

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03844

研究課題名(和文) スケール不変性に基づく標準理論の拡張と重力波による検証可能性

研究課題名(英文) Extension of the standard model based on scale invariance and its verification through gravitational waves

研究代表者

久保 治輔 (Kubo, Jisuke)

富山大学・理学部・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) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：素粒子の質量、暗黒物質の質量、プランク質量の起源を明らかにするために、スケール不変性に基づき標準理論とアインシュタンの重力理論の拡張を図った。宇宙初期のスケール相転移によって生成された重力波が宇宙空間検出器から地上検出器までの周波数帯で検出可能かを調べた。その結果、ヨーロッパのBBOにおいては5年間以上の観測を継続すれば検証可能であるが、日本のDECIGOの実験では難しいということが分かった。また、モデルには暗黒物質が存在でき、スケール不変性が自発的に破れる際に生ずる南部-Goldstoneボゾンが宇宙のインフレーションに欠かせないインフラトンの役割を果たしていることを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

暗黒物質を含めた素粒子の質量の起源は何かは分かっていない。質量次元があるパラメータを持つ理論では答えは見出せない。従って、質量次元がないパラメータを持つ理論(スケール不変な理論)に基づいて質量の起源を追求することは、ごく自然な方向である。当研究では、スケール不変性を指導原理とし素粒子の質量がダイナミカルに生成されるよう標準理論を拡張した。現実の世界にはスケールが存在しているため、スケール不変性は自発的に破れていなければならない。この自発的破れが宇宙初期に起こったとすると、それは相転移として起こり重力波が生成される。この重力波が将来の実験において観測可能かを調べることは、意義がある研究である。

研究成果の概要(英文)：In order to explain simultaneously the origin of elementary particle mass, dark matter mass, and Planck mass, we have extended, based on scale invariance, the Standard Model for particle physics and Einstein's theory of gravity. We have investigated whether gravitational wave background generated by the scale phase transition in the early Universe can be detected in the frequency band from space detectors to ground detectors. As a result, it is found that it is possible to detect the gravitational wave background in the European BBO experiment if the observation continues for more than 5 years, but it is very difficult in the DECIGO experiment in Japan. We also found that a realistic dark matter candidate can exist, and that the Nambu-Goldstone boson, which occurs when scale invariance is spontaneously broken, plays the role of an the inflaton in the inflationary expanding Universe.

研究分野：素粒子論

キーワード：素粒子論 スケール不変性 重力波 宇宙相転移 宇宙のインフレーション

1. 研究開始当初の背景

素粒子の標準理論を拡張する代表的な例として、2次発散をしている Higgs 粒子の質量の量子補正を抑えるために超対称性を導入し理論を拡張する研究が長年にわたって精力的に行なわれてきた。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構成される理論に拡張し、標準理論のゲージ対称性は標準理論とは別のセクタ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)も考えられた。しかしながら、最近の CERN における 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候がなく、同様、CERN の LEP 精密実験の結果は technicolor 模型を実質的に排除している。

一方、実際の Higgs 粒子の質量値とトップクォークの質量値は、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という可能性を意味しており、Higgs 場の2次発散が原因である"naturalness"の問題は存在していないという Bardeen の指摘が再認識されつつある。Bardeen の指摘は、Higgs 場の質量はスケール不変性をソフトに破っているだけで、TeV 領域と Planck スケールまでの中間領域に新物理が存在しない場合、2次発散の問題はないということに基づいている。素粒子の標準理論の粒子は Higgs 機構によって質量を得ている。しかし、Higgs 場の2次発散の問題はないとしても、Higgs 粒子自身の質量の起原は分からないままである。また、Higgs 機構によって得られた質量は宇宙全体のエネルギーと比べると、わずか1%にしか過ぎないし、Higgs 機構は宇宙全体のエネルギーの27%を占める暗黒物質に質量を与えることもできない。標準理論において、Higgs 場の質量項は唯一のスケール不変性破る項であり、この項がゼロの極限で標準理論は古典的にスケール不変な理論になっている。このスケール不変性を自発的に破り、同時に暗黒物質に質量を与えることができれば、宇宙の30%以上のエネルギーの起源を明らかにすることができる。近年この考えに基づく研究が精力的になされてきた。当研究代表者は共同研究において、エネルギースケール生成が非可換ゲージ理論の非摂動効果でおこった場合、有限温度では一次相転移になっているという指摘をした。つまり、このスケール生成一次相転移が宇宙の初期におこると背景重力波が生成され、Higgs の質量項や暗黒物質の生成機構が重力波の観測によって検証される可能性がある。

2. 研究の目的

標準理論の素粒子の質量、暗黒物質の質量、プランク質量の起源を明らかにするために、スケール不変性に基づき標準理論とアインシュタンの重力理論の拡張を図る。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ることにより質量が生成されると仮定すると、宇宙初期に起こったスケール相転移が背景重力波を生成する可能性がある。当研究では、スケール不変性に基づく素粒子の新物理由来の重力波が、宇宙空間検出器(LISA, DECIGO, BBO)から地上検出器(LIGO, Virgo, KAGRA)までの周波数帯で検出可能かを調べ、暗黒物質を含めた素粒子の質量の起源は何かという「問い」を重力波を使って解明できないかを追求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・現象論的研究である。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

当研究の目的は、暗黒物質を含めた素粒子の質量の起源は何かという「問い」に対するスケール不変性に基づき標準理論を拡張するという「答え」を、重力波を使って検証できないかを調べることである。QCD の強い相互作用は、カイラル対称性を自発的に破ると同時にスケール不変性も自発的に破り、ハドロンの質量の99%を生成する。素粒子の標準理論に新たに QCD と類似した hidden QCD sector を導入し、そこで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(Higgs 質量項の起源)であると仮定した。このスケール生成が有限温度で一次相転移となっているパラメータ領域において、宇宙相転移によって生成される背景重力波スペクトルが将来の実験で観測可能であることを調べた。この宇宙一次相転移の継続時間は、宇宙の膨張率を考慮すると、非常に短いことが判明したので、その効果を取り入れた。その結果、図1が示すように、ヨーロッパで検討されている Big Bang Observer (BBO) において5年間以上の観

測を継続すれば、検出可能であるという結論に至った。しかし、日本で検討されている DECIGO の実験では、背景重力波の検証は非常に難しいということが分かった。また、同じパラメータ領域において、模型の予言する現実的な暗黒物質(カイラル対称性が自発的に破れる際に生ずる南部-Goldstone(NG) ボゾン)が存在できることを確認した。

また、プランク質量、暗黒物質の質量、Higgs 質量、つまり、すべてのエネルギースケールの起源が同じであるような二つ模型を構築した。一つ目の模型においては、二つのスカラー場を導入し摂動論的(Coleman-Weinberg)効果によってスケール不変性を自発的に破る機構を採用した(模型 1)。スケール不変性の破れによってスカラー場と重力場の結合からプランク質量が生成される。このスカラー場は、宇宙のインフレーション的膨脹を記述するのに必要なインフラトン場の役目を果たすこと、また、もう一方のスカラー場は、宇宙の暗黒物質になれることを見出した。二つ目の模型では、非可換ゲージ理論の強い相互作用を利用し、カイラル対称性を自発的に破ると同時にスケール不変性も自発的に破る機構を採用した(模型 2)。この模型では、非可換ゲージ理論と重力理論を繋げているスカラー場がインフラトン場の役目を果たしており、スケール不変性が自発的に破れる際に生ずる NG ボゾンが宇宙の暗黒物質になれるかを調べた。いずれの模型も現実的なインフレーション宇宙を記述できていることを確認した(図 2)。スケール不変な項、Ricci scalar の二乗と Weyl tensor の二乗をアインシュタインの重力理論に加えた重力理論(Quadratic Gravity)は、くりこみ可能である。つまり、Quadratic Gravity は、アインシュタインの重力理論と比べると二つ多く独立なパラメータを含んでいるが、量子化されてもその数は増えることはない。しかし、Weyl tensor の二乗が加わると二つのスピン 2 の粒子が存在する。一つは質量ゼロの(通常の)graviton でもう一つは、質量が有限であるが、その運動項の符号が逆になっているため量子理論の確立解釈ができない。この質量が有限のスピン 2 の粒子は、massive spin-two ghost と呼ばれ、その存在のために Quadratic Gravity は完全な量子重力理論として見なされていない。この問題を克服するための様々な案はあるが、まだ満足のいく解決策は存在していない。Quadratic Gravity の重力場は、graviton と massive spin-two ghost を同時に含んでいる複雑な構造をしている。当研究代表者は共同研究で、この二つの自由度を完全に分離し、つまり、graviton を記述する場と massive spin-two ghost を記述する場が独立に存在している理論に書き換えることにより、理論の共变的正準量子化に成功した。この量子化は演算子形式であるため、Quadratic Gravity における確立解釈の可能性(ユニタリ性)の問題について新たな理論的展開を図ることができる。

さらに、宇宙のインフレーション理論をスケール不変性に基づいて拡張することにも成功した。特に、Quadratic Gravity の Weyl tensor の二乗の項がスケール不変性の自発的破れに重要な役割を果たしていることを見出した。

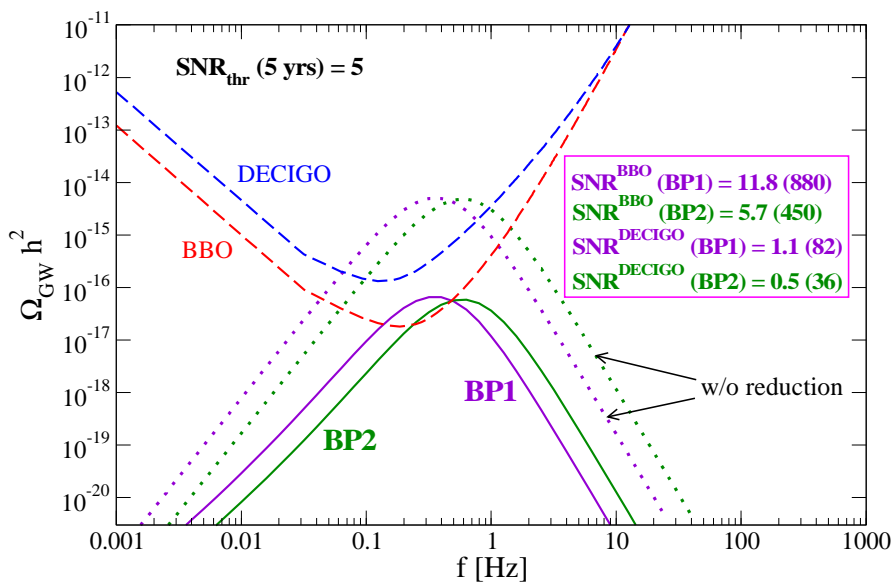


図 1. 背景重力波スペクトル. 縦軸: エネルギー密度. 横軸: 周波数. 背景重力波の検証は、BBO において 5 年間以上の観測を継続すれば、検出可能であるということ、しかし、DECIGO の実験では、非常に難しいということを示している。

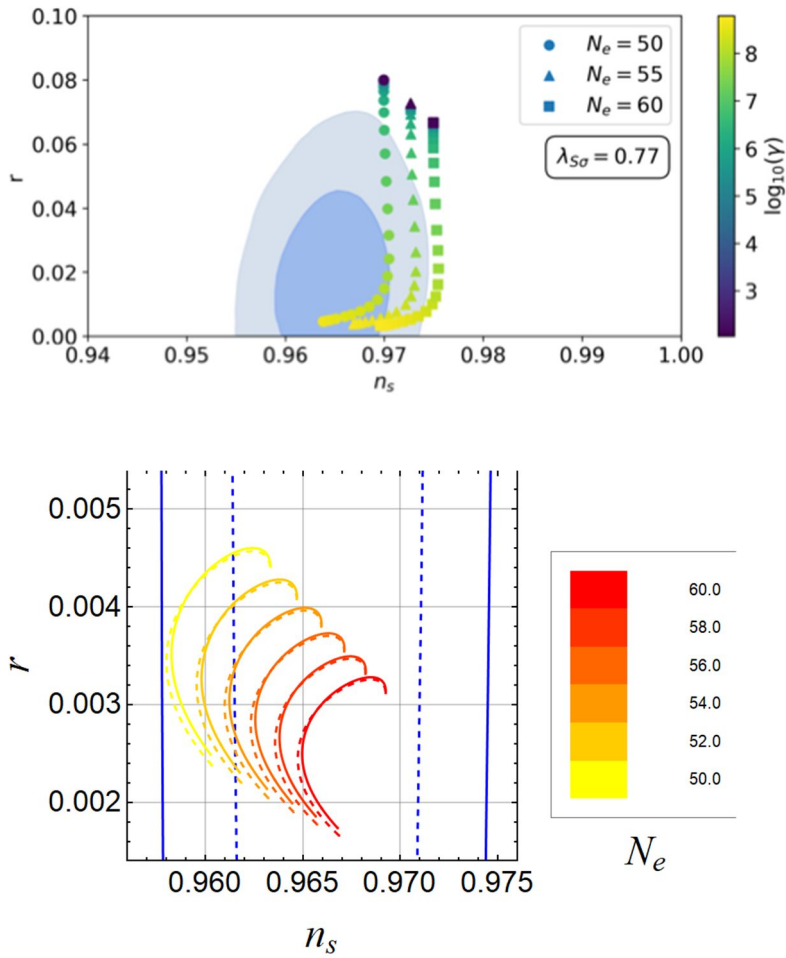


図2. インフレーションパラメータとCMBの制限. 縦軸は tensor-to-scalar ratio r 、横軸は scalar spectral index n_s を示している。上の図は模型 1、下は模型 2の予言で、 r が非常に小さいのは、模型のスケール不変性の帰結である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件／うち国際共著 10件／うちオープンアクセス 12件）

1. 著者名 J. Kubo and J. Kuntz	4. 巻 106
2. 論文標題 Spontaneous Conformal Symmetry Breaking and Quantum Quadratic Gravity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 126015(22 p.)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.126015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 J. Kubo, J. Kuntz, J. Rezaeck and P. Saake	4. 巻 11
2. 論文標題 Inflation with massive spin-2 ghosts	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (JCAP)	6. 最初と最後の頁 49(13 p.)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2022/11/049	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 J. Kubo and J. Kuntz	4. 巻 39
2. 論文標題 Analysis of unitarity in conformal quantum gravity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 175010(33 p.)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/ac8199	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 J. Kubo 他5名	4. 巻 8
2. 論文標題 Unified emergence of energy scales and cosmic inflation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics (JHEP)	6. 最初と最後の頁 016 (31 p.)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP08(2021)016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 V. Brdar, S. Jana, J. Kubo and M. Lindner	4. 巻 820
2. 論文標題 Semi-secretly interacting Axion-like particle as an explanation of Fermilab muon g-2 measurement	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136529 (5 p.)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136529	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 M. Aoki, J. Kubo and J. Yang	4. 巻 1
2. 論文標題 Inflation and dark matter after spontaneous Planck scale generation by hidden chiral symmetry breaking	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (JCAP)	6. 最初と最後の頁 005 (26 p.)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2022/01/005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 M. Aoki, V. Brdar and J. Kubo	4. 巻 102
2. 論文標題 Heavy dark matter, neutrino masses, and Higgs naturalness from a strongly interacting hidden sector	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 035026(13 p.)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.035026	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 M. Aoki and J. Kubo	4. 巻 4
2. 論文標題 Gravitational waves from chiral phase transition in a conformally extended standard model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (JCAP)	6. 最初と最後の頁 1/29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2020/04/001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 J. Kubo, M. Lindner, K. Schmitz and M. Yamada	4. 巻 100
2. 論文標題 Planck mass and inflation as consequences of dynamically broken scale invariance	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 015037(17 p.)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.015037	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 J. Kubo	4. 巻 941
2. 論文標題 Physics beyond the standard model may be described by a massless QFT	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Physics B	6. 最初と最後の頁 911-917
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysb.2018.01.013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 V. Brdar, A. Helmboldt, and J. Kubo	4. 巻 2
2. 論文標題 Gravitational Waves from First-Order Phase Transitions: LIGO as a Window to Un- explored Seesaw Scales	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (JCAP)	6. 最初と最後の頁 21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2019/02/021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 A. Helmboldt, J. Kubo and S. van der Woude	4. 巻 100
2. 論文標題 Observational prospects for gravitational waves from hidden or dark chiral phase transitions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 055025(25 p.)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.055025	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 J. Kubo
2. 発表標題 Scale invariance as a solution for Mass without Mass
3. 学会等名 27th International Symposium on Particles, Strings and Cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 久保治輔
2. 発表標題 Classically scale invariant extension to SM
3. 学会等名 素粒子現象論研究会2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Aoki
2. 発表標題 Gravitational waves from phase transition in a hidden QCD sector
3. 学会等名 Particle Astrophysics and Cosmology Including Fundamental Interactions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Aoki
2. 発表標題 Gravitational Waves from Phase Transition in a QCD-like hidden sector
3. 学会等名 16th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------