

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03539

研究課題名（和文）ワイル不変な量子場理論としての標準理論を超える理論

研究課題名（英文）BSM as Weyl-invariant quantum field theory

研究代表者

小田 一郎 (Oda, Ichiro)

琉球大学・理学部・教授

研究者番号：40265517

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：ワイル不変性をもつ量子重力理論について研究した。まず、制限されたワイル不変性を持つ量子重力理論を構成し、対称性の自発的な破れの問題を考察した。

また、大域的なスケール不変性をもつ量子重力理論を構成し、そのBRST量子化を行い、この理論に存在する対称性が、 $ISO_p(10|10)$ という非常に大きな対称性であることも明らかにした。

さらに、ワイル不変性をもつコンフォーマルな量子重力理論のBRST量子化も行い、その物理的な粒子についても明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現代の素粒子物理学の重要な未解決な問題の一つに、量子力学と一般相対性理論を結び付けた量子重力理論の構成がある。我々は、特に一般座標変換不変性に加えて、局所的なスケール不変性を持つ量子重力理論を構成した。この理論を土台にして、重力理論の繰り込み可能性の問題の解明がなされる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：We have studied a Weyl invariant quantum gravity. First of all, we have constructed a quantum gravity with the restricted Weyl symmetry, and then considered a issue of spontaneous symmetry breakdown. In addition to it, we have constructed a globally scale invariant quantum gravity and performed its BRST quantization. We have clarified the a huge global symmetry $ISO_p(10|10)$.

Finally, we have made a Weyl invariant quantum gravity, performed its BRST quantization and clarified its physical contents.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：ワイル不変性をもつ量子重力理論

1. 研究開始当初の背景

2013年、欧州原子核研究機構(CERN)で稼働している世界最大の衝突型円型加速器の Large Hadron Collider(LHC)において、標準模型の中で最後まで未発見のまま残されていた素粒子、ヒッグス粒子、がついに発見され、素粒子の標準理論(SM)が完全に実証された。観測されたヒッグス粒子は約 125GeV の質量の大きさを持つことが分かったが、興味深いことに、この値は従来予想されていた質量の範囲の下限近傍にあり、大分小さい。そのためにこの質量の大きさとトップ・クォークの質量の大きさ(約 173GeV)を初期条件にし、繰り込み群を使って、我々の宇宙の真空の安定性を計算してみると、真空は完全には安定ではないが、その寿命は現在の宇宙の年齢(約 137 億年)に比べて大きいので、擬似的な安定状態にあることが分かった。

また、LHCの実験の目的はヒッグス粒子に加えて、当時、理論的に存在が予想されていた超対称性粒子を発見することであった。しかし、13TeV(1TeV=10³ GeV)以下には超対称性粒子はおろか、その痕跡さえ発見されていない実験事実を考慮すると、超対称性理論やそれを基にした統一理論の正当性に疑問が投げかけられていると言っても過言ではない。

以上のことから、10² GeV 近傍で成り立つ標準理論をプランクエネルギー(10¹⁸ GeV)で成り立つ量子重力理論に結びつけることによって、「標準理論を超える理論」を構築することを目指すことは自然であることが分かる。そのとき、ゲージ階層性の問題、暗黒物質の問題、宇宙項の問題などの未解決の問題を説明するためには、新しい物理的な指導原理に基づいて、「標準模型を超える理論」を構築していかなければならない。

では、新しい物理的な指導原理とは何であるのか？ 驚くべきことに、ヒッグス粒子の質量 125GeV とトップ・クォークの質量 173GeV は、プランクエネルギーでの大域的な共形対称性(スケール対称性)の存在を強く示唆しているのである。具体的には、繰り込み群の初期値としてこれらの質量の大きさを代入して計算すれば、プランクスケールでは、ヒッグスの自己結合定数とそのベータ関数が同時にゼロになり、かつヒッグス粒子の裸の質量もゼロになるということが分かる。つまり、プランクエネルギーとは繰り込み群の紫外的な固定点となっていて、そこでは共形不変性が成立しているのである。重力を含んでいない標準理論が、重力の量子効果が大きくなるエネルギースケールであるプランクスケールでの物理の情報を与えていることは驚くべきことである。この事実からも 10² GeV に標準理論があり、そして 10¹⁸ GeV に量子重力理論があって、その間のエネルギースケール(10² GeV ~ 10¹⁸ GeV)には、他の理論は存在しないという「巨大な砂漠」のシナリオが説得力を持つ。ちなみに、共形対称性は、素粒子が質量を持たず、結合定数も無次元のときに成り立つ対称性であるので、共形対称性の自発的対称性の破れを通じて、質量の起源、ゲージ階層性の問題、宇宙項の問題を説明できる可能性がある。

2. 研究の目的

相対性理論や量子力学を土台にして、過去約 100 年に渡って、素粒子物理学は大きな発展を遂げてきた。しかも、超弦理論の出現によって、素粒子物理学の究極理論も近い将来作ることが可能であるかもしれないと喧伝する研究者もいた。しかし、宇宙背景放射を観測する WMAP や Planck によれば、宇宙の全エネルギーの約 68%が暗黒エネルギー、約 27%が暗黒物質で、残りのわずか約 5%だけが既知の素

粒子の占めるエネルギーであることが分かり、この楽観的な夢はもろくも崩れた。

一方、2008年実験を開始したLHCは、2013年までに最大重心系衝突エネルギー8TeVを達成し、ヒッグス粒子を発見して標準理論の正しさを証明した。2年間の改良工事を終えた2015年4月からは、LHCは実験を再開し、エネルギーを13TeVまで上げて、「標準理論を超える物理」の探索を行い、現在はその間に得られた実験データの解析中である。標準理論は、重力や暗黒物質を含んでいないこと、ゲージ階層性の問題やインフレーションを説明できないこと、また多くの未知定数を含んでいることなどの問題があり、標準理論を超える物理を構築しなければならないことは周知の事実である。標準理論を超える新しい理論の第一候補は、最小超対称性標準理論(MSSM)であるが、この理論によればすでに8TeVのエネルギー領域で、もっとも軽い超対称性粒子(LSP)は発見されるはずであった。LHCの重心エネルギーを13TeVまで上げて、LSPはおろか、超対称性理論の痕跡すら見つかっていない状況を考慮すると、

もし超対称性理論が存在しているとしても、超対称性はもっと高いエネルギー領域で自発的に破れ、超対称性理論はゲージ階層性の問題や暗黒物質の問題に対する解を提供できないように思える。

LHCの実験の開始以前に、W. A. Bardeenは1995年のプレプリントで、超対称性理論に代わる理論は、大域的な共形不変な対称性を持つ理論であり、階層性の問題への有力な解を与えることを指摘している(W. A. Bardeen, FERMILAB-CONF-95-391-T)。我々の研究は、この大域的な共形不変性のアイデアを、局所的なワイル不変性に拡張し、プランクスケールに存在する量子重力理論を考えることによって、標準理論を超える物理を構築しようとする野心的な試みである。また、我々の研究は、LHCやPlanckなど現在精力的に行われている実験の結果を反映しているので、きわめてタイムリーな研究でもある。

3. 研究の方法

本研究では、土台となる数学的な幾何学として、従来のリーマン幾何学ではなくて、それを拡張した「ワイルの共形幾何学」を採用する。リーマン幾何学では、平行移動の後、2つのベクトル場の長さとともに、そのなす角度も保存されるが、ワイル幾何学では角度だけが保存され、その長さは変化する。このためにワイル幾何学では、長さのスケールを変える対称性、つまりワイル不変性が自然に生じ、その不変性に付随する接続場として、ワイルベクトル場が存在する構造になっている。一方、ワイル幾何学を物理に適用すると、「第2時計問題」という問題が生じ、物理現象と矛盾する結果を与えるということが昔から知られていた。しかし、我々は最近、ワイル曲率の2次の項を含む作用(これはワイル幾何学では最も一般的な重力場の作用である)から出発すると、重力場とワイルゲージ場の量子効果によって共形不変性が自発的に破れ、一般相対性理論の作用が誘起されるとともに、ワイルゲージ場がプランク質量程度の質量を持ち(ヒッグス機構)低エネルギーでは分離するので、「第2時計問題」は回避されるということを明確な形で示した(I. Oda, "Planck Scale from Broken Local Conformal Invariance in Weyl Geometry", PoS(CORFU2020)070)。

4. 研究成果

研究期間中に7本の論文が外国の論文雑誌に掲載された。まず、制限されたワイル対称性(共形対称性)を持つ量子重力理論を構成した。

さらに、この理論を基にして、ワイル対称性の自発的な破れの現象についても研究した。

次に、一般座標不変性に対して、ド・ドンダーのゲージ条件（調和ゲージ）を採用してゲージ固定して、大域的なスケール不変な量子重力理論を構成した。さらに、この理論に存在する大域的な対称性についても議論した。また、同じゲージ条件を採って、今度はワイル対称性（局所的なスケール不変性）を持つ量子重力理論を構成した。この理論に存在するワイル不変性に対しては、ディランの質量をゼロにするような新しいゲージ条件、即ち「スカラーゲージ条件」を採用して量子化を実行して、大域的な対称性は、 $10\text{Sp}(10|10)$ という非常に大きな対称性になることも指摘した。

さらに、ワイル不変性を持つ重力理論では、その第1ネーター荷電、第2ネーター荷電とも恒等的にゼロであることを証明した。この研究は、その後のワイルアノマリーや質量を持つゴースト粒子の閉じ込めの問題にとっても役に立つ有用な研究であった。

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 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Ichiro Oda and Misaki Ohta	4. 巻 2
2. 論文標題 Quantum conformal gravity	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 213-1, 213-30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP02(2024)213	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 Ichiro Oda	4. 巻 105
2. 論文標題 Quantum scale invariant gravity in the de Donder gauge	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 066001-1,15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.066001	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 Ichiro Oda	4. 巻 105
2. 論文標題 Quantum theory of Weyl-invariant scalar-tensor gravity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 126018-1, 20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.126018	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 Ichiro Oda and Philipp Saake	4. 巻 106
2. 論文標題 BRST formalism of Weyl conformal gravity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 106007-1, 20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.106007	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 Arata Kamimura and Ichiro Oda	4. 巻 36
2. 論文標題 Quadratic gravity and restricted Weyl symmetry	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Modern Physics Letters A	6. 最初と最後の頁 2150-139, 149
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S021773232150139X	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Ichiro Oda	4. 巻 36
2. 論文標題 Restricted Weyl symmetry and spontaneous symmetry breakdown of conformal symmetry	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Modern Physics Letters A	6. 最初と最後の頁 2150-203, 213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0217732321502035	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Ichiro Oda	4. 巻 37
2. 論文標題 Vanishing Noether current in Weyl invariant gravities	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Modern Physics A	6. 最初と最後の頁 2250-213, 220
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0217751X2250213X	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------	---------