

(論文内容の要旨)

本論文は、ホログラフィック QCD の一つである酒井-杉本モデルにおけるバリオンの静的な性質の解析を行ったものである。

弦理論は低エネルギーで重力を加えた標準模型を再現する理論として期待されているが、しかし未だ標準模型を導く時空のコンパクト化の方法、D ブレーンの配置の方法などはわかっていない。ホログラフィック QCD とは適当な時空のコンパクト化や D ブレーンの配置などを仮定して低エネルギーで QCD を再現しようとする弦理論のモデルの一つである。その中でも 2005 年に提唱された酒井-杉本モデルと呼ばれるものは、カイラル対称性をうまく取り入れたものとなっており、ベクトルメソンの質量や相互作用定数を比較的良い精度で説明することが知られている。

本論文は、この酒井-杉本モデルにおけるバリオンの静的性質の解析を行ったものである。このモデルでは低エネルギー有効理論を近似的に扱うために AdS/CFT 対応の一つである「D ブレーンと、その D ブレーンのつくる重力解が対応する」という予想を用いる。この近似を使うと最終的に考える系は Chern-Simons 項付きの 5 次元 Yang-Mills 理論となるのであるが、バリオンはその空間 4 次元部分のインスタントンとして記述される。

本論文では、まず古典インスタントン解を構成することを試みた。重力効果がある場合の Yang-Mills 理論ではスケール安定なインスタントン解が存在しないが、酒井-杉本モデルにおいては Chern-Simons 項の効果によって安定なインスタントン解が存在することがわかった。

次に、この古典インスタントン解を半古典量子化することによってバリオンの状態を導出した。この半古典量子化では基本的にエネルギーの励起の小さいモード、つまり古典解が破る対称性のモード(ゼロモード)のみ量子化を行うのであるが、このモデルのゼロモードであるスピン、アイソスピンのモード以外に準ゼロモードとして 5 次元目の方向(z 方向)への並進のモード、スケール振動のモードを導入した。これらは重力がある場合には厳密なゼロモードとはなっていないのであるが、このモデルでは z 方向の原点近くで重力場が平坦に近くなっていることから良い近似でゼロモードとなっている。これらのモードを導入することによって、ネガティブパリティのバリオンを含む 2 フレーバーのバリオンの質量が比較的良く再現されることがわかった。

最後に、陽子と中性子の電荷密度分布、電荷の平均二乗半径、磁気モーメント、Axial vector couplingなどを求めた。このためにまずこのモデルにおけるカイラルカレントを Noether カレントとして定義することを試みた。結果、得られたカイラルカレントはゲージ不変になっていないという問題点を残しつつも他の様々な性質を上手く満たすようなものになっており、更に陽子と中性子の性質についてもかなり良い予言を与えることがわかった。

以上の研究により、酒井-杉本モデルにおけるバリオンの性質の多くが明らかになり、それらは比較的良く実験値を再現することがわかった。

(論文審査の結果の要旨)

AdS/CFT 対応とは D ブレーン上の Yang-Mills 理論と、D ブレーンが作り出す超重力解が対応するという予想である。この予想は未だ完全な証明はなされていないが数々の部分的な対応が調べられており、一般に正しいものであると考えられている。

近年、この AdS/CFT 対応を用いて Yang-Mills 理論を弦理論により解析しようという試みがなされている。中でも QCD の有効理論を与えるものはホログラフィック QCD と呼ばれ、従来の手法では扱うことの難しい非摂動的な QCD の性質を説明できる可能性があるということで注目を浴びている。特に 2005 年に提唱された酒井-杉本モデルは、カイラル対称性の自発的破れをブレーンの配位により上手く説明でき、4次元の有効理論としてはベクトルメソンを含む Wess-Zumino-Witten 項付きの Skyrme モデルとなっており、ベクトルメソンの質量や相互作用定数を比較的良い精度で预言するモデルとして知られている。

このモデルにおけるバリオンは、弦理論記述ではカラーに対応する D ブレーンに巻きつく D ブレーンとして、その 5 次元有効理論では空間 4 次元部分のインスタントンとして、更に 4 次元の有効理論では Skymion と呼ばれるソリトンとして記述されることがわかっていた。しかし、バリオンの諸性質は解析の難しさからほとんど未解明であった。

本論文は上記のバリオンの静的な性質を 2 フレーバーの場合に調べたものである。まずバリオンに対応するインスタントン解を 5 次元の有効理論上で構成し、それを半古典量子化することによってバリオンの状態を求めた。またこのモデルにおけるカイラルカレントを定義することにより電磁気的な性質の解析を行った。

まずバリオンの古典解については、D ブレーンの作る重力によるインスタントンを縮めようとする効果と Chern-Simons 項によるインスタントンを広げようとする効果が釣り合うことによって有限な大きさを持った解が得られることが本研究によって明らかになった。これはホログラフィック QCD において初めてそのバリオン解の存在を示したという点で評価に値する。

またこのバリオン解を半古典量子化することによってバリオンの質量を求め、更にカイラルカレントを Noether カレントとして定義することによって核子の電荷密度、平均二乗半径、磁気モーメント、Axial vector coupling の計算を行った。特にカイラルカレントを Noether カレントとして定義する試みはこのモデルにおいては先駆的研究として注目に値する。

以上のように、本論文は酒井-杉本モデルにおける 2 フレーバーのバリオンの性質を明らかにしたものであり、博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。