

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 9 月 5 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14707

研究課題名（和文）ストカスティック形式で迫る重力と量子論

研究課題名（英文）Aspects of gravity and quantum theory in the stochastic formalism

研究代表者

多田 祐一郎（Tada, Yuichiro）

名古屋大学・高等研究院（理）・特任助教

研究者番号：90837022

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,200,000円

研究成果の概要（和文）：研究期間中に計13本の論文を発表。特に1908.08694では確率形式を用いて非常に長く続くインフレーション理論を提唱・検証し、2008.07497では確率形式をインフラトン場に対し共変な形で再定式化、既存の不定性を解決した。2111.15280では確率形式において任意に粗視化した宇宙論的ゆらぎの確率密度関数を計算する手法を確立し、インフレーションから天体形成までの最後のピースを埋めた。研究成果は24件の国内外会議および11件のセミナーで発表し、Online JGRG Workshop 2020ではOutstanding Presentation Award Gold Prizeを受賞した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によってインフレーションの確率形式が不定性なく定式化され、またインフレーションから天体形成までの全ての過程を確率形式において計算することができるようになった。これによりあらゆるインフレーション理論に対し結果的な観測量を計算する準備が整ったと言える。例えば現在暗黒物質の候補として原始ブラックホールが再注目され、その副産物としての重力波などについても、私自身のいくつかの研究を含め世界的に研究が進められているが、これらを一貫した手法で解析するために本研究が役立つであろう。

研究成果の概要（英文）：A total of 13 papers are published during the research term. In particular, 1908.08694 proposed and tested a very long-lasting inflationary theory in the stochastic formalism, and 2008.07497 reformulated that formalism in a covariant way in the inflaton fields and resolved the existing uncertainty. 2111.15280 established a method to calculate the probability density function of arbitrarily coarse-grained cosmological fluctuations in the stochastic formalism, filling in the last piece of the puzzle from inflation to astrophysical object formations. These results were presented at 24 national and international conferences and 11 seminars, and I received the Outstanding Presentation Award Gold Prize at the Online JGRG Workshop 2020.

研究分野：宇宙論

キーワード：インフレーション 確率形式 原始ブラックホール 重力波

1. 研究開始当初の背景

重力理論と量子論の統合は物理学の一大目標であり、強重力場が作る地平線まわりでの量子論はその一つのアプローチとして注目されている。特にインフレーション宇宙(加速膨張時空)においては、量子ゆらぎが地平線付近において「古典化」し星や銀河などの構造のもととなる密度ゆらぎを生成すると考えられている。このように「古典化」した量子ゆらぎを実際に古典的揺動に置き換えて解析する手法として確率(ストカスティック)形式が知られている。この確率形式の定式化を精査することで地平線まわりにおいて量子ゆらぎがどのように量子性を失うかに迫ることができる。また確率形式は量子論ではなく古典論を用いることで通常よりはるかに強力な解析を行うことができ、例えば非常に大きなゆらぎから作られる原始ブラックホールと呼ばれる天体を議論する上などでも注目されている。

2. 研究の目的

確率形式に量子相互作用を取り入れて定式化、特に経路積分における実装を確立することで、地平線において量子場がどのように差分化されるべきかを明らかにし、重力による「古典化」の理解を深めること、および確率形式を応用し原始ブラックホールの解析を行うことが本研究の目的である。

3. 研究の方法

ポテンシャル相互作用を確率形式に取り入れる手法は De Sitter 宇宙において正準な単一場に対して文献 [1] で調査されている。ここでは確率形式と量子論の結果を直接比較することによって取り入れ方を議論しており、逆に量子論の計算が難しい場合においてこの手法は適用しづらい。そこで我々は量子論計算を直接は用いず、運動方程式が満たすべき場空間共変性に着目し、運動方程式が共変性を満たす様に定式化することで、場空間曲率を介した微分相互作用を確率形式に取り入れることを議論する。

一方、確率形式で原始ブラックホール形成を議論するには、任意スケールで粗視化された曲率ゆらぎや密度ゆらぎを確率形式で定式化しなければならない。パワースペクトルに関しては我々の研究 [2, 3] や文献 [4] で議論されているので、これらを参考にして粗視化された宇宙論的ゆらぎの確率密度関数を計算する方法を定式化する。

4. 研究成果

確率過程の特異な点は、それが数学的に至る所(単純な)微分が不可能であることにより通常とは異なる微分の連鎖律を持つことである。我々は、これを考慮すると実はこれまで考えられてきた確率形式における運動方程式は場の変数変換に対して共変ではなく、場の定義により変わってしまうことを発見し前段階研究 [5] において指摘した。ところがこれは、場の値は単に場空間における「座標」であり、座標の取り方は物理に影響しない(エネルギーや運動量などの物理量は座標に依らない)という物理的自然さに反する。そこで我々は確率形式の定式化を一から見直し、初めに演算子形式において古典的揺動のもととなる量子ゆらぎの発展を考察、それが満たすべき「確率微分方程式」を見出すことで、場空間共変性を保つ確率形式運動方程式を導くことに成功した。さらにこの運動方程式を導く経路積分での差分化も議論、結果として場空間計量を通じた微分相互作用についての地平線まわりでの経路積分差分化法を定式化することに成功し、ポテンシャル相互作用と微分相互作用の両方の曲がった時空中での量子化に対する知見を得た。これらの成果はフランスでの研究員活動の集大成とも言える論文 [6] にまとめており、本論文に関する Online JGRG Workshop 2020 での発表では Outstanding Presentation Award Gold Prize を受賞している。また前段階研究 [5] は CQG Highlights of 2019-20 に選ばれ評価されている。

一方論文 [7] では確立した確率形式の現実的応用として、確率形式における宇宙論的ゆらぎの粗視化の定式化および計算法の提唱をおこなった。確率形式はインフレーション中の地平線サイズで粗視化した場の理論であり、当時の地平線サイズは現在の宇宙スケールから比べると非常に小さい。原始ブラックホール等の天体形成や宇宙マイクロ波背景放射のゆらぎなど現実的な問題に適用する場合には宇宙論スケールで粗視化した観測量を計算する必要がある。確率形式において 2 点間の距離はインフレーション中のどの時期に分岐したかという時間の情報に置き換えることができ、これを利用して我々の論文 [2, 3] や文献 [4] ではインフレーション後まで保存される曲率ゆらぎという物理量のパワースペクトル(2 点相関のフーリエ成分)を計算する手法を議論している。そこで我々はこれらの研究を進展させ、パワースペクトルに限らず、任意スケールで粗視化された曲率ゆらぎの確率密度分布を求める手法を定式化した。

原始ブラックホールの形成には曲率ゆらぎより密度ゆらぎやコンパクション関数といったエネルギー密度のゆらぎの方がより直接的に扱いやすい。これらは簡単に言えば曲率ゆらぎの空間微分に相当する。ところが確率形式において簡単に計算できるのは 1 点の運動までであり、空

間微分を計算することは困難である。そこで我々は上述した任意スケールの曲率ゆらぎの計算法を応用し、粗視化スケールをわずかに変えることで空間微分を再現、密度ゆらぎやコンパクト関数の確率密度分布を計算することにも成功した。これを応用し原始ブラックホール質量関数の具体例も計算している（図1）。本研究によりインフレーション中の確率形式からその後の宇宙の観測量までをつなぐ最後のピースが完成したと言える。

他にも研究期間中に計13本の論文を発表、研究成果は24件の国内外会議および11件のセミナーで発表した。

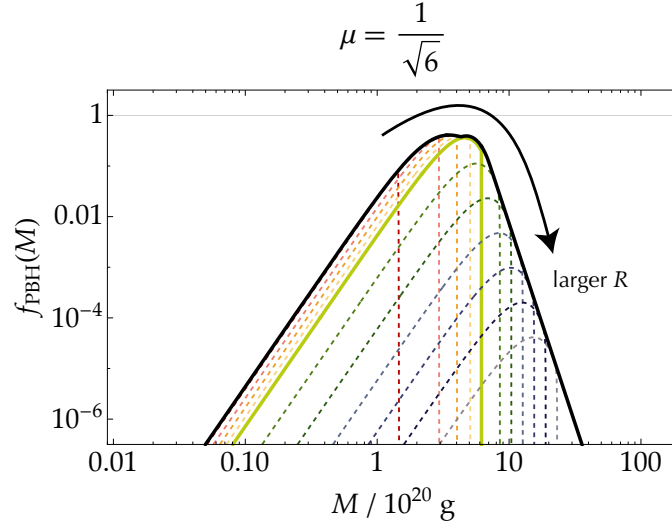


図1. 確率形式における初の正確な原始ブラックホール質量関数計算の具体例 [7]

参考文献

- [1] J. Tokuda and T. Tanaka, “Statistical nature of infrared dynamics on de Sitter background”, JCAP **02**, 014 (2018).
- [2] T. Fujita, M. Kawasaki, Y. Tada and T. Takesako, “A new algorithm for calculating the curvature perturbations in stochastic inflation”, JCAP **12**, 036 (2013).
- [3] T. Fujita, M. Kawasaki and Y. Tada, “Non-perturbative approach for curvature perturbations in stochastic δN formalism”, JCAP **10**, 030 (2014).
- [4] K. Ando and V. Vennin, “Power spectrum in stochastic inflation”, JCAP **04**, 057 (2021).
- [5] L. Pinol, S. Renaux-Petel and Y. Tada, “Inflationary stochastic anomalies”, Class. Quant. Grav. **36**, no.7, 07LT01 (2019).
- [6] L. Pinol, S. Renaux-Petel and Y. Tada, “A manifestly covariant theory of multifield stochastic inflation in phase space: solving the discretisation ambiguity in stochastic inflation”, JCAP **04**, 048 (2021).
- [7] Y. Tada and V. Vennin, “Statistics of coarse-grained cosmological fields in stochastic inflation”, JCAP **02**, no.02, 021 (2022).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Mikura Yusuke, Tada Yuichiro, Yokoyama Shuichiro	4. 巻 103
2. 論文標題 Minimal $\langle \text{mml:math xmlns:mml="http://www.w3.org/1998/Math/MathML" display="inline">\rangle \langle \text{mml:mi}\rangle \langle \text{mml:mi}\rangle \langle \text{mml:math}\rangle$ -inflation in light of the conformal metric-	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 L101303
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.103.L101303	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 Suyama Teruaki, Tada Yuichiro, Yamaguchi Masahide	4. 巻 2021
2. 論文標題 Revisiting non-Gaussianity in non-attractor inflation models in the light of the cosmological soft theorem	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 7300
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptab063	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 Katsuya T., Tada Yuichiro, Ueda Ikumi	4. 巻 2021
2. 論文標題 Induced gravitational waves as a cosmological probe of the sound speed during the QCD phase transition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 048 ~ 048
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1475-7516/2021/06/048	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 Suyama Teruaki, Tada Yuichiro, Yamaguchi Masahide	4. 巻 2020
2. 論文標題 Local observer effect on the cosmological soft theorem	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1130
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptaa144	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 PinoI Lucas, Renaux-Petel S?bastien, Tada Yuichiro	4. 巻 2021
2. 論文標題 A manifestly covariant theory of multifield stochastic inflation in phase space: solving the discretisation ambiguity in stochastic inflation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 048 ~ 048
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2021/04/048	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 該当する

1. 著者名 Mikura Y., Tada Y., Yokoyama S.	4. 巻 132
2. 論文標題 Conformal inflation in the metric-affine geometry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 EPL (Europhysics Letters)	6. 最初と最後の頁 39001 ~ 39001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1209/0295-5075/132/39001	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 Kogai Kazuhiro, Tada Yuichiro	4. 巻 101
2. 論文標題 Escape from the swampland with a spectator field	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 103514
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.103514	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 Kitajima Naoya, Tada Yuichiro, Takahashi Fuminobu	4. 巻 800
2. 論文標題 Stochastic inflation with an extremely large number of e-folds	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135097 ~ 135097
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2019.135097	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 Tada Yuichiro, Yokoyama Shuichiro	4. 巻 100
2. 論文標題 Primordial black hole tower: Dark matter, earth-mass, and LIGO black holes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 23537
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.023537	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 Escrib? Albert, Tada Yuichiro, Yokoyama Shuichiro, Yoo Chul-Moon	4. 巻 2022
2. 論文標題 Simulation of primordial black holes with large negative non-Gaussianity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 012 ~ 012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2022/05/012	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 該当する

1. 著者名 Tada Yuichiro, Vennin Vincent	4. 巻 2022
2. 論文標題 Statistics of coarse-grained cosmological fields in stochastic inflation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 021 ~ 021
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2022/02/021	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 該当する

1. 著者名 Mikura Yusuke, Tada Yuichiro	4. 巻 2022
2. 論文標題 On UV-completion of Palatini-Higgs inflation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 035 ~ 035
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2022/05/035	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 Kitajima Naoya, Tada Yuichiro, Yokoyama Shuichiro, Yoo Chul-Moon	4. 巻 2021
2. 論文標題 Primordial black holes in peak theory with a non-Gaussian tail	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 053 ~ 053
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2021/10/053	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 -

〔学会発表〕 計24件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 17件)

1. 発表者名 Yuichiro Tada
2. 発表標題 Manifestly covariant theory of stochastic inflation
3. 学会等名 Online JGRG Workshop 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuichiro Tada
2. 発表標題 StocDeltaN: numerical approach to inflation in combination of the stochastic and delta N formalism
3. 学会等名 PBH & Stochastic inflation workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuichiro Tada
2. 発表標題 Manifestly covariant theory of stochastic inflation
3. 学会等名 The 14th International Conference on Gravitation, Astrophysics and Cosmology (ICGAC14) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 多田祐一郎
2. 発表標題 インフレーションの確率形式に対する共変な定式化
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 多田祐一郎
2. 発表標題 Escape from the swamp with spectator
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 多田祐一郎
2. 発表標題 Primordial black hole tower: Dark matter, earth-mass, and LIGO black holes
3. 学会等名 Focus Week on Primordial Black Holes (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 多田祐一郎
2. 発表標題 Stochastic inflation with an extremely large number of e-folds
3. 学会等名 JGRG29 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 多田祐一郎
2. 発表標題 Stochastic approach to non-Gaussianity
3. 学会等名 Theoretical aspects of non-Gaussianity from modern perspectives (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 多田祐一郎
2. 発表標題 Primordial black hole tower: Dark matter, earth-mass, and LIGO black holes
3. 学会等名 GWPAW 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 多田祐一郎
2. 発表標題 Primordial black hole tower: Dark matter, earth-mass, and LIGO black holes
3. 学会等名 COSMO19 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 多田祐一郎
2. 発表標題 Primordial black hole tower: Dark matter, earth-mass, and LIGO black holes
3. 学会等名 15th Rencontres du Vietnam "COSMOLOGY" (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 多田祐一郎
2. 発表標題 Stochastic formalism and curvature perturbation
3. 学会等名 3-day workshop: INFLATION AND GEOMETRY (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 多田祐一郎
2. 発表標題 PBH tower in multi-phase inflation
3. 学会等名 2-day mini-workshop: Axion Cosmology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 多田祐一郎
2. 発表標題 PBH tower in multi-phase inflation
3. 学会等名 Future Perspective in Cosmology and Gravity (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 多田祐一郎
2. 発表標題 極長ストカスティックインフレーション
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 多田祐一郎
2. 発表標題 多段階インフレーションによる原始ブラックホールタワー
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuichiro Tada
2. 発表標題 Primordial black holes in peak theory with a non-Gaussian tail
3. 学会等名 2021 NRF-JSPS Workshop in particle physics, cosmology, and gravitation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuichiro Tada
2. 発表標題 Probability density functions of coarse-grained curvature and density perturbations in stochastic inflation
3. 学会等名 COSMO'21 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuichiro Tada
2. 発表標題 Primordial black holes in peak theory with a non-Gaussian tail
3. 学会等名 The KEK-PH + KEK-Cosmo joint workshop on "Primordial Black Holes" (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuichiro Tada
2. 発表標題 Probability density functions of coarse-grained curvature and density perturbations in stochastic inflation
3. 学会等名 JGRG30 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuichiro Tada
2. 発表標題 Primordial black holes and induced gravitational waves in light of the non-Gaussian tail
3. 学会等名 FY2021 学術変革領域研究「ダークマター」シンポジウム (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 多田祐一郎
2. 発表標題 粗視化曲率ゆらぎの確率密度関数
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 多田祐一郎
2. 発表標題 インフレーションの「現在」と重力波
3. 学会等名 DECIGO workshop (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 多田祐一郎
2. 発表標題 原始ブラックホールのピーク理論と非ガウス尾
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<https://nekomamat.github.io/indexJP.html>

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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
フランス	Institut d'Astrophysique de Paris	Ecole Normale Supérieure	
ベルギー	Universite Libre de Bruxelles		