

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 3 日現在

機関番号：14602

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24540232

研究課題名(和文) 銀河に付随する拡散X線放射の研究

研究課題名(英文) Study of the Galactic Diffuse X-ray Emission

研究代表者

山内 茂雄 (YAMAUCHI, SHIGEO)

奈良女子大学・自然科学系・教授

研究者番号：60260410

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)：銀河系内に存在する拡散X線放射の起源を探るため、広い範囲にわたって鉄元素から放射される特性X線に注目した解析を行った。電離の進んでいない鉄からの6.4keV輝線、ヘリウム様イオンからの6.7 keV輝線、水素様イオンからの6.97 keV輝線の強度を求め、空間分布と等価幅を評価した。点源起原の候補となりうる白色矮星連星系やフレア星等の空間構造、輝線強度と比較し、銀河系内拡散X線放射の起源について検討した。系外銀河に付随する拡散X線放射の探査を行い、M101銀河に鉄輝線を伴う放射の存在を明らかにした。銀河系内の超新星残骸等、拡散X線放射をもつ天体の構造とスペクトルの解析を行った。

研究成果の概要(英文)：In order to investigate the origin of the Galactic diffuse X-ray emission (GDXE), we carried out a systematic study of iron K-shell lines in the Galaxy. Using intensities of three emission lines at 6.4, 6.7 and 6.97 keV, we determined the spatial distribution and equivalent width of each line for the first time. Comparing the spatial distributions and equivalent widths with those of the cataclysmic variables and flare stars, we discussed the origin of the GDXE. We found similar diffuse X-ray emission with an intense iron K-shell line in the spiral galaxy M101. We analyzed the data of supernova remnants and extended sources in the Galaxy and obtained new results of the X-ray emission.

研究分野：天文学

キーワード：X線 銀河面X線放射 X線スペクトル

## 1. 研究開始当初の背景

1970年代後半に行われた HEAO-1 衛星による X 線観測で、天の川銀河には個々の天体に分解することのできない拡がった X 線放射 (銀河面 X 線放射、Galactic Diffuse X-ray Emission: 以下 GDXE) が存在することが明らかにされた (Worrall et al. 1982, ApJ, 255, 111)。日本の「てんま」衛星による観測で、GDXE のスペクトルに高電離した鉄イオンからの K 輝線が発見されるに至って、GDXE が数千万度の温度のプラズマガスからの放射であることがわかった (Koyama et al. 1986, PASJ, 38, 121)。その後の観測で、GDXE は以下のような特徴を持つことが明らかにされてきた。

(1) GDXE は銀河円盤に沿って広く分布する (Warwick et al. 1985, Nature, 317, 218; Yamauchi and Koyama 1993, ApJ, 404, 620)。この成分に加えて、銀河中心、銀河バルジ領域にも存在する (Koyama et al. 1989, Nature, 339, 603; Yamauchi et al. 1990, ApJ, 365, 532; Revnivtsev et al. 2006, A&A, 452, 169)。また、高銀緯領域にも拡散成分 (ハロー成分?) が見られる (Iwan et al. 1982, ApJ, 260, 111; Koyama 1989, PASJ, 41, 665; Kaneda et al. 1997, ApJ, 491, 638)。

(2) 鉄輝線を放射する数千万度の温度の成分に加えて、1千万度以下の低温成分が存在する (Kaneda et al. 1997, ApJ, 491, 638)。また、10 keV 以上のバンドで卓越する非熱的放射成分が存在し (Yamasaki et al. 1997, ApJ, 481, 821; Valinia and Marshall 1998, ApJ, 505, 134)、この成分は銀河円盤から離れた位置で顕著になる (Kaneda et al. 1997, ApJ, 491, 638)。

(3) GDXE の空間分布は、近赤外線放射の強度分布と相関する (Revnivtsev et al. 2006, A&A, 452, 169)。

(4) chandra 衛星を用いた銀河バルジの領域の長時間観測で、視野内で観測されたフラックスの 80% 以上が点源に分解された (Revnivtsev et al. 2009, Nature, 458, 1142)。これらの天体の光度は「小質量星と白色矮星連星系」や「小質量星同士の近接連星系」のものとはほぼ等しい。

(5) GDXE のスペクトルには、いずれの領域においても電離をしていない鉄元素からの輝線 (6.4 keV)、ヘリウム様鉄イオンからの輝線 (6.7 keV) と水素様鉄イオンからの輝線 (6.97 keV) が見られる (Koyama et al. 2007, PASJ, 59, S245; Yamauchi et al. 2009, PASJ, 61, S225)。6.97 keV と 6.7 keV 輝線の強度比は銀河中心領域で高く、銀河円盤領域では低い値となる (Yamauchi et al. 2009, PASJ, 61, S225)。

上記 (3) (4) の結果に基づき、「小質量星と白色矮星連星系」や「小質量星同士の近接連星系」の足し合わせとする点源起源説

が有力視されている (Revnivtsev et al. 2009, Nature, 458, 1142) が、この場合には次のような問題がある。i) GDXE の分布を星の質量分布 (stellar mass distribution) と詳細に比較すると、銀河中心領域を含む天の川銀河全体を星だけではうまく説明することができない (Uchiyama et al. 2011, PASJ, 63, S903)。ii) 「小質量星と白色矮星連星系」や「小質量星同士の近接連星系」の太陽系近傍における空間密度を超える高い空間密度が必要となる (Yamauchi et al. 2009, PASJ, 61, S225)。iii) 6.97 keV と 6.7 keV 輝線の強度比の違いが見られることは、スペクトルの異なる種族がそれぞれの領域に分かれて存在していなくてはならないことを示す (Yamauchi et al. 2009, PASJ, 61, S225)。iv) 「小質量星と白色矮星連星系」や「小質量星同士の近接連星系」の足し合わせでは GDXE の X 線スペクトルに見られる強い鉄輝線を説明できない。

GDXE の起源は何か。GDXE のプラズマガスが真に拡がった放射であるとする、その全熱エネルギーは  $10^{56}$  erg にもなり、銀河系内全体で超新星爆発 1-10 万個分にも相当する大きなものである上、数千万度の温度のガスは銀河系の重力で閉じ込めておくことはできない。一方、検出限界以下の微弱な天体に付随する高温プラズマガスが拡がった X 線放射として見えているという点源起源説の場合には、既知の天体の中に強い鉄輝線を含む数千万度の温度の放射を持つものがないという課題がある。これまでに様々な議論がなされてきたが、その起源は未解明の課題である。

一方、天の川銀河と同様の現象は他の銀河にも見られると期待できる。実際、1keV 以下の温度を持つ拡散放射成分、および渦状腕に付随する硬 X 線成分が検出されている (例えば、Owen and Warwick 2009, MNRAS, 394, 1741; Bogdan and Gilfanov 2008, MNRAS, 388, 56) が、その起源についても天の川銀河の GDXE と同様に議論がある。

数百万度から数千万度にもなる高温プラズマガスの存在とその起源は、銀河内で生じている加熱、加速機構、さらに銀河内の星間物質の起源や銀河全体の活動性とも関係する重要な課題である。

## 2. 研究の目的

本研究は、広範囲の領域で得た X 線スペクトルの情報から、GDXE の理解と起源解明、そして、天の川銀河以外の銀河に付随する拡散放射成分の統一的理解を目的とする。GDXE の起源を解明するには、GDXE の強度を正確に測定し、その分布を明らかにすること、X 線スペクトルを正確に測定することが必須事項である。とりわけ、鉄元素が放射する輝線スペクトルが重要な意味を持つ。表面輝度が低く、強い鉄輝線を持つ GDXE の観測には、低い検出器バックグラウンドと鉄輝線バンド

における高い検出効率という特徴を持つ「すざく」衛星が最適である。

### 3. 研究の方法

GDXEの起源解明のためには、銀河円盤近傍だけでなく、銀河円盤外縁部、ハロー領域も含む銀河内の様々な場所で質の良いX線スペクトルを取得し、天の川銀河全体にわたって系統的に研究を行う必要がある。本研究では、天の川銀河の様々な領域でGDXEの観測を行い、X線強度の評価、輝線を中心にスペクトルの詳細観測、および関連天体のスペクトルとの比較を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 銀河面拡散X線放射の研究

銀河面拡散X線放射の空間分布と輝線強度  
銀河系に付随する高温プラズマガス成分の空間構造を明らかにするため、すざく衛星のデータを用いて電離の進んでいない鉄からの6.4keV輝線、ヘリウム様イオンからの6.7keV輝線、水素様イオンからの6.97keV輝線の強度を求め、銀河中心、銀河バルジ、銀河円盤領域のそれぞれの領域ごとにその強度を調べた。銀河系内の広い領域をカバーするよう、解析に用いた観測点はこれまでの研究よりも多い143点である。

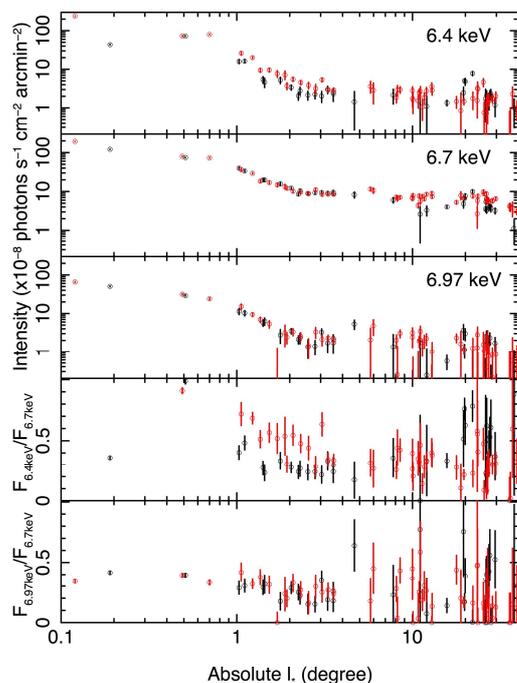


図1 銀経方向の輝線強度と強度比の分布(発表論文に載せた図にデータ点を追加)。赤は銀経+、黒は銀経-の領域を示す。

解析結果から、銀河中心、銀河バルジ、銀河円盤のそれぞれの領域で求めた輝線の強度比は同じではなく、系統的な差があることを確認した。またこの広域探査によって、6.7

keV, 6.97 keV輝線は銀河中心に対して対称に、6.4 keV輝線は非対称に分布していること、銀河中心近傍のX線反射成分が存在している場所以外に、6.4 keV輝線が強い特異な領域があることが分かった(図1)。

3本の輝線のそれぞれについて銀河円盤に垂直な方向の空間分布(スケールハイト:強度等がe分の1になる長さ)を初めて明らかにした。銀河円盤、銀河バルジ領域の6.4 keV輝線のスケールハイトは6.7 keV, 6.97 keVのものよりも有意に小さいこと、一方、銀河中心領域ではいずれの輝線のスケールハイトも同程度であることが分かった(図2)。

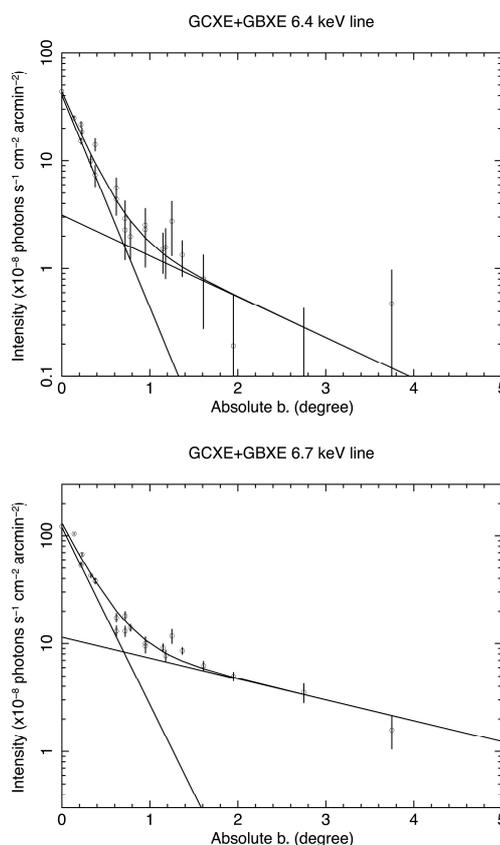


図2 (上)6.4 keV, (下)6.7 keV輝線の銀河中心領域における銀緯方向の強度分布(発表論文より)。

連続成分に対する輝線の強度比にあたる等価幅を求め、領域ごとの平均値を評価した。空間構造と輝線強度の解析結果に基づき、拡散X線放射の起源について以下のことを明らかにした。

銀河バルジ領域では、スケールハイトは白色矮星連星系やコロナ放射を持つ小質量星のものと同程度で、等価幅も起源となりうる点源の寄与の組み合わせで説明することは可能であることがわかった。したがって、点源からの放射が主要な起源である可能性を示す。

銀河円盤領域では、6.4keV 輝線の強度が超過している領域が存在すること、6.4keV 輝線のスケールハイトは6.7keV、6.97keV 輝線よりも小さく、さらに白色矮星連星系やコロナ放射を持つ小質量星のスケールハイトより有意に小さいことから、点源の寄与は大きい、点源だけですべての拡散 X 線放射を説明することは難しいと結論した。少なくとも6.4 keV 輝線については新たな放射源が必要である。

銀河中心領域では、3本の輝線のスケールハイトは、いずれの点源のものよりも小さいこと、3本の鉄輝線とも点源のものよりも大きな等価幅を示すことから、私たちの知りうる点源だけで説明することは難しく、銀河中心領域の活動性など、他の起源を考える必要があることが分かった。

#### 熱的放射を持つフィラメントの発見

銀河系中心領域に位置する拡散 X 線放射の中に細長いフィラメント構造を持った天体が存在する。この天体の一つについてスペクトルを解析し、強い6.7 keV 輝線を持つことを明らかにした。この放射には電波領域に対応天体があり、chandra 衛星による観測では非熱的放射であると考えられていたが、本解析により熱的放射であることが分かった。スペクトルは銀河系中心の拡散 X 線放射と類似していることをふまえ、その起源について検討した。

#### 銀河中心方向の角状構造をもつ拡散 X 線放射の解析

銀河中心領域の拡散 X 線放射について、銀河中心の北側の領域における軟 X 線成分の空間構造を調査した。1-3 keV バンドのイメージには、銀河中心に対して対称に北側へ角状にのびる2つの構造が見られる。そのスペクトル解析を行い、 $10^7$  K 以下の温度のプラズマガスからの放射モデルで説明できることがわかった。両側の構造の物理量は似通っている。また、サイズは1つの超新星爆発によるものよりも大きいと推定される。解析結果に基づいて、形成過程について検討した。

#### (2)系外銀河の拡散 X 線放射の研究

銀河系内の高温プラズマガス成分と同様の成分が系外の銀河にも存在しているかを調査するため、系外渦巻銀河の観測データも解析を進め、鉄の輝線の探査を進めた。

M101 銀河の中心から半径10kpcの領域のスペクトルに比較的強い鉄輝線を発見した(図3)。輝線の光度を求め、M101 銀河の物理パラメータと比較し、この放射の起源について検討した。その結果、白色矮星連星系やフレア星等、小質量星の重ね合わせとして考えるのは難しく、銀河内の活動性等、その他の起源を考えなくてはならないことがわかった。

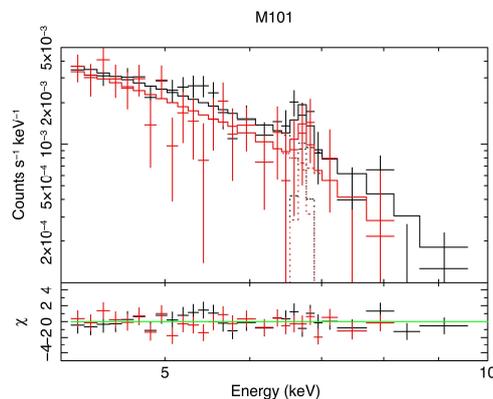


図3 系外銀河 M101 のスペクトル(発表論文より)。

#### (3) 関連天体の観測的研究

##### 超新星残骸の研究

銀河系内拡散 X 線放射との関連、および高温プラズマの物理過程を比較・検討するため、超新星残骸のスペクトルの解析を行った。

##### 1) G348.5+0.1

スペクトルと空間構造の解析を行い、中心集中した熱的 X 線放射であることから、複合形態型超新星残骸であることを確認した。また、近傍にパルサー星雲候補も存在する。このパルサー星雲候補天体からの寄与を考慮に入れた解析より、超新星残骸の拡散 X 線放射のスペクトルは、電離平衡状態、電離優勢状態のプラズマモデルでは再現できず、再結合優勢状態にあるプラズマからの放射のモデルで良く再現できることが分かった。

##### 2) W49B

W49B は再結合優勢プラズマの存在が報告されている複合形態型超新星残骸である。最近再結合優勢プラズマのモデルが改善され、プラズマ放射モデルに基づいて詳細に物理パラメータを評価することが可能となった。W49B のスペクトルに対して、改良された再結合優勢プラズマのモデルを適用し、再結合優勢プラズマの温度や経過時間等の物理量を得た。

##### 2) Kes27

スペクトルと空間構造の解析を行い、いずれも中心集中した熱的 X 線放射が観測され、複合形態型超新星残骸の特徴を示すことを確認した。得られた元素組成比は Ia 型超新星残骸のものと良く似ていること、少なくとも3種類のプラズマが混在すること、スペクトルは空間構造を持っていることが分かった。また、輝線構造と全体のスペクトルとも G344.7-0.1 や G352.7-0.1 と似通っていることがわかった。

## 未同定天体の研究

銀河円盤領域に発見した未同定天体の構造、スペクトルの解析を行い、その特徴を調査した。広がった構造を持つ G22.0+0.0 および G23.5+0.1 について、非熱的放射スペクトルであることから熱的放射を持つ超新星残骸ではなく、パルサー星雲である可能性が高いが、明確なパルサー天体は見つからなかった。また、同視野中に検出された点源について、スペクトルの情報よりそれらが晩期型星、白色矮星連星系等であると推定した。

## 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., Nobukawa, M., Koyama, K., Yonemori, M., Evidence for Recombining Plasma in the Supernova Remnant G346.6-0.2, Publ. Astron. Soc. Japan, Vol.65, 6 (7 pages) (2013), 査読有

Minami, S., Ota, N., Yamauchi, S., Koyama, K., X-Ray Observation of the Galactic Supernova Remnant G355.6-0.0 with Suzaku, Publ. Astron. Soc. Japan, Vol.65, 99 (7 pages) (2013), 査読有

Yamauchi, S., Minami, S., Ota, N., Koyama, K., Thermal and non-thermal X-rays from the Galactic supernova remnant G348.5+0.1, Publ. Astron. Soc. Japan, Vol.66, 2 (7 pages)(2014), 査読有, DOI: 10.1093/pasj/pst004

X-ray emission from the galactic supernova remnant G12.0-0.1, Yamauchi, S., Bamba, A., Koyama, K., Publ. Astron. Soc. Japan, Vol.66, 20 (8 pages) (2014), 査読有, DOI: 10.1093/pasj/pst021

Yamauchi, S., Shimizu, M., Nakashima, S., Nobukawa, M., Tsuru, T. G., Koyama, K., X-ray filament with a strong 6.7 keV line in the Galactic center region, Publ. Astron. Soc. Japan, Vol.66, 125 (6 pages) (2014), 査読有, DOI:10.1093/pasj/psu122

Yamauchi, S., Sumita, M., Bamba, A., Suzaku observations of two diffuse hard X-ray source regions, G22.0+0.0 and G23.5+0.1, Publ. Astron. Soc. Japan, Vol.68, S6 (10 pages) (2016), 査読有, DOI: 10.1093/pasj/psv109

Yamauchi, S., Iron emission line from the spiral galaxy M101, Publ. Astron. Soc. Japan, Vol.68, S18 (9 pages) (2016), 査読有, DOI: 10.1093/pasj/psv107

Yamauchi, S., Nobukawa, K. K., Nobukawa, M., Uchiyama, H., Koyama, K., Scale heights and equivalent widths of the iron K-shell lines in the Galactic diffuse X-ray emission, Publ. Astron. Soc. Japan, 受理済, 査読有, DOI: 10.1093/pasj/psw057

[学会発表](計 7 件)

山内茂雄, 信川正順, 小山勝二, 米森愛美, 超新星残骸 G346.6-0.2 からの再結合優勢プラズマの発見, 日本天文学会春季年会 2013 年 3 月 20-23 日, 埼玉大学(埼玉県・さいたま市)

南沙里, 太田直美, 山内茂雄, 小山勝二, 過電離プラズマモデルを用いた超新星残骸 W49B のスペクトル解析, 日本天文学会春季年会 2013 年 3 月 20-23 日, 埼玉大学(埼玉県・さいたま市)

山内茂雄, 南沙里, 太田直美, 小山勝二, 超新星残骸 G348.5+0.1 の X 線放射について, 日本天文学会秋季年会 2013 年 9 月 10-12 日, 東北大学(宮城県・仙台市)

南沙里, 山内茂雄, 小山勝二, Mixed-Morphology 型超新星残骸 Kes27 のプラズマの電離状態について, 日本天文学会春季年会 2014 年 3 月 19-22 日, 国際基督教大学(東京都・三鷹市)

山内茂雄, すざく衛星による渦巻銀河 M101 の観測, 日本天文学会秋季年会 2015 年 9 月 9-11 日, 甲南大学(兵庫県・神戸市)

信川久実子, 信川正順, 鶴剛, 小山勝二, 山内茂雄, 銀河リッジ X 線放射の 6.4 keV 輝線, 日本天文学会秋季年会 2015 年 9 月 9-11 日, 甲南大学(兵庫県・神戸市)

信川久実子, 山内茂雄, 信川正順, 鶴剛, 小山勝二, 鳥居和史, 福井康雄, 銀河リッジ X 線放射の中性鉄輝線における宇宙線の寄与, 日本天文学会春季年会 2016 年 3 月 14-17 日, 首都大学東京(東京都・八王子市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山内 茂雄 (YAMAUCHI SHIGEO)  
奈良女子大学・自然科学系・教授  
研究者番号: 60260410

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし