

# 宇宙創成「インフレーション」の謎に迫る

～簡単かつ直観的な方法で原始重力波の計算が可能に～

## 本研究成果のストーリー

### ● Question

ビッグバン宇宙が始まる前にインフレーションという急速な加速膨張期があったと考えられていますが、その全体像はまだ分かっていません。インフレーションを説明する理論と観測を比較することでどのモデルが正しいか検証できます。この検証で重要となるのが原始宇宙で作られた時空のさざ波、原始重力波ですが、その理論計算は多くの場合とても複雑でした。

### ● Findings

宇宙をモザイクアートのように捉え直す分割宇宙アプローチを応用し、原始重力波の計算を大幅に簡単化できました。これによりこれまで複雑な数値計算が必要だったモデルでも簡単な手計算で重力波を予言できるようになりました。

### ● Meaning

これまで解析が難しかったモデルも含めて多様な宇宙モデルの理論予言を計算できるようになり、重力波観測による創成直後の宇宙の解明につながると期待されます。またこの手法は原始重力波の生成機構を直観的に理解する際にも役立つことを例示しました。



120文字  
サマリー

創成直後の超高エネルギーの宇宙で作られた原始重力波を検出することで宇宙創成の謎の解明につながると期待されています。宇宙の空間分布をモザイクアートのように理解することで、これまで非常に複雑だった原始重力波の計算を劇的に簡単化できました。

## 概要

宇宙の創成直後に、非常に高い真空のエネルギーにより宇宙が急激な加速膨張していた時期（インフレーション）を経てビッグバンが起こったと考えられています。この理論は、宇宙の観測を通じて原始宇宙の密度の濃淡（原始密度揺らぎ）を調べる研究によって検証されてきました。しかし、具体的に何が急激な加速膨張を引き起こした駆動源だったのかその全体像はまだ分かっていません。加速膨張宇宙を説明する多くの理論（インフレーションモデル）が提案されており、各モデルの理論的な予言と最新の観測を比較することによってどのモデルが正しいか検証することができます。

インフレーション期間中には原始密度揺らぎと同様に量子効果を通じて原始重力波と呼ばれる時空のさざ波が作られます。原始重力波にはインフレーションを引き起こした真空のエネルギーの大きさなどその模型に関する重要な情報が刻まれていると考えられています。しかし原始重力波を模型ごとに見積もる理論計算は一般にとっても複雑で、インフレーション模型を特定する障壁となっていました。特に非線形効果と呼ばれる微小な効果が異なる模型を区別する上で重要となりますが、原始重力波の非線形効果を計算するには多くの場合コンピュータを使った計算が必要なため、原始重力波の理論研究は一部の簡単な模型に限定されていました。

原始重力波に比べ理論研究が進んでいる原始密度揺らぎについては、非一様な宇宙の空間分布をモザイクアートのように粗視化して捉え直す分割宇宙アプローチという簡単な計算方法が1990年代に確立され、幅広く用いられています。この方法では、時間と空間に依存した宇宙の進化を時間だけに依存した発展方程式を使って記述することで、計算が飛躍的に簡単になります。一方で重力波については分割宇宙アプローチを用いた計算手法がわかっていませんでした。今回の研究では、密度揺らぎの簡単な計算方法の確立以降四半世紀以上に渡って閉ざされていた扉を開け、分割宇宙アプローチを使った原始重力波の計算手法を初めて確立し、複雑な数値計算によらずに幅広いインフレーション模型を調べることを可能にしました。分割宇宙アプローチは宇宙の進化を直観的に理解する際にも役立つため、原始重力波の時間進化の過程についての理解を深化できると期待されます。

原始重力波は宇宙背景放射と呼ばれる宇宙のあらゆる方向から飛来する光の偏光を調べることで検出でき、その重要性から多くの観測計画が提案されています。今回開発された分割宇宙アプローチを使うことで、これまで解析が難しかった模型も含めて多様な宇宙模型で予言される原始重力波を計算できるようになるため、重力波検出を通じた創成直後の宇宙の全体像を明らかにし、ひいては加速器実験では検証できない超高エネルギーの世界の物理法則の解明に繋がると期待されます。

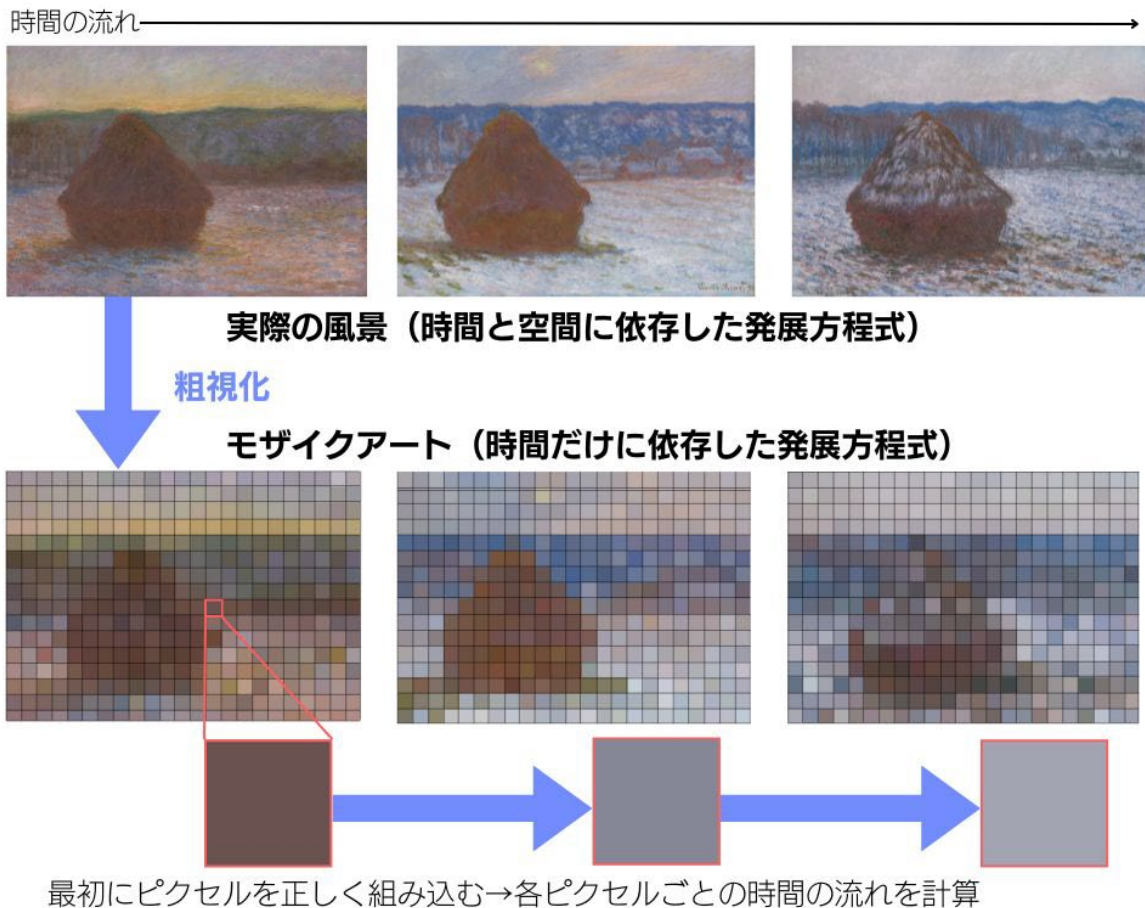


図1：分割宇宙アプローチのイメージ。実際の宇宙は上段のように場所ごとに異なる非一様な空間分布をもつため、宇宙の進化を解くには時間と空間に依存した方程式を解く必要があります。これを下段のモザイクアートのように粗視化することで、時間だけの方程式を単色の各ピクセルごとに解きます。

## 研究グループ

この研究は京都大学理学研究科の田中貴浩教授と高エネルギー加速器機構（KEK）の浦川優子准教授（兼 名古屋大学素粒子宇宙起源研究所（KMI）特任准教授）の共同研究によって行われました。

## 研究者からひとこと



KEKの浦川優子准教授（兼 KMI 特任准教授）

分割宇宙アプローチを使うと、これまでコンピュータで行われていた原始重力波の計算でも、簡単な手計算で行えるようになります。

## なぜこの研究を始めたのですか

宇宙創世直後の加速膨張期であるインフレーション※1 期間中は、地上のあらゆる加速器実験

で到達可能なエネルギーを凌駕する非常に高い真空のエネルギーで宇宙が占められていた可能性が高いと考えられています。インフレーションモデルを調べることは、超弦理論に代表される超高エネルギーの世界の物理法則を与える理論の検証につながると期待されています。インフレーション期間中には微視的な世界の量子揺らぎ※2が急速な加速膨張によって引き伸ばされ、宇宙の空間分布を決める巨視的な揺らぎとなります。

このような巨視的な揺らぎには原始密度揺らぎと時空のさざ波である原始重力波※3があります。インフレーションが予言する原始密度揺らぎは宇宙背景放射や銀河分布など宇宙の様々な観測データを整合的に説明できるため、インフレーションは原始宇宙の標準的なシナリオとして広く受け入れられるようになりました。一方で原始重力波の確定的な観測は現在のところありませんが、原始重力波を探索するいくつかの実験事業が進行中で検出への期待が高まっています。原始重力波が観測されればインフレーション宇宙のエネルギースケールなど原始宇宙モデルの理解が飛躍的に進むと考えられています。原始重力波の観測を原始宇宙の理解へとつなげるためには、高エネルギー基礎理論が予言する多様なインフレーションモデルでどのような原始重力波が作られるか理論的に予言する必要があります。

方向依存性が単純な密度ゆらぎに比べ、時空間の動的な歪みを表す重力波の計算は複雑で、単純なモデルを除き一般には複雑な数値計算が必要でした。特にインフレーションモデルを特定する上で重要な非線形効果と呼ばれる小さな揺らぎが相互に影響しあって生まれる効果の計算は一部のモデルに限定されていました。このことが幅広いモデルで原始重力波の計算を行う障壁となっていたため、一般的なモデルで原始重力波を簡単に計算する方法はないかと考えました。

#### ※1. 宇宙インフレーション

宇宙創成直後に急速な加速膨張があったと仮定するとビッグバン宇宙の空間的均質性や磁気単極子の問題を解決できるとして1981年に佐藤勝彦、アラン・グースらによって提案されました。インフレーションを引き起こすスカラー場の量子的な揺らぎにより原始宇宙は空間の場所ごとに異なる密度揺らぎを持ちます。インフレーションモデルが予言する原始宇宙における密度の空間分布を初期条件として宇宙の構造の進化計算を行うと、宇宙背景放射（宇宙のあらゆる方向から飛来する光）や暗黒物質などの観測を整合的に説明できることが、様々な観測プロジェクトによって確かめられています。

#### ※2. 量子揺らぎと原始密度揺らぎ

不確定性関係に基づき量子的な場は定まった値ではなく微小な揺らぎを持ちますが、この揺らぎを量子揺らぎと呼びます。インフレーションシナリオでは、加速膨張を引き起こしたスカラー場の量子揺らぎが原始宇宙における場所ごとに異なる密度の濃淡を作り出したと考えられており、この密度の濃淡を原始密度揺らぎと呼びます。

### ※3. 原始重力波

アルバート・アインシュタインが提唱した一般相対性理論は、空間の歪みが波として伝わる重力波の存在を予言します。インフレーション期間中には原始密度揺らぎと同様に、量子揺らぎを通じて重力波が作られ急速な加速膨張によって引き伸ばされます。このようにして作られた重力波を原始重力波と呼びます。

## 困難だったのはどこですか

計算を単純化するために、重力波の計算に密度揺らぎの進化計算で広く使われている分割宇宙アプローチ※4 を適用することを考えました。この方法は以前よりアイデアとしてありましたが、時空を歪ませる重力波は密度揺らぎに比べると方向依存性が複雑なため、四半世紀以上に渡り分割宇宙アプローチを用いた重力波計算は実現していませんでした。

分割宇宙アプローチでは場所ごとに異なる密度をもつ非一様な宇宙を小さく分け、同じ密度からなる小さな宇宙の集合体と捉え直します。図1に示されるように、それはあたかも無数の単色のピクセルを組み合わせて多様な色彩の絵を作り出すモザイクアートのようなものです。このように捉え直すことによって、非一様な密度揺らぎの時間発展を解く複雑な作業を、単色の各ピクセルに対応する一つ一つの分割された宇宙の時間発展を解く作業に置き換えることができます。一つ一つの分割宇宙は一樣いわば単色なのでその進化を解くには時間だけの関数からなる(常微分)方程式を解けば十分なため、劇的に進化計算のコストを下げることができます。インフレーション宇宙の詳細な空間分布を知るにはモザイクアートのように粗視化された宇宙の情報だけでは不十分ですが、宇宙の観測から確かめることができるのはインフレーション宇宙の非常に粗い精度の空間分布だけであることがわかっています。

分割宇宙アプローチを使って粗視化された宇宙の進化を正しく計算するためには、一つ一つの分割宇宙はお互いに影響し合うことなく独立に進化する必要があります。素朴に考えると、一般相対性理論のように因果律※5 が保たれる理論では一つ一つの分割宇宙の大きさを因果関係をもつ空間領域程度に調整することで、異なる分割宇宙同士が因果関係を持たないようにすることができそうです。

しかし重力が含まれる場合には状況はもう少し複雑でした。一般相対性理論の基本方程式であるアインシュタイン方程式にはいわば隣同士の宇宙の関係性を決める拘束条件(運動量拘束条件)が含まれています。この拘束条件の扱い方が不適切だと隣り合う分割宇宙を同時に解かなければならなくなり、一つ一つの分割宇宙を独立に扱うことができなくなってしまいます。隣同士の分割宇宙の関係を適切に決めるのは、方向を持たない密度揺らぎの場合は比較的簡単でしたが、空間を歪ませる重力波の場合は非常に複雑でした。このため、佐々木 - スチュワート

が分割宇宙アプローチを使った密度揺らぎの計算方法を確立して以降、四半世紀以上に渡り分割宇宙アプローチを用いた重力波計算は実現していませんでした。

#### ※4. 分割宇宙アプローチの密度揺らぎの計算への応用

分割宇宙アプローチを用いて密度揺らぎを計算する方法はデルタ N 形式と呼ばれています。1982 年にアレクセイ・スタロピンスキーが基本的なアイデアを提案し、1996 年に佐々木節 - イワン・スチュワートがデルタ形式の定式化を行い、1998 年には佐々木節 - 田中貴浩により非線形摂動論に拡張されています。それ以降、デルタ N 形式は初期宇宙研究において幅広く用いられており、具体的な応用を実現した佐々木 - スチュワートの論文は現在までに引用数が 1000 を超えています。

#### ※5. 因果律

因果律は物質や情報のあらゆる伝播速度に上限値の存在を要請します。アインシュタインが提唱した一般相対性理論ではこの上限値は光の速度で与えられます。このため有限のある時間  $\delta t$  の間に因果関係を持ちお互いに影響しあう空間の領域は、

$$(\text{光の速さ}) \times \delta t$$

で与えられる有限サイズの領域に限られます。

## ひらめいたところはどこですか

京大-KEK-名大の共同研究グループは分割宇宙アプローチを使った原始重力波計算の実現のため、隣同士の分割宇宙が影響しあってしまう原因をもう一度見直してみることにしました。その際に着目したのは問題の拘束条件を初期時刻でのみ正しく解いておけば、(他の発展方程式が正しく解かれている限り) その後の時刻でも拘束条件は自動的に満たされるということでした(2021 年に発表した論文※6)。つまりモザイクアートのピクセルを最初の時刻(図1で一番左端)に正しく配置しておけば、その後は周りのピクセルの存在を忘れて各ピクセルごとの時間進化を追えばよいとひらめきました。

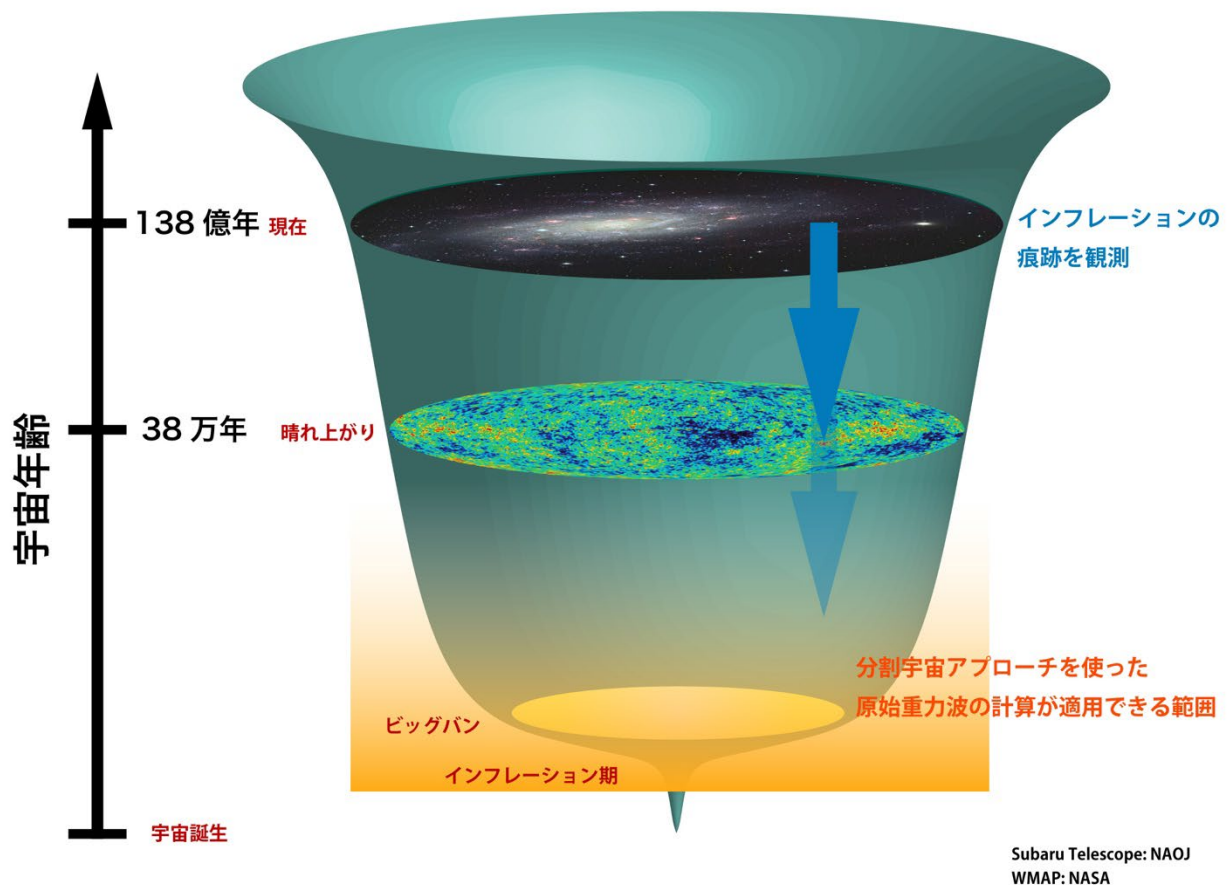


図 2 宇宙の歴史の中で分割宇宙アプローチを使った計算ができる期間

※6. 本研究の土台となった 2021 年の論文

題目： Anisotropic separate universe and Weinberg's adiabatic mode

著者：田中貴浩、浦川優子

掲載雑誌： Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 07 (2021) 051

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1475-7516/2021/07/051>

## 何がわかったのですか

2021 年の論文の成果を土台とし、今回発表された論文ではこれまでは複雑な計算によって求められていた原始重力波の振幅が非常に簡単な分割宇宙の計算から再現できることを具体的に例示しました。これにより分割宇宙アプローチを原始重力波の計算に応用できる準備が整いました。

分割宇宙アプローチを使う利点は計算の簡単化だけではなく、宇宙の進化の過程を直観的に理解する際にも役立ちます。重力波がもたらす空間の歪みには 2 つのパターンがあり、原始宇宙のモデルによってはそれぞれの大きさが異なる場合があることが指摘されていました。分割宇宙アプローチを用いることで「どのような物理過程が 2 つのパターンの重力波の大きさの違いを

もたらずのか」などの疑問に答えを与えることができます。

## それで世界はどう変わりますか

---

分割宇宙アプローチを多様な宇宙模型で予言される原始重力波の計算に用いることができるようになったことで、創成直後の宇宙そして超高エネルギーな世界の物理法則を解明することに繋がると期待されます。例えば、インフレーション宇宙では地上では作られない様々な性質（例として多様なスピン）を持つ粒子が作られていた可能性があり、それらの痕跡を探索することにより超高エネルギーの世界の物理法則を検証することができます。このような多様なスピンを持つ粒子が作り出す原始重力波の研究が進むことが期待されます。

## 謝辞

---

この研究は科学研究費助成事業である基盤研究 (A) (田中 : 23H00110)、基盤研究 (C) (田中 : 20K03928)、基盤研究(B) (浦川 : 19H01894)、国際共同研究加速(B) (浦川 : 21KK0050) 及び 科学技術振興機構創発的支援事業 (浦川 : MJFR222Y) の予算援助のもと行われました。

## 論文情報

---

題目 : Statistical anisotropy of primordial gravitational waves from generalized  $\delta N$  formalism

著者 : 田中貴浩、浦川優子

掲載雑誌 : Physical Review Letters

<https://journals.aps.org/prl/accepted/40074Y5fX0717e8843896887ae36d161c44066b3d>