

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19540303

研究課題名 (和文) TeV スケール弦模型の構成と電弱対称性の自発的破れ

研究課題名 (英文) Construction of TeV-scale String Models and Electroweak Symmetry Breaking

研究代表者

北澤 敬章 (KITAZAWA NORIAKI)

首都大学東京・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：20271158

研究成果の概要：素粒子の質量の起源である電弱対称性の自発的破れの機構の解明は、現代素粒子物理学の最重要課題のひとつである。一方、弦理論は重力相互作用をも含めて素粒子現象を記述する枠組みとして期待されているものである。本研究では、弦理論の枠組において電弱対称性の自発的破れが必然的に起こる可能性を追求した。その際、「NS-NS タドポール問題」という難問題の克服が必要であるため、この問題の新しい回避策を開発した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	700,000	210,000	910,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,400,000	420,000	1,820,000

研究分野：素粒子物理学理論

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子、電弱対称性、弦理論

1. 研究開始当初の背景

現代素粒子物理学における最も重要な課題のひとつとして、電弱対称性の自発的破れの機構の解明がある。電弱対称性の自発的破れは、弱い相互作用の弱さを説明すると共に、すべての素粒子の質量の起源でもある。素粒子の「標準模型」の最も精密に検証された部分は電弱相互作用の部分である。特に、素粒子の間に電弱対称性が存在すること、そしてそれが自発的に破れていることは、実験によって非常に精密に検証されている。しかしながら、標準模型は電弱対称性の自発的破れを「手で」起こしているもので、それが「必然

的」に起きているものではない。

この問題を解決するために、量子場の理論を駆使して様々な試みがなされてきた。例えば、標準模型に超対称性を導入して上記の不自然さの問題を解決する試みがその一例であるが、超対称性がどのようにして「必然的」に自発的に破れるのかという新しい大きな問題を生ずるものである。場の理論に基づく追求はアイデアが出尽くした感がある。

本研究は、電弱対称性の自発的破れが「必然的」に起こる未知の機構の探索であり、特に、これまでのように量子場の理論を土台とするのではなく、弦理論を土台として新たな可能性を探るものである。

2. 研究の目的

弦の量子効果によって電弱対称性の自発的破れが必然的に起こるという可能性を、具体的に模型を構成して説得力ある形で提案することを最終目的とした。これに至るための目標として次のものを設定した。

(1) NS-NS tadpole 問題の回避

弦模型においては、質量のないスカラー場としてヒッグス場を得ることができる。ヒッグス場とは、その真空期待値によって電弱対称性を自発的に破るといふ役割を負うものである。特に超対称性のない弦模型においては、ヒッグス場の2乗質量への補正が存在し、それが負の値になる場合には、輻射補正によって「必然的」に電弱対称性が自発的に破れることになる。

しかし、超対称性のない弦模型には「NS-NS tadpole 問題」という難問題があり、これを解決または回避しないと有限な値の質量補正が得られない（答えが無限大になってしまう）。この問題の回避策として「tadpole resummation」という手法が場の量子論に基づいて提案されている。これを弦理論において定式化して実現し、この問題の回避策とする。

(2) 標準模型のゲージ対称性や湯川相互作用が実現される模型の構成

上記の理論的問題の回避を前提に、弦のエネルギースケールが TeV である素粒子の弦模型を具体的に構成する。TeV というエネルギースケールは弦の輻射補正によって電弱対称性が自発的に破れるという要求から決まる。すると、重力相互作用のエネルギースケールであるプランクスケールを得るためには、弦模型の6次元コンパクト空間を弦のエネルギースケール（の逆数）に比べて非常に大きく取らなければならない。明らかに実験と矛盾する結果を導かず具体的に模型を構成できるかどうかは、試みてみないとわからない。

(3) 加速器実験における検証

具体的な模型の構成の成功を前提に、加速器実験、特に LHC、での超対称性のない弦模型の検証について議論する。

3. 研究の方法

研究の目的の欄に挙げたそれぞれの研究目標に対して、次の方法を取った。

(1) NS-NS tadpole 問題の回避

超対称性の存在しない弦模型においては NS-NS tadpole（1点関数）の存在は基本的

に避けられない。NS-NS tadpole の存在は、仮定している平坦な背景時空が構成した弦理論の解になっていない（すなわち偽真空にいる）ことを意味すると解釈されており、その具体的な困難は物理量が発散することとなって現れる。偽真空にいたまま真の物理量を得る手法（tadpole resummation）が、いくつかの場の理論の模型を例にとりてすでに示唆されている。その方法とは、ある物理量を計算する上で、たとえ偽真空にいても、tadpole の効果を無限に足し合わせることで真の値が得られるというものである。この方法を一般的な形で弦理論に適用する。

まず、弦理論におけるDブレーンの真空のエネルギーにおける NS-NS tadpole 問題を対象とする。Dブレーンと閉じた弦の間の「contact interaction」の効果を「boundary state」の方法を用いて取り扱い、tadpole の効果を無限に足し上げる。発散する真空のエネルギーへの補正は、この足し上げの後には有限になるはずである。

次に、スカラー場の背景場が存在するときのDブレーンの「boundary state」を構成し、同様のことを行う。この場合の真空のエネルギーの背景場の2次の係数が、スカラー場の質量への弦の量子補正である。

(2) 標準模型のゲージ対称性や湯川相互作用が実現される模型の構成

弦のエネルギースケールが低い場合には、Dブレーンを用いて標準模型のゲージ対称性を実現する必要がある、その方法としては2つある。ひとつは6次元コンパクト空間内で互いに交差するDブレーンを用いるもので、もうひとつは6次元コンパクト空間内の特異点にDブレーンを設置するものである。明らかに実験と矛盾する結果を導かないように、両方の可能性についてDブレーンの次元や配位を工夫する。

4. 研究成果

研究の目的の欄に挙げたそれぞれの研究目標に対して、次のような成果が得られた。

(1) NS-NS tadpole 問題の回避

①ボゾン弦の理論におけるタキオン凝縮と tadpole resummation

ボゾン弦の理論はフォルミオン場を生成しないので現実の物理に応用することはできないものだが、NS-NS tadpole 問題のような理論的な問題を議論する場合には用いることができる。ボゾン弦の理論は、現実の物理に応用できる可能性のある超弦理論に比べて、その理論的構造が簡単なので、理論的な問題の核心を本質的でない複雑さにわず

らわされずに調べることができる。ボゾン弦の理論は時空 26 次元の理論であるが、その空間全体を占める D25-brane を導入してその真空のエネルギーに対する弦の量子補正を考える。古典論のレベルでの真空のエネルギーは D25-brane の張力そのもので、正の有限な値をとる。これに対する閉じた弦の one-loop 補正は、ディラトンとグラビトンの tadpole の存在により赤外発散する。

この系は「タキオン凝縮」という現象を含むものとして広く研究されてきたものである。実は D25-brane は安定に存在できないことが、その上にタキオン（負の 2 乗質量を持つ励起）が存在することからわかり、「タキオンが真空に凝縮」することによって D25-brane が崩壊して消滅してしまうと信じられている。もしこれが本当ならば、D25-brane の真の真空のエネルギーはゼロであるはずで、tadpole resummation を行って得られる真空のエネルギーに対する弦の量子補正は正確に古典論のレベルでの真空のエネルギーを相殺するはずである。

ディラトンとグラビトンの tadpole、すなわち D25-brane との 1 点結合は D25-brane の boundary state によって表現できることが知られている。2 点結合以上が存在することは知られていたが（低エネルギー有効理論により）、それらの弦理論における表現方法は確立していなかった。そこで、すでに知られている boundary state を組み合わせてそれを表現した。

ディラトンとグラビトンが 2 点結合によって D25-brane の上をバウンドしながら伝播していく効果や、3 点以上で D25-brane と結合する効果をすべて足し上げることによって、D25-brane の真空のエネルギーに対する量子補正として有限な値を得ることができた。その値は期待通り、古典論のレベルの真空のエネルギーを正確に相殺するもので、「タキオン凝縮」の考察と一致するものである。「タキオン凝縮」の考察は非常に複雑なものであるが、この方法は単純であり、理論的に非常に興味深い発見である。

②安定な系での tadpole resummation

ボゾン弦の理論における D25-brane は不安定な系であるが、安定な系で tadpole resummation を行い、今度は真空のエネルギーの相殺が起こらないことを確かめなければならない。これが達成されないと、D25-brane の場合に偶然にうまくいっただけである可能性があるからである。

超弦理論における超対称性のない簡単な模型として、タイプ IIB 型超弦理論に特殊な unoriented projection をほどこして、かつ 32 枚の D9-brane を導入して得られるもの（杉本模型）がある。この模型にはタキオンは存

在せず、したがって安定である。しかしながら、NS-NS tadpole は存在するため、真空のエネルギーへの弦の量子補正を普通に計算すると発散する。

系の安定化のために必要な unoriented projection によって orientifold fixed plane (O9-plane) が導入される。この O9-plane も張力を持つため、古典論のレベルでの真空のエネルギーは D9-brane の張力と O9-plane の張力の和で有限な正の値となる。また、O9-plane も D9-brane と同様にディラトンやグラビトンと tadpole 結合する。

この模型において tadpole resummation を用いて真空のエネルギーへの弦の量子補正を計算してみると、O9-plane に起因する効果によりゼロとなり、期待通り真空のエネルギーの相殺は起きないことがわかった。

③スカラー場のポテンシャルに対する弦の量子補正への tadpole resummation の応用

上記の成功を受けて、tadpole resummation をスカラー場の質量（ポテンシャル）への弦の量子補正の計算に応用すべく定式化を行った。スカラー場の導入は D ブレーンの上に定数の背景スカラー場が存在する状況での boundary state を構成することによって実現した。D ブレーンという弦理論の構成要素が発見される以前に、boundary action を重みとして boundary state を重ね合わせることによって、背景ゲージ場が導入できることが知られていたが、それを応用して背景スカラー場を boundary action を用いて導入した。

この過程で、ひとつの D ブレーンの上に存在し得るスカラー場は 2 種類に分類されることがわかった。ひとつは 6 次元コンパクト空間の方向に偏極するゲージ場に起源を持つもので、もうひとつは D ブレーンの 6 次元コンパクト空間内での位置を表現する場に起源を持つものである。前者のスカラー場のポテンシャルに対する弦の量子補正はすでに計算されていて、tadpole resummation の手続きは必要ないことが知られている。しかしこの場合に標準模型のヒッグス場を得るためには複雑なコンパクト化を行わなければならない、第 2 の可能性のほうが単純である。しかし、その場合には tadpole resummation が必要である。

超弦理論に基づく超対称性のない模型の例として、特異点上に設置された D ブレーンと反 D ブレーンの系を考えて、D ブレーンの上に実現されるスカラー場（第 2 の場合に属する）の質量についての弦の量子補正を tadpole resummation を行って計算し有限な値を得た。しかし、twisted sector の閉じた弦と D ブレーンとの結合の情報が未知であるために、完全な計算はできず、2 乗質量の符号を確定することはできなかった。

(2) 標準模型のゲージ対称性や湯川相互作用が実現される模型の構成

①コンパクト空間内で交差するDブレーンを用いる模型

典型的な模型は空間6次元を占めるDブレーンを用いるものである。その空間6次元の内の3次元は我々の知る空間で、残りの3次元空間は6次元コンパクト空間内に埋め込まれることとなる。6次元コンパクト空間を3つの2次元トーラスに分けて、Dブレーンの3つの空間次元がそれぞれ3つの2次元トーラスに埋め込まれるという構成が典型的である。しかし、弦のエネルギースケールをTeVと低い場合にはコンパクト空間の体積を大きくする必要があって、これはこの設定においては軽い Kaluza-Klein ゲージボソンの存在を意味することとなるために、実験や観測と矛盾するので受け入れられない。コンパクト6次元空間の中の少なくとも2次元空間をDブレーンが占めない空間として確保する必要があり、そのために、空間5次元を占めるDブレーン考えた。この場合にある程度現実的な模型の構成が可能であることはすでに研究されている。

しかし、この「コンパクト空間内で交差するDブレーンを用いる模型」には一般的に、模型によらずに主張することのできる、決定的な困難がすでに指摘されていることを知った。それは、ヒッグス場が何らかの機構で真空期待値を持ち、素粒子の質量がDブレーンの空間的配位によって決定される湯川結合を通じて生成されるとしたときには、大きなFCNC (Flavor-Changing Neutral Current) を生じてしまうということである。実験ではFCNCの効果は非常に小さいことがわかっているので、この種の模型でTeV程度の低い弦のエネルギースケールを実現することは困難であると理解した。

②コンパクト空間内の特異点にDブレーンを設定する模型

この種の模型については上記のような制限は知られていないが、現実のさまざまな素粒子の質量の値を実現するような湯川結合を生成することが難しい。この問題については、「Dブレーンインスタントン効果」によって解決が見られるのではないかと期待されていて、現在盛んに研究されている。この効果によって現実的な湯川結合の生成が可能であるということになれば、次に問題になることはFCNCの効果の大きさである。現在これについて研究を進めている。

具体的に様々な模型を構成して実験と矛盾しないものを得る努力を行ったが、目標の達成には至らなかった。

(3) 加速器実験における検証

残念ながら、加速器実験への予言をするに足る模型を得ることができなかったため、この目標は今後の課題となって残った。

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 2 件)

① Noriaki Kitazawa, One-loop masses of open-string scalar fields in String Theory, Journal of High Energy Physics, 0809, 049 (27 pages), 2008, 査読有り。

② Noriaki Kitazawa, Tadpole Resummations in String Theory, Physics Letters, B660, 415-421, 2008, 査読有り。

[その他]

(1) セミナー

北澤敬章

“Tadpole resummation in String Theory”
マドリッド自治大学 (スペイン)
2008年2月12日。

北澤敬章

“One-loop masses of open string scalar fields in String Theory”、
中央大学、2008年7月9日。

(2) ホームページ

<http://chercher.phys.metro-u.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・大学院理工学研究科・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
(アウグスト サニョッティ)
ピサ高等師範学校 (イタリア)・教授
Emilian Dudas
(エミリアン デュダス)
パリ工科大学 (フランス)・教授