

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14281

研究課題名（和文）弦理論・量子重力理論に現れる超光速伝搬の解析

研究課題名（英文）Analysis of the superluminal modes by gravitational quantum effect

研究代表者

泉 圭介 (Izumi, Keisuke)

名古屋大学・素粒子宇宙起源研究所・助教

研究者番号：90554501

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、量子重力理論の理解に向けて、古典因果構造とその量子的対応物であるユニタリ性を調べた。

古典的研究では、静的時空でのみ定義される光球面の概念を動的時空に拡張し、その面積に上限があることを示した。また、拡張された光球面に対してフープ仮説が成立することを、具体例で見た。

量子的研究では、ユニタリ性と繰り込み可能性の関係性についての研究を行った。この関係性については、高階微分理論がその反例になっていることが知られている。本研究では、S行列ユニタリ性という概念を導入し、それと繰り込み可能性が関連するという新たな仮説を立て、高階微分理論でも新たな仮説であれば成り立つことを具体例で示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

古典的研究で扱った光球面は、ブラックホールの影の観測で見ている対象である。それを深く理解することで、重力理論の検証を精密に行うことができるようになった。

一方、ユニタリ性や繰り込み可能性は、量子重力理論を構築する際に克服すべき重要な問題点である。本研究は、その間の関係性を見出し、量子重力理論の理解につながる結果を得た。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this project is to understand the quantum gravity by investigating the classical causality and its quantum object unitarity.

In the classical research, the concept of photon surface, that is defined only in static spacetimes, is extended to generic spacetimes. It has been shown that the area of the extended photon surface has an upper bound, and the hoop conjecture for it is established in some examples.

In the quantum research, the conjecture between unitarity and renormalizability is investigated.

Although theories with higher derivatives are its counter examples, we have introduced a new concept S-matrix unitarity, and posited a new conjecture between S-matrix unitarity and renormalizability.

We have seen our conjecture is established even in theories with higher derivatives.

研究分野：重力理論

キーワード：因果構造 時間発展のユニタリ性 重力理論

1. 研究開始当初の背景

一般相対性理論は、重力の標準模型として確立した理論です。観測や実験で、一般相対性理論と相反する現象は見つかっていません。本研究が始まる前には、重力波が初観測され、重力の動的自由度も一般相対性理論と矛盾がないです。少なくとも 0.01mm から 1Gpc の間のスケールでは、一般相対性理論は現実を正しく記述する理論です。

しかし、その量子化を考えた際、一般相対性理論には問題が生じます。一般相対性理論を素直に量子化すると、繰り込み不可能であり、また、摂動的ユニタリ性がありません。この問題を解決するため、超弦理論に代表されるような量子重力理論が導入されています。しかし、残念ながら、完全な量子重力理論は未だ構築されていません。本研究は、因果構造というキーワードをもとに、量子重力理論を理解することを目指します。

重力理論は、時空の姿、すなわち因果構造を記述する理論です。ブラックホールといった強重力下では、時空が大きくゆがめられ、非自明な時空構造が現れます。量子重力の効果により、強重力下で一般相対性理論が補正されれば、その効果が時空構造を通して、因果律へ現れる可能性があります。実際、曲がった時空上で計算された量子補正を加えると、光の速さより速い伝搬が現れることが知られています。

一方で、量子論において、時間発展の唯一性は S 行列のユニタリ性が保証しています。古典論では因果律が時間発展の唯一性を表しているため、S 行列のユニタリ性は量子的な因果律に関係していると考えられます。上でも述べたように、一般相対性理論を素直に量子化すると摂動的ユニタリ性の破れが見られます。したがって、重力のユニタリ性に関する理解が、量子重力の理解につながると考えられます。

以上のように、因果構造を古典的・量子的に理解することで、重力理論を理解していくことができると期待できます。本研究では、量子重力効果を取り入れて、その効果が理論にどのように影響するかを調べました。また、古典論においては、近年の精密な観測データをもとに一般相対性理論を検証することが重要です。

2. 研究の目的

因果構造・時間発展のユニタリ性というキーワードをもとに、量子重力理論を理解する研究を行いました。

まずは古典的解析に関してですが、強重力下で表れる一般相対性理論の性質について調べました。強重力下の研究では、ブラックホールを考えることが多いですが、ブラックホールそれ自体は、定義から観測不可能な対象です。この意味で、ブラックホールの存在を仮定することは、観測との相性が悪くなります。この研究では、ブラックホールの存在によらない一般相対性理論の性質を調べ、それが作る因果構造を解析することを目指しました。このような、ブラックホールの存在を仮定しない、つまり観測可能量のみで構成された理論の解析を行うことで、仮定から、それが導く理論的結果まで、観測により確かめることができます。

量子的解析については、摂動的ユニタリ性と繰り込み可能性の関係性について研究しました。上で述べたように、摂動的ユニタリ性と繰り込み可能性は、一般相対性理論を素直に量子化した際に現れる問題点であり、量子重力理論構築のキーワードです。摂動的ユニタリ性が成り立つための条件と、繰り込み可能になるための条件が一致するという仮説があります。この仮説は、ワインバーグ・サラム理論や、(両方とも成立しないという意味で) 4-フェルミ理論など、知られている理論では確かに正しいです。一般相対性理論を量子化した重力理論も、共に成立しないという意味で、確かにこの仮説に従います。しかし、高階微分を持つ理論は、この理論の反例になっています。例えば、繰り込み可能である高階曲率重力理論では、高階微分由来の負ノルム状態の存在により、ユニタリ性がないことがわかっています。本研究計画では、高階微分を持つ理論では、なぜこの仮説が成り立たないのかを調べ、仮説を修正してすべての理論に適応可能な仮説を作ることを目標としました。

3. 研究の方法

古典的解析について

観測可能な物理量をもとに、強重力領域の因果構造を調べました。ブラックホールやその地平線は、重力が強いときに現れ、また、因果構造の境界として重要な対象です。しかし、重力が強すぎるがゆえに、その定義から観測不可能な対象です。観測と結びつけるためには、観測可能な物理対象に関して、その性質を調べる必要があります。その候補の一つとして、光球面が考えられます。

静的球対称な重力場を考えたとき、その周りを対象物が回る円軌道が存在します。その対象物の速さが大きいほど、円軌道の半径は小さくなります。ブラックホールなどが作る強重力場を考えると、十分短い半径で円軌道を作る対象物の速さが光の速さでないといけない半径があります。つまり、この領域は、光でさえも円軌道をとるような強重力場が存在することになります。この半径を持つ球面は、光球面とよばれます。超光速が存在すると、因果律の意味で光球面の定

義を拡張する必要が生じます。光球面を解析することにより、超光速伝搬の兆候を捕まえることができると期待できます。

光球面は理論的には、null 方向の測地線をもとに定義された、因果構造の情報を持つ対象物です。また、光でさえ大きく軌道を曲げられる強重力領域である一方、ブラックホールの時空では、地平線の外側に存在する観測可能量です。さらに、2019年に撮影されたブラックホールの影で観測された対象そのものであり、観測的にも重要な対象物です。したがって、光球面は、ブラックホールの地平線外側にある強重力領域であり、因果構造とも関係し、観測的にも重要という、本研究で臨まれる対象です。

しかし、理論的には光球面は静的時空でのみ定義されるものであり、理論的に厳密に議論するためには、定義を拡張する必要があります。本研究では、光球面の概念を一般的な時空に拡張し、それが持つ理論的な性質を調べました。

量子的解析について

散乱振幅のユニタリ性は、時間発展において情報の流出入がないことを保証しています。散乱のS行列がユニタリでないとき、空間の無限遠からの情報の流出入があると考えられ、つまり、それを古典的にとらえると、超光速伝搬が存在することに対応します。時間発展のユニタリ性は閉じた量子系において必要とされる条件であり、それは、空間無限遠で外向き、内向きに超光速伝搬がないことと対応しています。散乱振幅のユニタリ性を調べることで、超光速伝搬と量子補正の関係を調べることができると期待できます。

本研究では、散乱振幅のユニタリ性を理解する目的のため、量子的因果構造に関係する時間発展のユニタリ性について、繰り込み可能性との関係を調べました。この二つを満たすための条件が一致するという仮説がありましたが、高階微分を含む理論において、その仮説が破れていることが知られていました。本研究では、S-行列ユニタリ性という概念を導入し、S-行列ユニタリ性と繰り込み可能性が関係するという仮説を立てました。また、具体的にスカラー場の高階微分模型を用いて、この新たな仮説が正しいことを具体的に確かめました。

4. 研究成果

古典的解析について

動的時空上で、様々な光の軌道を考えることで、光球面を拡張した概念を動的時空に定義しました。具体的には、ある閉じた面が、以下の条件を満たすものとして定義しました。「1) 時間発展により、考えている面の面積が瞬間的には変わらない。2) 面に平行な null 測地線は、時間発展後、その面の内側に必ず入る。3) 面の時間発展を有限時間追ったとき、その面積は増加しない。」という三条件です。静的時空の場合、これらの三条件が光球面とその内側の強重力領域を表すことを示しました。

ここで導入された、拡張された光球面について、現実的な条件下ではその面積が時空全体のエネルギーの関数で抑えられていることを示しました[1]。ブラックホール地平線に関しては、ペンローズ不等式と呼ばれる地平線面積の上限値が知られていますが、本研究の結果は、この結果を拡張された光球面に拡張したものです。拡張された光球面は地平線の外に存在できるため、強重力の性質を観測不可能な地平線ではなく、観測可能な物理量で表す、という本計画の目標が達成されます。

さらに、ブラックホール地平線に関する仮説であるフープ仮説を、拡張された光球面についての仮説に拡張しました。具体的な重力源の配置に対して、この拡張されたフープ仮説が正しいかどうかを確認し、仮説に対して肯定的な結果を得ました[2]。

量子的解析について

高階微分理論において、ユニタリ性と繰り込み可能性の条件が対応しないことが知られています。高階微分を導入することで、場の次元を下げ繰り込み可能にできるのに対して、高階微分項を導入すると、一般に負ノルム状態が現れるため、ユニタリ性がなくなるからです。ユニタリ性は、1) 負ノルムが存在しないこと、と2) 散乱に関するS行列が $SS^\dagger = 1$ を満たすこと、の二条件を指します。本研究では、ユニタリ性と繰り込み可能性の関係の仮説について、1) 負ノルムが存在しないことは関係なく、2) 散乱に関するS行列が $SS^\dagger = 1$ を満たすことが本質であると考えました。そこで、散乱に関するS行列が摂動的に $SS^\dagger = 1$ を満たすことと繰り込み可能性に関して、それらを満たすための条件が一致するという仮説を立てました。

仮説が正しいかを確認するため、スカラー場の高階微分理論模型で具体的に対応を確認しました。繰り込み可能な理論と、繰り込み不可能な理論を考えて、それぞれにおいて、摂動的に $SS^\dagger = 1$ が成立するかを調べました。繰り込み可能な理論においては、散乱振幅に非自明な相殺が起き、結果として $SS^\dagger = 1$ が成立することが確認できました。一方、繰り込み不可能な理論では、同様な相殺が起きましたが、 $SS^\dagger = 1$ が成立するほどの十分な相殺が起きないことを示しました。つまり、この具体例において、本研究で提唱した仮説に対して肯定的な結果を得ました[3]。また、高階曲率を持つ重力の物質散乱についても、同様な解析を行い、肯定的な結果を得ました[4]。

<引用文献>

- [1] Hirotaka Yoshino, Keisuke Izumi, Tetsuya Shiromizu, Yoshimune Tomikawa, PTEP 2020 (2020) no.2, 023E02
- [2] Hirotaka Yoshino, Keisuke Izumi, Tetsuya Shiromizu, Yoshimune Tomikawa, e-Print: 1911.09893 (PTEP accepted)
- [3] Yugo Abe, Takeo Inami, Keisuke Izumi, Tomotaka Kitamura, Toshifumi Noumi PTEP 2019 (2019) no.8, 083B06
- [4] Yugo Abe, Takeo Inami, Keisuke Izumi, Tomotaka Kitamura, PTEP 2018 (2018) no.3, 031E01

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yoshino Hiroataka, Izumi Keisuke, Shiromizu Tetsuya, Tomikawa Yoshimune	4. 巻 2020
2. 論文標題 Transversely trapping surfaces: Dynamical version	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/ptz161	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Abe Yugo, Inami Takeo, Izumi Keisuke, Kitamura Tomotaka, Noumi Toshifumi	4. 巻 2019
2. 論文標題 S-matrix unitarity and renormalizability in higher-derivative theories	5. 発行年 2019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/ptz084	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hiroataka Yoshino, Keisuke Izumi, Tetsuya Shiromizu, Yoshimune Tomikawa	4. 巻 -
2. 論文標題 Formation of dynamically transversely trapping surfaces and the stretched hoop conjecture	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) -	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nozawa Masato, Shiromizu Tetsuya, Izumi Keisuke, Yamada Sumio	4. 巻 35
2. 論文標題 Divergence equations and uniqueness theorem of static black holes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 175009 ~ 175009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/aad206	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 Yoshino Hirota, Izumi Keisuke, Shiromizu Tetsuya, Tomikawa Yoshimune	4. 巻 Volume 2017, Issue 6
2. 論文標題 Extension of photon surfaces and their area: Static and stationary spacetimes	5. 発行年 2017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/ptx072	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 Abe Yugo, Inami Takeo, Izumi Keisuke, Kitamura Tomotaka	4. 巻 Volume 2018, Issue 3
2. 論文標題 Matter scattering in quadratic gravity and unitarity	5. 発行年 2018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/pty010	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14件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 泉 圭介
2. 発表標題 Causal structures in Gauss-Bonnet gravity
3. 学会等名 Miyazaki Workshop on Particle Physics and Cosmology in 2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 泉 圭介
2. 発表標題 Causal structures in Gauss-Bonnet gravity
3. 学会等名 4th Korea-Japan bilateral workshop on String axion cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 泉 圭介
2. 発表標題 Causal structures in Gauss-Bonnet gravity
3. 学会等名 the APCTP workshop of Gravity, Strings and QM Matter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 泉 圭介
2. 発表標題 Invertible eld transformations with derivatives: necessary and sufficient con- ditions
3. 学会等名 3rd Korea-Japan bilateral workshop on String axion cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 泉 圭介
2. 発表標題 Penrose inequality" for photon surface
3. 学会等名 Mini-workshop ¥Black holes and neutron stars imagination and reality" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 泉 圭介
2. 発表標題 S-matrix Unitarity and Renormalizability
3. 学会等名 VAST physics seminar (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 泉 圭介
2. 発表標題 S-matrix Unitarity and Renormalizability
3. 学会等名 “ 1-day Workshop on Quantum Gravity ” (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 泉 圭介
2. 発表標題 Locality and Causality
3. 学会等名 The 2nd Korea-Japan bilateral workshop on String Axion Cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 泉 圭介
2. 発表標題 On uniqueness of static black hole in Einstein-conformal scalar
3. 学会等名 Korea-Japan bilateral workshop on String axion cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 泉 圭介
2. 発表標題 Loosely trapped surface
3. 学会等名 Korea-Japan bilateral workshop on String axion cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 泉 圭介
2. 発表標題 S-matrix unitarity and renormalizability
3. 学会等名 Essential next steps for gravity and cosmology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 泉 圭介
2. 発表標題 S-matrix Unitarity and Renormalizability in Higher Derivative Theories
3. 学会等名 The 28th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan - JGRG28 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 泉 圭介
2. 発表標題 因果構造解析
3. 学会等名 相対論宇宙論 東北研究会 2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Keisuke Izumi
2. 発表標題 Loosely trapped surface
3. 学会等名 Third LeCosPA International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 早田次郎、野海俊文、泉圭介、関口雄一郎、西岡辰磨、山本直希、櫻山和己、多々良源、泉正己、鈴木増雄、谷村省吾	4. 発行年 2017年
2. 出版社 株式会社 サイエンス社	5. 総ページ数 100(14-20)
3. 書名 数理学 2017年8月号 No.650 特集：「相対論的思考法のすすめ」	

〔産業財産権〕

〔その他〕

Keisuke Izumi http://www.math.nagoya-u.ac.jp/~izumi/
--

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
---------------------------	-----------------------	----