

X線・ガンマ線偏光観測で開拓する中性子星超強磁場の物理

Elucidation of ultra-strong magnetic field of neutron stars with highly-sensitive X-ray and Gamma-ray polarimetry

課題番号：19H05609

玉川 徹 (TAMAGAWA Toru)

国立研究開発法人理化学研究所 開拓研究本部 主任研究員



研究の概要（4行以内）

『マグネター(磁石星)と呼ばれる中性子星は、本当に、量子電磁力学(QED)摂動計算が破綻する 10^{10} テスラを超える磁場を持つ極限天体なのだろうか？そのような天体では、我々の知っている QED は通用するのだろうか？』本研究では、マグネターの強磁場中性子星仮説を、世界初の高感度X線・ガンマ線偏光観測により直接検証することを目的とする。

研究分野：宇宙物理学（実験）

キーワード：X線・ガンマ線偏光、超強磁場、中性子星、飛翔体観測

1. 研究開始当初の背景

中性子星は、大質量の恒星が超新星爆発した後に残される半径 10km 程度の天体であり、この世に存在する最も高密度の物質（原子核密度の 2-3 倍）である。パルサーと呼ばれる周期的に明滅する中性子星の多くは、 10^8 テスラ程度の強い磁場を持つことが知られており、その内部構造や磁場の起源を知ることが、天体物理学・天文学のみならず、素粒子・原子核物理学の重要なテーマの一つである。

中性子星の一種である「マグネター」は、 10^{10-11} テスラもの超強磁場を持ち、磁気エネルギーの解放により輝くと信じられている。しかしこれは、あくまで仮説であり、観測による超強磁場の直接検証が世界的に競われている。

2. 研究の目的

マグネター(磁石星)と呼ばれる中性子星は、本当に、量子電磁力学(QED)摂動計算が破綻する 10^{10} テスラを超える磁場を持つ極限天体なのか？それを知るためには、これまで通りの観測手段では限界があり、質的に全く新しい研究手法が求められている。本研究では、マグネターの強磁場中性子星仮説を、世界初の高感度X線・ガンマ線偏光観測により直接検証することを目的とする。

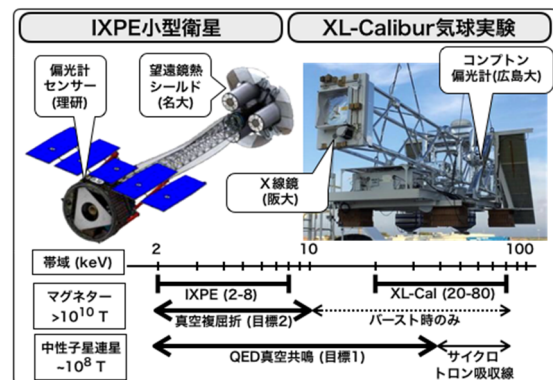
ひとたびマグネターの超強磁場中性子星描写が確定すれば、基礎物理学（強い場の物理学）の実験場として「強磁場高密度核物質」分野が創出できる。

3. 研究の方法

マグネターの超強磁場中性子星仮説を証明するために、以下の2つの研究目標を設定する。

(目標1) 磁場強度が既知の中性子星における QED 効果の検証：サイクロトロン吸収線の存在により磁場が既知の中性子星連星(約 10^8 テスラ)で QED 効果（真空共鳴）の存在を検証する。

(目標2) マグネターにおける真空の複屈折現象の観測： 10^{10} テスラ以上でのみ顕著に観

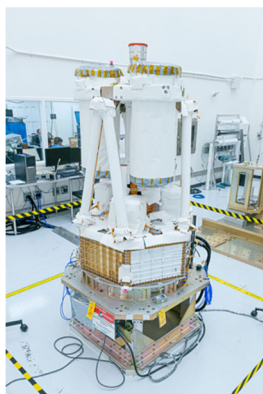


測できる QED 効果「真空の複屈折」を捉えることで、マグネターの強磁場中性子星仮説を観測により実証する。

これらの目標を実現するために、我々がハードウェアを提供し、コアメンバーとして参加する NASA の X 線偏光観測小型衛星 IXPE (2021 年打上) と、日米共同気球実験 XL-Calibur (2022 年飛行) を成功させ、世界初の中性子星連星とマグネターの X 線・ガンマ線高感度偏光観測を実現する。

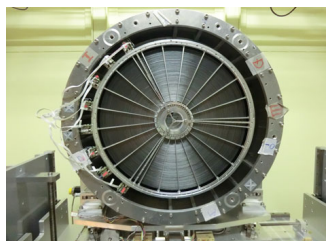
4. これまでの成果

IXPE 衛星に搭載する X 線偏光計の製作と較正試験は、2019 年度末までに予定通り完了した。X 線偏光計と X 線望遠鏡の衛星への搭載作業は、米国 Ball Aerospace 社で実施され、2020 年度内に予定通り完了した(右図)。これらの研究成果や進捗状況は、順次、国際会議等にて発表し、論文としてまとめた。日本からの提供ハードウェアで残されていた望遠鏡熱シールドも、予定通り 2019 年度末までに米国に納品が完了した。



IXPE 衛星マグネターワーキンググループ (WG) では、QED 効果を観測しやすいマグネター天体を 2 つ、当初の予定通り 2020 年度中に選定した。観測シミュレーションも実施し、予測通りの偏光度であれば、数週間程度の観測で結果が得られることを確認した。

XL-Calibur 気球実験について、日米瑞国際チームでのペイロード準備が順調に進んでいる。日本チームが担当するのは、世界最大面積を持つ FFAST 硬 X 線望遠鏡の搭載準備である(右図)。この望遠鏡は、一部の支持構造がフライト品質ではなかったため、不足箇所を製作した。その後、望遠鏡の結像性能を最大化すべく、放射光施設 SPring-8 の 30 keV X 線を用いて、2019-20 年で計 3 回の調整を行った。調整箇所を 70 分割して、それぞれの位置の集光ピークが同じ場所に来るように調整した結果、要求値である ± 0.5 分角以内に、ピーク位置を揃えることができた。



XL-Calibur コンプトン偏光計のアップグレードとして、偏光計の主検出部である CZT 半導体検出器の薄型化を行った。我々は 0.8 mm 厚の CZT 素子入手して複数計測し、エネルギー分解能や低エネルギー閾値、長期安定性

などが要求性能にマッチしていることを実測した。これにより、次回のフライトでは 0.8 mm 厚の CZT 素子を利用することが決定した。

5. 今後の計画

IXPE 衛星は 2021 年 11 月の打ち上げが予定されている。打ち上げまでの間は、IXPE 衛星チームのマグネターワーキンググループを通じた観測天体のシミュレーション、データ解析方法の確立など、論文化に向けた活動に注力する。打ち上げ後はマグネター観測とデータ解析を並行して進め、2022 年度中には、おおよその結果見通しが得られるであろう。

XL-Calibur の望遠鏡は、SPring-8 において、2021 年 6 月に最終較正試験を実施し、光軸と有効面積の計測を行なう。最終較正実験後は、ヒーターやケーブル類を実装して、気球に搭載する準備が完了する。その後、米国において気球ゴンドラに全機器を搭載して、機器間の噛み合わせ試験を実施する。2022 年春には放球準備をすすめ、2022 年 5-7 月期に北極圏で放球を行う。IXPE 衛星との同時観測も予定している。結果は 2023 年度中にまとめる。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- [1] "XL-Calibur: a second-generation balloon-borne hard X-ray polarimetry mission", Q. Abarr, H. Takahashi (32), T. Tamagawa (34), et al., *Astroparticle Physics* 126, 102529 (2021).
- [2] "XL-Calibur: the next-generation balloon-borne hard x-ray polarimeter", Y. Maeda, H. Takahashi (55), T. Tamagawa (58), et al., *Proc. of SPIE* 11444, 114442X (2021).
- [3] "The Imaging X-ray Polarimetry Explorer (IXPE): technical overview III", P. Soffitta, I. Mitsuishi (106), T. Tamagawa (127), et al., *Proc. of SPIE* 11444, 1144462 (2020).
- [4] "Current status of the X-ray mirror for the XL-Calibur experiment", K. Hattori, H. Takahashi (25), T. Tamagawa (42), et al., *Proc. of SPIE* 11444, 114445W (2020).
- [5] "IXPE mirror module assembly", B. Ramsey, I. Mitsuishi (9), et al., *Proc. of SPIE* 11119, 1111903 (2020).
- [6] "The Imaging X-ray Polarimetry Explorer (IXPE): technical overview II", S. O'dell, I. Mitsuishi (96), T. Tamagawa (117), et al., *Proc. of SPIE* 11118, 111180V (2019).

7. ホームページ等

<https://astro.riken.jp/ks-xpol.html>