

LIGO-VIRGO-KAGRA の第 4 期観測運転期間の最初の 8 ヶ月間における長時間持続型突発性重力波の全天探索

LIGO-Virgo-KAGRA がこれまでに検出した重力波信号はすべて、中性子星またはブラックホールの連星が長い時間をかけて近づき最終的に合体する「コンパクト連星合体」により発生したものです。アインシュタインの一般相対性理論の大きな成果の一つは、これらの激変的な現象で放出される重力波信号を正確に予測したことです。しかし、宇宙にはまだ検出されておらず、理論的にもまだ十分に理解されていない他の重力波の発生源が存在する可能性が極めて高いと考えられています。なかでも有望視されているのが「バースト」と呼ばれる突発的な重力波で、これはあらかじめ重力波波形の予測ができない現象です。

本論文では、2023 年 5 月から 2024 年 1 月にかけて実施された LVK 第 4 期重力波観測運転の第一段階 O4a において、こうした種類の信号を探索した結果について報告します。具体的には、約 1 秒から 1000 秒にわたって持続する、長時間持続型の突発現象の探索です。こうした信号がどこで発生するのかは正確には分かっていませんが、理論上は、非球面状に変形している誕生直後の中性子星、ブラックホールの周囲に形成された不安定な降着円盤、あるいは非常に離心率の高い（つまり非円形の）軌道を周回する中性子星またはブラックホール連星などから発生する可能性がありますと考えられています。とりわけ、この種のバーストは、かの有名な GW170817 のような中性子星合体の後に何が起こるのか — たとえば、結果として生じる残骸が非常に質量の大きい中性子星なのか、それともブラックホールなのか — といった点に関する重要な手がかりを与えてくれるかもしれません。

この探索は、2 種類の独立したアルゴリズムを用いて行われ、LIGO のリビングストンとハンフォードの両検出器が観測

を行っていた約 120 日間のデータを調べました。このように両検出器で同時に信号を観測できる期間を選ぶことは、天体起源の真の信号（両検出器に同時に現れる）と、片方の検出器のみに現れるノイズとを識別するうえで極めて重要です。今回の探索に使用されたアルゴリズムのひとつであるコヒーレント・ウェーブバースト (cWB) は、特定の種類の信号に対してより高い感度を持つように、前回の第 3 期観測 (O3) で行われた探索から改良されました。この改良には、機械学習ベースの勾配ブースティング決定木アルゴリズムである XGBoost の使用が含まれており、ノイズと信号を区別する分類器として機能し、探索感度が向上されています。

機械学習が LVK による重力波探索に用いられたのは今回が初めてです。もう一つのアルゴリズムである PySTAMPAS も、初めて全天を対象とした探索をしました。



図 1: 中性子星合体の後に形成された超大質量中性子星の想像図。このような特異な天体は、長時間持続型の重力波バーストを引き起こす可能性があります。Credit: ESO/L. Calçada/M. Kornmesser

用語集 1

- **コンパクト連星合体 (Compact binary coalescence, CBC):** 2つのブラックホール、2つの中性子星、あるいはブラックホールと中性子星の組で構成された連星が、互いに周回しながら最終的に合体する現象。すべての過程で重力波が生成され、連星が互いに近づき加速するにつれて、周波数と振幅が増加する。合体によって生じる天体は、初期状態に応じて、中性子星またはブラックホールのいずれかになる。連星を構成する天体は要素 (component) と呼ばれ、より重い方を主要素 (primary component) と呼ぶ。
- **一般相対性理論 (General relativity):** アルバート・アインシュタインが 1915 年に提唱した重力理論。物質やエネルギーの存在によって時空は柔らかい織物のように曲がり、物体が曲がった時空に沿って進むことが重力の根源である、とする理論。

既知のブラックホール合体に対応する候補を除外した結果、天体起源の新たな信号は発見されませんでした。cWB と PySTAMPAS で得られた最も有意な信号候補は、それぞれ 8 ヶ月に 1 回と 6 ヶ月に 1 回の偽警報率であり、いずれもノイズであると考えられます。

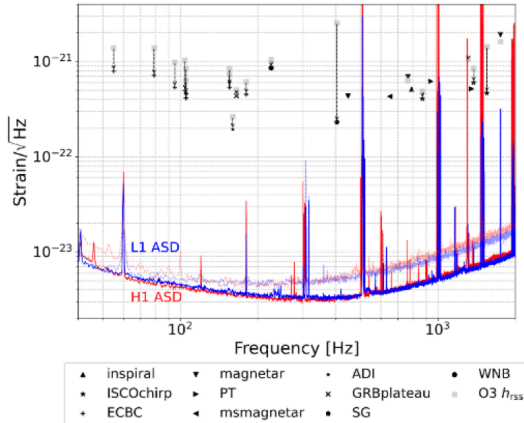


図 2: 様々な長時間バースト信号における重力波振幅の上限と LIGO 検出器感度 (青と赤) の比較。縦軸は重力波の振幅 (空間のゆがみの大きさ)、横軸は重力波の周波数を示しています。黒色のマーカーは、各信号タイプに対して O4a 観測期間で得られた振幅の上限を表し、灰色のマーカーの前回 O3 観測期に得られた対応する値と比較したものです。ほとんどの上限値は 1.2 ~ 2 倍改善されています。主なタイプとして「マグネター」(下向き矢印) と「ms マグネター」(ミリ秒マグネター, 左向き矢印) は、2 つの異なるタイプのマグネターから発生する信号を表し、「ECBC」(偏心コンパクト連星合体, +印) は、偏心軌道にある連星を指します。その他のタイプには、「インスパイラル」(連星中性子星の合体前の重力波)、「ISCOchirp」(回転するブラックホールの周りの最も内側の安定した円軌道で生じる重力波)、「PT」(中性子星へのフォールバック降着)、「ADI」(降着円盤不安定性)、「GRB プラトー」(ガンマ線バーストプラトーにエネルギーを供給する新しく形成されたマグネター)、「SG」(正弦ガウス波形)、「WNB」(ホワイトノイズ・バースト) などがあります。

有意な検出がなかったとはいえ、この探索からは興味深い天体物理学的知見を得ることができます。特定の種類の重力波源を模したサンプル信号を用いることで、各探索手法の感度を定量化し、各種の重力波源が宇宙でど

のくらいの頻度で発生したのかを推定できます。実際、何も検出されなかったという事実は、これらの長時間持続型バーストが、今回導出された「上限値」よりも稀である、あるいは微弱である可能性を示唆しています。図 2 は、今回の探索で得られた重力波振幅の上限値 (黒) と、前回の O3 探索で得られたこれまでの最良の上限値 (灰色) を比較しています。ほとんどの信号タイプにおいて、検出器の感度向上と探索アルゴリズムの高度化により、これらの制限は約 1.2 ~ 2 倍厳しくなっています。残りの O4 観測期間 (2025 年後半まで実施予定) のデータの探索では、さらに感度が向上し、制限がさらに厳しくなり、画期的な新発見に向けて、さらに一歩前進することでしょう。

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-P2500090/public>

(日本語訳: 真貝寿明, 澤田崇広)

用語集 2

- **バースト探索 (Burst search):** 重力波探索法の 1 つで、特定の波形モデルを前提とせず、重力波検出器ネットワーク内の複数検出器に同時に検出されるエネルギー過剰の信号を探索する方法。
- **突発的 (Transient):** 数千年から数十億年続くような天体物理的な現象とは対照的な、短い時間スケールの天文学的現象。
- **観測運転 (Observing run):** 重力波検出器が観測データを取得している期間。
- **偽警報率 (False-Alarm Rate; FAR):** 重力波信号とみなしたものが、ノイズによって引き起こされた可能性を定量化する指標。ノイズから発生したものが重力波検出と誤って判断される場合をシミュレートし、その信号強度を分析し、誤報とする確率の分布を信号強度の関数として導き出すことによって与えられる。より具体的には、信号の偽警報率が 1 日あたり 1 件である場合、検出器のノイズによってそのような信号がほぼ毎日 1 回発生すると考えられることを意味します。そうであれば、私たちは自信を持って重力波信号とは言えなくなる。
- **上限 (Upper limit):** 実験や観測で除外できなかった測定量の最大値。