

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03851

研究課題名(和文) 弦理論における電弱対称性の自発的破れの起源

研究課題名(英文) The origin of electroweak symmetry breaking in String Theory

研究代表者

北澤 敬章 (Kitazawa, Noriaki)

東京都立大学・理学研究科・助教

研究者番号：20271158

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)：素粒子の標準模型の電弱ゲージ対称性の自発的破れのダイナミクスは未知である。その理解のために場の量子論や弦理論の枠組みにてさまざまな試みが行われてきたが、決定的な理解には至っていない。そこで、本研究では、弦理論の枠組みでこれまで考えられてきたような静的な物理系ではなく、動的な物理系、特に連星系のように準安定に定常的な公転運動をする2枚のDブレーンの配位によって電弱ゲージ対称性の自発的破れが実現される可能性を追求した。弦理論における弦の共形場の理論に基づく詳細な計算と検討により、このような動的な物理系は実現されないことがわかった。電弱ゲージ対称性の自発的破れのダイナミクスは未知のままである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

全ての素粒子の質量の起源である電弱ゲージ対称性の自発的破れのダイナミクスの解明には至らなかったが、本研究の成果である弦理論におけるDブレーンの動的な性質についての理論的な知識や弦理論における量子補正についての理論的な知識は、将来の弦理論研究に資するものである。

研究成果の概要(英文)：The dynamics of the electroweak gauge symmetry breaking in the standard model of particle physics is unknown yet. Though it has been investigated within the framework of the quantum field theory, the solution has not been found yet. There have been further effort in String Theory beyond the quantum field theory, but it is still in a mystery. In this research we try to understand the dynamics by considering a dynamical system of D-brane, as a binary star, in String Theory. Though the detailed investigations within the string world sheet theory, it should be concluded that there is no such a possibility. The dynamics of the electroweak gauge symmetry breaking is still in a mystery.

研究分野：素粒子物理学理論

キーワード：弦理論 Dブレーンの動的性質 弦理論における量子補正

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 素粒子の標準模型では電弱対称性の自発的破れはヒッグス場の真空期待値によって引き起こされる。欧州原子核研究機構 (CERN) の LHC 加速器実験におけるヒッグス粒子についての研究結果は標準模型の正しさを高精度で確認している。しかし、標準模型でのヒッグス場の真空期待値がなぜ 250GeV であるのか、そしてそれがなぜ、重力相互作用のエネルギースケールと比較して 16 桁も小さいのか。これらの謎の理論的解明と実験的検証は現在の素粒子物理学の最重要課題のひとつであり、その克服なしに素粒子質量の起源を理解することはできない。

(2) この問題を解決するためには、ボトムアップからの現象論的考察に加えて、弦理論のようなトップダウンの考察からヒントを得ることが重要である。弦理論では、電弱対称性の自発的破れの問題は、D プレーンの安定な配位の問題として理解される。我々の 3 次元空間は D プレーンの中に閉じ込められており、2 枚の D プレーン間の距離がヒッグス場の真空期待値を与える。これまでは、超対称性が存在して D プレーンの配位の安定性が保証される場合が主に研究されてきた。しかし、実際の自然には超対称性なしでヒッグス場の真空期待値が安定に実現しているため、超対称性のない配位まで研究範囲を広げる必要がある。

(3) 超対称性のない配位の中でも、特に次のような動的な系についてはこれまで研究されてこなかった。すなわち、2 枚の D プレーンが、互いに間に非常に短い距離を保ちつつ、連星系のように準安定に定常的な公転運動をするような系で、これが実現するためのダイナミクスの解明は意味があることである。

## 2. 研究の目的

(1) 弦理論における D プレーンの動的性質を利用したメカニズムにより、電弱対称性の自発的破れを理解することを主目的とする。さらに、運動する D プレーンによる宇宙のインフレーションや暗黒物質生成のメカニズムとの関連や、D プレーンの配位によって決定される素粒子質量の生成機構についての理解も目的とする。

(2) 弦理論における D プレーンの動的性質については、D プレーンの発見当初には盛んに研究されたが、まだ未知の部分が多い。本研究で取り扱うような D プレーンの動的定常状態の理解のためにはさらなる研究が必要で、これは今後の弦理論研究において重要な方向のひとつである。

(3) 電弱対称性の破れが公転する D プレーンによって実現されている場合、D プレーンに閉じ込められている我々の座標系は D プレーンが止まって見える回転座標系である。すると、力学系でのコリオリ力に相当する効果がローレンツ対称性を破る。また、時間とともに膨張する宇宙の中での安定した D プレーンの公転運動の実現は自明ではない。これらの問題を克服して、素粒子宇宙物理学の新しいパラダイムを構築し、素粒子物理学の進展に重要な知見を与える。

## 3. 研究の方法

### (1) 公転する D プレーン上の物理

我々が存在する 3 次元空間は 2 つの D プレーンの世界面の中に閉じ込められていると仮定する。2 つの D プレーンは我々の 3 次元空間と直交する空間においてわずかに離れていて、それらの重心の周りを公転しているとする。我々が実際に経験する物理を知るには D プレーンが止まって見えるような回転座標系に移行しなければならない。この系を低エネルギー有効理論場の理論で取り扱うことができ、実際に回転座標系に移行することができる。力学系でのコリオリの力に相当する効果がヒッグス場の伝播の分散関係に及ぼす影響を理解し、その観測可能性について考察する。

### (2) 公転する D プレーンの動的定常状態の物理

非常に短い距離だけ離れた 2 つの同種の D プレーンの動的性質は、D プレーンの低エネルギー有効場の理論を用いて調べるべきであるが、まずはその本質的な部分を表現する 2 つのスカラー場のみを含む簡単なモデルを用いて調べる。D プレーンがすれ違うときに起こる現象として、対生成された開いた弦の張力による線形ポテンシャル力が公転運動を支える可能性がある。このような過程で実現される準定常状態の物理を、注意深い詳細な研究を行って理解する。

### (3) 公転する D プレーンの間に働く力のより深い理解

わずかに離れた 2 つの D プレーンがそれらの重心の周りを公転している系には超対称性がない。この場合には D プレーンが互いにすれ違う時に対生成された開いた弦の張力以外にも、超対称性によって禁止されない量子効果による定常的な力が働く可能性がある。公転する D プレーンはこのような定常的な力によって維持されると考えられるので、量子効果による互いに公転する 2 つの D プレーン間のポテンシャルエネルギーを計算して、それが引力であり、さらに十分な強さがあるかどうかを確認する。

## 4. 研究成果

### (1) 公転する D プレーン上におけるローレンツ対称性の破れ

電弱対称性の自発的破れが、弦模型における2つのDブレーンの公転運動によって起こる場合において、ヒッグス粒子に関して現れるローレンツ対称性の破れの独特な現れ方を低エネルギー有効場の理論を用いて明らかにした。現在の実験ではそのようなローレンツ対称性の破れが見えていないことから、公転の角速度についての上限を導いた。なお、この研究においては、公転が実現するような公転のダイナミクス(2つのDブレーンの間に働く力)を考えた。

(2) Dブレーン間に生成された閉じた弦の張力では束縛状態ができない

弦模型における2つのDブレーンがすれ違う時に生ずる粒子生成に伴う力では、安定した公転運動が実現できないことを明らかにした。しかし、一方のDブレーンが他方の周りを円運動する際に働く力(量子効果として生ずる)は、すれ違う際に働く力とは非常に異なる性質を持っていることを明らかにし、さらにその力によって安定な公転運動が実現される可能性を認識した。

(3) 互いに公転するDブレーンの間に働く量子効果による力(D3ブレーン)

弦理論の10次元時空に $D_p$ ブレーンという $p$ 次元空間を占める物体を導入すると、その上の $p+1$ 次元時空にゲージ対称性が導入される。 $D_p$ ブレーンが $N$ 個重なっているとゲージ対称性群は $U(N)$ になる。現実の世界で起きている電弱対称性の自発的破れのようなゲージ対称性の自発的破れは、この $N$ 個の $D_p$ ブレーンが分離することによって起こる。例えば、それが $N_1$ 個のまとまりと $N_2$ 個のまとまりに分離すると、ゲージ対称性は $U(N_1) \times U(N_2)$ に破れる。分離した2組の $D_p$ ブレーンの距離をどうやって一定に保つかということが問題になる。なぜなら、その距離がゲージ対称性の自発的破れのエネルギースケールに対応し、現実の世界では弱い相互作用の力の強さを決めることになるからである。 $D_p$ ブレーンが相対的に静止しているときには力は働かないが、相対運動をしている場合には力が働く(超対称性が破れることによる量子効果として)。もしその力が十分に強く遠心力とバランスするならば、2つの $D_p$ ブレーンは連星系のように距離を一定に保ちつつ公転運動する可能性がある。これは2組の $D_p$ ブレーンの距離を一定に保つ機構であるかもしれない。そこで、特に3次元空間を占める $D_3$ ブレーンの場合について具体的に力のポテンシャルを計算した(弦を表現する共形場の理論を用いて)。その結果、力は引力であることがわかったが、その大きさは2つの $D_3$ ブレーンに公転運動をさせるほどは強くないことがわかった。しかし、 $D_p$ ブレーンの $p=3$ 以外についてはまだ可能性が残されている。

(4) 互いに公転するDブレーンの間に働く量子効果による力(Dpブレーン)

全ての可能な $p$ の値について、互いに公転運動している時に働く力のポテンシャルを計算した。その結果、どの $D_p$ ブレーンの組についても、束縛状態ができないことがわかった。束縛状態の成立を期待した理由は、それによってゲージ対称性の自発的破れが起こる(具体的には、平行にわずかな距離だけ離れた2つの $D_p$ ブレーンの系が得られる)と期待されるからであったが、その可能性はないことがわかった。すなわち、公転運動による超対称性の破れに起因する力は、遠心力に比べて弱すぎるということがわかった。しかし、このような力の情報は、まだ詳細に研究されていない $D_p$ ブレーンの動力学の理解に寄与するものである。

(5) 余剰次元のフラックスによるゲージ対称性の自発的破れ

空間として3次元より多いコンパクトな余剰次元を仮定した場合に可能なゲージ対称性の自発的破れの機構がある。それはコンパクトな余剰次元空間に磁場フラックスなどの自明でないゲージ場の配位を導入するもので、弦理論において実現可能である。この機構を電弱対称性の破れへと応用すべく、そのダイナミクスについて詳細に検討した。詳細で具体的な検討を行うために、弦理論の枠組みではなく、多次元時空におけるゲージ理論を用いた。その結果、これまでは重要でないと簡単に見なされて無視されてきた自由度が実は非常に重要であることを明らかにした。その自由度は通常は重い粒子に対応する高次のカルツァ・クライン状態の自由度である。それらの自由度の中には真の真空においてはゼロ質量状態になるものがあることを示した。

(6) Dブレーン上のスカラー場への量子効果による質量生成

Dブレーン上のスカラー場についての量子効果による質量生成について詳細な研究を行った。特に弦理論におけるスカラー場の2点関数について詳細に研究をおこなった(弦を表現する共形場の理論に基づいて)。本来は散乱行列しか計算できない現状の弦理論の定式化においても、外線運動量を質量殻からずらした2点関数は、量子効果による質量補正を正しく与える可能性を指摘した。新しい技術として「部分モジュラー変換」をいうものを駆使して、それを示した。このようにして得られる量子効果による質量補正について、その2乗質量が負になるときに対称性の自発的破れが起きる。それが実現するための条件を見出すことは興味深いが、答えを得ることはできなかった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Noriaki Kitazawa	4. 巻 2205
2. 論文標題 Reionization process dependence of the ratio of CMB polarization power spectra at low- $l$	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2022/05/016	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 Noriaki Kitazawa	4. 巻 840
2. 論文標題 Inflaton as a pseudo-Nambu-Goldstone boson	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 137846
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2023.137846	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 Satoshi Iso, Noriaki Kitazawa and Takao Suyama	4. 巻 105
2. 論文標題 Gauge Symmetry Restoration by Higgs Condensation in Flux Compactifications on Coset Spaces	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 45008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.045008	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 Noriaki Kitazawa	4. 巻 35
2. 論文標題 Polarization of CMB and possible time dependence of dark energy,	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of the Dark Universe	6. 最初と最後の頁 100937
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.dark.2021.100937	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 Iso Satoshi, Kitazawa Noriaki, Ohta Hikaru, Suyama Takao	4. 巻 2020
2. 論文標題 More on effective potentials for revolving D-branes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP08(2020)137	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 Satoshi Iso and Noriaki Kitazawa	4. 巻 35
2. 論文標題 A Possibility of Lorentz Violation in the Higgs Sector	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Modern Physics Letters A	6. 最初と最後の頁 2050064
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0217732320500649	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 Noriaki Kitazawa	4. 巻 1908
2. 論文標題 On CMB B-modes and the Onset of Inflation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2019/08/005	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 Satoshi Iso, Noriaki Kitazawa, Hikaru Ohta and Takao Suyama	4. 巻 2001
2. 論文標題 Dynamics of Revolving D-Branes at Short Distances	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 182
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP01(2020)182	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 Satoshi Iso, Noriaki Kitazawa and Takao Suyama	4. 巻 D107
2. 論文標題 Stringy Threshold Corrections in D-brane Systems	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review	6. 最初と最後の頁 125914
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.126014	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1件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 Hikaru Ohta
2. 発表標題 Effective potential for revolving D-branes in superstring theory
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Home Page of Noriaki Kitazawa <a href="http://chercher.phys.se.tmu.ac.jp/">http://chercher.phys.se.tmu.ac.jp/</a>
--

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
研究協力者	磯 暁 (Iso Satoshi)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	須山 孝夫  (Suyama Takao)		
研究協力者	太田 光  (Ohta Hikaru)		

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