LIGO-Virgo-KAGRA Science Summary（2026年３月4日）
https://ligo.org/science-summaries/o4a_ssm/
tags: #CompactBinaryCoalescence, #SubSolarMass, #O4b, #arXiv:2605.05444

重力波で太陽より軽いブラックホールを探す

LIGO Virgo KAGRA (LVK) 共同研究グループの重力波検出器は、その観測運転期間ごとに、より多くの重力波源を検出する機会をもたらしています。これまでに観測されたコンパクト連星合体は200を超えています。また、未だ検出されていない重力波源を探すことも可能にします。これらの中で魅力的なものに、太陽の質量（以降、$M_\odot$と表します）より小さいコンパクト天体の合体があります。このような軽い天体は通常の恒星の進化から形成されることはないと考えられていますが、宇宙初期の原始ブラックホールなどによって形成される可能性が指摘されています（図１参照）。

軽い天体の合体で生じる重力波は重い天体の合体で生じるものほど大きくないものの、波源が100メガパーセク以内の距離にあれば、私たちの検出器はその重力波を検出することができます。これらの天体の検出は新しい物理に繋がる可能性を秘めています。LVK共同研究グループの第４期観測運転期間の第１部（O4a）で LIGO の２つの検出器は過去最高の感度でデータを収集し、その観測可能範囲は第３期観測運転の時と比較して15-45%ほど向上し、宇宙のより広い範囲を観測することができました。

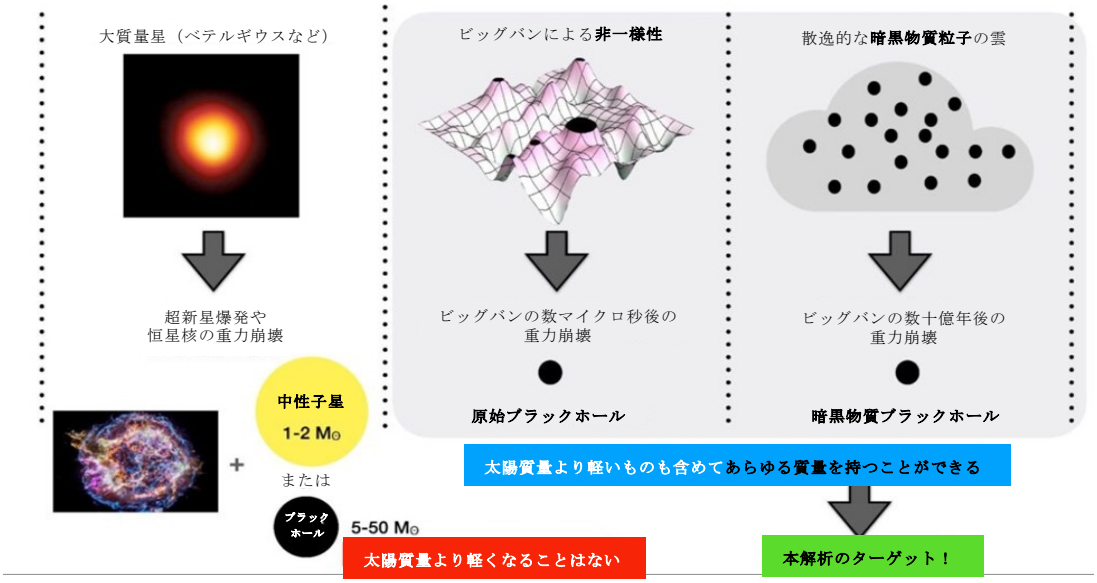


図 1: LIGO-Virgo-KAGRA で観測が期待されるコンパクト天体を形成する様々な天体形成過程。恒星の進化で形成される中性子星やブラックホールの他に、仮説として、原始ブラックホールや暗黒物質ブラックホールなどの形成過程もあり、これらは太陽質量より軽い天体を形成する可能性があると考えられている。

私たちは独立した３つの探査パイプライン（GstLAL, MBTA, PyCBC）を使い、O4a のデータの中から太陽質量以下の天体を伴う連星合体の信号を探しました。３つの探査パイプラインはいずれも想定される波形を使って解析を行うものの、信号を雑音から識別する手法や統計的有意性の推定方法に違いがあります。探索の対象としたのは、連星の伴星の質量が0.2 $M_\odot$から1 $M_\odot$、連星の主星の質量が0.2 $M_\odot$から10 $M_\odot$の系です。ちなみに、今まで重力波で観測された天体はすべて、1 $M_\odot$ より重い天体であり、電磁波による観測は中性子星の質量の下限値が0.8 $M_\odot$程度である可能性を示しています。

もっと知るには：

ウェブサイト：

www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

今回の解析では新しい発見が得られなかったものの、そのこと自体がこのような連星合体の形成率の上限値を与えることになりました（**図２**参照）。（今回の解析では連星の主星が質量ギャップ帯にある未知天体を含む重力波　GW230529　を再び検出することができています。報告時の要約を参照してください。）**図２**はO4aのデータにシミュレートされた太陽質量以下の天体を含む連星合体の波形モデルを加えて解析し、探査パイプラインの検出効率を測定することで得られました。

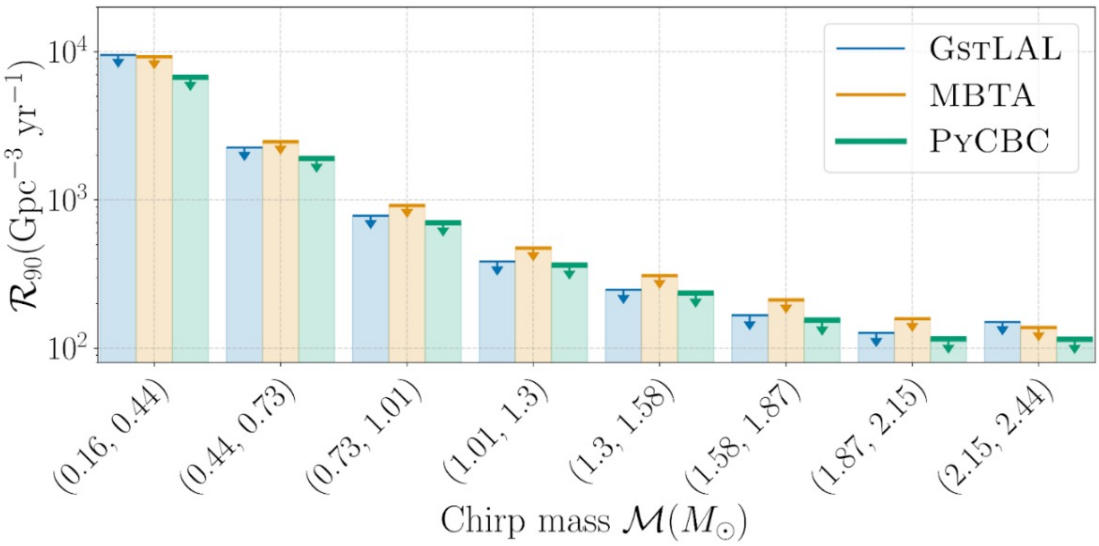


図２：（論文の図５）：太陽質量以下の天体を含む連星の合体率の上限値をチャープ質量の関数として表す。チャープ質量は重力波信号を特徴づける質量パラメータであり、２つの天体の質量を組み合わせて得られる。上限値はO4aデータの中に対象となる信号が発見されなかったことと、各探査パイプラインの想定検出効率を元に求められる。

今回、私たちが行う探索が太陽質量より軽い中性子星にどれ程の感度があるかという点についても初めて調べました。中性子星は太陽の質量より軽くはない、と予想されるものの、そのような中性子星が存在する場合、潮汐効果が連星系の動きに重要な影響を与えると考えられます。潮汐効果とは、一方の天体の重力が他方の天体を変形させる現象を指します。この変形は通常の中性子星では微小であっても、低質量星では著しくなります。私たちの解析では天体がブラックホール（潮汐効果がない点粒子）であることを想定しているため、太陽質量以下の中性子星を伴う連星からの信号を正確に捉えることができない可能性があります。そこで、太陽質量以下の連星中性子星合体の波形をシミュレートしてデータに挿入し、解析し、このような連星合体がどのような頻度で検出されるかを調べました。

合体率の上限値を使い、太陽質量以下の天体の形成を予言する暗黒物質のモデルに対する制限を与えることができます。このようなモデルの１つに、宇宙初期に原始ブラックホールが形成され、連星を作り、いずれ合体することを予想するものがあります。私たちは、原始ブラックホールの質量や連星を形成するシナリオに応じ、暗黒物質のうち、原始ブラックホールが占め得る割合の最大値を導き出しました。また、暗黒物質が（未知の）粒子によって構成され、それらは環境と相互作用して高密度に蓄積し、最終的にブラックホールを形成する、という可能性を予言するモデルもあります。これらのブラックホールは暗黒物質によって構成されるため、「ダークブラックホール」または「暗黒物質ブラックホール」（**図１**参照）と呼ばれます。ダークブラックホールは連星を形成して合体する可能性があり、合体前の螺旋運動（インスパイラル）が重力波の信号として観測されることが予想されます。今回、太陽質量より軽い天体の連星を検出することはできませんでしたが、その結果を使い、太陽質量以下の領域でダークブラックホールが暗黒物質に占め得る割合の予想範囲も求めることができました。

第４期観測運転は2025年11月まで続き、さらにデータを集めました。このデータからより詳細な解析を可能になり、新たな発見、または求められる制限をより強くすることができます。続報をお待ちください。

日本語訳：左近喜音、真貝寿明

もっと知るには：

ウェブサイト:

www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/(KAGRA)

論文の無料プリプリントはこちら またはarXivへ。
本要約の英語版はこちら。