

令和元年6月24日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26287044

研究課題名(和文) 宇宙論の高次摂動論の理論的基礎の構築

研究課題名(英文) Theoretical foundation of higher order cosmological perturbation

研究代表者

田中 貴浩 (Tanaka, Takahiro)

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：40281117

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,900,000円

研究成果の概要(和文)：超ホライズンスケールにおける曲率ゆらぎの保存には空間のスケール変換に対する不変性が重要な役割を果たす。ループ補正を受けた有効作用も、この不変性を保つことを証明した。曲率ゆらぎの保存の他にも整合性関係などの普遍的性質がある。これらは、広義のゲージ変換に関係するとされるが、我々はさらに局所性条件が必要であることを示した。また、観測可能な物理量が赤外発散しない条件が、同じ局所性条件であると示した。一方、大学院生の徳田順生君と共同で、ドジッター背景時空上でのスカラー場の長波長モードに対する有効運動方程式を導出するための系統的な方法を定式化し、この運動が古典的な確率過程と解釈できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

インフレーション宇宙論は宇宙の初期条件に関わる諸問題の多くを解決することに成功した。しかし、インフレーション宇宙論の成功は、それ以前の宇宙を探索することを難しくしている。我々の研究は、その状況を打破する突破口を見出すべく、インフレーション宇宙論の基礎付けの脆弱な部分にメスを入れ、ほころびが生じないかを確かめる試みである。結果としては、これまでの理論予想の正しさを補強する、より強固な理論的枠組みを与えることに貢献したことになる。

研究成果の概要(英文)：The invariance under spacial scale transformation plays an important role in the conservation of curvature perturbation on super horizon scales. The effective action that received the loop correction is also proved to maintain this invariance. Besides the conservation of curvature perturbation, there are also universal properties such as consistency relations. Although these are often claimed to be related to the large gauge transformation, we show that locality conditions are further needed. It was also shown that the conditions for the observable physical quantities not to have infrared divergences are the same locality conditions. On the other hand, in collaboration with a graduate student, Mr. Junsei Tokuda, we formulated a systematic method to derive an effective equation of motion for long wavelength modes of a scalar field on a De Sitter background spacetime, and we showed that the dynamics governed by this equation can be interpreted as a classical stochastic process.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：宇宙物理学 インフレーション 曲がった時空の場の理論 赤外発散

1. 研究開始当初の背景

宇宙初期に起こった加速的膨張であるインフレーションの時期に、構造形成の種となったゆらぎは生成された。このゆらぎの生成過程においてループ(高次量子)補正を考慮すると赤外発散が生じるという原理的な問題がある。この問題は長い歴史をもつが、ループ補正を無視する近似の範囲で、とりあえず計算して答えが出せる、軽視されがちである。しかしながら、インフレーション宇宙のアイデアが生みだされた時代を考えると、類似の状況があったように思われる。一般的に、一様性問題や平坦性問題はビッグバン宇宙論のほころびとして指摘され、インフレーション宇宙という考え方に向かうきっかけとなったとされている。しかし、その当時、宇宙の初期条件が何らかの機構で宇宙が生まれたと同時に、一様性問題や平坦性問題を解決するように適当に選ばれていただけのことであろうと考えていた研究者は少なくなかったと想像する。**赤外発散の問題は、まさにこのような次なる飛躍へのヒントを与えてくれるものである。**

2. 研究の目的

これまでも、ループ補正が永年的に増大し、**宇宙項の遮蔽や結合定数の永年の変化**といった劇的なモデルの変形を引き起こすという主張が繰り返されてきた。これらの主張の論理的弱点を見出すことはできるが、宇宙項の遮蔽や結合定数の永年の変化といった劇的な現象が起こる可能性を明白に否定することもできていない。これらの効果が現実に存在するならば宇宙論のシナリオを大きく書きかえる重大な発見である。したがって、**これらの効果の有無を明らかにすることが本研究の目的である。**

我々のこれまでの研究との関連と独創性

近年、連携研究者の浦川優子氏と共同でいくつかの新しい知見を得ることに成功した。まず、この赤外発散の問題はインフレーション中に場の空間の中で背景場が時間発展する方向のゆらぎともいえる断熱的ゆらぎが原因になる場合と、それ以外の場の成分に起因する等曲率的ゆらぎが原因になる場合で大きくその性質が異なるということを指摘した。断熱的なゆらぎに関しては、我々の観測にかからない遠方の情報がゲージを固定する(=座標条件を固定する)条件に影響を与えることが、赤外発散の主たる原因であることを突き止めた。すなわち、我々が観測可能な領域に考える領域を限定すると、通常宇宙論的摂動論で用いられるゲージ固定条件が完全なゲージ固定にならないことが赤外発散の主たる原因であるという主張である。さらに詳しい解析を進めた結果、意外なことに赤外発散が現れないための条件として、初期の量子状態の選び方に対する条件が課せられるということを見出した。これは、通常宇宙論的摂動論の理論体系が一様等方背景時空の存在を仮定しているが、実際には宇宙の大きな領域を見た際にこの仮定がよい摂動の出発でないことに起因しているように思われる。さらに、通常宇宙論的摂動計算においておこなわれている ie 処方で決まる状態の選び方は、これらの赤外発散が現れないための非自明な条件を満たすことを明らかにした。このことは、多くの人為的な初期条件の変更の提案を不自然なものとして棄却する。また、この研究の延長線上として、整合性条件として知られる 2 点相関関数のスペクトルと 3 点相関の間になり立つ関係式が、実際の真の意味でゲージ不変な観測量を見る限り陽には現れないという結果を示した。これらの研究成果は *Classical and Quantum Gravity* の topical review に招待を受けてレビュー論文としてまとめた

“Loops in inflationary correlation functions”

Takahiro Tanaka, Yuko Urakawa. arXiv:1306.4461

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとするのか

これまでの研究から、**多くの赤外発散の問題が実際の観測量が何であるかをきちんと考慮していなかったことに起因している**ことが明らかになってきた。その一方で、状態の選び方に制限をつけないと赤外発散を除けないといった、当初予想していなかった結論も導き出されてきた。これまでの研究では、一般相対論的インフレーションモデルを考える限り**普遍的に存在している重力波摂動のモードに関する研究**が、我々の視点からはあまり進んでいない。まずは、これを進める。さらに、**赤外発散の問題とされる様々な現象が観測可能な物理的效果として存在するかどうかを、実際の観測量は何であるのかという観点を追求し研究を進めることで、明確な答えを導く。**

予想される結果と意義

初期宇宙を探る上で宇宙論的摂動論は欠くことのできない研究手段である。宇宙論的摂動論に基づく計算と観測の比較によってのみ、我々は宇宙初期を探ることができる。しかしながら、赤外発散の問題はその宇宙論的摂動論の基礎を危うくする問題として存在し続けている。赤外発散に起因する永年摂動効果の増大は、本当であれば、インフレーション宇宙論のシナリオに大きな影響を与える可能性を持つ重大な問題である。本研究では、このような問題を解決し、**宇宙論的摂動論の基礎を確立するという成果**を期待している。この成果は初期宇宙に対するほとんど唯一の窓を提供する**宇宙論的摂動論の信頼度の高いものにするという意義**がある。

3. 研究の方法

これまで重点的に研究を進めてきた断熱的ゆらぎモードの取り扱い手法や議論を重力波モードへと拡張する。その結果をもとに、他の研究者が報告しているような赤外発散による効果をどのように解釈するべきかを明らかにする。さらに、等曲率ゆらぎの問題等に取り組む。これら目的の達成に向けて、研究協力者である浦川氏とは議論を重ねている。本研究においては論理構成の確立が重要であって、長時間膝を突き合わせた共同研究が不可欠であるので、ポスドク研究員を雇用と、研究打ち合わせ旅費が特に必要である。基研の滞在型研究会も活用する。

4. 研究成果

まず、赤外発散の問題は大別して、短時間の時間発展において赤外発散が現れるかという問題と、長時間時間発展した場合に永年の増大効果の増加が存在するかという問題の2つがある。後者は格段に難しい問題であり、また、多くの場合に問題の本質は後者の問題にある。これまで、我々が主として議論してきた断熱的ゆらぎのモードはインフラトン自身のゆらぎに対応しており、基本的にあらゆるインフレーションモデルに存在するゆらぎのモードである。このゆらぎのモードに関しては、上記の赤外発散の問題の二つの問題の両方を議論することができている。この議論を我々が展開した際に、これまで見落とされてきた鍵となる考え方があった。それは、通常の宇宙論的摂動論においてゲージ不変量と呼ばれている摂動変数の相関関数は真に観測可能量でないという点である。宇宙論的摂動論におけるゲージ不変量の構成には、空間のラプラス演算子の逆演算を多用している。このため、それらのゲージ不変量と呼ばれる量は非局所的な物理量となり、観測者不可能な領域の情報を定義に必要としてしまうからである。このような視点から、我々は、観測者の観測可能領域の情報だけを用いてゲージ不変量を構成し、それらの相関関数を計算することで、赤外発散問題が解決される為の量子状態に対する条件を形式的な議論で見出した。

まず、その形式的な議論を具体的計算にどのように反映されるかを明らかにする議論を進めた。まずは取り扱いのやさしいモデルとしてインフラトンに結合した軽い質量を持つ粒子のループ補正で曲率ゆらぎが超ホライズンスケールで保存することを陽に示すことを試みた。このループは質量を持つ粒子のループであるので赤外発散とは関係ないが、曲率ゆらぎの保存がこの補正によって破れるという、おそらく誤っている指摘が繰り返さされている。この誤った指摘を改める計算を進め、これまでの形式的な議論がどのように具体的な計算に反映されるかを議論した。これらの議論の結果論文としての成果としては、赤外発散とは直接は関係しないが、関連のある超ホライズンスケールにおける曲率ゆらぎの凍結という現象が、別の質量を持つ場のループ補正を受けても保たれるということを示した。曲率ゆらぎの保存には空間座標のスケール変換に対して系が不変であるということが重要な役割を果たす。ループ補正を受けた後の有効作用にも、元の系が持っていた空間座標のスケール変換に対する不変性が保たれることを示すことで、この証明に成功した。

インフレーション期の赤外におけるダイナミクスには、曲率ゆらぎの保存や整合性関係としても知られるいくつかの普遍的な性質を有する。これらの性質は、単一スカラー場によるインフレーションモデルに対して広く成り立つ。これらの普遍的な性質は、広義のゲージ変換と呼ばれる遠方で落ちないような広いクラスのゲージ変換に深く関係していると主張されている。しかしながら、広義のゲージ変換に対する不変性の議論だけでは、これらのIR特性を示すには不十分である。連携研究者の浦川優子氏と共同で、整合性関係やの保存を示すためには、局所性条件と呼ぶべき条件が満たされていることが重要であることを示した。また、宇宙論的に観測可能な物理的な量に対する相関関数において赤外発散が起こらないことを保証する相殺が起こる条件が、同じ局所性条件であることを示した。さらに、この議論を多成分場の場合に成立するように拡張し、より精密化した議論を展開した。さらに、拡張されたインフレーションモデルの中にはこのような普遍的な性質を有さないものがあり、モデルの系統的分類にも役立つことを示した。

一方で、大学院生の徳田順生君と共同で、de Sitter背景時空上でのスカラー場の長波長モードに対する有効運動方程式(EoM)を導出するための系統的な方法を定式化し、有効なEoMが古典的な確率過程として解釈できるかどうかを調べた。我々の定式化は、短波長モードの非線形性由来する永年摂動的な成長を最低次の次のオーダーまで正しく含むように、通常のストカスティックアプローチを拡張したものである。⁴理論に我々の定式化を適用し、場の理論的な計算の結果を正しく再現する有効EoMを導出し、このEoMが古典的な確率過程と解釈できることを示した。我々の拡張されたストカスティックアプローチは、演算子の順序をもった相関関数に現れるすべての永年摂動的に成長する項を記述することができる。さらに、その拡張として、この定式化の新しい導出を与えるとともに、任意の次数への拡張に成功した。その後も引き続き、非局所的相関が無視できるという仮定が正しいことを示すための議論を進めている。このモデルはインフレーションにおける等局率ゆらぎに似た振る舞いをすると考えられるので、この研究の延長線上に懸案であった等局率ゆらぎの取り扱い方を議論できると考えられる。

また、研究員として雇用している北本君も独立に以下のような成果をあげた。加速膨張時空では、質量を持たず背景時空に最小に結合するスカラー場のスーパーホライズンスケールの量子揺

らぎにより、各演算子の真空期待値は時間経過とともに増大する時間依存性を持ち得る。背景時空がde Sitter空間かつ相互作用に微分結合を持たない場合については、この量子赤外効果は確率論的方程式を用いて非摂動的に評価できることが既に知られている。背景時空にスローロールパラメータを導入した場合、相互作用に微分結合を導入した場合それぞれについて確率論的処方一般化し、これらの場合における量子赤外効果の非摂動的評価を可能にした。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 29 件)

1. Isoyama, Soichiro; Fujita, Ryuichi; Nakano, Hiroyuki; Sago, Norichika and Tanaka, Takahiro, “Flux-balance formulae” for extreme mass-ratio inspirals PTEP, 2019 013E01 (2019)
2. Kimura, Masashi and Tanaka, Takahiro, Stability analysis of black holes by the \$\$\$-deformation method for coupled systems, Class. Quant. Grav., 36 055005 (2019)
3. Loutrel, Nicholas; Tanaka, Takahiro and Yunes, Nicolas, Spin-Precessing Black Hole Binaries in Dynamical Chern-Simons Gravity, Phys. Rev., D98 064020 (2018)
4. Loutrel, Nicholas; Tanaka, Takahiro and Yunes, Nicolas, Scalar Tops and Perturbed Quadrupoles: Probing Fundamental Physics with Spin-Precessing Binaries, Class. Quant. Grav., 36 10LT02 (2019)
5. Tokuda, Junsei and Tanaka, Takahiro, Can all the infrared secular growth really be understood as increase of classical statistical variance?, JCAP, 1811 022 (2018)
6. Kimura, Masashi and Tanaka, Takahiro, Robustness of the \$\$\$-deformation method for black hole stability analysis, Class. Quant. Grav., 35 195008 (2018)
7. Nair, Remya and Tanaka, Takahiro, Synergy between ground and space based gravitational wave detectors. Part II: Localisation, JCAP, 1808 033 (2018)
8. Sasaki, Misao; Suyama, Teruaki; Tanaka, Takahiro and Yokoyama, Shuichiro, Primordial black holes—perspectives in gravitational wave astronomy, Class. Quant. Grav., 35 063001 (2018)
9. Fujita, Tomohiro; Obata, Ippei; Tanaka, Takahiro and Yokoyama, Shuichiro, Statistically Anisotropic Tensor Modes from Inflation, JCAP, 1807 023 (2018)
10. Kocsis, Bence; Suyama, Teruaki; Tanaka, Takahiro and Yokoyama, Shuichiro, Hidden universality in the merger rate distribution in the primordial black hole scenario, Astrophys. J., 854 41 (2018)
11. Tokuda, Junsei and Tanaka, Takahiro, Statistical nature of infrared dynamics on de Sitter background, JCAP, 1802 014 (2018)
12. Tanaka, Takahiro and Urakawa, Yuko, Large gauge transformation, Soft theorem, and Infrared divergence in inflationary spacetime, JHEP, 10 127 (2017)
13. Nakano, Hiroyuki; Sago, Norichika; Tagoshi, Hideyuki and Tanaka, Takahiro, Black hole ringdown echoes and howls, PTEP, 2017 071E01 (2017)
14. Fujita, Ryuichi; Isoyama, Soichiro; Le Tiec, Alexandre; Nakano, Hiroyuki; Sago, Norichika and Tanaka, Takahiro, Hamiltonian Formulation of the Conservative Self-Force Dynamics in the Kerr Geometry, Class. Quant. Grav., 34 134001 (2017)
15. Kanno, Sugumi; Sasaki, Misao and Tanaka, Takahiro, Vacuum State of the Dirac Field in de Sitter Space and Entanglement Entropy, JHEP, 03 068 (2017)
16. Nakamura, Takashi and others, Pre-DECIGO can get the smoking gun to decide the astrophysical or cosmological origin of GW150914-like binary black holes, PTEP, 2016 093E01 (2016)
17. Sakakihara, Yuki and Tanaka, Takahiro, Primordial fluctuations from inflation in dRGT bimetric theory of gravity, JCAP, 1609 033 (2016)
18. Kimura, Rampei; Tanaka, Takahiro; Yamamoto, Kazuhiro and Yamashita, Yasuho, Constraint on ghost-free bigravity from gravitational Cherenkov radiation, Phys. Rev., D94 064059 (2016)
19. Nakano, Hiroyuki; Sago, Norichika; Tanaka, Takahiro and Nakamura, Takashi, Estimate of the radius responsible for quasinormal modes in the extreme Kerr limit and asymptotic behavior of the Sasaki-Nakamura transformation, PTEP, 2016 083E01 (2016)
20. Sasaki, Misao; Suyama, Teruaki; Tanaka, Takahiro and Yokoyama, Shuichiro, Primordial Black Hole Scenario for the Gravitational-Wave Event GW150914, Phys. Rev. Lett., 117 061101 (2016)
21. Yamashita, Yasuho and Tanaka, Takahiro, Bigravity from gradient expansion, JCAP, 1605 011 (2016)
22. Tanaka, Takahiro and Urakawa, Yuko, Conservation of ζ with radiative corrections from heavy field, JCAP, 1606 020 (2016)
23. Nair, Remya; Jhingan, Sanjay and Tanaka, Takahiro, Synergy between ground and space based gravitational wave detectors for estimation of binary coalescence parameters,

- PTEP, 2016 053E01 (2016)
24. Emparan, Roberto; Shiromizu, Tetsuya; Suzuki, Ryotaku; Tanabe, Kentaro and Tanaka, Takahiro, Effective theory of Black Holes in the 1/D expansion, JHEP, 06 159 (2015)
 25. Narikawa, Tatsuya; Ueno, Koh; Tagoshi, Hideyuki; Tanaka, Takahiro; Kanda, Nobuyuki and Nakamura, Takashi, Detectability of bigravity with graviton oscillations using gravitational wave observations, Phys. Rev., D91 062007 (2015)
 26. Yamashita, Yasuho; De Felice, Antonio and Tanaka, Takahiro, Appearance of Boulware-Deser ghost in bigravity with doubly coupled matter, Int. J. Mod. Phys., D23 1443003 (2014)
 27. Kimura, Masashi; Ishihara, Hideki; Matsuno, Ken and Tanaka, Takahiro, A simple diagnosis of non-smoothness of black hole horizon: Curvature singularity at horizons in extremal Kaluza-Klein black holes, Class. Quant. Grav., 32 015005 (2015)
 28. Isoyama, Soichiro; Barack, Leor; Dolan, Sam R.; Le Tiec, Alexandre; Nakano, Hiroyuki; Shah, Abhay G.; Tanaka, Takahiro and Warburton, Niels, Gravitational Self-Force Correction to the Innermost Stable Circular Equatorial Orbit of a Kerr Black Hole, Phys. Rev. Lett., 113 161101 (2014)
 29. De Felice, Antonio; Gümrukçüoğlu, A. Emir; Mukohyama, Shinji; Tanahashi, Norihiro and Tanaka, Takahiro, Viable cosmology in bimetric theory, JCAP, 1406 037 (2014)

[学会発表](計 32件)

1. Takahiro Tanaka, Area workshop of innovative area "GW Genesis" (国際学会), "What is the next step of A01?", 2019年
2. 田中貴浩, 日本物理学会(招待講演), "重力波輻射反作用の数理: LISA-DECIGOによる連星からの重力波観測の時代に向けて" 2019年
3. 田中貴浩, DECIGO workshop, "DECIGOと地上重力波干渉計のシナジー効果", 2018年
4. Takahiro Tanaka, Second Area Symposium of innovative area "GW Genesis" (国際学会), "A01 Status Report", 2018年
5. Takahiro Tanaka, 2018 Second international workshop "Particles, Gravitation and the Universe"(PGU 2018) (招待講演)(国際学会), "Testing gravity theory using gravitational waves", 2018年
6. Takahiro Tanaka, IBS Workshop on Prospects of Particle Physics and Cosmology (招待講演)(国際学会), "Testing gravity theory using gravitational waves", 2018年
7. Takahiro Tanaka, 5th Korea-Japan Workshop on Dark Energy: Starobinsky's Universe (招待講演)(国際学会), "Testing gravity theory using gravitational waves", 2018年
8. Takahiro Tanaka, AVENUES OF QUANTUM FIELD THEORY IN CURVED SPACETIME, "Gravitational waves from BH mergers as a new probe of physics", 2018年
9. Takahiro Tanaka, Gravitational wave physics and astronomy: Genesis, First Area Symposium (国際学会), "Opening and A01 Status Report", 2018年
10. Takahiro Tanaka, YKIS2018a (招待講演)(国際学会), "On ringing gravitational waves from black holes", 2018年
11. Takahiro Tanaka, KAGRA f2f meeting (招待講演)(国際学会) "Targets of Innovative Area Gravitational Wave Physics and Astronomy:Genesis"
12. Takahiro Tanaka, Gravitational wave physics and astronomy: Genesis, KICKOFF workshop (国際学会), "A01: 重力波データ解析による重力理論の検証", 2017年
13. Takahiro Tanaka, Gravitational wave physics and astronomy: Genesis, Area Workshop 2017 Autumn (国際学会), "A01: 重力波データ解析による重力理論の検証", 2017年
14. 田中貴浩, 日本物理学会, "ドジッター背景時空上における赤外効果の統計的性質", 2017年03月17日~2017年03月20日, 大阪大学(豊中市)
15. 田中貴浩, 日本物理学会, "AdS境界に局在したブラックホールに対する高次元極限からのアプローチ", 2016年09月12日~2016年09月15日, 宮崎大学(宮崎市)
16. Takahiro Tanaka, UTQuest WS5 (招待講演)(国際学会), "Testing gravity theory by gravitational waves", 2016年12月12日~2016年12月15日, 京都大学基礎物理学研究所(京都市)
17. 田中貴浩, 新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会 2016 (招待講演), "Impact of gravitational wave detection and its perspective", 2016年11月28日~2016年11月30日, 山代温泉 ゆのくに天祥(石川県加茂市)
18. Takahiro Tanaka, Rethinking Quantum Field Theory(招待講演)(国際学会), "Restriction on the initial state for the absence of IR effect in single fieldinflation model", 2016年09月27日~2016年09月30日, DESY,ハンブルグ(ドイツ)
19. Takahiro Tanaka, ILC 夏の合宿 2016 (招待講演), "Gravitational waves as a new probe of physics", 2016年07月23日~2016年07月26日, いくし園(岩手県一関市)
20. Takahiro Tanaka, 3rd Korea-Japan Workshop on Dark Energy (招待講演)(国際学会),

- "Revival of classical black hole evaporation?", 2016年04月04日~2016年04月08日, KASI, Dejeon(韓国)
21. 田中貴浩, 第4回観測的宇宙論ワークショップ(招待講演), "重力波で探る修正重力". 2015年11月18日~2015年11月20日, 基礎物理学研究所 京都大学(京都市)
 22. Takahiro Tanaka, Hot Topics in General Relativity and Gravitation(招待講演)(国際学会), "Testing Modified gravity and gravitational waves", 2015年08月09日~2015年08月15日, Quy Nhon, Vietnam
 23. Takahiro Tanaka, Quantum Fields and IR Issues in de Sitter Space(招待講演)(国際学会), "Restriction on the initial state for the true gauge invariance, 2015年07月20日~2015年07月31日, Natal, Brazil
 24. Takahiro Tanaka, 18th Capra Meeting on Radiation Reaction in General Relativity(国際学会), "Some proposal on second order perturbation", 2015年06月29日~2015年07月02日, YITP, Kyoto, Japan
 25. Takahiro Tanaka, One Hundred Years of Strong Gravity workshop(招待講演)(国際学会), "Graviton Oscillation in a viable bigravity model", 2015年06月10日~2015年06月12日, Lisbon, Portugal
 26. 田中貴浩, 高宇連シンポジウム(招待講演), "重力波物理学", 2015年03月10日, 広島大学(東広島市)
 27. 田中貴浩, 「重力波天体」A05/A04 合同合宿, "自己重力反作用による長時間軌道進化", 2015年01月10日, 瀬波温泉(新潟県村上市)
 28. 田中貴浩, 日本物理学会, "自己重力反作用による長時間軌道進化", 2014年09月21日, 佐賀大学(佐賀市)
 29. Takahiro Tanaka, 11th Cospa, "A viable explanation of the CMB dipolar statistical anisotropy", 2014年12月11日, Auckland大、オークランド、ニュージーランド
 30. Takahiro Tanaka, Relativistic Cosmology, "Modified gravity and gravitational waves", 2014年09月16日, 京都大学基礎物理学研究所(京都市)
 31. 田中貴浩, 天文天体若手夏の学校(招待講演), "修正重力と重力波", 2014年07月30日, 戸倉上山田温泉(長野県千曲市)
 32. Takahiro Tanaka, 17th Capra meeting, "A formulation for the long-term evolution of EMRIs with linear order conservative self-force", 2014年06月25日, Caltech, パサデナ, USA

〔図書〕(計 1件)

田中貴浩, "深化する一般相対論 : ブラックホール・重力波・宇宙論", 丸善出版, 206ページ, 2017年

〔産業財産権〕

なし

〔その他〕

国際研究集会開催

“Infrared physics of gauge theories and quantum dynamics of inflation” 2018年

6. 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名 : 浦川優子

ローマ字氏名 : Yuko Urakawa

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。