

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740133

研究課題名(和文) X線星による銀河中心拡散X線放射へのエネルギー寄与の解明

研究課題名(英文) Energetic contribution of X-ray binaries to diffuse X-ray emission in the Galactic center

研究代表者

森 英之(MORI, Hideyuki)

名古屋大学・現象解析研究センター・助教

研究者番号：20432354

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：銀河系バルジに属する低質量X線連星系の光度関数を作成した。光度関数の精度向上のために、同領域の未同定X線天体に対して種族同定を目的とした観測提案を行い、本研究期間内にSuzaku及びChandra衛星で新たに13天体を撮像分光観測した。その結果、銀河系バルジ方向の比較的明るいX線源のほぼ全てを2keV以上の硬X線で網羅したサンプルを構築することに成功した。種族同定解析を進めた結果、新たに低質量X線連星系を1天体、銀河団を2天体、星を3天体同定した。この成果から、我が銀河系バルジの低質量X線連星系の個数は、他の銀河に比べて少ないという示唆を得た。

研究成果の概要(英文)：We constructed the luminosity function of the Low-Mass X-ray Binaries (LMXBs) in the Galactic bulge, which is a fundamental observable to elucidate the formation history of the Galaxy, using a flux-limited sample extracted from the ROSAT All-Sky Survey. In order to improve the completeness of the luminosity function, Spectroscopic studies above 2 keV were performed for unidentified X-ray sources towards the Galactic bulge; 13 follow-up X-ray observations were carried out with Suzaku and Chandra. We have almost completed the observations of these unidentified bulge sources, and then obtained good-quality hard (> 2keV) X-ray spectra. So far we newly identified 1 LMXB, 2 clusters of galaxies, and 3 X-ray active stars. These result suggests that the number of the LMXBs in the Galactic bulge is smaller than those in the bulges of other disk galaxies and elliptical galaxies.

研究分野：X線天文学

キーワード：銀河系バルジ 低質量X線連星系 銀河団 X線星 未同定X線天体 X線光度関数

1. 研究開始当初の背景

銀河中心は、約三百万倍の太陽質量を持つ巨大ブラックホールの存在が示唆されていると同時に、多様な高エネルギー現象が混在する、系内で最も特異な領域でもある。とりわけ、高階電離した鉄イオンと中性鉄原子からの K 輝線放射が同時に、かつ角度にして数度の範囲にわたって観測される銀河中心拡散 X 線放射(Koyama et al. 1989)は、宇宙物理学の未解決問題の 1 つである。拡散 X 線放射の起源としては、(1)未だ検出されていない多数の白色矮星や星からの X 線放射の重ね合わせ (Muno et al. 2003, Revinvstev et al. 2007) と、(2) 真に広がった約七千万度の超高温プラズマからの X 線放射 (Koyama et al. 2007) という 2 説が有力とされている。

0.5 秒角という極めて優れた角度分解能を持つ Chandra 衛星は、銀河中心領域の深観測を通して、エネルギーフラックスで  $10^{-16}$  erg s<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup> に達する暗い X 線源を多数検出した。しかしこれら X 線源からの放射の総和は、拡散 X 線放射を完全に説明することはできず、より暗い未検出の点源以外の寄与を可能性として残している。従って、X 線連星系に代表されるような X 線(点)源からの寄与を精密に求めることが、拡散 X 線放射の起源に決定的な観測的制限を付ける。このためには、銀河中心方向の X 線源の正確な光度関数が要求される。しかし、光度決定には天体までの距離情報が必要なため、X 線光度にして  $10^{36}$  erg s<sup>-1</sup> 以上のよく知られた明るい X 線連星系に関するもの(Grimm et al. 2002)、あるいは太陽系近傍の白色矮星や星を集積して構築したもの(Sazonov et al. 2006)しか存在しない。特に両者を繋ぐ光度範囲( $10^{33} \sim 10^{36}$  erg s<sup>-1</sup>)については、該当する X 線天体の観測数が絶対的に不足している。

2. 研究の目的

我が銀河系の中心核は、数百パーセクに渡る拡散 X 線放射で特徴付けられる、特異な活動性を示す環境に取り巻かれている。本研究では、莫大なエネルギー源を要求するこの拡散 X 線放射の起源に迫る。起源の候補は、降着ガスの重力エネルギーを解放する X 線連星か、数百万度以上の高温プラズマを生み出す超新星残骸の重ね合わせである。そこで、銀河中心近傍の X 線連星からの X 線放射エネルギーの総和を、その光度関数に基づいて観測的に明らかにする。ここから、新たな星生成をトリガーする、超新星爆発の銀河中心における発生率を導く。以上を踏まえて、銀河中心核が周囲の星と共に進化して現在に至る様子を、観測的に捉えることを目指す。

3. 研究の方法

銀河系中心方向の比較的暗い未同定 X 線源

について X 線分光観測を行い、2-10keV のスペクトルを取得する。得られた X 線スペクトルを元に、各 X 線源の種族を決定する。X 線源の種族、視線方向の吸収量(有意なスペクトルが得られない点源については、色情報から推定できる吸収量を用いる)、さらに光学対応天体の情報を組み合わせて天体までの距離を推定し、信頼度の高い銀河中心近傍の X 線連星系のサンプルを構成する。これを用いて、光度限界を  $10^{32}$  erg s<sup>-1</sup> まで下げた、銀河中心近傍の X 線光度関数を初めて観測的に決定する。光度関数の積分によってエネルギー放射の総和を求め、拡散 X 線放射への点源の寄与を算出する。点源の寄与を差し引いた残りは、超新星残骸や星風を起源とする高温プラズマからの X 線放射であると考えられる。そこで、拡散 X 線放射を説明するために必要となる高温プラズマの個数密度を見積もる。

4. 研究成果

Suzaku, Chandra 衛星の観測公募で獲得した未同定 X 線天体の追観測リスト

銀河系バルジ方向の未同定 X 線天体の分光追観測を行うため、撮像集光系を有し 2keV 以上に検出感度を持つ X 線天文衛星に観測提案を行った。その結果、Suzaku で 8 天体(第 7,9 期)、Chandra で 5 天体(第 15 期)が採択され、合計で 123,000 秒の観測時間を確保した。本研究期間を含め、これまでのべ 32 天体の未同定 X 線源について、X 線撮像分光観測を行ってきた。X 線光度にして  $10^{33-34}$  erg s<sup>-1</sup> 以上の明るい点源をほぼ完全に網羅したことになる。このサンプルは、今後銀河系の X 線星の種族研究をする上で、貴重な資産となる。現時点での解析結果に基づく種族分類を下記表にまとめた。

Suzaku (11 天体, 8 天体を第 7,9 期に観測)		
低質量 X 線連星系	1	Mori et al. (2012)
銀河団	2	Mori et al. (2013), (in prep.)
星	2	Mori et al. (2012), (submitted)
未同定	6	
XMM-Newton (5 天体)		
低質量 X 線連星系	3	int ' Zand et al. (2005), Younes et al. (2009), int ' Zand et al. (2003), Saji et al. (in prep.)
星	1	Mori et al. (submitted)
未同定	1	
Chandra (16 天体, 5 天体を第 15 期に観測)		
銀河団	2	Mori et al. (2013), (in prep.)
活動銀河核	1	現在解析中。
低質量 X 線連星系	7(?)	現在解析中。
星	2	現在解析中。
未同定	5	2 天体は X 線放射なし

### 低質量 X 線連星系

未同定 X 線天体 1RXS J174459.5-172640 の観測は Suzaku により 2008 年 3 月に行われた。X 線 CCD カメラ及び硬 X 線検出器ともに良質なスペクトルが得られており、20keV まで有意な信号を得る事ができた。X 線スペクトルの形は、17keV に指数関数的な折れ曲がりを示す冪形関数で表される。降着円盤からの軟 X 線放射と、その X 線放射がコロナ状の高温電子プラズマによって逆コンプトン散乱を受けて、硬 X 線帯域にまで叩き上げられる、というより物理的なモデルを提唱し、X 線スペクトルを再現することに成功した(図 1)。この時降着円盤の温度は 0.1keV と低く、X 線光子数が逆コンプトン散乱前後で保存されることを考慮すると、降着円盤の内縁半径は数百 km の位置にあると推測された。

この天体は、スペクトルの折れ曲がり数が数十 keV と低いことから、主星が中性子星である可能性が高い。降着円盤の内縁半径は理論上中性子星半径の 10km になるが、降着円盤はそこまで形成されておらず、途中で切れていることが分かる。本天体が、仮に銀河系バルジに属しているとするれば、 $2 \times 10^{35}$  erg s<sup>-1</sup> の X 線光度になり、中性子星 X 線連星系のエディントン限界光度の 0.1% の明るさしかないことになる。この光度範囲の連星系の X 線放射過程は、観測例が少ないこともあって、よく分かっていない。従って、本研究で新たな観測サンプルを提供したことになる。可視光対応天体候補は A あるいは F 型巨星であり、連星系形成過程を探る上での貴重なサンプルともなる。

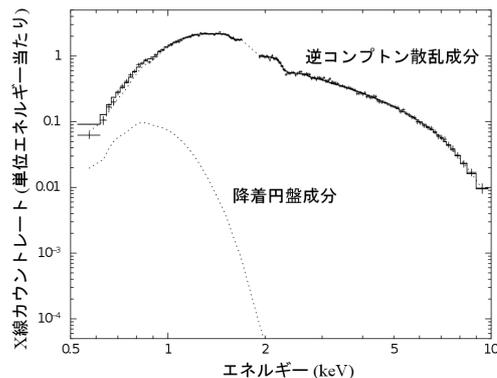


図 1: 1RXS J174459.5-172640 の X 線スペクトル

### 銀河団

未同定 X 線天体 1RXS J175911.0-344921 は Suzaku および Chandra 衛星で X 線撮像分光観測が行われた。Chandra の観測は、天体位置の精密決定が目的であり、X 線 CCD カメラのパイルアップを防ぐために観測視野を制限していたのに対し、Suzaku ではスペクトル取得のために 18 分角四方の視野を確保した通常観測を実施した。図 2 に示した X 線イメージは、明らかに X 線望遠鏡の Point Spread Function より広がっていた。輝度分布を正確に決定するために、Suzaku 搭載 X 線望遠鏡の

機上較正で ray-tracing シミュレータを駆使した経験を活かして、新たに X 線天体の像の広がりを求める手法を確立した。具体的には、(1)自己重力系の星間ガスの密度分布モデル(モデル)を仮定して、天球上の X 線輝度分布を計算し、(2)その輝度分布を入力として ray-tracing シミュレーションを行い、(3)得られた出力と実測の輝度分布とを比較してモデルパラメータである (0.78) とコア半径(1.6 分角=230kpc)を求めた。

一方 X 線スペクトルには 6keV 付近に輝線があることが分かった。光学的に薄い熱的電離平衡プラズマからの X 線放射を仮定すると、プラズマの温度は 5.3keV と求められた。また輝線が高階電離した鉄イオンによるものと仮定すると、重力赤方偏移から天体までの距離が  $z = 0.13$  となった。イメージ及びスペクトルの解析結果からは、X 線天体は銀河系の背後に位置する銀河団であると推定された(Suzaku J1759-3450 と命名)。

同様に、未同定天体 1RXS J170047.8-314442 も銀河団候補天体である可能性が高い。この天体は 2013 年 2 月に観測され、X 線 CCD カメラで非軸対称な広がった X 線放射が観測されている。この天体は北西に明るい点状放射が見えていたため、この箇所をくり抜いて、Suzaku J1759-3450 と同様の手法で輝度分布を求めた。X 線スペクトルは、5.9keV に輝線を示しており、光学的に薄い熱的プラズマからの X 線放射を仮定すると、Suzaku J1759-3450 よりやや温度の高い 6.2keV であるという結果が得られた。この成果は現在論文にまとめている途中である。

銀河面は、星間ガスによる強い吸収を受けるために、銀河系背後の天体の様子を可視光観測で探るのは簡単ではない。銀河面に沿ったこの領域は Zone of Avoidance と呼ばれている。従って透過力の高い X 線で銀河団の高温ガスを直接観測する方法は、強力な種族同定法となる。Suzaku J1759-3450 の発見に伴い、可視光で追観測をして銀河団であることを確かめた論文として Coldwell et al. (2014) がある。

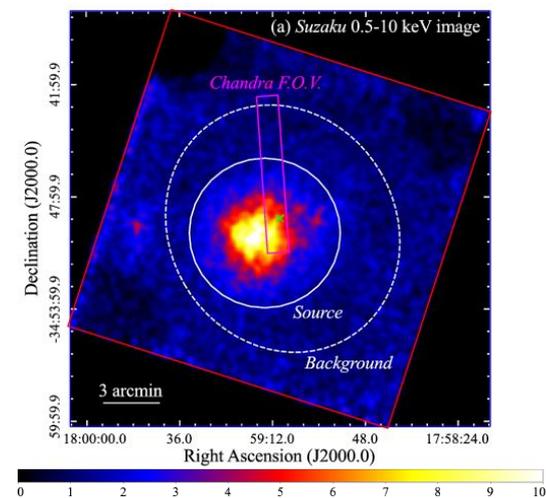


図 2: Suzaku J1759-3450 の X 線イメージ

### X線で活動的な星

Suzaku 及び XMM-Newton 衛星によって、未同定天体 1RXS J165256.3-264503(以後 XS1), 1RXS J180556.1 - 343818(XS2), 1RXS J173905.2-392615(XS3)の観測を行い、2keV以上のX線スペクトルを取得した。

XS1のX線スペクトルは、2温度の光学的に薄い電離平衡プラズマからの放射で再現できた。スペクトルに見える輝線からプラズマの元素組成が推定できるが、その割合は太陽組成の0.2-0.6倍であった。また可視光対応天体 HD 152178 は、RS CVn 型星であり、視差から 432pc と距離が求まっている。ここからX線光度は  $6 \times 10^{31} \text{ erg s}^{-1}$  と見積られ、RS CVn 星としては典型的なものであった。

XS2はXMM-Newton衛星で観測された天体である。このX線スペクトルも同様に2温度(0.5, 1.8keV)の光学的に薄い熱的プラズマからの放射で説明することができた(図3)。可視光対応天体候補 HD 321269 は G 型巨星であった。従って高温( $kT = 1.8\text{keV}$ )プラズマは、星表面でのフレア活動で生成されたものと推測される。プラズマ中のネオンや酸素の含有量は太陽組成と同程度である一方、鉄の含有量は低い(0.2倍程度)ことが分かった。星の回転速度が  $33\text{km s}^{-1}$  と速く、フレア活動や元素含有パターンの形成に影響を与えていると考えられる。

XS3は、SuzakuのX線CCDカメラですら、得られた光子統計が200個程度と少なかったが、輝度分布は点源からのX線放射であることを示していた。銀河面に広がるリッジ放射の寄与を考慮してX線スペクトルを求めた所、光学的に薄いプラズマからのX線放射で再現できることが分かった。またX線フラックス  $9 \times 10^{-14} \text{ ergs}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  は、ROSATによる発見時の約1/10であった。この天体の可視光対応天体候補 HD 323934 は、通常X線で極めて暗いAまたはF型星と推定されている。ROSATによるサーベイ観測時にはA型星自身というより伴星からのフレアを検出した可能性がある。XS2とXS3については、結果を論文として投稿中しており、現在レフェリーの査読を受けて改訂中である。

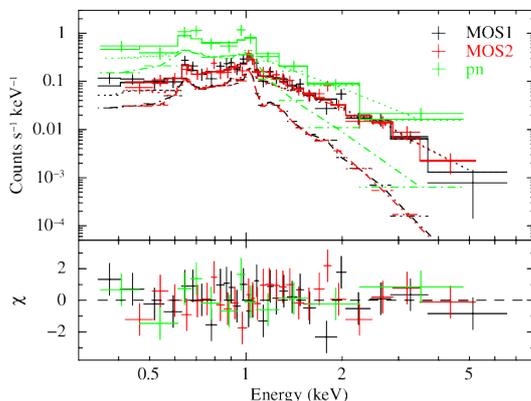


図3: 1RXS J180556.1-343818のX線スペクトル

光学同定観測

名古屋大学の光赤外グループの協力を得て、南アフリカ赤外線天体観測所(IRSF)を用いた測光観測をChandraの第11期公募で観測した未同定X線天体全てについて行った。その結果の1例を図4に示す(緑円内が対応天体候補)。Chandraの位置決定精度は0.5秒角以下と極めて高く、光学対応天体の探査と種族の調査を現在進めている。

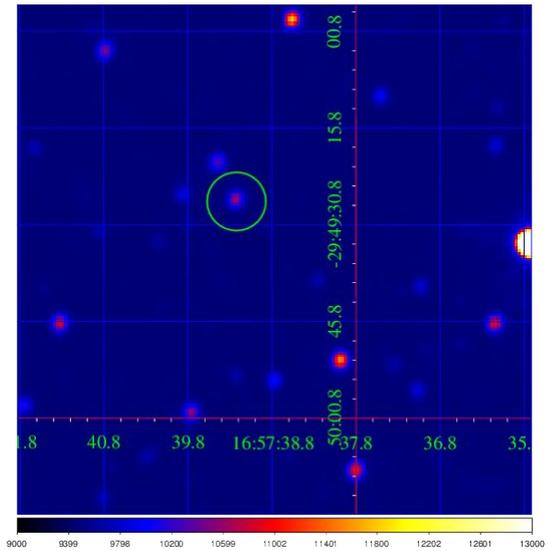


図4: IRSFによる観測結果(K-band イメージ)。

### 光度関数構築に向けて

これまでに計32天体の未同定X線源について撮像分光追観測を行い、2keV以上の硬X線帯域での姿を明らかにしてきた。銀河系バルジに属する天体であれば、ROSATによる全天サーベイの検出限界はX線光度にして  $10^{33-34} \text{ erg s}^{-1}$  に相当するため、低質量X線連星系であることが期待される。これまでに発表した成果としては、低質量X線連星候補が1天体、銀河団が2天体、星が3天体であった。X線で活動的な星は、銀河系バルジではなく、太陽系に比較的近い銀河面の天体と考えられる。

ROSATのエネルギー帯域は吸収に感度のある2keV以下であるが、吸収量推定には仮定するスペクトルモデルに依存すると考えられる。一方で表1に示した通り、Chandraの観測から光子指数1.4-2の冪型スペクトルを示す天体が7個見つかった。これらは低質量X線連星系の候補であり、今後解析を急ぐ予定である。Chandraの観測は露光時間が短く、X線スペクトルからの種族決定の議論を行うには、光子統計が不足している。そこで統計のよいスペクトルを得るために、追観測の提案も計画している。

これまでの結果から、銀河系バルジの低質量X線連星系の光度関数は、Mori et al. (2005)に示したもののより完全性、信頼性が向上した。特に  $10^{32} \text{ ergs}^{-1}$  に近い低光度側では、光度関数がフラットになると予想される。銀河系バルジにおけるX線連星系からのX線光度の寄与は、比較的明るい連星系に支配さ

れており、たかだか  $10^{38}$  ergs<sup>-1</sup> であるという示唆を得た。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

##### [雑誌論文](計 17 件)

Hisamitsu Awaki, Hideyo Kunieda, Manabu Ishida, et al. (計 43 人中 23 番目), Hard x-ray telescopes to be onboard ASTRO-H, Applied Optics, 査読有り, 2014, Volume 53, Issue 32, pp.7664-7676

Hideyuki Mori, Yuuji Kuroda, Takuya Miyazawa, et al. (計 21 人中 1 番目), Recent progress in the ground calibration of the ASTRO-H Hard X-ray telescope (HXT-2), Proceedings of the SPIE, 査読無し, 2014, Volume 9144, id. 914457 10 pp.

DOI: 10.1117/12.2055656

Hideyuki Mori, Yoshitomo Maeda, Akihiro Furuzawa, Yoshito Haba, Yoshihiro Ueda, A New Cluster of Galaxies Towards the Galactic Bulge, Suzaku J1759-3450, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有り, 2013, Vol. 65, No.5, Article No.102 7 pp.

DOI: 10.1093/pasj/65.5.102

Yoshitomo Maeda, Hideyuki Mori, Tadayasu Dotani, A new eclipsing low-mass X-ray binary with a giant companion, Advances in Space Research, 査読有り, 2013, Volume 51, Issue 7, pp. 1278-1281

DOI: 10.1016/j.asr.2012.11.005

Hideyuki Mori, Yoshitomo Maeda, Yoshihiro Ueda, Tadayasu Dotani, Manabu Ishida, Suzaku Observations of Unidentified X-Ray Sources toward the Galactic Bulge, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有り, 2012, Vol. 64, No.5, Article No.112, 1 pp.

DOI: 10.1093/pasj/64.5.112

Hideyuki Mori, Yoshitomo Maeda, Manabu Ishida et al. (計 16 人中 1 番目), The pre-collimator for the ASTRO-H x-ray telescopes: shielding from stray lights, Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray. Proceedings of the SPIE, 査読無し, 2012, Volume 8443, article id. 84435B, 8 pp.

DOI: 10.1117/12.925902

##### [学会発表](計 9 件)

森英之他、「すざく」による Zone of

Avoidance 領域銀河団の X 線撮像分光観測、2014 年天文学会秋季年会、2014 年 9 月 11 日、山形大学(山形県・山形市)

Hideyuki Mori 他、Recent Progress in the Ground Calibration of the ASTRO-H Hard X-ray Telescope (HXT-2), SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation: Space and Ground-based Telescopes、2014 年 6 月 22-27 日、モントリオール(カナダ)

Hideyuki Mori, The impact of SUZAKU in Frontier Astrophysics、Frontier Research in Astrophysics, 2014 年 5 月 26-31 日、モンテッロ(イタリア)

森英之他、ASTRO-H 搭載 X 線望遠鏡の開発の現状、日本物理学会第 69 回年次大会、2014 年 3 月 29 日、東海大学湘南キャンパス(神奈川県・平塚市)

Hideyuki Mori 他、Suzaku spectroscopic studies of unidentified ROSAT sources towards the Galactic bulge, Suzaku-MAXI 2014, Expanding the Frontiers of the X-ray Universe、2014 年 2 月 19-22 日、愛媛大学(愛媛県松山市)

森英之他、ASTRO-H 搭載 X 線望遠鏡用プリコリメータのフライト品製作、2013 年天文学会秋季年会、2013 年 9 月 11 日、東北大学(宮城県・仙台市)

森英之他、「すざく」衛星による新しい銀河団候補 Suzaku J1749-3450 の発見、2013 年天文学会春季年会、2013 年 3 月 20 日、埼玉大学(埼玉県、さいたま市)

Hideyuki Mori 他、XMM-Newton observations for hard X-ray emission from the ROSAT sources towards the Galactic Bulge、39<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly 2012、2012 年 7 月 14-22 日、マイソール(インド)

Hideyuki Mori 他、The pre-collimator for the ASTRO-H x-ray telescopes: shielding from stray lights、SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation 2012、2012 年 7 月 1-6 日、アムステルダム(オランダ)

##### [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:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

KMI スポットライト

第 2 回：「すざく」が捉えた低質量 X 線連星  
系の新たな素顔 - 中間光度 LMXBs? (2013  
年 8 月)

<http://www.kmi.nagoya-u.ac.jp/jpn/spotlight/spotlight02.php>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

森 英之 (MORI, Hideyuki)

名古屋大学・素粒子宇宙起源研究機構・現  
象解析研究センター・特任助教

研究者番号：20432354