

1. 背景

高速電波バースト(※1)は、1 ミリ秒以下という非常に短い時間で起こる電波帯（数百メガヘルツから数ギガヘルツ）の突発現象で、2007 年の初報告後、オーストラリアのパークス天文台をはじめとして世界中の電波望遠鏡でいくつも検出されてきました。これまでの観測から、高速電波バーストのほとんどは、我々の住む天の川銀河の外からやってきていることが分かっており、実際に高速電波バーストを起こした天体が含まれる銀河が特定された例もあります。しかし、高速電波バーストを起こす天体の正体や、その発生機構はまだ明らかになっていませんでした。そんな中、2020 年 4 月 28 日に天の川銀河にある中性子星の一種、宇宙で最も強い磁場を持つマグネターと呼ばれる天体 SGR 1935+2154 が、X 線のバースト現象を頻発し、そのバーストの 1 つと高速電波バーストが同時に検出されました。この観測から、少なくとも高速電波バーストの一部はマグネターが起源となっていることが明らかになりましたが、その発生機構については観測が少なく、まだ明らかになっていません。

2. 研究手法・成果

マグネター SGR 1935+2154 は、前回の高速電波バーストから 2 年後の 2022 年 10 月 10 日、類似した X 線バーストを頻発しはじめました。本研究チームは、これにいち早く気が付き、前回と同様に高速電波バーストが発生することを期待して、国際宇宙ステーションに搭された NASA が運用する NICER (Neutron Star Interior Composition Explorer) 望遠鏡や、X 線天文衛星 NuSTAR (Nuclear Spectroscopic Telescope Array) に緊急観測を要請して、同月 12 日から 4 日間にわたるモニタリング観測を行いました。観測開始から 2 日後の 14 日、マグネターは期待していた高速電波バーストを起こしました。残念ながら地球の影になってしまい、高速電波バーストそのものの瞬間に X 線の観測は行えませんでした。高速電波バーストが発生した前後の 2 日間にわたる、かつてない高頻度な X 線観測データを得ることができました。

マグネターを含む中性子星は、その表面にホットスポットと呼ばれる高温の領域があり、そこからの X 線が自転に伴ってパルス的に放射され、この数ミリ秒から数秒程度の X 線パルスを観測することで、星の自転を測定できます。中性子星の自転は長期にわたって少しずつ遅くなっていきますが、X 線バーストを放射する活動期には複雑な時間変化を示すこともあります。本研究チームは、この X 線パルスの到来時間を詳しく解析し、

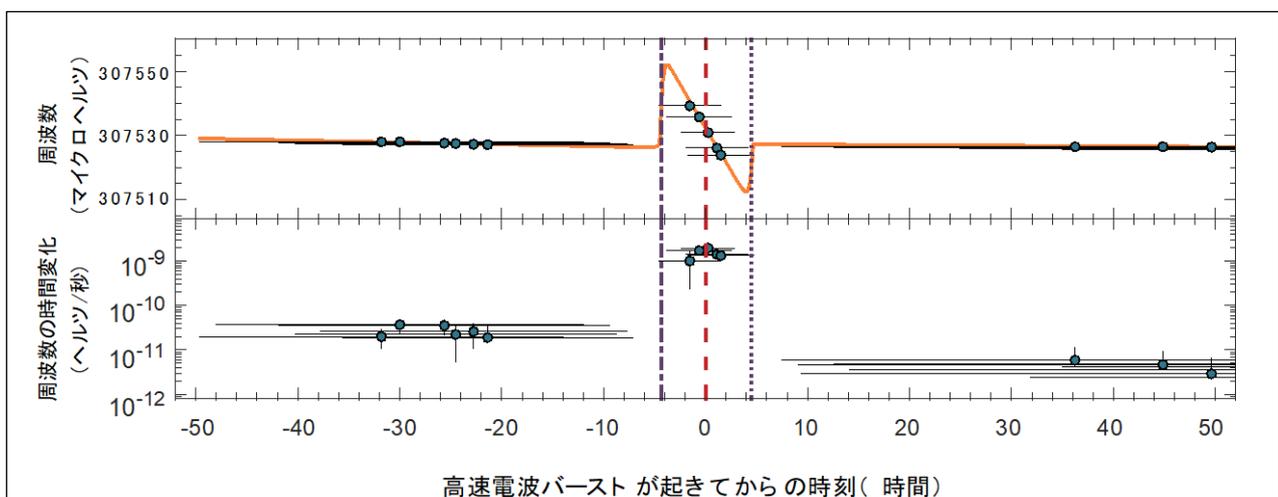


図 1: X 線の高頻度観測で得られたマグネター SGR 1935+2154 の X 線パルスの自転周波数の変化 (上図) と、それぞれの時刻での周波数の時間変化率の絶対値 (下図)。上図では上の方が自転が早いことを意味する。青いデータ点は観測値、オレンジの線はモデルを示す。赤の点線は高速電波バーストが起きた時間 (図の時刻原点)、紫の点線は 2 回のグリッチの時刻を示す。

今回の高速電波バーストが起きた前後の時間で、SGR 1935+2154 の自転がどのように変化しているか調べました。その結果、この天体は高速電波バーストが発生した約 4 時間前と 4 時間後に、急激に自転が速くなるグリッチ(スピンアップ・グリッチ)という現象が起きたことを見つけました。このようなグリッチは、これまでもいくつかの中性子星で観測されてきましたが、高速電波バーストと付随して観測されたのは今回が初めてで、短期間にほぼ同じ強度の 2 度のグリッチを連続して観測できたのも初めてです。また今回の双子のグリッチは、これまでに観測された中で最大級であることも分かりました。さらに、2 度のグリッチの間で、自転が急激に減速していました。減速するという事は何らかの方法でエネルギーを外に排出する必要があります。本研究チームは X 線バーストのスペクトルも解析し、外に放出された放射エネルギーを計算しました。その結果、放射によって失われたエネルギーは 10%程度と分かり、荷電粒子を含む星風など、放射エネルギー以外の理由で減速が起きた可能性が示唆されました。これらの自転が早くなるグリッチ、急速な減速、2 回目のグリッチのあとには、ほぼ元の自転速度に戻っており、高速電波バースト前後の高頻度な X 線観測が実現したことによって、世界で初めて、マグネターの地獄の釜が開くような貴重なタイミングを垣間見たこととなります。

今回の研究により、高速電波バーストが起きる際に、マグネターの自転が短時間で大きく変化していることが示され、マグネターの活動がどのように高速電波バーストを起こすかの機構の解明に一步近づきました。

3. 波及効果、今後の予定

宇宙論的な距離から到来する高速電波バーストは、天文学上の未解明な現象として多くの天文学者が興味を持っています。高速電波バーストの発生源が全てマグネターなのか、他の種族の天体も混ざっているのかもいまだによくわかっていません。今回のような電波と X 線を結びつけた多波長観測や、高頻度なマグネター観測などは、今後の高速電波バーストとマグネターの観測の研究を大いに進展させる鍵となるでしょう。

本研究では、X 線パルスの周波数の時間変動に着目してマグネターの回転運動の変化を捉えました。さらに本観測からは X 線の放射強度が数十分から数時間の幅で変化していることが分かっています。X 線放射の長時間での時間変動を高頻度で調べることで、高速電波バーストが起きる際に、マグネターのどこで物理的な変化が起きているか解き明かせる可能性があります。本研究チームは、今後もこのマグネターで起きた高速電波バーストと X 線バーストの放射の関係について、より詳細な解析を行なっていく予定です。

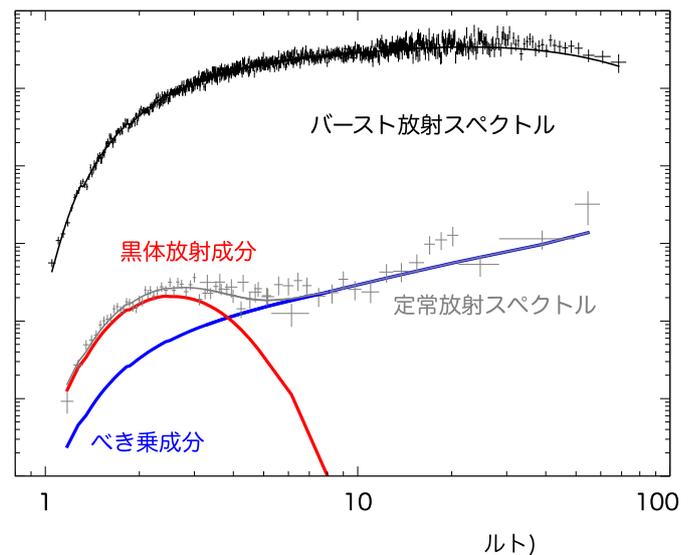


図 2: 今回の NICER と NuSTAR の観測で得られた、マグネター SGR 1935+2154 のグリッチ間のバースト放射スペクトルと定常放射 (バースト以外の放射) スペクトル。スペクトルはマグネターにおいて典型的な黒体放射成分とべき乗成分でフィットできた。ここでは、バースト放射スペクトルに関しては、NICER と NuSTAR の観測時期の違いを補正して、NuSTAR のスペクトルを実際の約 3 倍にして表示している。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、Chin-Ping Hu（台湾国立彰化師範大学 准教授、元日本学術振興会 外国人特別研究員として京都大学に在籍）、成田拓仁（京都大学大学院理学研究科 物理学第二教室 博士学生）、榎戸輝揚（京都大学大学院理学研究科 物理学第二教室 准教授、理化学研究所 開拓研究本部 理研白眉研究チームリーダー兼務）らを中心に実施しました。本研究の科学観測では、NICER の公募観測 Cycle 4 提案(proposal number 5076, PI:榎戸)に基づいて観測が行われ、NICER チーム内の強磁場中性子星の研究グループ Magnetar & Magnetosphere (M&M) のメンバーが初期観測や解析を主導しました。本成果に至る一連の研究は、JSPS 科研費 22H01267、理化学研究所および京都大学の白眉プロジェクト、JST 創発的研究 JPMJFR2020 (sohatsu)によって支援されました。

<用語解説>

※1 高速電波バースト(Fast Radio Burst, FRB)：電波（数百メガヘルツから数ギガヘルツ）で観測される継続時間が約1ミリ秒以下の電磁波パルス。天の川銀河の外で発生しているものが多い。

※2 中性子星 (neutron star)：原子から構成される恒星と異なり、中性子を主成分とする高密度（約 $3 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$ ）の天体。自転に伴う数ミリ秒から数秒程度の特徴的な電磁波パルスを放射する。

※3 マグネター (magnetar)：通常の若い中性子星が持つ磁場の100から1000倍の極端に強い磁場（ 10^{10-11} テスラ）を持つ中性子星。X線やガンマ線などのバーストを起こすことが知られている。

※4 グリッチ (glitch)：中性子星の放射する電磁波のパルス周期が瞬時に短くなる現象。中性子星の内部と外部の回転速度差が臨界値を超えた時に、瞬時に外層の回転速度が上昇することで生じると考えられている。

<研究者のコメント>

- 高頻度な観測で大規模データが生み出され、その解析には先進的なアルゴリズム、迅速なデータ転送、十分な計算能力、そして緊密な国際協力が必須です。本研究で、マグネターや高速電波バーストの解明につながる有益な情報が得られ、将来の望遠鏡や観測戦略の策定のヒントにもなりました。(Chin-Ping Hu)
- マグネターは重い星の爆発の後で形成される中性子星の一種と考えられていますが、その形成と爆発の関係は明らかになっていません。将来は爆発した星の残骸とマグネターを観測することで、その起源に迫っていきます。(成田拓仁)
- 今回の成果は、マグネターの活動期にかつてない高頻度なモニタリング観測を迅速に実施できたことが鍵になりました。激変する宇宙を観測する時間軸天文学の分野では、こういった高頻度観測は大切で、将来の宇宙望遠鏡や月面天文台で実現していきたいです。(榎戸輝揚)

<論文タイトルと著者>

タイトル：Rapid spin changes around a magnetar fast radio burst（マグネターの高速電波バースト前後での急速な自転周期の変化）

著者：Chin-Ping Hu, Takuto Narita, Teruaki Enoto, George Younes, Zorawar Wadiasingh, Matthew G. Baring, Wynn C. G. Ho, Sebastien Guillot, Paul S. Ray, Tolga Guver, Kaustubh Rajwade, Zaven Arzoumanian, Chryssa Kouveliotou, Alice K. Harding, and Keith C. Gendreau

掲載誌：Nature DOI：https://doi.org/10.1038/s41586-023-07012-5

<参考イラスト>

