

中性子星はビリヤード球よりも滑らか 残念ながら

中性子星は滑らかなことで知られています。半径わずか約 12km でありながら、太陽よりも大きな質量を持つ、驚くほど高密度である中性子星は、重力の影響を大きく受けています。星の圧倒的な重力は、表面の亀裂や星間物質の集積によって生じる可能性のある、あらゆる凹凸をその大小を問わず、なましてしまうのです。

LIGO-Virgo-KAGRA の研究者たちは、最近の LIGO のデータ (2023 年 5 月から 2024 年 1 月にかけての O4a 観測運転のデータ) を用いて、この「なまし過程」が銀河系のどこかにある中性子星で、必ずしも完璧に機能していない証拠を探しました。広い周波数範囲 (20~2000 Hz) にわたる連続重力波の全天探索を行うことで、自転する星の周囲の空間を渦巻かせるほど「凹凸のある」珍しい中性子星を発見できる可能性があるからです。

生じる重力波の周波数は、星の自転周波数の 2 倍になると予想されます。例えば、1 秒間に 100 回自転する星は、信号周波数 200 Hz の連続重力波を放射します。このような連続重力波の振幅は非常に小さい (1 兆分の 1 よりもはるかに小さい) と予想されます。星は重力波の放射によってエネルギーを失うため、自転周波数は非常にゆっくりと低下し、信号周波数も徐々に低下します。ここで行われる探索では、1 年間で最大 3/10 Hz の低下を許容しました。

探索方法と得られた結果

このような異常な中性子星の探索には、3 つの異なる探索手法 (PowerFlux, Frequency Hough, SOAP) が用いられました。これらのアルゴリズムはそれぞれ異なる理論に基づいていますが、いずれも LIGO データにおけるほぼ単色 (単一周波数) の正弦波状の信号探索が基本になっています。フーリエ変換に基づくスペクトルは、1024 秒から 16384 秒の範囲で収集された数千のデータ区間について計算されます。これらのスペクトルは、地

球の運動 (すなわち、自転と太陽のまわりの公転) による周波数と信号強度の小さな変動 (ドップラー偏移) を考慮しながら、観測運転の全期間にわたって平均化されます。

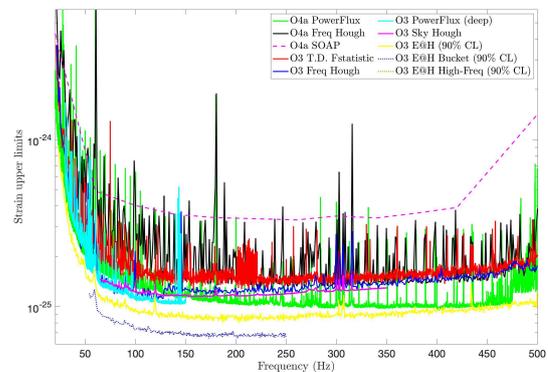
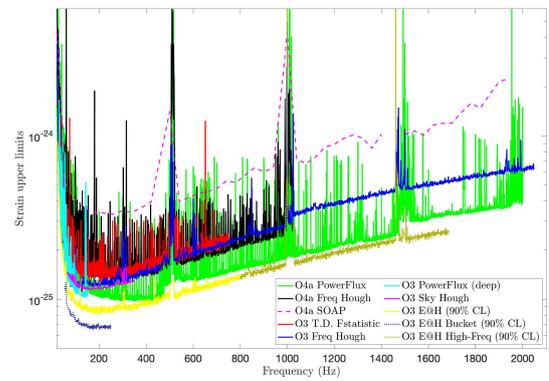


図 1: [論文の図 2] 今回の探索で得られた連続重力波のひずみ振幅の上限値を周波数に対して表した図。前回の O3 観測運転のデータを用いたときに得られた上限値との比較も示す。上のグラフは 20Hz から 2000Hz までの全探索範囲を示している。下のグラフは 20Hz から 500Hz の範囲を拡大したものである。多数の上向きのスパイクがあるが、これらは機器または検出器周囲の環境によるノイズ (「ライン」と呼ばれる) によるものである。

波源となる天体の天球面上の位置、周波数、周波数の時間変化のさまざまな組み合わせに対して異なる予測波形が得られます。PowerFlux プログラムと Frequency

Hough プログラムは、そのような膨大な数の信号パターンを用いて探索します。一方、SOAP プログラムは、このような特定のパターンを用いた探索は行いません。その結果、SOAP は孤立中性子星からの予想される信号に対する感度は他のアプローチに比べて低下しますが、一方で、他の2つのプログラムよりも桁違いに高速であり、予測できない周波数変化を示す予期せぬ信号を検出する可能性を秘めています。(SOAP は「Snakes on a Plane (面上の蛇)」の略です。映画のタイトルではありません。時間を横軸にとり、周波数を縦軸にして表される **スペクトログラム** 平面 (plane) では、連続重力波信号の一部は、くねくねと動く蛇 (snake) のように見えることが由来です。SOAP はこのようなパターンを検出するのに適しています。)

残念ながら、連続重力波信号は検出されませんでした。図 1 は、無次元の重力波 **ひずみ振幅** の上限値を示しています。もっとも検出感度の良かった周波数は 290 Hz 付近で、ひずみ値の上限は、 9.7×10^{-26} という値が得られました。

非検出という結果が意味するもの

LIGO-Virgo-KAGRA の研究者は、本論文で、非検出という結果から、次の3つの具体的な天体物理学的な解釈を議論しています。

1. 母集団となった、天の川銀河系におけるすべての中性子星の「滑らかさ」。
2. **銀河中心**付近の**ミリ秒パルサー** (自転周波数が約 100Hz を超える星) の数。これは、ミリ秒パルサーが銀河中心から観測される高エネルギー・ガンマ線の過剰 (**GeV 過剰**) と呼ばれる) に大きく寄与する可能性があると考えられていることに由来する。
3. 全暗黒物質のうち、小惑星規模の質量を持つ**原始ブラックホール**が占める可能性のある割合。これは、原始ブラックホール連星系の**螺旋運動**が、「凹凸のある」回転する中性子星と同様の、ほぼ単色の信号を放射すると考えられることに由来する。

図 2 は、中性子星の滑らかさの限界を特徴付ける一つの方法を示しています。横軸は**楕円率**の常用対数です。楕円率は、星の非軸対称性、つまり星の断面の長軸方向と短軸方向の比をとった無次元の量で、中性子星の凸

凹具合を特徴づけます。縦軸は周波数 (Hz) の対数です。曲線は、ある値を超える楕円率を持つ中性子星の数を除外する輪郭を示しています。曲線の色は、右側のカラーバーで定義されています。例えば、楕円率の閾値が約 10^{-5} で、周波数が約 200 Hz (縦軸で約 2.3) の場合、PowerFlux 探索の結果 (紫色の実線) は、この閾値を超える楕円率を持つ中性子星が銀河内に約 100 個以下であることを示しています。言い換えれば、中性子星はビリヤードの球よりも直径に対して滑らかです (ただし、中性子星は完全な球ではなく、高速自転によって扁平化します。つまり、極周回の円周よりも赤道円周の方が長くなります)。

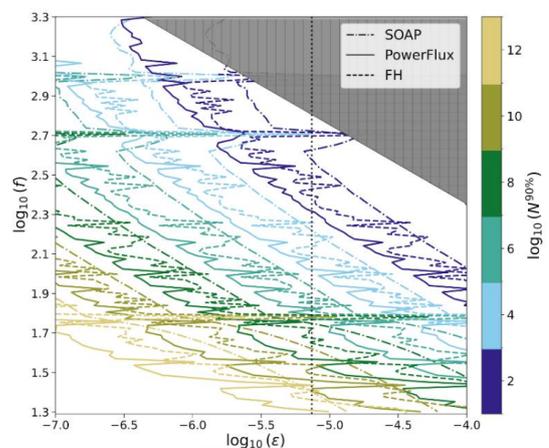


図 2: [論文の図 5] 銀河の中性子星の持ち得る楕円率と放出される重力波の周波数を仮定し、除外される中性子数 (値は右のカラーバー参照) を示した輪郭線。異なる探索手法による結果を、異なる除外閾値 (中性子星数) に対して示す。

図 3 は、非検出結果を、GeV 超過を説明できるかどうかという観点から解釈する別の方法を示しています。GeV 超過とは、銀河中心付近から放射されるガンマ線の放射強度が GeV (ギガ電子ボルト, $1\text{GeV} = 10^9 \text{eV}$) 以上のエネルギーをもつという、予想外の現象のことです。この超過を説明する2つの主要な物理的説明は、重い暗黒物質粒子の対消滅によるとするもの、あるいは銀河内の塵 (ダスト) によって隠れてしまい、電磁波では観測できないミリ秒パルサーの集団によるものです。後者は重力波を放出するはずで、それは遮られずに観測されるはずで。

図の横軸は、ミリ秒パルサー (MSP) によるガンマ線の光度パラメータを対数で示しています (値が低いほど、GeV 超過を説明するために必要なミリ秒パルサーの数が多くなります)。縦軸は光度を表す関数の形状を決め

るパラメータです。色分けは、各パラメータにおいて超過を説明するために必要なミリ秒パルサーの数を示しています。灰色の領域は、非検出の結果と矛盾するほど多くのミリ秒パルサーが必要で、除外される領域です。重力波放出で検出可能になるほどの楕円率を持つ星の割合を仮定して得られたものです（モデル依存性があり、論文で説明されています）。

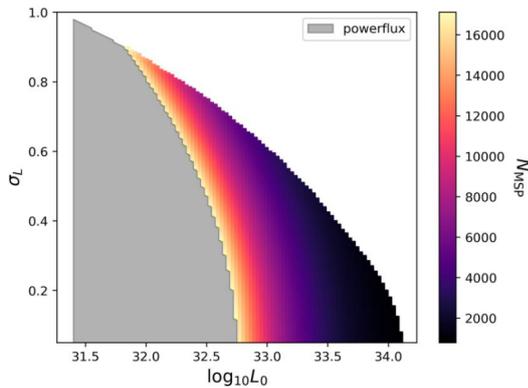


図 3: [論文の図 6] ガンマ線の GeV 超過現象がミリ秒パルサーに起因するモデルと、連続重力波の非検出の事実が矛盾しないために、光度関数のパラメータが除外される領域 (灰色)。色付きの領域は、GeV 超過を説明するために必要なミリ秒パルサーの数を光度パラメータ L_0 と σ_L の値に対して示している。

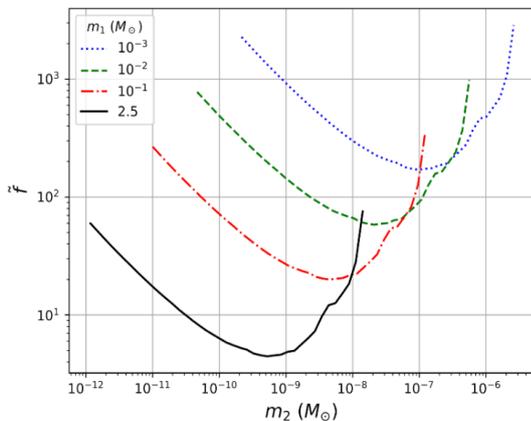


図 4: [論文の図 9] さまざまな質量（質量は太陽質量の単位）を仮定して得られた、原始ブラックホールの連星系の形成関数で除外される領域を示す輪郭曲線。ブラックホールの質量 m_1 と m_2 に関するさまざまな仮定に対して、曲線より上の領域は除外される。

図 4 は、非検出の結果を解釈する別の方法を示しています。横軸は、原始ブラックホールの連星系における小さい方のブラックホールの質量 m_2 で、単位は太陽質量です。曲線は、連星系における大きい方のブラックホールの質量 m_1 をさまざまに変化させて描いた、原始ブラッ

クホールの形成関数で除外される境界を示しています。

連続重力波信号が見つからなかったことは残念なことです。なぜなら、そのような信号が観測されれば、重力そのものと、未知の要素が多い中性子星の内部構造の両方に対する理論を検証できるからです。連続重力波を放射する星がひとたび発見されれば、その星は、ますます高性能化する重力波検出器を用いて、何年も、何十年も、あるいは何世紀にもわたって研究され続ける可能性があります。将来の検出器は、地球上、宇宙空間、さらには月面に設置されるかもしれません。研究者たちは、重力波放出現象の振動（偏光特性）を研究することにより、その観測結果をアインシュタインの一般相対性理論や、他の拡張重力理論の予測と比較できることになるでしょう。

さらに、重力波によって、天球面のどこに中性子星があるのか、そしてどのような自転周波数が光信号を変調（可視光からガンマ線までの広い帯域にわたって検出されうる変調）させる可能性があるのかを正確にわかるようになれば、これまで電磁波観測によって知られていなかった中性子星を発見できる可能性が非常に高くなります。重力と電磁波の両方で長期間にわたって観測されことになるそのような星は、究極のマルチメッセンジャー天文源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/LIGO-P2500416>

あるいは<https://arxiv.org/abs/2603.14168>

- 連続重力波についての解説は[こちら](#)。

(日本語訳：真貝寿明，藤森 匠)