

## ミリ秒パルサーに山はいまだ見つからず

重力波天文台から発表される発見は、ブラックホール連星や中性子星連星からの重力波の話題で持ち切りです。しかし、連星だけが重力波を放出しているわけではありません。その他に期待される波源として、回転する中性子星があります。中性子星は高速で回転していることが知られていますが、重力波を放出することによってエネルギーを失い、次第に回転速度を落としていきます。この「スピンドアウン\*」の効果はとても小さいため、中性子星の回転周波数はほとんど一定に見えることになります。私たちはこのような重力波を「連続重力波」信号と呼んでいます。重力波は連続して放出され、ほとんど一定の周波数になっていることが特徴です。これまでの観測から、中性子星の回転による重力波の振幅には厳しい上限値がついています。中性子星のイメージ図を図1に示します。

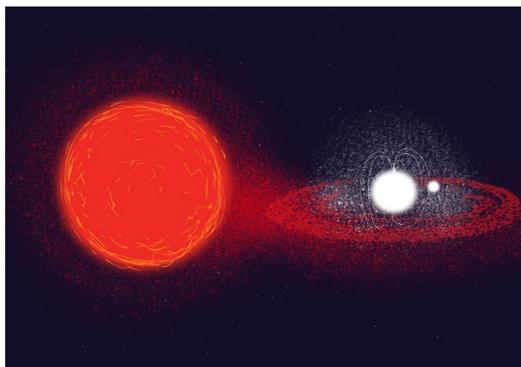


図1: ミリ秒パルサー PSR J1023 + 0038 の想像図。磁力線が白く描かれた右側の天体がパルサー。伴星(左側の赤い星)から降着円盤(赤色)を介して物質を放出する。製作: 欧州宇宙機関 (ESA)

パルサーと呼ばれる天体の正体は回転中性子星であり、優れた時計です。電波パルスとX線パルスは定期的に到着し、その到着時間を高精度で測定できるため、私たちは回転速度を正確に監視できます。パルスの通常の到着時間にわずかなずれが生じていて、周波数変化からスピンドアウンしていることはわかります。しかし、その原因となる物理的なメカニズムは完全には理解されていません。重力波観測はこれらの変化の解明に役立つと期待されます。

重力波を生成するには、パルサーは回転軸を中心に非対称でなければなりません。この非対称性は、単純に、星の表面から突き出している「山」のようなものと考えられます。このような歪みができる原因にはさまざまな説があります。例えば、中性子星が超新星爆発で誕生した後、ゆがんだ部分が星の地殻またはコア

に「凍結」されたとする説。あるいは、星に降り注ぐ物質から形成された、とする説。さらには、非常に大きな内部磁場を通じて「山」が生成され維持されている、とする説などです。重力波は、発生源のメカニズムに応じて、星の回転周波数と同じか、またはその2倍で生成されます。星が回転するときにくらついたり、超伝導状態の地殻が完全に固定されていないと、慣性モーメントの軸がずれ、星の回転と同じ周波数の重力波になります。星の形状が非対称に歪んでいれば、回転周波数の2倍の周波数の重力波になります。

私たちの重力波探査は特定の放出メカニズムに依存していません。むしろ、あらゆる種類の連続信号を測定し、後でそれを特定のプロセスにあてはめていきます。電波、X線、およびガンマ線を用いた天文学者の観測により、多くのパルサーについて、天空上の位置や周波数、スピンドアウン、さらにはスピンドアウンの変化率さえわかっています。これらを用いて重力波信号を探査していきます。この研究の1つの重要な目標は、「スピンドアウン限界\*」を超える感度\*に到達することです。つまり、中性子星の回転エネルギー損失のすべてが重力波に変換されていると想定したときに予測される重力波振幅よりも小さな振幅を測定できるようにすることです。検出感度がこのレベルに達すると、物理的にどれがもっともらしい放出メカニズムなのかを判明し、実際に重力波を検出する機会につながります。

現在の研究は、ライゴ (LIGO)\* とヴィルゴ (Virgo)\* での3回に及ぶ観測期間\*のデータを用いて、5つのパルサーからの重力波放出に制約を課す作業を行っています。その過程では、重力波の周波数はそれぞれのパルサーの回転周波数と同じか2倍の値を用いています。私たちは、まだ重力波信号を検出したわけではありませんが、2つのパルサーについて、そのスピンドアウン制限を初めて超えるレベルに到達しました。特にこれらが非常に高速で回転する「ミリ秒パルサー\*」であることに注目してください。重力波の放出は周波数が高いほど効率的になるため、検出可能な重力波を生成するために大きく変形している必要がなくなります。実際、私たちが発見した358光年先にあるパルサー J0711-6830の赤道面は、真円に近く、人間の髪の毛ほども歪んでいないことがわかりました! これらの上限値は図2と図3にて詳しく知ることができます。対照的に、かにパルサー (Crab pulsar) や、ほ座パルサー (Vela pulsar) などの遅く回転するパルサーは、検出可能な信号を生成するために非常に大きな変形を必要とします。中性子星は非常に強い重力をもつため、小さな変形の方が、大きな変形よりも生き残る可能性が高いはずですが、ミリ秒パルサーのスピンドアウン制限を超えたことは、重力波宇宙物理学において非常に重要な瞬間といえます。

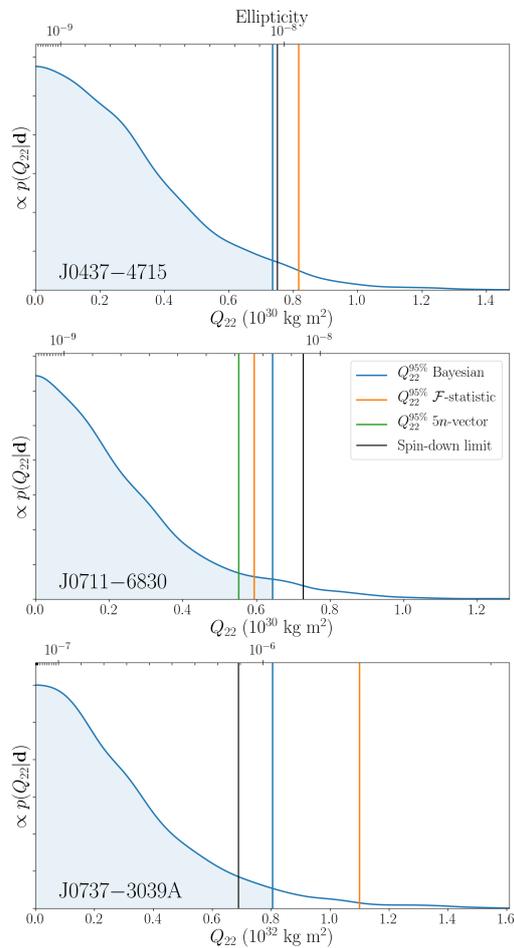


図 2: 新しい観測に基づいて得られた、3つのリサイクル・パルサー\*の質量四重極モーメント  $Q_{22}$  と離心率 (変形のレベル) に対する上限値を示します。曲線は **ベイズ事後確率** 分布を示し、この曲線より下の部分で、四重極モーメントの範囲を設定して囲む領域の面積は、真の値がその中に存在する確率に相当します。(もちろん、モデルを仮定し、今回得られたデータに基づく、という条件つきですが)。黒い縦線は各パルサーのスピンドウン限界を表し、色付きの縦線は四重極モーメントまたは離心率の上限値に対する95%の信頼区間の上端に対応しています。四重極モーメント (または離心率) の上限測定値 (色付きの縦線) が、黒い線よりも左側にある場合、スピンドウン限界を超えた感度だったと言えます。約358光年離れた場所にあるパルサー J0711-6830 の場合、赤道面の形状の真円からの歪みは、人間の髪の毛1本の幅よりも小さいことがわかります!

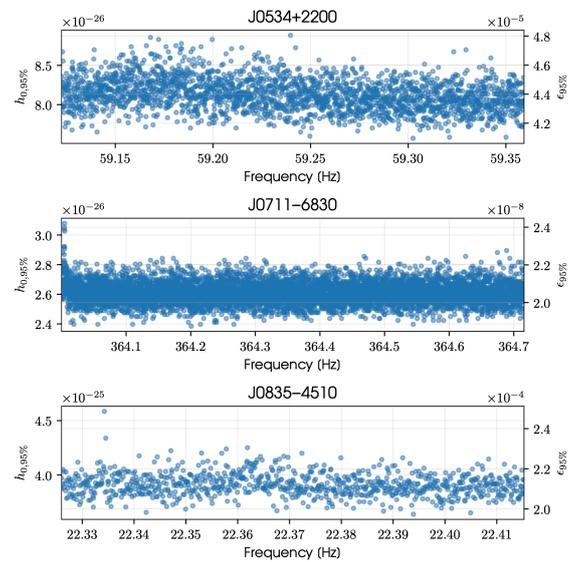


図 3: 狭帯域分析で分析された3つのパルサーの重力波振幅  $h_0$  と離心率  $\epsilon$  の95%の信頼区間の上端。上から順に、かにパルサー (Crab pulsar), スピンドウン制限を超えたミリ秒パルサー, ほ座パルサー (Vela pulsar) の上限値を示しています。

## さらに詳しく知るために

- この論文のプレプリント [\[link\]](#)
- Michael Kramer によるパルサーに関する解説 [\[pdf\]](#)
- NASA の提供する “Imagine the Universe!” の [パルサーについて](#)

## 用語解説

- **ライゴ (LIGO)**: レーザー干渉計重力波観測所 (LIGO) は、米国にある2つの重力波検出器を持ちます。1つはルイジアナ州リビングストンの近くにあり、もう1つはワシントン州ハンフォードの近くにあります。どちらの検出器も、直交する2本の4 kmの長さの腕を備えた大規模なレーザー干渉計であり、通過する重力波によって引き起こされる腕の長さの相対的な変化を測定する装置です。
- **ヴィルゴ (Virgo)**: イタリア、ピサの近くにある重力波検出器。これもレーザー干渉計ですが、腕の長さは3 km です。
- **感度 (sensitivity)**: 信号を検出する検出器の能力を示す指標。ノイズレベルの低い検出器は、弱い信号を検出できるため、感度が高い (優れている) と言われます。

- **スピンドウン (spin-down)** : パルサーは回転中性子星であり, その回転の速さ (スピンとも呼ばれる) は時間とともに減少します (言い換えると, 回転周期は増加します).
- **スピンドウン限界 (spin-down limit)** : 星がスピンドウンするときに失われる回転運動エネルギーが, すべて重力波の放射に使われる, との仮定に基づいて, パルサーからの重力波の振幅に換算された値のことを指します. この値を計算するには, パルサーまでの正確な距離が必要ですが, 実際には, パルサーの距離は最大で約 2 倍の不確定さがあります. しかし, パルサーがエネルギーを失うメカニズムとして, 磁気双極子放射もあることが知られているため, この値は, パルサーから得られるであろう重力波信号の振幅の上限値を示すこととなります.
- **観測期間 (observing run)** : 重力波検出器がデータを取得している期間.
- **ひずみ (strain)** : 通過する重力波によって引き起こされる時空の変形による 2 つの測定点間の距離変化の比率. 地球に到達する最も強い重力波でさえ典型的なひずみは非常に小さく, 通常は  $10^{-21}$  未満です.
- **上限 (upper limit)** : データとの整合性を保ちながら, ある量が持つことができる最大値に関する推定値. ここで関心のある量は, 私たちが見ることができる星の四重極モーメントの最大値 (これは, 地球に到達する連続重力波によるひずみ振幅に関連する量) です. 95% の信頼度での区間推定を用いて議論しています. つまり, 与えられたデータをもとにすると, 95% の確率で真の値はこの値より小さい, ということです.
- **ミリ秒パルサー (millisecond pulsar)** : 回転周期が約 30 ミリ秒未満で, スピンドウン率が非常に低い高速回転パルサーのこと.
- **リサイクル・パルサー** : 必ずしもミリ秒のパルサーとして分類されるほど速く回転しないかもしれないが, 伴星から物質を降着させることによって高い回転速度を獲得したと予想されるパルサーのこと.