

重力波とブラックホールのスピンによる超軽量ボソンへの制限

重力波は、他の実験では調べるのが難しい、あるいは不可能な、宇宙の構成要素を探るための強力な手段を与えてくれます。物理学者は、素粒子どうしがどのように相互作用するかについての最良とされる理論 — 標準模型として知られるもの — が不完全であることを知っており、観測結果をよりよく説明するために、標準模型を修正・拡張するさまざまな有望な理論が提案されています。本研究では、LIGO-Virgo-KAGRA 共同研究グループが連星ブラックホール合体の観測データを用いて、超軽量ボソン (ultralight boson) の性質を調べました。超軽量ボソンは、標準模型のいくつかの拡張理論に登場する粒子であり、ダークマターの正体を含む素粒子物理学・宇宙論の未解決問題を説明する手がかりになりうると考えられています。

私たちは、互いに補完的な 2 つのアプローチを組み合わせました。1 つは、新たに形成されたブラックホールを取り囲むベクトルボソンの雲から発せられる持続的な重力波信号を直接探索する方法、もう 1 つは合体するブラックホールの自転角運動量を用いて間接的に探索する方法です。どちらも「ブラックホール超放射」として知られる過程に基づいています。超軽量ボソンの証拠は見つかりませんでしたが、今回の結果は、スカラーボソン・ベクトルボソン双方の質量に対して、より一般的で（すなわち、より少ない仮定に基づく）かつより強い（すなわち、より高い信頼度の）制限を与えるものであり、これらの粒子が存在しうるパラメータ空間をさらに狭めました。

ブラックホール超放射とは？

超軽量ボソンは、素粒子物理学の標準模型を拡張する数多くの理論によって言われる仮想的な粒子です。既知の粒子よりも何桁も軽く、ダークマターの有力な候補の一つとされています。本研究では、スカラーボソン (スピン 0) とベクトルボソン (スピン 1) の両方を扱います。もしこうした粒子が存在すれば、回転するブラックホールと、超放射と呼ばれる過程を通じて相互作用することができます。この過程では、ブラックホールが自らの回転エネルギーの一部をボソン場に受け渡し、その場が指数関数的に成長して、ブラックホールの周囲に粒子の雲を形成します。

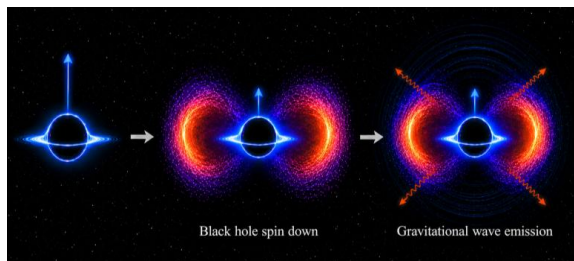


図 1: 回転するブラックホールの周囲にボソンの雲が形成され、進化していく様子の模式図。成長段階では、超放射がブラックホールから回転エネルギーを引き抜き、ボソン雲を増幅させながらブラックホールの回転を遅くする。続いて、はるかに長く続く重力波放出段階では、ボソン雲は連続重力波を放出しながらゆっくりと減っていく。

ボソンの雲が成長するにつれて、ボソン雲はブラックホールから角運動量を奪い、ブラックホールはスピンダウン—つま

り、ゆっくりと自転速度を落としていきます。この雲はまた、ほぼ単色の（すなわち、ほとんど一定の周波数の）連続重力波を放出する可能性があります。これら 2 つの効果により、超軽量ボソンを探索する互いに補完的な 2 つの方法が得られます。ボソン雲が放つ重力波を直接とらえる方法と、ブラックホールの自転の測定を通じて間接的にとらえる方法です。

どのように探索するのか？

私たちは、LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) 共同研究グループによる重力波観測データの中に超軽量ボソンの影響を探すため、互いに補完的な 2 つのアプローチを用いました。第一に、連星ブラックホール合体の残存ブラックホールを取り囲むベクトルボソンの雲からの、持続時間の長い重力波信号を探索しました。ベクトルボソンに着目したのは、スカラーボソンよりも強い重力波信号を生み出すと予想され、現在の重力波検出器でとらえやすいと考えられるためです。これらの信号はほぼ単色であり、ブラックホール合体後、数時間から数か月にわたって持続すると予想されるため、新たに形成されたブラックホールは有望な探索対象となります。

私たちは、GW250114 と GW250207 という合体イベントの後に取得されたデータを、隠れマルコフモデルと呼ばれる手法を用いて解析しました。これは、時間とともに周波数に変化する微弱な信号を追跡するために設計された手法です。これらのイベントを選んだのは、残存ブラックホールの質量が大きく、高速で自転しており、比較的近傍にあるため、私たちの探索でとらえられるベクトルボソン雲を宿主有望な天体だったからです。さらに、合体信号が非常に大きかったこともあり、その性質を十分な精度で測定でき、期待される重力波信号を正確にモデル化できたことも選定理由です。

第二に、連星合体で観測された高速自転ブラックホールの測定値を用いた解析を行いました。もしこれらのブラックホールの質量に対応する特定の質量を持つ超軽量ボソンが存在すれば、超放射がブラックホールから効率よく角運動量を奪い、その自転角運動量（スピン）を低下させるはずですが、連星合体を構成するブラックホールが高速で自転していることが観測されれば、もし存在すればすでにこれらのブラックホールを大きく減速させていたはずの質量を持つボソンが存在しないことを示せます。私たちはこの手法を、高スピンの合体イベントである GW240515_005301, GW241113_163507, GW241225_082815 に適用し、スカラーボソンとベクトルボソンの両方に対して補完的な制限を課することができました。

何がわかったのか？

連星合体後の残存ブラックホールを取り囲むベクトルボソン雲からの重力波を対象とした指向探索を行いました。信号の証拠は見つかりませんでした。そこで、検出可能な重力波を生み出すはずでありながら観測されなかったベクトルボソンの質量範囲を特定しました。これにより、 $[2.80, 3.95] \times 10^{-13} \text{ eV}$ (1 eV [電子ボルト] は約 $1.8 \times 10^{-36} \text{ kg}$ の質量に相当) の範囲のベクトルボソンの質量を、90% の信頼度で排除することができました。結果を図 2 に示します。O4a のデータを用いた LVK による最初のベクトルボソンの雲の指向探索と比較すると、今回の解析はかなり強い制限になっています。

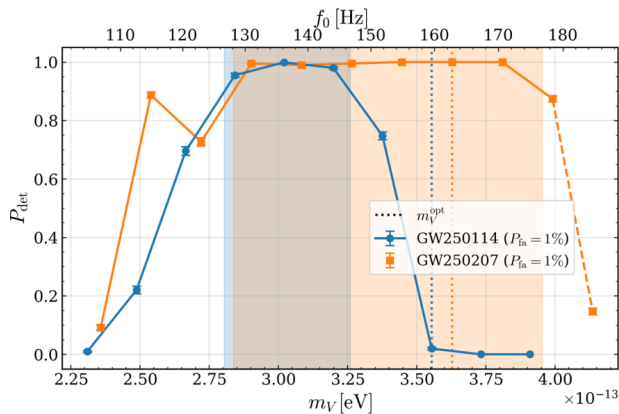


図 2: (論文の図 3) GW250114 (青) および GW250207 (オレンジ) の残存ブラックホールを対象とした探索でいずれも重力波が検出されなかったことから、下側の横軸で示される質量を持つベクトルボソンの存在を棄却できる信頼度 (P_{det}) の推定値。上側の横軸は、各ボソン質量が重力波を放出する場合に対応する周波数を示す。網掛け部分は、90% の信頼度で棄却されるベクトルボソンの質量範囲を示す。

こうしたより強い制限が得られたのは、主に本研究で解析した合体イベントの性質によるものです。ブラックホール合体イベントである GW250114 と GW250207 はいずれも比較的近傍で発生し、高い信号対雑音比で検出されたため、この探索にとって特に好都合な対象となりました。これらの要因が相まって、ベクトルボソン雲からの重力波を検出する能力が向上し、その結果、重力波が検出されなかったことに基づくベクトルボソンの質量排除の信頼度を大幅に高めることができました。

LVK によるブラックホール回転量（スピン）の測定値は、超軽量ボソンを独立に検証する手段となります。

GW240515_005301, GW241113_163507, GW241225_082815 で観測された高いスピンは、特定の質量を持つボソンによる効率的な超放射スピン低下とは整合しないことがわかりました。ブラックホールの寿命を控えめに少なくとも 10 万年と仮定すると、測定されたスピンから、90% の信頼度で $[1.39, 6.94] \times 10^{-13} \text{ eV}$ の範囲のスカラーボソンの質量と、 $[0.32, 14.4] \times 10^{-13} \text{ eV}$ の範囲のベクトルボソンの質量を排除できます (図 3 参照)。この排除範囲は指向探索よりも広い質量範囲に及んでおり、超軽量ボソン仮説に対する補完的な検証となっています。

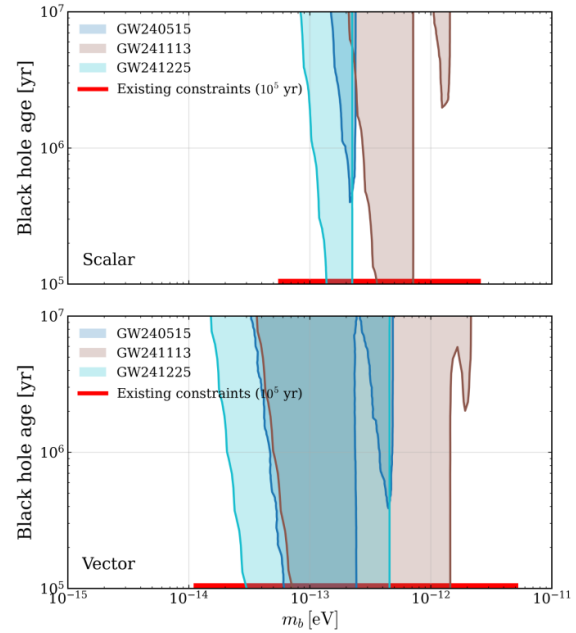


図 3: (論文の図 4) 重力波イベント GW240515_005301, GW241113_163507, GW241225_082815 で観測された高速自転ブラックホールの観測によって排除される、超軽量スカラーボソン (上段) およびベクトルボソン (下段) の質量領域。網掛け部分は、想定するブラックホールの年齢のもとで、観測されたブラックホールのスピンと 90% の信頼度で整合しないボソンの質量を示す。

なぜ重要なのか？

信号が検出されなかったからといって、超軽量ボソンが存在しないことにはなりません。むしろ今回の結果は、私たちの重力波データに観測可能な影響を及ぼさずだった特定の質量範囲内には、これらの粒子が存在する可能性がますます低くなっていることを示しています。ベクトルボソン雲からの重力波の直接探索と、高速自転ブラックホールによる独立した制限とを組み合わせることで、本研究は超軽量ベクトルボソンに対してこれまでで最も強い重力波による制限のひとつを与えています。

重力波検出器の感度が向上し、観測されるブラックホール合体の数が増え続けるにつれ、将来の探索は超軽量ボソンのパラメータ空間のさらに広い部分を調べられるようになるでしょう。これらの観測は、いずれ新しい粒子の直接的な証拠を明らかにするかもしれませんが、あるいは成立しうる理論の範囲をさらに狭めていくことになるかもしれません。どちらの結果になったとしても、ダークマターの本質についての貴重な知見が得られるでしょう。

より広い視点で見れば、本研究は、地上の実験では調べることが難しい、あるいは不可能なアイデアを検証するための強力な実験場として、ブラックホールと重力波観測をどのように活用できるかを示すものです。



さらに詳しく知るために

- 私たちのウェブサイトをご覧ください
www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/ (KAGRA)
- 論文の無料プレプリントはこちらから閲覧できます：
<https://dcc.ligo.org/P2600218/public/>
または arxiv でも：<https://arxiv.org/abs/2608.11620>
- 自転するブラックホールの周囲のスカラーボソンの雲を対象とした、私たちの以前の (O3 期の) 探索についてのサイエンスサマリー (2021 年 11 月 30 日) はこちら：
<https://ligo.org/science-summaries/O3BosonClouds/>
(英語版のみ)

用語集

- **ボソン (Bosons)**: 素粒子の一種のクラス。ボソンは、もう一方のクラスであるフェルミオン (電子など) が従う「パウリの排他原理」に従わない。この性質により、多数のボソンが同時に同じ量子状態を占めることができ、本稿で扱うボソン雲のような巨視的な対象を形成することが可能になる。
- **電子ボルト (Electronvolt (eV))**: 電子ボルトの略称で、原子物理学・素粒子物理学でよく用いられるエネルギーの単位。アインシュタインが示したエネルギーと質量の関係式 $E = mc^2$ により、粒子の質量はエネルギーを光速の 2 乗で割った単位、すなわち eV/c^2 で表すことができる。例えば、電子の質量は $5.11 \times 10^5 \text{eV}/c^2$ であるのに対し、現在知られている中で最も軽い質量を持つ粒子であるニュートリノの質量は $0.120 \text{eV}/c^2$ 未満である。自然単位系 ($c = 1$ とする) を用いる場合、質量は eV で表される。
- **超放射 (Superradiance)**: 粒子が自転する大質量天体から回転エネルギーを引き出す過程。ボソン雲の場合、回転するブラックホールの近傍にあるボソン場は、超放射散乱によって増幅されることがある。
- **ベクトルボソン (Vector boson)**: 粒子が自転する大質量天体から回転エネルギーを引き出す過程。ボソン雲の場合、回転するブラックホールの近傍にあるボソン場は、超放射散乱によって増幅されることがある。