

超軽量ベクトルボゾン雲からの重力波は検出できるか？

重力波 (GW) は、地球上の加速器実験で知られている現象を超える、素粒子物理学における特異な現象の探索に利用することができます。ここでは、いわゆる「超軽量ベクトルボゾン」の探索結果を報告します。LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) 共同研究チームは、既知のブラックホールを対象に、ベクトルボゾン雲に由来すると考えられる重力波の探索を初めて試みました。このような重力波が検出されなかったことから、質量が 1×10^{-13} 電子ボルト [eV] 付近のベクトルボゾンの存在を支持しない結果となりました。

超軽量ボゾン雲とは？

超軽量ボゾンは、素粒子物理学の標準モデルを拡張する多くの理論においてその存在が予言され、自転するブラックホールの周囲に雲を形成すると考えられている、非常に小さな質量 ($< 10^{-6}$ eV) をもつ仮説上の粒子です (図 1)。周囲の環境とほとんど相互作用しないと考えられているため、暗黒物質の有力な候補となります。本研究では、とくにスピン量子数 $s = 1$ であるベクトルボゾンに注目しました。これは、同様に存在が仮定されているスカラーボゾン ($s = 0$) およびテンソルボゾン ($s = 2$) の親戚です。

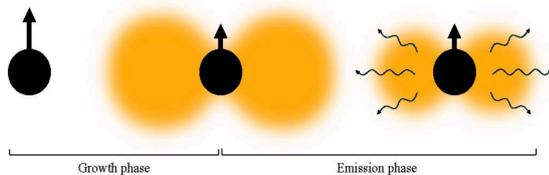


図 1: 自転するブラックホールの周囲におけるボゾン雲の超放射成長と減衰の模式図。この模式図では、このプロセスを 2 つの段階に分けています。1 つは成長段階であり、ブラックホールは成長するボゾン雲に質量エネルギーを奪われます。もう 1 つは、重力波放出段階であり、この段階ではボゾン雲はエネルギーを失い、重力放射を続けます。後者は、はるかに長い時間がかかります。

どのように探すのか？

LVK は、第 4 期観測運転第 1 部 (O4a) のデータを用いて、ベクトルボゾン雲からの重力波探索を 2 種類のブラックホールを対象に行いました。1 つは、重力波イベント GW230814 と GW231123 の連星合体から生じた残骸ブラックホールで、も

う 1 つは、はくちょう座 X-1 連星系にある天の川銀河系内のブラックホールです。私たちがこれらのブラックホールに注目した理由は、質量が大きく、自転速度も速く、比較的近い位置にあるためです。そして、これらすべてを高い信頼度で把握していたため、予想されるボゾン雲からの重力波信号を正確にモデル化することが可能でした。しかし、それぞれのブラックホールにはそれぞれ長所と短所がありました。特に、はくちょう座 X-1 を観測する利点の一つは、はるかに近い位置にあることです。約 7,000 光年離れていますが、私たちの銀河系内にあります。合体残骸が数十億光年離れた遠方銀河にあるとは対照的です。一方、合体残骸をターゲットとする利点は、それらがいつ、どのように誕生したかを正確に把握できることです。これに対して、はくちょう座 X-1 のブラックホールは、その年齢や歴史が不明確です。

これら 2 種類のブラックホールは特性が大きく異なるため、潜在的な重力波信号を探すために、2 つの異なる手法を用いました。1 つは、若い孤立した合体残骸に適した隠れマルコフモデル (HMM) 法、もう 1 つは連星系内の古いブラックホールに適した連星 BSD-VBC 法です。HMM 法は柔軟な探索手法であり、急激に、あるいは予期せず変化する信号に最適です。一方、BSD 法は、信号周波数はあまり変化しないものの、連星系の動きによってドップラー変調を受けるタイプの波源に最適です。

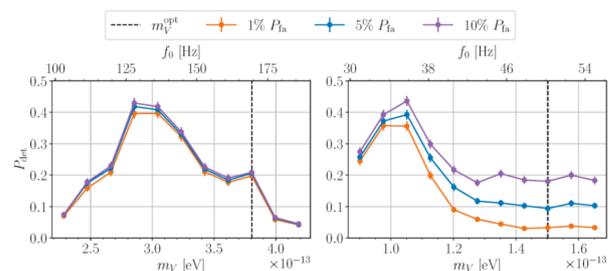


図 2: 残骸ブラックホールを対象とした探索でボゾン雲由来の重力波が検出されなかったことから、ボゾン質量 (横下軸) ごとに、その存在の可能性を退けられる程度 (信頼度 P_{det}) を GW230814 (左図) と GW231123 (右図) について示す。横上軸は、各ボゾン質量に対応する重力波の放出周波数を示している。これらの結果の解釈例として、1% の偽警報率 (オレンジ色の曲線) を考えてみよう。この場合、 $P_{\text{det}} > 0.3$ と表示されるボゾン質量の範囲は、1% の偽警報率に対して 30% の信頼度で存在が退けられることになる。これは確実な除外ではないが、将来の観測により、これらのボゾン質量範囲をより高い信頼度で検証できるようになるだろう。

何がわかったのか？

データにはベクトルボゾン雲からの重力波信号は見られませんでした。このことから、次のような疑問が生じるでしょう。LVKでも発見されなかったことを考えると、超軽量ベクトルボゾンが存在する可能性はどれほどあるのだろうか？

厳密な統計解析により、私たちはその疑問に、…ある程度答えることができます。連星合体残骸を対象とした探索では、質量範囲 $[0.94, 1.08] \times 10^{-13}$ eV と $[2.75, 3.28] \times 10^{-13}$ eV の質量範囲にベクトルボゾンが存在する可能性が低いと示されました(図2)が、この結論に対する信頼度は高くありません。一方で、検出器の精度向上の技術開発を継続することで、将来の探索はより高い信頼度で除外できると期待されます。はくちょう座 X-1 のブラックホールを対象とした探索(図3)では、ブラックホールの年齢と初期条件に関する特定の仮定に基づく形で、質量範囲 $[0.85, 1.59] \times 10^{-13}$ eV のベクトルボゾン

を95%の信頼度で除外しました。

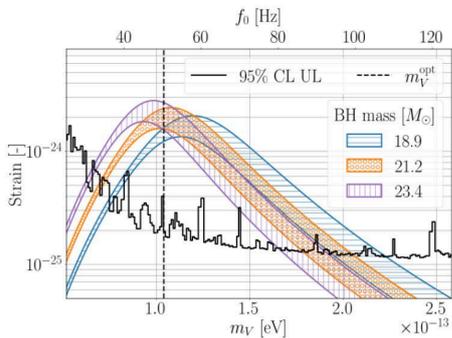


図3: はくちょう座 X-1 のまわりのベクトルボゾン雲から放出される重力波のひずみ振幅の上限値(黒曲線)を、ボゾン質量(下軸)と周波数(上軸)の関数として示す。重力波が非検出だったことから得られる95%の信頼度での曲線である。網掛けで示された領域は、この系で予測されるひずみ振幅を示す。特に注目すべきは黒い曲線がこの網掛け領域を下回っている部分で、この部分は、本来なら検出できるはずの信号が見つからなかったボゾン質量の範囲を示している。したがって、この質量範囲にボゾンが存在する可能性は95%の信頼度で低いと言える。

なぜこれが重要なのか？

何も発見できなかったからといって、超軽量ベクトルボゾンが存在しないことを意味しているわけではありません。重要なのは、対象とする質量範囲の一部において、超軽量ベクトルボゾンが存在する可能性が低いということです。今後、検出器の感度を高め、より多くのブラックホールを観測していくと、次の2つのうち、どちらかが起こるでしょう。1つの可能性は、超軽量ボゾンによって生成された重力波の兆候を直接検出すること、別の可能性は、他の相補的な研究と併せて、検出されなかったすべての結果を統合し、超軽量ボゾンの存在を完全に排除できるようになる、というものです。最終的な結果がどうであれ、この研究は、捉えどころのない暗黒物質の正体を最終的に明らかにすることを含めて、重力波検出器が新しい物理学の強力な実証装置として、どのように活用できるかを示す重要な前例となることでしょう。

さらに興味のある方へ

私たちのウェブサイトでも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/P2500256/public>

最新の重力波カタログ GWTC-4.0 としてリリースしている波形データの情報は、[ここ](#)。

O3 までの観測データを用いたブラックホール周囲のボゾン雲に関する解析論文の概要は[ここ\(英語版\)](#)。

(日本語訳: 真貝寿明, 桑 潤哉)

用語集

- **連星 BSD-VBC 法 (Binary Band Sampled Data-Vector Boson Cloud)**: 発生源の軌道運動によるドップラー偏移のデータを補正し、ハフ変換のような方法を使用して、短時間フーリエ変換から作られた時間-周波数図内で持続的信号を探索する分析方法。
- **はくちょう座 X-1 (Cygnus X-1)**: はくちょう座の領域に、約 7000 光年離れたところに位置する高質量 X 線連星系。史上初めて発見されたブラックホールで、青色超巨星変光星と軌道を描いて公転運動している。
- **電子ボルト (Electronvolt)**: 原子物理学および素粒子物理学で一般的に使用されるエネルギーの単位で、1 電子ボルト (eV と略記) は約 1.6×10^{-19} ジュールに相当する。
- **GW230814**: 2023 年 8 月 14 日に、LVK によって検出された重力波イベントで、**信号雑音比**がとても高いもの。GW150914 と同程度の質量を持つ連星ブラックホールの合体によるもの。LIGO の**リングストーン検出器**によってのみ観測された。
- **GW231123**: 2023 年 11 月 23 日に LVK によって検出された重力波イベント。これまでに検出された中で最大の質量をもつ連星ブラックホール合体の結果であり、残骸ブラックホールの質量は、太陽の約 220 倍である。合体前のブラックホールの一方または両方は、恒星進化モデルでは不可能とされる質量範囲 (**上方質量ギャップ**内) に位置していた可能性がある。
- **自転角運動量 (Spin)**: 自転するブラックホールの角運動量のことで、質量と電荷とともにブラックホールを特徴づける物理量の 1 つ。
- **ひずみ振幅 (Strain)**: 通過する重力波によって引き起こされる時空の変形による 2 つの測定点間の距離変化の比率。地球に到達する最も強い重力波でさえ典型的なひずみは非常に小さく、通常は 10^{-21} 未満。