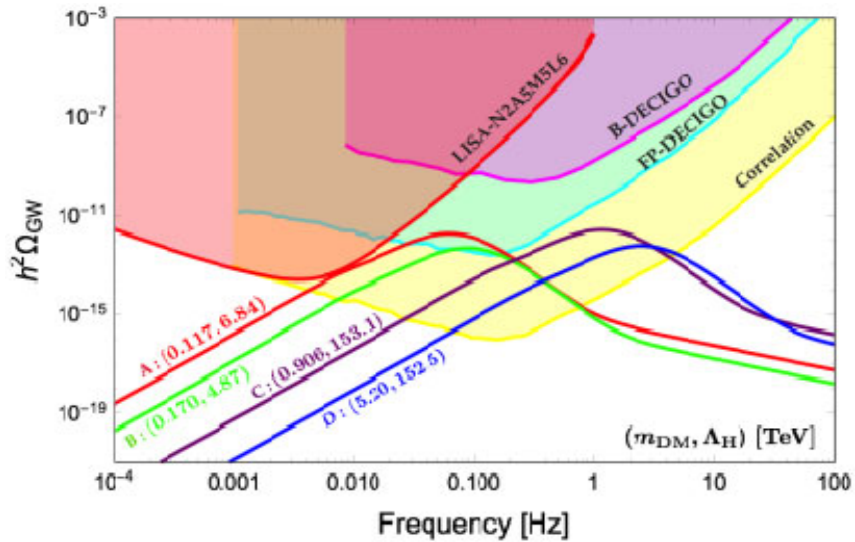


図1. type Aにおいて、hidden sector のカイラル相転移が一次相転移になるパラメータセット A-D を考察した。横軸が背景重力波の周波数で縦軸はその強度である。図からわかるように DECIGO 実験によって type A が生成する重力波は観測可能であることが分かった。

また、typeB(ボゾン対の凝縮によるスケール不変性の自発的に破れに基づく)については、hidden sector のフレーバー対称性 SU(2)を U(1)xU(1)に破ることにより、暗黒物質の対消滅モードを増やすことを見出し、それより暗黒物質の理論的予言が実験と無矛盾に存在できる領域が大幅に増えることを指摘した (図2)。

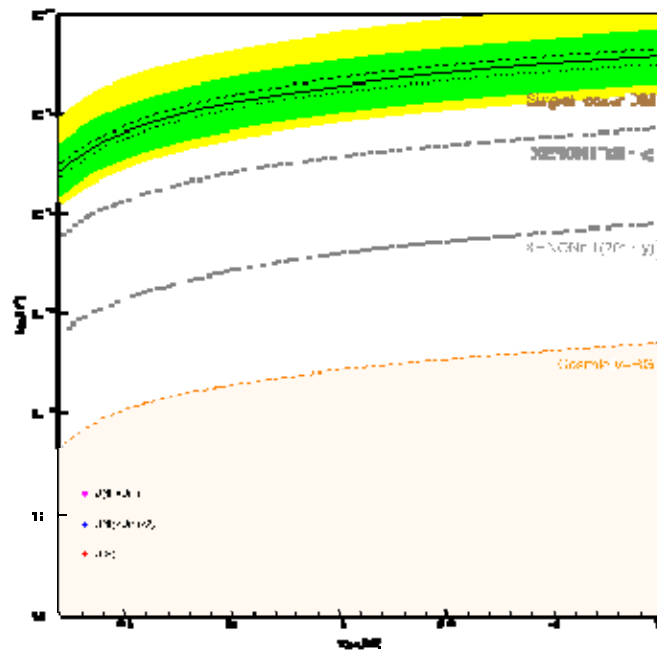


図2. typeBのフレーバー対称性SU(2)をU(1)xU(1)に破ることにより、暗黒物質の対消滅モードが増し、暗黒物質の理論的予言が実験と無矛盾に存在できる領域が大幅に増える。横軸は暗黒物質の質量で縦軸は暗黒物質と物質の散乱断面積である。横に走る黄色と緑の帯は実験 (XENON) からの制限で、それより下の領域が許されている領域である。フレーバー対称性を破ることにより、赤い領域が下方に広がっているのが分かる。

また、大きな質量を持つ右巻きニュートリノ由来の量子補正が、標準理論の Higgs 質量項を生成する模型 (Neutrino option model) に着目した。大きな右巻きニュートリノ質量がスケール不変性の自発的破れによって生成される場合は、相転移温度が高くなり生成される背景重力波周波数帯は LIGO 等の周波数帯と重なっている可能性がある。最終年度では、Neutrino option model のスケール不変性の自発的破れによって生成された背景重力波は、LIGOやKAGRAなどの地上重力波検出器で検出可能であることを指摘した (図3)。

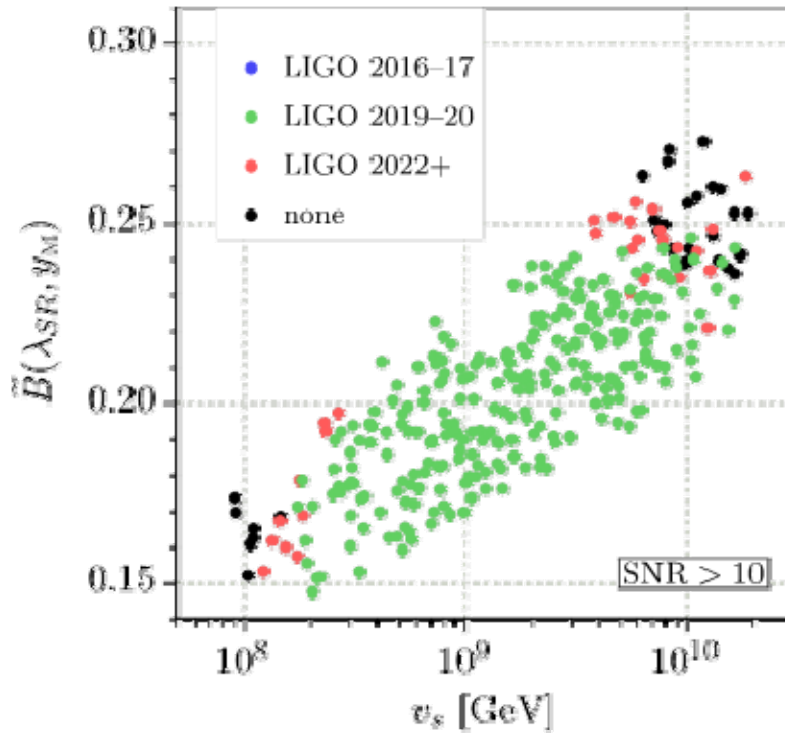


図 3. 右巻きニュートリノの質量生成機構を LIGO によって検証できる領域。縦軸は、スカラーポテンシャルを決めるパラメータ、横軸はスケール不変性を自発的に破るスカラー場の真空期待値で、Signal-to-noise ratio (SNR) が 10 以上の点を表示してある。

非可換ゲージ理論の非摂動効果によってスケール不変性が自発的に破れ、エネルギースケールが標準理論側に伝達される機構について考察した。この研究において考察されたモデルでは、スケール不変性が自発的に破れた後に残っているフレーバー対称性のおかげで Nambu-Goldstone 粒子が安定な宇宙の暗黒物質の候補になれ、暗黒物質の質量と標準理論のエネルギースケールの起源を統一的に説明できることを示した。さらに、hidden sector のカイラル相転移 (type A) とスケール相転移 (type B) が将来観測可能な背景重力波を生成する可能性があることが分かり、研究の重点をこの背景重力波に移し研究の新たに展開を図った。これは、最近重力波が実際に観測されて以来、hidden sector の相転移由来の背景重力波に大きな関心が寄せられているからである。これらの結果を様々な国際会議[①, ②, ③, ④]で発表した。これら研究結果は多くの関連している海外の研究者からも注目され、新たな国際共同研究を進めるきっかけとなっている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

① J. Kubo,

“Scale-genesis - Origin of gravitational waves”,
Int. J. Mod. Phys. A33 (2018) no. 31, 1844019 (査読有)
DOI: 10.1142/S0217751X18440190

② V. Brdar, A. J. Helmboldt and J. Kubo,

“Gravitational Waves from First-Order Phase Transitions:
LIGO as a Window to Unexplored Seesaw Scales,”
JCAP 1902 (2019) 021 (19 pages) (査読有)
DOI: 10.1088/1475-7516/2019/02/021

③ J. Kubo and M. Yamada,

“Scale and confinement phase transitions in scale invariant SU(N) scalar gauge theory”,
JHEP 1810 (2018) 003 (28 pages) (査読有)
DOI: 10.1007/JHEP10(2018)003

④ J. Kubo and Q. M. B. Soesanto M. Yamada,

“Non-perturbative electroweak-scalegenesis on the test bench of dark matter detection”,
Eur. Phys. J. C78 (2018) no. 3, 218 (10 pages) (査読有)
DOI: 10.1140/epjc/s10052-018-5713-4

- ⑤ M. Aoki, D. Kaneko and J. Kubo,
“Multicomponent Dark Matter in Radiative Seesaw Models”,
Front. in Phys. 5 (2017) 53 (16 pages) (査読有)
DOI: 10.3389/fphy.2017.00053
- ⑥ M. Aoki, H. Goto and J. Kubo,
“Gravitational Waves from Hidden QCD Phase Transition”,
Phys.Rev. D96 (2017) no.7, 075045 (16 pages) (査読有)
DOI: 10.1103/PhysRevD.96.075045
- ⑦ J. Kubo and M. Yamada,
“Scale genesis and gravitational wave in a classically scale invariant extension of the
standard model”, CAP 1612 (2016) no.12, 001 (25 pages) (査読有)
DOI: 10.1088/1475-7516/2016/12/001
- ⑧ J. Kubo and M. Yamada,
“Genesis of electroweak and dark matter scales from a bilinear scalar condensate”,
Phys. Rev. D93 (2016) 075016 (6 pages) (査読有)
10.1103/PhysRevD.93.075016

[学会発表] (計 4 件)

- ①招待講演 発表者:久保治輔
“Gravitational Waves from Dark Matter Genesis”,
Particle, Astroparticle and Cosmology Tallinn Symposium,
June18-22, 2018, Estonian Academy of Sciences, Tallinn, Estonia
- ②招待講演 発表者:久保治輔
“Dynamical scale symmetry breaking and scale phase transition”
The conference “Scalars 2017”, Nov.30-Dec.3, 2017, University of Warsaw, Poland
- ③招待講演 発表者:久保治輔
“Physics beyond the standard model may be described by a massless QFT”,
Zimmermann Memorial Symposium,
Max-Planck-Institute for Physics, Munich, Germany
- ④講演 発表者:久保治輔
“Gravitational Waves from Dark Matter Genesis”,
The 13th International Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics,
Nov. 28-Dec.2, 2016, University of Sydney, Australia.

※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。