

重力波観測から得られる宇宙膨張と一般相対性理論に対する最新の制約

LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) の最新の論文で、私たちは、宇宙の膨張速度に関する結果を更新し、重力がアインシュタインの一般相対性理論の予測通りに振る舞うかどうかを検証しました。最新の LVK データリリースである GWTC-5.0 (突発性重力波カタログ, バージョン 5.0) により、**重力波の検出データ総数は 236 件**になり、宇宙の大きなスケールで何が生じているのかをより正確に知り得ることになりました。この総数は、前回の宇宙論を議論した論文で使用された、2025年8月公開の **GWTC-4.0** よりも 94 件多いものです。この論文の主な目的の1つは、宇宙が現在どのくらいの速さで膨張しているかを示す **ハッブル定数 H_0** の測定結果を報告することです。この膨張率の正確な値は、測定方法によって (多くの場合、非常に) 異なる結果が得られているため、まだ不確かです。今回更新されたハッブル定数 $H_0 = 71.0^{+9.0}_{-7.1}$ km s⁻¹ Mpc⁻¹ は、GWTC-4.0 の場合よりも 25.7% 精度が向上しました。しかし、この測定値は、**電磁波の観測のみ**を使用して報告されている、長年確立された方法で得られたものよりもまだ精度が劣ります。私たちのもう一つの主な目的は、重力波が本当に一般相対性理論にしたがって振る舞うかどうかを検証することです。これまでのところ、一般相対性理論からの逸脱の証拠は見つかっていません。しかし、将来的には、重力波の検出によって、宇宙論と重力の検証が可能になり、他の方法との競争力のある手段になることで、宇宙の理解を深めるための重要な新しい方法になると期待しています。

科学的な背景

過去 100 年間の驚異的な技術進歩のおかげで、宇宙論は成熟した科学分野へと発展しました。宇宙論は宇宙を最も大きなスケールで研究し、次のような根本的な問いに答えることを目指しています。宇宙はどのように始まったのか？ 宇宙は時間とともにどのように変化してきたのか？ 物質、エネルギー、そして重力は宇宙の進化をどのように形作ってきたのか？

現在、宇宙を記述する標準的な理論的枠組みは「**ラムダ CDM (Λ CDM) モデル**」として知られています¹。アインシュタインの一般相対性理論に基づいたこのモデルは、幅広い天体観測を単一の首尾一貫した図式で説明することに成功しています。しかし、多くの未解決の問題が残っており、 Λ CDM モデルが宇宙を完全に記述しているとは言えず、新たに刺激的な発見がなされる可能性があります。

宇宙論における最大の未解決の謎の一つは、宇宙の膨張率である **ハッブル定数 H_0** の値です。1920 年代以来、私たちは**宇宙が膨張している**ことを知っています。宇宙のすべての銀河は、膨張する風船の表面の点のように、互いに次第に遠ざかっています (図 1 参照)。過去 1 世紀にわたり、多くの科学者が宇宙の膨張速度を正確に測定しようと試みてきましたが、今日に至るまで結果は一致していません。私たちの **近傍の宇宙** からの測定では膨張率の値が得られますが、**宇宙の始まりの頃の信号**に基づく別の測定では、別の値が確信を持って示されています。多くの議論の後、これら 2 つの測定値の差は、測定誤差だけでは説明できない可能性が高いことがわかっています。「**ハッブル定数の緊張**」とも呼ばれるこの不一致は、 Λ CDM モデルが完全なモデルではない可能性、そして未知の物理現象

が不一致の原因となっている可能性を示唆する手がかりとなります。ここに、重力波が重要な役割を果たす理由があります。重力波を用いることで、ハッブル定数やその他の宇宙論的パラメータを完全に独立した形で測定することが可能になり、ハッブル定数の不一致に関する議論に新たな視点をもたらし、将来的にはその解決に貢献するかもしれません。

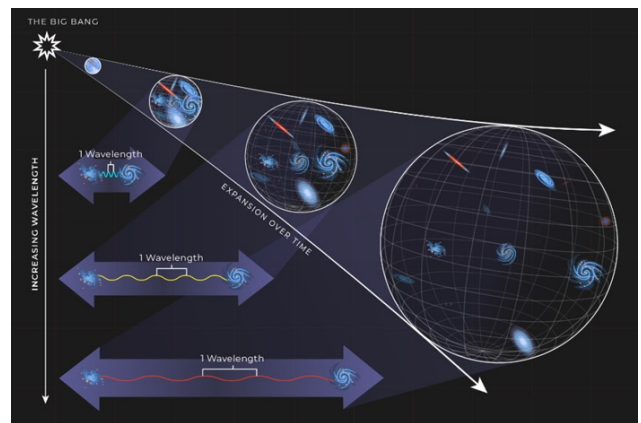


図 1: 宇宙の膨張が、光と重力波を時間とともにどのように引き伸ばすかを説明する図。左から右へ進むにつれて宇宙は大きくなり、銀河間の距離も広がります。同時に、空間を伝わる波 (下部に表示) は、左側の「波長増加」軸で示されるように、より長い波長へと引き伸ばされます。この効果は**赤方偏移**として知られ、遠方から放出される光と重力波の両方に当てはまります。[クレジット: NASA Scientific Visualization Studio]

¹ (訳註) Λ は通常物質以外の要素で宇宙膨張を引き起こす項 (宇宙項)、CDM は冷たい暗黒物質 (cold dark matter) を意味する。前者はモデルによってはダークエネルギーとも称される。両者とも正体不明であるが、現実の観測と整合性を持たせるために、標準モデルとして必要とされている。

重力波は、宇宙の近傍における距離測定に用いられる複雑な「宇宙距離はしご」に頼ることなく、宇宙における距離を直接測定することができます。重力波は宇宙空間を伝播するにつれて、距離が離れるほど弱くなります。信号を解析し、一般相対性理論の予測と比較することにより、重力波が放出された時の強度を推定することができます。そして、地球上で観測される値と比較することで、発生源までの距離を特定することができるのです。

このため、重力波源はしばしば「標準音源」と呼ばれます。これは、天文学者が長年宇宙の距離を測定するために使用してきた「標準光源」(Ia型超新星など、固有の明るさが既知の天体)にちなんだものです。宇宙の膨張によって遠方の銀河は私たちから遠ざかるため、重力波源までの距離と、その銀河がどれくらいの速さで遠ざかっているかの情報を組み合わせることができます。これにより、宇宙の膨張率を推定することが可能になります。それだけでなく、重力波は、長距離においても一般相対性理論が期待どおりに機能するかどうかを検証するのに役立ちます。例えば、重力に関するいくつかの代替理論(一般相対性理論の拡張理論)では、重力波が宇宙空間を伝播する仕方にわずかな変化が生じると予測されています。これらの変化は、私たちに見える信号の強さに影響を与え、ひいては距離の推定方法に影響を与える可能性があります。私たちの研究では、これらのタイプの理論のいくつかを検証しています。

解析の方法

重力波信号からは発生源までの距離を計算できますが、発生源が私たちから遠ざかる速度(いわゆる「後退速度」)を特定するのは容易ではありません。天体の後退速度を決定する最良の方法は、赤方偏移を測定することです。赤方偏移とは、宇宙膨張による光やその他の放射のドップラー効果の結果生じるものです。そのためには、重力波源が存在する銀河の正確な位置を特定し、分光器と呼ばれる特殊な装置を備えた望遠鏡で観測する必要があります。

重力波信号の正確な発生源を特定できたのは、2017年8月17日に観測されたイベント **GW170817** の1例のみです。このイベントは、連星中性子星の合体によって引き起こされました。合体によって、重力波と(キロノバと呼ばれる)爆発が発生し、両者が地球で観測されたのです。宿主である銀河(**NGC 4993**)が特定され、その赤方偏移が測定されると、この現象は重力波によるハッブル定数の初測定に利用されました。この方法は「ブライツ(明るい)音源法」と呼ばれています。

しかし、ほとんどの場合、どの銀河が重力波源を宿しているかは分かりませんが、信号からおおよその発生源の位置がわかります。そこで、大規模な銀河カタログを用いてその領域にあるすべての銀河を検査し、それぞれに発生源である確率を割り当てることができます。これらの確率で重み付けした赤方偏移を組み合わせることで、ハッブル定数の統計的測定を行うことができます。これは「銀河カタログ・ダーク(暗い)音源法」として知られています。

銀河カタログに加えて、重力波源の質量分布をモデル化することも重要です。ここで、観測された重力波源の特性分布は、真の分布とは異なることに注意しなければなりません。これは、検出器の特性に起因するもので、検出器は特定の重力波源(質量が大きいものや近いものなど)を他の重力波源(質量が小さいものや遠いものなど)よりも検出しやすい性質を持つからです。さらに、宇宙の膨張の歴史や重力の法則が異なっ

いた場合、例えばダークエネルギーが予期せぬ特性を持っていた場合、真の分布と観測された分布における重力波源の特性の関係は変化するでしょう。観測された天体群の特性と予測される天体群の特性を比較し、検出確率の違い、すなわち「選択バイアス」を慎重に考慮することで、銀河カタログを用いなくても、ハッブル定数などの宇宙論的特性を測定することが可能になります。これは「スペクトル音源法」として知られています。

スペクトル音源法と銀河カタログ法を組み合わせることで、銀河と重力波の分布に関する情報を活用し、より精度の高い統一的なダーク音源測定値を得ることができます。個々のダーク音源ではブライツ音源法に比べて精度は劣りますが、ダーク音源の数はブライツ音源よりもはるかに多いため、組み合わせたダーク音源法による測定結果はブライツ音源法と同程度の精度を達成できます。最終的なハッブル定数の測定結果は、これらのすべての方法を統合し、利用可能なすべての重力波情報から得られた完全な標準音源測定値となります。

解析結果

図2は、GWTC-5.0 データのさまざまな組み合わせを用いて計算された、 H_0 の値に対する事後確率分布を示しています。黒色の曲線は、ダーク音源とブライツ音源 GW170817 を組み合わせた、最も精度の高い結果を示しています。曲線のピークの位置と幅から、 $H_0 = 71.0^{+9.0}_{-7.1} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ が得られます。ここで、下付き文字と上付き文字の数字は、68% 信頼水準におけるこの測定値の誤差を示しています。

今回の結果は、前回の LVK データリリースにおける解析結果と比較して精度が 25.7% 向上しており、これは主にイベント数の増加によるものです。イベント数の増加により、重力波源の質量分布をより正確に制約することが可能になりました。

銀河カタログの導入による精度向上は、スペクトル音源を用いた場合と比較して 7.4% 向上しており、これは GWTC-4.0 における銀河カタログ利用の改善率と同等です。

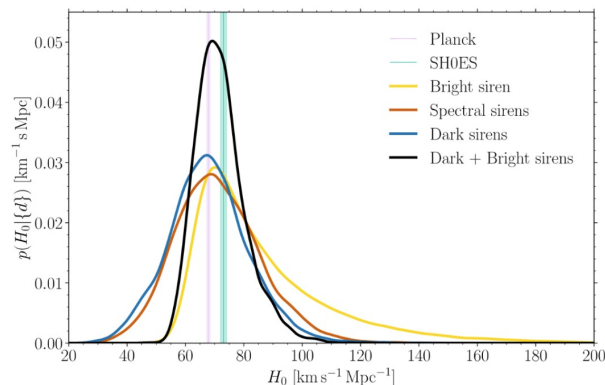


図2: (本論文の図4) ハッブル定数 (H_0) の測定結果。最良の推定値は、ダーク音源解析と GW170817 のブライツ音源解析結果を組み合わせたもの(黒)です。比較のため、ダーク音源のみ(青)、スペクトル音源のみ(オレンジ)、および単一のブライツ音源のみ(黄)の結果も示しています。

図3は、膨張宇宙における重力波の伝播に関して、一般相対性理論からの逸脱の可能性に対する制約を示しています。具体的には、重力波から測定された距離 (D_L^{GW} と表記) と、望遠

鏡を用いた光による検出から測定される距離 (D_L^{EM} と表記) の比を調べています。一般相対性理論が正しければ、これら 2 つの距離尺度は完全に一致するはずであり、したがって、あらゆる赤方偏移においてその比は 1 になるはずですが。私たちは、重力とダークエネルギーが相互作用する方法が異なる 2 つのモデルを用いてこの比を検証し、それぞれのモデルパラメータに制限を設けました。図 3 の上段と下段は、各モデルの結果を示しており、両者はよく一致しています。

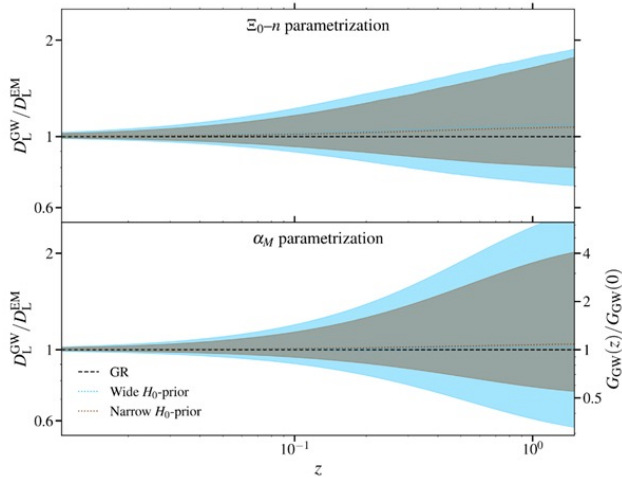


図 3: (論文の図 7 より) 重力とダークエネルギーが相互作用する方法が異なる 2 つのモデルについて、重力波源から測定された距離と、電磁波 (光) 放射から測定される距離の比を、発生源の天体の赤方偏移の関数として示した。上段と下段の図は、この効果を記述するために採用された 2 つの異なるパラメータでの値を示しており、一般相対性理論が成り立つ場合、2 つの距離は同じであると予想され、その比はすべての赤方偏移で 1 に等しくなります (黒の破線)。色の付いた帯は、GWTC-5.0 から 90% の信頼水準で得られた制約を示しています。青色の帯は、ハッブル定数に関する既知の (または「事前」) 情報を仮定しない場合の結果であり、茶色の帯は、 H_0 が以前に測定された値に近いと仮定した場合の結果です。上段と下段の図の両方で結果は一貫しており、一般相対性理論からの逸脱の証拠は見つかりませんでした。

まとめと将来の展望

GWTC-5.0 のデータを用いて、ハッブル定数の新たな独立した測定値を得るとともに、一般相対性理論からの逸脱の可

能性に対する制約を改善しました。

ハッブル定数の最良推定値は、 $H_0 = 71.0^{+9.0}_{-7.1} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ であり、これは GWTC-4.0 による値よりも 25.7% 高い精度です。この値は、近傍宇宙および初期宇宙における長年の測定値と完全に一致していますが、これらの測定値間の矛盾を解消するにはまだ十分な精度ではありません。

(重力波源質量の分布を用いる) スペクトル音源法は、現在、ダーク音源の精度を高める主要な手段となっています。銀河カタログからの追加情報によって、測定値は 7.4% 向上しました。この改善の割合は、GWTC-4.0 のときと同程度です。スペクトル音源に対する制約は、イベント数の平方根に反比例します。つまり、イベント数が増えるごとに改善度合いは下がっていきます。このことから、次期 GWTC-6.0 のリリースに向けて、より精度の高い銀河カタログが必要になり、より良い重力波データが求められることになります。

本研究では、長距離スケールにおいて、一般相対性理論からの逸脱は見られず、モデルによって異なるものの、制約は従来よりも約 20–50% 厳しくなりました。

多くのデータが得られつつあり、また堅牢な統計的手法が確立された今回の結果は、重力波による宇宙論が、現代物理学における最大の未解決問題のいくつかに取り組む上で有利な立場にあることを示しています。

さらに興味のある方へ

- 私たちのウェブサイトでニュースを更新しています。
<https://www.ligo.org/news.php>
<https://www.virgo-gw.eu/>
<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/>



- 本発表の論文
<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2600018/public/>
 あるいは <https://arxiv.org/abs/2605.27227>

(日本語訳: 真貝寿明, 藤森朱里)

用語集

- **メガ・パーセク (Megaparsec; Mpc)**: 宇宙論で用いられることの多い距離の単位。1 メガ・パーセクは、100 万パーセクであり、1 パーセクは、約 3.26 光年 ($3.086 \times 10^{16} \text{ m}$) に相当する。
- **ハッブル定数 (Hubble constant)**: 宇宙の膨張速度を測るために使用されるパラメータ。現在の値は記号 H_0 で表される (添字の 0 は、現在を意味する)。値は約 $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ と測定されている。これは、1 メガパーセク (約 326 万光年) の距離ごとに、銀河が遠ざかる速さが 70 km s^{-1} ずつ増加していくことを意味している。
- **赤方偏移 (Redshift)**: (音、光、または重力波の) 波源が観測者から遠ざかる運動をすることによって波長が増加すること。宇宙膨張のために、銀河などの天体は私たちから遠ざかりつつあり、遠方の銀河から届く電磁波ほど波長が長くなっている。
- **事後確率分布 (Posterior probability distribution)**: データを分析した後、**ベイズ推論**と呼ばれるプロセスを通じて推定された、特定の物理的特性のさまざまな値の可能性を示すグラフまたはプロット。