

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 21 年 5 月 27 日現在

研究種目：若手研究（B）
研究期間：2006～2008
課題番号：18740146
研究課題名（和文）場の理論における超対称的ノントポロジカルソリトンと宇宙論への応用
研究課題名（英文）Supersymmetric non-topological soliton in field theory and its application to cosmology
研究代表者
小暮 兼三（OGURE KENZO）
京都大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：50379020

研究成果の概要：

超対称性を持つノントポロジカルソリトンの性質とその宇宙論への応用について研究を進めたが、残念ながら当初予想していたようなおもしろい結果が得られず、投稿論文として残せる結果が得られなかった。しかし、当研究で用いる数学的技術をスピングラス系に応用して、投稿論文として残せる結果を得た。

交付額

(金額単位：円)			
	直接経費	間接経費	合 計
2006 年度	1500000	0	1500000
2007 年度	1000000	0	1000000
2008 年度	1000000	300000	1300000
年度			
年度			
総 計	3500000	300000	3800000

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、数理物理・物性基礎

キーワード：素粒子物理、宇宙物理、統計物理学、数理物理

1. 研究開始当初の背景

量子場の理論においては、基本粒子の他に粒子のように振る舞うソリト

ンの的な配位があることが知られている。これらのソリトンは場の理論の性質を理解する上で重要であるだけでなく、宇宙論においてもバリオン数生

成との関係やコールドダークマターの候補として興味深い存在である。その中で、モノポールやインスタントンといったトポロジカルなソリトンは、トポロジカルナンバを保存量として安定化しており、その性質が既によく調べられている。一方、Q-ボールやフェルミボールといったノントポロジカルソリトンは、通常の粒子と同様に連続的対称性に付随する保存量を持つことにより安定化しており、比較的最近になってその性質が調べられはじめ、まだその性質が十分に調べられていない。

予備研究において、これらのノントポロジカルソリトンが、今まで知られている実験結果に矛盾せずにコールドダークマターとして、宇宙に存在できるかどうかを調べた。その結果、今まで知られている実験結果に矛盾せずに、ノントポロジカルソリトンが、コールドダークマターとして、存在できることが分かった。さらに、性質のあまり知られていないフェルミボールについて、その安定性を薄膜近似からのずれの摂動論を用いて調べた。その結果、理論のパラメータ次第では、安定なフェルミボールが存在することが分かった。この研究においては、簡単なモデルをもちいて研究を行ったが、その範囲ではソリトン解を厳密に解くことができず、薄膜近似からのずれの摂動論の範囲でしか安定性を調べられなかった。そして、その範囲においては初期宇宙においてフェルミ

ボールが生成され、ダークマターの候補となり得るような、現実的なシナリオを考えることができなかった。

2. 研究の目的

上記の背景の下、本研究においては超対称性を持つ理論において、フェルミボールの性質を調べ、宇宙論的な考察を進めることを目的とした。フェルミボールは、スカラー場の他にフェルミオン場のコンポジットオペレータが期待値を持ち、デリックの定理に抵触せずに安定化している。このソリトンにおいて超対称性を考える利点は、大きく3つある。まず、1点目はソリトン解が厳密に解ける可能性があることである。フェルミボールは、スカラー場とフェルミオン場によって形成され、ソリトン解を得るための微分方程式は、一般に連立の非線形微分方程式となり解析的に解くことは難しい。しかし、超対称性によりスカラー場とフェルミオン場の解に関係がつけられ、超対称性がない場合に比べて、ソリトン解が解きやすくなると考えられる。具体的には、フェルミボールの表面におけるスカラー場のドメインウォール的な振る舞いが分かれば、これに対応するスカラー場の零エネルギーモードがわかり、部分的に残った超対称性により、フェルミオン場の零エネルギーモードも求まる。このため先行の研究においては、薄膜近似の近傍でしか解の性質を知ることができなかったが、この場合はより広い範囲で解の性質を知ることができるように思われた。

2点目は、超対称性を持つ理論においては、フェルミボールが、超対称性を持たない場合にはないおもしろい性質を持つことが考えられた。超対称性を持つ理論には、平坦方向

と呼ばれるポテンシャルが非常に平らな方向があり、この影響でQ-ボールの場合には質量が対応する大局的電荷に比例しないというおもしろい性質が得られていた。フェルミボールの場合に、この平坦方向の存在がどのような性質の変化として現れるのかを調べることは、場の理論の興味としておもしろいだけでなく、宇宙論への応用の観点からも研究することが目的であった。

3点目は、素粒子理論の拡張として、超対称性は非常に有力であることがあげられた。宇宙論においては、ダークマターやバリオン数生成の問題など、標準理論の拡張を強く示唆する問題があり、超対称性はその拡張の一つとして有力な候補である。従って、超対称性をもつ理論を考えて、ノントポロジカルソリトンの性質を調べることは、現実的なモデルの構築を目指す上でも重要であると考えた。

本研究は、超対称性を持つ理論において、フェルミボールの性質を調べ、さらにフェルミボールが宇宙のバリオン数生成の問題やコールドダークマターの問題を解決できるかを考察することも目的であった。

3. 研究の方法

フェルミボールの存在のためには、理論にスカラー場とフェルミオン場が構成場としてあり、スカラー場には対称性の破れを起こすポテンシャルが必要である。このような理論の中で特に超対称性を持つ簡単なモデルを仮定する。そして、この理論の運動方程式を導き、ソリトン解の球対称性を仮定して、保存電荷をラグランジュの未定係数法で考慮しながら解くべき運動方程式を簡単化する。この方程式の解は、超対称性のおかげでスカラー場とフェルミオン場の解の間に関係が付

くと考えられる。その結果、方程式が簡単化されると考えられるので、どのような関係がつき、どのように簡単化されるのかを具体的に調べる。そして、厳密なフェルミボール解か、厳密でなくても超対称性がない場合に比べて性質のわかりやすい解があるかを調べる。その後、このフェルミボール解の安定性を調べ、フェルミボールが安定であるための結合定数や各場の世代数などの理論への要請を考察する。特に、超対称性がない場合に既に得ている薄膜近似の近傍の結果との比較を行いながら考察を進める。

さらに、超対称性の理論の特徴であるポテンシャルが平坦方向を持つという性質が、フェルミボールの性質に与える影響を、保存するフェルミオン数とフェルミボールの質量の関係などに着目しながら調べる。これが単純な比例関係でなければ、超対称性を導入した事による大きな変化であり、基本粒子には見られないソリトンのようなおもしろい性質である。このような性質は、宇宙論的な考察においても重要になる。手法としては、主に解析計算を念頭に置いているが、必要に応じて数値計算を行うこともある。

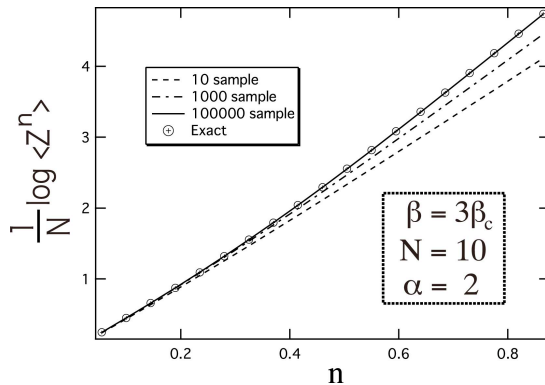
4. 研究成果

上記のような、研究背景・目的・手法により研究を進めたが、残念ながら当初予想していたようなおもしろい結果が得られず、投稿論文として残せる結果が得られなかった。しかし、当研究で用いる数学的技術をスピングラス系に応用して、投稿論文として残せる結果を得た。

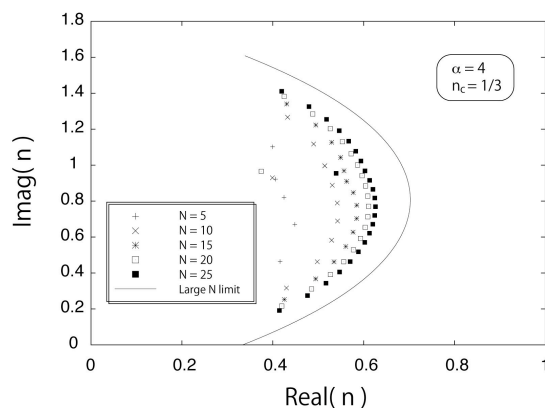
スピングラス系はランダム性を持つために、単純な統計力学的手法が用いにくく、レプリカ法という方法が、しばしば用いられる。し

かし、この方法は数学的に不明確な点が多く、発見法的な部分が多い。ここでは、ランダムエネルギーモデルという簡単なモデルにおいて、レプリカ法の正当性を調べた。

まず、新たな数学的手法を用い、ランダムエネルギーモデルのモーメントの厳密解を得た。この解の厳密性は図のように数値計算においても確かめられた。



また、レプリカ数を複素数まで拡張して数値的に厳密解を評価して、その零点を求めた。その結果を図に示す。この零点（リーマンゼロ）の挙動により、レプリカ数に対する相転移がおこっていることが分かった。



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 Kenzo Ogure and Yoshiyuki Kabashima, “On analyticity with respect to the replica number in random energy models I: an exact expression of the moment of the partition function”, J. Stat. Mech. (2009) P03010 査読あり

② Kenzo Ogure and Yoshiyuki Kabashima, “On analyticity with respect to the replica number in random energy models II: zeros on the complex plane”, J. Stat. Mech. (2009) P05011 査読あり

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小暮 兼三 (OGURE KENZO)
京都大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：50379020