

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：32641

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2023

課題番号：21K20372

研究課題名（和文）新たな観測的手法・観測機器で迫る宇宙最強の磁石・中性子星

研究課題名（英文）Study on magnetized neutron stars with new observational method and instruments

研究代表者

米山 友景（Yoneyama, Tomokage）

中央大学・理工学部・助教

研究者番号：90908774

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、中性子星の磁気圏及び表面磁場の解明を目的とした。そのために、革新的な性能をもつ日本のX線天文衛星「X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission (XRISM)」の開発を行った。XRISMは2023年9月7日に打ち上げられ、軌道上での性能検証を経て2024年6月現在順調に観測を進めている。XRISMは既に複数の中性子星を観測し、現在初期成果の出版に向けた解析が進行している。また、本研究課題ではアーカイブデータを用いた中性子星の研究も行った。単独中性子星ならびに中性子星連星について、従来知られていなかった性質の存在を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

XRISMはそれぞれ過去最高のエネルギー分解能と広大な視野を持つ2つのX線望遠鏡を搭載している。これらはX線天文学全体に革新的な成果をもたらし、星の最後の姿である中性子星を含め、宇宙における物質・エネルギー循環の理解を大きく進めることとなる。また、アーカイブデータ解析で得られた成果は、中性子星に対する従来の理解を変えるものであり、中性子星理論にもフィードバックを与えられるものである。

研究成果の概要（英文）：In this project, we aimed to reveal the magnetosphere and surface magnetic field of neutron stars. For the objective, we developed a brand new X-ray astronomical satellite, "X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission" (XRISM). XRISM has been successfully launched on 2023-09-07. After the commissioning phase, XRISM is in the nominal operation. XRISM has observed several neutron stars, whose data are under analysis to be published. We also performed archival data analysis for several neutron stars. We have revealed new observational properties that cannot be explained by present aspects for an isolated neutron star and a neutron star binary.

研究分野：X線天文学

キーワード：X線天文学 宇宙物理学 中性子星 半導体検出器

1. 研究開始当初の背景

中性子星は、重力崩壊型超新星爆発の残骸中に形成されるコンパクト天体であり、極めて強い自己重力を核子の強い相互作用によって支えていると考えられている。中性子星は原子核に匹敵、あるいは凌駕する密度によって、地上では実現不可能な極限環境を持ち、天文学のみならず、物理学の幅広い分野から注目されている。特に中性子星の磁場は極めて強力 ($\sim 10^9 - 10^{15}$ G) で、さまざまな観点から重要な研究対象である。多くの中性子星の観測的特徴である周期的な光度変動 (パルス) もこの強磁場によって発生すると考えられているほか、地球近傍での過剰な反物質の存在 (Abeysekara et al. 2017 など) や、未知の電波現象である高速電波バースト (FRB) の起源も強磁場中性子星である可能性が示唆されている (The CHIME/FRB Collaboration 2020 など)。更には、中性子星自身の内部構造にも大きな影響を与えているほか、強磁場中でのみ発生する高次の量子電磁気学的効果の検証が期待されるなど基礎物理の観点からも重要な研究対象である。しかし、観測、理論の両面で半世紀以上にわたって精力的に研究が進められてきたが、中性子星磁場の構造や生成過程については、いまだ十分理解されていない。(2) 研究の目的、独自性、創造

2. 研究の目的

本研究は、新たな観測的方法と観測機器の基礎開発によって中性子星磁場にこれまでにない視点からアプローチすることを目的とする。具体的には、a) 自転とサイクロトロン共鳴線を用いた単独中性子星磁場構造の観測、b) X線精密分光による連星中性子星磁気圏の観測を行う。a) は申請者が独自に考案した新しい方法であり、博士論文において実証したものをさらに発展させる。b) は日本の次期X線天文衛星「XRISM」によって実現する。申請者はXRISMの開発及び科学運用の中心メンバーとして活動しているため、2022年度の打ち上げ後直ちに観測データを取得解析できる。

3. 研究の方法

a) 自転とサイクロトロン共鳴線を用いた単独中性子星磁場構造の観測

一般に、中性子星の自転は一定の割合で減速している。これは自転エネルギーを磁気双極子放射の形で放出しているからである。したがって、中性子星の磁場は自転速度とその減衰率から見積もられる。しかし、この方法では磁場と自転軸のずれなど、磁場の幾何学による不定性がある。一方、X線単独中性子星という種族では、星表面からの軟X線 (< 2 keV) 放射を直接観測でき、そのスペクトル中の陽子サイクロトロン共鳴線 (PCRF) から磁場を求めることができる。申請者は、自転パラメータから求めた磁場とPCRFから求めた磁場の差から自転軸と磁軸のずれを求める方法を考案し、初めてこれを系統的に測定した ($\sim 15 - 35\%$; 博士論文)。本研究ではこの手法を発展させ、自転に伴うPCRFの変動を考慮した解析を行い、単独中性子星表面の磁場分布を測定する。現状の観測データでは統計量や時刻精度が不十分なため、過去最高の有効面積と時間分解能をもつX線望遠鏡NICERによる観測を行う。

b) X線精密分光観測による連星中性子星磁気圏の観測

恒星との連星系をなす中性子星 (X線連星パルサー) は、自らの重力によって引き込んだガスを磁場で絡めとり、磁力線に沿った降着流を形成する。この降着流からは鉄元素に由来する輝線/吸収端が観測される。これらのスペクトル構造について、中性子星の自転による変化を観測することで、中性子星と共回転する磁気圏の構造を制限できる。ところが、磁場 1012 G、自転周期 300 秒の典型的なX線連星パルサーの磁気圏における共回転速度はおおよそ 100 km/s 以下 (2 eV のドップラー速度に相当) と見積もられ、従来の観測機器では測定できなかった。本研究では、従来の数十倍の分光性能をもつXRISMを用いて自転位相ごとの鉄輝線/吸収端のドップラーシフトを初めて検出し、降着流の幾何学的構造から中性子星磁気圏の構造を決定する。a) と合わせて、中性子星表面と磁気圏、二つの空間的スケールから中性子星磁場の全体像に迫る。また、これを実現するべくXRISMの開発、運用を行う。

4. 研究成果

a) 自転とサイクロトロン共鳴線を用いた単独中性子星磁場構造の観測

当初想定していた NICER による観測データは、機器の性能劣化に伴うバックグラウンド信号の増大によって精密な解析ができなかった。そのため、XMM-Newton 衛星のデータを使用して解析を行った。X 線単独中性子星のうち、最も磁場が強く、1 周期に 2 回のパルスを繰り返す天体である RBS 1223 について、研究の方法で述べた手法を適用した。ところが、光度曲線に予想外の性質を発見した。スペクトル解析から予想した描像では、光度曲線は正弦波であり、パルス振幅はエネルギーに比例するとされていた。しかし、実際には正弦波から外れたプロファイルをもち、かつパルス到来時刻にエネルギー依存性があり、2 つのうちの 1 つのパルスではあるエネルギー以上で振幅が低下してゆくことが明らかになった。これは、単独中性子星における従来の描像を覆す発見である。

b) X 線精密分光観測による連星中性子星磁気圏の観測

本目的のために XRISM 衛星の開発を行った。イプシロンロケット及び H3 ロケットの不具合により開発は遅延したが、2023 年 9 月 7 日に種子島宇宙センタより打ち上げられ、軌道投入に成功した。軌道上での性能検証を経て 2024 年 6 月現在順調に観測を進めている。XRISM は既に複数の中性子星を観測し、現在初期成果の出版に向けた解析が進行している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yoneyama, Tomokage, Dotani, Tadayasu	4. 巻 75
2. 論文標題 X-ray spectroscopy of the accretion disk corona source 2S 0921-630 with Suzaku archival data	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Publication of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 30-36
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/pasj/psac086	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yoneyama, Tomokage
2. 発表標題 X-ray spectroscopy of the accretion disk corona source 2S 0921-630 with Suzaku archival data
3. 学会等名 COSPAR 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 米山友景、他9名
2. 発表標題 X線分光撮像衛星 XRISM 搭載軟 X線撮像装置 Xtend のためのパイルアップ シミュレータの開発
3. 学会等名 天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 米山友景、堂谷忠靖
2. 発表標題 すざくによる低質量 X線連星 2S 0921 - 630 の降着円盤コロナの解析
3. 学会等名 天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 米山友景、他36名
2. 発表標題 X線分光撮像衛星 XRISM の科学運用準備の現状 (2)
3. 学会等名 天文学会2023年春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 米山友景、堂谷忠靖
2. 発表標題 X-ray spectroscopy of the accretion disk corona source 2S 0921 - 630
3. 学会等名 ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 米山友景
2. 発表標題 パイルアップシミュレータ /NICERのキャルからSXIのキャルに役立てそうなこと
3. 学会等名 SXI開発レビュー会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 米山友景
2. 発表標題 すざくによるLMXB 2S 0921-630の観測
3. 学会等名 ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 米山友景
2. 発表標題 X線単独中性子星におけるパルスピーク位相のエネルギー依存性
3. 学会等名 日本天文学会2024年春季年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yoneyama, Tomokage
2. 発表標題 On-orbit calibration of XRISM/Xtend
3. 学会等名 16th IACHEC meeting
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yoneyama, Tomokage
2. 発表標題 E0102 observations of XRISM/Xtend
3. 学会等名 16th IACHEC meeting
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------