

平成 21 年 5 月 21 日現在

研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18540266
 研究課題名(和文) 弦の場の理論とループ方程式による弦理論とゲージ理論の双対関係の探究
 研究課題名(英文) Investigation of the duality between string theories and gauge theories in terms of string field theory and loop equations
 研究代表者
 畑 浩之 (Hiroyuki Hata)
 京都大学・大学院理学研究科・教授
 研究者番号: 70164837

研究成果の概要：超弦理論とゲージ理論の双対性である AdS/CFT 対応を拡張することによって得られた、強い相互作用を表す QCD を再現するモデルとして「酒井・杉本模型」がある。本研究では、まず、酒井・杉本模型においてバリオンを表すソリトン解を構成し、その集団座標量子化を行うことでバリオンのスペクトラムを求め、負パリティバリオンも含めて実験との比較的良い一致を得た。更に、この結果をフレーバー数が 3 の場合に拡張し、また、バリオンの電荷分布や磁気モーメント等の静的な諸性質の解析を与えた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,100,000	0	1,100,000
2007年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	690,000	4,090,000

研究分野：素粒子論

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：超弦理論、AdS/CFT 対応、ループ方程式、ホログラフィック QCD、Skyrmion、ソリトン、バリオン

1. 研究開始当初の背景

超弦理論と 4 次元超対称ゲージ理論の等価性であるところの AdS/CFT 対応は、非常に難しい強結合領域のゲージ理論の解析を超弦理論あるいは超重力理論の摂動論的解析を用いて実行できる点において、その重要性が益々高まってきていた。しかし、AdS/CFT 対応は、それを支持するさまざまな証拠があるものの、その証明は与えられていなかった

(残念ながら、現時点でもそうである)。従って、AdS/CFT 対応に対して(数学的に厳密ではなくとも)“決定的な証明”を行うことは重要な課題であった。

2. 研究の目的

超弦理論と超対称ゲージ理論の等価性である AdS/CFT 対応は、ゲージ理論の非摂動論

的解析のための強力な道具を与えるものであるが、その証明は未だ与えられていない。本研究の本来の目的は、この AdS/CFT 対応に対して、特に、超弦理論側の記述法として「弦の場の理論」を用いた証明を与えることであった。弦の場の理論とは、弦の配位の汎関数である弦場を力学変数とし、弦場の作用を与えることで弦理論を表現する定式化であり、ゲージ対称性や一般座標不変性の弦理論的拡張である巨大な弦的ゲージ対称性を持つ理論である。弦の場の理論を用いた AdS/CFT 対応の証明に向けた具体的な戦略としては、4 次元超対称ゲージ理論におけるゲージ不変量である Wilson ループ演算子が従う(非線形項の入った)ループ方程式を導き出し、Wilson ループ演算子を弦場、ループ方程式を弦の場の理論の運動方程式と同定して等価性を示す、というものである。具体的な課題としては以下のようなものが考えられた:

- (1) 4 次元 $N=4$ 超対称ゲージ理論におけるループ方程式の確立
- (2) ループ方程式からの弦の場の方程式の導出
- (3) ループ方程式を基礎とした AdS/CFT 対応の理解
- (4) 超弦理論のダイナミクスの解析

3. 研究の方法

弦の場の理論を基礎にした AdS/CFT 対応の証明に向けた手順としては、超弦理論におけるゲージ不変量である Wilson ループ演算子を弦の場の理論の力学変数である弦場と同定し、Wilson ループ演算子が従うループ方程式をゲージ理論において導き出し、これを弦の場の理論の運動方程式と対比して解析をおこなうことが考えられた。このための第一の課題は、以前は特殊な形のループ(=弦の配位)に対してしか与えられていなかった超対称ゲージ理論の Wilson ループ演算子を一般の形のループへ拡張し、更に、ループの微小変形に対する Wilson ループ演算子の応答をゲージ理論の運動方程式を用いて解析することでループ方程式を導くことである。超対称性を持たないゲージ理論の場合は、ループ方程式が弦の場の理論の運動方程式と似ていることが知られていたが、本研究では、超対称ゲージ理論において、導かれたループ方程式が 5 次元 AdS 空間と 5 次元球面の直積である 10 次元時空上の Type IIB 超弦の場の理論の運動方程式と見なせることを示す必要がある。これらの研究の流れの中で、特に、AdS 空間の動径座標がどのようにゲージ理論から現れるか(正則化パラメータが一つの可能性)という疑問、また、一般のループ配位

に対する Wilson ループ演算子におけるフェルミオンのループ座標の弦理論側での意味付けの問題、等の考察が重要である。

4. 研究成果

本研究の本来の課題は、弦理論側の記述法として弦の場の理論を用いることで、AdS/CFT 対応の証明に迫ろうというものであった。しかし、この課題そのものよりも、AdS/CFT 対応を他に D ブレインが存在する場合に一般化することによって得られた「酒井・杉本模型」と呼ばれるホログラフィック QCD 模型において特記すべき成果を上げることが出来た。酒井・杉本模型は、超弦理論において 10 次元時空上に D4/D8/反 D8 の 3 種類の D ブレインを配置することで 4 次元時空上の QCD を再現したものである。この模型を D4 ブレイン上の理論として見ると QCD の基本場であるクォークやグルーオンを持った理論となっているが、他方、D8 ブレイン上の理論として見るとメソン場から成る QCD の低エネルギー有効理論を与えており、現実世界を数値的にもかなり良い精度で再現することが知られている。本研究では、主に酒井・杉本模型におけるバリオンに関して、次の三つの研究成果を得た。

(1) 酒井・杉本模型において、QCD の有効理論を与える曲がった 5 次元時空上の非可換ゲージ理論において、バリオンを表す古典解(ソリトン解)を構成し、更にそのバリオン解の周りで理論を量子化することによりバリオンのスペクトルを導出した。これはメソンの低エネルギー有効理論である Skyrme 模型でのバリオン解の構成と量子化に相当する解析を、(Skyrme 模型から見ると)無限個のベクトルメソンが入った理論である 5 次元模型で行ったものである。しかし、Chern-Simons 項から来る相互作用を考慮して初めてバリオン解がつぶれずに安定に存在できる、量子化により高いスピンを持ったバリオンや負パリティのバリオンの解析を容易に行うことが出来(理論が持つパラメータを適当に取ることにより)数値的にも実験結果との良い一致を得た、等の非自明な知見や結果を得ることができた。

(2) 上述の(1)の研究は、フレーバー数が 2 の場合のバリオン解の構成とその集団座標量子化であったが、これをフレーバー数が 3 のより現実的な場合に拡張した。フレーバー数が 3 以上の場合は Chern-Simons 項の non-Abelian 部分が効いてくるので、これは決して自明な拡張ではない。実際、現実のバリオンスペクトルを得るためには、Chern-Simons 項の別の表現を用いる必要があることが分

かった。

(3)バリオンの電荷分布・磁気モーメント・axial vector coupling等の静的な諸性質の解析を行った。この解析における最も重要な点は、酒井・杉本模型において4次元の意味でのフレーバーの左右カレントを如何に定義するか、である。我々は、ある種の局所ゲージ変換のNoether currentの積分として与えたカレントを用いて解析を行い、実験値とかなり良い一致を得た。なお、我々の用いたカレントにはゲージ不変性に関する問題が残されていたが、その後、橋本・酒井・杉本により、この問題を克服した別のカレントを用いた解析が行われ、我々と多くの共通点のある結果が導かれた。

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3件)

Hiroyuki Hata, Masaki Murata and Shinichiro Yamato, Chiral currents and static properties of nucleons in holographic QCD, Phys. Rev. D78 (2008) 086006, 査読有

Hiroyuki Hata and Masaki Murata, Baryons and the Chern-Simons term in holographic QCD with three flavors, Prog. Theor. Phys. 119 (2008) 461 - 490, 査読有

Hiroyuki Hata, Tadakatsu Sakai and Shigeki Sugimoto, Baryons from instantons in holographic QCD, Prog. Theor. Phys. 117 (2007) 1157 - 1180, 査読有

[学会発表](計2件)

村田仁樹, ホログラフィック QCD におけるバリオンの諸性質, 日本物理学会第63回年次大会, 2008年3月23日, 近畿大学

Shigeki Sugimoto, Baryons from Instantons in Holographic QCD, Strings 2007, 2007年6月29日, Madrid (Spain).

[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]

6. 研究組織

(1)研究代表者

畑 浩之 (Hiroyuki Hata)
京都大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 70164837

(2)研究分担者
なし

(3)連携研究者
なし