

## 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]。こうした 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 [3], 続く LISA などの重力波望遠鏡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。さらに重力波源となる可能性をきっかけに原始ブラックホール (Primordial Black Hole: PBH) も注目されてきている。ブラックホールは通常重い星から形成されるが、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、これを PBH と呼ぶ。逆に PBH が発見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、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** 上述した 3 つの問題を踏まえ、理論的にはインフレーションに関わる場 (インフラトンと呼ぶ) が複数相互作用し合い、さらにインフラトンの住む多様体が曲がっている場合などの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 については、PBH を形成するには大きなゆらぎ ( $\sim 1$ ) が必要になるのに対し、CMB や LSS の観測から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、PBH 形成モデルはパラメータの微細調整を必要とする不自然なものが多かった。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多数指摘されている ([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まだまだ研究途上である。

そこで私は、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その理論的整備を進めるとともに、ii) 複数場による自然な PBH 形成モデルを探り、さらに iii) 重力波観測量とインフレーション特徴量の関連づけを本研究の目的とする。

### 3. 研究目的・方法および独創性

i) ストカスティック形式: 通常インフレーションによるゆらぎは、ゆらぎのない一様背景場のまわりで摂動展開して計算されるが、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手法である [6]。そのため少なくともインフラトンのゆらぎ自体は非摂動的に計算可能である。しかしこれまではインフラトンゆらぎを観測量である (空間) 曲率ゆらぎに変換する際に摂動展開を必要としてしまっていた。そこで私は曲率ゆらぎとインフレーション持続時間を結びつける  $\delta N$  形式を応用することで、曲率ゆらぎまで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)-8). これによりアルゴリズムを適用すれば複数場においても曲率ゆらぎの自動計算が可能となり, さらに摂動展開を必要としないので PBH に必要な大きなゆらぎも制御可能となった. このストカスティック- $\delta N$  形式の研究を進めることが提唱者である私の独創的研究の 1 つである.

ii) PBH: 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 スケールのゆらぎの大きさとの差から不自然な模型になることが多い. 一方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 (4-(1)-5). 多段階インフレーションは段階のつなぎ目が相転移になることがしばしばあり, この時ゆらぎが力学を支配するので従来の摂動計算が破綻していた. しかし上述したストカスティック- $\delta N$  形式を用いればこのような場合も曲率ゆらぎを計算することができるので, ストカスティック形式を応用しながら多段階インフレーションでの PBH 形成を議論することが 2 つ目の私の独創的研究である. また私は非ガウスなゆらぎの大小スケール相関が PBH の空間分布を変動させることを指摘した (4-(1)-7). これは後述する重力波の非等方性にも関連してくる.

iii) 重力波: PBH はその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 次的に背景重力波を作ることが知られている. 興味深いのは, PBH 暗黒物質として許される PBH 質量に対応する背景重力波の周波数がちょうど LISA の感度にあたることである [7]. また上述したようにゆらぎに大小スケールの相関があると PBH と同様に 2 次重力波の強度も非等方性を持つことになり [8], その計算には (4-(1)-7) で提唱した PBH 空間分布と同種の手法が必要である. こうした 2 次重力波を介してインフレーションや初期宇宙の物理について示唆を与えることが 3 つ目の私の独創的研究である.

## ② 研究経過および得られた結果

上述したように私はストカスティック形式と  $\delta N$  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)-8). これを適用し 2 次相転移の起こ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に曲率ゆらぎを計算し, さらに PBH 形成を議論した (4-(1)-6). 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 [9], パリでの受入研究者であった Renaux-Petel 博士も交え, 現在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, 素朴な複数場への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  $\delta N$  形式においてゆらぎの大小スケール相関の計算方法を定式化し (4-(1)-4), これは上述した PBH の空間分布や 2 次重力波の非等方性などに対し重要である.

PBH に関して, 多段階インフレーションにて PBH が簡単に実現できることを指摘した (4-(1)-5) 後は, 関連する 2 次重力波を計算し (4-(1)-3), また多段階インフレーションが超弦理論とも相性がいいことを示した (4-(1)-1). 現在は 2 次重力波に関し名古屋大学同研究室所属の修士課程学生である植田氏とともに, 初期宇宙の QCD 相転移中に生成された 2 次重力波が QCD 相転移中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. Niihara, 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. Matarrese, M. A. Musso and A. Riotto, *JCAP* **0405**, 008 (2004). [7] N. Bartolo, V. De Luca, G. Franciolini, A. Lewis, M. Peloso and A. Riotto, *Phys. Rev. Lett.* **122**, no. 21, 211301 (2019). [8] N. Bartolo *et al.*, *JCAP* **2002**, no. 02, 028 (2020). [9] 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** 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完了する。定式化の論文は執筆の最終段階であるし、数値コード自体も完成はしているので、これらは着任までに達成される予定である。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。前述したように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ことになる。現在 Matarrese 教授は私とは独立にストカスティック形式での非ガウス性についての研究を立ち上げているところであり、そこに私の「 $\delta N$  形式での大小スケール相関の定式化」(4-(1)-4)の研究を組み合わせる形で、ゆらぎの非ガウス性に対しストカスティック形式という新たな側面から迫る。

また数値計算コードを様々な模型に適用し、新たなインフレーション機構や PBH 形成模型の可能性を探る。具体的には1つ目としてまず、インフラトンのポテンシャル相互作用だけでなく、その**多様体の幾何構造に運動が強く影響される模型**が挙げられる。特にパリの 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2次相転移を起こす可能性があることが指摘され [10]、以降幾何学力を使った模型はインフレーションの新たな可能性として注目されている ([11] 等)。前述したとおり2次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 とはインフラトンポテンシャルが十分平らで、ポテンシャル力と摩擦抵抗が釣り合った状態のことを指す。我々は単一場 SR 模型ではストカスティック効果が無視できることを示したが (4-(1)-8)、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、ストカスティック効果の大きさは PBH 形成の文脈でも重要である ([12] 等)。また超弦理論の文脈ではインフラトン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。我々のストカスティック形式の定式化および数値計算コードでは SR 近似を用いず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** 上述したような模型に対しストカスティック形式を適用しながら PBH 形成の可能性を探る。特に 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を作り PBH 計算に役立てる。また PBH 空間分布や2次重力波の非等方性を作るゆらぎの大小スケール相関について、Matarrese 教授との非ガウス性の研究を通し、相関を作る具体的な模型を模索する。

**3. 重力波** 受入研究室所属の Bartolo 教授とともに、特に LISA 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議論する。まずは上述したように大小スケール相関由来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) を通じ具体的な観測可能性を明らかにする。その後は非等方性に限らず、非ガウス性由来の観測量やパリティの破れ由来の重力波カイラリティなど、重力波を通して初期宇宙に関する情報を得る可能性を模索する。

#### ② 年次計画

**1年目** 初年度はストカスティック- $\delta N$  の非ガウス性への拡張と LISA の重力波角度パワースペクトル検出能力の解析の研究に集中する。余裕があればストカスティック- $\delta N$  をゆらぎの確率分布の裾の計算に

(研究目的・内容の続き)

拡張し, PBH 量の正確な見積もりを定式化する研究を行う. ストカスティック形式に関わる 2 つの研究はすでに私自身多くの経験を持っており, スムーズに行えるはずである. 重力波解析に関しては Bartolo 教授の助けを借りながら遂行したい.

**2 年目** 次年度には残った研究, すなわちストカスティック- $\delta N$  の様々なインフレーション模型 (特に幾何学的力が働く模型と SR 条件の破れた模型) への適用, 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.

### 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. 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.

[10] S. Renaux-Petel and K. Turzyński, Phys. Rev. Lett. **117**, no. 14, 141301 (2016). [11] A. R. Brown, Phys. Rev. Lett. **121**, no. 25, 251601 (2018). [12] J. M. Ezquiaga and J. García-Bellido, JCAP **1808**, 018 (2018).

## (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

### ② 当該研究の位置づけ

### ③ 予想されるインパクト

### (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

#### ② 派遣の意義

#### (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)-3, 4）、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 IAP の共同研究者と日々オンラインで研究を進めたり、フランスでの国際研究会の開催協力（(3)-1）を行ったりしている。こうした国際連携活動を買われ、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ばれた。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ている。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. 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).
4. Y. Tada and V. Vennin, “Squeezed bispectrum in the  $\delta N$  formalism: local observer effect in field space,” JCAP **02**, 021 (2017).
5. 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).
6. M. Kawasaki and Y. Tada, “Can massive primordial black holes be produced in mild waterfall hybrid inflation?,” JCAP **08**, 041 (2016).
7. Y. Tada and S. Yokoyama, “Primordial black holes as biased tracers,” Phys. Rev. D **91**, no.12, 123534 (2015).
8. 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 9 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