

さそり座 X-1 におけるトルク・バランス予測の検証

我々は、低質量 X 線連星「さそり座 X-1 (Scorpius X-1)」からの連続重力波について、これまでで最も感度の高い探索を実施しました。もし「さそり座 X-1」が「スピン・トルクバランス (spin-torque balance)」モデルで予測される程度の強さの重力波を放出しているならば、レーザー干渉計重力波観測所 (LIGO) の検出器は、50–200 Hz の周波数範囲においてその信号を捉えることが可能となります。

LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) による第 4 回観測運転期間の前半 (O4a) のデータを用い、相互相関法 (cross-correlation method) によって 25–200 Hz の周波数帯域を探索しました。連星系を構成する中性子星に注目してデータを解析することで、連星の軌道運動を考慮に入れることができ、より長い時間にわたるコヒーレントな解析が可能となりました。天体物理学的な起源である可能性を示唆する挙動を示す興味深い信号候補がいくつか特定されました。これらの候補については、その挙動が実際の信号と整合しているかどうかを確認するため、より長いコヒーレンス時間を用いて再解析を行いました。しかしながら、いずれの候補からも、重力波の検出を主張するのに十分な証拠は得られませんでした。

私たちが探しているもの？

特定の中性子星からの重力波を探すことは、演奏しているバンドの姿は見えていても、距離が遠すぎて音が聞こえない状況に例えられます。その代わり、バンドが作り出す空気の微小な振動を検出できる高感度な装置があり、その振動を分析することで、バンドがどんな曲を演奏しているかを予測しようとするわけです。連続重力波は、ブラックホールや中性子星といったコンパクト連星天体のインスパイラル（合体に至る軌道収縮）や合体からすでに検出されている（多数の）重力波信号に比べて、その振幅が著しく小さいものです。しかし、短時間で終わる連星合体の信号とは異なり、連続重力波信号は長い期間にわたって連続的に放出されます。そのため、連続重力波の探索では、長期間（観測期間全体など）にわたるデータを統合して信号を蓄積し、検出の可能性を高めることができます。コンパクト連星の合体では、周波数と振幅が急速に増大する「チャープ」信号が生じますが、連続重力波は「単色」信号、つまり長い期間にわたってほぼ一定の周波数を維持する信号です。

連続重力波の発生源として最も有力なのは、毎秒数百回転という驚異的な速さで自転する高密度な中性子星です。中性子星の質量分布にわずかでも非対称性があれば、その中性子星の自転周波数の 2 倍の周波数を持つ重力波が発生します。これらの波が地球上の検出器に到達する際には、私たちは「ドップラー偏移」として知られる周波数が変化した波として受け取ります。これは、中性子星自身の時間変化を伴う運動に起因するものだけではなく、地球の自転や公転に伴う検出器の動きにも起因するものです。

連続重力波の発生源として知られる中で最も有望なのは、低質量 X 線連星 (LMXB) である「さそり座 X-1 (Sco X-1)」です。LMXB (図 1 参照) とは、コンパクト天体と、それより質量の小さい伴星とが組になった連星系のことです。Sco X-1 は、我々の銀河系内に位置する LMXB であり、(太陽を除けば) 観

測される中で最も明るく持続的な X 線源です。また、地球からわずか 9000 光年という比較的近い距離にあります。LMXB では、中性子星が「降着」と呼ばれる過程を通じて、伴星からガス状の物質を引き寄せます。この降着した物質は中性子星の表面に「こぶ」を形成し、質量分布の非対称性を生じさせます。その結果、中性子星の自転に伴って連続重力波が発生することになります。



図 1: さそり座 X-1 (Sco X-1) のような低質量 X 線連星 (LMXB) の想像図。Credit: Gabriel Pérez Díaz, SMM (IAC)

中性子星への物質の降着は、その自転にも影響を及ぼします。降着は中性子星を「スピンアップ」させて自転速度を速める一方、重力波や、中性子星の磁場と周囲環境との相互作用といった他の力は、中性子星を「スピンドアウン」させる方向にはたらきます。スピンアップとスピンドアウンをもたらすトルク（回転力）が互いに打ち消し合うと、中性子星の自転は一定に保たれます。降着と重力波のみによってこの一定の自転が維持されるシナリオは「トルクバランス」として知られており、こ

の場合、予想される重力波信号の強さは（スピンドアウンに寄与する他の要因を無視しているため）楽観的な推定値となります。伴星から Sco X-1 へ移動する質量は一定ではありません。Sco X-1 のスピンアップは降着トルクによって引き起こされるため、降着率の変動は中性子星の自転周波数を時間とともに確率的にゆらがせることになります。これは「スピン・ワンダリング（自転のゆらぎ）」として知られている効果です。長期間の観測において、スピン・ワンダリングは重力波信号を予想される位相の推移からずらし、位相の不整合や信号対雑音比の低下を招きます。

中性子星への降着は X 線も発生させます。この X 線は X 線望遠鏡で観測することができ、それによって降着率を推定することが可能です。電波から X 線に至る幅広い電磁波周波数帯域での Sco X-1 の観測により、その天球面上の位置や中性子星の軌道パラメータに関する情報が得られています。こうした情報は、想定される重力波信号を特定する上で不可欠であり、この探索はマルチメッセンジャー天文学の一例となっています。これまでに、本研究で用いられている相互相関法に加え、ラジオメーター法やビタビ法といった手法を用いて、Sco X-1 の探索が数多く実施されてきました。

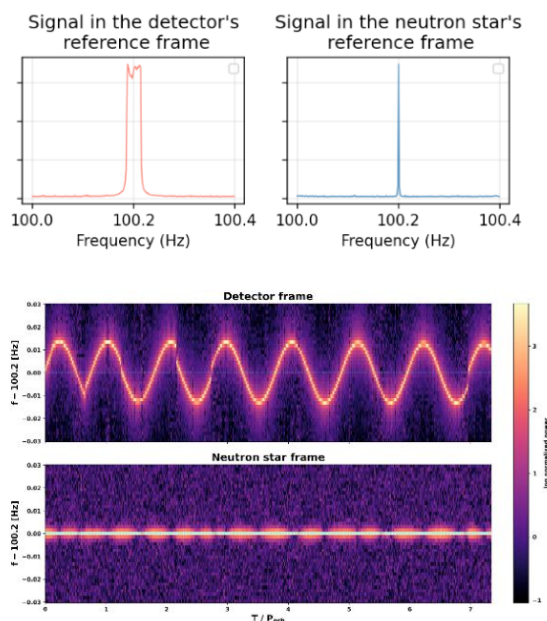


図 2: 上段の図は、観測された重力波信号の強度が、検出器の座標系（左）と中性子星の座標系（右）において、それぞれどのような周波数分布を示しているかを表しています。右側のグラフでは、軌道運動の補正を行うことで、ドップラー変調を受けていた信号が一定の周波数へと変換されています（なお、図示を分かりやすくするため、振幅は実際よりも大きく描かれています）。中段および下段の図は、対応するスペクトログラム（信号の周波数の時間変化を示すグラフ）です。検出器座標系での信号は連星の軌道運動によって正弦波状に変動していますが、中性子星座標系では、周波数 $f = 100.2$ Hz の一定値へと変換されています。地球の公転に起因する付加的なドップラー変調については、Sco X-1 の軌道運動による変調に比べてはるかに小さいため、この図では確認できません。

どのように探索したか？

重力波信号は、地球の自転と公転運動、そして連星系である Sco X-1 の重心周りの運動によって「ドップラー変調」されます（図 2 参照）。この効果は、消防車のサイレンに似ています。消防車は近づいてくると音が高くなり、遠ざかるにつれて音が低くなります。検出器の基準座標系から中性子星が静止している基準座標系へとデータを変換するために、リサンプリングと呼ばれる手法を用います。これは、消防車が通り過ぎる際に外から見ている視点から、車内に乗っている視点に移すことに似ています。そうすることで、サイレンの音程の変化がなくなります。この補正により、地球の自転と連星系の軌道運動によって生じるドップラー変調が除去され、信号は単色になります。

リサンプリングのプログラムは、同じ相互相関探索を使用しますが、唯一の違いは、探索を実行する前に、データが検出器の基準座標系から中性子星の静止座標系に時間変換される点です。

相互相関探索をよりよく理解するために、クラリネット奏者が特定の音を演奏しながら前後に歩いている様子を想像してみてください。奏者の動きによって、音程は時間とともにわずかに高くなったり低くなったりします。ここで、異なる場所にいる 2 人の観測者がクラリネットの音を録音するとします。彼らは視覚的な観察だけで、奏者の速度と前後運動の周期を推定できます。それぞれの観測者が聞いた音を比較することで、音程が時間とともにどのように変化するかを追跡し、奏者の動きによるドップラー変調を補正することができます。2 人の観測者が聞いた周波数の一致度が高いほど、演奏されている音の真の周波数をより正確に復元できます。

同様に、相互相関法は、回転する中性子星によって生成される重力波波形のモデルを用いて、異なる時間、あるいは異なる検出器で取得されたデータセグメント間の相関を探索します。このモデル波形を構築するには、真の重力波信号周波数、天球面上の位置、軌道パラメータなど、連星系の特性に関する知識が必要です。Sco X-1 の場合、周波数は不明ですが、天球面上の位置は電磁波観測によって正確に決定されています。軌道パラメータも既知ではありますが、多少不正確であるため、信号周波数、周期、位相、軌道の大きさなど、多くの可能なパラメータの組み合わせを用いて探索を行う必要があります。私たちの探索では、「コヒーレンス時間」と呼ばれる調整可能な時間オフセットによって隔てられたデータ間の相関のみを考慮します。

2023 年 5 月から 2024 年 1 月にかけて実施された第 4 回 LVK 観測運転期間の最初の部分（O4a）のデータを解析しました。片方または両方の検出器が高品質で使用可能なデータを取得していなかった期間を除くと、LIGO ハンフォード検出器からは約 159 日分、LIGO リビングストン検出器からは約 163 日分のデータが得られました。コヒーレンス時間は 24 時間に設定しました。

何が得られたか？

探索の結果、検討した各パラメータ値の組み合わせについて信号対雑音比が算出されます。あるパラメータの組み合わせに対する信号対雑音比が、ノイズのみを含むデータから予想される値よりも高い場合、我々はその候補となる組み合わせを「検出の可能性のあるもの」として追跡調査します。この際、より長いコヒーレンス時間を用い、かつ当該候補のパラメータ

値周辺の狭い範囲（グリッド）を対象としてデータを再解析します。もし信号対雑音比が上昇すれば、さらに長いコヒーレンス時間を採用して同様のプロセスを繰り返します。また、シミュレーション信号（ノイズに連続重力波信号を「注入」したもの）から生じた候補についても、同様の解析を行います。図3が示すように、探索で特定された候補はいずれも、シミュレーションで注入した信号（真の信号であれば示すはずの挙動）と同様の信号対雑音比の上昇傾向を示しませんでした。

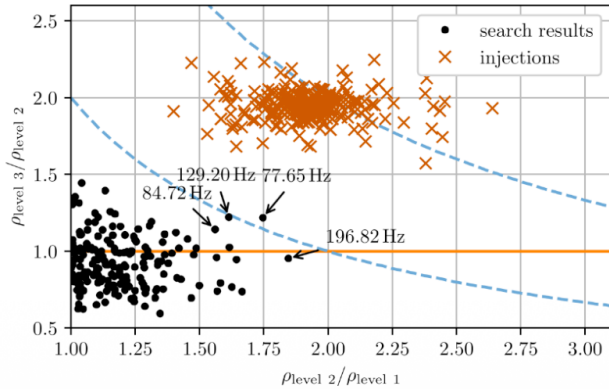


図 3: (論文の図 4 より) 探索で見つかった信号候補に対する追跡解析の結果。横軸は、相互相関におけるコヒーレンス時間を 4 倍にする前後での信号対雑音比 (SNR) の比率を示しており、理論上はこの操作で SNR が 2 倍になるはずである。縦軸は、さらにコヒーレンス時間を 4 倍にした前後での SNR の比率を示しており、したがって理論上は元の SNR が 4 倍になるはずである。青い破線は、これら 2 回の 4 倍化操作を合わせた前後での SNR 比の一定値を示しており、下の破線は 2、上の破線は 4 に対応する。赤い × 印はシミュレーションで注入した信号を示しており、予想通り、コヒーレンス時間が増加するにつれてその SNR も増大している。これに対し、探索で見つかった候補（黒い点）の SNR は、真の信号に期待される挙動を示していない。ただし、周波数 129.20 Hz の地点に信号候補の可能性があるものが示されている。この候補は 4 倍化に伴って SNR が増大する傾向を示しているものの、理想的な信号で期待されるほどの顕著な増大ではない。図中には、他にも同様の信号候補となり得る 3 つの周波数が示されている。

今回の探索では重力波の検出には至らなかったため、周波数の関数として Sco X-1 からの重力波強度の「上限値」を算出した (図 4 を参照)。この上限値は、もしその振幅以上の信号が存在していたならば、当該周波数において今回観測されたものと同等かそれ以上の信号対雑音比が 95% の確率で得られていたであろう、という基準で決定されています。これらの結果は、Sco X-1 からの重力波放射の強度に対する現時点で最も感度の高い制約であり、トルク・バランスシナリオのモデルにおいて現実的と予測される振幅領域を検証するものです。図 5 には、周波数の関数として、中性子星の楕円率 (球形からのずれの度合いを示す指標) に関する同様の上限値と、r モード振幅の大きさ (流体の振動速度を中性子星の自転速度の比として表したもの) に対する上限値が示されています。

将来の Advanced LIGO-Virgo-KAGRA による観測運転期間において感度が向上すれば、Sco X-1 からのさらに微弱な信号を探索できるようになると期待されます。重力波以外にもスピンダウン (自転減速) のメカニズムが関与するような、より現実的な状況下では、重力波強度はここで調べたトルク・バランス振幅よりも低くなると予想されます。したがって、将来の観測で感度が向上することは、より現実的なシナリオを検証可能にし、ひいては Sco X-1 からの重力波を検出できる可能性

を高めることにつながります。

重力波信号について理解を深めるためのもう一つの手段として、電磁波による観測が挙げられます。もし Sco X-1 から電磁波で脈動や熱核爆発が検出されれば、重力波の研究で、放射される重力波信号の周波数をより正確に制約できる可能性があります。さらに、X 線変動を観測することで、Sco X-1 における降着プロセスの変化をより適切にモデル化・予測できるようになります。これは、中性子星のスピン・ワンダリング (自転のふらつき)、すなわち中性子星の自転加速や自転減速を引き起こしうる変化を理解し、追跡する上でも役立つと考えられます。

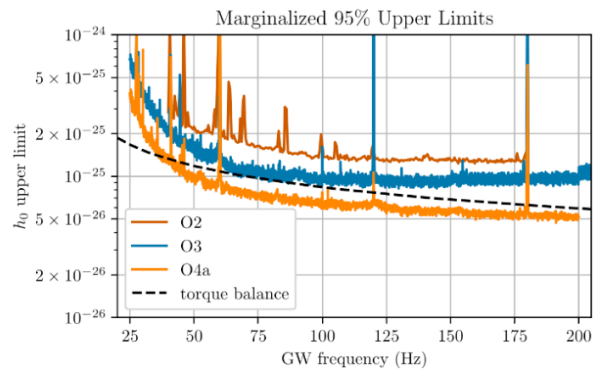


図 4: (我々の論文の図 5 を改変) O4a における相互相関探索によって設定された重力波振幅 h_0 の上限値 (95% 信頼水準) を、周波数の関数として示す。併せて、過去の観測運転期間である O2 および O3 における相互相関探索の結果も示している。O4a で得られた上限値は、中性子星の自転軸の傾き角 (未知のパラメータ) について周辺化 (すなわち平均化) を行った上で、50–200 Hz という広い周波数範囲にわたり、初めて「トルク・バランス限界」を下回るものとなった。

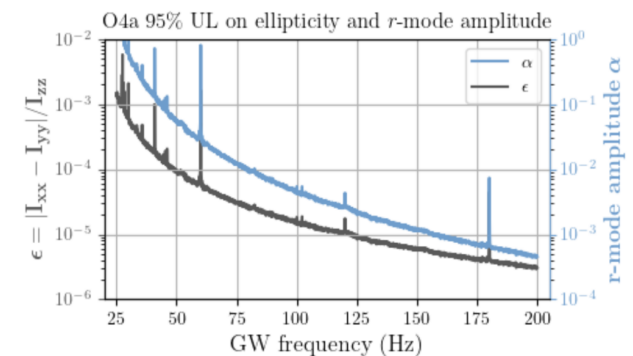


図 5: (論文の図 7): 図 4 に示された重力波振幅の上限値から導出された、Sco X-1 の中性子星の楕円率と r モード振幅に関する上限値 (95% 信頼水準) を周波数の関数として示したもの。高周波数では、中性子星殻が支えるようになるために楕円率の上限値となりうるかどうかは微妙である。r モード振幅に対しては、上限値は、予想される r モード飽和振幅を十分に上回る値である。

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/>(KAGRA)



- 論文原稿（タイトルは，“Sub-Torque-Balance Upper Limits on Continuous Gravitational Waves from Scorpius X-1（さそり座 X-1 からの連続重力波におけるトルク・バランス上限値）” は、アーカイブ <https://arxiv.org/abs/2607.07765> より取得できます。
- 解析方法について、より詳細に記載した論文原稿は、以

下のもの。

“The cross-correlation search for periodic gravitational waves（周期的重力波に対する相互相関法）”:
<http://arxiv.org/abs/0712.1578>

“Model-Based Cross-Correlation Search for Gravitational Waves from Scorpius X-1（さそり座 X-1 からの重力波に対するモデルベースの相互相関探索）”:
<http://arxiv.org/abs/1504.05890>

“Resampling to accelerate cross-correlation searches for continuous gravitational waves from binary systems（連星系からの連続重力波に対する相互相関探索を加速するリサンプリング法）”:
<https://arxiv.org/abs/1712.06515>.

（日本語訳：真貝寿明）

用語集

- **コヒーレント解析 (Coherent analysis)**: 複数の検出器で記録されたデータを、それらすべてが単一の物理信号と整合することを条件として同時に解析する手法。この手法は、特に各検出器における信号のパターンが天球面上の位置などの要因に依存する場合、単に各検出器の出力を合算するよりもはるかに高い有効性を発揮し得る。
- **コンパクト天体 (Compact object)**: ブラックホール、中性子星、**白色矮星**など、極端に密度の高い天体の総称。
- **チャープ (Chirp)**: ブラックホールや中性子星などの超高密度天体が連星合体する直前のインスパイラル期に観測される重力波信号または波形の名称。チャープ信号は、周波数と振幅は時間とともに増加してゆく。
- **楕円率 (Ellipticity)**: 中性子星の自転軸周りにおける、軸対称ではない質量分布の度合いを示す指標。完全な球形のサッカーボールの楕円率はゼロですが、ラグビーボールやアメリカンフットボールのように一方向に引き伸ばされた形状のものは、ゼロではない楕円率を持ちます。
- **ヘルツ [Hz] (Hertz)**: 周波数の単位であり、1 ヘルツは、1 秒間に 1 回の振動（サイクル）を行うことを表します。
- **軌道傾斜角 (Inclination angle)**: 中性子星の自転軸と、基準となる方向（観測者への視線方向などの）とのなす角。
- **低質量 X 線連星 (Low-mass X-ray binary (LMXB))**: 白色矮星、中性子星、あるいはブラックホールといったコンパクト天体と、それより質量の小さい伴星から構成される連星系で、コンパクト天体が伴星から物質を降着させることで、X 線を放射している連星。
- **信号対雑音比 (Signal-to-noise ratio (SNR))**: 信号の強度と雑音の強度の比。信号に混入する雑音源と比較して、信号がどれだけの強さを持っているかを示す指標。
- **ひずみ振幅 (Strain)**: 重力波の通過に伴う時空の変形によって生じる、2 つの基準点間の距離の相対的な変化量。
- **上限 (Upper limit)**: データにおいて信号が検出されなかったことと整合する、ある物理量の取り得る最大値。本報告において対象としている物理量は、地球に到達する特定の連続重力波信号が持つ、固有の重力波歪み振幅の最大値です。信号が検出されなかったため、ここでは信頼水準 95%での上限値を設定しました。これは、その値の歪み振幅（またはそれ以上）を持つ実際の信号が存在した場合、観測された信号対雑音比よりも高い信号対雑音比が得られる確率が 95%（またはそれ以上）になることを意味します。