

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 4 月 26 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400253

研究課題名(和文) 超対称性のない弦模型の物理と宇宙観測による検証

研究課題名(英文) Physics of non-supersymmetric string models and their cosmology

研究代表者

北澤 敬章 (Kitazawa, Noriaki)

首都大学東京・理工学研究科・助教

研究者番号：20271158

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：時空10次元の超弦理論に基づく模型の余分な6次元空間は現在の実験で観測できない程度に有限体積でかつ小さくなっていなければならない。さらにその大きさと形は時間変化せずに安定でなければならない。その安定性を超対称性のない弦模型におけるDブレーンの非自明な動力学によって実現する機構を提案した。また、弦模型における電弱ゲージ対称性の自発的破れを超対称性のない弦模型におけるDブレーンの非自明な動力学によって実現する機構も提案した。さらに、超対称性のない弦模型において宇宙背景輻射のゆらぎの大角度成分について予言を行い、さらに、宇宙観測の専門家と共に、その予言が実際に観測によって支持されることを示した。

研究成果の概要(英文)：The extra six-dimensional space in ten-dimensional space-time of superstring theory should be compactified, and its small size and shape should be stabilized so that they do not change in time. Several mechanisms to realize the stability with non-trivial dynamics among D-branes in non-supersymmetric string models was proposed. It was also proposed that the electroweak symmetry breaking could be realized by non-trivial dynamics among D-branes in non-supersymmetric string models. A prediction of string models without supersymmetry to large-angle components of the cosmic microwave background was clarified. It was shown with experts of the observation of the universe (experiments) that the prediction was supported by their observation.

研究分野：素粒子物理学(理論)

キーワード：弦理論 超対称性の破れ コンパクト空間 電弱対称性の破れ 宇宙背景輻射 インフレーション

1. 研究開始当初の背景

弦理論は超対称性を予言するものではない。たとえ時空 10 次元の超対称弦理論から出発しても、余分な 6 次元空間のコンパクト化の仕方や D プレーンと呼ばれる物体の配位によって超対称性のない模型を構成することが可能である。LHC 加速器実験において低エネルギースケールでの超対称性の存在について否定的な結果が出るまでは、自然には近似的に超対称性が存在するという考え方が一般的であった。超対称性があると、素粒子の質量生成に必要な電弱対称性の破れが起きないのであるが、何らかの機構で超対称性がわずかに破れた結果としてそれが起き、現実の世界が記述できるという考え方が大勢を占めていた。しかし、LHC 加速器実験の結果はこの見方が必ずしも正しくなく、超対称性は存在してもその破れは決してわずかではないことを示唆している。素粒子の標準模型は超対称化されないままでプランクスケールまで有効な模型かもしれない。

弦模型は重力相互作用を矛盾なく含む枠組みであると考えられているので、超対称性がわずかに破れているのではなく、超対称性のない(または超対称性が大きく破れている)弦模型を研究することは、上記の背景から重要であると言える。超対称性は非常に強力な対称性であり、その存在によって弦理論の重要な事柄が明らかにされてきたのであるが、あまりに強い対称性であるために非自明な動力学を許さない傾向にある。たとえば、ゲージ対称性の自発的破れは超対称性があると起こらない。超対称性のない弦模型においては興味深い動力学が存在しうる反面、理論的な研究は容易ではない。強力な対称性を援用することができないからである。

2. 研究の目的

弦理論は超対称性を予言するものと誤解されることが多いが、時空 10 次元の超対称弦理論から出発したとしても、6 次元空間のコンパクト化や D プレーンの配位によって、超対称性は容易に破れる。一方、素粒子物理や宇宙物理において重要な現象で、超対称性の破れを必要とするものがある。例えば、ゲージ対称性の自発的破れや、6 次元コンパクト空間を小さく保つことなどである。超対称性のない弦模型には非自明な動力学が存在するが、超対称性という強力な武器が使えないために、これまで深く研究されてこなかった。超対称性のない弦模型におけるゲージ対称性の自発的破れやコンパクト空間の安定化の物理を明らかにする。また、超対称性のない弦模型の宇宙のインフレーションに関係した観測量への予言を明らかにし、それを宇宙観測によって検証する。

3. 研究の方法

(1) 10 次元時空を仮定するタイプ IIB 型超弦理論から出発して、弦理論の枠組み(弦の

世界面の共形場の理論)において 6 次元コンパクト空間が安定化された具体的な模型を構成する。弦の世界面の共形場の理論が可解である範囲で達成することを目的とするので、6 次元コンパクト空間としてはオービフォールドと呼ばれる空間(6 次元空間の各方向に周期的境界条件を課して構成するトラス空間に、6 次元空間の原点を中心とした離散的な回転変換に関する同一視を行うことによって得られる)を考える。オービフォールド特異点に局在させた D プレーンと呼ばれる物体の間の引力や斥力でコンパクト空間を動力的に安定に保つというアイデアを実現する。そのために、「形」(complex structure moduli) を変える自由度がなく、「大きさ」(Kähler moduli) を変える自由度のみを持つオービフォールドを想定する。

(2) 超対称性のない弦模型における“climbing phenomena”という現象の、宇宙のインフレーションに関係した観測量に対する予言を明らかにする。超対称性のない弦模型において典型的なことは、指数関数で記述されるポテンシャルに従うスカラー場が存在することである。このようなスカラー場の時間発展をピックバン特異点から解析してみると、指数関数の勾配がある臨界値よりも急であるときにはスカラー場は必ずポテンシャルを「登らなければならない」ことがわかる。これを“climbing phenomena”という。スカラー場はポテンシャルの壁を登ってからいったん止まり、そのあとに下りてくることになる。宇宙のインフレーションを引き起こすスカラー場(インフラトン)の最初の動きがこのようなものである場合に、観測されるべき宇宙背景放射の温度揺らぎがどのようになるかということの詳細に調べ、PLANCK 実験の結果と比較する。

(3) ゲージ対称性の自発的破れは D プレーンのコンパクト空間内での動きで理解できる。特にコンパクト空間として離散対称性を課したオービフォールドと呼ばれる空間を考えた場合、その空間内のオービフォールド特異点上の D プレーンが特異点から離れる場合には離散対称性による同一視が起きるため、電弱対称性の自発的破れを説明できるようなゲージ対称性の自発的破れが実現できる。D プレーンが特異点から離れる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を決定するため、これを安定化するような機構を探索する。

4. 研究成果

(1) 弦模型における超対称性の自発的破れの機構

超弦理論における超対称性の破れのひとつとして“brane supersymmetry breaking”と呼ばれるものがある。その最も簡単な例として、タイプ I 型理論によく似た杉本模型と

いうものがある。この模型は超対称性が全く存在しない安定な模型であることが知られている。この模型の開いた弦のゼロ質量粒子に対応する状態の中に超対称性の自発的破れを意味する南部・ゴールドストーン粒子が存在するが、対応するゲージ粒子である重力微子は質量を獲得し得ないことが知られている。なぜなら重力微子はマヨラナ・ワイルフェルミオンなのでラグランジアンに質量項を書くことができないからである。つまり、起きていと期待される超ヒッグス機構が未だに理解されていない。

杉本模型には実は宇宙項があり、したがって時空間は平坦でないド・ジッター時空と呼ばれるものになることに着目し、通常の平坦な時空間におけるヒッグス機構の理解をそのまま持ち込んではいけなことを指摘した。すなわち、ド・ジッター時空における質量の定義は平坦な時空間における定義とは異なることにより、重力微子がゼロ質量のまま南部・ゴールドストーン粒子の自由度を吸収できることを指摘した。

(2) 宇宙背景輻射の大きなスケールでのゆらぎの観測

宇宙のインフレーションの過程で生成される宇宙背景輻射の長波長領域(大スケール領域)には異常な振る舞いがあると指摘されてきた。そのひとつとして WMAP および PLANCK 実験による観測結果における宇宙背景輻射の長波長成分が宇宙標準模型(CDM 模型)の予言に比べて小さいのではないかとということが指摘されてきたが、それが統計的に有意なものであるかどうかは意見の分かれるところであった。弦模型の予言として、特に“brane supersymmetry breaking”によって超対称性が破れている模型においては、長波長成分が小さくなる可能性があることを指摘した。

研究期間内に終了した PLANCK 実験のすべての観測データを用い、宇宙背景輻射の観測の際に重要である「銀河マスク」(背景輻射の観測の際に邪魔になる我々の銀河面からの放射を遮る手続き)について詳細に考察し、統計的に有意にその長波長成分が CDM 模型の予言に比べて小さいことを示した。行った解析は PLANCK collaboration によって正式に承認されているものである。

さらに、長波長成分を多重項展開における偶成分と奇成分に分けて、それぞれについて同様の解析を行った。その結果、偶成分は銀河マスクの大きさに関係なく長波長になるほど CDM 模型からずれて減衰するのに対し、奇成分は銀河マスクが大きい場合には偶成分と同様な振る舞いをするが、銀河マスクが小さい場合(銀河面からの影響を受けやすい場合)にはそのような減衰傾向を示さないことがわかった。この結果は、長波長成分の減衰がインフレーションの初期に偶奇の区別なく作られ、銀河面の近くには奇成分に

汚染があると理解される。これは、長波長領域における CDM 模型の予言からずれた減衰、すなわちインフレーションの始まりが見えていることのさらなる証拠になる。

(3) 弦模型におけるゲージ対称性の自発的破れ

10次元時空を仮定する弦理論における D プレーンという多次元に広がりを持つ物体を用いた模型において、ゲージ対称性はその D プレーンの占める部分時空間内に実現される。我々の経験している時空間は4次元なので、余分の6次元空間は「コンパクト空間」と表現される閉じた観測できないほど小さな空間でなければならない。「電弱対称性の自発的破れ」で要求されるようなゲージ対称性の自発的破れを実現するためには、いくつかの D プレーンが消滅しなければならないが、その過程はこれまで明確にされてこなかった。そこで、コンパクト空間内の離散回転対称性を利用して複数の D プレーンを同一視することによって実質上の D プレーンの消滅を実現することを提案した。さらに、その状態を安定な定常状態として実現する可能性として、コンパクト空間内で D プレーンに働く中心力を導入して D プレーンを公転させ、遠心力と中心力の釣り合いによってそれを実現する動力学を提案した。

(4) 弦模型のコンパクト空間の D プレーンの動力学における安定化

平坦な時空を仮定すると矛盾のない弦理論は10次元の時空間を要求する。余分な6次元空間は現在の我々が観測できないように小さく丸まったもの(「コンパクト」なもの)でなければならない。さらにこの「コンパクト」な空間の大きさや形を決まったものに固定しないと、重力に似た長距離相互作用が現れ、宇宙観測に矛盾する。この「コンパクト空間の安定化」の問題は非常に重要であるにもかかわらず、現在の弦理論の技術の及ぶ範囲で具体的に実現できている例はごく少ない(有力なシナリオは存在するが)。

様々なコンパクト空間の可能性のうち、それを変形(体積や形を変えること)する自由度が少なく、かつ現在の弦理論の技術の及ぶ範囲にある、T6/Z3 オービフォルドという空間に着目して、D プレーンと呼ばれる弦理論における重要な物体による「コンパクト空間の安定化」の達成に向けた試みを行った。この空間は高い対称性を持つために形状を変える自由度がなく、体積を変える自由度のみがある。磁気を帯びた D プレーンを導入することにより、その空間の4次元部分空間の体積を固定することができることを具体的な模型を構成して示した。さらに互いに斥力を及ぼし合うプレーンをうまく導入すれば残りの2次元部分空間の体積も固定できる可能性を指摘した。これについては具体的に模型を構成する前に、2次元空間内における

2つのDブレーンの間のポテンシャルエネルギーを求める際に存在する困難(結果が無限大になる)の解決法を提案した。

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)

Naoyuki Haba, Hiroyuki Ishida, Noriaki Kitazawa and Yuya Yamaguchi,
A new dynamics of electroweak symmetry breaking with classically scale invariance,
Physics Letters B755 (2016) 439-443.
DOI:10.1016/j.physletb.2016.02.052

Noriaki Kitazawa and Yuki Sakai,
Constraints on gauge-Higgs unification models at the LHC,
Modern Physics Letters A31 (2016) 1650041 (17 pages).
DOI:10.1142/S0217732316500413

A. Gruppuso, N. Kitazawa, N. Mandolesi, P. Natoli and A. Sagnotti,
Pre-Inflationary Relics in the CMB ?
Physics of the Dark Universe 11 (2016) 68-73.
DOI:10.1016/j.dark.2015.12.001

Satoshi Iso and Noriaki Kitazawa,
Revolving D-branes and Spontaneous Gauge Symmetry Breaking,
Progress of Theoretical and Experimental Physics 2015 (2015) 123B01 (20 pages).
DOI:10.1093/ptep/ptv157

Noriaki Kitazawa and Augusto Sagnotti,
A String-Inspired Model for the Low- l CMB,
Modern Physics Letters A30 (2015) 1550137 (14 pages).
DOI:10.1142/S0217732315501370

String theory clues for the low- l CMB ?
Noriaki Kitazawa and Augusto Sagnotti
EPJ Web Conferences 95 (2015) 03031 (14 pages).
DOI:10.1051/epjconf/20159503031

Noriaki Kitazawa,
Towards the stabilization of extra dimensions by brane dynamics,
International Journal of Modern Physics A30 (2015) 1550055 (25 pages).
DOI:10.1142/S0217751X15500554

[学会発表](計7件)

Noriaki Kitazawa,
Pre-inflationary Physics in String Theory

Seminar at National Center of Theoretical Science (招待講演),
2016年10月21日,
Hsinchu, Taiwan

Noriaki Kitazawa,
Towards Realistic Models in String Theory with D-branes,
KEK 理論センター 夏の合宿(招待講演),
2016年08月04日~2016年08月07日,
長野県安曇野市

Noriaki Kitazawa,
Physics in Extra Dimensions of String Models for Particle Physics,
Seminar at Scuola Normale Superiore di Pisa (招待講演),
2016年03月23日,
Pisa, Italy

Noriaki Kitazawa,
Extra Dimensions in String Phenomenology, New Physics Forum (8th) (招待講演),
2015年12月14日,
高エネルギー加速器研究機構(茨城県つくば市)

北澤敬章,
Pre-inflationary Clues from String Theory?,
大阪市立大学理学研究科数理物理研究室セミナー(招待講演),
2014年10月14日,
大阪府大阪市

Noriaki Kitazawa,
Towards Stabilization of Extra Dimensions by Brane Dynamics,
Workshop on geometry, extra dimensions and string phenomenology (招待講演),
2014年11月04日~2014年11月06日,
宮崎県宮崎市

北澤敬章,
Dynamics in Non-supersymmetric String Models,
信州大学理学部物理学科素粒子論研究室セミナー(招待講演),
2014年10月23日,
長野県松本市

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕
ホームページ等
<http://chercher.phys.se.tmu.ac.jp/>

6．研究組織

(1)研究代表者

北澤 敬章 (KITAZAWA, Noriaki)
首都大学東京・理工学研究科・助教
研究者番号：20271158

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

Augusto Sagnotti
ピサ高等師範学校 (イタリア)・教授