

2. 現在までの研究状況 (図表を含めてもよいので、わかりやすく記述してください。様式の改変・追加は不可(以下同様))

- ①これまでの研究の背景、問題点、解決方策、研究目的、研究方法、特色と独創的な点について当該分野の重要文献を挙げて記述してください。
- ②申請者のこれまでの研究経過及び得られた結果について整理し、①で記載したことと関連づけて説明してください。「4. 研究遂行能力」欄に記載した論文、学会発表等を引用する場合には、同欄の番号を記載するとともに、申請者が担当した部分を明らかにして記述してください。

本研究の目的は、初期宇宙の加速膨張期「インフレーション」の解明に向けて、その理論的側面としてストカスティック形式の理解を深めるとともに、その観測的側面として原始ブラックホールと重力波の物理を模索することである。本項では研究の背景とこれまでに得られた成果を以下にまとめる。

① これまでの研究背景・問題点・研究方法

1. 研究の背景 インフレーションは、宇宙が大局的に一様等方平坦である理由を説明しつつ、さらに銀河などの構造のもととなる初期の曲率ゆらぎを量子効果で生成できる有望な機構である。観測的には主に宇宙背景放射 (Cosmic Microwave Background: CMB) の温度非等方性や銀河の大規模構造 (Large Scale Structure: LSS) からその正しさが検証されてきたが、特に 2013, 15, 18 年には Planck 衛星による CMB の精密な測定結果が発表され [1], インフレーション機構はさらに強く支持されるようになった。

しかしインフレーションの具体的な機構は未だ解明されていない。むしろ Planck の詳細な観測により 1) 有力視されていたモデルの多くは棄却されてしまい、一方でゆらぎの非ガウス性や初期重力波などの 2) 機構の決定に役立つ特徴量は何も観測できない結果に終わってしまった。さらに近年 3) 超弦理論等の高エネルギー理論はインフレーションと相性が悪い可能性が指摘されている [2]。これら 3 つの問題を踏まえ、今こそ理論的にも観測的にも新たな視点が必要となっている。

一方インフレーションにも関係する明るいニュースとして、2015 年に LIGO/Virgo グループが初めて重力波の直接観測に成功した [3]。続く LISA などの重力波観測衛星計画も視野に入り、今や重力波は現実的な観測対象となっている。観測された重力波はブラックホールや中性子星の連星合体から生じたものであるが、太陽質量の 30 倍を超える重いブラックホールが見つかったことをきっかけに、通常とは異なる生成機構を持つ原始ブラックホール (Primordial Black Hole: PBH) も再注目されている。ブラックホールは主に重い恒星の重力崩壊から形成されるが、インフレーションで大きな曲率ゆらぎが作られた場合、宇宙初期の放射ゆらぎが直接潰れることでも形成される。これを PBH と呼ぶ。PBH はいまだに発見されていないが、もし観測されればインフレーションモデルへの大きな情報となる。さらに PBH は重力波源となるだけでなく、暗黒物質の候補であったり、最近 Optical Gravitational Lensing Experiment (OGLE) によって観測されたマイクロ重力レンズ現象のレンズ天体候補であったりするなど [4]、天体そのものとしても興味深い。

2. 問題点および解決方策 1)–3) の問題を踏まえ、理論的にはこれまでのような簡素なモデルだけでなく、インフレーションに関わる場 (インフラトン) が複数相互作用し、さらにインフラトンが曲がった多様体を成す複雑なモデルも視野に入れ研究する必要が出てきた。実際複数場に関わるのは超弦理論の文脈からも自然である。一方観測量としての PBH について、その形成には大きなゆらぎ (~ 1) が必要になるのに対し、CMB や LSS のような大スケールのゆらぎは非常に小さい ($\sim 10^{-5}$) ことがわかっており、簡素なモデルで両者を実現するには不自然なパラメータの微細調整が必要だった。また PBH 形成に必要な大きなゆらぎを摂動論で扱う危険性も指摘されている ([5] 等)。重力波に関してはその黎明期であり、重力波からどのようなインフレーションの情報を得られるかはまだ研究途上である。

そこで 1)–3) の問題を解決する方策として、本研究では i) 複数場においてもゆらぎを非摂動的かつ自動的に計算できるストカスティック形式に着目し理論的に整備するとともに、ii) 複数場による自然な PBH 形成モデルを探り、さらに iii) 重力波観測量をインフレーション特徴量と関連づける方策を採用する。

3. 研究目的・方法および特色と独創的な点

i) ストカスティック形式: 1 つ目の研究目的はストカスティック形式 (非摂動形式) でゆらぎを計算する手法の提唱することである。通常の計算方法では一様背景場のまわりでゆらぎを摂動展開して計算するが、ストカスティック形式ではゆらぎをブラウン運動として背景場そのものに取り入れ計算するため、

ゆらぎを非摂動的に扱える可能性がある [6]. しかしこれまではインフラトンのゆらぎを、観測量に直接関係する (空間) 曲率ゆらぎに変換する際に摂動展開を必要としていた. そこで我々はインフレーション持続時間を曲率ゆらぎに結びつける δN 形式を応用することで、**曲率ゆらぎを直接非摂動的に計算するアルゴリズム**を提唱した (研究遂行能力欄 4-(1)-9). このアルゴリズムは複数場においても自動的に曲率ゆらぎを計算でき、さらに摂動展開を必要としないことから PBH に必要な大きなゆらぎも制御できる、これまでにない申請者の独創的研究の 1 つである.

ii) PBH: 次に我々はパラメータの微細調整を必要としない自然な PBH 形成模型を目指した. PBH 形成は単一場インフレーションで実現しようとする CMB のような大スケールのゆらぎの振幅との差から不自然な模型になることが多い. これは小スケールのゆらぎと大スケールのゆらぎを同じ機構で実現しようとするためである. そこで我々はインフラトンを複数にし、さらに**インフレーションをいくつかの段階に分け CMB スケールと PBH スケールを異なった段階に割り当てる**ことで、簡単かつ自然に PBH を実現することができることを示した (4-(1)-6). その後このような多段階インフレーションにおいて LIGO/Virgo 観測の連星合体重力波、暗黒物質、OGLE 実験の重力レンズ現象 **すべてを同時に PBH で解決できる模型**を提唱した (4-(1)-1). これらの研究は2019年の日本ブラジル2国間交流研究会において若手代表発表者として発表の機会を得るなど (4-(3)-2), 申請者の独創的研究の 2 つ目である.

iii) 重力波: 3 つ目の研究目的は PBH を介して重力波からインフレーションに示唆を与えることである. PBH は連星合体で直接重力波源になるだけでなく、PBH を作るほど大きな曲率ゆらぎが 2 次的に作る背景重力波も伴うことが知られている [7]. そこで我々は ii) で述べた多段階インフレーション模型において PBH とともに作られる 2 次重力波を計算し、**生成される PBH 量とそれに伴って観測される 2 次重力波の大きさを対応づけた** (4-(1)-4). さらに我々は銀河分布の計算に使われる「バイアス」の手法を PBH に応用し、非ガウスなゆらぎが大小のスケールで相関を持つと PBH の空間分布が変動することを指摘した (4-(1)-8). これは連星合体からの**直接重力波**と、大きなゆらぎから伴う**2 次重力波**の両方に影響を与えると期待される. これらが 3 つ目の申請者の独創的研究である.

② 研究経過および得られた結果

以上のように申請者はストカスティック形式と δN 形式を組み合わせることで非摂動的に曲率ゆらぎを計算できるアルゴリズムを提唱した (4-(1)-9). これを適用し、2 次相転移が起きて摂動論が破綻するハイブリッドインフレーション模型において、初めて**定量的な曲率ゆらぎの計算に成功**し、さらに **PBH 形成も議論**した (4-(1)-7). その後共同研究者でもある Vennin 博士がより解析しやすい偏微分方程式の形に焼き直し [8], パリでの受入研究者であった Renaux-Petel 博士も交え、現在我々は自動でインフレーション模型を解析できる**公開数値コード**の開発を行っている. Renaux-Petel 博士とはストカスティック形式のより理論的な側面として、複数場への単純な拡張はインフラトン多様体上での理論の共変性を壊し得ること (**stochastic anomaly**) を指摘し (4-(1)-2), 引き続き共変なストカスティック形式の定式化についての論文を執筆中である. Vennin 博士とは δN 形式において、PBH の空間分布に影響する、**ゆらぎの大小スケール相関の計算方法を定式化**した (4-(1)-5).

PBH に関して、多段階インフレーションにおける PBH 形成や (4-(1)-6) 2 次重力波の計算 (4-(1)-4) を示したのち、これら多段階インフレーション模型が**超弦理論の予言とも相性がいい**ことを示した (4-(1)-1). 現在は 2 次重力波に関して、初期宇宙の量子色力学 (QCD) 相転移中に生成された 2 次重力波が **QCD のプラズマの性質を探索**できる可能性について研究中である.

[1] P. A. R. Ade *et al.*, Astron. Astrophys. **571**, A1 (2014). R. Adam *et al.*, Astron. Astrophys. **594**, A1 (2016). Y. Akrami *et al.*, arXiv:1807.06205 [astro-ph.CO]. [2] G. Obied, H. Ooguri, L. Spodyneiko and C. Vafa, arXiv:1806.08362 [hep-th]. H. Ooguri, E. Palti, G. Shiu and C. Vafa, Phys. Lett. B **788**, 180 (2019). [3] B. P. Abbott *et al.*, Phys. Rev. Lett. **116**, no. 6, 061102 (2016). [4] H. Niikura, M. Takada, S. Yokoyama, T. Sumi and S. Masaki, Phys. Rev. D **99**, no. 8, 083503 (2019). [5] J. M. Ezquiaga, J. García-Bellido and V. Vennin, JCAP **2003**, no. 03, 029 (2020). [6] A. A. Starobinsky, Lect. Notes Phys. **246**, 107-126 (1986). S. Mollerach, S. Matarrese, A. Ortolan and F. Lucchin, Phys. Rev. D **44**, 1670-1679 (1991). [7] R. Saito and J. Yokoyama, Phys. Rev. Lett. **102**, 161101 (2009) [8] V. Vennin and A. A. Starobinsky, Eur. Phys. J. C **75**, 413 (2015).

3. 派遣先における研究計画

(1) 研究目的・内容 (図表を含めてもよいので、わかりやすく記述してください)

①研究目的、研究方法、研究内容について記述してください。

②どのような計画で、何を、どこまで明らかにしようとするのかを、年次毎に(1年目、2年目)分けて具体的に記入してください。

③なお共同研究の場合には、申請者が担当する部分を明らかにしてください。

① 研究目的・方法・内容

1. ストカスティック形式 我々はストカスティック- δN 形式を応用し、新たなインフレーション機構を発見することや、これまで計算できなかった観測量を定量的に示すことを研究目的とする。まずは前項で述べた共変なストカスティック形式の定式化と数値計算コードの公開を着任までに完了する。着任後は受入研究者である Matarrese 教授とともに、ストカスティック形式におけるゆらぎの非ガウス性の計算の定式化を行う。ストカスティック形式は非摂動的手法であるので、ゆらぎの最低次の情報である「大きさ」だけでなく、正負の非対称性や大小スケールの相関などの非ガウス性の情報も自動的に含んでいる。そこで「 δN 形式における大小スケール相関の計算 (4-(1)-5)」をストカスティック形式に拡張することで、新たな側面からゆらぎの非ガウス性に迫る。

また数値計算コードを用い、特に以下の2つの模型を解析する。1つ目はインフレーションがポテンシャル相互作用だけでなく、多様体の幾何構造に強く影響される模型である。前受入研究者の Renaux-Petel 博士によって多様体が負曲率を持つ場合、運動が不安定になり相転移を起こす可能性があることが指摘され [9]、以降幾何学力を使った模型が注目されている ([10] 等)。2-②でも述べたとおり相転移点付近でのゆらぎの計算にはストカスティック形式が必須であり、また転移点で作られる大きなゆらぎは PBH を形成する可能性があり興味深い。もう1つはスローロール (Slow-Roll: SR) 条件が破れる模型である。SR とはポテンシャルが十分平らでインフラトンがゆっくり動く状態のことを指す。我々は単一場 SR 模型では非摂動効果が小さいことを示したが (4-(1)-9)、SR 条件を破れば単一場でもゆらぎを急激に増減させることが可能であり、非摂動効果が大きくなってストカスティック形式が必須となる可能性が指摘されている ([11] 等)。また超弦理論の文脈ではポテンシャルは常に SR 条件を破ることが示唆され [2]、単一場に限らず複数場においても SR 状態を超えてゆらぎの解析を行うことが求められている。我々の定式化は SR 近似を用いない完全な形式で議論されているため、SR 条件が破れる模型にも適用可能である。これらの研究は受入研究室の Matarrese 教授や Bartolo 教授の協力だけでなく、フランスの Renaux-Petel 博士や Vennin 博士の協力も仰ぎ、広くヨーロッパの研究コミュニティに対し我々の定式化の普及を進めたい。

2. PBH ストカスティック形式を応用し、新たな PBH 形成模型を提唱することや PBH 生成量を正確に見積もることを目的とする。上述した幾何学力を使った模型や SR を破った模型に注目し、またこれまで研究してきた多段階インフレーションにおける段階のつなぎ目の相転移に対しても、ストカスティック- δN 形式を適用することで PBH 形成の議論を可能とする。さらに PBH 生成量の計算にはゆらぎの大きさだけでなくその確率分布の裾が重要であることが示されており [5]、上述した数値計算コードとは別に、確率分布の裾を中心に計算するコードも開発する。

3. 重力波 PBH に伴う2次重力波で興味深いのは、暗黒物質として許される PBH 質量に対応する2次重力波の周波数がちょうど LISA 衛星の感度にあたることである [12]。そこで申請者は特に LISA 衛星を見据えて、2次重力波やその他背景重力波の非ガウス性の検出可能性を明らかにすることを目的とする。我々はゆらぎの非ガウス性により PBH の空間分布が変動することを示したが (4-(1)-8)、これに伴い2次重力波の強度も非等方になることを、受入研究室の Bartolo 教授と Matarrese 教授らが明らかにした [13]。そこでこの重力波非等方性を角度パワースペクトルとして、観測誤差推定 (フィッシャー解析) を通じ LISA 衛星等における具体的な観測可能性を議論する。

② 年次計画

1 年目 ストカスティック- δN の非ガウス性への拡張と LISA の重力波非等方性検出能力の解析に集中する。特に非ガウス性に関してはストカスティック- δN の定式化を行うだけでなく、数値コードとしても実装し、具体例としていくつかのインフレーション模型に適用することまで行う。さらにストカスティック- δN をゆらぎの確率分布の裾の計算に拡張し、PBH 量の正確な見積もりを定式化する。

2 年目 幾何学的力が働く模型と SR 条件の破れた模型の解析、ゆらぎが大小スケール相関を持つ模型の提唱、そして重力波を通じて初期宇宙に関する情報を与える観測量の模索を可能な限り押し進める。例えば重力波に関して、我々はインフレーション中にパリティを破るスカラー粒子がいてベクトル場と結合していると、パリティを破った円偏光重力波が強く生成されることを指摘した (4-(1)-3)。重力波強度の非等方性だけでなくこのような様々な重力波の性質も初期宇宙への示唆として使えるだろう。

③ 申請者の担当

ストカスティック形式と PBH の研究に関しては、Matarrese 教授と Bartolo 教授と議論を重ねながらも、研究の主要な部分は申請者が行う。重力波の特に観測器の感度解析に関しては Bartolo 教授の指導のもと手法を学ぶ予定である。他にも受入先であるパドヴァ大学の Peloso 教授はインフレーション中でのパリティを破る粒子生成について詳しく、協力を仰げると期待する。それぞれ場合によっては研究室の学生への指導を交え、研究の分担を行う可能性もある。

[9] S. Renaux-Petel and K. Turzyński, Phys. Rev. Lett. **117**, no. 14, 141301 (2016). [10] A. R. Brown, Phys. Rev. Lett. **121**, no. 25, 251601 (2018). [11] J. M. Ezquiaga and J. García-Bellido, JCAP **1808**, 018 (2018). [12] N. Bartolo, V. De Luca, G. Franciolini, A. Lewis, M. Peloso and A. Riotto, Phys. Rev. Lett. **122**, no. 21, 211301 (2019). [13] N. Bartolo *et al.*, JCAP **2002**, no. 02, 028 (2020).

(2) 研究の特色・独創的な点

次の項目について記載してください。

- ①これまでの先行研究等があれば、それらと比較して、本研究の特色、着眼点、独創的な点
- ②国内外の関連する研究の中での当該研究の位置づけ、意義
- ③本研究が完成したとき予想されるインパクト及び将来の見通し

① 先行研究との比較・本研究の独創的な点 現在宇宙のインフレーション機構について観測的に明らかになることは一段落し、この先には理論的にも観測的にも新たな視点が必要となっている。その中で申請者はストカスティック形式と δN 形式を組み合わせ曲率ゆらぎを非摂動的に計算できるようにし、複雑な模型の直接解析や、PBH 等大きなゆらぎが絡む物理も問題なく取り扱うことができるようになった。この形式の提唱者として 実際には様々な模型に適用すること、大きなゆらぎを作り PBH 形成を議論すること、そして非ガウス性等の多様な観測量に拡張することが本研究の独創的な点である。

② 当該研究の位置づけ・意義 ストカスティック形式については申請者の研究の後にフランスの Vennin 博士が理論的に整備し、その後イギリスの Wands 教授らにより PBH への応用や ([14] 等)、オランダの Prokopec 教授らにより SR 近似を超えた適用などが議論され ([15] 等)、さらに再び申請者が数値的整備を進めることで、世界的な研究分野として芽吹きつつある。これをさらに推し進め大きな流れにすることは重要課題である。超弦理論からの示唆や PBH、さらに重力波も絡み、本研究は理論とこれからの観測をつなぐ架け橋としても位置づけられる。

③ 予想されるインパクトおよび将来の見通し 本研究は世界的にも注目されており、完成した際にはストカスティック形式を適用した様々なインフレーション模型の解析や、未知のインフレーション機構の提唱、ストカスティック形式を通した加速時空における量子ゆらぎの理論的研究など、様々な研究が派生すると期待される。より正確な PBH 量の見積もり方法としてもストカスティック形式が定着する。さらに重力波観測から得られる初期宇宙の情報を網羅的に整備することで、初期宇宙の理論的研究だけでなく、日本および世界における重力波観測計画をより一層促進することができるであろう。

[14] C. Pattison, V. Vennin, H. Assadullahi and D. Wands, JCAP **1710**, 046 (2017). [15] T. Prokopec and G. Rigopoulos, arXiv:1910.08487 [gr-qc].

(3) 外国で研究することの意義（派遣先機関・指導者の選定理由）

①申請者のこれまでの研究と派遣先機関（指導者）の研究との関連性について記述してください。

②国内外の他研究機関（研究者）と派遣先機関（指導者）とを比較し、派遣先で研究する必要性や意義について明らかにしてください。

（フィールドワーク・調査研究を行う場合、派遣先地域で研究する必要性や意義を中心に述べても構いません。）

① 研究関連性

前項までに説明してきたとおり、申請者はこれまでインフレーション宇宙に対するストカスティック形式や原始ブラックホール (PBH)、また大きな初期曲率ゆらぎ由来の背景重力波などの研究を行ってきた。一方受入研究者である Matarrese 教授はストカスティック形式の黎明期から研究を重ね ([6] 等)、その物理に精通している。受入にあたっての連絡交換によれば、現在も我々とは独立にストカスティック形式の非ガウス性への応用の研究立ち上げを考えていたようである。同研究室の Bartolo 教授はゆらぎの非ガウス性や大小スケール相関に詳しく ([16] 等)、特に CMB や銀河ハローなどの実際の観測量に結びつける研究を多く行ってきた。両教授ともインフラトンとゆらぎを作る場が異なるカーバトン模型や、時空が非等方なインフレーションなど、多様なインフレーション模型の現象論に詳しく ([17] 等)、これらに対し観測から示唆を与える研究も行ってきた。また PBH にも精通しており、PBH 量と初期曲率ゆらぎのパワースペクトルを結びつける研究をまとめるなどしている [18]。最近まで両教授は Planck 計画の理論グループとして CMB の解析を行い [1]、特にゆらぎの非ガウス性の理論と観測の関係をまとめた ([19] 等)。現在は LISA 計画の理論グループに携わり [20]、非ガウス性の研究を重力波観測にまで拡張している。

以上のように申請者と受入研究者の研究内容の関連性は深い。例えばストカスティック- δN の定式化においては Matarrese 教授の協力が重要であるし、具体的なインフレーション模型への適用や PBH 形成模型の探索、さらにはそれらの模型の観測的示唆について研究するには、両教授のインフレーション現象論に対する豊富な経験が手助けとなるだろう。LISA 衛星における重力波観測に関しては Bartolo 教授の指導が不可欠である。またパリティを破った重力波の生成などに関しては、同大学の Peloso 教授の協力も仰げると期待される。

② 派遣の意義

①で述べたように受入先であるパドヴァ大学と申請者の研究内容の親和性は、他研究機関と比べてはるかに高い。特にストカスティック形式に関して、Matarrese 教授がストカスティック形式に精通しているというだけでなく、現在ヨーロッパで根付きつつあるストカスティック- δN の研究の流れを確実なものとするためにも、パドヴァ大学は重要な拠点となる。地理的にフランスと近いため、現共同研究者との研究をさらに円滑にする側面もある。日本人研究者としては LISA 計画の研究に携わることも重要である。両教授とともに LISA 計画に関わる研究を経験することで、その後の日本の重力波望遠鏡衛星計画である DECIGO 等に対しても活かすものを得ることができるであろう。DECIGO の理論グループとしては黒柳博士が研究を進めているが ([21] 等)、現在博士はスペインのマドリード大学に滞在しており、やはりヨーロッパにいてことで連携が取りやすい。さらに PBH と重力波の関係についてはスイス・ジュネーブ大学の Riotto 教授のグループでも活発に研究されている ([22] 等)。以上の状況よりパドヴァ大学は申請者の研究拠点として最もふさわしいと言える。

[16] N. Bartolo *et al.*, Phys. Dark Univ. **13**, 30 (2016). [17] N. Bartolo, S. Matarrese and A. Riotto, Phys. Rev. D **69**, 043503 (2004) [18] A. Kalaja, N. Bellomo, N. Bartolo, D. Bertacca, S. Matarrese, I. Musco, A. Raccanelli and L. Verde, JCAP **1910**, no. 10, 031 (2019). [19] N. Bartolo, E. Komatsu, S. Matarrese and A. Riotto, Phys. Rept. **402**, 103-266 (2004). [20] N. Bartolo *et al.*, JCAP **1612**, 026 (2016). [21] S. Kuroyanagi, K. Nakayama and J. Yokoyama, PTEP **2015**, no. 1, 013E02 (2015). [22] V. De Luca, G. Franciolini and A. Riotto, arXiv:2001.04371 [astro-ph.CO].

(4) 人権の保護及び法令等の遵守への対応

本欄には、研究計画を遂行するに当たって、相手方の同意・協力を必要とする研究、個人情報の取扱いの配慮を必要とする研究、生命倫理・安全対策に対する取組を必要とする研究など法令等に基づく手続きが必要な研究が含まれている場合に、どのような対策と措置を講じるのか記述してください。例えば、個人情報を伴うアンケート調査・インタビュー調査、国内外の文化遺産の調査等、提供を受けた試料の使用、侵襲性を伴う研究、ヒト遺伝子解析研究、遺伝子組換え実験、動物実験など、研究機関内外の情報委員会や倫理委員会等における承認手続きが必要となる調査・研究・実験などが対象となりますので手続きの状況も具体的に記述してください。また、既に海外において研究を開始している者で、当該国の法令等に基づく手続きが必要な研究が含まれている場合は、その対策と措置をどのように講じているのかを記述してください。

なお、該当しない場合には、「該当しない」と記載してください。

本研究は該当しない。

4. 研究遂行能力

研究を遂行する能力について、これまでの研究活動を踏まえて述べてください。これまでの研究活動については、網羅的に記載するのではなく、研究課題の実行可能性を説明する上で、その根拠となる文献等の主要なものを適宜引用して述べてください。本項目の作成に当たっては、当該文献等を同定するに十分な情報を記載してください。

具体的には、以下(1)～(6)に留意してください。

- (1) 学術雑誌等（紀要・論文集等も含む）に発表した論文、著書（査読の有無を区分して記載してください。査読がある場合、採録決定済のものに限ります。）
著者、題名、掲載誌名、発行所、巻号、pp 開始頁～最終頁、発行年を記入してください。
- (2) 学術雑誌等又は商業誌における解説、総説
- (3) 国際会議における発表（口頭・ポスターの別、査読の有無を区分して記載してください）
著者、題名、発表した学会名、論文等の番号、場所、月・年を記載してください。（発表予定のものは除きます。ただし、発表申し込みが受理されたものは記載してもかまいません。）
- (4) 国内学会・シンポジウム等における発表
(3)と同様に記載してください。
- (5) 特許（申請中、公開中、取得を明記してください。ただし、申請中のもので詳細を記述できない場合は概要のみ記載してください。）
- (6) その他（受賞歴等）

申請者はこれまで計 17 報の学術論文と、23 件の国際会議、および 10 件の国内会議での発表を行ってきた。また国内外の研究機関で計 20 件（うち 5 件が招待）のセミナー講演を行っている。今回の受入先であるパドヴァ大学の理論物理グループにもセミナー発表で訪れ、Matarrese 教授や Bartolo 教授と議論を行った。特筆すべきは国を超えた研究活動経験であり、申請者は学生のころから外国人とともに共同研究を行い ((1)-5, 6), 2017 年度にはフランスのパリ天体物理学研究所 (IAP) にポスドク研究員として雇用され研究を行った ((1)-2)。現在も引き続きフランスの共同研究者と日々オンラインで研究を進めており、フランスでの国際研究会の開催協力 ((3)-1) も行っている。こうした国際連携活動が評価され、今年発足したフランス日本の 2 国間連携企画 “NECO” ではサイエンスメンバーに選定された。また 2019 年にはブラジル日本の 2 国間研究会 “FAPESP-JSPS Workshop on dark energy, dark matter, and galaxies” にて若手代表発表者として選出されサンパウロ大学にて発表を行った ((3)-2)。他にも学術振興会特別研究員 PD, DC2 や科研費若手研究に採択され、宇宙線研究所にて発表賞を受賞し、また多数の学術雑誌から論文の査読依頼を受けてきた（詳細は (6) 参照）。このような客観的評価は、特に海外においても申請者が様々な研究者とともに研究課題を遂行し成果を上げることができる十分な根拠である。

(1) 学術雑誌（紀要・論文集等も含む）に発表した論文及び著書

（査読有り）

1. Y. Tada and S. Yokoyama, “Primordial black hole tower: Dark matter, earth-mass, and LIGO black holes,” Phys. Rev. D **100**, no.2, 023537 (2019).
2. L. Pinol, S. Renaux-Petel and Y. Tada, “Inflationary stochastic anomalies,” Class. Quant. Grav. **36**, no.7, 07LT01 (2019).
3. T. Fujita, R. Namba and Y. Tada, “Does the detection of primordial gravitational waves exclude low energy inflation?,” Phys. Lett. B **778**, 17-21 (2018)
4. K. Inomata, M. Kawasaki, K. Mukaida, Y. Tada and T. T. Yanagida, “Inflationary primordial black holes for the LIGO gravitational wave events and pulsar timing array experiments,” Phys. Rev. D **95**, no. 12, 123510 (2017).
5. Y. Tada and V. Vennin, “Squeezed bispectrum in the δN formalism: local observer effect in field space,” JCAP **02**, 021 (2017).
6. M. Kawasaki, A. Kusenko, Y. Tada and T. T. Yanagida, “Primordial black holes as dark matter in supergravity inflation models,” Phys. Rev. D **94**, no.8, 083523 (2016).
7. M. Kawasaki and Y. Tada, “Can massive primordial black holes be produced in mild waterfall hybrid inflation?,” JCAP **08**, 041 (2016).
8. Y. Tada and S. Yokoyama, “Primordial black holes as biased tracers,” Phys. Rev. D **91**, no.12, 123534 (2015).
9. T. Fujita, M. Kawasaki, Y. Tada and T. Takesako, “A new algorithm for calculating the curvature perturbations in stochastic inflation,” JCAP **12**, 036 (2013).

他 8 報

(研究遂行能力の続き)

(2) 学術雑誌等又は商業誌における解説・総説 なし

(3) 国際会議における発表

(□頭・招待)

1. T. Fujita, L. Pinol, S. Renaux-Petel, Y. Tada, J. Tokuda, and V. Vennin, "Stochastic formalism and curvature perturbation", 3-day workshop: INFLATION AND GEOMETRY, Institut d'Astrophysique de Paris, 2019 年 6 月

(□頭・査読有り)

2. K. Inomata, M. Kawasaki, A. Kusenko, K. Mukaida, Y. Tada, T. T. Yanagida, and S. Yokoyama, "Aspects of primordial black hole as dark matter", FAPESP-JSPS Workshop on dark energy, dark matter, and galaxies, Universidade de São Paulo, 2019 年 2 月

他 21 件

(4) 国内学会・シンポジウムにおける発表

(□頭・招待)

1. 川崎雅裕, 多田祐一郎, "Can massive primordial black holes be produced in mild waterfall hybrid inflation?", 松江素粒子物理学研究会, 島根大学, 2016 年 3 月

(□頭・査読なし)

2. 北嶋直弥, 多田祐一郎, 高橋史宜, 「極長ストカスティックインフレーション」, 日本物理学会 第 75 回年次大会, 名古屋大学 2020 年 3 月

他 8 件

(5) 特許 なし

(6) その他

職歴・フェローシップ

- 2019.04– 非常勤講師 (力学 1, 2) 大同大学
- 2018.04– 日本学術振興会特別研究員 PD 名古屋大学大学院 理学研究科 宇宙論研究室
- 2017.04– ポスドク研究員
- 2018.03 Institut d'Astrophysique de Paris, France
- 2015.04– 日本学術振興会特別研究員 DC2
- 2017.03 東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構および宇宙線研究所
- 2012.10– フォトンサイエンス・リーディング大学院
- 2017.03 東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構および宇宙線研究所

採択・受賞歴

- 2019.02 若手代表発表者 FAPESP-JSPS Workshop on dark energy, dark matter, and galaxies
- 2017.02.24 所長賞 (博士部門) 第 6 回修士博士研究発表会, 宇宙線研究所

外部資金獲得状況

- 2019–2020 科学研究費助成事業 若手研究
- JP19K14707 「ストカスティック形式で迫る重力と量子論」 1,560,000 円, 研究代表者

研究者活動

- サイエンスメンバー
International Research Network Extragalactic astrophysics and Cosmology (NECO)
 - 査読 EPJC, PTEP, JCAP, PRD, Universe
- 2014.10.01– 留学 ヘルシンキ大学 Kari Enqvist 教授
- 12.22 フォトンサイエンス・リーディング大学院のコースワーク