

平成 31 年 4 月 25 日

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人 日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 平成29年度

受付番号 354

氏 名 吉田大介

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。

なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地（派遣先国名）用務地： モントリオール （国名： カナダ ）

2. 研究課題名（和文）※研究課題名は申請時のものと変わらないように記載すること。

新しい重力理論の構築とその検証

3. 派遣期間：平成 29 年 4 月 9 日 ～ 平成 31 年 3 月 31 日

4. 受入機関名及び部局名

Department of physics, McGill University

(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)

(注)「6. 研究発表」以降については様式 10-別紙 1~4 に記入の上、併せて提出すること。

計画していた研究の目的は、超高エネルギー領域における重力理論を構成すると期待される、重力場の高次の微分相互作用の詳細をゴースト不安定性の観点から特定する、というものでした。ゴースト不安定性回避以外にも、超重力理論との整合性、特異点回避との整合性などの有用な制限も活用し、超高エネルギー領域の重力理論に迫りました。この目的に向け、海外特別研究員として派遣中、私は以下の 10 件の研究行い、7 本の論文を執筆し、学会・セミナー等で 6 件の研究発表を行いました。

(研究 1) 曲率制限理論の宇宙論的安定性の研究

一般相対論では、理論がそこを超えて適応できないような点である、時空特異点が容易に生じてしまいます。多くの場合、時空特異点の近くでは時空の曲率が無限大に発散し、そのため、重力の量子効果等、我々の知らない重力理論の効果が主要となると期待されています。一般相対論における特異点は、このような未知の重力理論の効果が考慮されていないために生じている見かけ上のものであると解釈されています。この「量子重力理論が特異点を解消すべきだ」という期待を利用し、特異点が解消されることを条件に、逆に、未知の超高エネルギー領域における重力理論の詳細に迫ろうという手法が注目されています。

特異点が生じない傾向にある重力理論として、重力場の高次の微分相互作用を利用した「曲率制限理論」と呼ばれる理論が知られていました。しかしながら、多くの場合、高次の微分相互作用はオストログラドスキーのゴースト不安定性を生じてしまい、現実を記述する理論としては不適合となってしまいます。私は一様等方時空解の摂動的安定性を解析し、これまでに知られていた曲率制限理論の一様等方時空はゴースト不安定性を持つことを明らかにしました。さらに、私は新しい種類の曲率制限理論を提唱し、この理論で一様等方時空にゴースト不安定性やその他の不安定性が、宇宙の歴史の大半の部分で起こらないことを明らかにしました。この研究成果により、少なくとも一様等方時空において初期特異点が回避され、摂動的に安定であるようなモデルの一例を構築できたことになり、これは、すべての特異点を回避しうる究極の量子重力理論の効果を有効的に記述した理論の候補とみなせ、重要です。この研究の問題点としては、不安定性を回避するために重度のパラメーターチューニングが必要であり、依然、この理論は自然な理論とは見なせないのが現状です。また、一様等方時空でないような、ブラックホール等のような時空でも、特異点回避・安定性の問題を解決しているかは極めて非自明です。後者については、下記の研究 2 において取り組みました。この研究成果は論文誌 *Physical Review D* 掲載されています。また、McGill 大学の宇宙論グループセミナーにおいて研究発表を行いました。

(研究 2) ブラックホール特異点回避に向けた曲率制限理論の研究

以上のように、超高エネルギー領域の効果を反映した重力理論として、曲率制限理論の宇宙論への応用は安定性の問題を解決できました。本研究では、一般相対論におけるもう一つの典型的な特異点である、ブラックホール特異点の回避を曲率制限理論の観点から議論しました。まず初めに明らかになったことは、「高階微分相互作用を曲率の 2 次の項までに制限した場合、一様等方時空が安定であるような曲率制限理論ではブラックホール特異点は回避されない」という結果です。この結果は、ブラックホール特異点回避が困難であること示唆しています。そこで、本研究では、「安定性・不安定にかかわらずそもそもブラックホール特異点を曲率制限理論で回避できるのか？」という問題に取り掛かりました。

解析の結果、曲率制限理論の効果において、曲率の発散はコントロールできるものの、高次の微分相互作用に起因する新しい自由度の特異なふるまいから、結局特異点が生じてしまうことを示すものでした。この研究成果から、特異点を回避するためには、曲率を制限するだけでは不十分であり、新しく生じる自由度もうまくコントロールする必要があること、もしくは、極力新しい自由度生じさせないような理論を扱う必要があることを明らかにしました。この視点は現在執筆中の研究 3 につながります。この研究内容は論文誌 *JCAP (Journal of Cosmology and Astroparticle Physics)* に掲載されています。

(研究 3) 曲率制限理論の安定化の研究

これまで扱ってきた曲率制限理論は、重力場の高次の微分相互作用によるものでしたが、前述のように、高次の微分に起因する自由度により、困難が生じています。これとは独立に、非自明な作用をもつスカラー場によって、一様等方時空の曲率をコントロールする理論 (mimetic gravity) も近年注目されています。しかしながら、この理論はゴースト不安定性を持つ

ことが知られており、現実を記述する理論としては不適合です。

私は、この理論の曲率をコントロールするという性質を保ったまま、理論を最小限変更することにより、ゴースト不安定性を回避できることを発見しました。さらに、変更後の理論がスカラーテンソル理論のある特殊なクラスと等価になることを示しました。この研究成果により、余分な自由度の出現を極力抑え、安定性の問題を解決した、とても性質の良い曲率制限理論が構築できたことになり、今後の応用の基盤を与えました。この研究内容は現在論文を執筆・校正作業中です。

(研究 4) 新しい曲率制限理論におけるバウンス宇宙の研究

上述のように、安定化した曲率制限理論はスカラーテンソル理論のあるクラスと等価でしたが、この理論では宇宙の初期特異点を回避したバウンス宇宙解が知られており、その解の摂動的安定性も解析されていました。しかしながら、バウンス宇宙における摂動はバウンス点において整合的でなくなることが、ホルンデスキー理論と呼ばれる別のスカラーテンソル理論のクラスで指摘されています。曲率制限理論においても、摂動は一見するとバウンス点で整合的に定義されていないように見え、安定性の解析結果が物理的に意味のあるものであるかどうか、問題となっていました。

私は、バウンス点において摂動が整合的に定義されているかどうか、摂動のゲージ固定条件に依存することを明らかにしました。言い換えると、バウンス点におけるゲージ変換が日整合的となりえることを明らかにしました。この解析により、先行研究で扱われていたゲージ条件は問題のないこと、したがって、このバウンス解が安定であることが明らかになりました。この研究の主要な解析はすでに完了しており、論文の執筆をこれから行っていきます。

(研究 5) インフレーション宇宙における特異点の判別法に関する研究

研究 1 では特異点を回避できると期待している曲率制限理論においてインフレーション宇宙解を構築しました。しかしながら、そもそもインフレーション宇宙に特異点があるかどうかはこれまで明確になっていませんでした。時空特異点は、「時空の測地線が完備でなく、かつ時空が拡張不可能である」という条件で定義されています。これまで、インフレーション宇宙に完備でない測地線があることは指摘されてきたものの、時空の拡張可能性について議論した研究はありませんでした。

私は、空間曲率のない平坦なインフレーション宇宙の拡張可能性を、宇宙の膨張率を記述するハッブル定数や宇宙のスケール因子から判別する方法を明らかにしました。この判別法を用いて、現在インフレーションモデルとして有力なスタロビンスキーモデルが実は初期特異点を持つことを明らかにしました。この結果は、スタロビンスキーモデルが現実を記述しているとしても、宇宙の最初期には、別の相になっている必要を指摘するもので、非常に興味深いものです。一方で、研究 1 で構築したゴースト不安定性を避けたインフレーション解にはこのような特異点が生じないことも明らかにし、これにより、曲率制限理論が従来の目的の通り初期宇宙における特異点を回避していることを確かめました。この研究は、インフレーション宇宙における特異点の判別法を初めて明らかにしたもので、極めて重要な結果がえられました。

この研究内容は、論文誌 *Classical and Quantum Gravity* に掲載されました。また、下記の研究 6 の内容とともに、McGill 大学の高エネルギー物理グループ、神戸大学の研究室セミナー、第 3 回若手による重力宇宙論研究会 で研究発表を行いました。

(研究 6) コンパクト化されたインフレーション宇宙における特異点の研究

研究 4 のように、インフレーション的な宇宙における特異点の有無はこれまであまり注目されておらず、わかっていないことが多くあります。私は、インフレーション的な宇宙が、周期的にコンパクト化された、トーラス型の宇宙において、初期特異点が必ず生じてしまうことを明らかにしました。この特異点は、曲率の発散が全くない種類の特異点で、これまでの、現実的でないような複雑な時空で知られていました。このような特異点を一般的に制限する機構は未だに考えられていません。この研究により、この種の特異点が現実的なインフレーション宇宙で起きることが明らかになり、曲率の発散しない特異点の回避の重要性が再認識されました。

この研究内容はプレプリントサーバーである arXiv で公開されており、現在論文誌 *Classical and Quantum Gravity* に投稿中です。

(研究 7) 新しいベクトルテンソル相互作用の宇宙論的安定性に関する研究

上記の曲率制限理論、特異点回避の研究とは独立に、重力場とベクトル場の高次の微分相互作用の研究も行いました。上述のように、高次の微分相互作用は多くの場合新しい自由度を生じ、その自由度がゴースト不安定性を引き起こし、系を不安定にしまいます。私は過去の研究で、このような新しい自由度の生じないような重力場とベクトル場の高次の微分相互作用を

提唱しています。しかし、新しい自由度が出ないとしても、他の自由度が不安定性を引き起こさない保証はありません。

私は、この理論で具体的に一様等方時空の解を構築し、その摂動の解析を行いました。さらに、摂動のふるまいから、この理論にゴースト不安定性・勾配不安定性が生じないことを明らかにしました。この解析によって、新しいベクトルテンソル相互作用が安定性の観点から許されることが明確になりました。この研究成果は Physics Letter B に掲載されています。

(研究 8) 一般共変性を破った新しいスカラーテンソル理論の研究

高次の微分相互作用によるゴースト自由度が、特定の仮定の下では現れなくなるケースが、スカラーテンソル理論の文脈で知られています。これまでは、ゴーストを含むスカラーテンソル理論のあるクラスにおいて、スカラー場で時間を計るという条件の下ではゴースト自由度が生じないことが知られていました。結果として得られる理論は一般共変性を失った空間的共変重力理論と呼ばれる理論として盛んに研究されています。

私は、この種の解析を拡張し、スカラー場で空間座標を測るという状況下で、より広いクラスのスカラーテンソル理論のゴースト自由度が消えることを、拘束系の清純解析を用いて明らかにしました。結果として得られる理論は、空間的共変重力理論に補助場が入った理論となり、これまでに知られていた理論との関係も明確となりました。この研究成果は論文誌 JCAP に掲載されました。

(研究 9) 超重力理論に基づく新しいインフレーションモデルの構築

超高エネルギーにおける重力を記述する理論として、超弦理論が現在の有力候補と言えます。超弦理論はエネルギーが低いところでは超重力理論で記述されるため、初期宇宙モデルが超重力理論と整合的かどうかを調べることは、重要になります。現在数々のインフレーションモデルが宇宙マイクロ波背景放射の観測によって制限されています。典型的な観測量として、スペクトル指数とテンソルスカラー比がありますが、観測と整合的なスペクトル指数とテンソルスカラー比を预言する包括的な機構として、ポールインフレーションと呼ばれる機構があります。

私は、超重力理論の枠組みでポールインフレーションの機構が実現する条件を明らかにし、これまでに知られていない観測と整合的な新しいポテンシャルを構築しました。

この研究成果は論文誌 JCAP に掲載されたほか、McGill 大学の高エネルギー物理学グループで研究発表を行いました。

(研究 10) 非摂動的なゴースト不安定性に関する研究

高次の微分相互作用は多くの場合、オストログラドスキーの定理によるゴースト不安定性が現れると信じられています。オストログラドスキーの不安定性は、系のハミルトニアンが下に有界でないことによって特徴づけられます。一方で、重力理論のように時間の再定義に対するゲージ対称性を持った理論においては、ハミルトニアンの定義に不定性があり、オストログラドスキーの定理をどのように適応すればよいかが明確ではありませんでした。

私は、重力理論のもつ時間のゲージ対称性を固定するためのゲージ固定条件が満たさなければいけない全条件を明らかにしました。特に、ゲージ固定条件が時間を陽に含まなければならないことがわかりました。この事実から、ゲージを固定後のハミルトニアンが、時間変数を固定しているゲージ固定条件の共役運動量として定義できることを導きました。ゲージ固定後のハミルトニアンを用いて一般相対論のハミルトニアンが下に有界でないことが明らかにしました。したがって、オストログラドスキーの意味では一般相対論は不安定となってしまうことがわかりました。しかしながら、このような不安定性は実際の運動では起こらないこと、すなわち、力学的には安定であることも明らかになりました。この事実は、ハミルトニアンが有界かどうかは力学系としての安定性とは直接対応しないことを表しており、物理的に有用な高次の微分相互作用を探る上で重要な一歩となりました。また、同様の解析を $f(R)$ 重力理論に適用し、オストログラドスキーの意味では不安定である者の、力学的には安定であることを確認しました。この成果は現在論文を執筆中です。