

重力で歪む重力波： O3a LIGO-Virgo イベントの中に重力レンズを受けたものはあるだろうか？

銀河ぐらい大きな虫眼鏡があったとして、それは宇宙を伝播する光や重力波にどのような影響を与えるでしょうか。「重力レンズ」という現象によって、重い天体は巨大なレンズのように振る舞います。今回の研究で私たちはLIGO-Virgo（ライゴ・ヴィルゴ）の第3期観測期間のうちの前半（O3aと呼びます）で見つかった重力波信号の中にレンズ効果の有無を調べました。

重力レンズーアインシュタインの予言と天文学における様々な応用

一般相対性理論*（*は用語解説あり）は、重たい天体はその周辺の時空を歪ませ、光の軌道を曲げると予言しています。言い換えれば、それらは重力的なレンズとして機能します。こうしたレンズ効果は遠くの物体を増光したり、いくつかの像に分裂させたり、あるいは「アインシュタイン・リング」（図1）と呼ばれる細長い弧状の像に歪ませたりします。重力レンズの観測は天文学の様々な波長帯にわたって行われていま

す。歴史的には、レンズ効果は1919年の皆既日食の時にアインシュタインの理論の最初の検証を与えました。近年では、弱いレンズ効果の観測が宇宙の質量分布の地図を作成するのに使われています。これは暗黒物質の存在を強く示唆しています。また、系外惑星は星の前を横切るたびに周期的な明るさの変動を引き起こします。このレンズ効果によって天文学者は系外惑星の研究ができます。さらに、レンズ効果は暗すぎて検出できないような宇宙の重たい天体や構造を発見することも可能にします。このように、重力レンズは天文学、宇宙物理学、そして宇宙論において標準的な道具になりつつあります。

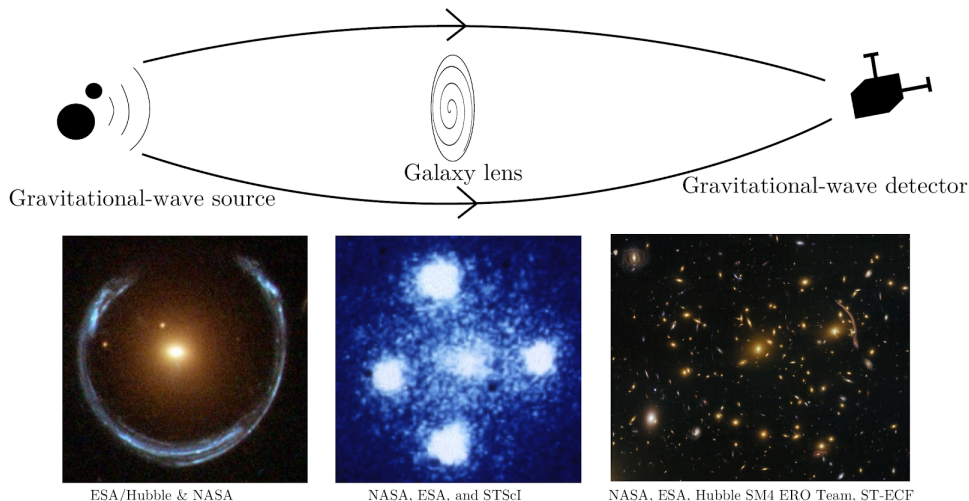


図1: 光が重い天体の近くを通る時、その軌道は重力によって曲げられ、重力レンズを引き起こします。こうした現象はアインシュタイン・リングやクロス、銀河からの背景光の統計的な歪み、その他様々な興味深い観測結果をもたらします。光と同じように、重力波もレンズ効果を受けます。しかし、重力波に対するレンズ効果の検出方法や応用の仕方は大きく異なります。像の形状の歪みや星の増光の代わりに、私たちは繰り返される重力波イベントや周波数に依存する重力波波形の歪みに注目します。

重力レンズは重力波にどんな影響を与えるか？

電磁波と同様に重力波も、星やブラックホール^{*}、銀河や銀河団などの途中にある物体によって重力レンズ効果を受けます(図1)。重力波のレンズ効果の背後にある理論は光のそれと似ていますが、波源や検出器の根本的な違いによって検出方法は大きく異なります。具体的には、私たちはレンズ増光を波の全体的な増幅によって検出します。この増光は連星合体信号が実際よりも近くて重たい波源からのものであるように見えます。複数の像は「繰り返された」イベント、つまり数分から数ヶ月(あるいは数年)の間において現れる非常に似通ったイベントとして現れます。レンズは典型的には現在の検出器では分解できないほど小さな像の分離しか生まないため、それらのイベントは天球上の同じ場所から到来するのようになります。一方、マイクロレンズは小さな時間遅延を起こし、それによって複数のレンズ効果を受けた波形が検出器上で重なることで波形に「うなりパターン」を作り出します。

レンズ効果を受けた重力波を検出することで私たちは何をすることができるか？

もし検出されれば、レンズ効果を受けた重力波は様々なわくわくする科学的成果をもたらします。もしレンズシステムが一つに特定されれば、通常の望遠鏡では見えないようなブラックホール合体を重力波と電磁波のレンズ探索によって特定することができます。レンズ効果を受けた波に電磁波対応天体が付随していた場合、ミリ秒に満たない時間遅延によって精密宇宙論の研究が可能になるでしょう。レンズ効果を受けた重力波とその電磁波対応天体からの光の時間遅延を比較することで、光に対する重力の伝播速度を測定することができます。重力波がレンズ効果を受けると、同じ事象を異なる検出器の方向で複数回観測することができます。これによって、波の全ての偏光^{*}を探索し、一般相対性理論や代替理論の検証ができます。さらに、マイクロレンズは原始ブラックホールや中間質量ブラックホールのような天体の個数分布の調査に役立つでしょう。レンズ効果を受けた重力波が観測されれば、基礎物理、天体物理学や宇宙論の新たな科学研究が可能になるでしょう。

O3aのデータから何を見つけようとしたか、そして何を見つけたか

今回の研究では、私たちはO3a観測期間中にAdvanced LIGO(アドバンスド・ライゴ)とAdvanced Virgo(アドバンスド・ヴィルゴ)によって検出されたコンパクト連星^{*}からの重力波信号にあるレンズ効果の兆候を探索しました。私たちは現在の検出器の感度でどれぐらいの頻度でレンズ効果が起こるかを予測し、強いレンズ効果が検出されていない事実から遠方宇宙^{*}での連星合体の頻度に制限を付けられること明らかにしました(図2)。

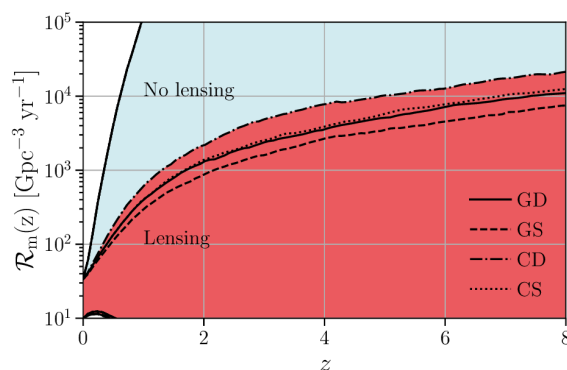


図2: レンズ効果を受けた重力波が存在すること、あるいは存在しないことがコンパクト連星^{*}の合体頻度(縦軸)について、私たちの知識をどの程度向上させるかを示しています。横軸は宇宙赤方偏移^{*} z を示しています。(現在は $z=0$ です。)私たちは既に、図で青い領域に示されているように、観測のカタログから合体頻度に関する全体的な知見を持っています。詳細はこの要約をお読みください。図の赤い領域に示されているように、データの中に観測可能なレンズ効果が含まれているかどうかを知ること、大きい赤方偏移(宇宙初期)での合体頻度を制限できます。これはレンズ効果により信号が増幅され、私たちがより遠くの信号を検出できるようになるためです。このグラフの縦軸に示されている量は専門的には合体頻度密度と呼ばれ、1年あたりに1立方ギガパーセク^{*}の体積内で起こる合体イベントの数です。異なる線はそれぞれ別のレンズの状況に対応する結果を示しています。つまり、銀河スケールレンズ(G)もしくはクラスタースケールレンズ(C)で作られた二重像レンズイベントが、重力波イベントとして一つだけ観測できる場合(S)とどちらも観測できる場合(D)です。

また、私たちは観測可能な確率的背景重力波が存在しないことからレンズの頻度に関する私たちの知識がどの程度向上するのかも調べました。さらに、私たちが見つけたイベントのうち(GW190425やGW190521のように)例外的に大きな質量のイベントはレンズ効果による増幅が影響しているというアイデアについても調べました。また、任意の信号の組に対して、それらがレンズ効果によって同一波源から複製されたものか、あるいは相関を持たない波源から来たものか、

どちらがもっともらしいかを比較することで、レンズ効果を受けた信号を探しました。私たちはいくつかの波形の組がよく似ていて、あたかも同一の波源のレンズ像のようになっていることを見つけました(図3)。しかし、波源の分布についてより現実的な仮定をしたり、私たちの探索に含まれる選択効果*や、現在の感度で期待されるレンズの頻度を考慮に入れた結果、最終的にはこれらの候補が本当にレンズ効果を受けたという証拠は見つかりませんでした。最後に、私たちはマイクロレンズが検出されたイベントの波形に与える特徴的な「うなりパターン」効果を探しましたが、調べた36個のイベントの中にそうした証拠は見つかりませんでした(図4)。結論としては、O3aデータにおいて重力波の増幅、複数回の到来、そしてマイクロレンズの兆候に関する包括的な調査の結果、重力レンズの確実な証拠は見つかりませんでした。

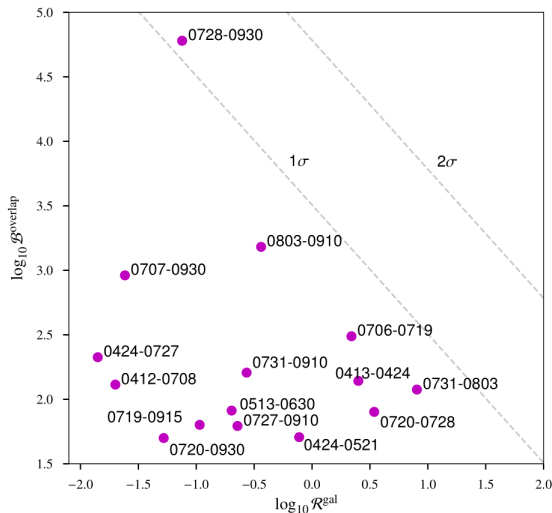


図3: GWTC-2に記載されたO3aのイベントのうちレンズ効果を受けている可能性のあるイベントの組。合体する物体の質量やスピン*を含む性質が非常に似通っているという意味で選択されています。類似の度合いを縦軸に示しています。横軸は組になっているイベントの間の時間差がレンズ効果に整合的か(銀河がレンズとして振る舞うと仮定すると短い時間差が期待され、より高い値が付けられます)、あるいは二つの無相関なイベントか(この場合は平均的にはより長い時間差になり、低い値が付けられます)を示しています。破線は、(標準的なシグマ基準で測って)どの組もレンズの証拠を強くは示さなかったことを表しています。さらに深く掘り下げるために、私たちは分布モデルや選択効果も取り入れて、より詳細な追解析を行いました。その結果、候補となったすべての組が、レンズの効果ではなく、単に似た性質を持った独立な合体であることと整合的であることがわかりました。

これらの図についての詳細な情報については、無料で読めるプレプリントをご覧ください。

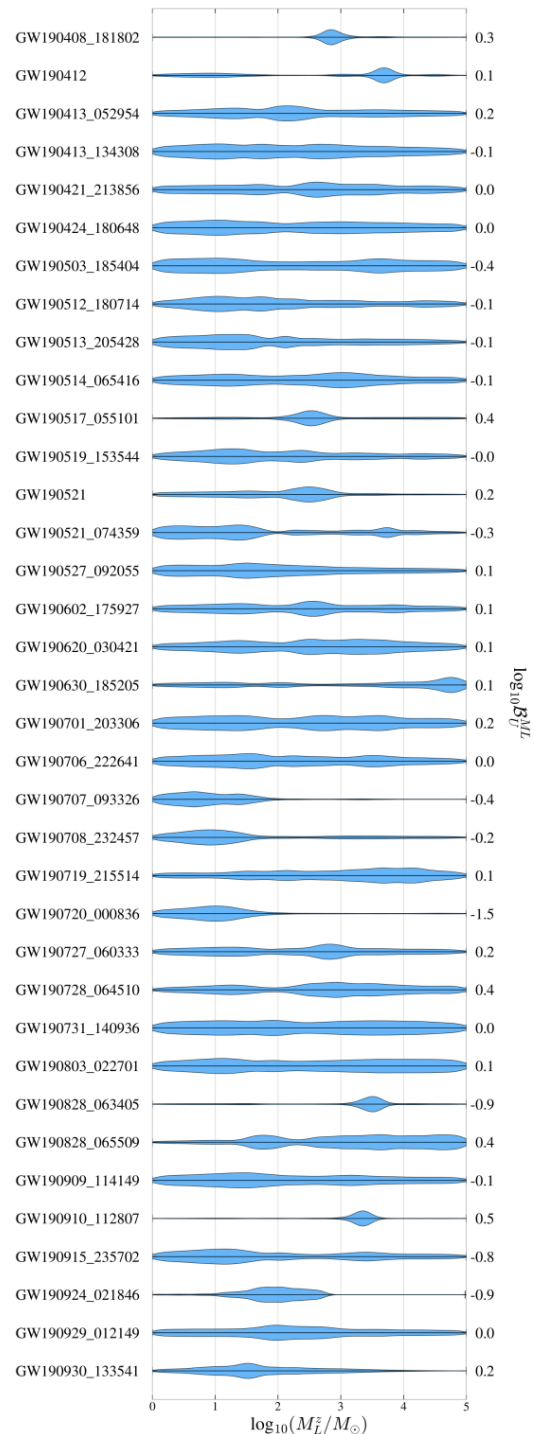


図4: O3aの36個のイベントについて、マイクロレンズによって周波数依存する「うなりパターン」について検証した結果。この等高線は、各イベントがマイクロレンズを受けたと仮定したときに、観測データを与えるようなもっともらしいレンズ質量の値を示しています。しかし、これらのどのイベントに対してもレンズの証拠を見つけることはできませんでした。図の右側に並んでいる値はベイズ因子で、観測データを最もよく説明できるのはレンズがある場合かない場合かを判定する統計量です。これらがすべて負もしくはゼロに近い値であることから、イベントの周波数変化を説明するためにマイクロレンズ効果は必要ないとわかりました。

将来の展望

将来的には、より感度の高い解析手法とより詳細なレンズのモデル化を通じて、重力波のレンズ効果をより深く探索することが可能になるでしょう。仮に重力波データだけでは十分な結論が得られなかったとしても、レンズ候補天体の電磁波追観測によって母銀河やレンズを同定できるようになるでしょう。現在の検出器をさらに改良し、国際的な検出器ネットワークを拡張することで、レンズの兆候を明確に検出する機会は増え続けるでしょう。第3世代検出器や宇宙重力波検出器（例：[Einstein Telescope](#)（アインシュタイン・テレスコープ）、[Cosmic Explorer](#)（コズミック・エクスプローラー）、[LISA](#)（リサ））が2030年代に稼働し始めたら、さらに興奮するような可能性が実現されるでしょう。

用語集

- **ブラックホール**：光すら脱出できないほど重力が強い、重く密な物体。
- **コンパクト連星**：中性子星やブラックホールなどの崩壊した星の残存物二つが互いの周囲を回っている系。
- **遠方宇宙**：光の速度が有限であるため、より遠くの宇宙を見るほど、私たちは時間についても遡って見ていることとなります。したがって、遠い距離で発見された連星合体は、実際には宇宙が現在よりももっと若かった時に生じています。そのため遠方を観測することで、近傍の観測よりも、宇宙の歴史の異なる時期について制限できます。宇宙は膨張しているため、距離がより遠いということは観測された信号の波長の赤方偏移*がより高くなることにも対応しています。
- **一般相対性理論**：1915年にアルバート・アインシュタインによって初めて記述された、現在受け入れられている重力の理論。この理論によると、質量やエネルギーが集中することによる時空の歪みが重力をもたらします。また、この理論は重力波と重力レンズの両方を予言しました。
- **ギガパーセク**：最も大きな宇宙論的な距離に適した天文学的な距離の単位。10億パーセク。1ギガパーセク（Gpcと略記）はおよそ30億光年、あるいはおよそ 3×10^{22} km。
- **重力波理論波形**：重力波によって生じた擾乱が時間的にどのように変化するかについて予測されたモデル。
- **重力波偏光**：重力波が伝播することで起こる時空の伸縮やゆがみ変形についての幾何学的な形状。一般相対性理論はテンソル型と呼ばれる特定の一つのタイプだけを予言するのに対し、ある重力の代替理論はそれ以外の偏光も予言しています。
- **赤方偏移**：膨張宇宙を伝播する光や重力波の波長の伸縮。
- **選択効果**：重力波検出器はある特定の内的性質（例えばある質量の範囲）を持つイベントや天球の特定の領域からのイベントをより検出しやすいです。このため、類似したイベントの組を一見して多く見つけることがあります。
- **スピン**：物体の自転がどれだけ速いかを測る物理量。

もっと詳しく知るためには

ウェブページを訪ねてみてください。

- www.ligo.org
- www.virgo-gw.eu



論文のプレプリント全文は[こちら](#)からダウンロードできます。

このリーフレットの英語版は[ここ](#)。

日本語版翻訳：山本貴宏，真貝寿明