

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2016～2019
課題番号：16K05324
研究課題名(和文)ホログラフィックQCDによるハイペロンの研究

研究課題名(英文)Hyperons in Holographic QCD

研究代表者

杉本 茂樹 (Sugimoto, Shigeki)

京都大学・基礎物理学研究所・教授

研究者番号：80362408

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：原子核を構成する陽子や中性子を始めとする、ハドロンと呼ばれる強い相互作用をする粒子の性質を、物質の基本的な構成要素が素粒子ではなくひもであるとする超弦理論を用いて解析することを可能にするホログラフィックQCDと呼ばれる理論的な枠組みの基礎を整備するための研究を行った。特に、クォークを3種類以上取り入れると、観測されているバリオンの性質をうまく再現できないという問題が2007年ごろに指摘されたが、本研究によって解決され、取り入れるクォークの数がいくつであっても、矛盾なくバリオンを解析できる枠組みが確立された。また、バリオンの励起状態を包括的に解析する新しい枠組みも与えた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、原子核を構成する陽子・中性子の仲間であるバリオンの性質を超弦理論を用いて解析するための枠組みが整備され、特にストレンジクォークを含むバリオン(ハイペロン)やバリオンが励起した状態の性質を矛盾なく解析することが可能となった。これはクォークを用いたモデルや、量子色力学に基づく数値解析とは全く異なる新しい解析方法を提供するため、学術的に大変興味深い。また、バリオンの研究は、この世に存在するあらゆる物質の成り立ちの解明に通じるものであり、将来的には工学的な応用もありうる。

研究成果の概要(英文)：We developed frameworks to analyze properties of hadrons, which are particles that interact by the strong interaction such as protons and neutrons, based on so-called "holographic QCD", which enables us to study hadrons using superstring theory. In particular, we solved some long-standing problems concerned with baryons in the cases with 3 or more flavors and established a way to analyze baryons unambiguously for arbitrary number of flavors. We also proposed a new framework to analyze excited baryons.

研究分野：素粒子論

キーワード：ホログラフィックQCD 超弦理論 場の量子論

1. 研究開始当初の背景

1997年にゲージ理論と曲がった時空における弦理論がある場合には等価になるという驚くべき双対性(ゲージ/ストリング双対性)が発見された。[1] 私は2004年ごろに行った名大の酒井氏との共同研究で、この双対性を強い相互作用の基礎理論であるQCDに適用し、弦理論に基づくQCDの記述(ホログラフィックQCD)を提案した。[2] この方法は当初の期待を大きく超える成功を収め、荒い近似ながらもハドロンのスペクトルや相互作用など、実験と比較し得る様々な物理量を弦理論に基づく簡単な計算で求めることが可能となった。我々はそのときに任意の数のフレーバーのクォークを含む記述法を開発したものの、実験値と比較するような具体的な解析は主としてクォークがアップクォークとダウンクォークの2種類のみからなる2フレーバーのQCDの解析を行ってきた。当初はストレンジクォークを入れる場合でも、基本的には同じ考え方で解析すれば様々な物理量を計算することができると考えていたが、2007年ごろに実はフレーバー数が3の場合には、ある基本的な問題があることが指摘された。[3] ホログラフィックQCDを用いてフレーバーが3の場合のバリオンのスペクトルを求めると、ハイパーチャージに対して課されるべき拘束条件の一つが正しく再現されず、導かれるバリオンのスペクトルが実験で観測されているものを再現しないという指摘である。この問題は長年、放置されており、正しい拘束条件が得られることを仮定した解析などがなされてきたが、基礎がはっきりしない状況が続いていた。また、当初、あまり認識されていなかったが、バリオンを含む系のホログラフィックQCDにおける記述には別の問題もあった。ホログラフィックQCDにおける低エネルギー有効理論は5次元ゲージ理論として記述され、この5次元ゲージ場の境界での値がQCDにおけるカイラル対称性のカレントと結合した外場と同一視される。バリオンが存在するときには、この同一視をする際に、5次元ゲージ場を境界でゲージ変換しなければならないことが示される。ところが、この5次元ゲージ理論にはチャーン・サイモンズ項と呼ばれる項があり、この項が境界でのゲージ変換で不変ではないため、ゲージの取り方によって作用の形が変わってしまう。そのため、ナイーブな取り扱いをすると、物理的であるはずの結果がゲージの取り方に依存してしまうという問題があった。この問題もフレーバー数が3以上である場合に生じる問題である。ホログラフィックQCDの正当性や有用性を確認するためにも、これらの問題を解決し、ハイペロンを扱うための理論的な基礎を固めることは重要な課題であった。

また、この弦理論に基づくハドロンの解析方法が優れている点の一つとして、ハドロンの励起状態を包括的に解析できる点が挙げられる。例えば、我々は[4]の研究で開弦の励起状態に対応したメソンの励起状態を調べたが、実験で観測されているメソンのスピン J と質量 M の2乗をプロットすると、ほぼ直線的に並ぶレジエ軌跡がうまく再現され、他の多くの励起状態についても実験と理論的予言が定性的に非自明に一致することを示した。バリオンについても、数多くの励起状態が実験的に観測されており、それらの性質の理論的な解明は、QCDの最も重要な研究テーマの一つと言える。ホログラフィックQCDが正しくQCDを記述するとしたら、少なくとも原理的には、それらの励起状態も正しく再現できるはずである。しかし、当初行われていた解析は、主としてバリオンをソリトンとして記述するスキルムモデルと同様の手法で、一部の励起状態は再現できたものの、スピンとアイソスピンの大きさが等しい場合など、限られた部分の解析しかなされていなかった。

2. 研究の目的

ホログラフィックQCDと呼ばれる弦理論に基づくハドロンの記述を用いて、ストレンジクォークを含むバリオン(ハイペロン)の性質を探るための基礎的な枠組みを整備し、それを応用している様々な解析を行うことが第一の目的である。具体的には、上で述べたフレーバー数が3の場合にバリオンのスペクトルがうまく再現されないなどの問題を解決し、バリオンと光子やメソンとの相互作用に関する様々な性質を解析すること、そしてハイペロンを含むバリオン間に働く力を求めることなどが当初の研究の目的であった。

しかし、以下に述べるように、バリオンのスペクトルに関する問題などの基本的な問題はすっきりと解決され、最初の目的は達成されたものの、当初、行おうとしていたハイペロンを含むバリオンの相互作用に関する解析は、他のグループが先に論文を発表してしまったため、軌道修正をしてより広い目的の研究を行うことにした。その一つは、バリオンの励起状態に関する研究で、これまで一部のセクターでしか解析されていなかったバリオンの励起状態を包括的に解析するための枠組みを構築することを目的とする。

また、ホログラフィックQCDは上記のゲージ/ストリング双対性に基づいているが、この双対性は未だに未解明な部分が多いため、QCDに限らず、ゲージ理論と場の量子論の間の関係をより深く理解することを目的とした研究も行った。

3. 研究の方法

まず、上で述べたフレーバー数が3の場合のバリオンのスペクトルを得るために必要な拘束条件が得られないという問題を解決する。ホログラフィックQCDにおけるソリトン描像に基づくバリオンの解析はスキルムモデルにおける取り扱いを拡張したものである。スキルムモデルでヴェス・ズミノ・ウィッテン(WZW)項がうまく働いて、正しいスペクトルを与える拘束条件が導かれることが知られている。一方、ホログラフィックQCDはスキルムモデルの作用を含み、WZW項も5次元チャーン・サイモンズ項から再現されるので、このチャーン・サイモンズ項が同じ働きをするものと考えられる。ところが、[3]によって、それまで用いられてきたチャーン・サイモンズ項をナイーブに用いると、正しい拘束条件が得られないことが示され、正しい拘束条件を得るためにこのチャーン・サイモンズ項に代わる新たな項を導入することが提案された。しかし、彼らの提案した項はゲージ不変で、QCDのカイラルアノマリーを正しく再現しない。そこで、我々はチャーン・サイモンズ項の定義そのものを見直し、ゲージの取り方に物理が依存しないように構成した上で、ハドロンスペクトルに関する正しい拘束条件とQCDのカイラルアノマリーを同時に再現するかどうかを調べる。

バリオンの励起状態については、メソンの励起状態の解析 [4] で重要な役割を果たした開弦の励起状態を、バリオンの場合にも取り入れた解析を行う。これはホログラフィックQCDに基づくバリオンをソリトンのように扱うのではなくDブレーンとして扱う橋本-飯塚-Yiの行列模型 [5]を開弦の励起状態を取り入れる形で拡張し、その理論の物理的な状態を調べることでバリオンの励起状態記述するアイデアである。まず、バリオンをDブレーンとして記述する際に、Dブレーンに端点をもつ開弦にどのような励起状態が現れるのかを調べ、その状態に対応する自由度を取り入れた量子力学の作用を書き下し、その系を量子化して得られる状態に対して、スピン、アイソスピン、パリティなどの量子数を同定する。その状態の質量と量子数を実験で観測されているバリオンのものと比較することで、予言と観測事実がどの程度合うのかを検証する。

4. 研究成果

上で述べたように、ホログラフィックQCDにおいて、フレーバーの数が3以上の場合でバリオンに対応するソリトンが存在するときに、従来、用いられていた有効作用に含まれるチャーン・サイモンズ項にいくつか問題があることが指摘されていた。特に、実験で観測されているバリオンを正しく記述するために必要な拘束条件が再現されず、正しいバリオンスペクトルが得られないという問題や、チャーン・サイモンズ項がゲージの取り方に依存することから、ゲージの取り方によらずに物理量を計算する方法が確立されていないという問題があった。我々はこれらの問題を解決すべく、ソリトンがある場合にも使えるチャーン・サイモンズ項を提案し、それが要求される様々な整合性の条件をきちんと満たすことを示すことで長年の問題を解決した。このチャーン・サイモンズ項は、もともと用いられていた標準的な形のものにあつたゲージ依存性を取り除き、物理的内容を不定性なく取り出せるようにする形で構成した。それを用いると、QCDのカイラルアノマリーが正しく再現され、さらに上述の拘束条件も正しく導かれる。また、この新しいチャーン・サイモンズ項の記述の仕方、等価なものを3種類与え、状況に応じて使いやすい表式を使えるように理論を整備した。この研究はPhysical Review誌のEditor's suggestionsに選ばれた。[6]

バリオンの励起状態の研究に関しては以下のような成果が得られた。ホログラフィックQCDにおいて、バリオンは超弦理論に存在するDブレーンと呼ばれる物体が内部空間に巻き付いた状態として得られる。この記述において、バリオンを表すDブレーン上に端点を持つ弦が3本(ゲージ群がSU(Nc)のQCDの場合はNc本)なければならないことが知られている。これまでの研究では、この3本の弦の振動モードが基底状態である場合の解析しかされていなかったが、これが励起状態にある場合へ拡張し、バリオンの励起状態を構成する方法を与えた。この方法はカラー数やフレーバー数が一般の場合に適用できるが、具体的な解析は主としてアップクォークとダウンクォークで構成されるバリオンの場合に行った。その結果、実験で見ついているアイソスピンが1/2や3/2で、スピンの1/2から11/2までの間の多くのバリオンに対応する状態が得られることが分かった。例えば、アイソスピンが1/2でスピンの3/2, 5/2, ..., 11/2のバリオンの共鳴状態であるN(1520), N(1680), N(2190), N(2220), N(2600)の系列は、上記の3本の弦のうちの2本は基底状態で1本が励起状態にあるような状態として理解することができる。この解釈で、実験で測られているこれらの状態のパリティを正しく再現し、質量の定性的な振る舞いも説明できる。これら以外の状態についても、我々の解析によって存在が示唆される状態と実験で見ついている状態の間の対応を詳しく議論した。[7]

その他、当初予定したホログラフィックQCDの研究ではないが、場の量子論と弦理論に関連した研究として以下のような研究も行った。まず、結合定数などの理論のパラメータが時空の座標に依存するような場の理論に関する研究を行った。4次元のN=4超対称ヤン・ミルズ理論に次

元3以下のオペレータを加える変形を加えた理論において、結合定数を含む理論のあらゆるパラメータが時空の座標に依存する状況で超対称性の一部が保たれるための条件を求め、その条件を満たす広いクラスの解を見つけた。さらに、そのような理論を超重力理論によって実現する方法も議論した。[8,9] また、2次元QEDにおいて、フェルミオンの電荷が素電荷の k 倍である状況において、離散的対称性が自発的に破れて k 個の縮退した真空が現れる現象を発見し、それらの真空がフェルミオンの質量を入れたときに獲得するエネルギーなどを調べた。また、この系を弦理論に埋め込み、2次元QEDの解析を応用することによって、弦理論におけるオリエンティフォールドとDブレーンの間に働く力の非摂動的な解析を行った。[10]

蛇足ながら、論文として未発表の研究として、(a)ホログラフィック双対を持つ場の理論における一般化された大域的対称性に関する研究、(b)ホログラフィックQCDを用いて温度とバリオン数密度を入れたときの相構造に関する研究なども行った。まず、(a)ではAdS時空における n -formゲージ場に関する運動方程式の完全な一般解を得ることができた。(b)の有限温度の解析では、ハドロン共鳴ガス模型に類する解析をホログラフィックQCDから得られるハドロンに対して行い、圧力やエネルギー密度が温度と共に増加する様子を調べた。また有限密度の解析では、バリオンを5次元時空におけるフェルミ粒子として取り扱う方法を開発し、スピンの $1/2$ のバリオンに限定したトイモデルにおいてバリオン数密度、圧力、エネルギー密度の間の関係を解析した。これらの研究は、今後、さらに発展させて論文の形にまとめたい。

参考文献：

- [1] J. Maldacena, Adv.Theor.Math.Phys.2(1998)231, Int.J.Theor.Phys.38 (1999) 1113
- [2] T. Sakai and S. Sugimoto, Prog.Theor.Phys.113 (2005) 843
- [3] H. Hata and M. Murata, Prog.Theor.Phys. 119 (2008) 461
- [4] T. Imoto, T. Sakai and S. Sugimoto, Prog.Theo.Phys.124 (2010) 263
- [5] K. Hashimoto, N. Iizuka and P. Yi, JHEP10(2020)003
- [6] P.H.C. Lau and S. Sugimoto, Phys.Rev.D 95 (2017) 12, 126007
- [7] Y. Hayashi, T. Ogino, T. Sakai and S. Sugimoto, Prog.Theor.Exp.Phys. 2020, 053B04
- [8] J. Choi, J.J. Fernandez-Melgarjo and S. Sugimoto, Prog.Theor.Exp.Phys. 2018, 013B01
- [9] J. Choi, J.J. Fernandez-Melgarejo and S. Sugimoto, JHEP03 (2018) 128
- [10] A. Armoni and S. Sugimoto, JHEP03 (2019) 175

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 5件）

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| 1. 著者名 Adi Armoni and Shigeki Sugimoto | 4. 巻 2019 |
| 2. 論文標題 Vacuum structure of charge k two-dimensional QED and dynamics of an anti D-string near an $O1^{\wedge}$ -plane | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics | 6. 最初と最後の頁 175 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP03(2019)175 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 Jaewang Choi, Jose J. Fernandez-Melgarejo, Shigeki Sugimoto | 4. 巻 1803 |
| 2. 論文標題 Deformation of $N = 4$ SYM with varying couplings via fluxes and intersecting branes | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics | 6. 最初と最後の頁 128 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP03(2018)128 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 Jaewang Choi, Jose J. Fernandez-Melgarejo, Shigeki Sugimoto | 4. 巻 2018 |
| 2. 論文標題 Supersymmetric Gauge Theory with Space-time Dependent Couplings | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics | 6. 最初と最後の頁 013B01 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptx181 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 Pak Hang Chris Lau, Shigeki Sugimoto | 4. 巻 D95 |
| 2. 論文標題 Chern-Simons five-form and holographic baryons | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review | 6. 最初と最後の頁 126007 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.95.126007 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| 1. 著者名 Hayashi Yasuhiro, Ogino Takahiro, Sakai Tadakatsu, Sugimoto Shigeki | 4. 巻 2020 |
| 2. 論文標題 Stringy excited baryons in holographic quantum chromodynamics | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics | 6. 最初と最後の頁 053B04 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa045 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

[学会発表] 計12件 (うち招待講演 12件 / うち国際学会 10件)

| |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Shigeki Sugimoto |
| 2. 発表標題 Comments on finite temperature/density in holographic QCD |
| 3. 学会等名 YKIS2018b Symposium "Recent Developements in Quark-Hadron Sciences" (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Shigeki Sugimoto |
| 2. 発表標題 超対称性の破れと超弦理論 |
| 3. 学会等名 質量階層性に対する新しい原理が導く多彩な物理現象とプランクスケールの物理 (招待講演) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Shigeki Sugimoto |
| 2. 発表標題 2 dim QED and String Theory revisited |
| 3. 学会等名 East Asia Joint Workshop on Fields and Strings 2018, KIAS, Korea (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Shigeki Sugimoto |
| 2. 発表標題 2 dim QED and String Theory revisited |
| 3. 学会等名 KEK Theory workshop 2018 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Shigeki Sugimoto |
| 2. 発表標題 SUSY gauge theory with space-time dependent couplings |
| 3. 学会等名 East Asia Joint Workshop on Fields and Strings 2017 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|-------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Shigeki Sugimoto |
| 2. 発表標題 Chern-Simons 5-form and Holographic Baryon |
| 3. 学会等名 excited QCD 2017 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 杉本茂樹 |
| 2. 発表標題 On CS 5-form and Holographic Baryon |
| 3. 学会等名 East Asia Joint Workshop on Fields and Strings 2016 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|-----------------------------|
| 1. 発表者名 杉本茂樹 |
| 2. 発表標題 弦理論は現実世界を記述できるか |
| 3. 学会等名 理論懇シンポジウム (招待講演) |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Shigeki Sugimoto |
| 2. 発表標題 Anomaly cancellation in type II string theory, revisited |
| 3. 学会等名 East Asia Joint Workshop on "Fields and Strings 2019" and 12th Taiwan String Theory Workshop (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Shigeki Sugimoto |
| 2. 発表標題 2 dim QED and String Theory |
| 3. 学会等名 SNU mini-workshop on Quantum fields and strings (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Shigeki Sugimoto |
| 2. 発表標題 Holographic QCD -review and recent development- |
| 3. 学会等名 15th Rencontres du Vietnam, "Perspectives in Hadron Physics" (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Shigeki Sugimoto |
| 2. 発表標題 Generalized WZW-term from holographic QCD |
| 3. 学会等名 Holographic QCD 2019 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|