

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23654096

研究課題名(和文) 超弦理論による新しい原子核描像の構築

研究課題名(英文) Construction of new description of atomic nuclei using superstring theory

研究代表者

橋本 幸士 (Hashimoto, Koji)

大阪大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80345074

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円、(間接経費) 810,000円

研究成果の概要(和文)：超弦理論で発見されたホログラフィー原理は、クォークの力学を司る量子色力学のような強結合のゲージ理論を高次元重力理論に写像して解析を可能にするツールである。特に、量子色力学における強結合の結果、クォークは束縛状態である核子を形成する。この核子がさらに多数の束縛状態を成したものが、原子核である。クォークの力学が高次元重力で解析可能になるということは、ハドロンや原子核の様々な性質が解析可能になるということである。本研究では、原子核の重力双対を構築し、原子核の半径や核子数密度分布を計算することに成功した。また、ハドロン物理に置ける様々な性質の計算や、特に物性的な面への応用を行った。

研究成果の概要(英文)：The holographic principle which was discovered in superstring theory is a useful tool for analyzing strongly coupled gauge theories such as Quantum chromodynamics (QCD) which governs the dynamics of quarks. In particular, due to the strong coupling of the QCD, quarks form a bound state known as nucleons, and the nucleons form a bound state which is nothing but an atomic nucleus. Solving the dynamics of the quarks is directly resulting in a possible analysis of hadrons and nuclei by using the higher dimensional gravity theory. In this research, we constructed a gravity dual of a heavy atomic nucleus, and succeeded in calculating the radius of the atomic nucleus and also nucleon density profile. Furthermore, we calculated various hadronic properties and also made an application to condensed matter physics.

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 原子核

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 超弦理論で 10 年前に発見された「ゲージ重力対応」という数理は、強結合のゲージ理論を解析する手法として確立しつつある。特に、クォークの力学を記述する量子色力学(QCD)は強結合で解析的に解けず、クォークの閉じ込めなどの大問題が残っている。超弦理論のゲージ重力対応は、ある極限で QCD に類似のゲージ理論を解くことに成功した。その結果、クォークの束縛状態であるメソンやバリオンの性質が解析的に明らかになった。しかし、バリオンの束縛状態である原子核までは応用がされていなかった。そこで、本研究では原子核への応用、特に核子多体系への応用、さらにはフェルミオン多体系としての凝縮系や物性理論への応用を目指した。

(2) 研究代表者は、研究が開始される前の平成 22 年 10 月に、ゲージ重力対応を核子多体系に応用し、量子色力学の極限から原子核の有効作用を導出した。研究代表者は、平成 22 年秋の以下の論文において、原子核の有効モデルを提唱した：

“A Matrix Model for Baryons and Nuclear Forces”, K.Hashimoto, N.Iizuka, P.Yi, Journal of High Energy Physics 1010 (2010) 003.この論文は、超弦理論のゲージ・重力対応という数理を用いて、量子色力学からバリオン多体系の有効作用を導出したものである。原理的に量子色力学から導出されており、現象論的モデルではない、バリオン(核子)の数が任意でも作用が簡便に書かれている、バリオン間の相互作用が行列の非対角要素で与えられる、等の特質を持つ作用であり、この「核子行列モデル」の解析は原子核の様々な物理量の計算を可能にすると期待された。近距離の二体核力、三体核力の計算は一部が完了しており、モデルの計算が核子の斥力芯など重要なハドロン物理量を再現していることが判明した。これらの発見に基づき、原子核や多体系物理への応用研究を進展させる。

## 2. 研究の目的

大きな問題として、原子核理論と素粒子理論は、クォークが強く結合しすぎてダイナミクスが解析的に解き明かされないために、分野が分断され、物理が分断されているという事実があった。そこで、本研究の目的は、我々の解決手法として、超弦理論で近年開発されてきた新しい数学手法をクォークの量子色力学に応用し、解析的に多体核子状態を解くことで、新しい原子核描像を構築することとする。研究の意義は、原子核理論と素粒子理論のあいだの架け橋を作り、新しいパラダイムを提供する可能性を摸索することである。原子核理論と素粒子論を本格的に繋げる研究は存在せず、両分野間の架け橋を作る、という他に類を見ない研究である。そのためには、超弦理論の手法であるゲージ重力対応

が、どの程度フェルミオン多体系に適用できるかを精査する必要がある、また、最終的には、その結果を重イオン衝突実験などクォークの自由度が見えるような QCD と原子核を繋ぐ実験手法と比較する必要がある。

## 3. 研究の方法

(1) 第一の研究の手法は、上記の論文に基づき、バリオン多体系としての原子核を直接ゲージ重力対応から解析し、原子核の性質が再現できるか、また、予言できるか、を具体的な物理量に対して計算することである。重要な物理量として、例えば、原子核の半径が挙げられる。実際のところ、重い原子核について、その半径が知られている Saturation property を QCD から導出できた例は無く、ゲージ重力対応がその saturation を出すことが出来れば、本手法の重要な試金石かつ第一歩となる。その研究に基づき、原子核の様々な物理量を解析することが可能となる。

(2) 第二の研究手法は、原子核のみならず、フェルミオンが多数存在する多体系において一般に成り立つと期待される性質をゲージ重力対応に基づいて計算することである。これには、例えば、物性物理などで良く知られている性質を捉えられるか、もしくは、捉えられない特例はどのような物理に基づいているのか、などが挙げられる。例えば、高密度や強結合のフェルミオン系は原子核と性質が共通であり、ゲージ重力対応を用いてどのようにそれらが記述されるのかを具体的に書き下すことが重要となる。

## 4. 研究成果

(1) 論文 は最初の成果であり、原子核の半径をゲージ重力対応から初めて導出したものである。種々の近似を使用したものの、実際に原子核が saturation property を持つような半径で特徴づけられることをゲージ重力対応を用いて示すことに成功した。これは、原子核が超弦理論で記述可能であるという本研究の方向性を与えるものである。一方で、使用された近似は QCD で一般的に知られているメソン交換による斥力芯での saturation の保持という考え方は異なる機構を提案しており、それらがどのように無矛盾になるかについて将来の問題を残している。これらの成果は、さらに 3 フレーバーの QCD への応用や 3 フレーバーの場合の近距離斥力がユニバーサルに存在するという研究成果論文 へと繋がり、ハドロン物理と原子核物理の 3 フレーバー高密度相について超弦理論からの情報を提供することとなった。研究成果論文 はこれらの結果を招待レビュー論文としてまとめたものである。

(2) 核子が多体系を成すのは原子核だけではなく、宇宙には中性子星が存在する。中性子星は大きな原子核であると考えられ、原子

核物理を試す大きな実験場と考えられている。また、中性子星にはマグネターという種類が知られており、これは超強磁場を持つが、その存在理由が知られていない。そこで、核子多体系が自発的に超強磁場を発生させる機構を論文では提案した。この提案は、ゲージ重力対応における QCD アノマリー項の取り扱いに端を発しており、アノマリー項を通じることでも中性子星のようなフェルミオン高密度系で自発磁化が生じる機構を提案しているものである。このゲージ重力対応を用いた解析については、論文では述べていないが、研究会などの招待講演では触れ、様々な議論が行われた。

(3) フェルミオン多体系には、無限系の場合にはラッティンジャーの定理が知られており、これは、重い原子核などのバリオン数が多い場合には近似的に成立する可能性が考えられる。一方で QCD は強結合のシステムであり、ラッティンジャーの定理が成立するのがどのような場合かを強結合の場合に具体的に見ることは重要である。研究成果論文ではこの点に着目して、様々な理論の変形、特に外場としての磁場をかけるとどうなるか、等に対してラッティンジャー定理がそのまま成立することをゲージ重力対応を用いて示した。つまり、ラッティンジャー定理が非常に広範囲で成り立っていることを示している。一方で、その証明には、閉じ込め相を仮定しているため、原子核内部で閉じ込めが弱くなっている可能性を考慮すると、原子核においては若干の破れが見られる可能性もある。また、原子核は有限システムであるので、ラッティンジャーの定理の前提条件に表面項の効果を加える必要があり、直接の適用からのずれを考慮する必要もある。

(4) QCD と原子核を直接つなげる実験として、重イオン衝突実験がある。重イオン衝突実験ではクォークのプラズマ状態を実現できるため、原子核の生成機構、すなわち、根源的にはクォークの閉じ込め機構、の解明に迫ることが出来る。研究成果論文では、QCD 真空中に電場を欠けた時の不安定性を、ゲージ重力対応を用いて計算した。重イオン衝突実験では大きな電磁場が瞬間的に生成することが知られており、その生成がどのようにクォークの対生成やプラズマの生成に関係するかを初めて見る事が出来た。ラッティンジャーの定理と磁場の関係や、核子多体系としての中性子星の電磁場にも関係する研究成果である。

#### 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5件)

橋本 幸土、岡 隆 司、 Vacuum

Instability in Electric Fields via AdS/CFT: Euler-Heisenberg Lagrangian and Planckian Thermalization、Journal of high energy Physics、査読有、1310 巻、2013、116

DOI: 10.1007/JHEP10(2013)116

衛藤 稔、橋本 幸土、初田 哲男、 Ferromagnetic neutron stars: axial anomaly, dense neutron matter, and pionic wall、Physical Review、査読有、D88、2013、081701

DOI: 10.1103/PhysRevD.88.081701

橋本 幸土、飯塚 則裕、A Comment on Holographic Luttinger Theorem、Journal of High Energy Physics、査読有、1207、2012、064

DOI: 10.1007/JHEP07(2012)064

青木 慎也、橋本 幸土、飯塚 則裕、 Matrix Theory for Baryons: An Overview of Holographic QCD for Nuclear Physics、Reports on Progress in Physics、査読有、76、2013、104301

DOI:

10.1088/0034-4885/76/10/104301

橋本 幸土、森田 健、Nucleus from String Theory、Physical Review、査読有、D84、2011、046004

DOI: 10.1103/PhysRevD.84.046004

[学会発表](計36件)

橋本 幸土、“MAGNETARS AND FERROMAGNETISM”(理研 OIST 数理物理研究会にて講演、沖縄科学技術大学院大学、2014年3月27日)

橋本 幸土、“DOMAIN WALLS AND MAGNETARS”(名古屋大学ソリトン研究会招待講演、2014年1月6日)

橋本 幸土、“SOLVING CONDENSED MATTER BY SUPERSTRINGS”(富山大学物理学科コロキウム、日本物理学会北陸支部講演会、2013年12月20日)

橋本 幸土、“VACUUM INSTABILITY IN HOLOGRAPHY”(パスコス国際会議講演、台湾、台北、2013年11月25日)

橋本 幸土、“Superstring theory and Lorentz violation”(反物質国際会議招待講演(スイス、ベルン)、2013年11月15日)

橋本 幸土、“Vacuum instability in holography”(東京大学数物連携宇宙研究機構研究会「ホログラフィーと QCD」招待講演、東京大学、2013年11月26日)

橋本 幸土、“Solving condensed matter with superstring”(台湾国立大学物理コロキウム 招待講演、台北、2013年9月17日)

橋本 幸土、“弦理論とその応用”(京

- 都大学基礎物理学研究所研究会「素粒子物理学の進展 2013」招待講演、京都大学、2013年8月9日)
- 橋本 幸土、"Superstring theory and hadrons" (KEK 新ハドロンサマースクール招待講演、高エネルギー加速器研究機構、筑波、2013年8月3日)
- 橋本 幸土、東大本郷物理コロキウム "超弦理論で物性を解く" (東京大学、2013年7月5日)
- 橋本 幸土、"VACUUM INSTABILITY IN HOLOGRAPHY" (韓国 APCTP 研究会招待講演「ホログラフィーにおける真空不安定性」、韓国ポハン、2013年6月19日)
- 橋本 幸土、"DIELECTRIC INSTABILITY IN HOLOGRAPHY" (カリフォルニア工科大学理論グループ招待セミナー「ホログラフィーにおける誘電不安定性」、アメリカ、カリフォルニア工科大学、2013年5月29日)
- 橋本 幸土、"VACUUM DECAY DESCRIBED BY HOLOGRAPHY" (九後汰一郎先生退官記念研究会招待講演、京都、基礎物理学研究所、2013年5月18日)
- 橋本 幸土、"ハドロン、弦、物性物理" (日本物理学会年会、シンポジウム「非平衡物理とハドロン物理」招待講演、2013年3月27日)
- 橋本 幸土、"ATOMIC NUCLEI AND MATRIX THEORY" (スタンフォード大学理論物理学研究所セミナー「原子核と行列理論」、アメリカ、スタンフォード、2013年3月18日)
- 橋本 幸土、"LANDSCAPE IN BOUNDARY STRING FIELD THEORY" (マサチューセッツ工科大学理論物理学センターセミナー「境界弦場理論における真空構造」、アメリカ、ボストン、2013年3月13日)
- 橋本 幸土、"LANDSCAPE IN BOUNDARY STRING FIELD THEORY" (韓国高等研究所セミナー「境界弦場理論における真空構造」、韓国、ソウル、2013年2月15日)
- 橋本 幸土、"MAGNETARS AND STRING THEORY" (理化学研究所宇宙線シンポジウム、理化学研究所、和光市、2012年11月27日)
- 橋本 幸土、"SUPERSTRING THEORY AND HADRON PHYSICS" (阪大グローニンゲン大合同シンポジウム、大阪大学、2012年11月26日)
- 橋本 幸土、"Holographic Magnetars" ("FROM GRAVITY TO STRONG COUPLING PHYSICS" YKIS シンポジウム、京都大学基礎物理学研究所、2012年10月15日)
- 21 橋本 幸土、"IMPURITIES IN ADS/CFT", TALK "FERROMAGNETIC NEUTRON STAR" (韓国 CQUEST 招待講演、韓国、ソウル、2012年7月10日)
- 22 橋本 幸土、"IMPURITIES IN GAUGE/GRAVITY CORRESPONDENCE" (理研研究会 "MATHEMATICAL METHODS IN CONDENSED MATTER AND MATERIAL SCIENCE"、理化学研究所、2012年6月12日)
- 23 橋本 幸土、"SUPERSTRING THEORY AND APPLIED MATHEMATICS" (東京都立大学コロキウム、東京、2012年5月24日)
- 24 橋本 幸土、"HOLOGRAPHIC NUCLEI" (ISAAC NEWTON INSTITUTE WORKSHOP "MATHEMATICS AND APPLICATIONS OF BRANES IN STRING AND M-THEORY"、2012年4月22日)
- 25 橋本 幸土、"Holographic nuclei" (CONFERENCE "PROGRESS IN QUANTUM FIELD THEORY AND STRING THEORY" にて招待講演、大阪市立大学、2012年4月4日)
- 26 橋本 幸土、"Baryons and matrices" (研究会 "行列模型とその周辺" にて招待講演、立教大学、2012年2月21日)
- 27 橋本 幸土、"NUCLEUS FROM STRING THEORY" (14TH WORKSHOP ON ELASTIC AND DIFFRACTIVE SCATTERING (EDS BLOIS WORKSHOP) にて招待講演、QUI NHON, VIETNAM、2011年12月20日)
- 28 橋本 幸土、"超弦理論と原子核" (研究会 "素核宇融合による計算基礎物理学の進展" にて講演、合歡の郷、2011年12月4日)
- 29 橋本 幸土、"superstring and CPT" (INTERNATIONAL CONFERENCE "PBAR11 (COLD ANTIMATTER AND HIGH PRECISION PHYSICS)" にて招待講演、松江、2011年12月29日)
- 30 橋本 幸土、"NUCLEUS FROM STRING THEORY" (2ND KEIO INTERNATIONAL WORKSHOP "QUARKS AND HADRONS UNDER EXTREME CONDITIONS" にて招待講演、慶応大学、2011年11月17日)
- 31 橋本 幸土、"Superstring and hadron physics" (WORKSHOP "FUTURE DIRECTIONS IN HIGH ENERGY QCD" にて招待講演、理化学研究所、和光市、2011年10月20日)
- 32 橋本 幸土、"SUPERSTRING AND NUCLEI" (日本物理学会にて招待講演、弘前、2011年9月19日)
- 33 橋本 幸土、"Holographic Nuclei" (WCU / HANYANG - APCTP FOCUS PROGRAM "FROM DENSE MATTER TO COMPACT STARS IN QCD AND HQCD" にて招待講演、アジア太平洋理論物理学研究所、韓国ポハン、2011年8月15日)
- 34 橋本 幸土、"RAPID THERMALIZATION BY

BARYON INJECTION IN GAUGE/GRAVITY DUALITY” (素核宇宙融合・新八ドロンクロスオーバー研究会にて招待講演、計算科学研究機構、神戸、2011年6月23日)

- 35 橋本 幸士、 “ RAPID THERMALIZATION BY BARYON INJECTION IN GAUGE/GRAVITY DUALITY ” ( THE 11TH WORKSHOP ON NON-PERTURBATIVE QCD にて招待講演、THE INSTITUT D ' ASTROPHYSIQUE DE PARIS、フランス、パリ、2011年6月6日)
- 36 橋本 幸士、 “ NUCLEAR PHYSICS FROM STRING THEORY ” (名古屋大学 GCOE コロキウム、名古屋大学、2011年4月14日)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

橋本 幸士 (HASHIMOTO, Koji)  
大阪大学・理学研究科・教授  
研究者番号：80345074

### (3) 連携研究者

矢崎 紘一 (YAZAKI, Koichi)  
理化学研究所・仁科加速器研究センター・  
客員主幹研究員  
研究者番号：60012382