

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22340069

研究課題名（和文） 超弦理論の原子核・クォーク物理への応用

研究課題名（英文） Application of superstring theory to nuclear and quark physics

研究代表者

橋本 幸士 (HASHIMOTO KOJI)

独立行政法人理化学研究所・橋本数理物理学研究室・准主任研究員

研究者番号：80345074

研究成果の概要（和文）：

超弦理論の AdS/CFT 対応は、様々なゲージ理論の強結合極限を解析的に解くことを可能にする。本研究課題では、量子色力学の仮想的ラージ N 極限（ゲージ群の階数を大きくする極限）に AdS/CFT 対応を適用することでその低エネルギーを解き、クォークが結合してバリオン（核子）を形成するのみならずその核子が集まってさらに原子核を形成することを理論的に示すことを目的とし、ある近似の下で、成功した。

研究成果の概要（英文）：

AdS/CFT correspondence in superstring theory makes it possible to solve analytically the strong coupling limits of various gauge theories. In this project, we apply the AdS/CFT correspondence to a hypothetical large N limit (large number of the rank of the gauge group) of quantum chromodynamics (QCD), aiming at solving the QCD to show how baryons (nucleons) are formed as bound states of quarks and also how atomic nucleus can form as a bound state of the nucleons. Under some approximations, we have succeed in seeing it.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2011年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
2012年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：超弦理論、ホログラフィー、原子核理論、クォーク、ハドロン物理学、格子 QCD、D ブレーン

1. 研究開始当初の背景

研究代表者橋本は、本研究課題開始の平成 22 年度より理化学研究所で新研究室を主宰することが内定していた。新研究室の研究テーマは本申請課題に沿っており、新研究室を核

として理化学研究所内の研究分担者・連携研究者間の研究交流を促進し、申請課題における飛躍的な研究の進展が期待できた。研究課題に直接関連する論文は、研究代表者(橋本)が、平成 19 年度から 21 年度において既にいくつか出版していた(QCD へのゲージ・重

力対応の応用について)。また、原子核へのゲージ・重力対応の応用となる初期段階の論文は既に出版されており(K. Hashimoto, "Holographic Nuclei,"

Prog.Theor.Phys.121 (2009) 241-251)、その完成に当たって、連携研究者(中務)との議論が非常に重要な役割を果たした。このように共同研究の準備段階は既に成功していた。研究分担者(鈴木)と代表者は同一の研究室に所属しているため日常的に議論を行っていた。また、現在研究代表者(橋本)は分担者(中務)との共同研究による出版論文を準備中であつた。これは、ゲージ・重力対応を用いて一般の N 体の近接核力の一部を計算するものであり、本申請課題の研究テーマに沿ったものであつた。すぐにでも、本申請課題に基づいて研究グループを本格的に組織し研究をスタートすることが可能であつた。国際的には、AdS/CFT 対応を原子核にまで応用するプロジェクトは全く行われていない新規の研究課題であつたため、独自の研究を生む時期であつた。

2. 研究の目的

研究課題「超弦理論の原子核・クォーク物理学への応用」の目的は、超弦理論で培われてきた新しい対応原理であるゲージ・重力対応を、原子核物理学・QCD(量子色力学)に応用し、原子核・QCD の長年の問題を解決することである。ここで言う原子核理論の長年の問題とは、具体的には、素粒子の標準模型である QCD から(1) 原子核の励起スペクトルを導出する問題(2) 核力を導出する問題等を指す。素粒子クォークの理論である QCD は、原子核のエネルギー領域では強結合のため、解析が困難である。強結合理論に適用可能な新しい数学であるゲージ・重力対応を応用し、原子核物理学の長年の問題を解決する。これは、素粒子理論と原子核理論のギャップを埋めることになる。

3. 研究の方法

本研究課題を遂行する計画は、次の4つの段階で構成される。(1) 超弦理論側と原子核理論側の問題意識の共有、(2) 計算対象とする物理量を絞りこんだ後の問題意識の各分野での精密化、(3) 具体的な原子核物理量の計算、必要な新しい計算方法の開発、(4) 結果と発展性の詳細な検討、超弦理論や重力理論へのフィードバック、である。

研究代表者は、平成22年度から理化学研究所にて本研究課題を中心目的の一つにすえた新研究室を主宰することが内定しており、理化学研究所に誕生する新研究室を中心に人的交流を行い、研究目的を達成するこ

とを目指す。

4. 研究成果

(平成22年度)

研究代表者の橋本は、超弦理論のテクニックを量子色力学に応用して原子核物理学を解明する最初のステップを達成した。原子核物理学は核子(中性子・陽子)の多体系の量子力学として定義されるが、核子はクォークの複合状態であり、クォークの量子色力学を解く必要がある。超弦理論のホログラフィック原理を量子色力学に適用し、核子が多数ある状況を構築することで、量子色力学から直接、隠した体系の量子力学の作用を導出することに成功した。この作用を用い、2体系の近距離斥力、3体系の有効斥力を計算し、実験と定性的に一致することを見た。この結果は、ホログラフィック原理の計算手法が確かに正しいものであることを示している。さらに、核子の統計力学的な性質、すなわち、色の数が奇数ならばフェルミオンとして振る舞うこと、がホログラフィック原理から導かれた。

研究分担者の鈴木の実績は、主に、低次元の Wess-Zumino 模型の非摂動的な格子定式化に関するものである。具体的には(1) 超対称性などの対称性を完全に保つ非摂動的定式化を提案した。これは、いわゆる SLAC 微分に基づく格子定式化である。従来そうした定式化では局所性に問題があるとされてきたが、我々は、低次元の Wess-Zumino 模型では超対称性のために理論が有限になり、そのため局所性の問題が起こらない事を指摘した。(2) いわゆる Nicolai 写像に基づく格子定式化は有限の格子間隔では超対称性など連続理論の対称性を壊している。我々は、一般の superpotential に対して、全ての対称性が連続極限で回復する事の簡潔な証明を与えた。これらの成果は、例えば、2次元の Wess-Zumino 模型を $N=2$ 超対称性共型場理論の Landau-Ginzburg 模型として使う際の非摂動的解析の基礎を与えるものである。

(平成23年度)

研究代表者の橋本は、超弦理論のホログラフィー原理に基づいた新しい原子核の描像を構築するため、特に重い原子核について、昨年度の研究で明らかになった核子多体系の行列有効模型に基づいた解析を行った。解析の結果、原子核は核子のバウンドした状態であることが示され、特に、その半径が核子数の $1/3$ 乗に比例することが示された。これは、原子核の基本的な性質であり、それらが QCD から再現されたことは特筆に値する。この研究成果を仕上げるためには、本研究課題の研究費で雇用したポストドクター研究員

との様々な研究と議論が重要な部分を占めた。さらに、関連する研究成果として、重イオン衝突において核物質が素早く熱化する現象を、超弦理論のホログラフィーを用いて検証し、実験結果と矛盾しない解析結果を出した。また、重イオン衝突における強い電場とカイラル アノマリーの効果が、クォークグルーオンプラズマ中のある種のソリトン解の効果として理解できることを示した。これらは、重イオン衝突をQCDの第一原理的な計算で解析できることを意味しており、特に、超弦理論とソリトンなどの数理解物理的手法が有効であることを示している。

また、平成23年度の研究分担者鈴木の研究成果は以下の通りである。まず、超弦理論のコンパクト化を表す超共型場の理論に対するいわゆるLandau-Ginzburg記述を数値的に調べる非摂動的な方法を定式化し、それを用いた数値計算を行った。次に、4次元超対称Yang-Mills理論の格子定式化において、超対称性Ward-高橋恒等式が連続極限で回復することを摂動の全次数で証明し、この定式化の基礎付けを行った。最後に、多核子系を格子QCDでシミュレートする際に問題となるクォークプロパゲーターの縮役を簡単化する方法を考察した。

(平成24年度)

研究代表者の橋本は、超弦理論をゲージ理論と原子核理論に応用する研究を進めた。特に物性理論で良く知られるラッティンジャー定理が、様々なゲージ理論の変形、特に磁場等の外的変形で不変に保たれるか、保たれないのはどのような時か、を調べ、ゲージ理論の閉じ込め相(質量ギャップがある場合)にはラッティンジャー定理がそのまま成立することを非摂動的に見た。また、本科学研究費補助金で雇用した研究者とともに、超弦理論の非摂動的定式化である弦の場の理論の解としてDブレーンが多数ある解の可能性を調べ、それが非摂動的に非可換ゲージ理論を自発的に与える可能性を研究し、多数の新しい解を発見した。超弦理論のゲージ重力対応を応用することにより得られた、核子多体系を記述する行列模型の研究を進め、それが2核子系での近距離斥力を取り入れていることを確認し、3核子より多い場合への拡張を研究した。核子が非常に多い場合の近似法を研究した。ゲージ理論、特にQCDのアノマリーをよく見ることで、磁場がある場合に、バリオン化学ポテンシャルの影響でパイオンのドメインウォールが自発的に生成し、それが磁場を増幅する可能性について研究した。これは超弦理論の枠組みに埋め込むことで、ラーゼンNの極限が上手く記述できる。また、強磁場中性子星(マグネター)の起源を提唱した。

研究分担者の鈴木は、平成24年度は格子定式化におけるエネルギー運動量テンソルの構成を精力的に研究した。特に4次元のN=1超対称Yang-Mills理論の格子定式化において、連続極限で保存則を満たす格子上のエネルギー運動量テンソルの構成法を与えた。さらにこの格子エネルギー運動量テンソルの定義する零点エネルギーが連続極限で超対称性代数と無矛盾になること、また、正しいトレースアノマリーを再現することなどを示した。

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14件)

1. Remark on the energy-momentum tensor in the lattice formulation of 4D N=1 SYM
Hiroshi Suzuki
Phys.Lett. B719 (2013) 435-439 (査読有り)
2. Ferrara--Zumino supermultiplet and the energy-momentum tensor in the lattice formulation of 4D N=1 SYM
Hiroshi Suzuki
Nucl.Phys. B868 (2013) 459-475(査読有り)
3. Anomaly-induced charges in baryons
Minoru Eto, Koji Hashimoto, Hideaki Iida, Yu Maezawa, Takaaki Ishii
Phys.Rev. D85 (2012) 114038 (査読有り)
4. A Comment on Holographic Luttinger Theorem
Koji Hashimoto, Norihiro Iizuka
JHEP 1207 (2012) 064 (査読有り)
5. Supersymmetry, chiral symmetry and the generalized BRS transformation in lattice formulations of 4D N=1 SYM
Hiroshi Suzuki
Nucl.Phys. B861 (2012) 290-320 (査読有り)
6. Numerical simulation of the N=(2,2) Landau-Ginzburg model
Syo Kamata, Hiroshi Suzuki
Nucl.Phys. B854 (2012) 552-574 (査読有り)

有り)

7. Rapid Thermalization by Baryon Injection in Gauge/Gravity Duality
Koji Hashimoto, Norihiro Iizuka, Takashi Oka
Phys.Rev. D84 (2011) 066005(査読有り)
8. Phys.Rev. D84 (2011) 066005
Nucleus from String Theory
Koji Hashimoto, Takeshi Morita
Phys.Rev. D84 (2011) 046004(査読有り)
9. Chiral Magnetic Effect from Q-balls
Minoru Eto, Koji Hashimoto, Hideaki Iida, Akitsugu Miwa
Phys.Rev. D83 (2011)125033 (査読有り)
10. Supersymmetry restoration in lattice formulations of 2D N=(2,2) WZ model based on the Nicolai map
Daisuke Kadoh, Hiroshi Suzuki
Phys.Lett. B696 (2011) 163-166 (査読有り)
11. Supersymmetric nonperturbative formulation of the WZ model in lower dimensions
Daisuke Kadoh, Hiroshi Suzuki
Phys.Lett.B684 (2010) 167-172 (査読有り)
12. Three-Body Nuclear Forces from a Matrix Model
Koji Hashimoto, Norihiro Iizuka
JHEP 1011 (2010) 058 (査読有り)
13. Journal-ref: JHEP 1011:058, 2010
A Matrix Model for Baryons and Nuclear Forces
Koji Hashimoto, Norihiro Iizuka, Piljin Yi
JHEP 1010 (2010) 003 (査読有り)
14. Nucleon Statistics in Holographic QCD : Aharonov-Bohm Effect in a Matrix Model
Koji Hashimoto, Norihiro Iizuka
Phys.Rev. D82 (2010) 105023 (査読有り)

[学会発表] (計22件)

1. H.Suzuki, “Ferrara-Zumino supermultiplet and the energy-momentum tensor in the lattice formulation of 4D N=1 SYM”

日本物理学会第68回年会, 2013年03月29日 広島大学(東広島市)

2. 橋本幸士, “シンポジウム非平衡物理-物性物理とハドロンの物理を結ぶ世界: 今後の展望” 日本物理学会第68回年会 2013年03月27日 広島大学(東広島市)
3. 橋本幸士, 村田仁樹, “Boundary String Field Theory におけるランドスケープ” 日本物理学会第68回年会、2013年03月27日 広島大学(東広島市)
4. H.Suzuki, “Ferrara-Zumino supermultiplet and the energy-momentum tensor in the lattice formulation of 4D N=1 SYM” New Frontiers in Lattice Gauge Theory 2012年09月27日, The Galileo Galilei Institute for Theoretical Physics (フイレンツェ)
5. 橋本幸士, “バリオンのための行列” 行列模型とその周辺、2012年2月20日、東京、立教大学
6. K.Hashimoto, “Holographic Nucleus” 14th workshop on elastic and diffractive scattering 2011年12月16日 ベトナム、Qui-Nhon
7. K.Hashimoto, “Nucleus from string theory Quarks and Hadrons under extreme conditions” 2011年11月17日 東京、慶応義塾大学
8. K.Hashimoto, “Approach to non-perturbative QCD with AdS/CFT” Future directions in high energy QCD, 2011年10月22日、和光、理研
9. K.Hashimoto, “招待講演 超弦理論と原子核” 日本物理学会2011年秋の分科会 2011年9月19日、弘前大学
10. 鈴木博, “Computer simulation of N=(2; 2) Landau-Ginzburg model” 日本物理学会 2011年秋期大会、2011年9月18日、弘前大学(弘前市)
11. K.Hashimoto, “Holographic Nuclei and Nuclear Matter” APCTP-WCU focus program on “From dense matter to neutron stars in QCD and in hQCD” 2011年8月16日 韓国、Pohang、APCTP

12. K.Hashimoto, “弦理論からの核子多体系への挑戦” 素核宇宙融合・新ハドロンクロスオーバー研究会 2011年6月24日 神戸、計算科学研究機構
13. K.Hashimoto, “Rapid Thermalization by Baryon Injection in Gauge/Gravity Duality” 11th workshop on non-perturbative QCD 2011年6月9日 フランス、パリ、国立天文台
14. 橋本幸士, Nuclear Matrix Model: a path to nuclear physics from superstrings Baryons’ 10、2010年12月9日、大阪大学(吹田市)
15. 鈴木博、`Lattice Simulation of Supersymmetric Gauge Theories” 「次世代格子ゲージシミュレーション研究会」 2010年10月25日 理化学研究所(和光市)
16. 鈴木博、`Lattice SUSY from Practitioner’s Perspective” 「離散的手法による場と時空のダイナミクス」研究会 2010年9月27日、京都大学基礎物理学研究所(京都市)
17. 橋本幸士、Nuclear Matrix Model Summer Institute 2010 Cosmology and Strings、2010年8月9日、富士 Calm (富士吉田市)
18. 鈴木博、`Overture to Lattice Study of Supersymmetric Gauge Theories” CERN Theory Institute “Future Directions in Lattice Gauge Theory - LGT10” 2010年7月30日 CERN (スイス・ジュネーブ)
19. 橋本幸士、Nuclear Force from String Theory 国際研究会 “Chiral symmetry and confinement in clod, dense quark matter” 2010年7月22日 ECT* (イタリア・トレント)
20. 橋本幸士、Holographic QCD and Beyond The 22nd Rencontre de Blois - Particle Physics and Cosmology、2010年7月19日、Blois (フランス)
21. 橋本幸士、Gravity Dual of Heavy Nuclei Gravity and Cosmology 2010 研究会、2010年6月8日、京都大学基礎物理学研究所(京都市)

22. 橋本幸士、Nuclear Physics from String Theory、WCU-APCTP focus program “From Dense Matter to Compact Stars” 2010年6月2日、3日、APCTP (韓国・ポハン)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋本 幸士 (HASHIMOTO KOJI)

独立行政法人理化学研究所・橋本数理論理学研究室・准主任研究員

研究者番号：80345074

(2) 研究分担者

鈴木 博 (SUZUKI HIROSHI)

独立行政法人理化学研究所・初田量子ハドロン物理学研究室・専任研究員

研究者番号：90250977

(3) 連携研究者

中務 孝 (NAKATSUKASA TAKASHI)

独立行政法人理化学研究所・中務原子核理論研究室・准主任研究員

研究者番号：40333786