

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010 ~ 2012

課題番号：22740158

研究課題名（和文）

ゲージ理論と弦理論の非摂動効果に関する研究

研究課題名（英文）

Nonperturbative effects in gauge theory and string theory

研究代表者

酒井 忠勝 (TADAKATSU SAKAI)

名古屋大学・理学研究科・准教授

研究者番号：50375359

研究成果の概要（和文）：

ゲージ理論/弦理論対応を用いて、スピンの1より大きい中間子の質量スペクトラムを計算し、実験結果とうまく一致することを確認した。また、Regge軌跡について新たな知見を得ることができた。さらに、あるasymmetric orbifold上に置かれたD-ブレーンを用いて、素粒子の標準模型を構成できないか、議論した。

研究成果の概要（英文）：

The mass spectra of mesons of spin more than one are computed using the gauge/string correspondence. It is found that the results are in accord with the experimental data. A new insight into the Regge trajectories is gained. A string model based on an asymmetric orbifold with D-branes put on it is constructed to discuss whether this model may yield the standard model of particle physics.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
総計	1,700,000	510,000	2,210,000

研究分野：物理学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：場の理論、弦理論、ゲージ理論/弦理論対応

1. 研究開始当初の背景

本研究を開始した当時は、弦理論におけるゲージ理論/弦理論対応を様々な系に応用することが、最重要課題の1つであった。

この対応はもともと、ある特殊な超対称ゲージ理論と弦理論の2つが実は等価であるとの主張であった。特に一方の強結合物理がもう一方の弱結合物理により記述することが可能となる。したがって、ゲージ理論/弦理論対応をより現実的な理論、例えばハドロン物理を支配する量子色力学(QCD)に適用するこ

とにより、これまで解析が困難であった様々な強結合物理の理解が大きく前進する、と期待されていた。本研究が始まる前の2005年に、ハドロン物理を理解するための1つのモデルを、共著論文 Prog. Theor. Phys. 113, 843-882 (2005) において提案していた。これはD-ブレーンと呼ばれる物体をうまく組み合わせで定義される。カイラル対称性の自発的破れの定性的理解のみならず、低エネルギーハドロン物理の実験結果もかなりの精度で説明できることがわかり、このモデルの有用性が明らかされつつあった。

ハドロン物理のみならず他の様々な物理系における成功から、計算道具としてゲージ理論/弦理論対応が非常に有用であると、多くの研究者は考えている。その一方で、発見当時から、ゲージ理論/弦理論対応はあくまで予想である。これまで数多くの証拠が積み上げられてはいるが、この対応が成立する本当の理由は未解明である。ゲージ理論/弦理論対応の背後に潜む物理を解明し、その正当性を厳密に証明することが必要不可欠であった。

2. 研究の目的

素粒子物理学における確立されている標準モデルは、ある種のゲージ理論により記述されている。その中でも特に QCD は、非可換群 SU(3)をゲージ群とし、物質場としてクォークを含むゲージ理論である。ハドロン物理における多種多様な現象を理論的に解明するには、QCD の深い理解が必要不可欠である。しかしながら、ゲージ群の非可換性から、QCD を解析的に解くことはほとんど不可能であり、これまでは数値計算に頼らざるをえなかった。そのような状況において、ゲージ理論/弦理論対応は発見されたことは大きな意義をもつ。すなわち、数値計算に代わる、非常に強力な計算道具を手にしたことを意味する。実際、Prog. Theor. Phys. 113, 843-882 (2005) において提案されたモデルは、低エネルギー領域におけるハドロン物理の実験結果をうまく説明できることが明らかになってきた。本研究の目的の一つは、このモデルをより詳しく解析することにより、理論と実験の一致がどの程度成り立つのかを見極めることであった。それにより、このモデルの有用性をより確かなものとしてできるだけでなく、ゲージ理論/弦理論対応そのものを裏付ける大きな証拠になると考えたからである。

大きな成功を収めた一方で、理論からの予言が実験結果から大きくずれる可能性もある。実際このモデルは、現実の QCD とは矛盾するいくつかの近似のもとで定義されている。具体的には、クォークに質量が与えられていないこと、本来カラーの数が 3 であるところを無限大にとっていること、などである。経験上、これらの近似を行っても、理論と実験の対応がうまくいくことは知られているが、どの範囲で一致が崩れるか系統的に理解されていない。それらを調べることは興味深い。さらには、このモデルをハドロン物理を記述モデルとして確立するためには、上で述べた近似をすることなく、モデルを定式化する必要がある。しかしながら、そのためにはいくつかの技術的な問題を解決せねばならない。上で述べた研

究は、その解決に向け、貴重な示唆を与えると期待される。

ゲージ理論/弦理論対応は、非常に強力な計算の道具立てを与えただけでなく、ゲージ理論と弦理論という、一見全く異なる 2 つの理論が実は等価であるという視点を与えた、という点からも非常に意義深い。というのも、理論物理学におけるいくつかの未解決問題、例えば QCD におけるクォークの閉じ込め、また重力の量子化など、は実は非常に密接に関連した問題であると示唆しているように思えるからである。ゲージ理論/弦理論対応が成立する真の理由を明らかにすることにより、上に述べた未解決問題についての深い知見が得られと期待できる。

3. 研究の方法

Prog. Theor. Phys. 113, 843-882 (2005) のモデルは、IIA 型超弦理論において、D4-ブレーンと D8-ブレーンと呼ばれる 2 つの物体をうまく組み合わせることで構成されている。特に、D8-ブレーン上で実現される 5 次元のゲージ理論を用いて、ハドロン物理を記述することが、この論文の key であった。これによりスピンの 0 と 1 のメゾン、およびスピンの 1/2 のバリオンの低エネルギー現象はかなりの精度で説明できることが示された。しかしながら、1 より大きいスピンをもつ中間子をこのモデルで記述するためには、このモデルを拡張する必要があった。より具体的には、上に述べた D8-ブレーンに端を持つ弦の量子化を行い、その質量スペクトラムを読み取らねばならない。しかしながら、D8-ブレーンは曲がった時空、しかも RR flux と呼ばれる弦理論に特有な背景場上に存在するため、弦の量子化を実行するのは非常に困難であった。その問題を解決するために、Prog. Theor. Phys. 124 (2010) 263-284 において、ある近似法を用いることを提案した。それは、時空の曲がりを、平坦時空からのずれとして摂動論的に取り扱うことである。これにより、RR flux の効果は摂動の高次項として処理することができる。そして、平坦時空上で計算された弦の質量スペクトラムに、時空の曲がりの効果を摂動論的に取り入れることにより、スピンの 1 よりも大きいメゾンの質量スペクトラムを計算した。

D ブレーンにはゲージ理論としての立場、そして重力場の源として曲がった時空を生成する視点が存在する。その 2 つがある適当な極限のもとで一致すると主張するのが、ゲージ理論/弦理論対応に他ならない。非常にもっともらしい考えであり、実際数多くの証拠

により支えられていることは、すでに述べた通りである。一方、ゲージ理論/弦理論対応の正当性を厳密に証明することは、未だなされていない。多くの技術的な困難を伴う問題であるので、まずは単純化された系から議論を始めることが重要である。具体的には、2次元のQCDを取り上げた。トフーフトモデルとも呼ばれるこの単純化されたモデルは、カラーの数を無限大にとった極限において、トフーフトにより厳密に解かれている。特に、中間子の質量スペクトラムを決定する積分方程式が導出されている。このように厳密な結果が得られている場の理論をゲージ理論/弦理論対応において考え、積分方程式を弦理論から理解することができれば、ゲージ理論/弦理論対応を支持する強力な証拠になり、興味深い。2次元QCDを実現するモデルは、D2-ブレーンとD8-ブレーンを組み合わせで定義できることが分かる。そしてD8-ブレーン上に現れる3次元ゲージ理論により、中間子の物理を記述すると結論に導かれる。この理論に基づき、2次元QCDの解析を試みた。

弦理論は自然界に存在する4つの基本相互作用の統一理論の最有力候補と考えられている。実際、素朴に重力を量子化した時に生ずる様々な問題は、弦理論においてはうまく回避できることが知られている。そして、弦理論は標準模型のもつ基本的な性質、具体的にはゲージ群の構造や、カイラルフェルミオンと呼ばれる質量のない物質場を含むことなど、をも自然に説明することができる。しかしながら、実際に弦理論から標準模型を構成する試みは、成功していない。というものの、標準模型の自由度以外にも、余分な場が数多く含まれてしまい、標準模型と完全に一致するモデルを作るのは非常に困難であるからである。このような状況を改善すべく、Prog. Theor. Phys. (2012) 127(5): 819-830において、asymmetric orbifoldと呼ばれる、弦理論に固有な空間上にD-ブレーンをうまく配置することにより、標準模型の構成できないか解析を行った。

4. 研究成果

Prog. Theor. Phys. 124 (2010) 263-284において、スピンの1以上の中間子の質量スペクトラムを、弦理論を用いて計算した。素朴に計算すると、現実の中間子とは無関係な状態が数多く現れることがわかった。それらを排除するために、今考えているモデルがもつ不連続な対称性を完全に調べ尽くした。その結果、今のモデルは現実のQCDが持つ対称性以外にも余分な不連続対称性を持つことがわかった。それに対して電荷を持つ状態は、非物理的状态とみなし、それらをすべて排除すべき

である。結果得られた質量スペクトラムは、実験結果とうまく一致することを確かめた。次に、中間子の中でも、 ρ 中間子軌跡と呼ばれる一群の中間子に注目した。スピンを縦軸、質量の2乗を横軸に取り、これらの中間子についてプロットすると、ある直線上に載ることが知られていた。一方上記の論文においては、 ρ 中間子軌跡の点が直線ではなく、2次元関数曲線に載ることを模型から導いた。そしてこの曲線は実験結果をうまく再現できることも確かめた。

弦理論は、弦が時間発展することにより描かれる世界面上の2次元共形場理論から定義される。この理論は一般に、弦の右向きと左向きの進行波から定義される状態空間の2つから成る。それらを弦理論の数学的要請に基づき制限することにより、弦理論の状態空間が与えられる。この構成法から、弦理論には右向きと左向きの状態空間に独立に作用する対称性が可能であることが分かる。これはT-dualityと呼ばれ、弦理論に固有の性質である。そしてT-duality群の適当な部分群をゲージ化することをasymmetric orbifoldという。これとD-ブレーンを組み合わせることにより、素粒子の標準模型を構成することが、Prog. Theor. Phys. (2012) 127(5): 819-830の目的であった。そのために、まずII型超弦理論をある特殊な形状をもつ6次元トーラスにコンパクト化し、かつ適当な背景場を与えた。そして、この弦理論のT-duality群の構造を調べた結果、トーラスの形状と背景場を不変に保つT-dualityの部分群として、不連続群 $Z_3 \times Z_3$ が許されることを示した。次に、この不連続群の作用と整合するD-ブレーンの配位を調べた。そして、3種類のD9-ブレーンを用意し、それぞれ異なるfluxを与えることにより、 $Z_3 \times Z_3$ の作用のもとで3種類のD9-ブレーンが互いに移行合うことを確かめた。最後に、このように構成された系を $Z_3 \times Z_3$ で割ることによって作られたのが、上記の論文の模型である。質量スペクトラムを調べた結果、ゲージ群はSO(4)、また物質場としてはSO(4)の随伴表現に属する場が現れることがわかった。これらは標準模型とはまったく異なる内容であり、残念ながら今回の模型も標準模型を導くことはできなかった。

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) Motoharu Ito and Tadakatsu Sakai, "A

Model of Asymmetric Orbifold with D-Branes”, 査読あり、Prog. Theor. Phys. (2012) 127(5): 819-830

(2) Toshiya Imoto, Tadakatsu Sakai and Shigeki Sugimoto, “Mesons as Open Strings in a Holographic Dual of QCD”, 査読あり, Prog. Theor. Phys. 124 (2010) 263-284

[学会発表] (計 2 件)

- (1) 重森正樹, 野澤晋作, 酒井忠勝, ” AdS/CFT 対応における高エネルギー衝突系の重力双対”、日本物理学会 第 68 回年次大会、広島大学、2013 年 3 月 28 日
- (2) 伊藤元治, 酒井忠勝, “Asymmetric Orbifold 上の D-brane を用いた現象論的モデルの可能性”, 日本物理学会 第 67 回年次大会、関西学院大学、2012 年 3 月 26 日

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 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 0 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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒井忠勝 (TADAKATSU SAKAI)
名古屋大学 大学院理学研究科 准教授

研究者番号：22740158

(2) 研究分担者なし

(3) 連携研究者なし

