

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 14 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540259

研究課題名(和文) 超対称性のないゲージ理論の弦理論による解析

研究課題名(英文) Analysis of non-SUSY gauge theory via string theory

研究代表者

杉本 茂樹 (SUGIMOTO, Shigeki)

京都大学・基礎物理学研究所・教授

研究者番号：80362408

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：超弦理論を用いて超対称性のないゲージ理論の性質を解明する研究を行った。主として行った研究は超対称性のないゲージ理論におけるS双対性と3次元ヤン・ミルズ・チャーン・サイモンズ(YMCS)理論のホログラフィック双対の研究である。前者については、相互作用が強く解析が困難なゲージ理論を相互作用が弱く解析が容易な別のゲージ理論と結びつける新しいS双対性を超弦理論のS双対性を用いることによって見出し、カラーの閉じ込めや対称性の自発的破れなどの現象を弱結合の物理を用いて理解できることを示した。後者については、YMCS理論にドメインウォールがある系を詳しく解析し、新種の相転移現象の発見などの成果があった。

研究成果の概要(英文)：We studied non-supersymmetric gauge theories using superstring theory. In particular, we mainly considered S-duality in non-supersymmetric gauge theory and holographic dual of 3 dim Yang-Mills-Chern-Simons (YMCS) theory. For the former, we found a new S-duality that relates strongly coupled gauge theory and weakly coupled gauge theory using string theory, and showed that the color confinement and dynamical symmetry breaking can be understood in terms of the weakly coupled description. For the latter, we analyzed the YMCS theory with domain walls using holography and found various new features of this system including a new kind of phase transition.

研究分野：素粒子論

キーワード：超弦理論 Dブレイン オリエンティフォルド S双対性 QCD カラーの閉じ込め 対称性の力学的破れ
Chern-Simons 理論

1. 研究開始当初の背景

1990年代中ごろから弦理論の第二革命と呼ばれる大きな発展が始まり、Dブレーンという膜状の物体を考えることで様々なゲージ理論を弦理論の中に実現し、弦理論の知識を用いてゲージ理論を解析することができるようになった。そして、1997年にゲージ理論と曲がった時空における弦理論が等価になるという驚くべき双対性(ゲージ/弦双対性)が発見され、弦理論とゲージ理論の間の交流は一層盛んになった。こうした発展は伝統的な場の理論の方法とは全く異なる新しい解析法を提供し、様々な成功を収めてきた。ただ、こうした研究の大多数は解析のしやすさや数学的な美しさなどから超対称性や共形対称性のある系を扱っている。現実世界ではこれらの対称性は破れているため、これらの対称性が破れた状況での解析は是非ともやらなければならない課題である。特に強い相互作用の基礎理論であるQCDやそれに関連するゲージ理論に対する新たな非摂動的解析法を開発する研究は非常に重要である。2004年の末ごろから私は共同研究者の酒井忠勝氏らとともに、ゲージ/弦双対性をQCDに応用する研究を行い、QCDと双対な弦理論による記述(ホログラフィックQCD)を見出すことに成功した。この記述を用いて、QCDの様々な非摂動的性質を非常に簡単な考察で定性的に導けることを示し、さらに荒い近似ながらハドロンの質量や相互作用の強さなど、様々な物理量を計算してみたところ、実験値と期待以上に良く合うことも示された。この例のように、弦理論の方法は超対称性のないゲージ理論に対しても大変強力な解析法を提供することが示唆されるが、まだこのような例は少なく、謎も多い未開拓な研究分野であると言える。

2. 研究の目的

本研究の主要な目的は超対称性のないゲージ理論に対して、弦理論を用いた新たな解析法を開発することである。それによってゲージ理論と弦理論の双方に新たな知見をもたらす、素粒子や時空に関する伝統的な考え方を超えた新しい世界観を得ることを目指す。より具体的には、強結合のゲージ理論におけるカラーの閉じ込め、対称性の力学的破れの機構や相転移現象などの解明を目指し、未だに謎の多い双対性に対する理解を深めるとともに、より現実的な系に対する応用も議論する。弦理論によるゲージ理論の研究は伝統的な場の理論の方法とは全く異なる新しい方法であるため、ゲージ理論の強結合領域での現象に対して場の理論だけを研究しては思いもよらないような全く新しい理解や強力な解析法を提供する可能性がある。また、逆にゲージ理論の知識を用いて弦理論の構造を解明する方向性も期待できる。

前述のゲージ/弦双対性は未だに証明がなく、状況証拠が積み上げられている状況である。例えば2次元QCDや3次元チャーン・サイモンズ理論など場の理論の構造が良く理解されている場合にこの双対性を適用することで、ゲージ/弦双対性が何故成立するのかをより深く理解することができるようになるのではないかと期待できる。この際、超対称性があると対称性の縛りが強すぎて本質が隠されてしまうことが多々あるため、超対称性に頼らない議論を深めることは重要である。

3. 研究の方法

- (1) まず弦理論の枠内にDブレーンやオリエンティフォールドをうまく配置することで超対称性のないゲージ理論を実現する。その系に対して弦理論で知られている双対性を用いることで別の記述を得る。一方の理論が強結合理論であるときにはそれと双対な記述は弱結合の理論になることが期待されるため、強結合の理論における現象を弱結合の理論を用いて解析する。具体的にはタイプIIB型の弦理論においてO3ブレーンと呼ばれるオリエンティフォールドに超対称性を完全に破る向きに反D3ブレーンを重ねた系を考える。タイプIIB型の弦理論にはS双対性と呼ばれる弱結合の理論と強結合の理論を結びつける双対性があることが知られており、O3ブレーンや反D3ブレーンがS双対性のもとでどのように移り合うのかも良く理解されているため、この系がS双対性でどのように振る舞うのかは超対称性が破れているにも関わらず理解できる。この系から導かれる場の理論のS双対性を詳しく調べ、強結合理論におけるカラーの閉じ込めや対称性の力学的破れが弱結合理論を用いてどのように理解できるかを詳しく調べる。
- (2) また、Dブレーンの一部を対応する曲がった時空に置き換える操作によって、ゲージ/弦双対性を応用できる場合には、曲がった時空における弦理論の記述を用いてゲージ理論の様々な性質を調べる。具体的にはD3ブレーンを円周にコンパクト化した系を考え、この円周上でフェルミオンに反周期境界条件を課すことで超対称性を完全に破る。この系にさらにD7ブレーンをプローブとして加え、チャーン・サイモンズ項を持つ場の理論を実現するとともに、チャーン・サイモンズ項のレベルが変化するようなドメインウォールを導入することができる。ここでD3ブレーンに対応する曲がった時空は知られているので、曲がった時空における弦理論を用いた記述を得ることができる。この記述を用いて、この理論の様々

な性質を詳しく調べる。

上記 (1), (2) のどちらの方法も超対称性のない場合にも成立すると考えられており、本研究の目的に合致している。

4. 研究成果

様々な解析を行ったが、主要な成果が上がったテーマは研究の方法で述べた二つに分けられる。一つは(1)超対称性のないゲージ理論に対するS双対性の研究で、もう一つは(2)3次元のヤン・ミルズ・チャーン・サイモンズ理論に対するゲージ/弦 双対性に関する研究である。

(1) タイプ IIB 型の弦理論にO3 プレインと反D3 プレインを配置することで、超対称性が破れていながら不安定モードのないゲージ理論を構成し、その系に対して弦理論のS双対性を用いることによって、超対称性のないゲージ理論に対するS双対性を見出した。一方の記述はゲージ群が $USp(2n)$ であり、物質場としてゲージ群の反対称表現に従うフェルミオンとゲージ群の随伴表現のスカラー場が存在する系であり、これと双対な記述はゲージ群が $SO(2n-1)$ で対称表現のフェルミオンと随伴表現のスカラー場を含む理論である。超対称性のない4次元のゲージ理論でこのように強い根拠と説得力のある双対性を提案した例は、自明な例を除くと私の知る限り他にはない。特に面白いのは $USp(2n)$ 理論は低エネルギーで強結合の理論であり、カラーの閉じ込めや対称性の力学的破れが起こることが予想されている理論であるところである。これに対し、この理論に双対な $SO(2n-1)$ 理論による記述は低エネルギーで弱結合の理論であり、摂動的な解析を行うことができる。その結果、(いくつかの)この理論のスカラー場が非自明な真空期待値を持ち、それによってゲージ対称性は完全に破れ、大域的対称性は一部が破れることが分かった。ゲージ対称性の破れは、双対マيسナー効果によって $USp(2n)$ 理論の閉じ込めを引き起こし、大域的対称性の破れは $USp(2n)$ で予想されている対称性の破れをうまく再現することを分かった。双対マيسナー効果による閉じ込めのアイデアは古くからあり、様々な議論がなされてきたが、私の知る限り、超対称性がない場合にこのように non-Abelian なゲージ群を持つゲージ理論における双対性に基づく筋の通った議論ができた例はこれが初めてである。

(2) 3次元ヤン・ミルズ・チャーン・サイモンズ理論に関する研究では、この理論に

2次元のドメインウォールがある系を弦理論の枠内に実現する方法を提案し、さらにゲージ/弦 双対性を用いて様々な解析を行った。まず、この系の曲がった時空中の弦理論を用いた記述におけるDブレインの配置を表す解を解析的に求めることに成功し、理論のパラメータを変えるとその配位がどのように変わるのかを調べた。また、このDブレイン上のゲージ理論と元の3次元ヤン・ミルズ・チャーン・サイモンズ理論を比較するとチャーン・サイモンズ理論において知られているレベル・ランク双対性と呼ばれる双対性を実現することが示され、ドメインウォールがその双対性のもとでどのように移り合うのかが明らかになった。そして、ホログラフィック繰り込みと呼ばれる発散を除去する操作をこの理論に適用し、発散を相殺するために必要な相殺項を求めた。これを用いてドメインウォール上のオペレータの相関関数や自由エネルギーなどを計算した。その結果、系の温度を上げたときやドメインウォールの位置を動かしたときに興味深い相転移が起こることが分かった。また、この系は2次元QCDや分数ホール効果と深い関わりがあることを指摘し、その関連を議論した。例えば、ドメインウォールの上にカイラルなボソンの自由度が生じることが示されるがこれは分数量子ホール効果に境界がある場合に生じることが知られているエッジ状態に対応することが分かり、さらにこれは2次元(ラージN) QCDにおけるカイラル対称性の自発的破れに伴って出てくる南部・ゴールドストーン粒子と同定されることが示された。

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)

杉本茂樹、 “ Confinement and Dynamical Symmetry Breaking in non-SUSY Gauge Theory from S-duality in String Theory ”, Progress of Theoretical Physics (査読有), 128 (2012) 1175-1209, DOI: 10.1143/PTP.128.1175

杉本茂樹、 “ Hadrons from String Theory ”, Few-Body Systems (査読無), 54 (2013) 71-75, DOI: 10.1007/s00601-012-0331-4

[学会発表](計 8 件)

杉本茂樹、 “ Towards a holographic dual of 3 dim YM-CS theory with defects (and 2 dim QCD) ”, Integrability in gauge-gravity duality and strong

coupling dynamics of gauge theory (招待講演)、2014年9月、京都大学

杉本茂樹、 “ On a holographic description of 3 dim Yang-Mills-Chern-Simons theory with defects ”, Aspects of holography (招待講演) 2014年7月、APCTP, Pohang, Korea

杉本茂樹、 “ Holographic QCD ”、Holography 2013: Gauge/gravity duality and strongly correlated systems (招待講演)、2013年6月、APCTP, Pohang, Korea

杉本茂樹、 “ 弦理論によるハドロンの解析 ”, スペクトル・散乱理論とその周辺 (招待講演) 2012年12月、京都大学数理解析研究所

杉本茂樹、 “ Holographic QCD -Status and perspectives for the future- ”, X th Quark Confinement and the Hadron Spectrum (招待講演)、2012年10月、TUM, Garching, Germany

杉本茂樹、 “ On S-duality in non-SUSY gauge theory ”, The 29th International Colloquium on Group-Theoretical Methods in Physics (招待講演)、2012年8月、Nankai University, Tianjin, China

杉本茂樹、 “ On S-duality in non-SUSY gauge theory ”, Applications of Gauge-Gravity Duality (招待講演)、2012年6月、Technion, Haifa, Israel

杉本茂樹、 “ On S-duality in non-SUSY gauge theory ”, Progress in Quantum Field Theory and String Theory (招待講演)、2012年4月、大阪市立大学

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉本茂樹 (SUGIMOTO, Shigeki)
京都大学・基礎物理学研究所・教授
研究者番号：80362408

〔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：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：