

令和元年6月21日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18776

研究課題名(和文) 高速自転する中性子星からの定常重力波の検出に向けた、X線による連携観測の開拓

研究課題名(英文) Concept design of X-ray CubeSats for observing fast spinning neutron stars as coherent GW emitters

研究代表者

榎戸 輝揚 (Enoto, Teruaki)

京都大学・白眉センター・特定准教授

研究者番号：20748123

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,800,000円

研究成果の概要(和文)：ブラックホール同士や中性子星同士の合体による突発重力波イベントが観測されるようになり、重力波天文学の幕があげた。今後、高速自転する中性子星からの定常重力波の探査が着目され、その信号探査には、中性子星の自転暦を長期にわたって精度良く決めることが必要になる。本研究では2017年に国際宇宙ステーションに新たに搭載された大面積X線望遠鏡 NICER を用いて、X線でのみ明るいパルサー PSR J1412+7922 と PSR J1849-0001 の自転暦を決定することに成功した。さらに、NICER の検出原理を応用し、中性子星の自転暦測定に特化した超小型衛星のコンセプトデザインの設計を進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

国際宇宙ステーションで新たに稼働したX線望遠鏡 NICER での国際連携プロジェクトに参加することで、高速で回転するX線パルサーの自転情報を精度よく決めることができた。これは今後の重力波探査にも有力な情報となると期待できる。さらに、NICER のノウハウを活用したX線での超小型衛星の概念設計を進めることができた。その結果、現状の超小型衛星の姿勢系安定度や指向性に沿った、観測機器のデザインの改良を進めている。

研究成果の概要(英文)：We are aiming to support LIGO and other projects to search for coherent GW signals from fast spinning neutron stars using the high-throughput and long-term X-ray monitoring observations. Using the NICER X-ray observatory on board the ISS, we obtained a new timing ephemeris of X-ray pulsars, PSR J1412+7922 and PSR J1849-0001. This is expected to be useful for the future GW search from these isolated neutron stars. In addition, we are also performing a concept design of X-ray CubeSats dedicated for Sco X-1, one of the brightest X-ray source in the Sky hosting a fast-spining neutron star in a binary system, which is a candidate of the coherent GW signal.

研究分野：X線天文学

キーワード：重力波 超小型衛星 X線 中性子星 さそり座X-1 X線集光系 定常重力波 X線連星

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) ブラックホール連星合体による重力波イベント GW150914 の検出に引き続き、中性子星連星の合体 GW170817 も発見され、重力波天文学の幕が開けた。これらのコンパクト天体の合体による「突発的な」重力波イベントでは、電磁波対応天体探しが電波、可視光、X線などの多波長で世界的に活発に行われるようになっていた。

(2) このような突発現象と対照に、重力波干渉計 LIGO などでは定常的に発生しうる重力波信号の探索も活発に行われている。高速で自転する中性子星は、その質量分布が球対象からわずかにゆがんでいれば定常重力波を発すると考えられ、LIGO での有力な観測ターゲットになっている。ただし、自転の暦が十分にわかっていないのが問題であった。

(3) NASA を中心に開発が進んできた大面積 X線望遠鏡 Neutron star Interior Composition Explorer (NICER) は 2017 年に国際宇宙ステーションに設置され、科学観測を開始した。NICER は孤立中性子星の X線パルサーの観測や、質量降着を受ける明るい X線パルサーの観測などに威力を発揮すると考えられ、上記の問題に X線から貢献できる可能性がある。

(4) 近年の技術革新に伴って超小型衛星によるサイエンス創出に期待が持たれるようになってきた。NICER は軽量の X線集光系と焦点面においたシリコンドリフト検出器のセット 56 個を用いた構成になっており、超小型衛星にスピノフする可能性が考えられる。X線による超小型衛星を用いれば、パルサー等の自転周期を長期にモニターできると期待できる。

### 2. 研究の目的

(1) 全天で最も明るい X線源「さそり座 X-1 (Sco X-1)」は中性子星を含む X線連星で、地球に近く、莫大な質量降着を受けているため、定常重力波源の最有力の候補である。実際に、LIGO による探査が行われている。しかし、さそり座 X-1 では中性子星のコヒーレントな自転周期が見つかっていないために、重力波探査が難しいのが大きな問題であった。一方で、さそり座 X-1 では双子の準周期振動が現れることが知られており、その差分周波数が自転周期に対応すると指摘されている。本研究の最終的な目的は、さそり座 X-1 の準周期振動を検出し、長期にわたってモニタリングができるような超小型衛星を開発することである。

(2) 大面積 X線望遠鏡 NICER は 2017 年に打ち上げられ、1.5 keV 付近を中心にかつてない大有効面積と高い時間分解能、明るい天体でもパイルアップしない高いスループットを有している。この NICER での X線の観測性能は、さそり座 X-1 には理想的であり、将来の超小型衛星の観測にスピノフするのにうってつけである。そこで本研究では、NICER のキャリブレーションや初期観測に参画することで、その性能を最大限に発揮させ、サイエンス創出に向けたノウハウを蓄積する。

(3) NICER では軽量で小型の X線集光系と、その焦点面に設置したシリコンドリフト検出器を用いたモジュールを 56 個束ねた装置になっており、その 1 モジュールを転用した超小型衛星を作成することが考えられる。本研究では、さそり座 X-1 に代表されるような明るい X線源を観測できる超小型衛星 (CubeSat) の概念設計と検出部 (サイエンスペイロード) の基礎開発を進めることである。

(4) さらに本プロジェクトでは、NICER チームとして X線パルサーの観測プロジェクトに参加し、将来の定常重力波の探査に使うことができるような X線パルサーの自転周期の暦を精度よく求めるなどの計画に参加する。

### 3. 研究の方法

(1) 研究代表者である榎戸が、NICER の「マグネターと磁気圏」サイエンスチームのリーダーであるとともに検出器チームであることから、NICER を用いた X線観測のプロジェクトに参加し、キャリブレーションや各種の観測プロジェクトを推進する。

(2) 研究分担者である北口は、その豊富な検出器の開発・キャリブレーションの経験を活かし、将来の超小型衛星に搭載する検出器の読み出し回路として使用できる小型の電子回路ボードの開発を進める。

(3) NASA ゴダード宇宙飛行センターのメンバーと連携し、超小型衛星に搭載可能な焦点距離の短い X線集光系の概念設計を進める。

(4) NICER によるモニタリング観測として、X線でのみ明るいパルサー PSR J1412+7922 と PSR J1849-0001 のデータ解析に参加する。この二天体は電波やガンマ線では暗いため、X線でパルサーの自転周期の暦を決定することが必要である。

#### 4. 研究成果

(1) NICER のキャリブレーションや初期観測に参加し、磁場の強い中性子星の初期観測の成果を国内学会・国際学会で多数発表した。また、NICER によるX線連星の観測成果にも貢献した (Strohmayer et al. 2018)。

(2) NICER による PSR J1412+7922 と PSR J1849-0001 の長期モニタリング観測を行い、そのデータ解析に参加した。これによって、これまでよりよい精度でこの二天体の自転暦を決定することができ、論文として発表できた (Bogdanov et al. 2019)。日本メンバーはスペクトル解析を中心に貢献した。図も参照。

(3) NICER のX線集光系の短焦点距離化を議論し、その性能をシミュレーションできる枠組みを構築した。これを用いて、さそり座 X-1 やかに星雲などの代表的な天体で予想されるX線スペクトルをシミュレーションして、学会等で発表した。

(4) Zynq も用いた汎用の読み出し電子回路ボードの設計を特殊電子回路社と行い、プロトタイプの電子回路基板を開発・製造した。これから、その初期性能の検証を行う予定である。

(5) さそり座 X-1 など占有観測できる超小型衛星の概念設計を進め、特に日本国内の超小型衛星の製作経験のある工学系の研究者と複数回の議論を行った。その結果、姿勢系の検討をより詳細に行い、観測装置の最適化を行う道筋がたった。

(6) 超強磁場の天体マグネターの内部トロイダル磁場による形状の歪みに関するX線観測の論文に貢献した。これは、将来の重力波観測に関係する可能性がある。

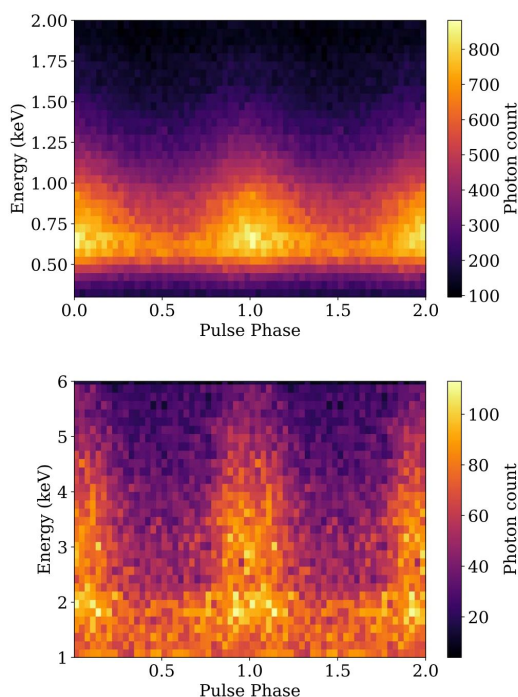


図: NICER で観測された PSR J1412+7922 (上)と PSR J1849-0001 (下)のパルス波形 (Bogdanov et al. 2019 より抜粋)。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

(1) Slavko Bogdanov, Wynn C. G. Ho, Teruaki Enoto, Sebastien Guillot, Alice K. Harding, Gaurava K. Jaisawal, Christian Malacaria, Sridhar S. Manthripragada, Zaven Arzoumanian, and Keith C. Gendreau, “Neutron Star Interior Composition Explorer X-Ray Timing of the Radio and  $\gamma$ -Ray Quiet Pulsars PSR J1412+7922 and PSR J1849-0001”, The Astrophysical Journal, vol. 877, 69, 8pp (2019) 査読有

<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ab1b2e>

(2) Kazuo Makishima, Hiroaki Murakami, Teruaki Enoto, Kazuhiro Nakazawa, “A NuSTAR study of the 55 ks hard X-ray pulse-phase modulation in the magnetar 4U 0142+61”, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 71, Issue 1, id.15 (2019) 査読有

<https://doi.org/10.1093/pasj/psy129>

(3) Tod E. Strohmayer, Zaven Arzoumanian, Slavko Bogdanov, Peter M. Bult, Deepto Chakrabarty, Teruaki Enoto, Keith C. Gendreau, Sebastien Guillot, Alice K. Harding, Wynn C. G. Ho, Jeroen Homan, Gaurava K. Jaisawal, Laurens Keek, Matthew Kerr, Simin Mahmoodifar, Craig B. Markwardt, Scott M. Ransom, Paul S. Ray, Ron Remillard, Michael T. Wolff, “NICER Discovers the Ultracompact Orbit of the Accreting Millisecond Pulsar IGR J17062-6143”, The Astrophysical Journal Letters, vol. 858, 2, L13 7 pp (2018) 査読有

<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/aabf44/meta>

〔学会発表〕(計 16 件)

(1) Teruaki Enoto, “NICER View of Magnetars and Young Pulsars” (invited), 16th HEAD meeting, Sun Valley, Idaho, USA, 2017/8/22

(2) Teruaki Enoto, “NICER Mission on the ISS and Initial Results of Magnetars”, 中性子星の観測と理論: 研究活性化ワークショップ 2017, 国立天文台, 2017/11/25

(3) 榎戸輝揚, “中性子星の観測的多様性をめぐる最新描像”, 第30回理論懇シンポジウム「星の物理の新地平」, 東京大学, 2017/12/27

(4) Teruaki Enoto, Zaven Arzoumanian, Keith C. Gendreau, Melania Nynka, Victoria Kaspi, Alice Harding, Tolga Guver, Natalia Lewandowska, Walid Majid, Wynn C. Ho, “NICER observations of highly magnetized neutron stars: Initial results” (poster), The 231st Meeting of the American Astronomical Society, Washington DC, USA, 2018/1/9

(5) 榎戸輝揚, “超強磁場中性子星マグネターに関する研究: ~ 観測上の多様な振る舞いの統一理解と将来観測実験の推進 ~”, 第10回宇宙科学奨励賞(宇宙理学分野)受賞講演, 東京霞が関ビル内、東海大学校友会館, 2018/3/8

(6) 北口貴雄, “高速自転する中性子星からの定常重力波の検出に向けた、X線による連携観測の開拓1”, 日本天文学会 春季年会, 千葉大学, 2019/3/15

(7) Teruaki Enoto, “Neutron star Interior Composition Explorer (NICER)”, ISAS/JAXA コロキウム, 宇宙科学研究所, 2018/5/22

(8) Teruaki Enoto, “The Neutron star Interior Composition Explorer (NICER) - First Results” (invited), MONDELLO WORKSHOP 2018 on Frontier Research in Astrophysics - III, Palermo, Italy, 2018/5/28

(9) 榎戸輝揚, “さそり座 X - 1 の専用モニタリング小型衛星による定常重力波への挑戦”, 新学術領域「重力波物理学・天文学創世記」B班ワークショップ, 東工大, 2018/6/7

(10) Teruaki Enoto, “X-ray CubeSat Project to Search for Continuous Gravitational Wave from Scorpius X-1”, The Second Annual Area Symposium, Gravitational Wave Physics and Astronomy: Genesis, Kyoto University, 2018/11/28

(11) Takao Kitaguchi, “Development of an X-ray Telescope onboard CubeSat for Long-term Monitoring of Scorpius X-1 Simultaneously with Gravitational Radiation”, The Second Annual Area Symposium, Gravitational Wave Physics and Astronomy: Genesis, Kyoto University, 2018/11/28

(12) 榎戸輝揚, “高時間分解能なX線観測と可視光・近赤外の連携”, 第9回光赤外線天文学大学間連携ワークショップ, 埼玉大学, 2018/12/25

(13) Teruaki Enoto, “Magnetars and Rotation-powered Pulsars with NICER” (invited), 233rd Meeting of the American Astronomical Society, Seattle, US, 2019/1/10

(14) 榎戸輝揚, “パルサーやマグネターのX線-電波同時観測, 茨城大学重点研究・研究会「突発・変動現象の電波フォローアップ」, 茨城大学, 2019/2/28

(15) 榎戸輝揚, “さそり座 X-1 の X 線モニタリングに特化した超小型衛星プロジェクト構想”, 日本天文学会 春季年会, 法政大学, 2019/3/17

(16) 榎戸輝揚, “重力波天文学や時間軸天文学に向けたスケーラブルな超小型X線衛星”, 超小型衛星利用シンポジウム, 東京大学, 2019/3/18

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年:  
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年:  
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

NASA NICER 公式ウェブページ <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/nicer/>

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名: 北口 貴雄

ローマ字氏名: KITAGUCHI, Takao

所属研究機関名: 理化学研究所

部局名: 仁科加速器科学研究センター

職名: 協力研究員

研究者番号(8桁): 30620679

### (2)研究協力者

研究協力者氏名: 南部 陽介

ローマ字氏名: NAMBU, Yohsuke

研究協力者氏名: 伊藤 洋介

ローマ字氏名： ITOH, Yousuke

研究協力者氏名： 高橋 弘充

ローマ字氏名： TAKAHASHI, Hiromitsu

研究協力者氏名： 小嶋 康史

ローマ字氏名： KOJIMA, Yasufumi

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。