様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２７ 年　 ６ 月　 ４ 日現在

機関番号：１３８０１
研究種目：研究活動スタート支援
研究期間：2013～2014
課題番号：２５８８７０２８

研究課題名（和文）銀河拡散X線放射の空間・時間的「揺らぎ」から迫る天の川銀河の高エネルギー活動性

研究課題名（英文）Study of High Energy Activity in the Milky Way Using Spatial and Time Fluctuations of the Galactic Ridge X-ray Emission

研究代表者
内山　秀樹（Hideki, Uchiyama）

静岡大学・教育学部・講師

研究者番号：５０７０８４３５

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）：「すざく」銀河面データにより、天の川銀河拡散X線放射の空間的揺らぎを測定した。統計誤差を除くと、天の川銀河拡散X線放射と宇宙背景X線を合わせた表面輝度は~10パーセク程度の空間スケールで3.6~8.1％（1σ）揺らぐことを明らかにした。この揺らぎは天の川銀河拡散X線放射が多くの暗い点源の集まりだとした場合の結果と大きく矛盾しない。
また、数百パーセクスケールでの鉄輝線強度比の空間分布から、バルジと銀河面ではその拡散X線放射の起源が異なる可能性が高いことも明らかにした。
天の川銀河拡散X線放射の研究を元に、「すざく」データを使った、高校物理で扱うボーア模型の学習教材を作成した。

研究成果の概要（英文）：Using the Galactic plane data of Suzaku, I measured the spatial intensity fluctuation of the Galactic ridge X-ray emission (GRXE). I revealed that the combined intensity of the GRXE and cosmic X-ray background fluctuates about 3.6~8.1 % (1 sigma) over about 10 pc, except for systematic errors. This fluctuation is consistent with the prediction of the case that the GRXE is the superposition of many faint point sources.
I also studied the spatial profile of the highly ionized iron line intensity ratio over a few hundred pc. It suggests that the origin of the GRXE possibly differs in the disk and bulge regions.
Based on these studies, I also developed an educational material for high school students to study the Bohr model using Suzaku data.

研究分野：X線天文学

キーワード：X線天文学　天の川銀河

１．研究開始当初の背景

天の川銀河面からの広がった X 線放射(GDXE) の正体は X 線天文学黎明期以来の謎であった。そのスペクトルは、強い高階電離イオンの輝線を伴い、高温プラズマ(〜数千万 K) の存在を示す。もし、これが天の川銀河を満たす広がったガスなら、これほど高温のプラズマは重力で束縛されず、〜10^{50} erg/年の莫大なエネルギー供給（10 年に 1 発の超新星爆発に相当）が銀河内で必要となる。その供給源として、銀河中心超巨大ブラックホールの過去のジェットや、銀河磁場のリコネクションなど、天の銀河の高エネルギー活動性が提案された（拡散説)。一方、空間分解できないほど暗い、白色矮星連星などのコンパクトな X 線天体(点源) の重ね合わせとする点源説も唱えられ、この 2 説を中心に長年議論が続けられてきた。

近年、Revnivtsev+09 は、空間分解能に優れる Chandra 衛星でバルジ領域を長時間観測し、GDXE の鉄輝線放射の約 85%を点源に分解した。これで、点源説で決着したと思われた。

しかし、我々は「すざく」衛星により、次の 2 つの事実を発見した。まず、近赤外線から求めた星質量で規格化した高階電離鉄 Kα 輝線の放射率が、円盤やバルジに比べて中心領域で 4 倍以上も大きい点である。次に、GDXE を構成するプラズマのスペクトルは、2 つの温度成分で説明できるものの、その 2 成分の温度差が銀河面より中心領域で有意に大きくなる点である。このように、GDXE の性質が大きく異なる以上、その起源も天の川銀河の場所により異なると考えるのが自然だろう。そのため、バルジの GDXE の大部分が点源で説明できたとしても、中心・円盤領域には、真に広がった高温ガスが存在する可能性は残る。実際、中心や円盤領域では Chandra 衛星が点源に分解した GDXE は 20〜40%でしかない（e.g. Revnivtsev+07)。我々が「すざく」で明らかにした、degree（〜数千光年）スケールの GDXE の構造は、一度は終わった問題と思われていた GDXE の正体解明に、新たな展開をもたらした。

２．研究の目的

degree（〜数千光年）スケールに対し、arcmin（〜数光年）スケールの構造、すなわち、空間的な強度の揺らぎは、GDXE の基本的な観測量であるにもかかわらず、これまで詳細な研究が X 線 CCD カメラを使っては為されていなかった。点源説に立つと GDXE の揺らぎは、点源の空間的な存在数のポアソン揺らぎに起因する。Revnivtsev らの結果から GDXE を構成する点源の存在数を仮定すると、arcmin スケールの空間的揺らぎのオーダーは、〜数%と非常に小さいと予想される。ゆえに、精度よく GDXE の空間的揺らぎの大きさ、または、その厳しい上限値を決める事は、点源説の良い検証となる。逆に、点源説で予想される以上の大きな揺らぎは、広がった高温ガス成分の寄与を強く示唆する。この場合、揺らぎの特徴的な空間スケールは GDXE の起源となる天体・現象そのもののサイズに近い筈である。本研究では、以上を踏まえて、GDXE の揺らぎの測定という全く新しい切り口で GDXE の正体解明に挑んだ。具体的には、以下を本研究の目標とした。

・GDXE の arcmin（数光年)スケールの揺らぎを数%の精度で決定する。
・空間的な揺らぎが点源説の予言する値と矛盾しないか検証する。

一方で GDXE は銀河系内の様々な広がった X 線天体の研究では主なバックグラウンドとなる。そこで本研究や過去の研究で得られた知見を生かし、他の研究者が容易にバックグラウンドとしての GDXE スペクトルを推定する手法の開発も目指した。

また、本研究でのアウトリーチ活動の一環として、GDXE の「すざく」X 線データを用いた、高校生から大学 1〜2 年生向けの物理教材の開発も目標とした。

３．研究の方法

暗い GDXE の揺らぎを数%のオーダーで測定することは、宇宙線バックグラウンド（Non X-ray Background, NXB）から来る不定性により、欧米の衛星データでは困難であった。そこで私は、非常に低く安定した NXB レベルを誇る「すざく」衛星搭載 X 線 CCD カメラ XIS の、天の川銀河面データを解析した。

(1) GDXE の arcmin（〜数光年）スケールの構造の研究に先駆け、「すざく」銀河面アーカイブデータの解析により大局的な構造を改めて調査した。

① GDXE を構成する成分（高温プラズマ成分、低温プラズマ成分、中性物質成分）の強度と吸収を我々の先の研究 (Uchiyama+13)のスペクトルモデルで天の川銀河面データをフィットすることで求めた。その上で、電波(Dame+01,Kalberla+05)や COBE 衛星の近赤外線の強度や減光と、GDXE の各成分の相関を調べた。これにより、天の川銀河全体を観測している電波や近赤外線のデータから GDXE スペクトルを推定する手法の開発を試みた。

② 先の研究 (Uchiyama+13)で、我々は銀河中心領域と銀河面領域ではスペクトルが異なることを明確に示した。しかし、バルジ領域については明らかでは無かった。そこで、バルジ方向の GDXE 輝線強度の空間分布を調べ、更にバルジ領域の高統計スペクトルを作成し、中心・銀河面領域との比較を行った。

(2) 次に、GDXE の空間的揺らぎを調べるため、「すざく」XIS による銀河面領域の長時間観測データを解析した。このデータの観測提案は我々が行ったものである。この領域は XMM-Newton 衛星による 38 ks の観測があり、

その点源カタログ（Watson+09）を用いることで、「すざく」単体より暗い点源の寄与を除くことができる。

様々な立体角での GDXE と分離不可能な宇宙背景 X 線(CXB)の表面輝度を測るため、視野中心 9×9 or 11×11 arcmin^{2}の領域を 4〜25 個のセルに分割し、各々からスペクトルを抽出した。各種較正の不定性を避けるため、視野中心の領域のみを使用した。

NXB を引いた各セルのスペクトルから GDXE+CXB 表面輝度（2.3-8 keV）を測定した。更に XMM-Newton のカタログを用いて、$S_{\rm lim}$ = 10^{-14}（2.3-8.0 keV）erg/cm^2/s 以上の明るさの点源の、各セルでの表面輝度へ寄与を XISSIM（Ishisaki+07)によるシミュレーションで計算し、差し引いた。

点源の寄与を差し引いた各セルの GDXE+CXB 表面輝度（2.3-8 keV)の空間的揺らぎ(標準偏差)の観測値 $\sigma_{\rm GDXE}$ を得た。XMM-Newton の観測に基づく GDXE を構成する点源の強度分布(Warwick 14)から点源説の場合に予想される GDXE+CXB の表面輝度の揺らぎ(標準偏差)を計算し、観測値と比較した。

４．研究成果

(1) GDXE の大局的な構造の研究では、次のような成果が得られた。

① 銀河面での GDXE 高温・低温プラズマ成分、中性成分の強度と、4.9 μm 近赤外線強度との変換係数を明らかにした。特に低温プラズマ成分も近赤外線強度と相関関係があることを確かめたのは本研究が初めてである。また、GDXE の吸収量と 4.9 μm 近赤外線減光の変換係数も求めた。これらの変換係数を用い、COBE 衛星の近赤外線データから全天で GDXE スペクトルモデルを推定する手法を構築した。「すざく」GDXE データと比較し、再現性を評価したところ、銀河面の暗い 36 領域では、2.3-10 keV 帯域の GDXE フラックスが約 20%（1σ）の精度でこのモデルと一致した。この成果を日本天文学会 2013 年秋季年会にて発表した。

② GDXE 鉄輝線の銀河中心からバルジに向かう銀緯方向での空間分布を精度良く求めた。中性鉄と高階電離鉄輝線の空間分布(スケールハイト)が、前者は 1°.1±0°.2 なのに対し、後者は 2°.0±0°.1 と異なることを過去の研究(Uchiyama+13)より高い有為度で示した。これは、両輝線の起源(放射天体)が異なることを意味する。また、高階電離鉄輝線の強度比（Fe XXVI Lyα/Fe XXV Heα）は銀河バルジでは 0.29±0.08 であり、銀河中心や銀河面(中心 0.38±0.02、銀河面 0.22±0.06, Yamauchi+09）の中間的な値であることが分かった（図 1)。この結果は銀河バルジの GDXE は、銀河面や銀河中心の GDXE と異なる性質（起源）を持つ可能性が高いことを示唆する。この成果を国際会議 Suzaku+MAXI Conference 2014 Expanding the Frontiers of the X-ray Universe にて報告した。

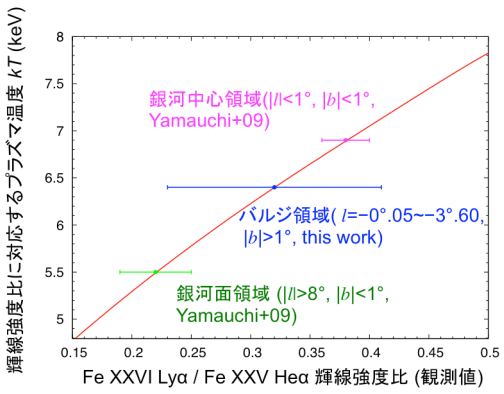


図 1 銀河中心・銀河面・銀河バルジにおける Fe XXVI Lyα/Fe XXV Heα 輝線強度比の比較

(2) 本研究によって得られた GDXE+CXB 表面輝度の揺らぎとセルの立体角の関係に図 2 に示した。統計誤差を除くと、$S_{\rm lim}$〜10^{-14} erg/cm^2/s より明るい点源の寄与を除いた GDXE と宇宙背景 X 線放射を合わせた表面輝度は 2.2-5.5 arcmin のスケールでは 3.6-8.1%（1σ）揺らぐことが分かった。また、Warwick 14 を元に計算した、点源説の場合に予想される揺らぎと立体角の関係（緑線）も図 2 に示した。点源説から予想された揺らぎと観測結果はほぼ一致した。不定性のあるα（点源の強度分布の冪）や Smin(GDXE に寄与する最も暗い点源の強度)を変化させても、点源の場合に予想される揺らぎに比べ、観測された揺らぎが極端に大き過ぎたり小さ過ぎたりすることはなかった。すなわち、GDXE+CXB 表面輝度の揺らぎの観測結果は、GDXE が多くの暗い点源の集まりだとした場合の結果と大きく矛盾しないことを本研究は明らかにした。この成果を日本天文学会 2015 年春季年会にて発表した。

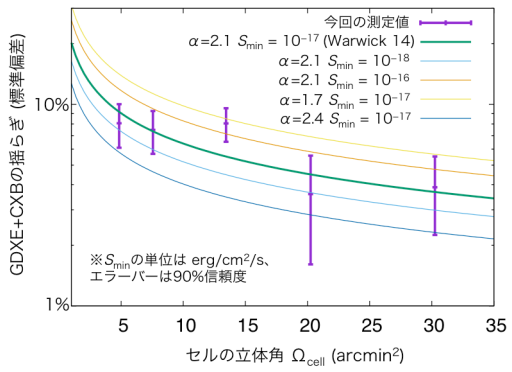


図 2 GDXE+CXB の表面輝度の揺らぎの観測結果と点源説の場合に予想される揺らぎの比較

また、本研究を元に、「すざく」の GDXE データを使った、高校物理で扱うボーア模型の学習教材を作成した。

５．主な発表論文等

〔学会発表〕(計 3 件)
① 内山秀樹、「天の川銀河拡散 X 線放射の arcmin スケールでの空間的揺らぎの測定」、日本天文学会 2015 年春季年会、2015 年 3 月 19 日、大阪大学（大阪府）
② Hideki Uchiyama, Masayoshi Nobukawa, Shinya Nakashima, “The Difference of the Galactic Ridge X-ray Emission between the Galactic Plane and Bulge Regions”, Suzaku+MAXI Conference 2014 Expanding the Frontiers of the X-ray Universe、2014 年 2 月 19 日、愛媛大学（愛媛県）
③ 内山秀樹、「天の川銀河リッジ放射バックグラウンド推定モデルの構築」、日本天文学会 2013 年秋季年会、2013 年 9 月 12 日、東北大学（宮城県）

６．研究組織
(1)研究代表者
内山 秀樹（Hideki Uchiyama）
静岡大学・教育学部・講師
研究者番号：50708435