

## 重力波を用いた宇宙膨張の観測

私たちは宇宙の現在の膨張率を計測するために、新たに出版された**突発性重力波カタログ (GWTC-3)**に掲載されている 47 個の重力波イベントを用いました。これらのイベントは連星ブラックホール合体、連星中性子星合体、そして中性子星・ブラックホールの連星合体が波源となっており、これらの重力波波形から波源までの距離を推定しました。続いて、これらの連星の質量分布、あるいは銀河カタログ **GLADE+**を用いて**赤方偏移**の分布から、これらの連星たちの赤方偏移に関する情報を求めました。そして距離と赤方偏移の測定結果を組み合わせてより精度の高い**ハッブル定数**の測定を新たに行いました。今後数年のうちにより多くの重力波イベントが観測されることは間違いありません。私たちの新たな宇宙膨張の計測手法は現在抱えている「**ハッブル対立**」と呼ばれる問題（計測されたハッブル定数の値が測定手法によって大きく異なっている問題）に新たな示唆を与えることでしょう。

### 宇宙論・重力波 概論

1920 年代、ジョルジュ・ルメートルとエドウィン・ハッブルは私たちの宇宙が膨張していることを発見しました（図 1）。この偉大な発見は私たちの宇宙観を一変し、現代**宇宙論**の基礎である**ビッグバン理論**の土台となっています。



図 1: 宇宙膨張の概念図。膨張する風船の表面にある銀河たちは互いに遠ざかっていく。(図: Eugenio Bianchi, Carlo Rovelli & Rocky Kolb)

宇宙の膨張率はハッブル定数で表されます。ハッブル定数を表す記号は  $H_0$ 、単位はキロメートル毎秒毎メガパーセク ( $\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ ) です。宇宙膨張の発見から 100 年ほどが経ちましたが、ハッブル定数の値は今もなお正確にはわかっていません。異なる手法で計測された最新の値には  $65 \sim 80 \text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$  程度の不一致が見られています。例えば、宇宙の年齢が 38 万

年の頃に放出された**宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)**と呼ばれる宇宙最初の光を用いて間接的にハッブル定数を測定することができます。その結果得られた値は  $H_0 = 68 \text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$  でした。一方、**Ia 型超新星**の輝度と**セフィイド変光星**と呼ばれる種類の星の脈動を用いてハッブル定数を直接計測することもできます。この手法で得られた値は  $H_0 = 74 \text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$  です。観測精度を考慮に入れても、これらの値は大きく異なっており、単に測定誤差によって必然的に生まれる測定結果のばらつきとして説明することはできません。この不一致は「ハッブル対立」と呼ばれており、宇宙論の大きな問題の一つです。

一方、**2015 年以降**、私たちは電磁波（電荷の運動が作り出す光）だけではなく重力波（質量を持った物体の加速度運動が作る波）を用いて宇宙を観測できるようになりました。重力波は時空の「さざなみ」あるいは摂動です。1917 年にアルバート・アインシュタインによってその存在が予言され、重力波の観測は彼の**一般相対性理論**とよく合致しています。これまでのところ、**ブラックホール**や**中性子星**といった非常に高密度な天体のペアが宇宙の中で最も強い重力波源として知られています。もしこれらの星が重力で束縛されたペアとなって互いの周りを公転していくと、重力波放射によって次第にエネルギーを失い公転軌道が縮んでいき、最終的には合体して一つのブラッ

クホールになってしまいます。これらのコンパクト連星系の合体からの重力波を観測し、その波形と時間進化を解析することで、[連星系までの距離を直接測](#)ることができます。宇宙距離はしごと天文学者が呼んでいる多段階の較正に基づく宇宙論的距離の測定手法（上述したセファイド変光星や Ia 型超新星を用いた手法はこの一種）が伝統的には用いられていましたが、重力波による測定はこれらの手法とは全く対照的です。

重力波による距離指標は[自己較正](#)されており、宇宙距離はしごの「段」を飛ばして遠くの距離を測ることができます。このような美しい性質があるので、重力波源となる連星は「[標準音源](#)」と呼ばれ、多くの注目が注がれています。もし標準音源までの距離を直接測定し、母銀河の[赤方偏移](#)から標準音源が私たちから遠ざかる速度を独立に観測することができれば、それらを組み合わせることでハッブル定数を測ることができます。

## 暗黒面を覗いてみる

電磁波対応天体が付随している連星中性子星合体については、母銀河の赤方偏移を簡単に測定することができます。一番最初の連星中性子星合体からの重力波イベント ([GW170817](#)) は明るい電磁波対応天体とともに観測されました。そのためこの連星中性子星が属している銀河 ([NGC4993](#)) はすぐに特定され、その銀河の赤方偏移と [GW170817](#) から直接得られた距離を組み合わせることで[重力波標準音源を用いたハッブル定数に対する測定結果](#)を初めて得ることができました。

残念ながら、ほとんどの連星合体、特に連星ブラックホール合体には電磁波対応天体は付随していません。しかし、対応天体が観測されず母銀河を直接特定できなかったとしても、私たちは重力波観測を波源の赤方偏移に関する情報を得るために用いることができます。

まず、ライゴやヴィルゴの基準系で私たちが「測定」する連星ブラックホールの質量は宇宙膨張によって赤方偏移しています。つまり、遠ざかりつつある銀河からの光がより長い（より赤い）波長へと引き伸ばされるように、連星ブラックホールの質量も実際のものよりも大きく見えるのです。したがって原理的には、観測された連星ブラックホールの質量分布には赤方偏移の分布に関する情報が刻まれているはずです。私たち

はこの情報を距離の測定と組み合わせることでハッブル定数を推定することができます。

あるいは、私たちは重力波観測から波源の天球面上の位置を特定することができます。こうして特定された範囲に存在する銀河を母銀河の候補として得ることができます。これらの母銀河候補たちについては赤方偏移の情報が直接得られるので、それを用いて  $H_0$  を統計的に計測することができます。この手法は 1986 年にバーナード・シュッツによる[独創的な論文](#)の中で初めて提案されたものです。

よって、電磁波対応天体を伴わない重力波イベントも「暗い標準音源」として用いることができます。

## どういう原理で測定するのか？

連星ブラックホールの質量分布からどのようにハッブル定数が推定できるのでしょうか。これをもう少し詳しく理解するために、連星ブラックホール形成に関する何らかの物理的過程によって質量分布に一つの大きなピークがあると仮定しましょう。（実際こうしたピークの存在は理論的にも予言されています。[対消滅型超新星爆発](#)と呼ばれる現象により、ある質量よりも大きな質量を持つ重たい星はその後に何も残さないほど激しい爆発を起こし、その結果恒星質量ブラックホールの質量には上限値があると予想されています）。観測できるのは赤方偏移を受けた各連星ブラックホールの質量ですが、宇宙膨張によって赤方偏移してしまったとはいえ、それらの分布には元の質量分布にあったピークの痕跡が刻印されていると考えられます。よって観測された質量分布のピークから連星ブラックホールたちの赤方偏移の情報を得ることができ、そしてそれを観測した連星ブラックホールの距離の情報と組み合わせることで宇宙の膨張率を知ることができます。

$H_0$  を測定する二つ目の統計的手法として銀河カタログを用いるものが挙げられます。ここで用いるカタログは [GLADE+](#) と呼ばれるもので、宇宙の数百万の銀河について赤方偏移、光度、色やその他の性質を系統的に収集したものです。重力波データからそれぞれの標準音源の天球面上の位置と距離がわかるので、これを [GLADE+](#) カタログと交差照合することで、重力波波源が属しているであろう母銀河の候補を特定することができます。実際には天球面上の位置はそれほど正確ではないので、各銀河と標準音源の対応は確率

で表されます。そのため、一つの銀河が母銀河として特定されるのではなく、代わりにそれが本当の母銀河である確率が割り当てられた母銀河の候補たちを数百個あるいは数千個見つけることができます。この対応はハッブル定数の値にも依存しています。ハッブル定数は距離と赤方偏移の関係を決定するからです。銀河サーベイが「不完全」であること、つまり探索した範囲内であってもカタログには載っていない銀河が存在することも考慮に入れる必要があります。この不完全性が存在する理由は、例えば小さくて暗い銀河が遠くにあると観測できないぐらい暗くなってしまうためです。それでも、注意深く母銀河の候補たちの赤方偏移を平均することで、私たちは各音源の赤方偏移を特徴づけることができ、そして重力波から得られた距離の情報と合わせて  $H_0$  の値を測定することができます。

### どのようにして測定するのか?

今回発表した私たちの論文では、前節で紹介した二つの手法、つまり質量分布に基づく方法と銀河カタログに基づく方法を GWTC-3 から選んだ重力波イベントに適用して解析した結果を示しています。

赤方偏移した連星ブラックホールの質量分布に基づく手法では、連星ブラックホールの質量分布と宇宙の膨張の仕方決定する宇宙論的パラメータを初めて同時に制限しました。実際、私たちの解析ではハッブル定数だけではなく、宇宙における暗黒物質や暗黒エネルギーの量を決める無次元のパラメータについても制限ができました。これらのパラメータは「ラムダ CDM」と呼ばれる宇宙論の「標準模型」において重要な役割を果たしています。

GWTC-3 のデータだけでは暗黒物質や暗黒エネルギーの存在量についての有益な制限は得られませんが、これはそれほど驚くべきことではありません。なぜならこうした宇宙論的パラメータは、GWTC-3 のイベントよりもっと遠くの連星ブラックホールに対してより重要になってくるからです。一方で私たちが得た結果から、今後私たちの検出器の感度が向上し、より遠くの音源を観測することで、連星ブラックホールの分布から暗黒物質や暗黒エネルギーについての情報を得ることができると期待できます。

質量分布に基づいた手法はハッブル定数の制限により効果的です。図 2 は  $H_0$  と質量分布のモデルに含まれるパラメータを同時に制限した結果を示して

います。この図は（少なくともこの特定の質量分布のモデルについて）私たちのデータが小さい値のハッブル定数と整合的であることを示しています。この結果を GW170817 とその電磁波対応天体の観測から得られた  $H_0$  の測定結果と合わせると、 $H_0 = 68^{+13}_{-7} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  という推定結果が得られます。これは最初の突発性重力波カタログ (GWTC-1) の連星ブラックホールを用いて得られた制限よりも 13% 改善されました。(重力波による距離推定の性質から  $H_0$  の不定性が偏る可能性があることは心に留めておきましょう。つまり、どちらかといえば真の値を過小評価する傾向があります。)

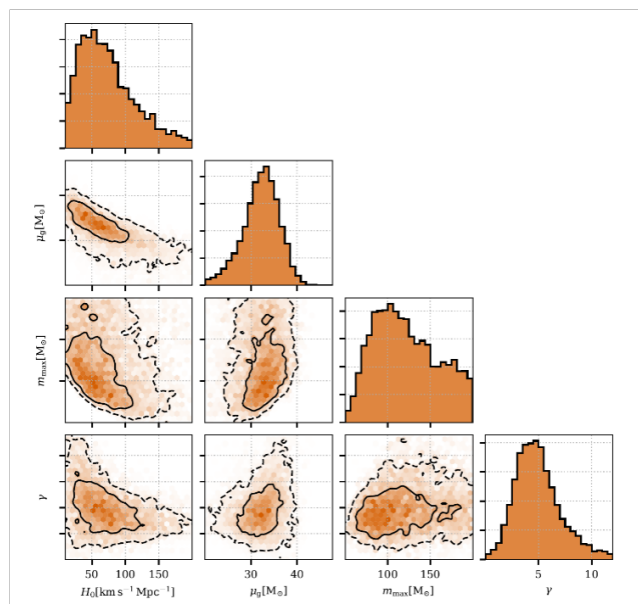


図 2: (論文の図 5) ハッブル定数 ( $H_0$ ) の値と連星ブラックホールの質量分布に関するモデルのパラメータに対する事後確率分布\*。これは GWTC-3 から選んだ連星ブラックホールに対する質量分布に基づく解析で得られた結果である。各行の一番右のパネルはそれぞれのパラメータごとの確率分布を示している。 $H_0$  の分布は一番上の行である。それ以外のパネルはパラメータの各組ごとの確率分布である。実線 (破線) で囲まれた領域は 90% と (50%) の確率で真の値がそこに含まれるような領域を示している。

カタログ GLADE+を用いて得られた二つ目の結果も同様に期待が持てるものです。ここでは連星ブラックホール分布に関する性質を仮定する必要があります。私たちは観測されている連星ブラックホールの質量分布によく一致するモデル (冪乗則の分布にガウス分布のピークが合わさったモデル) のパラメータを用いました。GLADE+から得られた情報と連星ブラックホールの質量分布のモデルパラメータを組み



合わせることで、私たちはハッブル定数の推定値として  $H_0 = 68^{+8}_{-6} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  を得ました。これは **GWTC-1** を用いた同様の解析に比べて 41% も向上した結果です。図 3 はこの新しい結果を示しています。私たちが推定したハッブル定数の値は CMB からの推定値（マゼンタの帯）、そして Ia 型超新星爆発・セファイド変光星からの推定値（緑の帯）の両方と整合的であることがわかります。しかし、これら二つの観測における「ハッブル対立」を解決する手助けになるにはまだ精度が足りません。

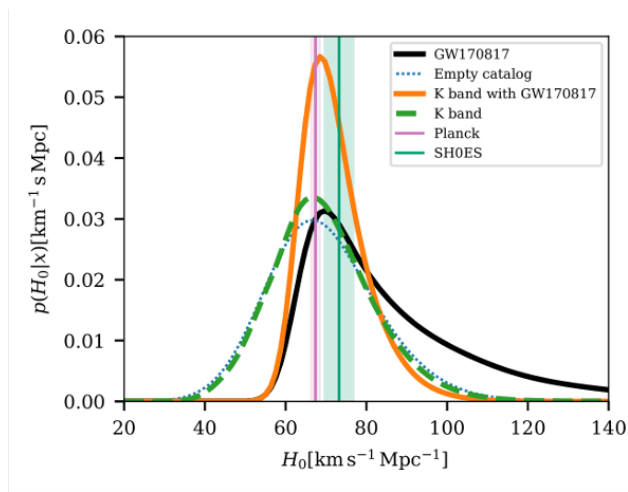


図 3: (論文の図 8) それぞれの解析から得られた  $H_0$  の事後確率分布<sup>\*</sup>。各解析手法において最も確からしいと思われる確率分布がそれぞれの曲線で表されている。黒い実線は連星中性子合体のイベント GW170817 とその電磁波対応天体を用いて得られた結果である。青い点線は銀河カタログの情報を用いずに解析した結果である。オレンジの実線と緑の破線は銀河カタログを用いた解析において、連星中性子星のイベントを入れた場合と入れていない場合に対応する（赤外線領域に波長帯を持つ銀河を集めた K バンドカタログを用いた）。二つの垂直な帯（マゼンタと深緑）は  $H_0$  の制限を示しており、それぞれ CMB から得られた結果（Planck）、超新星爆発とセファイド変光星から得られた結果（SHOES）を表している。

## まとめと今後の展望

今回の私たちの論文に示したハッブル定数の制限は以前の結果に比べると向上しました。しかし、この結果は私たちがどのように連星ブラックホールの質量分布をモデル化するかに依存していることを覚えておかななくてはなりません。銀河カタログによる手法で用いた GWTC-3 のほとんどのイベントについて、私たちが得た結果は質量分布のモデルを作る際の仮定に依存しています。GW190814 は唯一の例外です。このイ

ベントは他の暗い音源よりも天球面上の位置がよりよく特定されているので、特定された位置と GLADE+ データとの相関がハッブル定数に対して有益な情報をもたらしています。

今後数年のうちに、**ライゴ**と**ヴィルゴ**は感度向上のためのアップデートを行う予定です。**KAGRA**（かぐら）は 2022 年後半に予定されている第 4 観測期間 O4 から参加します。また 2020 年代の後半には**ライゴ・インディア**も登場する予定です。検出器のネットワークが拡大していくことで、位置が精度よく特定された音源がたくさん検出されると期待されます。特に、もしより遠くの銀河も探索できる新たな銀河サーベイで見つかった銀河もカタログに入れることができれば、カタログに基づく手法でのハッブル定数の制限がよくなるでしょう。

これまでよりも多くの連星ブラックホール合体が今後数年で見つかることと期待されており、これにより質量分布に基づく手法もより精度が向上するでしょう。今後の解析により、(今回の論文のものよりももっと一般的な) 連星ブラックホールの性質に関する分布と宇宙論的パラメータ（ハッブル定数だけではなく暗黒物質や暗黒エネルギーの存在比率）との両方に制限をつけることができるでしょう。標準音源を用いた重力波宇宙論の未来は明るい！

## 用語集

- **GLADE+**: 新たに拡充され編纂された銀河のカタログ。およそ 2,200 万個の銀河が含まれており、重力波源が属している可能性がある銀河の赤方偏移の情報を与える。GLADE カタログに関する論文は [ここ](#) から自由にアクセスできる。
- **メガパーセク (Megaparsec)**: 宇宙論でよく用いられる距離の単位。1 メガパーセクは 100 万パーセク。1 パーセクはおよそ 3.26 光年 ( $3.086 \times 10^{16}$  メートル)。
- **ハッブル定数 (Hubble constant)**: 宇宙の膨張率を表すために用いられるパラメータ。現在のハッブル定数の値は  $H_0$  と書かれ、観測からおよそ  $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  と測定されている。
- **ビッグバン理論 (Big Bang theory)**: 現在観測されている宇宙の起源と進化に関する理論。140 億年前に宇宙がどのように生まれ、高温高密度の初期状態からどのように膨張していったかを記述する。ビッグバン理論は最も軽い元素の存在量や宇宙マイクロ波背景放射の存在などを含む、宇宙の様々な観測結果を説明するとして広く受け入れられている。
- **宇宙マイクロ波背景放射 (CMB; Cosmic Microwave Background)**: 宇宙の進化の初期段階、およそ 38 万

歳の宇宙から到来する電磁波。CMB はビッグバンからの「残光」として知られている。詳しい情報は[こちら](#)。

- **Ia 型超新星爆発 (Type Ia supernova)** : 赤色巨星から質量が降着している白色矮星が起こす特定のタイプの爆発。白色矮星の質量が[チャンドラセカール限界](#) (太陽質量の 1.4 倍) を超えると起こる。爆発時のピークの輝度や光度が似ているため Ia 型超新星までの距離は正確に測定することができる。そのため Ia 型超新星は[標準光源](#)として有用である。
- **セファイド (Cepheid)** : 変光星の一種。半径と温度の周期的な変動により、光度も周期的に変動する。変動の周期を観測することで、天文学者はセファイド変光星までの距離を正確に推定することができる。
- **宇宙距離はしご (Cosmic distance ladder)** : 宇宙の中の物体までの距離を決めるために、天文学者が用いる多段階的な手法。遠くの物体までの距離を測るときに、大抵はそれらの物体の性質と距離との関係について経験則を仮定する。これはより近くの天体、大抵は天の川銀河内の天体について、幾何学的手法を用いた直接計測による距離測定に基づいて行われる。より詳しい情報は[こちら](#)。
- **ブラックホール (Black hole)** : 非常にコンパクトな物質によって作られる、重力が非常に強い時空の領域。その領域からは、光を含めてあらゆる物質が脱出できない。
- **中性子星 (Neutron star)** : 太陽の 10 から 25 倍の質量を持つ星が超新星爆発を起こした後に残る残骸。典型的な中性子星は太陽の 1 から 2 倍の質量をもち、半径は 10 から 15km で、これまで見つかった中でもっともコンパクト (高密度) な天体である。
- **対不安定型超新星爆発 (PISN; Pair-instability supernova)** : 超新星爆発の一種。太陽の 130 倍以上の質量を持つ星が起こすと予言されている。中心の核内部で[電子・陽電子対](#)が生成されることにより、星を支えている圧力が突然下がり暴走的熱核反応が起こる。これにより爆発後には星の残骸は何も残らないと予想されている。
- **赤方偏移 (Redshift)** : 観測者に対する波源の運動によって (音, 光, 重力波などの) 波長が伸びる現象。

[宇宙膨張](#)によって銀河なども私たちから遠ざかっており、それらから放出された光や電磁波などもより長い波長に伸ばされる。

- **暗黒物質 (Dark matter)** : 宇宙の物質の 85% を占める謎の物質。それらは電磁気的な相互作用をせず光を出さないため暗い。暗黒物質の正体について、ある種の基本粒子であるとする理論が多く存在する。一方で、私たちがよく知る最も暗い天体 (ブラックホール!) も暗黒物質成分の一部を担っているとする説も興味深い。
- **暗黒エネルギー (Dark energy)** : 全く未知の、謎に包まれたエネルギー成分。宇宙の大きな規模での振る舞いを支配し、宇宙膨張を加速させている原因であると信じられている。最も簡単な暗黒エネルギーのモデルは宇宙定数と呼ばれるもので、これが負の圧力を生み、[宇宙の加速膨張](#)を引き起こしていると考えられる。
- **事後確率分布 (Posterior probability distribution)** : 物理的な性質について、データを解析した結果それぞれの値について与えられる確からしさ。あるいはそれを描画したグラフ。[ベイズ推定](#)と呼ばれる手法によって推定される。

## もっと詳しく知るためには

ウェブページを訪ねてみよう。

- [www.ligo.org](http://www.ligo.org)
- [www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)
- [gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)



原論文は[こちら](#)。

このリーフレットの英語版は[こちら](#)。

日本語版への翻訳：山本貴宏, 真貝寿明