

平成 27 年 4 月 18 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740123

研究課題名(和文) X線・ガンマ線観測による銀河中心高エネルギー活動の解明

研究課題名(英文) Observational Study of High Energy Phenomena in the Galactic Center Region

研究代表者

信川 正順 (Nobukawa, Masayoshi)

京都大学・白眉センター・助教

研究者番号：00612582

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本課題は、天の川銀河系中心部の広がったX線放射に着目し、その領域で起こる高エネルギー現象の有機的つながりを解き明かすことを目的とした。本研究では、1億度近くにもなる高温プラズマの存在を証明し、分子ガス雲からのX線放射観測により過去の銀河中心ブラックホールの活動を解き明かした。これにより、銀河の中心領域で起こる高エネルギー現象の全貌を調査した。本研究の大きな柱である「ASTRO-H」衛星は打ち上げが本研究開始であった2012年当時の予定(2014年度)よりも遅れてしまい、上記高エネルギー現象の関連性の解明までは至らなかった。2015年度の打ち上げの後には、本研究の完成を行う予定である。

研究成果の概要(英文)：This research aims to study the overall structure of the high-energy phenomena in the central region of our galaxy. During this research, we found high energy phenomenon in the region: a huge plasma of 100 million K extending over the Galactic center region, and X-ray reflection nebulae, i.e. X-ray emitting molecular clouds, which are evidence for past high activity of the super massive black hole, Sagittarius A*. Unfortunately, launch of the next X-ray observatory, ASTRO-H, was postponed, and hence this research did not reach the goal. After ASTRO-H will be launched in FY2015, we will reveal the relationship among those high-energy phenomena in the Galactic center region.

研究分野：高エネルギー宇宙物理学

キーワード：銀河系中心部 X線天文学 ブラックホール ASTRO-H すざく衛星

1. 研究開始当初の背景

銀河中心には、太陽の 400 万倍の質量をもつ巨大ブラックホール「いて座 A*」が存在する。全宇宙の中で我々に最も近い(約 3 万光年)ので、巨大ブラックホールの研究に特別重要な対象である。さらにその周辺は星や分子ガスが密集する高密度空間で覆われ、星生成と消滅(超新星爆発)が激しく繰り返されている。超新星は重元素合成の現場であり、さらに基礎物理の実験に不可欠な最高エネルギー宇宙線粒子の生成工場でもある。したがって、銀河中心は現代宇宙物理学の重要課題解明のための最高・最適の「実験室」である。にもかかわらず、星間物質による減光が大きいため、これまで銀河中心の観測研究はなかなか進まなかった。しかし、高エネルギー電磁波である X 線はこの「実験室」からの主要情報を担うのみならず、高い透過力によって星間物質に邪魔されず直接我々に情報を届けることができる。X 線観測は銀河中心研究に新しい窓を開いてきたのである。

本研究代表者はこれまで、X 線天文衛星「すざく」を用いた銀河中心の観測研究を行ってきた。その内容は「すざく」の持つ世界最高のエネルギー分解能と感度によって、銀河中心の物理状態を高い信頼性で決定してきたことである。その結果、多数の超新星残骸や高温プラズマを発見し、銀河中心に 10^{54} erg(超新星爆発 1000 個分)もの膨大なエネルギーが内在していることを明らかにした(参考文献 1 など)。さらに、X 線反射星雲を発見し、いて座 A* が数百年前に現在の光度の百万倍以上の大フレアを起こしたことを突き止めた(参考文献 2 など)。これらの研究成果は銀河中心の国際会議などで最重要課題として取り上げられ、多くの著名な研究者と議論してきた。

銀河中心の個々の物理現象が、銀河中心の極限環境下においてどのように関わりあっているのかは未解決の問題である。それらを有機的に紡ぐ糸は星間空間を満たしている宇宙線であると考え。銀河中心には多数の非熱的電波放射や 10 keV (以後、粒子や光子のエネルギー単位として eV を用いる。1 eV = 1.6×10^{-19} J、1 TeV = 10^3 GeV = 10^6 MeV = 10^9 keV = 10^{12} eV) 以上の硬 X 線やガンマ線放射が存在することから、太陽系近傍に比べて宇宙線密度が 100 倍以上高いことが指摘されている(参考文献 3)。また超新星爆発は約 10000 km/s の超高速衝撃波をつくり、これにより高エネルギーの宇宙線が効率的に生成される(フェルミ加速: 参考文献 4)。したがって、これら多くの超新星残骸が宇宙線の起源である可能性は高い。一方、過去に大爆発した巨大ブラックホールいて座 A* が、宇宙線を大量に生成した可能性も考えられる。しかし、これらの仮説を実証する定量的な観測結果はなかった。

既に述べた通り、研究代表者はこれまでに、中性鉄原子からの輝線(以後、鉄輝線)を放

射する X 線反射星雲を多数発見し、その照射源として過去にいて座 A* が大きな X 線フレアを起こしたことを明らかにした。これらの研究を通して、分子雲以外にも銀河中心全域に広がった鉄輝線放射があることを見出した(以後、「広がった鉄輝線放射」)。その輝度は X 線反射星雲の 10 分の 1 程度であるが、広がりが大きいため総光度はほぼ同じであった。さらに、X 線スペクトルを詳細に調べると、両者の等価幅(輝線と連続 X 線の強度比)は有意に異なっており、同一起源での説明は難しい。すなわち、「広がった鉄輝線放射」の起源はいて座 A* からの X 線照射ではない可能性が示唆された。銀河中心は宇宙線密度が高いため、宇宙線が起源である可能性は高い。

(参考文献)

- [1] Koyama et al. 1996, PASJ, 48, 249
- [2] Nobukawa et al. 2011, ApJL, 739, 52
- [3] Aharonian et al. 2006, Nature, 439, 69
- [4] Koyama et al. 1995, Nature, 378, 225

2. 研究の目的

この謎を解き明かすための鍵は(1)「広がった鉄輝線放射」と硬 X 線、および(2)高エネルギーガンマ線放射である。従来の X 線天文衛星では分光力や感度が不足していたために、(1)の測定が困難だったが、申請者自身の研究成果が証明したように X 線衛星「すざく」によってそれが可能になった。さらに、日本の次期 X 線天文衛星「ASTRO-H」(平成 27 年度打上予定)により、これまでより 10 倍以上良い空間分解能と感度で 10 keV 以上の硬 X 線の観測が可能となる。また、大気チェレンコフを用いた TeV ガンマ線望遠鏡「H.E.S.S.」の観測に加え、平成 20 年から GeV ガンマ線衛星「Fermi」が打ち上げられ、(2)の高エネルギーガンマ線の良質な観測データが取得可能となった。

本研究では、X 線からガンマ線の広帯域スペクトルを駆使して、銀河中心に広がる宇宙線のエネルギー・空間分布を初めて明らかにする。申請者がこれまでに行ってきた X 線反射星雲を用いたいて座 A* の活動史研究も発展的に総合して、銀河中心の高エネルギー活動性の起源を解明する。さらに「ASTRO-H」の打ち上げに向けた開発研究を行い、観測データ取得後すぐに解析結果を得るための準備も行う。

3. 研究の方法

(1) 「すざく」衛星による観測

上記の研究のために、主に「すざく」を用いた銀河中心および銀河面の観測を行い、銀河中心・銀河面拡散 X 線放射の精密測定を行う。これまでの研究から、この拡散 X 線放射には、高温プラズマと低温ガスの 2 成分から

成ることがわかってきた。特に、高温プラズマの起原として、多数の超新星爆発による可能性があることから、銀河面に分布する超新星残骸の観測も行う。中性鉄輝線放射を付随する低温ガス成分は、X線反射星雲が主要であるが、それ以外の「広がった成分」の切り分けを行い、これが宇宙線が生成したX線であることを決定する。ガンマ線による観測結果と合わせて、宇宙線測定を行う。

(2) 「ASTRO-H」衛星の開発

本研究には「ASTRO-H」による広帯域分光観測が必須である。そのため、研究代表者は軟X線カメラSXIの開発を行う。特に、エネルギー決定精度が重要であるので、地上試験でエネルギー較正方法を確立する。またデータ解析のためのソフトウェアの開発を行い、打ち上げ後に備える。

(注) 本研究開始時点では「ASTRO-H」は本研究期間内の2014年度打ち上げ予定であり、その観測も研究方法に含めていた。しかし、打ち上げの延期があったため、本研究では実際の観測は行っていない。

4. 研究成果

(1) 銀河中心・銀河面に広がる高温プラズマの研究

銀河中心・銀河面拡散X線の高感度測定を行い、その中から、重元素(ケイ素、硫黄、アルゴン、カルシウム、鉄)の高階電離輝線の分布を決定した(図1)。その結果、驚くべきことに、元素間で分布が同じではないことを発見した。すなわち銀河中心と銀河面では

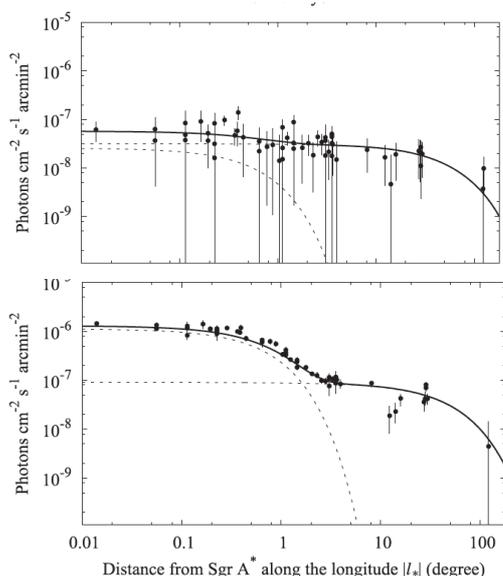


図1 銀河中心・銀河面拡散X線における、硫黄(上)と鉄(下)の高階電離輝線の強度分布。銀河中心(いて座A*)からの距離が1~2°を境に、銀河中心成分と銀河面成分に分かれる。しかし、硫黄の分布では銀河中心成分が非常に弱いことを発見した。このことは、中心と銀河面では起原が異なることを意味する。

は性質が異なり、起原が同一ではない。銀河面の主な起原はX線星であろうと考えられていることから、銀河中心には真に広がった高温プラズマが存在している。

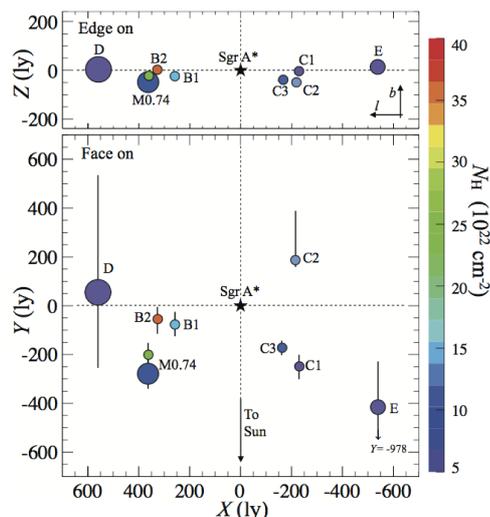


図2 X線反射星雲の3次元分布。我々から見た2次元分布(上図)と銀河面の真上から見た場合の分布(下図)。

(2) X線反射星雲といて座A*の活動史

これまでの研究により、銀河中心領域のX線反射星雲は過去に活動的であったいて座A*によりX線で照らされたものである、ことがわかってきた。しかし、いて座A*がいつ、どれくらい活動していたのか、については世界的に諸説あり統一がとれていなかった。その原因は、いて座A*とX線反射星雲の相対位置関係がわかっていないことである。すなわち、両者の距離の不定性が時間と光度情報の誤差になっていたのである。

本研究において、X線の光電吸収を用いたX線反射星雲の位置決定方法を開発し、それを適応しX線反射星雲の3次元分布を決定した(図2)。その結果、いて座A*は少なくとも600年前から最近50年前まで活動的であったことを突き止めた。

(3) 銀河面における低エネルギー宇宙線の初測定

銀河中心から約3度離れた東の領域から中性鉄輝線の超過を発見した。X線反射星雲は全て銀河中心から1度以内で見ついていることから、可能性は低い。さらに、分子ガスの濃さと相関しないことも、X線反射星雲説で説明ができない。従って、低エネルギー宇宙線陽子(E=MeV)が星間ガスと衝突し、X線放射をしていると考えられる。

そのエネルギー密度は約20 eV/ccであり、従来の常識である密度1 eV/ccから1桁も高い。銀河中心近傍で宇宙線が効率よく生成されている、あるいはこれまで未測定であった低エネルギー領域では、宇宙線が多いのかもしれない。いずれにしても星間空間の理解

に変更を求める結果である。

(4) 超新星残骸の観測研究

銀河面に分布する超新星残骸の観測を行った。G349.7+0.2 と G350.1-0.3 からは強い鉄輝線に加えて、初めてニッケルの輝線の検出に成功した。研究(1)の結果を使うことで、銀河面高温プラズマをバックグラウンドとして正確に見積り、これらの超新星で合成された元素量を測定した。その結果、いずれも太陽の20-40倍程度重たい星が重力崩壊型の超新星の残骸であったことを明らかにした。

また、G337.2-0.7 からは初めて鉄輝線を発見した。元素量を測定した結果、重力崩壊型ではなく、核暴走型の超新星が起原であることを決定した。

(5) 「ASTRO-H」搭載 SXI の開発

X線 CCD カメラ SXI は 0.3-15 keV で感度

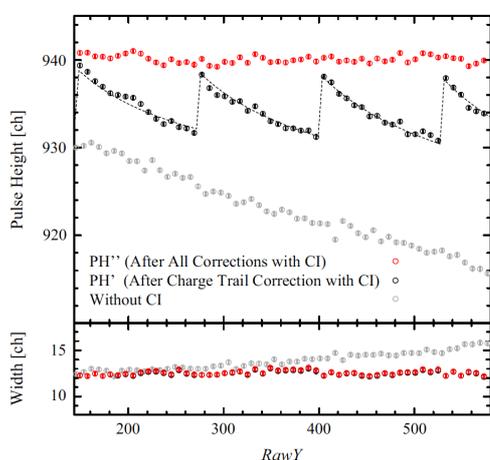


図3 転送回数(横軸)によって同じエネルギー($E=5.9$ keV)のX線が入射した場合でも、出力値が異なる(上図の黒および灰色のデータ点)。補正することで転送回数によらず一定にすることができた(赤データ)。下図はその時のエネルギー分解能を示す。転送回数が多いと悪くなる(灰色)が、電荷注入機能により、転送回数依存性を抑えることに成功した(黒、赤)。

があるX線撮像分光装置である。過去の同型観測装置で最大の視野 38分角 \times 38分角を持ち、本研究対象である拡散X線放射に最適である。CCDの原理は、入射X線により生成された電荷をピクセル間でバケツリレーのように転送し、最終的に読み出し口から電気信号として取り出す。この転送で一部の電荷を確率的に損失するため、元のX線エネルギー決定に問題を残す(図3)。

そこで、本研究ではその転送による損失を測定し、補正する方法を開発した。地上試験によるデータを元に、従来のX線CCDカメラでは達成できなかった精度0.1%でエネルギー較正を行うことに成功した(図3の赤データ)。さらに、電荷注入機能により、転

送によって生じるエネルギー分解能の劣化を抑えることにも成功した。これにより、「ASTRO-H」打ち上げ後に信頼度の高いデータ処理が可能とすることができた。

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8件)

Yamauchi, S., Shimizu, M., Nakashima, S., Nobukawa, M., Tsuru, T. G., Koyama, K., 2014, "X-ray filament with a strong 6.7-keV line in the Galactic center region", Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 66, Issue 6, id.1256 pp., 査読有

Yasumi, M., Nobukawa, M., Nakashima, S., Uchida, H., Sugawara, R., Tsuru, T. G., Tanaka, T., Koyama, K., 2014, "Abundances in the ejecta of core-collapse supernova remnants G350.1-0.3 and G349.7+0.2", Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 66, Issue 4, id.689 pp., 査読有

Nobukawa, M., Nakashima, S., Nobukawa, K. K., Koyama, K., 2014, "Suzaku Observation of Time Variability of X-ray Emission from Molecular Clouds in the Galactic Center", Suzaku-MAXI 2014: Expanding the Frontiers of the X-ray Universe, proceedings of a conference held 19-22 February, 2014 at Ehime University, Japan. Edited by M. Ishida, R. Petre, and K. Mitsuda, 2014., p.54-55, 査読無

Nakashima, S., Nobukawa, M., Uchida, H., Tanaka, T., Tsuru, T., Koyama, K., Murakami, H., Uchiyama, H., 2013. "Discovery of the Recombining Plasma in the South of the Galactic Center: A Relic of the Past Galactic Center Activity?", The Astrophysical Journal, Volume 773, Issue 1, article id. 20, 8 pp., 査読有

Ryu, S. G., Nobukawa, M., Nakashima, S., Tsuru, T., Koyama, K., Uchiyama, H., 2013. "Discovery of the Recombining Plasma in the South of the Galactic Center: A Relic of the Past Galactic Center Activity?", Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.65, No.2, Article No.33, 9 pp. 査読有

Uchiyama, H., Nobukawa, M., Tsuru, T., Koyama, K., 2013. "K-Shell Line Distribution of Heavy Elements along the Galactic Plane Observed with

Suzaku”, Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.65, No.1, Article No.19 査読有
Yamauchi, S., Nobukawa, M., Koyama, K., Yonemori, M., “Evidence for Recombining Plasma in the Supernova Remnant G346.6-0.2”, Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.65, No.1, Article No.6 査読有
Yusef-Zadeh, F., Hewitt, J. W., Wardle, M., Tatischeff, V., Roberts, D. A., Cotton, W., Uchiyama, H., Nobukawa, M., Tsuru, T. G., Heinke, C., Royster, M., 2013, “Interacting Cosmic Rays with Molecular Clouds: A Bremsstrahlung Origin of Diffuse High-energy Emission from the Inner $2^\circ \times 1^\circ$ of the Galactic Center”, The Astrophysical Journal, Volume 762, Issue 1, article id. 33, 22 pp. 査読有

[学会発表](計13件)

信川正順「Calibration method for the Astro-H SXI」, 9th IACHEC meeting, Airlie Center (Warrenton, VI), 2014年5月12-15日

信川正順「X-ray Reflection Nebulae and Past Activity of Sgr A*」, 野辺山ユーザーズミーティング, 野辺山宇宙観測所, 2014年7月23-24日

信川正順「Suzaku Observations of X-Ray Reflection Nebulae in 2005-2013 and Past Activity of Sagittarius A*」, COSPAR2014, モスクワ大学, 2014年8月2-8日

信川正順「PV proposal for Galactic Center (ASTRO-H)」, 12th ASTRO-H Science Meeting, AstroParticle Cosmology Laboratory (APC), Univ. of Paris 7, 2014年7月7-11日

信川正順「NGHXT で狙うブラックホールのサイエンス」, 日本物理学会 2015年, 早稲田大学, 2015年3月23日

信川正順「X線反射星雲と Sgr A*の過去1000年の活動史」, 天の川銀河研究会 2015, 東京大学理学部, 2015年3月23-24日

信川正順「射手座D領域からのX線反射星雲の発見」, 日本天文学会 2013年秋期年会, 東北大学, 2013年9月10-12日

信川正順「X-ray Reflection Nebulae and Past X-ray Flares of Sgr A*」, 銀河中心 ALMA 研究会, 慶応大学, 2013年11月27日

信川正順「Central Region in Our Galaxy ~Recent Result of an X-ray Satellite Suzaku~」, Swiss-Kyoto Symposium, ETH (スイス), 2013年11月22日

信川正順「宇宙X線トモグラフィ」を用

いた天の川銀河中心領域の巨大分子雲の三次元位置と Sgr A*の過去の活動性の解明」, 日本天文学会 2013年春期年会, 埼玉大学, 2013年3月20-23日

信川正順「すざく衛星による銀河中心領域の観測結果」, 「銀河系中心部」小研究会, 名古屋大学理学部, 2012年11月6日

信川正順「エックス線観測による銀河中心ブラックホールの活動史の解明」, 育志賞研究発表会, 東京大学農学部, 2012年9月10日

- 21 信川正順「K-shell Emission Line of Neutral Fe from the Galactic Center Region」, Galactic center mini-workshop 2012, 国立天文台 三鷹キャンパス, 2012年5月11日

[その他]

ホームページ等

<http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/member/nobukawa/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

信川 正順 (NOBUKAWA, Masayoshi)

京都大学白眉センター・特定助教

研究者番号: 00612582