

令和元年6月11日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2013～2018

課題番号：25287054

研究課題名（和文）Massive gravityとその宇宙論への応用

研究課題名（英文）Massive gravity and its application to cosmology

研究代表者

山口 昌英（Yamaguchi, Masahide）

東京工業大学・理学院・教授

研究者番号：80383511

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,000,000円

研究成果の概要（和文）：Massive gravity理論が安定な理論として存在するためには、helicity 0モードが高階微分を一般には伴うにもかかわらずゴースト不安定性を生じない必要があります。この性質を調べるために、まず、点粒子を扱う解析力学の場合において、高階微分項があってもゴースト不安定性を生じない条件を明らかにしました。また、Massive gravityの場合に、一般のreference metricでもhelicity 0モードの運動方程式が二階までに留まりゴースト不安定性が出ないことを示しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般相対性理論においてはゼロである重力子の質量がゼロでない理論とはどのようなものであるか、また、このような理論が宇宙のエネルギーの大部分を占めている暗黒エネルギーを説明できるかという問いは、我々の宇宙を記述している理論がどのようなものであるかという根源的な問いに答えようとするものです。このような問いに答えようとするのは学術的意義のみならず、人々の知的好奇心を満たすものでもあり社会的意義も十分にあると思います。

研究成果の概要（英文）：In massive gravity, the absence of a ghost in a helicity 0 mode is necessary for the stability of the theory. In order to clarify this feature, as a first step, we began with a point particle theory and obtained the generic condition for the absence of a ghost associated with higher derivative terms. We also showed that the equation of motion for a helicity 0 mode in a massive gravity with a general reference metric remains second order and hence that it does not lead to the ghost instability.

研究分野：宇宙物理

キーワード：重力理論

1. 研究開始当初の背景

Einstein により定式化された一般相対論(GR)は、場の理論的な捉え方では、質量のないスピン2の粒子 (graviton) による相互作用理論です。これを拡張しようというアイデアは、GR 誕生直後から理論的な動機により考えられて来ましたが、近年の宇宙の加速膨張の発見により観測的にも GR の拡張を考える動機が出て参りました。つまり、現在の宇宙のホライズンスケールでは GR は変更を受けるのではないかと、いうものです。GR の場の理論的な解釈の拡張として、graviton が質量をもつ理論(Massive Gravity)はどのようなものになるのだろうか、という疑問は極めて自然なものです。もし、graviton の質量が現在のハッブルスケールぐらいならば、そのスケールで重力の伝播が弱まり、宇宙項を新たに導入せずに宇宙が加速膨張するように見えることとなります。そのような拡張は、Fierz と Pauli により 1939 年に初めて考えられ、Minkowski 時空からの揺らぎとして graviton を導入し、ghost が出ない形の質量項を加えました。しかしながら、このような理論で質量をゼロにする極限を取っても GR の予言と一致せず、太陽系近傍の観測と矛盾することが指摘されました(vDVZ discontinuity, 1970)。これは、Massive gravity では graviton の自由度は5個あり、質量をゼロにする極限では、二自由度は GR での massless graviton を表し、もう二自由度は massless vector、最後の二自由度が massless scalar に対応しますが、graviton だけでなく scalar も物質と相互作用をしてしまうからです。ところが実は、linear theory を超えて non-linear 効果も取り入れると、Vainstein 半径以下では scalar mode との相互作用が抑制され GR が回復することが示されました(Vainstein 1972)。しかしながら、今度は、このような non-linear 項を取り入れると自由度が6になり、余分な自由度が ghost (BD ghost)になってしまうことが指摘されました(Boulware & Deser 1972)。このようにして、多くの人々による長い間の努力にも関わらず、矛盾のない Massive gravity 理論を構築することは成功してきませんでした。ところが、近年の Effective field theory の発展(Arkani-Hamed et al. 2003)に触発され、漸く、理論的に矛盾のない Massive gravity 理論の候補が出てきました(de Rham & Gabadadze 2010, de Rham et al. 2011)。この際に鍵となった考え方は2つあり、実は相互に密接に関係していることが分かりました。一つ目は、(有効理論としての)カットオフスケールが適切な大きさになるためには、scalar の自己相互作用(及び vector が linear になる vector-scalar 相互作用)が全て禁止されること。二つ目は、BD ghost が少なくともカットオフスケールより下には現れないことです。

2. 研究の目的

近年、漸く理論的に矛盾のない定式化が出来つつある Massive gravity 理論について、さらなる理論的な基礎付けを与えること。特に、なぜ提唱された Massive gravity 理論においては、ゴースト不安定性が現れないのか、その理由と背後の物理を明らかにすること。また、一般相対論(GR)でのブラックホール解が Massive gravity でも同様に存在するか、存在するときにはその性質がどのように変更されるか、特に Quasi-normal mode(QNM)を調べることにより、ブラックホールからの重力波がどのように放出されるかを解析し、重力波干渉実験での検出可能性がどのように変更されるかを明らかにすること。そして、Massive gravity におけるこれらの予言と GR での予言を比較することにより、graviton の質量に制限を与えると共に、多くの Massive gravity 理論を観測的に取捨選択することを目的とします。

3. 研究の方法

reference metric が一般の場合において、scalar(scalar-tensor の mixing を分離した後の)相互作用項がどのようなものになるかを調べます。この目的のために、de Rham & Heisenberg は、reference metric が Minkowski 時空の場合において、mixing を分離する前の scalar-tensor 相互作用項の形から類推することで、decoupling limit (カットオフスケールで一番効く項だけを取り出す)では、scalar とリッチスカラーやアインシュタインテンソルとの結合が部分的に現れることを示しました。この手法を reference metric が一般の場合に、まず、decoupling limit で拡張し、Generalized Galileon のどの項に対応するものが存在するかを調べます。最終的には、decoupling limit の制限を除いた一般の場合に全ての相互作用項を同定し、これが予想通り Generalized Galileon に現れる項と完全に一致しているか、もし違ふならどこが異なっているかを明らかにします。また、高階微分を伴う理論では、一般には高階微分に伴うゴースト不安定性を伴います。どのような条件が満たされているときに、このゴースト不安定性を避けることが出来るかを、まず解析力学の場合から調べ明らかにします。さらに、加速膨張を行う“安定な”宇宙論解を探します。Stuckelberg 場に一樣等方性を課さない場合には、揺らぎの解析がそこまでは進んでおりません。これは、stuckelberg 場が対称性を持たないために計算が複雑になるからですが、基本的には同様の手法で解析を行うことが出来ます。

4. 研究成果

Massive gravity 理論において、reference metric が flat metric の場合に Boulware-Deser ゴーストが現れない理由は、helicity 0 モードの自己相互作用が Galileon 項と呼ばれる高階微分項を含むにも関わらず運動方程式が二階微分までになる項の形で書けることから理解できます。一方、一般の reference metric の場合には、この Galileon 項が Generalized Galileon 理論という、運動方程式が二階になる最も一般的なスカラー・テンソル理論になると期待されています。この理論の性質をより詳細に調べるため、一様等方時空とその揺らぎに対する接続条件を明らかにしました。また、スカラー場が複数個ある場合の Generalized Galileon 理論を考察し、その理論から導かれる原始密度及び原始テンソル揺らぎの性質を明らかにしました。また、Generalized Galileon 理論を単純に複数スカラー場に拡張しただけでは、単数スカラー場の場合と異なり、運動方程式が二階になる最も一般的な(複数)スカラー・テンソル理論にはなっていないことを示しました。

Massive gravity 理論においては、質量を導入するために reference metric を導入する必要がありますが、その存在は一見すると一般座標変換不変性を破るよう見えます。しかしながら、Stuckelberg 場を導入することによりこの不変性を回復させることが出来ます。massive graviton の内、helicity 1 モードと helicity 0 モードはこの Stuckelberg 場の自由度に対応しますが、一般座標変換不変性を回復させるという条件より、helicity 0 モードは必ず二階の微分項を伴って現れます。このような高階微分項は一般には helicity 0 モードにもう一つの自由度、しかも ghost (BD ghost) である自由度を出すことが知られています。reference metric が flat metric の場合には、その相互作用項が Galileon 項と呼ばれる特殊な組み合わせになるために、運動方程式が二階に留まり余分な自由度(ghost)が現れません。この議論を一般の reference metric へ拡張することを行いました。まず、一般の reference metric の場合に helicity 分解を covariant に行いました。また、従来の flat reference metric に対する decoupling limit を拡張し、この limit での helicity 0 モードの相互作用項を明らかにしました。helicity 0 モードに対する運動方程式を求めた所、この場合も二階までの微分方程式に留まる事が分かり、BD ghost が Massive gravity 理論において現れないことへの理解が深まりました。

修正重力理論の一種である massive gravity や bigravity を研究する際に重要なことの一つは、現在までのところ観測と理論予言がよくあっている一般相対論との違いを見つけ、どちらの理論がより観測結果を今後も説明することが出来るかを調べることです。そこで、massive gravity 及び bigravity における球対称解の摂動について調べました。特に背景解として、ある条件を満たすパラメータのクラスに対するものを考え、運動方程式が宇宙定数入りのアインシュタイン方程式と一致するものを考えました。このような背景解は、一般相対論における、一様等方宇宙解や Schwarzschild-De Sitter 解のようなブラックホール解を含みます。このようなクラスの背景解の周りの摂動を調べた所、一次摂動及び二次摂動とも、一般相対論における摂動方程式と完全に一致することが分かりました。この事実は、これらの背景解の安定性が、一般相対論における背景解の安定性と少なくとも摂動の二次までについて同じであることを意味し、これらの摂動解が、massive gravity や bigravity で見つかっている他の多くのクラスの球対称解で見られる不安定性を伴わないことが分かりました。

Massive gravity 理論においては、helicity 0 モードは必ず二階の微分項を伴って現れます。このような高階微分項は一般には helicity 0 モードにもう一つの自由度、つまり Ostrogradsky ghost を出すことが知られていますが、Massive gravity においては、その相互作用項が Galileon 項と呼ばれる特殊な組み合わせになるために、運動方程式が二階に留まり ghost が現れません。それでは、より一般に、どのような場合に高階微分が存在するにも関わらず ghost が現れないのか、という疑問が生じます。これは Massive gravity 理論の拡張にも関係する問題です。まず、点粒子を扱う解析力学の場合において、一階微分のみを持つ系と二階微分まで持つ系が混在する場合において、Ostrogradsky ghost が存在しない条件をかなり一般的に求めました。二階微分まで持つ粒子が一つの場合には、運動項を表す行列が(一階微分から成る系の運動項は非縮退であると仮定して)縮退していることが、Ostrogradsky ghost が出ないための必要十分であることが分かりました。一方、二階微分まで持つ粒子が複数の場合には、さらなる条件を課す必要があることが分かり、一つの十分条件を与えました。さらに、これらの条件が満たされている場合には、運動方程式を二階の微分方程式まで落とせることを示しました。また、三階微分まで持つ系において、Ostrogradsky ghost が存在しない条件を調べました。二階微分までを持つ系においては、ハミルトニアンに現れる運動量の線形依存性を取り除くことが ghost 不安定性を生じない必要十分条件でしたが、三階微分を含む系においては、これは必要条件に過ぎないことが分かりました。ハミルトニアンに現れる運動量の線形依存性を取り除いた後でさえも、元の変数の二階微分に相当する正準変数がハミルトニアンに線形に現れ、これを除かない限り、ghost 不安定性を取り除いたことにならないことを示しました。また、全

での ghost 不安定性を取り除く条件を求め、また、これらの条件が満たされている場合には、運動方程式を二階の微分方程式まで落とせることを示しました。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

Tsutomu Kobayashi, Norihiro Tanahashi, Masahide Yamaguchi, Multi-field G-inflation, Physical Review D 88, 083504 (2013) 1-10, 10.1103/PhysRevD.88.083504

Sakine Nishi, Tsutomu Kobayashi, Norihiro Tanahashi, Masahide Yamaguchi, Cosmological matching conditions and galilean genesis in Horndeski's theory, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 1403, 008 (2014) 0-20, 10.1088/1475-7516/2014/03/008

Xian Gao, Tsutomu Kobayashi, Masahide Yamaguchi, Daisuke Yoshida, Covariant Stuckelberg analysis of de Rham-Gabadadze-Tolley massive gravity with a general fiducial Metric, Physical Review D 90, 124073 (2014) 1-14, 10.1103/PhysRevD.90.124073

Hayato Motohashi, Karim Noui, Teruaki Suyama, Masahide Yamaguchi, David Langlois, Healthy degenerate theories with higher derivatives, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 1607, 033 (2016) 0-27, 10.1088/1475-7516/2016/07/033

Hayato Motohashi, Teruaki Suyama, Masahide Yamaguchi, Ghost-Free Theory with Third-Order Time Derivatives, Journal of the Physical Society of Japan 87, 063401 (2018) 1-5, 10.7566/JPSJ.87.063401

〔学会発表〕(計 2 件)

Masahide Yamaguchi, Xian Gao, Tsutomu Kobayashi, Daisuke Yoshida, Perturbations of Cosmological and Black Hole Solutions in Massive gravity and Bi-gravity, Exploring Theories of Modified Gravity(招待講演 国際学会), 2015 年 10 月 12 日, The Kavli Institute for Cosmological Physics (KICP) at the University of Chicago

Masahide Yamaguchi, Hayato Motohashi, Karim Noui, Teruaki Suyama, David Langlois, Healthy degenerate theories with higher derivatives, International Workshop for String theory and Cosmology 2016(招待講演 国際学会), 2016 年 08 月 18 日, Hanyang University

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。