

くにやす まさし

氏名 國安 正志
授与学位 博士 (理学)
学位記番号 理工博甲第704号
学位授与年月日 平成29年3月16日
学位授与の要件 学位規則第4条1項
研究科, 専攻の名称 理工学研究科(博士後期課程) 自然科学基盤系専攻
学位論文題目 Dirac-Born-Infeld 型 k 場の理論における Q-ball とその安定性について
(Q-balls in Dirac-Born-Infeld k field theory and the stability)

論文審査委員 主査 山口大学 教授 白石 清
山口大学 教授 坂井 伸之
山口大学 教授 藤澤 健太
山口大学 准教授 新沼 浩太郎
山口大学 准教授 芦田 正巳

【学位論文内容の要旨】

Q-ball とは場の理論におけるノン・トポロジカルソリトン解の一つである。理論が $S_0(2)$ などの適当な対称性を持つ場合、ネーターの定理により保存量 Q が存在する。このような場合に適当なポテンシャルを置くと、Q-ball 解を得ることができる。この解はソリトン解であるから、エネルギーは有限の値となっている。このような解を持つポテンシャルは様々な興味深いモデルに基づいている。例えば最小超対称模型や、バリオン数生成を説明する AD 機構に基づくモデルが存在する。これらはダークマターの候補にもなりうるため、宇宙論的・素粒子論的に興味をもたれている。

Q-ball 解は数学的にも興味深い性質を持つ。現実には Q-ball が存在するか調べるうえで安定性の解析が重要となるが、その際、カタストロフィ理論が有効であることが示されている。カタストロフィ理論は従来、1自由度の力学系で議論されており、場の理論のような無限の自由度を持つ系における有効性は不明である。そのような事情があるにもかかわらず、Q-ball の安定性をうまく表現できる。本論文では以上のような観点から、Q-ball 解をいくつかのポテンシャルモデルの下で導出し、カタストロフィ理論を用いた安定性の解析とその妥当性について第2章でまとめ、レビューを行った。

ところで、以上のような議論はすべて正準スカラー場の理論で行われてきた。一方、自然界におけるスカラー場は必ずしも正準理論で記述されるとは限らず、運動項に非線形性を持つ k 場の理論で表される可能性もある。本研究はそのような k 場の理論の中で特に Dirac-Born-Infeld (DBI) 型と呼ばれる理論を扱った。DBI 型スカラー場の理論は、場が十分弱い極限で標準理論に帰着することなど、様々な良い性質を持つ。また力の統一理論の最有力候補である、弦理論と対応関係を持っている。このような動機から DBI 型 k 場の理論を用いて、強い相互作用の物理や、大域ひも、インフレーション等が議論されてきた。また本論文で扱うノン・トポロジカルソリトンについても研究は行われた。ところが Q-ball のような様な相回転をする ansatz の下では解が導出されておらず、その性質も調べられていなかった。そこで本研究では DBI 型 k 場の理論における Q-ball 解を導出し、その性質を調べることを目的とした。

第3章では本研究の主目的である DBI 型 k 場の理論における Q-ball 解について議論している。まず基礎方程式やエネルギー E 、保存量 Q の具体的な形を導出した。当然であるが、これらの式は非線形性がじゅうぶん弱い極限で正準理論と一致する。また、解が満たすべき条件として新たな制限式が加わることも分かった。次に基礎方程式を Q-ball 解が満たすべき境界条件のもと数値的に解いた。その結果、非線形性がある程度大きくなると初期振幅が大きくなるが、ある一定値以上では逆に減少していく様子が見て取れた。これから、新たな制限式は常に満たされることが分かり、非線形性が非常に強い領域でも Q-ball が存在できることを示した。また、カタストロフィ理論を用いて安定性の解析を行った。まず、DBI 型 k 場の理論を導入することで新たにパラメータが増えるものの、正準理論の場合と同様にして解析を行うことができることを示した。これを用いていくつかのポテンシャルモデルについて解析を行ったが、すべてのモデルで正準理論の場合とカタストロフィのタイプは変わらず、従って定

性的には安定性の構造が変化しないことが分かった。ただし、非線形性に対する応答はポテンシャルモデルに依存しており、安定平衡解を持つパラメータ領域が増える場合や、逆に減少し、ついには消滅する場合がある。以上のように DBI 型 k 場の理論でもカタストロフィ理論によって Q-ball の安定性を解析し、解の応答を調べることができた。これは k 場の理論における Q-ball 解の安定性を議論する場合にも、カタストロフィ理論が有効であることを示唆する。

ところで DBI 型の修正理論は本来、Born と Infeld によって電磁場(すなわちゲージ場)の修正理論として提唱されたものである。そこで BI 型ゲージ場の理論と結合した gauged Q-ball についても研究を行っている。gauged Q-ball は局所的な対称性を持つため、ゲージ場と結合していない Q-ball よりも小さくなることができる。また保存量 Q は Q-ball の電荷とみなすことができる。この電荷 Q はポテンシャルモデルによって上限値が存在する。第 4 章ではまず Maxwell 型(標準的な)の gauged Q-ball についてレビューを行った。次に BI 型ゲージ場を導入し、基礎方程式などを導出した。ゲージ場の場合も BI 型特有の Q-ball 解が満たすべき制限式が存在する。ところが実際に解を導出すると、この制限式は常に満たされることが分かった。また非線形性を大きくすることは、実効的にゲージ結合定数を小さくすることと等価であることも分かった。この点はスカラー場やゲージ場の分布だけでなく、Q-E 図上の振舞いにも反映されている。このような特徴を生かし、今後の課題として帯電ボソンスターへ適用した場合に予想される結果などをまとめている。

【論文審査結果の要旨】

ある種のスカラー場の理論では、ノン・トポロジカルソリトンの一種である Q-ball と呼ばれるコンパクトな物体が存在することが理論的に示されている。本研究では、拡張されたモデルにおける Q-ball の数値解を示し、さらにその性質を探るため、新たな側面からのアプローチを検討している。本学位論文第一章では、Q-ball の宇宙論などにおける意義、及び Q-ball の標準的モデルを拡張する動機として、他の理論モデル(弦理論及び D ブレーンの理論)との関連性などが述べられている。本学位論文第二章では、標準的 Q-ball の概要が示されている。また、その安定性の解析については、カタストロフィ理論を用いた解析が有効であることが知られており、それについて詳しくレビューがなされている。

本学位論文第三章では、学位申請者はスカラー場の運動項が非線形性を持つ拡張されたモデル(DBI 型 k 場の理論)を提案し、そのモデルにおける Q-ball 解を数値計算により求めている。さらに、学位申請者はその安定性の解析をカタストロフィ理論の応用によって行い、その解析方法の有効性を確認した。非線形性の強さを表すパラメータを大きくすると、安定性の臨界点の位置が定量的に変化することを見出した。この章の結果は、関連論文の内容に相当する部分である。

本学位論文第四章では、さらに拡張されたモデルにおける Q-ball 解を求めている。ここでの拡張は、スカラー場が電荷を持つものとし、さらに電場のエネルギーに相当する部分を、素粒子統一理論で動機づけられた場の非線形な表現であらわされるものに置き換えたことによる。電荷及び非線形性パラメータによって Q-ball の物理量に変化することを示した。この章の内容はまだ印刷公表されていないが、学位申請者の研究におけるポテンシャルの高さを示すものと考えられる。

本学位論文第五章では、論文のまとめと、今後の研究方向について述べられている。さまざまなモデルの拡張可能性と、異なった性質を持つ Q-ball の宇宙物理学における意義の検討などが述べられている。

本研究での Q-ball 解導出における数値解析手法、及び本研究で得られたカタストロフィ理論を用いた安定性解析の幅広い有効性の確認は、当該分野における発展的研究を切り開いていく重要な手掛かりとなるものであり、本研究は極めて重要な意義を持つものである。

審査会(第 1 回)では、予備審査会で指摘されていた改善点について(正確な記述、宇宙論における意義の詳細等)の確認がなされた。

公聴会における主な質問内容は、拡張モデルにおける対称性の必然性、カタストロフィ理論の例示と本研究対象の関連性の詳細、パラメータの制限範囲と有効ポテンシャルの形の対応、物理的なカタストロフィ現象の発現などについてであった。いずれの質問に対しても発表者(学位申請者)からの確かな回答がなされた。

本審査(第 2 回)では、論文における例示の妥当性、拡張モデルの詳細、今後の発展的な数値計算の可能性、今後の研究における統一的視座の必要性などについての質問があり、申請者から適切な回答を得た。

以上より本研究は独創性、新奇性、応用性ともに優れ、博士（理学）の学位論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。（関連論文 計1編、参考論文 計0編）、（これらの編数は査読付き論文、つまり(a)と(b)の総数）

関連論文の印刷公表の方法及び時期

(a) 査読のある雑誌等

(1) 著者氏名： Masashi Kuniyasu, Nobuyuki Sakai and Kiyoshi Shiraishi

論文題目： Q-balls in DBI type k field theory

学術雑誌名： Physical Review D

巻、号、頁： Phys. Rev. D94, 116001 (2016)

発行年月： 平成28年12月2日発行

(本文との関連：本学位論文における主な研究内容である、DBI型 k 場の理論におけるQ-ball解について議論した。主にその安定性について議論しており、修正理論においても正準理論と同様にカタストロフィ理論による解析が有効であることを示している。これは本学位論文の、第三章に相当する。)

(b) 査読のある国際会議の会議録等： なし

(c) その他： なし

参考論文

(a) 査読のある雑誌等： なし

(b) 査読のある国際会議の会議録等： なし

(c) その他： なし