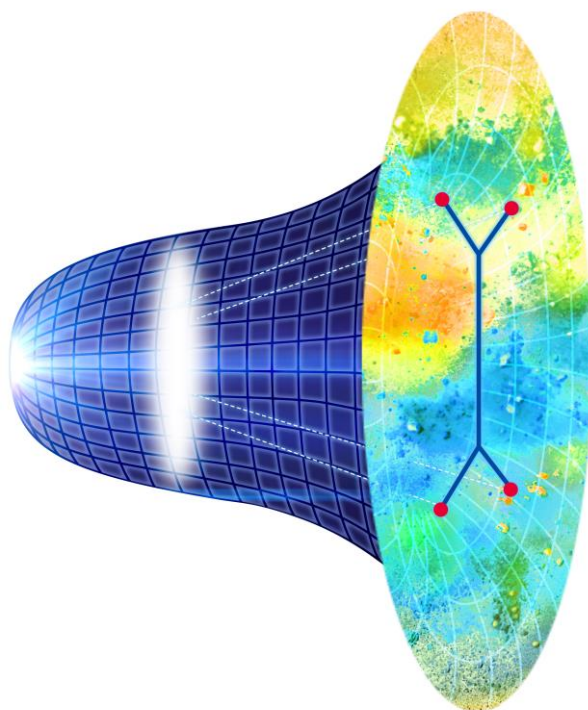


ホログラフィーによる宇宙の始まりの探索 —新手法による初期宇宙の揺らぎの相関の計算—

概要

京都大学基礎物理学研究所 疋田泰章 特定准教授、国立台湾大学物理学系 陳恒榆 教授の国際共同研究グループは、3次元重力を用いたホログラフィー^{*1}を開発し、その手法による初期宇宙の密度揺らぎ^{*2}の相関の計算に世界で初めて成功しました。初期宇宙の研究は、宇宙創成のメカニズムの理解に必須です。また、地球上の実験施設では不可能な超高温状態が実現され、その状態の理解は宇宙の構成要素の解明に非常に有用です。ただし、解析が困難であることで有名な、量子重力^{*3}の効果が強く効いてきます。近年では、量子重力の記述法としてホログラフィーが開発されていますが、初期宇宙に対しては理解があまり進んでいないのが現状です。本研究では、最近の提案をより精密にすることで、ホログラフィーを用いた初期宇宙の密度揺らぎの相関の計算に成功しました。今は単純化したモデルを解析している段階ですが、将来的には現実の宇宙における研究に幅広く応用できると考えています。

本成果は、2022年8月3日（現地時刻）に米国の国際学術誌「Physical Review Letters」にオンライン掲載されました。



ホログラフィーを利用した低次元の物質場の理論による、初期宇宙における密度揺らぎの相関の計算の概念図

初期宇宙の密度揺らぎの相関は、宇宙創成のメカニズムの理解や、宇宙の構成物質の解明に非常に重要である。本研究では、初期宇宙における量子重力により直接解析するのではなく、ホログラフィーにより低次元の物質場の理論に帰着させて計算を遂行した。

1. 背景

私たちの宇宙は、指数関数的に膨張する時期を経て始まったと考えられています。膨張宇宙は、正の宇宙項をもつアインシュタイン方程式^{※4}の解である、ドジッター時空^{※5}で近似できます。初期宇宙の研究には、少なくとも次の2つの意義があります。1つ目として、宇宙がどのように始まったかの理解につながります。2つ目として、宇宙の構成要素が何であるかを明らかにできます。宇宙初期に実現される超高温状態を利用することで、地球上の実験施設では得られない情報が手に入ります。そのような状況下では、重力理論の量子効果が重要となってきます。ところが、膨張宇宙における量子重力は、ほとんど理解されていないのが現状です。本研究の目標は、ホログラフィーという手法を利用することで、初期宇宙の性質を調べることにあります。ホログラフィーは、難解な量子重力をより扱いやすい物質場の理論に帰着できる画期的な手法です。実際、ここ20年以上に渡り、量子重力や量子場の理論に関する研究分野の中心的な話題であり続けています。ただし、負の宇宙項をもつアインシュタイン方程式の解である、反ドジッター時空^{※5}での解析が中心で、膨張宇宙を表すドジッター時空に関してはほとんど理解されていませんでした。最近、著者の一人を含む研究グループが、3次元ドジッター重力によるホログラフィーを提唱しました。その提案をより精密なものとする中で、初期宇宙の性質を導き出せるのではないかと。より具体的には、初期宇宙の密度揺らぎの相関が計算できるのではないかと。このように考え、本研究のプロジェクトの設立に至りました。

2. 研究手法・成果

膨張宇宙でのホログラフィーを開発し、初期宇宙の密度揺らぎの相関を計算するのが、本研究の目的です。ところが、膨張宇宙でのホログラフィーは、ほとんど理解されていませんでした。具体例が少なく、抽象的な議論しかできなかつたのが、原因のひとつと考えられます。実際、3次元ドジッター重力に関する提案の以前には、その他に1つしか具体例が存在していませんでした。本研究では、ホログラフィーにより初期宇宙の密度揺らぎの相関を計算する具体的な処方箋を確立し、3次元ドジッター重力に関するホログラフィーを計算可能なものに精密化しました。ホログラフィーは、反ドジッター時空での重力理論に対し、1997年に具体的に構成されました。さらにその後の研究により、大きな発展が為されてきました。同様に、宇宙背景でのホログラフィーによる計算手法も、2002年に提唱されています。ただし、当時は具体例がひとつもなく、抽象的な議論に終わっています。

本研究では、その後の発展や具体例を利用することで、初期宇宙の密度揺らぎの相関を計算する処方箋を完成させました。また、3次元ドジッター重力に関するホログラフィーは、反ドジッターの場合から解析接続で構成できます。本研究では、その解析接続の仕方を系統的なものにすることで、ホログラフィーによる初期宇宙の密度揺らぎの相関の計算に成功しました。この結果は、膨張宇宙に関するホログラフィーの理解、初期宇宙の新たな解析手法の構築、両方に関して重要な意義を持つと考えています。

3. 波及効果、今後の予定

本研究では、3次元ドジッター時空でのホログラフィーを応用することで、初期宇宙における密度揺らぎの相関の計算を実行しました。その他にも、宇宙の理解につながる重要なアプローチがあります。その中でも、エントロピーと量子重力効果の2つに注目するつもりです。私たちの宇宙にはブラックホールが存在し、最近の観測結果により大きな注目を集めています。ブラックホールにはホライズン^{※7}に付随するエントロピーが存在し、その起源を説明することは量子重力に課された重大な使命です。同様に、膨張宇宙にもホライズンがあり、私たちはその内側しかアクセスできません。そのホライズンにも付随するエントロピーが存在します。ホ

ログラフィーを利用することで、そのエントロピーの起源を明らかにしたいと考えています。

また、私たちのホログラフィーによる解析手法では、量子的な効果を比較的容易に解析することができます。重力の量子効果を系統的に調べ、量子効果に付随する様々な謎の解明に取り組むつもりです。本研究では、3次元ドジッター重力という単純化したモデルを取り扱いました。この研究を4次元の私たちの宇宙へと拡張し、実際の宇宙の始まりに何が起きたのを明らかにすることが、今後の課題として非常に重要です。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、日本学術振興会 科学研究費助成事業 基盤研究 (B)「高階スピン重力とゲージ/重力対応による超弦理論の研究」(研究代表者: 疋田泰章、課題番号: 19H01896)、同 科学研究費補助金 学術変革領域研究 (A)「極限宇宙の物理法則を創る - 量子情報で拓く時空と物質の新しいパラダイム」(領域代表者: 高柳匡、課題番号: 21H05187)、同 科学研究費補助金 基盤研究 (A)「量子情報理論を用いた超弦理論の研究」(研究代表者: 高柳匡、課題番号: 21H04469)、Ministry of Science and Technology (MOST) grant 1110-2112-M-002-006- の支援を受けて行われました。

<用語解説>

※1 **ホログラフィー**: ホログラフィー (ホログラフィック原理) とは、高次元の重力理論を低次元の重力を含まない物質場の理論で記述する手法のことです。3次元像を2次元に埋め込む技術にちなんで、一般にホログラフィーと呼ばれます。

※2 **初期宇宙の密度揺らぎ**: 宇宙には約 3K のマイクロ波背景放射が存在し、その密度揺らぎは初期宇宙の量子揺らぎに起因しています。したがって、密度揺らぎの相関の解析から、初期宇宙で何が起こったのかを明らかにできます。

※3 **量子重力**: 重力は、大きなスケールでは、一般相対論で記述できます。一方物質や電磁力は、小さなスケールでは、量子効果が効いてきます。重力でも、宇宙の始まりなど小さなスケールでは、量子効果が大きく効いてくると考えられます。量子効果まで含んだ重力を、量子重力と呼びます。ただし、物質や電磁力と比較すると、重力における量子効果の理解はかなり遅れています。

※4 **宇宙項をもつアインシュタイン方程式**: 時空の構造を与える計量の満たすべき方程式を、アインシュタイン方程式と呼びます。その方程式には宇宙項として知られる項があり、その起源の有力候補としてダークエネルギーがあげられます。正の宇宙項は正のダークエネルギーに対応し、負の宇宙項は負のダークエネルギーに対応します。

※5 **ドジッター時空、反ドジッター時空**: ドジッター時空は、正の宇宙項をもつアインシュタイン方程式の解であり、宇宙の初期に現れる膨張宇宙を近似的に表します。一方、反ドジッター時空は、負の宇宙項をもつアインシュタイン方程式の解であり、ブラックホールのホライズン近傍に現れます。ホログラフィーの典型的な例であるゲージ重力対応では、主に反ドジッター時空が取り扱われます。

※6 **ホライズン**: 私たちが光で観測できる領域には、限界があります。ブラックホール近傍では重力が強く、光が吸い込まれて脱出できません。また初期宇宙では、宇宙膨張が光の速さを超えてしまう領域があります。そのような、光で観測できる領域の限界を、ホライズンと呼びます。

<研究者のコメント>

量子重力を含む世の中の全ての現象を記述する理論として、超弦理論が有力候補として挙げられています。超弦理論は、点粒子のかわりにひもを構成要素とする、非常にエキゾチックな理論です。ただし、超弦理論特有な効果は超高温状態でしか現れず、実験的に検証するのが非常に困難なのが現状です。初期宇宙では実験室では不可能な超高温状態が実現でき、超弦理論特有な現象が捕まえられると期待されています。今回の初期宇宙の理論的な研究成果を、超弦理論の検証にもつなげていきたいと考えています。(疋田 泰章)

<論文タイトルと著者>

タイトル：Three-dimensional de Sitter holography and bulk correlators at late time (3次元ドジッター時空におけるホログラフィーと初期宇宙の密度揺らぎの相関関数)

著者：Heng-Yu Chen, Yasuaki Hikida

掲載誌：Physical Review Letters DOI： <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.129.061601>