

重力波を使って中性子星の内部を解剖する

LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) コラボレーションは、中性子星から放出される非常に微弱な連続重力波の新たな探索を行いました。中性子星は、大質量星が超新星爆発を起こした後に残り、極めて高密度で高速に回転する核です。LIGO, Virgo, KAGRA 干渉計の第4回観測運転期間の第1期 (O4a: 2023年5月～2024年1月) および第2期 (O4b: 2024年4月～2025年1月) の観測データを用いたこの探索は、激しい天体衝突からではなく、安定した天体物理学的発生源からの重力波検出に向けた取り組みにおける新たな節目となります。これらの微弱で周期的な重力波信号は、ブラックホールに次いで宇宙で最もコンパクトな天体である中性子星の隠された内部構造を明らかにする可能性を秘めています。これまでの数多くの探索が行われてきたにもかかわらず (私たちの前回の探索については[こちら](#))、驚くべきことにこうした信号は未だに検出されていません。この事実は、中性子星がどれだけ完全な球体に近いかを示しています。

連続重力波を放出する天体は？そしてそれらが興味深い理由とは？

中性子星は、太陽よりも大きな質量を半径約 10 km に圧縮した、高密度で非常にコンパクトな天体です。この特異な天体の構造には、超高密度の特性によって引き起こされる量子現象が見られます。通常の恒星とは異なり、中性子星は非常に硬く、層構造を持つと考えられています (図1参照)。中性子星は非常に薄い大気に覆われ、表面殻と内部核から構成されており、星の中心に近づくにつれて物質の性質はより一層特異な状態へと変化していきます。一部の中性子星は1秒間に数百回自転しており、質量分布がわずかでも非対称であれば、この不完全性により、微弱で周期的な連続連続波 (CW) を放射する可能性があります。これらは未だ検出されていません。

中性子星は、地球の磁場の1億倍から1000兆倍にも及ぶ極めて強力な磁場を持ちます。この磁場が、電波からX線、ガンマ線に至るまで、幅広い周波数帯にわたる電磁放射ビーム (図2参照) を発生させます。

中性子星が自転するにしたがい、これらのビームは宇宙の灯台のように空間を掃引し、地球との視線を通過するたびに規則的なパルスが地球に届きます。複数の電波天文台によるパルサーの観測により、パルサーの天球面上における位置、自転周波数、そしてそれらの振る舞いを記述するパラメータの時間変化 (「スピンドアウン」と呼ばれる) が精密に測定されています。これらのパルサーが連星となっている系ならば、電

波天文台の観測からパルサーの軌道要素を決定することも可能です。このような詳細な情報により、研究者は信号が期待される特定の周波数範囲に集中できるため、パルサーは連続重力波探索の理想的なターゲットになります。

これらの信号を明らかにすることは大きな進歩となり、中性子星の内部構造の解明を可能にするとともに、極限状態下の物質に関する新たな知見をもたらします。

本研究では、既知の39個のパルサー (図3参照) に焦点を当て、それらの微弱な連続重力波放射の検出を試みました。

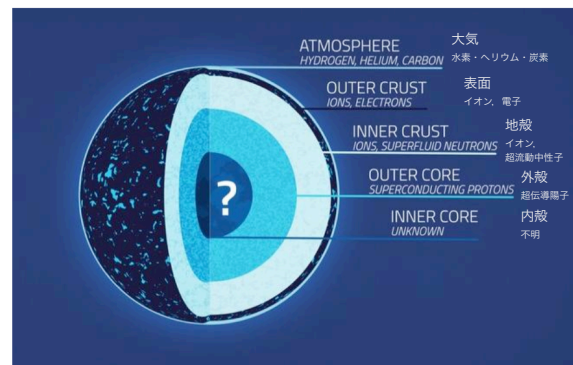


図1: 中性子星の内部構造。提供: NASA GSFC. (こちらのレビュー記事も参照。)

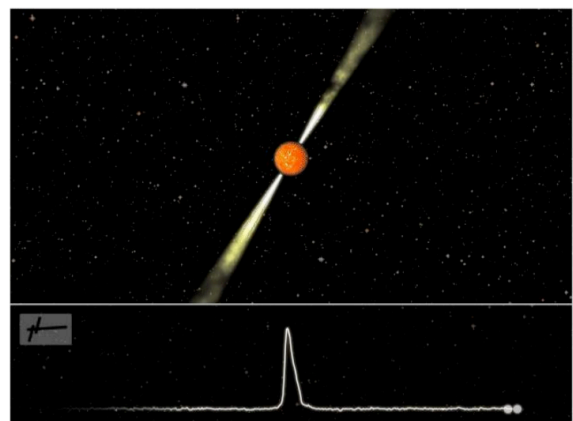


図2: 回転する中性子星と放射される電磁波ビームを描いたパルサーのイメージ図。下図は、望遠鏡に規則的に到達するパルス。画像クレジット: Joeri van Leeuwen, ライセンス: CC-BY-AS.

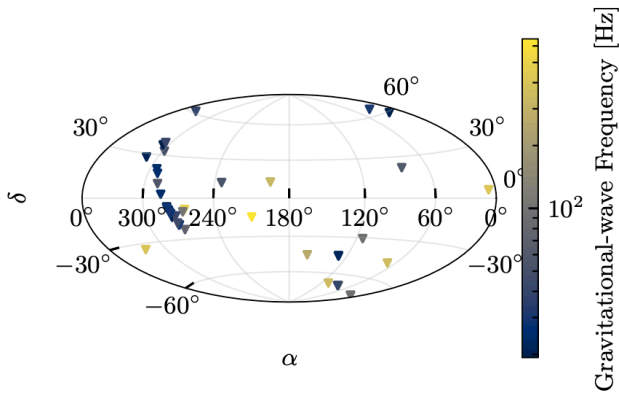


図 3: (論文の図 1 より) 分析対象ターゲットの天球面上 (赤経赤緯座標) の位置。

連続重力波信号の探索方法

一般に、想定する放射メカニズムや、連続重力波を記述するパラメータをどの程度正確に把握しているかに応じて、探索手法を適切に調整する必要があります。ここでは、いわゆる狭帯域探索 (narrowband search) を適用しました。この手法は狭い周波数帯域を探索でき、電磁放射と連続重力波放射が完全に一致していなくても対応できるようになっています。実際、いくつかのモデルでは、電磁放射の主な発生源である中性子星表面 (図 1 参照) が内部核よりも遅れてわずかに異なる速度で自転している可能性が指摘されています。狭帯域探索を用いてこのシナリオを検証する場合は、中性子星内部の強力な磁場によって引き起こされる内部核の変形度合いを調べることになります。

また、ノイズの多い電磁波データでは、パルサー放射の周波数の時間変化を適切に制限できない場合もあります。したがって、これらの影響を適切に考慮しないと、検出の可能性が低下することになります。

何が見つかった？

残念ながら、LIGO ハンフォード観測所と LIGO リビングストン観測所で取得された O4ab データからは、ターゲットとした天体からの連続重力波の検出はありませんでした。

これらの中性子星の変形は「**楕円率**」と呼ばれるパラメータによって量化されます。O4ab のデータから連続重力波が検出されなかったということは、その楕円率に**上限** (と呼ばれる閾値) が存在していることを意味します (図 4 参照)。言い換えれば、たとえ検出可能な信号を生み出すには小さすぎる変形であったとしても、これらのパルサーが取り得る最大の歪みについて、研究者たちはより正確な推定値を得たことになりました。

図 4 の結果は、それぞれのパルサーに対して、いわゆる**スピンドアウン限界**を、理論上考えられる最大値と比較したものです。対象としたパルサーの半数以上について、上限がスピンドアウン限界よりも低い値となることがわかりました。これ

は、連続重力波放射によって失われるエネルギーの割合に制限を与えます。中性子星の楕円率に関する最も厳しい上限は、パルサー J0711-6830 (予想される連続重力波周波数は約 364 Hz) に対して得られました。この値は半径 10km の星の変形が、100 **マイクロン** (1 ミクロンは 1 メートルの 100 万分の 1) をわずかに上回る程度に相当します。このような限界は、放出される連続重力波のエネルギーにも上限があることを意味しています。かに**パルサー** (約 60Hz) の場合、連続重力波放出によって星が失うエネルギーは最大でもわずか 0.04% に過ぎないことがわかりました。

今回の探索では重力波は発見できませんでしたが、データ取得期間の延長と検出器の改良により、以前の上限值を改善することができました。総合的に見て、本成果は中性子星を記述する理論により厳しい制限を与え、中性子星の複雑な物理に対する包括的な理解を深める重要な結果となります。

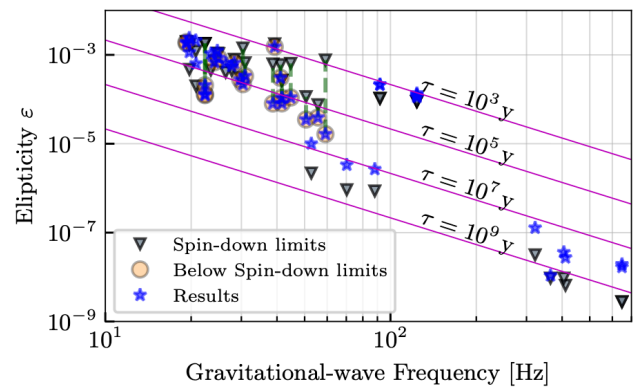


図 4: (論文の図 6a より) 星印: 各パルサーの楕円率に対する上限値 (観測で得られた上限値) を連続重力波の周波数の関数として描いたもの。三角印: パルサーのスピンドアウンが完全に連続重力波放射によるものと仮定した場合の、楕円率の理論的な上限値。紫色の線: パルサーの年齢 (図の τ) を描いたもので、重力波放射によってエネルギーを失う場合には、この線付近に位置するはずである。

Find out more

- <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-P2500612>
 あるいは <https://arxiv.org/abs/2603.25938>
- 連続重力波についての解説は [こちら](#)

(日本語訳: 真貝寿明, 今福準斗)