

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 24 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25800144

研究課題名(和文) 真空の安定性と軽い粒子からの弦理論への制限

研究課題名(英文) Constraints from vacuum stability and light particles in string theory

研究代表者

大河内 豊(Ookouchi, Yutaka)

九州大学・基幹教育院・准教授

研究者番号：40599990

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：この研究では2つの柱をもとに行った。いずれも超弦理論において、我々の世界の構築する際の制限を与える。一つ目は軽い粒子が宇宙紐から生成される可能性と新たに議論が巻き起こった離散的ゲージ対称性の関係を議論したものである。もう一つは、弦理論の真空が複雑な構造になっているとの予言を積極的に採用し、その中で自然界でしばしば見られる触媒効果が同様に起こりうるかを調べたものである。触媒効果により準安定状態の寿命が短くなることから、これまで正しいとされてきた真空の構成についてももう一度考える必要があることを提示した。

研究成果の概要(英文)：This research is twofold. The first aim of it is to find constraints arising from light particles in string theory associated with discrete gauge symmetries. The other aim is to study the stability of metastable vacua in string theory. According to the recent progress in string theory suggested us that there may be a large number of metastable vacua in string theory. If this is true, it would be important to study how transitions between them occur, and how long such metastable vacua survive. Toward this goal, we focused on the catalytic effect which may be familiar in real world and found that the effect makes the lifetime of a metastable vacuum much shorter.

研究分野：素粒子論

キーワード：準安定状態 真空崩壊 超弦理論における制限

1. 研究開始当初の背景

超弦理論の枠組みでスタンダードモデルを実現する事は、超弦理論を現実の科学とする上で一つの重要な課題である。こうした試みはこれまでも精力的になされており、オービフォールに基づいた理論の構成では大量にモデルの候補が提案されている。これらに共通することは、不必要な $U(1)$ 対称性と不必要な軽い粒子 (モデュライ) の存在である。スタンダードモデルを構成することには成功しているが同時に不要な残骸も生じてしまうというのが研究開始当初の状況であった。こうしたモデルのどれが望ましくどれが実際に実現されるのかを選び出す強い条件が必要であった。

また、弦理論のポテンシャルがランドスケープ(複雑な構造でたくさん準安定状態を含むもの)となっていることは、弦理論のみならず、場の理論にも大きな影響を与えていた。弦理論のポテンシャルが複雑ならば、紐のスケールをずっと小さくする場の理論の極限でもやはり真空構造が複雑であると考えられる。この概念にもとづき、超対称性を自発的に破るモデルを準安定状態をもとに構成しようと試みたのが参考文献[1]である。準安定状態を用いた超対称性のモデルビルディング自体は実は柳田氏らをはじめとする多くの日本人研究者によって既に具体的なモデルで行われていたが、弦理論のランドスケープの概念を受け入れたことにより、多くの研究者が積極的に使うようになったのは、[1]以降の流れである。こうした試みに基づきモデルビルディングが再注目されいくつかの重要な成果が得られていたのが研究当初のもう一つの状況であった。[2]では、共同研究者と共にダイレクト型のゲージメディエーションモデルの構成を行なった。強調すべき点は、ゲージノの質量がスクォークの質量と同程度に大きくする事が可能となる最初のダイレクトゲージメディエーションモデルだという点である。柳田氏らにより、ダイレクト型のモデルではゲージノの質量が小さく出る事が指摘されてい

たが[3]、それを準安定状態を用いると回避できる例を示した。後に[4]によってその一般論が構成され、真空が存在する点の周りの情報のみでなく、ポテンシャルのグローバルな構造がゲージノの質量と関係づいていることが示されたことは一つの進展であった。

弦理論や場の理論においてポテンシャルが複雑な構造をする場合、ソリトンの存在がきわめて重要になる。スタインハートが82年に提案した[5]、反古典的な真空の崩壊がおこる可能性があるからである。スタインハートは超対称性とは関係なく準安定状態でソリトンの振る舞いを考えた。準安定状態に我々がいるとして、ソリトンが生じるならば、エネルギー密度が高いところから徐々にエネルギーの低い真空へと崩壊がおこる可能性を指摘した。

この事実は準安定状態を用いて超対称性を破るモデルを構成するときには、非常に危険な可能性があることを意味している。真空そのもの寿命だけを議論しては不十分なのである。真空自体の寿命が宇宙年齢を超えているとしても、もし自発的に対称性が破れているとすると、そこに非自明な場の配位ができエネルギーが密集しているところから、ポテンシャルの低い方へと転がり落ちるのである。例えば、宇宙紐では、紐がチューブ状に広がり、内側がより安定な真空であるのでチューブの半径は段々と広がりより安定な真空に世界は落ち着いてしまう事になる。

[1] K.Intriligator, N.Seiberg and D.Shih, JHEP 0604 (2006) 021

[2] R.Kitano, H.Ooguri, Y.Ookouchi, Phys. Rev. D75 045022 (2007)

[3] K.Izawa, Y.Nomura, K.Tobe and T.Yanagida, Phys.Rev. D56, 2886 (1997)

[4] Z.Komargodski and D.Shih, JHEP 0904 (2009) 093

[5] P.Steinhardt, Nucl. Phys. B190 (1981) 583-616

2. 研究の目的

背景でふれたように、超弦理論の真空は一つではなく、複雑なポテンシャル(ランドスケープ)によりいくつも存在するのではないかと考えられている。その中でどの真空が選ばれやすいかを考えることは一つの

重要な研究課題となっている。私の研究目的は、ポテンシャルが複雑な構造をしているときには、ソリトンの存在が真空のセレクションや、存在する軽い粒子密度に対しての強力な制限を与える事を示すことである。

3. 研究の方法

目的を達成するために、下記の3つの方法を行った。

(1) 超対称性を持つ場の理論特有の R 対称性から生じるソリトンとロールオーバープロセスを調べる

(2) 重力をデカップルさせた弦理論の有効理論でソリトンとロールオーバープロセスを調べる

(3) 最後にストリングコンパクト化に現れる特徴的な宇宙紐からの制限をつける

これら3点のアプローチにより一般性及び重要性を示し、他の例にも応用できる土台となる議論を構築することが狙いである。

4. 研究成果

超弦理論のコンパクト化によるスタンダードモデルの構成では、しばしばディスクリート対称性が付随する。最近の Banks-Seiberg による議論によれば、そうしたディスクリート対称性はゲージ化されている必要がある。その場合、関連して宇宙紐が生成され初期宇宙のコンパクト化の情報を拾い出せる可能性があることをアハロノフボーム効果を用いて示した。現在の観測結果を用いると、ある種のコンパクト化は許されない事を論文で示した。

この結果を受け論文では、R 対称性と呼ばれる超対称性特有の離散対称性に付随する宇宙紐から最軽量の超対称粒子が生成されることを示した。また、その粒子が安定である事から現存するダークマターの量を超えないための制限が得られる事を示した。この制限は超弦理論においてはさらにきついものとなり、弦理論のコンパクト化に対するひとつの制限となる事を示した。

論文では、準安定状態を用いた超対称性の破れのモデルにおける制限を示した。超対称性のモデルに特有の R 対称性に着目し、その破れに伴うソリトンが準安定状態の寿命に非常に重要であることを指摘し、既存のモデルに関する制限を付けた。

この成果をさらに発展させ、同様の触媒効果のプロセスが弦理論で起こるかを調べたのが論文、である。弦理論のこれまでの研究から大変多くの準安定の存在が示唆されている。もしこれが事実だとすると、初期宇宙に置いて弦理論の準安定状態にト

ラップされた可能性がある。一方で、D プレーンを用いたスタンダードモデルの構成が非常に盛んに行われている。D プレーンとアンチ D プレーンが消滅するときに、より次元の低い D プレーンが生成されることが知られている。これらの2つの事実を組み合わせると、準安定状態にも低い次元の D プレーンが存在することになる。これは我々の空間から見ればソリトンとしてみることができ、その存在が真空の安定性に大きく寄与する可能性がある。我々は、こうしたソリトンに対応する D プレーンが真空の相転移を引き起こすバブルの生成率を高め、準安定状態の寿命が劇的に短くなる事を示した。また、その途中過程で生じるバブルとソリトンの束縛状態は、これまで全く別の文脈で議論されてきた誘電ブレーンそのものであることを指摘した。

この結果をさらに有限温度系に拡張したのが、の論文である。初期宇宙で高温な状態であったならば、様々な真空間の遷移が繰り返されたとも考えられる。我々はこの準安定状態にソリトンとして観測しうる物体が存在する場合、触媒効果がおこり、真空の寿命が短くなることを調べた。特に有限温度効果ではブレーンは非エクストリーマルブラックブレーンと呼ばれるものとなり、それからの寄与が準安定状態の触媒効果にどのような影響を与えるかを調べた。また崩壊が生じるのは、熱的に励起された状態からの崩壊も起こりうるので、その寄与についても計算を行った。その結果、真空は温度効果で不安定となり、崩壊が早まることがわかった。この結果は弦理論のランドスケープと呼ばれる概念を議論する上で、触媒効果は見逃すことができないことを示唆している。

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7件)

Thermal Effects on Decays of a Metastable Brane Configuration.

By Yuichiro Nakai, Yutaka Ookouchi.

DOI:10.1016/j.physletb.2016.09.050.

Phys.Lett. B762 (2016) 321-326. 査読有

Baryon as Impurity for Phase Transition in String Landscape.

By Aya Kasai, Yuichiro Nakai, Yutaka Ookouchi.

DOI:10.1007/JHEP06(2016)029.

JHEP 1606 (2016) 029. 査読有

Gravitational Correction to Fuzzy String in Metastable Brane Configuration.

By Aya Kasai, Yutaka Ookouchi.

DOI:10.1007/JHEP06(2015)098.
JHEP 1506 (2015) 098. 査読有

Decay of False Vacuum via Fuzzy Monopole in String Theory.
By Aya Kasai, Yutaka Ookouchi.
DOI:10.1103/PhysRevD.91.126002.
Phys.Rev. D91 (2015) no.12, 126002. 査読有

Radiation of Supersymmetric Particles from Aharonov-Bohm R-string.
By Yutaka Ookouchi, Takahiro Yonemoto.
DOI:10.1007/JHEP02(2015)164.
JHEP 1502 (2015) 164. 査読有

Discrete Gauge Symmetry and Aharonov-Bohm Radiation in String Theory.
By Yutaka Ookouchi.
DOI:10.1007/JHEP01(2014)049.
JHEP 1401 (2014) 049. 査読有

More on cosmological constraints on spontaneous R-symmetry breaking models.
By Yuta Hamada, Kohei Kamada, Tatsuo Kobayashi, Yutaka Ookouchi.
DOI:10.1088/1475-7516/2014/01/024.
JCAP01(2014)024. 査読有

〔学会発表〕(計 8 件)

発表者名：大河内 豊
発表標題：Decay of False Vacuum via Fuzzy Monopole in String Theory
学会等名：慶應義塾大学 商学部 セミナー
発表年月日：2017 年 3 月 10 日
発表場所：慶應義塾大学（神奈川県・横浜市）

発表者名：大河内 豊
発表標題：ストリングランドスケープとマルチバース
学会等名：シンポジウム「現在という謎」
発表年月日：2016 年 12 月 17,18 日
発表場所：立正大学（東京都・品川区）

発表者名：大河内 豊
発表標題：Decay of False Vacuum via Fuzzy Monopole in String Theory
学会等名：大阪大学理学部素粒子論研究室セミナー
発表年月日：2015 年 12 月 8 日
発表場所：大阪大学（大阪府・吹田市）

発表者名：大河内 豊
発表標題 Decay of False Vacuum via Fuzzy Monopole in String Theory
学会等名 KEK String 2015
発表年月日 2015 年 2 月 5 日
発表場所 高エネルギー加速器研究機構（茨

城県・つくば市）

発表者名：大河内 豊
発表標題 Discrete Gauge Symmetry and Aharonov-Bohm Radiation in String Theory
学会等名 橋本研究室 closing 研究会
発表年月日 2015 年 1 月 28 日
発表場所 理化学研究所（埼玉県・和光市）

発表者名：大河内 豊
発表標題 Decay of False Vacuum via Fuzzy Monopole in String Theory
学会等名 北海道大学素粒子論研究室セミナー
発表年月日 2015 年 1 月 16 日
発表場所 北海道大学（北海道・札幌市）

発表者名：大河内 豊
発表標題 Discrete Gauge Symmetry and Aharonov-Bohm Radiation in String Theory
学会等名 日本物理学会秋季大会
発表年月日 2014 年 9 月 21 日
発表場所 佐賀大学（佐賀県・佐賀市）

発表者名：大河内 豊
発表標題 Discrete Gauge Symmetry and Aharonov-Bohm Radiation in String Theory
学会等名 YITP Workshop “Strings and Fields”
発表年月日 2014 年 7 月 22 日
発表場所 京都大学 基礎物理学研究所（京都府・京都市）

〔図書〕(計 1 件)
別冊数理科学「超対称性の破れ」大河内 豊 著
サイエンス社 192 頁

〔産業財産権〕
なし

出願状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1)研究代表者
大河内 豊 (Ookouchi Yutaka)
九州大学 基幹教育院 准教授
研究者番号：40599990

(2)研究分担者
なし ()
研究者番号：

(3)連携研究者
なし ()
研究者番号：

(4)研究協力者
中井 雄一郎 (Nakai Yuichiro)
ハーバード大学 博士研究員