

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：14601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K14289

研究課題名(和文) 銀河面拡散X線放射の観測による銀河系内宇宙線加速の初期機構の解明

研究課題名(英文) Study of initial acceleration mechanism of the Galactic cosmic-rays by the observation of the Galactic diffuse X-ray emission

研究代表者

信川 正順 (Nobukawa, Masayoshi)

奈良教育大学・理科教育講座・准教授

研究者番号：00612582

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、銀河系内に由来する宇宙線の低エネルギー帯域 (~MeV) に着目した。超新星残骸を対象として中性鉄輝線のX線観測により低エネルギー宇宙線の測定を行った。その結果、複数の超新星残骸から中性鉄輝線を検出した。IC443などでは放射分布が分子ガスと相関しており、低エネルギー宇宙線が起源であることを明らかにした。また、一部の超新星残骸に付随する過電離プラズマがその遷移過程で元素毎に電離温度が異なっていることを示し、電子冷却よりも電離促進の可能性が高いことを提案した。また、銀河系拡散X線放射について、銀河中心から北方向に吹き出す低温プラズマ成分の詳細測定を行い、その起源を議論した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

低エネルギー宇宙線の測定はこれまで困難であった。中性鉄輝線を用いた測定方法は、宇宙線の生成過程、すなわち宇宙線の起源を解明する上で重要な観測情報である。本研究では超新星残骸から低エネルギー宇宙線に由来する中性鉄輝線を初めて検出した。また、低エネルギー宇宙線が超新星残骸のプラズマに作用して、過電離状態にする可能性を示した。これらのことは超新星残骸、および宇宙線研究の新しい展開につながるだろう。

研究成果の概要(英文)：This research focuses on the low energy band (~MeV) of the Galactic cosmic rays (LECRs). We measure the LECRs from supernova remnants (SNRs) with X-ray observation of the neutral Fe line at 6.4 keV. We found that the spatial distribution of the Fe line emission correlates with molecular gases, and hence the origin is possibly of LECRs. Observation of an SNR, IC443 with recombining plasmas revealed that ionization temperatures of heavy elements (Ne -- Ni) are different. It indicates that additional ionization is more likely than electron cooling as the origin of the recombining plasma. Also, we measured the plasma outflow with ~8 million K from the Galactic center, and discussed the origin.

研究分野：X線天文学

キーワード：銀河面拡散X線放射 低エネルギー宇宙線 X線天文学 中性鉄輝線 超新星残骸 X線天文衛星すざく 銀河系中心

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

宇宙には広く宇宙線（高速で飛び交う粒子、多くが荷電粒子）が分布している。エネルギースペクトルは広い帯域にわたっており、最大で $E=10^{20}$ eV にも達する。中でも $E=10^{15}$ eV 以下は銀河系内で作られていると考えられている（銀河宇宙線）。地球に飛来する宇宙線の直接測定などから、宇宙線のエネルギー密度は 1 eV/cm^3 程度であることが知られている。銀河系の体積も考慮すると、その総エネルギーは 10^{55} erg にもなる。その生成源の有力候補は超新星残骸である。宇宙線は銀河の重力および銀河磁場では留めておけず拡散することを考えると、発生頻度 ~ 0.01 個/年の超新星爆発による解放エネルギーの 10%程度を宇宙線生成（加速）に使えば良い。実際に超新星残骸で宇宙線が観測されており、加速されている事実も踏まえて、超新星残骸が主要生成源であることを疑う研究者はほとんどいない。

一方で、宇宙線生成は熱的な粒子が徐々にエネルギーを獲得し、高エネルギーにいたると考えられる。しかし、太陽磁場により $\sim \text{GeV}$ 以下の宇宙線は太陽系内に入れず、直接測定は難しい。また、 π^0 崩壊によるガンマ線観測などでも 100 MeV 以下は測定できない。そのため、宇宙線が加速されつつある $10^3\text{--}10^7 \text{ eV}$ ($\sim \text{MeV}$) のエネルギー帯域の観測情報は不足していた。

研究代表者らは銀河面の拡散 X 線放射（以後、銀河系拡散 X 線放射）の観測により中性鉄原子が出す X 線輝線（中性鉄輝線）を精密測定した。特に、銀河中心の近傍（銀経 $2\text{--}4$ 度）では、その強度分布は $\sim 10\text{--}100 \text{ K}$ の星間分子ガスと良く相関していた (Nobukawa et al. 2015, ApJL, 807, id.L10)。このことから、低エネルギー宇宙線（陽子）が星間ガス中の鉄原子を電離して、中性鉄輝線が出ていることを突き止めた。エネルギー密度は 10 eV/cm^3 以上であること、また周囲に超新星残骸が存在しないことから、別の加速源が必要であることを提案した。さらに、中性鉄輝線は銀河面に広く分布しており、超新星残骸以外の加速源による低エネルギー宇宙線の生成は広く行われている可能性を指摘した (Yamauchi et al. 2016, PASJ, 68, id.59)。

先述の制約により、超新星残骸の観測研究では主に GeV 以上の高エネルギー宇宙線の測定が行われてきた。その結果に基づき、加速理論が構築されている。しかし、ここでも加速過程の低エネルギー宇宙線の情報は不足している問題があった。

2. 研究の目的

これまでの研究成果や状況を踏まえて、本研究では以下のことを目的とした。

- (1) 銀河系拡散 X 線放射に含まれる成分を分離し、中性鉄輝線の観測による銀河系内の低エネルギー宇宙線測定の精度を向上させる。とりわけ、温度 ~ 1000 万度の低温プラズマ成分については高温プラズマ成分（温度 ~ 7000 万度）に比べて研究が進んでおらず、本研究の優先対象とした。
- (2) 超新星残骸は依然として銀河宇宙線の有力な生成源である。中性鉄輝線を用いた研究方法により超新星残骸における低エネルギー宇宙線の測定を行う。
- (3) 超新星残骸には数千万度のプラズマが付随する。爆発による衝撃波で加熱されて生成されているが、通常の過程では起こり得ない過電離状態が複数の天体から観測された。その成因は議論中である。本研究では (2) の研究目的と関連して、過電離プラズマの生成起源を明らかにする。
- (4) 本研究は淡い広がった X 線放射天体を対象とする。さらなる観測研究の進展のために、将来の X 線天文衛星の開発を行う。

3. 研究の方法

研究目的 (1) \sim (3) では主に X 線天文衛星すざくの観測データアーカイブを用いる。

研究目的 (4) では 2022 年度打ち上げ予定の X 線天文衛星 XRISM (X-Ray Imaging Spectroscopy Mission) のチームメンバーとして開発を行う。

4. 研究成果

(1) 銀河系拡散 X 線放射の観測

銀河系拡散 X 線放射は、プラズマ成分と中性鉄輝線（とそれに付随する連続成分）から成る。さらにプラズマ成分は低温 (1000 万度) と高温 (7000 万度) の 2 成分に分かれていることがわかっている (e. g., Nobukawa et al. 2010, PASJ, 62, 423)。高温成分については温度や強度の分布などの性質がよく調べられているが、低温成分については未調査である。そこで、研究代表者らは銀河中心付近の低温成分について調査した。

図 1 は低温成分に特徴的な硫黄の高階電離輝線のエネルギー帯域の X 線画像である。中心付近の明るい部分に加えて、黄色い三角領域 (NE, NW) で示したところに放射が見られる。そのスペクトルを詳細に解析したところ、温度は 800 万度、ケイ素と硫黄の組成量は太陽組成と同程度であるこ

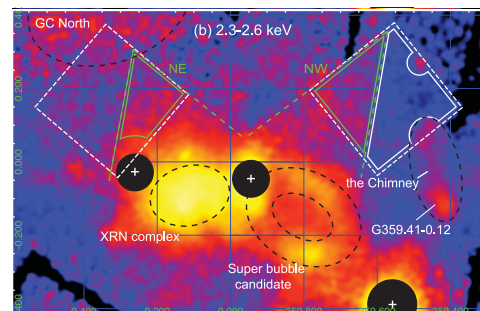


図 1. 銀河中心領域における低温プラズマからの X 線放射分布 (Yamauchi et al. 2019)。黄色で示した部分にプラズマの吹き出し構造が見える。

とがわかった。この程度の温度を持つ点状 X 線天体はコロナ星や RS CVn 型星が挙げられるが、それらは元素組成量が小さく、このプラズマの性質を説明できない。真に広がった成分であると考えられる。また、この成分の X 線スペクトルが受ける星間吸収量から銀河中心にあると考えると矛盾しないことがわかった。その成因の可能性として、多重超新星爆発や多数の大質量星の星風、銀河中心ブラックホールによる生成、を提案した。

[1] Yamauchi et al. 2018, PASJ, 70, id.82 (論文)

[2] Nobukawa et al. 2018, COSPAR (国際会議)

(2) 超新星残骸の低エネルギー宇宙線の調査

中性鉄輝線による低エネルギー宇宙線測定の方法を用いて、超新星残骸を調査した。中性鉄輝線は弱いため、スペクトルの 6 keV 帯域に放射成分が少ない天体を数個選択した。その結果、複数の天体から中性鉄輝線を検出することに成功した。図 2 はその中から 5 天体 (W28、Kes67、Kes69、Kes78、W44) のデータを足し合わせたものであり、中性鉄輝線 ($E=6.4$ keV) が顕著に出ていることがわかる。さらに、IC443 では中性鉄輝線の放射分布と分子ガス密度が高い領域が良く相関していることを発見した。これらの事実から、この中性鉄輝線はプラズマに由来するものではなく、低エネルギー宇宙線陽子が周囲の冷たい星間ガス中の鉄原子と相互作用して放射されていると結論した。また、低エネルギー宇宙線のエネルギー密度が $10\text{--}100$ eV/cm³ と見積もった。これは加速過程にある低エネルギー宇宙線の貴重な観測結果であり、超新星残骸における宇宙線生成に重要な情報になるだろう。

[3] Nobukawa et al. 2018, ApJ, 854, 87 (論文)

[4] Saji et al. 2018, PASJ, 70, 23 (論文)

[5] Nobukawa et al. 2019, ApJ, PASJ, 71, id.115 (論文)

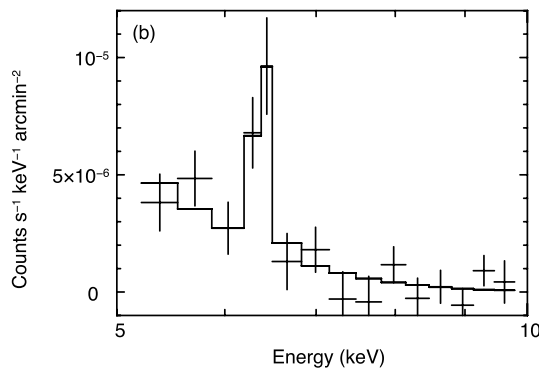


図 2. 超新星残骸の X 線スペクトルから強い中性鉄輝線放射を発見した。5 天体(W28, Kes67, Kes69, Kes78, W44 の足し合わせ) (Nobukawa et al. 2018, ApJ, 854, 87)。

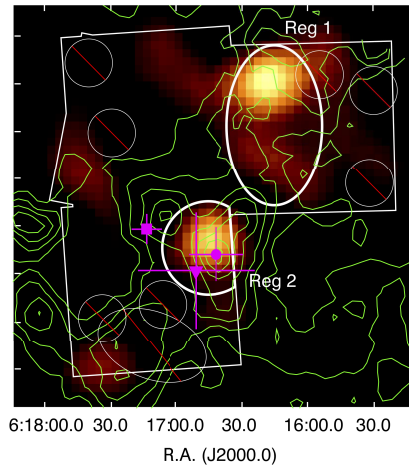


図 3. IC443 からの中性鉄輝線分布。2 つの明るいスポットが見られる。それらは分子ガスが濃い部分(コントア)とよく相関している (Nobukawa et al. 2019, PASJ, 71, id.115)。

(3) 超新星残骸の過電離プラズマの新しいシナリオ

超新星残骸では爆発の衝撃波により物質を加熱しプラズマを生成する。従来の描像では、粒子に熱エネルギーを与えた後、高速の電子が粒子のイオン化を促進させる、と考えられている。電離状態が平衡に達するまでには 10 万年以上かかる。プラズマが冷えて見えなくなるまでにかかる時間も 10 万年程度であるので、超新星残骸のプラズマはその生涯のほとんどを電離進行する状態にあると考えられる。事実、これまでの観測結果はそれをサポートするものであった。しかし、近年の観測から電離進行ではなく、逆過程の再結合が進行する状態のプラズマ (過電離プラズマ) を持つ超新星残骸が数天体見つかった (e.g., Yamaguchi et al. 2009, ApJ, 705, L6, Ozawa et al. 2009, ApJ, 706, L71)。プラズマが生成されてからある時点で、電子温度が低下した、あるいは電離状態が促進された (電離温度が上昇した)、と考えられているがその成因については議論が続いている。

研究代表者らは、超新星残骸でのプラズマ生成は電離進行状態であり、過電離に遷移が生じた時点の状態 (電離状態、温度) を詳細に測定することが重要である、と考えて観測データを解析した。特に、元素間で電離状態 (電離温度) が異なるという、新しい視点を導入した。その結果、IC443 の X 線スペクトルから、過電離遷移時点の電離温度を元素毎に決定し、原子番号が大きいほど電離温度が高くなることを発見した。また、それらの電離温度は典型的な電離進行状態の超新星残骸で観測される電子温度よりも高いことがわかった。電子温度が低下するのではなく、電離温度が上昇したと考える方が自然であることを示した。その 1 つのシナリオとして、超新星残骸が生成した宇宙線による電離促進説を提案した。

また、銀河中心の超新星残骸 Sgr A East から過電離状態のプラズマを発見した。その成因として、天体が内包する巨大ブラックホール Sgr A* による光電離の可能性を指摘した。

[6] Hirayama et al. 2019, PASJ, 71, id.37 (論文)

[7] Ono et al. 2019, PASJ, 71, id.25 (論文)

(4) X線天文衛星 XRISM の開発

日米欧で開発している X 線天文衛星 XRISM は 2022 年度打ち上げ予定である。研究代表者はそのチームメンバーとして、主に軟 X 線撮像装置 Xtend の地上開発試験、打ち上げ後の衛星データを地上で処理するシステムの開発、及び初期科学観測の計画立案を行っている。本研究期間では、Xtend のフライトモデルの機能性能試験を実施し、特段の問題がないことを確認した。また、軌道上でのデータ較正方法の検討と試験を実施した。打ち上げ後に衛星からダウンリンクされるテレメトリデータをデータ処理可能なフォーマットに変換する地上データ処理システムを設計・整備し、設計通りに動作することを確認した。銀河中心領域の観測シミュレーションを実施し、XRISM で期待される観測成果を見積もり、観測計画を立案した。以上により、XRISM 打ち上げとその後の観測実施に向けて準備を円滑に進めることができた。

[7] Uchida et al. 2020, NIMA, 978, id.164374 (論文)

[8] Kanemaru et al. 2020, NIMA, 984, id.164646 (論文)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Nobukawa, Kumiko K.; Nobukawa, Masayoshi; Yamauchi, Shigeo	4. 巻 72
2. 論文標題 Discovery of annular X-ray emission centered on MAXI J1421-613: Dust-scattering X-rays?	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 id.31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psaa007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Katsuda, Satoru et al.	4. 巻 891
2. 論文標題 Inverse First Ionization Potential Effects in Giant Solar Flares Found from Earth X-Ray Albedo with Suzaku/XIS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 id.126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab7207	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nobukawa, Kumiko K.; Hirayama, Arisa; Shimaguchi, Aika; Fujita, Yutaka; Nobukawa, Masayoshi; Yamauchi, Shigeo	4. 巻 71
2. 論文標題 Neutral iron line in the supernova remnant IC 443 and implications for MeV cosmic rays	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 id.115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz099	査読の有無 有
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 -
1. 著者名 Ono, Akiko; Uchiyama, Hideki; Yamauchi, Shigeo; Nobukawa, Masayoshi; Nobukawa, Kumiko K.; Koyama, Katsuji	4. 巻 71
2. 論文標題 X-ray spectra of Sagittarius A East and diffuse X-ray background near the Galactic center	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 id.52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz025	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Arisa Hirayama; Shigeo Yamauchi; Kumiko K Nobukawa; Masayoshi Nobukawa; Katsuji Koyama	4. 巻 71
2. 論文標題 New scenario of plasma evolution in IC443	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 psy153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy153	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Yamauchi, Shigeo; Shimizu, Miku; Nobukawa, Masayoshi; Nobukawa, Kumiko K.; Uchiyama, Hideki; Koyama, Katsuji	4. 巻 70
2. 論文標題 Origin of the low-temperature plasma in the Galactic center X-ray emission	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 id. 82
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy077	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Saji, Shigetaka; Matsumoto, Hironori; Nobukawa, Masayoshi; Nobukawa, Kumiko K.; Uchiyama, Hideki; Yamauchi, Shigeo; Koyama, Katsuji	4. 巻 Advance access
2. 論文標題 Discovery of 6.4 keV line and soft X-ray emissions from G323.7-1.0 with Suzaku	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1, 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx158	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nobukawa, Kumiko K.; Nobukawa, Masayoshi; Koyama, Katsuji; Yamauchi, Shigeo; Uchiyama, Hideki; Okon, Hiromichi; Tanaka, Takaaki; Uchida, Hiroyuki; Tsuru, Takeshi G.	4. 巻 854
2. 論文標題 Evidence for a Neutral Iron Line Generated by MeV Protons from Supernova Remnants Interacting with Molecular Clouds	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 1, 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaa8dc	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Bamba, Aya; Ohira, Yutaka; Yamazaki, Ryo; Sawada, Makoto; Terada, Yukikatsu; Koyama, Katsuji; Miller, Eric D.; Yamaguchi, Hiroya; Katsuda, Satoru; Nobukawa, Masayoshi; Nobukawa, Kumiko K.	4. 巻 854
2. 論文標題 The Transition from Young to Middle-aged Supernova Remnants: Thermal and Nonthermal Aspects of SNR N132D	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 1, 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaa5a0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Matsumura, Hideaki; Uchida, Hiroyuki; Tanaka, Takaaki; Tsuru, Takeshi Go; Nobukawa, Masayoshi; Nobukawa, Kumiko Kawabata; Itou, Makoto	4. 巻 69
2. 論文標題 Localized recombining plasma in G166.0+4.3: A supernova remnant with an unusual morphology	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1, 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Uchida, H., et al.	4. 巻 978
2. 論文標題 Optical blocking performance of CCDs developed for the X-ray Astronomy Satellite XRISM	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A	6. 最初と最後の頁 id.164374
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.164374	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kanemaru, Y. et al.	4. 巻 984
2. 論文標題 Experimental studies on the charge transfer inefficiency of CCD developed for the soft X-ray imaging telescope Xtend aboard the XRISM satellite	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A	6. 最初と最後の頁 id.164646
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.164646	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yamauchi, Shigeo; Nobukawa, Masayoshi; Koyama, Katsuji	4. 巻 73
2. 論文標題 A systematic comparison of ionization temperatures between ionizing and recombining plasmas in supernova remnants	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 tmp41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab033	査読の有無 有
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7件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Masayoshi Nobukawa
2. 発表標題 The Galactic Center Diffuse X-rays and Isolated Black Holes with FORCE
3. 学会等名 The Galactic Center Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masayoshi Nobukawa
2. 発表標題 Local enhancement of Ni abundance in the Galactic Center X-ray emission
3. 学会等名 The Galactic Center Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 信川正順
2. 発表標題 銀河中心拡散X線放射 の硬X線成分
3. 学会等名 日本天文学会2020年春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masayoshi Nobukawa
2. 発表標題 Origins of the Galactic Center Diffuse X-rays
3. 学会等名 COSPAR 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 信川正順
2. 発表標題 FORCE による銀河系内孤立ブラックホールの探査
3. 学会等名 第1回 missing blackhole 研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masayoshi Nobukawa
2. 発表標題 Origin of the Galactic Diffuse X-ray Emission: Fe Line Diagnostics with Suzaku
3. 学会等名 XII Multifrequency Behaviour of High Energy Cosmic Sources Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masayoshi Nobukawa
2. 発表標題 Suzaku View of the Galactic Center Diffuse X-ray Emission
3. 学会等名 COSPAR2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021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
---------	---------