

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 5 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03847

研究課題名(和文) フロー方程式を用いたゲージ重力双対性の研究

研究課題名(英文) Study of gauge gravity duality via flow equation

研究代表者

横山 修一 (Yokoyama, Shuichi)

京都大学・基礎物理学研究所・特定研究員

研究者番号：50773389

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：量子重力理論の構築は21世紀に残された物理学の最大の問題の一つである。量子重力を実現する方法が明らかになれば、ブラックホールやクォーク閉じ込めに関する未解決問題の解決につながる事が期待される。

量子重力構築の鍵として活発に研究されている手法がホログラフィーを用いたゲージ重力双対性であり1997年に提唱された。それ以降、様々な方法が提案され研究が行われてきたが、本研究では既存の方法とは異なる方法でこの問題を研究した。その結果、既存の方法にある問題点をクリアしながら重力側で期待される結果を再現することに成功し、また一般相対性理論において懸案であったエネルギーの定義の不備を克服することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により重力の効果が別の異なる理論を粗視化することによって実現されることを強く示唆する結果を得た。これは重力の量子論を構築の確かな足がかりとなるものである。

また本研究を通じて懸案事項であった一般相対性理論におけるエネルギーの定義の問題が解決されたことは、基礎物理学における大きな進展であった。今後天体や宇宙空間における物理量を精密に扱う上で欠かすことのできない基本的な役割を果たすことが期待される。

研究成果の概要(英文)：The construction of a theory of quantum gravity is one of the greatest remaining problems in physics in the 21st century. Once a method to realize quantum gravity is clarified, it is expected to lead to the solution of unsolved problems related to black holes and quark confinement.

Gauge-gravity duality using holography, which was proposed in 1997, has been actively studied as a key method to construct quantum gravity. Since then, various methods have been proposed and studied, we studied this problem using a method different from existing methods. As a result, we succeeded in reproducing expected results on the gravity side while overcoming the problems with the existing methods. We also succeeded in overcoming the incomplete part of known definitions of energy, which had been a concern in the general theory of relativity.

研究分野：自然科学一般 / 素粒子、原子核、宇宙線、宇宙物理にする理論 /

キーワード：双対性

場の量子論 弦理論 一般相対性理論 量子重力

1. 研究開始当初の背景

矛盾のない量子重力理論の構築は21世紀に残された物理学の最大の問題の一つである。量子重力理論を実現する方法が明らかになれば、ブラックホールにまつわる未解決問題や強結合領域の物理に関する未解決問題の解決につながることを期待される。

この問題を解決する鍵として現在活発に研究されている手法が双対性である。双対性とは、ある理論と見かけの異なる別の理論が同じ物理を記述するという性質であり、この性質を用いることで、片方の理論において強結合領域の物理量を双対な理論における摂動論によって計算することが可能になる。

双対性の中でもとりわけゲージ/重力双対性、特に CFT/AdS 双対性と呼ばれる双対性が量子重力理論の謎を解明する有力なアプローチとして期待され研究が進められている。CFT/AdS 双対性とは、共形場理論(CFT)が Anti-de-Sitter(AdS)空間を背景とする重力の理論と等価になるという提唱であり、この双対性において量子重力理論はゲージ理論のホログラムとして実現される。

1997年 Maldacena によって AdS/CFT 双対性が提唱されて以降、この双対性を実現して重力理論を構成する方法がいくつか提案され研究がすすめられてきた。しかし、得られる結果が期待される重力理論の振る舞いとは異なる場合があることや双対な幾何を仮定して議論を進めていることなど、既存の方法にはいくつかの基本的な問題が内包しながら研究が続けられている。このような基本的な問題点を改善するには、何か大きな技術的進歩、もしくは抜本的な手法の転換が必要であるように思われる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、フロー方程式と呼ばれる、格子ゲージ理論において研究が進められていた粗視化の手法を用いて AdS/CFT 双対性を新しい方法で実現し、上述したような既存の方法にある問題点を改善し、量子重力理論の構築をより実現に近づけることにあった。

申請当初の段階までの自身の研究によって、このフロー方程式を用いた方法により重力理論の対称性と静力学が共形場理論からうまく再現できることを明らかにしていた。本研究における目的の一つが、この定式化を用いて共形場理論から重力理論の励起状態などの動力学がどのように実現されるのかを明らかにすることであった。

もう一つの目的は、AdS/CFT 双対性を用いて実現されたブラックホールは量子効果を含んだものになっていることが期待される。フロー方程式の方法を用いてブラックホールをホログラフィックに実現し、重力の量子的性質がブラックホールにどのような効果をもたらすかを明らかにすることであった。

3. 研究の方法

研究の方法は、フロー方程式によって粗視化された作用素は接触発散が解消されているという特性を活かしたものである。この性質により、粗視化された作用素に対し Hermite 共役による内積を定義することができるようになる。この内積を用いて粗視化した作用素の合成作用素を構成する。この合成作用素と共形場理論の励起状態とで構成した量が、重力理論側において対応する運動方程式と境界条件を満たすことを確認する。

合成作用素として2階の対称テンソルを用いた場合は1次元高い空間の計量になる。この計量が双対なホログラフィック空間におけるそれと同定する。その一方、AdS/CFT 双対性の一般論から、有限温度の共形場理論に対する双対な幾何は AdS ブラックホールになることが知られている。このことを利用して有限温度の自由なスカラー場に対しフロー方程式を用いたホログラフィック計量を計算し、その計量を古典的ブラックホールの計量と比較することで量子効果を含んだブラックホールの性質を調べる。

4. 研究成果

(1) ①フロー方程式が AdS/CFT 双対性とは異なるゲージ重力対応にも適用可能かどうか調べるため、一般の非相対論的共形場理論に対応してフロー方程式の方法を適用し対応するホログラフィック空間を調べた。その結果、それまで用いていた自由フロー方程式に1パラメータ加えて拡張したフロー方程式を使うことで対称性がうまく対応することが分かった。そしてシュレーディンガー時空とリフシッツ時空が混成するような新しい幾何が見れることを発見し、そのような幾何を非相対論的混成幾何と命名した。

②その後、新しく発見した非相対論的混成幾何を解に持ち、かつ非相対論的 CFT を境界双対としてもつことができる重力理論を構成した。特に、非相対論的共形場理論に存在する粒子数の保存に対応する大域的 $U(1)$ 対称性がバルクではゲージ化され非自明なゲージ場が重力理論に存在する。またフロー方程式に新しく導入したパラメータはバルク側では一般座標変換のゲージ自由度に対応していることを明らかにした。

(2) dS/CFT 対応の予想をフロー方程式の方法を用いて検証するため、自由 $Sp(N)$ ベクトル模型にフロー方程式を適用してホログラフィック空間としてドジッター時空が見れるかどうか調べた。その結果、以下のことを明らかにした。

①粗視化したゴースト作用素が発散しないためには作用素を複素化し実軸ではなく虚軸方向に粗視化する必要がある。

②虚軸方向に粗視化したゴースト作用素を使って誘導計量を計算すると確かにドジッター時空が創発される。

③対応するバルクの宇宙定数の量子補正をラージ N 展開の一次まで計算を行った。これは重力側では1次の量子補正に相当し、宇宙定数が小さくなる方向へ寄与する。すなわち、重力の量子補正は宇宙をより安定に向かわせる。

(3) 量子効果を含んだブラックホールを実現する動機で複数の自由なスカラー場からなる有限温度 CFT に対して対応する1次元高い空間の計量を計算した。その結果の計量は以下の性質を持つことが判明した。

①計量は漸近的に AdS ブラックブレン解になるが、ホライズンは存在せず座標特異点が解消されている。

②励起した物質場が時空全体にわたって広がっている。

③系の原点に生じる曲率特異性は完全には除去されないが、古典的なブラックホールに比べて緩やかになっている。

以上の性質が、時空の有限温度効果によって物質場が励起され、かつ古典的ブラックホールに量子効果が加わった結果のブラックホールの性質として妥当であることを議論した。

(4) (3) の量子効果を含んだブラックホールを研究する過程で、曲がった時空におけるエネルギーの定義として標準的に用いられている準局所エネルギーや Komar 積分ではより一般の時空でエネルギーが正しく評価できないことを認識し、この点を改善するような一般座標変換で明示的に不変となるチャージの定義を見つけ出し、この定義が一般の曲がった時空で正しいチャージの定義であると提唱した[30]。そしてこの定義がよく知られたブラックホールの質量や角運動量を再現することを確認した上で、静止した星のもつ全エネルギーをこの定義を用いて再計算し、これまで星の質量とされていた Misner-Sharp 質量からずれが出て、その補正が大きな割合になることを指摘した。特に、このずれは自己重力相互作用から生じる重力束縛エネルギーであり、広がった物体に対しては「重力質量と慣性質量が等しくなる」という等価原理が成立しないことを指摘した。

(5) (4) で提唱したチャージの研究を進めると、大域的対称性のないような一般の場の理論においても(4)で定義したチャージが保存するようなベクトル場が存在することを示した。このような大域的対称性に付随しない保存量を構成するベクトル場として、球対称な系における Kodama ベクトルと呼ばれるベクトル場が知られていたが、本研究で得られたベクトル場は Kodama ベクトルの拡張になっている。またこのベクトル場から作られた保存カレントの物理的意味がエントロピーカレントであり保存チャージが系のエントロピーであると提唱した。この提唱の証拠として系が一様等方になる場合にこの保存量をエントロピーとみなすことで熱力学第一法則が再現されることを証明した。そして一様等方宇宙やシュワルツシルトブラックホール、BTZ ブラックホールに適用してこれまでの知られていたエントロピーに関する結果をこの方法で統一的に再現した。特にこの方法で計算した結果が Bekenstein-Hawking の公式と矛盾がないことを確認した。

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 1件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Yokoyama Shuichi	4. 巻 2020
2. 論文標題 Holographic de Sitter spacetime and quantum corrections to the cosmological constant	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptaa122	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 -
1. 著者名 Aoki Sinya, Onogi Tetsuya, Yokoyama Shuichi	4. 巻 814
2. 論文標題 What does a quantum black hole look like?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136104 ~ 136104
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physletb.2021.136104	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 -
1. 著者名 Aoki Sinya, Onogi Tetsuya, Yokoyama Shuichi	4. 巻 -
2. 論文標題 Conserved charges in general relativity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Modern Physics A	6. 最初と最後の頁 2150098 ~ 2150098
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1142/S0217751X21500986	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 -
1. 著者名 Aoki Sinya, Onogi Tetsuya, Yokoyama Shuichi	4. 巻 36
2. 論文標題 Charge conservation, entropy current and gravitation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Modern Physics A	6. 最初と最後の頁 2150201
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1142/S0217751X21502018	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 -

1. 著者名 Aoki Sinya、Balog Janos、Yokoyama Shuichi、Yoshida Kentaroh	4. 巻 2
2. 論文標題 Nonrelativistic hybrid geometries with gravitational gauge-fixing terms	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 13169
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.013169	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

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Shuichi Yokoyama
2. 発表標題 Hole or Matter?
3. 学会等名 INTERNATIONAL CONFERENCE ON HOLOGRAPHY, STRING THEORY AND DISCRETE APPROACHES (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横山修一
2. 発表標題 保存チャージ、エントロピーカレント、重力
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shuichi Yokoyama
2. 発表標題 Holographic computation of quantum correction in the bulk
3. 学会等名 It from Qubit school/workshop "Quantum Information and String Theory 2019" (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shuichi Yokoyama
2. 発表標題 Holography via Flow Equation
3. 学会等名 Gauge theories, supergravity and superstrings (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shuichi Yokoyama
2. 発表標題 Holography via Flow Equation
3. 学会等名 INTERNATIONAL CONFERENCE ON HOLOGRAPHY, STRING THEORY AND DISCRETE APPROACHES (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横山修一
2. 発表標題 CFTの励起状態に対応したAdS時空上のエネルギー運動量テンソルの計算
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shuichi Yokoyama
2. 発表標題 Non-relativistic hybrid geometry and gravitational gauge fixing term
3. 学会等名 East Asia Joint Workshop on Fields and Strings 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横山修一
2. 発表標題 青木さんとの流れ
3. 学会等名 場の量子論における非摂動論的手法と素粒子物理学への応用(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横山修一
2. 発表標題 フロー方程式を用いたド・ジッター時空の生成
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横山修一
2. 発表標題 一様等方宇宙における球対称殻状の流体の重力崩壊
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 横山修一
2. 発表標題 混合圧力下における球対称物質殻の重力崩壊に対する解析的模型
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shuichi Yokoyama
2. 発表標題 On the definition of energy and a new conserved quantity in General Relativity
3. 学会等名 Physics and Astronomy World Forum, Webiner (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Study of gauge gravity duality using flow equation https://www.ingentaconnect.com/content/sil/impact/2020/00002020/00000005/art00007#researchmap https://researchmap.jp/shuichitoissho</p>

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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
ハンガリー	Wigner Research Centre for Physics		