

初期宇宙の惑星質量ブラックホールの探査

暗黒物質は宇宙の全物質の 85% を占めますが、私たちに直接見ることはできません。しかし、さまざまな天体への影響を観測することは可能です。暗黒物質は各銀河に広がって存在し、恒星が軌道から飛び出さないようにしています。また、遠く離れた銀河からの光線の変え、宇宙の大規模構造の形成を助け、宇宙マイクロ波背景放射（宇宙が誕生してわずか 38 万年だった頃の、宇宙最古で最も遠い宇宙の写真）にも痕跡を残しています。

宇宙論研究者たちは長年、暗黒物質は通常の物質とほとんど相互作用しない新しい種類の粒子で構成されているものと想定してきました。しかし、何年もの間、その痕跡が見つからなかったため、他の可能性がより魅力的に見え始めました。その一つ、かつては可能性が低いと考えられていたものが、LIGO-Virgo

のグループが初めて重力波を検出したことで再び注目を集めるようになりました。

これらの検出器で観測されたブラックホールの中には、比較的小さな自転をしているものや通常とは外れた質量をもつものなど、予想外の特徴を持つものがあります。これらの手がかりから、研究者たちは、いくつかのブラックホールが、死にゆく高密度の恒星からではなく、ビッグバン直後のほんの一瞬の間に高密度の物質の塊から形成されたのではないかと考えるようになりました（図 1 参照）。もし、原始ブラックホール（Primordial Black Hole; PBH）と呼ばれるこのようなブラックホールが存在するならば、謎の暗黒物質の一部、あるいはすべてを構成している可能性があります。新たな重力波が検出されるたびに、この可能性をめぐる議論は活発になってきました。

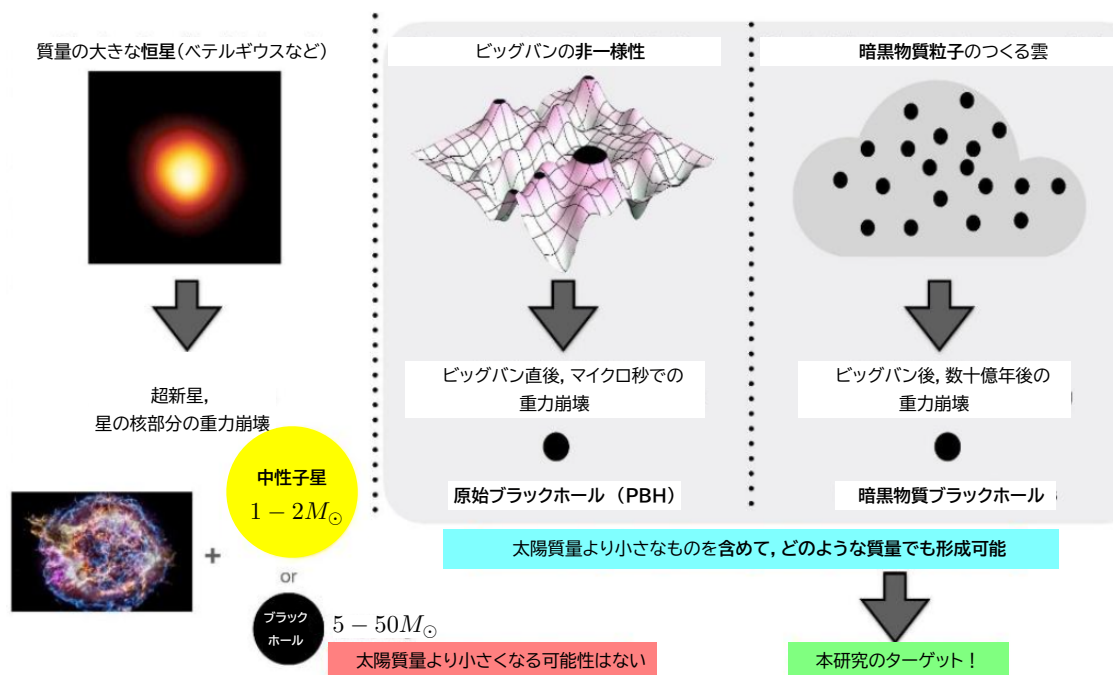


図 1: ブラックホールが形成されるさまざまな過程を示す模式図。

左：死にゆく大質量星の超新星爆発によって形成されるブラックホール。その質量は太陽質量（ $M_{\odot}$ ）より軽くなることは決してない。

中央：ビッグバン直後の小さな密度ゆらぎから形成される可能性がある原始ブラックホール。原理的には任意の質量を持つ可能性があり、太陽よりもはるかに軽い質量を持つこともあり得る。

右：未知の暗黒物質粒子の雲が重力崩壊することで、ビッグバンからずっと後に発生する可能性がある暗黒物質ブラックホール。本研究で行われた探索は、中央と右図のような低質量ブラックホールを対象としている。

LIGO, Virgo, **KAGRA** の重力波検出器は、ブラックホールや中性子星の合併現象、変形した**パルサー**の自転、**超新星爆発**などから発生する**重力波**を探索するために設計されました。しかし、これらの検出器は非常に**感度が高い**ため、数百**キロパーセク**離れた距離までの**螺旋運動**（**インスパイラル運動**）する惑星質量程度の原始ブラックホール連星も観測することができます。現在の検出器で観測可能となるのは、合体前の数時間から数日にわたる期間で、この持続時間は、現在日常的に検出されているより重いブラックホールの合体よりもはるかに長い時間です。

本研究では、惑星質量の超コンパクト天体からなる連星系が螺旋運動する際に放出する重力波を探索しました。

これらの信号は、検出器が感度を持つ周波数で少なくとも数時間持続します。**整合フィルタリング解析**では、比較的長時間持続する信号の探索に膨大な計算能力を必要とするため、今回の探索処理が困難です。そのため我々は、新しい手法を用いました。検出器データを**時間・周波数**で表示し、**チャープ質量**ごとに決まって現れる軌

跡に対応するものを探す、という手法です。チャープ質量は、連星合体前の螺旋運動で生じる重力波の波形を決めるパラメータです。この手法で超コンパクト天体の螺旋運動を探すという作戦です。

本研究では、Advanced LIGO, Advanced Virgo, **KAGRA** の第4回**観測運転**第1期 (O4a) で得られたデータから、天の川銀河系内で超コンパクト天体が螺旋運動しているときの重力波信号を探索しました。重力波信号は検出されませんでした。図2に示すように、(1) 螺旋運動が観測可能だった距離、(2) このような螺旋運動の発生頻度、(3) 原始ブラックホールが暗黒物質に占める割合、の3つの**上限**を設定することができました。

本探索は、惑星質量程度の原始ブラックホールが暗黒物質に占める割合について、重力波による最初の制限値を与えるものです。孤立したブラックホールを対象とした探索ほど感度は高くありませんが、この研究は、連星となった原始ブラックホールに対して、幅広い質量帯にわたって、潜在的な存在可能な量の制約を、他の観測手段と相補的に与えるものです。

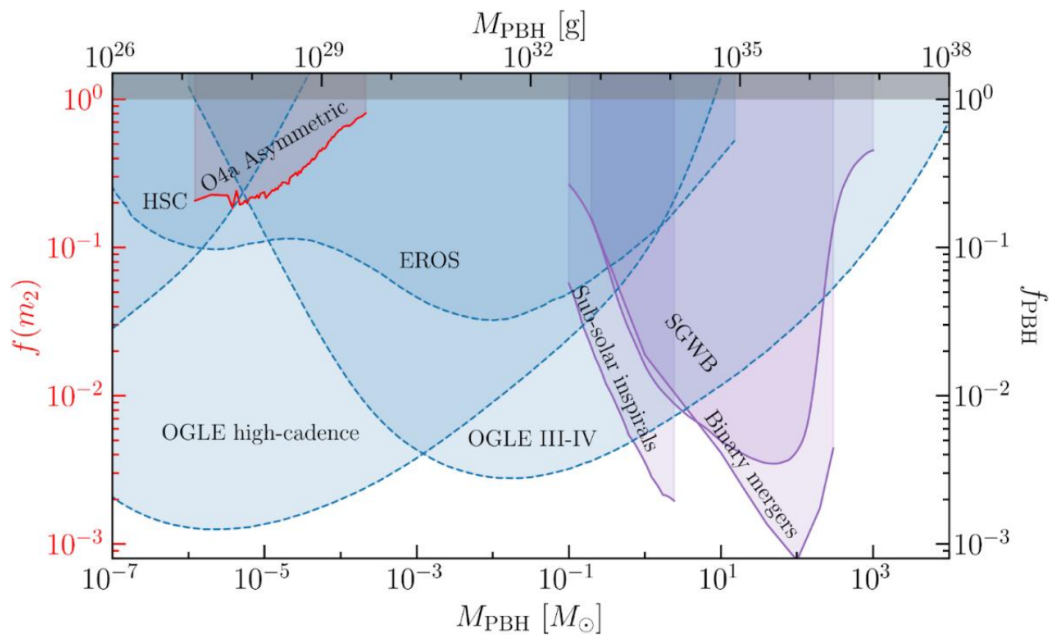


図2: (論文の図4): 暗黒物質のなかで原始ブラックホール (PBH) が占める可能性の上限を、質量の関数として赤線で示す。横軸は原始ブラックホールの質量をグラムと太陽質量の両方で示す。右の縦軸は対応する暗黒物質の割合 f_{PBH} を示し、これは他の実験による制限値と比較ができるようにした。これらの既存の制限値は通常、すべての原始ブラックホールが同じ質量を持つことを前提としている。これに対して、今回得られた制限 (赤線) は、原始ブラックホールがすべての暗黒物質を構成すると仮定した場合の、各質量の原始ブラックホールが占める割合である。各曲線は、原始ブラックホールの形成メカニズムと質量分布に関する特定の仮定を反映している。私たちの結果は、原始ブラックホールの質量が太陽質量の $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 倍の間であれば、存在量が1未満になるように制限している。HSC, EROS, および OGLE から得られていたマイクロレンズ効果を用いた制限を補完する。これらの解析では、すべての暗黒物質が原始ブラックホールで構成されていることを仮定しているとともに、原始ブラックホールの形成過程にも特定の方法を仮定している。

用語集

- **ライゴ (LIGO)**: レーザー干渉計重力波観測所 (LIGO) は、米国にある2つの重力波検出器から構成されます。1つはルイジアナ州リビングストンの近くにあり、もう1つはワシントン州ハンフォードの近くにあります。どちらの検出器も、直交する2本の4 km の長さの腕を備えた大規模なレーザー干渉計であり、通過する重力波によって引き起こされる腕の長さの相対的な変化を測定する装置です。
- **ヴィルゴ (Virgo)**: イタリア、ピサの近くにある重力波検出器。これもレーザー干渉計で、腕の長さは3 km です。
- **かぐら (KAGRA)**: 日本の富山近郊にある地下重力波検出器。これもレーザー干渉計で、3 km の長さの腕と極低温冷却鏡を備えています。
- **パルサー (Pulsar)**: 「脈動する電波源」が由来で、磁極から電磁放射のビームを放射する、大きな磁化をもつ回転するコンパクトな星のこと。
- **感度 (Sensitivity)**: 信号を検出する検出器の能力を示す指標。ノイズレベルの低い検出器は、弱い信号を検出できるため、感度が高い（優れている）と言われます。
- **観測運転期間 (Observing run)**: 重力波検出器が天体物理的な観測のためにデータを取得している期間。
- **上限 (Upper limit)**: ある量の推定に関して、非検出と整合しつつ取り得る最大値。通常は、95%の信頼度限界を用いる。すなわち、データが与えられた場合、その量がこの限界を下回る確率は95%となる。
- **原始ブラックホール (Primordial black holes)**: 宇宙の非常に初期、ビッグバンの直後1秒にも満たない時期に、物質が例外的に高密度だった領域で形成されたと考えられるブラックホール。

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-P2500248/public/>

- GWTC-4.0 のデータは [Gravitational-Wave Open Science Centre](#) にて公開しています。

(日本語訳: 真貝寿明, 山本貴宏)

