

GEO600 による SGR1935+2154 からの銀河高速電波バーストと一致する重力波の探索

高速電波バースト (FRB) は、通常約 1000 分の 1 秒持続する高エネルギーの電波信号の一種です。これまでに検出された数千の FRB のほとんどは、私たちの銀河系外の非常に遠く離れた距離から地球に到達しています。銀河系外 FRB を検出できるのは、FRB の非常に大きなエネルギーに関係しています。1 つの FRB は、ほんの一瞬の間に太陽の約 10 万倍から 10 兆倍の明るさになることがあります。いくつかのケースでは、天空上のまったく同じ場所から複数の FRB が、異なる時間（数分から数年にわたって静寂を保ったあとに）に閃光を発することが知られており、これは、FRB を生み出す物理プロセスが（膨大なエネルギーが放出されるにもかかわらず）その発生源を完全に破壊しないことを示唆しています。

FRB の正確な発生源はわかりませんが、中性子星のすぐ近くで起こる強力な現象であると考えられています。中性子星の一部は、宇宙に存在する最も強い磁場を持っており、その強さは地球の約千兆倍 (10^{15} 倍) にも及びます。そのため、便宜上「マグネター」と呼ばれています。マグネターの磁場は、その内部を貫き、表面を通り抜け、そこから遠くまで広がり、非常に低密度の大気である「磁気圏」を形成します。これは地球や太陽の磁気圏に似ています。マグネターは物理的に極端な天体であり、FRBs だけでなく、X 線バースト (X 線の明るい閃光) やグリッチ (マグネターの回転速度の急激な変化) といった他の種類の活動も引き起こします。

FRB の性質に関する重要な手がかりは、2020 年 4 月 28 日に、銀河系のマグネター SGR 1935+2154 が FRB を発生させたときに得られました。これは、

FRB が我々の銀河系から発生した初めての事例であり、また FRB と X 線バーストが同時に観測された初めてのケースでもありました。わずか 3 年足らずの間に、この特別な発生源はさらに 3 つの FRB を発生させました。2020 年 10 月 8 日、2022 年 10 月 14 日、そして 2022 年 12 月 1 日です。

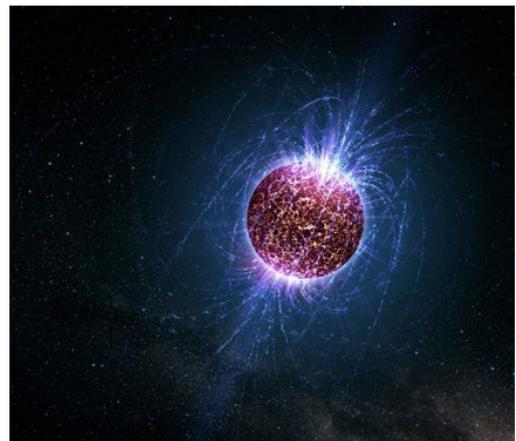


図 1: 高速電波バースト (FRB) の発生源と考えられるマグネターの想像図。提供元: NASA.

FRB とマグネターの X 線フレアは関連した現象とも考えられますが、同じマグネターが X 線フレアなしで FRB を発生させる場合があります、その逆もあります。実際に SGR 1935+2154 の場合でも当てはまりました。有力な理論では、フレアはマグネターの地殻における地震活動の結果として発生するとされています。十分に強いねじれが生じると、地震のときに地球の地殻が割れるのと同じように、中性子星の地殻がひび割れます。その際に放出される膨大なエネルギーは、中性子星の内部と周囲の磁気圏の両

方に伝わります。磁気圏に伝わるエネルギーの一部は、最終的に磁気フレアを生み出したり、FRBを引き起こしたりする可能性があります。残りのエネルギー（実際にはその大部分）は中性子星の内部に衝突し、特殊な周波数で中性子星を振動させることになります。これがいわゆる準固有振動モードです。

重力波の探索

重力波は時空の振動であり、発生源から宇宙全体にエネルギーを伝える流れです。地殻の亀裂によって引き起こされるマグネター内部の振動は、重力波の潜在的な発生源であり、FRBが放出される仕組みと関連していることでしょう。これらの重力波の特性は中性子星とその磁場の性質に依存するため、磁気フレアとほぼ同時に重力波観測することは、長年期待されているものの、これまで実現できていません。いくつかの最近の理論モデルは、孤立したマグネターの内部振動から放出される重力波のエネルギーは、これまでに検出されている重力波の発生源（たとえば、連星ブラックホールの合体）のもの

と比較して弱いものと予測しています。そのため、現在の重力波検出器では、マグネター起源の重力波の観測には感度不足かもしれません。マグネター活動に関連する重力波の発見は非常に価値あるものですが、発見されないことでも、重力波で放出されるエネルギーの上限を推定することができ、したがって、マグネターの性質を理解するためのモデルが制限できます。この論文では、銀河マグネター SGR1935+2154 で観測された FRB に関連して、重力波が非検出だったことを報告します。

重力波の発生源が遠くにあるほど、時空の歪みは小さくなります。とてつもなく強力な天体物理学的現象で放出されるような膨大なエネルギーであっても、地球上ではごくわずかな歪みしか生じません。そのため、非常に高度な検出器を準備する必要があります。LIGO, Virgo, KAGRA および GEO600 の重力波観測所は、吊り下げられた鏡の動きをレーザー光で監視する装置で、重力波を検出します。複数の重力波検出器で同時観測することは、偽の重力波信号を排除する上で大きな利点です。実際の重力波が1つの検出器を通過すると、地理的に離れた別の検出器でわずかに異なる時刻に同様の痕跡が残ることが予想されます。

論文で掲載した図

これらの図とその詳細については、無料で入手可能なプレプリントをお読みください。

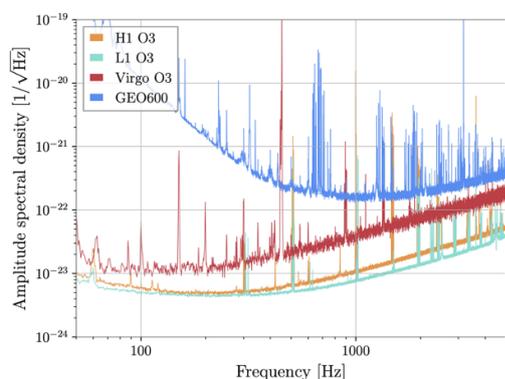


図 2: 重力波干渉計感度曲線。横軸は重力波の周波数で、各線は LIGO (オレンジ, 薄緑), Virgo (赤), GEO600 (青) のもの。曲線の位置が低いほど、その周波数での検出器の感度が高いことを意味します。

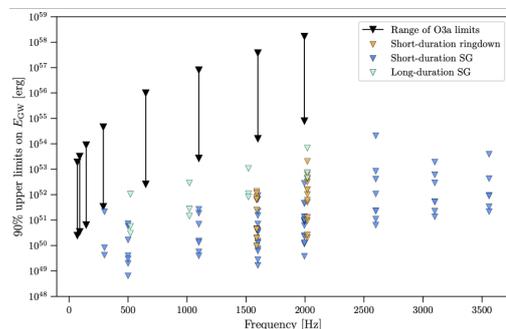


図 3: FRB 中に放出される GW エネルギーの上限。今得られた上限は、さまざまな周波数とモデルについて、色付きの三角形でプロットされています。以前の制限の範囲は、黒い矢印で示されています。新しい制限は大幅に厳しくなっていることがわかります。

既知のマグネターで FRB が発生すると、私たちはその時刻周辺の重力波データを調べて、観測された電磁信号に対応する重力波信号を探索します。銀河系のマグネター SGR 1935+2154 から発生した FRB は、LIGO と Virgo の観測所が調整のために観測を中断している時間帯に起こりました。GEO600 は (LIGO や Virgo ほど感度が高くはありませんが) SGR 1935+2154 からの 4 つの FRB のうち 3 つの時刻周辺で稼働しており、有用な重力波データを収集しました。

単一の干渉計での観測には、いくつかの課題があります。第一に、前述の通り、実際の信号とノイズを区別することがより複雑になります。第二に、複数の重力波観測所からのデータを組み合わせることができないため、FRB が発生した天空上の位置に焦点を合わせることがより困難になります。第三に、GEO600 の感度は LIGO や Virgo 検出器よりも低く、周波数が約 1 kHz 以下の重力波は検出できない可能性があります。幸いなことに、理論モデルでは、マグネター内部の急速な振動によって生成される重力波は、GEO600 が最高の感度を持つ高周波帯 (1~3 kHz) である可能性が高いと予測しています。

連星ブラックホールの合体の場合とは異なり、期待される重力波信号の正確な形状はわかりません。そのため、私たちは、重力波信号の波形を最良と推測される一般的な「波形」に限り、かつ検索を「最小限モデル」で行いました。これは信号が理論的な波形と完全に一致しなくても検出できる余地を残していることを意味します。重力波探査は、1 秒未満の短い重力波信号用と、1~10 秒続く長い信号用の 2 つの解析プログラムを用い、SGR 1935+2154 からの FRB およびその周辺の X 線イベントの期間で重力波信号を探しました。

結果と今後の見通し

SGR 1935+2154 が (これまでで) 最も近い FRB の発生源であることを考慮しても、FRB に関連する重力波は検出できませんでした。解析の感度を決定するために、シミュレーションによって得られた妥当な特性を持つ重力波信号を使って、その振幅がどれだけ大きければ観測できるのかを検証しました。そしてこれらの振幅を使用して重力波放出エネルギー

の上限を決定しました。つまり、信号が検出されないままとなるには、この値以上のエネルギーとなる信号はありえない、という上限値です。この制限値は、2019 年から行っている LVK の FRB 解析よりも、4 桁厳しく改善する結果になりました。また、FRB 中に重力波で放出されるエネルギーと電波で放出されるエネルギーの比率に関する制限もわずかに厳しくすることができました。

FRB に伴う重力波で放出されるエネルギーに関する既存のすべての予測は、今回得られた上限値よりも低い値です。そのため、現状の制限では、マグネターにおける FRB と重力波を関連づけるさまざまな理論モデルを選別するにはまだ十分に厳しくありません。それでも、これらの上限は、重力波の放出が FRB と関連する可能性のあるモデルを制限し、理論研究者がさらなる FRB のメカニズムを解明してゆく助けとなっています。

LVK の重力波検出器は 2025 年半ばまで観測モードを維持する予定です。SGR 1935+2154 (あるいは別の銀河系マグネター) が再び FRB を発生させた場合、より感度の高い検出器で同時発生する重力波を探査できる可能性があります。これらの極端な天体物理現象をより深く理解するさらなる機会が得られるかもしれません。

さらに興味のある方へ

私たちのウェブサイトでは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/P2400192/public>

あるいは <https://arxiv.org/abs/2410.09151>

(日本語訳：土井夏海，真貝寿明)