

# 宇宙インフレーション期に、私たちは本当に隣人から孤立していたのか？

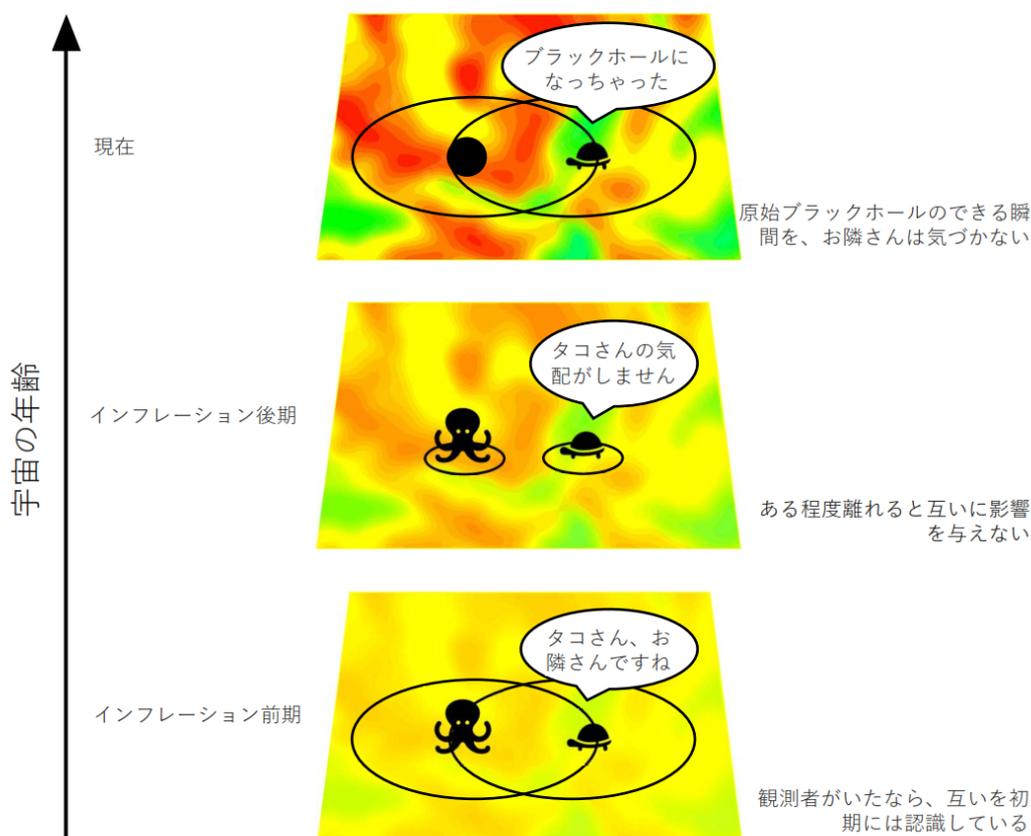
## 概要

初期宇宙、すなわちビッグバン直後の時代において、宇宙が指数関数的な膨張を遂げたインフレーション<sup>注1</sup>期を経たとする説が広く受け入れられています。このインフレーション期には、量子ゆらぎ<sup>注2</sup>が増幅され、その後、重力的に崩壊して原始ブラックホール（PBH）を形成する可能性があります。

PBH の形成を予測するために、広く用いられている理論的枠組みの一つが「セパレートユニバース近似」と呼ばれるものです。この手法では、インフレーション宇宙を、一様宇宙のパッチワークとして記述します。計算を大幅に簡略化できる利点がありますが、ゆらぎを大きく増幅する超スローインフレーションモデル<sup>注3</sup>に適用すると大きなエラーが生じると考えられていました。

この問題に対し、京都大学大学院理学研究科の田中貴浩教授と日本学術振興会（JSPS）特別研究員 Danilo Artigas 博士、北京大学の Shi Pi 教授からなる共同研究グループは、各一様宇宙に空間曲率を持たせられるように定式化を拡張することで解決できることを示し、より広範なモデルに「セパレートユニバース近似<sup>注4</sup>」が適用できることを明らかにしました。これにより、PBH の形成量を簡便、かつ、正確に予測する手法が提供されます。

本研究成果は、2025年6月3日に、国際学術誌『Physical Review Letters』に掲載されました。



インフレーション中に、量子ゆらぎが増幅される様子を模式的に表しています。赤い領域は高密度領域を、黄色い領域は低密度を表しています。極端な高密度領域はブラックホールに崩壊し、原始ブラックホールを形成する可能性があります。

## 1. 背景

本プロジェクトは、昨年 2 月に基礎物理学研究所で開催された国際滞在型研究会"Gravity and Cosmology 2024"での議論を契機とする共同研究です。出発点となったセパレートユニバース近似が大きく破れる例について招待講演者である David Wands 氏が講演し、多くの人が何故近似が破れているのかに関心を寄せていました。

## 2. 研究手法・成果

本研究は純粋に解析的手法に基づいています。例を示す上で数値計算も用いていますが、その点は本質ではありません。解析の手法は 1998 年の本学名誉教授である佐々木節氏と田中による論文 (*Prog.Theor.Phys.* 99 (1998) 763)中で発展させたセパレートユニバース近似を基礎としています。本研究は、四半世紀の時を経て、セパレートユニバース近似の更なる拡張に成功したものと位置づけられます。

## 3. 波及効果、今後の予定

本研究の成果は PBH の形成量を正確に見積もる上で、基礎となる考え方を与えるものです。 $\delta N$  フォーマリズムの応用は多くの可能性を秘めていますが、必ずしもそのすべてが引き出されているわけではありません。近年、ダークマターの候補としてや、重力波源としての PBH が盛んに議論されるようになってきました。一方で、PBH 形成の副産物として重力波生成が付随することが認識され、重力波検出技術の進展とともに、PBH 形成に関してもより精密な議論が必要となっており、今後の研究の進展が期待されます。

## 4. 研究プロジェクトについて

本研究は、以下の支援を受けて行われました。

- ・ YITP long-term workshop "Gravity and Cosmology 2024,"
- ・ National Key Research and Development Program of China Grants No. 2021YFC2203004, No. 12475066 and No. 12447101
- ・ World Premier International Research Center Initiative (WPI Initiative)
- ・ JSPS Grant-in-Aid for Scientific Research Grants No. JP23KF0247, No. JP24K00624, No. JP23H00110, No. JP20K03928, No. JP24H00963, and No. JP24H01809

### <用語解説>

#### インフレーション：

宇宙の膨張速度が増加する加速度膨張の時期をインフレーションとよびます。標準宇宙論では、この加速膨張期の存在により、現在の宇宙がほぼ一様等方であることや、豊富な物質を宇宙が湛えることができる大きさを持てるようになったこと等が説明されます。

#### 量子ゆらぎ：

量子力学によると、全ての力学的な自由度には量子ゆらぎが不可避免的に付随します。位置と運動量(質量×速度)を同時に正確に決定することができないという不確定性原理は、この不可避免的な量子ゆらぎの現れです。インフレーション宇宙には、この量子ゆらぎを比較的大きな古典的ゆらぎへと成長させる仕組みが備わっており、銀河や星へと成長する初期密度ゆらぎを与えたと考えられています。

### 超スローインフレーションモデル：

インフレーション期が終わらなければ、現在の宇宙を創造できません。そのため、時計の役割をする自由度（インフラトン）が必要で、やがて時が来れば加速膨張が終わるというインフレーションモデルが標準的です。この時計の進みがひどくゆっくりになる時期があるインフレーションモデルを超スローインフレーションと呼びます。超スローインフレーションがあると対応するスケールのゆらぎが増幅され PBH が形成される可能性が高まります。

### セパレートユニバース近似：

インフレーション中のゆらぎの時間発展を調べるには、非線形方程式を解かなければなりません。大規模シミュレーションに頼らずに理論予測を得るには近似が必要です。セパレートユニバース近似は十分長波長のゆらぎに対して空間微分が無視できる、つまり、周囲がどうなっているかが無関係になるインフレーション宇宙の性質を利用して、空間の各点の時間発展を一様等方宇宙モデルによって近似する手法です。

### <研究者のコメント>

「この拡張されたセパレートユニバースアプローチを用いることで、初期宇宙に生成される原始ブラックホール量のモデル依存性を容易に予測できるようになりました。将来的には、様々なインフレーションモデルの観測制約との比較によるテストに利用されることを期待しています。」(Danilo Artigas)

### <論文タイトルと著者>

タイトル：Extended  $\delta N$  Formalism: Nonspatially Flat Separate-Universe Approach (拡張 $\delta N$ 形式：空間的に非平坦な独立宇宙アプローチ)

著者：Danilo Artigas, Takahiro Tanaka, Shi Pi

掲載誌：Phys. Rev. Lett. DOI：10.1103/PhysRevLett.134.221001