

令和 2 年 6 月 23 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14276

研究課題名(和文)重力子の質量の起源と宇宙論

研究課題名(英文)Origin and Cosmology in massive gravity

研究代表者

木村 蘭平(Kimura, Ranpei)

早稲田大学・高等研究所・講師(任期付)

研究者番号：70785310

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)：本研究では新たな重力子の質量項を構築することに成功しました。まずは平坦時空周りのspin-2の粒子の一般的な作用がどのように与えられるかを明らかにしました。その結果、Fierz-Pauli以外の質量項がゴースト不安定性なしで構築できることを明らかにしました。さらに、Stuckelberg場の並進対称性を破ることで、Einstein-Hilbert項がStuckelberg場と非最小結合を持つこと、そして、相殺項が必要となることを明らかにしました。さらにそれに加え、Boulware-Deserゴーストが現れない重力子の質量項が2パターン存在することを示しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでの有質量の重力子は宇宙論背景時空において不安定であることが知られていました。しかし、本研究で不安定性がない有質量重力子が発見されたことで、重力子に質量が存在するかを検証する必要性が出てきました。一般相対性理論による記述では重力子の質量はゼロであるため、このような検証は今後非常に重要になっていくと考えられます。本研究で得られた理論からの予言と観測結果を比べることで、重力子の質量がゼロなのか、もしくはノンゼロなのかという問いに答えられると期待しています。

研究成果の概要(英文)：In this research, we found new mass terms of graviton, which are totally different from well-known ones. We first confirmed that the new mass terms beyond Fierz-Pauli mass term can be allowed in a flat spacetime without ghost instability. Furthermore, by breaking the translation symmetry of the Stuckelberg fields, we revealed that the kinetic term of graviton can have non-minimal coupling with appropriate counter terms, and two types of mass terms can be allowed without introducing Boulware-Deser ghost.

研究分野：宇宙論

キーワード：宇宙論 重力理論 ダークエネルギー

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

1915年にEinsteinによって提唱された一般相対性理論は、実験・観測との整合性から重力の標準理論として広く認識されており、場の理論の観点から質量がゼロの spin-2 の粒子(重力子)で記述されますが、今のところ重力子の質量がゼロであるという保証はありません。なぜなら、現時点で「一般相対性理論が実験・観測と整合」することが「重力子の質量がゼロ」と同値というのは早計で、あくまで重力子の質量がゼロとみなせる領域で実験と一致していると解釈する方が正しいかもしれないからです。従って、重力子の質量が厳密にゼロであるか否かという問いに対して、一般相対性理論のみを検証するだけでは不十分であり、質量を持つ重力子に関する研究は究極の重力理論の探求に必要不可欠です。

Massive gravity に関する理論は1939年にFierzとPauliによる線形理論が発端ですが、様々な問題により、質量を持つ重力子を記述する理論の構築は不可能であると考えられてきました。ところが、理論のカットオフスケールより下の領域でBD ghostを取り除くように相殺項を導入することで、理論的に矛盾のない massive gravity が2010年に発見されました。しかし、この理論では、宇宙論背景時空で摂動不安定性を含むことが知られていました。

2. 研究の目的

dRGT理論は正しい自由度(BD ghostなしの5自由度)を持つ最も単純な理論として知られていますが、重力子を記述するローレンツ不変な唯一の理論かどうかは自明ではありません。例えば、spin-2の場の理論で許される微分相互作用がdRGT理論に埋め込めるかという問いに対しては、6つ目の自由度であるBD ghostが再び現れることが明らかとなっており、如何なる微分相互作用も許されないというno-go theoremが知られています。しかし、BD ghostを取り除くため、重力子のスカラー成分はgalileon(運動方程式に高階微分が現れないscalar-tensor理論)の形になることを常に要請していました。しかしここ数年の研究発展により、高階微分が常に余分な自由度に対応付くのではなく、拘束条件が存在する特定の状況下においては自由度の変更なしに拡張が可能であることが分かりました。このことは、他の種類の場に対しても同様と考えられます。そこで、まずspin-2の場の理論に立ち戻り、一般的な理論を再構築します。更に、重力理論としてのspin-2の場に応用し、他の場との相互作用も含めてどのような理論が許されるのかを系統的に調べることを目的とします。最も一般的な理論を与えることは、重力子の質量が存在するか否かを検証するにあたって非常に重要です。

3. 研究の方法

平坦な時空で2階の対称テンソルを用意し、微分も含めて考えうる全ての組み合わせをそれぞれの次数ごとに書き下し、共役運動量を定義します。このような一般的なラグランジアンの場合、2階の対称テンソルの独立な成分は10個ありますが、正しい自由度の5つまで落とす必要があります。そのために、まず時間-時間成分(ラプス関数)と時間-空間成分(シフト関数)の時間微分が現れないことを要請します。これは、運動項の係数から作られる行列の行列式がゼロ、つまり縮退していることに対応します。これにより、6成分となるので、あと1つの拘束条件(massive gravityでのハミルトニアン拘束条件に対応するもの)で5自由度の理論が作れることとなります。これらの要請から条件式を導出し、これを満たすラグランジアンがどのようなものであるかを系統的に調べます。現在知られているFierz-Pauliの質量項とspin-2のPseudo-linear相互作用はこれらの要請を満たすはずですので、これらの相互作用との対応も明らかにします。次に、同様の手法を用いて、曲がった時空、及び重力子に拡張します。重力子の場合には得られたラグランジアンがdRGT理論を含むか確認し、詳細なハミルトニアン解析を行う予定です。また、重力子のそれぞれの成分を分解し、非結合極限を取ることで、理論のカットオフスケールを評価します。もし、BD ghostが現れるような結果であれば、同時にghostが現れるエネルギースケールも評価し、理論的な整合性に関する議論を行う予定です。

4. 研究成果

平坦な時空における最も一般的なスピン2の理論の構築を行いました。これまでに知られていたFierz-Pauliの理論以外にも有質量のスピン2の理論が存在することを証明し、さらに、質量を持たないような新しいスピン2の理論の構築にも成功しました。これらの一部は、場の再定義で既存の理論と結びついていることを明らかにしました。さらに、Stuckelberg場の並進対称性を破れの過程のもと、新たなmassive gravityの構築に成功しました。並進対称性が破れることで、Einstein-Hilbert項がStuckelberg場と非最小結合を持つこと、そして、相殺項が必要となることを明らかにしました。さらにそれに加え、Boulware-Deserゴーストが現れない重

光子の質量項が2パターン存在することを示しました。一つ目の質量項は、これまで知られていた de Rham-Gabadadze-Tolley massive gravity の拡張である新たな質量項であり、二つ目は、これまで知られていた質量項とは全く異なるものであることが明らかとなりました。オリジナルの de Rham-Gabadadze-Tolley massive gravity では宇宙論背景時空では strong coupling となっていることが知られていましたが、これらの新たな質量項ではそのような問題や不安定性も現れないことも示しました。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Naruko Atsushi, Kimura Rampei, Yamauchi Daisuke	4. 巻 99
2. 論文標題 On Lorentz-invariant spin-2 theories	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 84018
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.99.084018	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 Kimura Rampei, Sakakihara Yuki, Yamaguchi Masahide	4. 巻 98
2. 論文標題 Ghost-free scalar-fermion interactions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 44043
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.98.044043	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 Kase Ryotaro, Kimura Rampei, Naruko Atsushi, Yoshida Daisuke	4. 巻 783
2. 論文標題 Stable cosmological solutions in degenerate theory of gravity	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 320 ~ 325
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physletb.2018.07.009	査読の有無 無
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 Kimura Rampei, Sakakihara Yuki, Yamaguchi Masahide	4. 巻 96
2. 論文標題 Ghost free systems with coexisting bosons and fermions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 44015
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.96.044015	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11件(うち招待講演 3件/うち国際学会 7件)

1. 発表者名 木村蘭平
2. 発表標題 Beyond Fierz-Pauli theory
3. 学会等名 COSMO2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木村蘭平
2. 発表標題 Beyond Fierz-Pauli theory
3. 学会等名 The first NRF-JSPS workshop in particle physics, cosmology, and gravitation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木村蘭平
2. 発表標題 Are redshift-space distortions actually a probe of growth of structure?
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 木村蘭平
2. 発表標題 New aspects of massive gravity
3. 学会等名 FAPESP&JSPS workshop : Dark energy, Dark Matter and Galaxies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村蘭平、成子篤、山内大介
2. 発表標題 On Lorentz-invariant spin-2 theories
3. 学会等名 物理学会春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Rampei Kimura
2. 発表標題 Ghost-free systems with coexisting boson and fermion
3. 学会等名 The origin and evolution of the universe (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 木村蘭平
2. 発表標題 Degenerate fermionic field theory
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Rampei Kimura
2. 発表標題 Are redshift-space distortions actually a probe of growth of structure?
3. 学会等名 JGRG 27 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Rampei Kimura
2. 発表標題 Are redshift-space distortions actually a probe of growth of structure?
3. 学会等名 CosPA (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Rampei Kimura
2. 発表標題 What can we probe with redshift space distortions?
3. 学会等名 重力・宇宙論研究会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木村蘭平
2. 発表標題 赤方偏移歪みで宇宙の大規模構造の成長率を本当に測ることができるのか？
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018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
---------	---------------------------	-----------------------	----