

GWTC-4.0: 重力波の重力レンズ効果の探索

LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) 共同研究グループで検出されているコンパクト連星の合体によって生じる重力波（時空のさざ波）は、アインシュタインの一般相対性理論によって予言されていました。アインシュタインの理論によれば、物質は周囲の空間と時間を曲げるため、その領域を通過する信号は曲率によって向きを変えます。重力レンズ効果として知られるこの現象は、光のレンズ効果と数学的に類似していて、例えば、メガネのレンズ効果（おそらくこの記事を読んでいる際に頼りにしている現象でしょう！）のようなものです。宇宙の巨大な天体による光の重力レンズ効果は 100 年以上にわたって観測されており、天文学者の日常的なツールの一部となっていますが、重力波のレンズ効果はこれまで観測されていません。

本研究では、最新の LVK 突発性重力波カタログ (GWTC-4.0; このカタログには、第 4 回観測運転第 1 期 (O4a) で行われた検出が含まれています) に詳述されている新しい連星ブラックホール合体におけるデータから、重力波のレンズ効果の兆候を探しました。

重力レンズ効果は重力波にどのような特徴を残すのでしょうか？

すべての物質は時空にゆがみをもたらすため、地球に到達する重力波信号をレンズ効果で屈折させる可能性のある天体は、実に多種多様です（質量もさまざまです）。これらの天体は、個々の恒星から星の集団、そして銀河や銀河団にまで及びます。このようにさまざまな質量スケールによるレンズ効果が生じる可能性があるのなら、重力波に見られる重力レンズ効果の潜在的な特徴も多様であることは驚くべきことではありません。

まず、質量スケールの重い側、つまり銀河や銀河団（太陽質量の何億倍かそれ以上）について考えてみましょう。重力波信号がこのような質量の大きい天体に十分接近すると、「強いレンズ効果」とよばれる現象が生じ、その信号が複数回コピーされたものになります。図 1 はこの現象を説明したもので、光（重力波源の母銀河からのもの）と重力波信号自体の両方に強いレンズ効果がどのように作用するかを示しています。これらの信号のコピーはそれぞれ独自の軌道をたどり、天体が作り出す重力場の異なる部分を通過するため、私たちは、異なる時刻に異なる倍率（明るさ）で観測することになります。これにより重力波の振幅が変化し、波源が実際よりも近くあるいは遠くにあるように見えます。しかし、信号の形状は、全体的な位相シフトを除いて変化しません。これは、眼鏡を通して見ると反射光の位相が反転するのと似ています。

このことは、測定されたパラメータがよく似ている重力波イベントを探すことで、レンズ効果を受けた複数の信号を探せることを意味しています。例えば、質量が似ている連星系から発生し、地球面の同じ方向から到来し、しかし一見すると波源までの距離が異なるように見える複数の重力波イベントを観測できるかもしれません。もちろん、このような重力波は偶然に生じる可能性もあるため、徹底的な調査を行い、こうした「偽陽性」のケースを排除（あるいは少なくとも削減）

するよう努めなければなりません。この解析は多段階のプロセスを経て行われます。

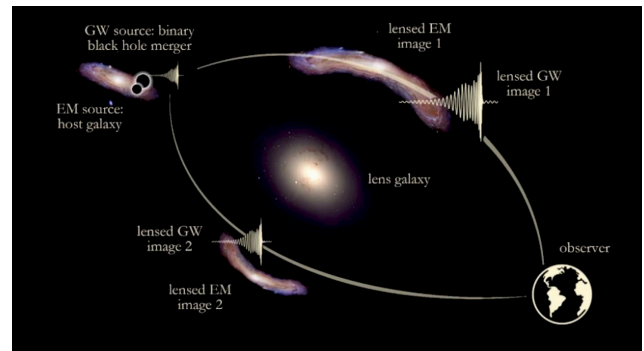


図 1: 強い重力レンズ効果を示す模式図。波源から放出された信号がレンズ天体の近くを通過すると、その信号の複数の「コピー」が生成される。各コピーはそれぞれ独自の経路と異なる明るさになる。そして、これらの複数のコピーは、別々の信号として、異なる時刻に地球に到達して観測される。この模式図は、強いレンズ効果が重力波 (GW) に及ぼす影響と、光 (電磁波) に及ぼす影響を重ねて示している。また、重力波源の母銀河が望遠鏡で観測されるとゆがんでみえる画像も添えてある。 [Image credit: Laura Uronen, CUHK.]

まず、さまざまな重力波イベントを高速アルゴリズムを用いて調べ、推定されたパラメータが類似しているものを探し、レンズ効果を受けているという仮定（「レンズ効果あり仮説」と呼ばれる）の下で、さまざまな信号の組み合わせがどの程度適合するかを評価します。

この最初のステップでレンズ効果の候補リストが選別され、より高度で計算負荷の高い分析に渡され、潜在的な候補の重要度が判定されます。

また、信号ごとに増幅率が異なるため、「閾値以下」の信号と

なっている可能性も考慮する必要があります。閾値以下とは、非常に「静か」な信号であるため、LVK の標準的な重力波信号探索では検出されない信号のことです。そうは言っても、私たちが受け取るデータの中には含まれているため、候補を絞り込んで探索を行うことになります。

大スケールで生じる強い重力レンズ効果の探索では、通常は同じ信号の複数のコピーを探しますが、特定の条件下では、単一の重力波信号しか識別できない場合があります。このシナリオは、タイプ II と呼ばれる場合に発生します¹。そして、このような状況では、重力レンズ効果によって、信号の周波数にもわずかな違いが生じて検出されることになります。

次に、より小さく、より質量の小さいレンズに目を向けてみましょう。この場合も、信号が物体に十分接近すると、複数の像が生成されますが、レンズがはるかに小さいため、レンズによって生じる方向のずれと時間遅延も小さくなります。つまり、複数の別々の信号ではなく、特徴的な、いわゆるうなりパターンを持つ 1 つの信号だけが観測されます。うなりとは、わずかに異なる周波数の 2 つの信号が互いに干渉するパターンです。このパターンは LVK のデータで理論的に検出可能であるため、本研究で探索しました。

何が見つけられたか？

O4a の期間に検出された重力波源の組み合わせから約 3500 組のペアとなる信号を私たちの高速解析によって精査した結果、より詳細な解析に回されたのはわずか数十組でした。しかし、これらのペアのいずれも重力レンズ効果を有意に裏付けるものではなかったため、除外されました。閾値以下探索においても、際立った候補は見つかりませんでした。タイプ II の強い重力レンズ効果の解析からも、新たに検出された重力波イベントの中に「レンズ効果あり仮説」を有意に裏付けるものは見つかりませんでした。しかしながら、これらの結果は依然として有用でした。図 2 に示すように、この強い重力レンズ効果が検出できなかったことから、高赤方偏移における連星ブラックホールの合体頻度に関する制約を推定することができました。

低質量レンズによって引き起こされる個々の信号のゆがみを探索した結果、大多数の信号は重力レンズ効果仮説を裏付けるものではありませんでした。重力レンズ効果を受けていない信号でも、単なる偶然によってゆがみが起こりうる可能性があります。その予想されるレベルを超えるゆがみも見られません。しかし、唯一の例外がありました。それは **GW231123** という重力波で、**O4a カタログ** の完全版の発表に先立ち、「**例外的重力波イベント**」として別途発表されたものです。

私たちの分析によると、GW231123 は、レンズ効果がないとする通常の解析よりもはるかに強力に、「レンズ効果あり仮説」を支持しているようです。例えば、図 3 に示すように、レンズ効果がない重力波を 250 件以上シミュレートした「背景」を用意した結果、GW231123 で私たちが得たレベルの「レンズ効果あり仮説」を同等あるいはそれ以上に支持する例はありませんでした。

¹強い重力レンズ効果には、タイプ I, II, III と呼ばれる、3 つの「像」のクラス分けがあります。像は、受けた位相シフトに応じて、(I) 0, (II) $\pi/2$, (III) π の 3 つの値のいずれかになります。どの位相シフト値が発生するかは、信号が重力場のどこを通過してきたかによって決まります。

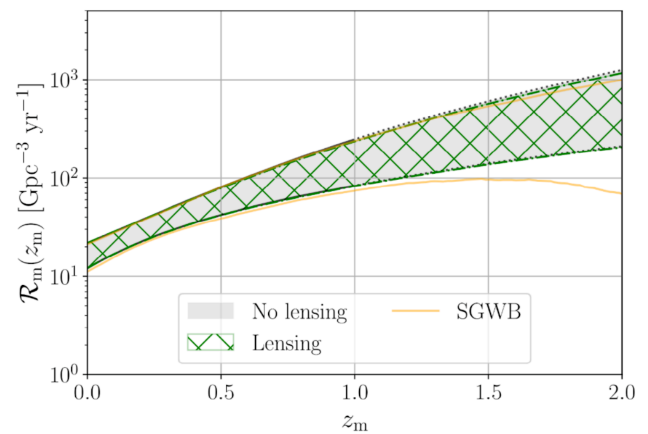


図 2: (論文の図 11) 赤方偏移の関数として推定された連星ブラックホールの合体率。本研究で強い重力レンズ効果が検出されなかったことを考慮して得られた合体率の制限値 (緑色の網掛け領域) は、**新しいカタログで検出された連星ブラックホール**の特性から直接推定された制限値 (灰色で表示) や、**確率的に生じる背景重力波**が検出されなかったことから推定された合体率の制限値 (オレンジ色の曲線) と同等である。

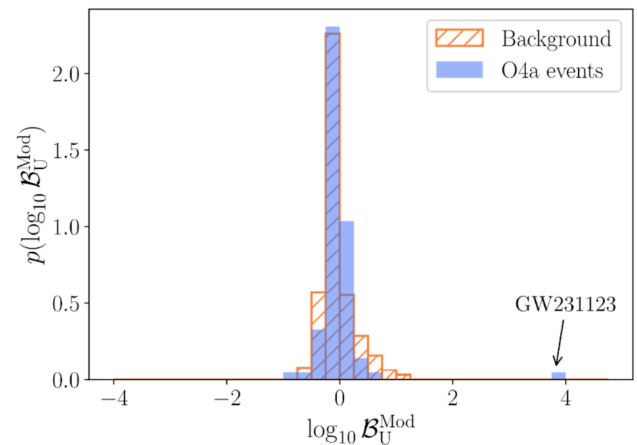


図 3: (論文の図 6) ベイズ係数の分布 (あるモデルが他のモデルよりもどの程度優れているかを示す指標) を、本研究で解析した O4a の重力波について、レンズモデルと非レンズモデルを比較した図。青色のヒストグラムは、ベイズ係数を常用対数で示したもので、各重力波イベントについて、レンズモデル (レンズが孤立した質点としたモデル) と非レンズモデルを比較したもの。オレンジ色のヒストグラムは、250 以上の非レンズモデルをシミュレートして得た分布に対するもの。O4a の重力波イベントの大部分は、このシミュレートされた分布内に収まっている。しかし、GW231123 は、この分布から大きく外れている。

奇妙な GW231123

GW231123 は非常に短い信号で、わずか数周期、つまり約 10 分の 1 秒ほどの観測時間しかなかった重力波でした。この信号の標準的な解析 (つまり、重力レンズ効果がないという仮定での解析) では、GW231123 は重く、**高速で回転**するブラックホール連星系であることが判明しました (実際、これはこれまでに観測されたこの種の連星系の中で、**最も質量の大き**

いものです）。しかし不可解なことに、これらの重力レンズ効果なしの解析で GW231123 について推定されたパラメータは、使用された重力波放射の特定のモデル（以下「**波形**」と呼ぶ）によって大きく異なるようでした。一方、重力レンズ効果の兆候について GW231123 を解析したところ、波形モデル間のこれらの差異は緩和されたように見えます。連星の一つは依然として質量が大きく回転速度も大きい（ただしレンズなしの場合よりも回転は小さい）と推定される一方で、もう一方の天体はより軽く、回転速度が緩やかであるように見えました。重力レンズ効果を受けた重力波信号を解析する際には、重力レンズ効果を考慮していないと、波源天体が実際よりも高速回転していると推定してしまう可能性があることが既に分かっています。もし GW231123 が実際に重力レンズ効果を受けていたとすれば、この振る舞いと矛盾しません。しかし、このような結論に飛びつく前には慎重に検討する必要があります。他の可能な説明を考えてみましょう。

一つの可能性は、観測された信号の短かさに由来するものです。検出器の**ノイズスペクトル**のもつ特徴によって、一部の周波数におけるデータの品質に問題が生じる可能性があります。しかし、この重力波イベントについて、レンズ効果の有無による差異を検証すると、「**レンズ効果あり仮説**」を作り出すノイズスペクトルは1つもないことが示唆されます。以前、(**活動銀河核**などの他の可能性のある発生源を考慮に入れた後に)このような**レンズ効果が支持されたケース**では、その根拠は、複数検出器のデータのうち、ただ1つの検出器データによるものでした。これは、レンズ効果ではなく、その検出器の過渡的ノイズの方が原因である可能性が高いことを示唆しています。一方、GW231123 の場合、各検出器のデータを個別に検証しても、依然として「**レンズ効果あり仮説**」を支持する結果が得られます。つまり、原因は両方の検出器に共通しているのです。

GW231123 がレンズ効果を受けている場合、「このようなレンズ効果が観測される可能性はどの程度あるのか」という問いが重要です。私たちは、孤立した質点で近似できる天体による重力レンズ効果をモデルにしました。最近 **Swift 衛星** は、**ガンマ線バースト** がこのような質点レンズによる重力レンズ効果を観測した可能性が複数あると報告しています。これらのレンズ効果の主張は未確定ですが、もし真実だとすれば、GW231123 のような重力波のレンズ効果が観測される可能性を推定するのに役立ちます。このようにして、孤立質点によるレンズ効果が重力波に見られる割合は、重力波信号検出の 1/100 から 1/1000 回の頻度と予測できることが分かりました。言い換えれば、GW231123 が重力レンズ効果を受けているとすれば、現在の観測数からすると非常に幸運な発見と言えるでしょう。

一方、本研究で用いた孤立質点モデルは、例えばレンズ現象が銀河のようなより大きな天体によって生じる場合など、他

の、おそらくより可能性の高いレンズ現象は説明できないことがわかっています。もしそのようなシナリオが真実であれば、GW231123 のような重力レンズ現象の観測頻度に関する推定値が変化し、その推定値を改善するにはより詳細な研究が必要になります。

まとめると、これらの分析結果を総合しても、GW231123 が真に重力レンズ現象であるかどうかについて、確信を持って結論付けることはできません。しかし、今後、より多くの信号を観測していくことで、より明確な結論に達することができるかもしれません。どうぞご期待ください！

将来への展望

重力波のレンズ効果の探索は続いています！最新のカタログでは、まだ確実に特定できる重力波のレンズ効果の兆候は見つけたとは言えないかもしれません。しかし、GW231123 という、これまでで最も興味深く有望な候補が見つかり、重力波に対する「**レンズ効果あり仮説**」を否定することはできません。今後数年間で、より多くの重力波源が検出されるにつれて、それらの中から重力波のレンズ効果の兆候を特定できる可能性が増すのは確実です。本研究で行われた検証がそのときの特定に重要な鍵となるでしょう。

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/P2500419/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，谷川衝）