LIGO-Virgo-KAGRA Science Summary (2026 年)

https://ligo.org/science-summaries/O4b_SSM/

tags: #CompactBinaryCoalescence, #SubSolarMass, #O4b, #arXiv:2610.20276

LIGO-Virgo-KAGRA 第 4 期観測運転第 2 部による，太陽より軽いコンパクト天体に関する最新の重力波探索と制約

LIGO-Virgo-KAGRA（LVK）共同研究グループは，第 4 期観測運転の第 2 部（O4b）で収集した重力波検出器のデータを用いて，太陽質量よりも軽い天体を含む連星の合体探索を継続しました．恒星進化理論はこのような低質量天体を予測しないため，これらの天体の存在については多くの議論があります．一方，暗黒物質（ダークマター）理論は，太陽質量以下の領域を含む，質量にして何桁にもわたる範囲で天体が存在すると予測しています．O4b のデータでも，これまでの探索でも，太陽質量以下の天体を含む連星の合体は検出されませんでしたが，O4b では，これまでで最も感度の高い重力波検出器ネットワークを用いて宇宙を探査しました．今回の最新の探索により，太陽質量以下の天体を含む連星の合体率と，特定の暗黒物質モデルにおける暗黒物質の存在割合について，これまでで最も厳しい制約が得られました．

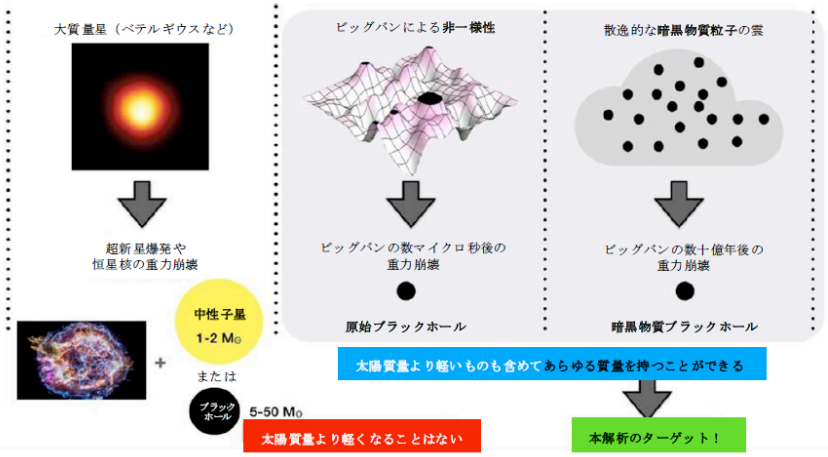


図 1: LVK 共同研究グループが検出しうるコンパクト天体の，考えられる形成経路を示した図．標準的な恒星進化は中性子星やブラックホールを生み出すが，太陽より軽いブラックホールを生み出すとは考えられていない．一方，初期宇宙で生成された原始ブラックホールや，いわゆる散逸性暗黒物質モデルで形成されるブラックホールなど，他の仮説的なメカニズムによって太陽質量以下のブラックホールが形成される可能性がある．

過去 10 年間，LVK 共同研究グループは，390 個以上のコンパクト天体連星の合体を波源とする重力波信号を同定してきました．これまでに見つかった発生源は，いずれも太陽質量（以下，$M_\odot$ とします）より大きい質量を持つブラックホールまたは中性子星でした．同時に，我々の LVK 検出器は，$1M_\odot$ よりも軽い質量をもつ天体を含む連星合体からの重力波信号にも感度があります．太陽より軽いコンパクト天体は，恒星進化の産物としては異例であると考えられますが，いくつかの形成メカニズムが提案されており，候補となる天体も報告されています（図 1 参照）．これらの軽い天体の合体からの重力波は，より質量の大きい天体の合体からのものほど強力ではないため，信号の検出は困難です．このような連星の検出は非常に重要な意味を持ち，コンパクト天体の形成や基礎物理学への新たな知見をもたらす可能性があります．そのため，我々は少なくとも 1 つの太陽質量以下の天体を持つ連星合体系からの信号を探索しています．

LVK の第 4 期観測運転は 3 つの部分に分かれています．以前，我々は第 4 期観測運転の第 1 部（O4a：2023 年 5 月〜2024 年 1 月）における，少なくとも 1 つの太陽質量以下の天体を含む連星合体からの重力波信号探索の結果を報告しました（英語版，日本語版）．第 4 期観測運転の第 2 部（O4b：2024 年 4 月〜2025 年 1 月）でもこれらの信号の探索を継続し，その最新の結果をここに報告します．

O4a では 2 台の LIGO 検出器（LIGO リビングストンと

LIGO ハンフォード）がデータを収集していましたが，O4b では Virgo 検出器も加わり，3 台の検出器がこれまでで最高の感度で稼働しました．第 4 期観測運転の第 3 部（O4c：2025 年 1 月〜2025 年 11 月）のデータの解析は現在進行中です．

雑音が支配的なデータの中から重力波信号を探索することは困難な作業です．我々は，データ中の特徴が実際の信号なのか，特定の解析手法による産物なのかを検証するため，3 つの独立した探索パイプライン（GstLAL，MBTA，PyCBC）を用いてデータを解析しました．これらのパイプラインは，検出器データを事前に計算した重力波波形と比較し，これらのパターンによく一致するデータ部分を特定し，その統計的有意性を推定します．今回の探索では，軽い方の天体の質量が 0.2 から 1 $M_\odot$ の間，重い方の天体の質量が最大でおよそ 11 $M_\odot$ までの連星を対象としました．シミュレーションに用いた波形には，広範囲の自転（スピン）の可能性も含めています．これらの選択は，過去の LVK 太陽質量以下の天体探索との整合性を保つために踏襲されたものです．

検出には至りませんでしたが，GstLAL と MBTA はそれぞれ，検出器雑音から当初際立って見える候補を 1 つずつ見つけました．しかし，詳細な追跡調査の結果，両候補とも実際の天体物理学的信号よりも雑音の揺らぎである可能性が高いことがわかりました．

探索の有効性を測定するため，数百万個のシミュレーション重力波信号を実際の検出器データに追加し，それらのうちパイプラインがどれだけ検出できるかを検証しました．これにより，探索がどのような系を，どの程度の距離まで検出できたか，すなわち探索の感度を推定することができました．今回の結果は，過去の結果の上に積み重ねたものです．太陽質量以下の連星ブラックホール系および太陽質量以下の中性子星系について，O4a データと O4b データを用いて得られた感度推定値を組み合わせました．説得力のある信号が見つからなかったこと，また感度検証によって特定の合体率に対して検出が期待される信号数がわかることから，これらの合体がどの程度の頻度で起こるかについて上限値を設定することができます．

我々の得た上限値を，信頼水準 90%で図 2 に示します．例えば，チャープ質量が $2M_\odot$ の系については，上限値は 1 立方ギガパーセクあたり年間 50〜72 件です．また，通常より軽い中性子星を含む連星に対する探索の感度も検証しました．検討した母集団モデルについては，1 立方ギガパーセクあたり年間に起こりうるこのような合体の件数にも，同様に上限値 249 が得られました．

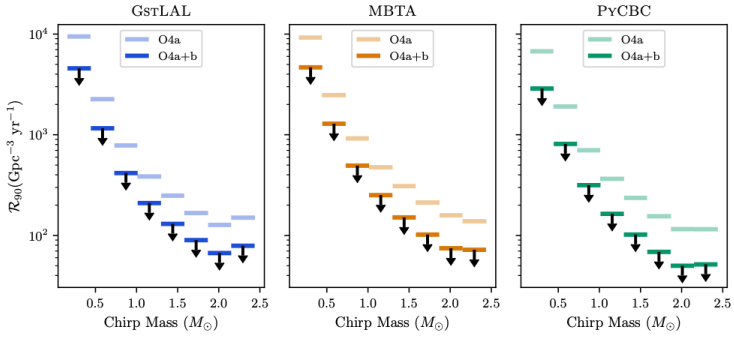


図 2:（論文の図 7）チャープ質量の関数として示した，少なくとも 1 つの太陽質量以下の天体を持つ連星ブラックホール母集団の合体率に対する信頼水準 90%の上限値（$\mathcal{R}_{90}$，単位は 1 立方ギガパーセクあたり年間の件数）．O4a と O4b の結果を組み合わせることで，「O4a+b」と表記される合体率の統合推定値が得られている．3 つの図それぞれにおいて，濃い（薄い）線は O4a+b（O4a のみ）解析の結果を示す．矢印は，O4a+b 探索によって制約されない合体率の方向を示す．

これらの合体率上限値は，太陽質量以下の天体を含む連星ブラックホール合体を予測する暗黒物質モデルに制約を与えます．我々は，原始ブラックホールと**散逸性**暗黒物質ブラックホールという，2 つの異なる暗黒物質モデルを検討しました．原始ブラックホールは，初期宇宙の密度の高い領域から形成された可能性があります．その一部は，その後連星系を形成し，最終的に合体した可能性があります．散逸性暗黒物質モデルは，暗黒物質が，現在起源が不明な粒子で構成されており，それらが周囲と相互作用し，集積し，その結果重力崩壊してブラックホールを形成し，その後合体する可能性を考慮するものです．我々の重力波観測から得られた，これらの天体の合体率上限値を用いて，太陽質量以下の領域における原始ブラックホールおよび散逸性暗黒物質ブラックホールの形態をとりうる暗黒物質密度の割合について，最大値を導出しました．

すべての原始ブラックホールが同じ質量を持つと仮定した場合，1 $M_\odot$ のブラックホールについては暗黒物質の割合が 1.8–3.2%未満，0.35 $M_\odot$ のブラックホールについては 10–15%未満であるという制約が得られました．散逸性暗黒物質モデルについては，最小暗黒物質ブラックホール質量の範囲に応じて，暗黒物質の割合が最小 0.001%程度まで制約されました．O4a と O4b を組み合わせることで，太陽質量以下の天体探索が対象とする質量範囲において，これらのモデルに対するこれまでで最も強い重力波による制約が得られました．

O4c は 2025 年 11 月まで継続しました．この追加データを解析することで，太陽質量以下の天体を含む連星合体を検出する，あるいはこれらの母集団に対してさらに厳しい制約を課す，新たな機会が得られるでしょう．どうぞご期待ください！

さらに興味のある方へ

- 私たちのウェブサイト：
  www.ligo.org
  www.virgo-gw.eu
  gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/ (KAGRA)
- 論文原稿の無料プレプリントはこちら：
  https://dcc.ligo.org/P2600230/public/
  または arxiv:2610.20276
- 私たちの LVK サイエンスサマリー一覧：
  https://ligo.org/science-summaries/

（原稿：左近喜音，翻訳：真貝寿明・左近喜音）