

論文内容の要旨

論文題目

Origins of the Unresolved Soft X-ray Emission from the Galactic Disk (銀河円盤軟 X 線放射の起源)

氏名 木村俊介

1 研究の背景: M-band 問題

全天は X 線で輝いている。その中でも約 1 keV 以下の軟 X 線背景放射は Soft X-ray Diffuse Background (SXDB) と呼ばれる。個々の点源を取り除いた後の 0.4 から 1 keV の全天マップは、North polar spur や、銀河中心領域などのローカルな構造などを除くと、驚くほど一様に近い。2 keV 以上のエネルギーでの X 線背景放射は活動銀河核など銀河系外の微弱な多数の天体の重ね合わせであると考えられており、高空間分解能の X 線望遠鏡により 80% が、個々の点源に分解されている。本論文では銀河系外成分を CXB (Cosmic X-ray Background) と呼ぶ。CXB はべき関数で表されるような連続スペクトルであるが、1 keV 以下では輝線放射が存在し高銀河緯度方向の 0.4–1 keV の SXDB の約 60% を占める。銀河面方向には厚い中性物質が存在し、銀河面内を 1kpc 程度しか透過することができない。ところが、ROSAT 衛星の全天マップでは、0.4–1 keV の X 線の高銀緯から銀河面への減少分はたかだか 20% 程度である。このことは、銀河面の 1kpc 以内に何らかの放射源が存在し残る 20% を埋め合わせていることを示唆する。しかし、0.4 から 1 keV のエネルギー帯で十分な感度、空間分解能、エネルギー分解能を同時に有する観測装置が存在しなかったため、その放射源は長く謎のままであった。この問題は 1980 年代から “M-band 問題” として知られていた¹ (McCammon & Sanders, ARAA, 28, 657; Cox, 2005. ARAA, 43, 337)。この放射源が、銀河面内の $kT = 0.2 - 0.5$ keV の広がった高温ガスであるとすると、それは膨張し、定常的には銀河面内では存在できない (Cox, 2005)。

この 30 年来の謎であった放射源に、最近のすざく衛星による (銀経, 銀緯) = (235°, 0°) 方向の観測が重要な手掛かりを与えた (Masui et al., 2009. PASJ, 61, 115)。すなわち、少なくともこの方向については、高銀緯に見られる酸素輝線放射 (0.56, 0.63 keV) に特徴づけられる放射スペクトルとは全く異なった形をした、約 0.9 keV にピークをもつ bump 状の放射が、中性物質の吸収による CXB の減少を埋め合わせていることがわかった。bump 状の放射は、鉄の L 輝線群や Ne K 輝線を含む温度 9×10^6 K ($kT \sim 0.8$ keV) の光学的に薄い衝突電離平衡プラズマからの放射で近似できる。これが真に広がった高温物質として約 1 kpc 以内に存在しているとすると、その圧力は銀河面の全圧力を超えてしまう。Masui et al. (2009) は、このことから、bump 状放射は微弱な点源の重ね合わせである可能性を示唆し、その有力な候補として M 型主系列星 (dM stars) を考えた。星からの X 線放射が SXDB に一定の寄与をする可能性は、1980 年代から示唆されていた (Rosner et al., ApJ, 1981, 249, L1)。その後、ROSAT 衛星や Chandra 衛星による観測から、太陽系近傍の星の X 線光度やスペクトルが明らかになり、より定量的な議論が可能になった。Masui et al. (2009) は、これらに基づいて dM 星の重ね合わせ放射のスペクトルモデルを作成し、bump 状放射がこのモデルで良く説明できることを示した。

Masui et al. (2009) は一方向の観測に基づいた議論であり、この方向が銀河面の代表的な方向ではなく特殊な方向であった可能性は否定できない。さらに、bump 状放射が微弱な点源の重ね合わせであるとすると、その起源について高空間分解観測による直接的な検出による検証が必要である。

¹M band は、Wisconsin 大、名古屋大-ライデン大学のロケット実験で用いられたエネルギーバンドの名前で、ほぼ 0.4–1 keV に対応する。

2 本研究の目的

本研究は、大きく分けて二つの部分から成る。第一は、すざく衛星による第2の銀河面の観測と、ROSAT衛星の全天マップの再解析を行う事で、bump状放射が銀河面の広い範囲に渡って存在しているのかを確かめることである。第二は、空間分解能に優れるChandra衛星を用いた銀河面方向の観測データを解析し、bump状放射のもととなっていると考えられる点源を分解し、そのX線スペクトルと足し合わせたX線強度を調べ、点源の集まりである可能性を検証し、かつ、そのX線源の由来を実証することである。

私は、上記の論文Masui et al (2009)においては、dM星の放射の検討を主に担当し、共著者として寄与した。本論文で用いるすざく衛星の観測は私がContact Co Investigatorとして共同観測提案を行い、すざく衛星の国際公募観測による観測時間を得た観測である。ROSATおよびChandra衛星は公開データを用いて解析を行った。

3 すざく衛星による他の銀河面からのbump状放射の検出

すざく衛星により銀河中心に対してMasui et al (2009)が観測した方向($\ell = 235, b = 0$)の軸対象に位置する(123, 0)の観測を行った。すざく衛星のデータ解析の標準的なdata screeningに加えて、特に1 keV以下の低エネルギー範囲でも問題になる、太陽X線の地球大気による散乱と、太陽風と地球近傍の中性物質の電荷交換反応によるX線放射(Geocoronal SWCX)が、データに影響を及ぼしていないことをチェックした。これによって信頼性の高いエネルギースペクトルが得られ、そこにはMasui et al. (2009)が観測したbump状放射とよく似た放射がクリアに検出された(図??)。得られた0.4-5.0 keVのスペクトルはこのbump状放射に加え、CXB、太陽風と惑星間空間内の中性物質との電荷交換反応(Heliospheric SWCX; 以下SWCXと表記)による放射の足し合わせで良く表される事が分かった。Bump状放射を単一温度の高温プラズマからの放射で近似すると温度のbest-fit値は $kT = 0.75 \pm 0.02$ keVとなった。これは同じモデルで近似したときのMasui et al (2009)の値($0.77^{+0.04}_{-0.07}$ keV)とよく一致している。ただし、その強度は1.5倍程強い。

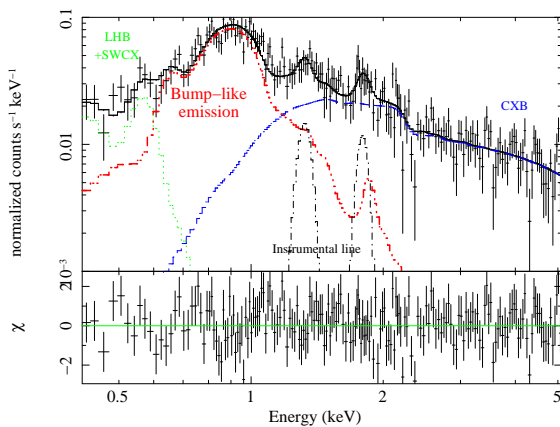


図1: 銀河面($\ell = 123, b = 0$)の領域のエネルギースペクトル。各成分の中で、赤で描かれているのが本論文でこの方向での存在を確認したbump状放射。青はCXBを表し、緑は太陽系内の放射(SWCX)を、黒は検出器由来の放射を表す。

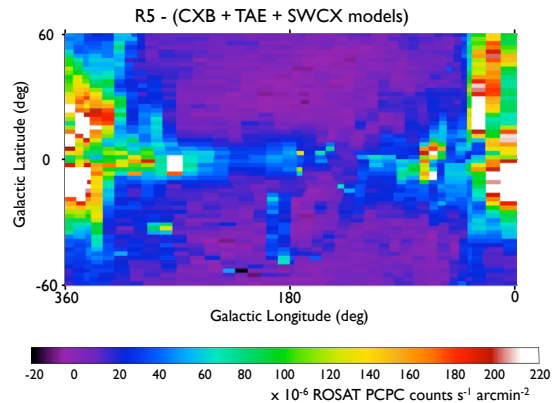


図2: ROSAT R5バンドのデータから、我々のモデルを引いた残差のマップ(メルカトル図法)。 $90^\circ < \ell < 270^\circ$ で $|b| < 10^\circ$ に渡って残差が見られる。 $0^\circ < b < 90^\circ, 270^\circ < b < 360^\circ$ の大きな構造はLoopIやバルジなどの銀河系のローカルな構造によるもの。

4 ROSAT R4R5 band マップの再解析による bump 状放射の分布

ROSAT 衛星による全天 map は、M band に相当するエネルギー範囲を R4 band (0.5-0.7 keV)、R5 band (0.7-0.9 keV) の二つに分けて作成されている。Bump 状放射はピークエネルギーが 0.9keV 付近に位置する為、ROSAT 衛星の R5 band (0.7-0.9 keV) に強く現れ、R4 band (0.5-0.7 keV) への寄与は弱いはずである。したがって、ROSAT R4 band と R5 band の全天マップを比較する事で、上述の bump 状放射が off center 方向の銀河面の広い範囲に存在するのかどうかを調べる事がはずである。しかし、CXB の吸収による減少と重なるので、生のマップからは確認する事ができない。そこで、私は ROSAT R4R5 band 全天マップの再解析を行った。すなわち、SXDB の他の成分、すなわち CXB、銀河系に付随する $T \sim 2 \times 10^6$ K の薄いプラズマである TransAbsorption Emission (TAE)、太陽圏内の SWCX をモデル化して、それを差し引いた後に残る放射を検討した。

解析の結果、 $|b| < 5^\circ$ の領域で残差が残った。ROSAT の全天マップには、Long Term Enhancement (LTE) と呼ばれる地球ジオコロナからの X 線放射と地球大気からの太陽 X 線散乱が完全には取り除かれていない領域が存在し、その領域は系統誤差が大きいことが知られている。そのため、これらの領域を取り除き、残差が残るかどうかを確認した。その結果、R5 band での残差の平均的な値は $\sim 30 \times 10^{-6} \text{ c s}^{-1} \text{ arcmin}^{-2}$ であった(図??)。これは、差し引きに用いたモデル(特に銀河面では主に太陽圏内の SWCX が効く)の不確定性、モデルの元となったすざく衛星の観測と ROSAT の全天マップの間のシステムティック誤差に対して、3倍以上大きな値である。一方、R4 band の平均的な値は、R5 バンドの 1/3 であったが、これは、システムティック誤差と同程度の大きさである。これらの誤差を考慮しても、残差は R5 band の方が強い事が示され、それはすざく衛星により 2 方向で観測された bump 状放射の特徴と矛盾しない。

5 Chandra 衛星による銀河面の点源からの bump 状放射

もし bump 状成分が微弱な点源であるとすると、X 線スペクトル、X 線光度、数密度から主系列の星が最も有力な候補であり、中でも若い M 型星 (dM 星) が大きな寄与をすると考えられる。私は、銀河内の中性物質による吸収を考慮して、星の X 線 $\log N - \log S$ 関係 (X 線強度が S 以上の星の数 N を、 S の関数としてプロットしたもの) のモデルを構築した。すざく衛星の点源の検出限界は $S = 1 \times 10^{-14} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ である。このモデルが予想するすざくの検出限界以下の星の総フラックスはすざくの bump 状放射強度と factor 1.5 の範囲で一致した。もしも、 $S = 1 \times 10^{-15} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ まで点源を分解すると、すざく衛星が観測した bump 状放射フラックスの約 30% が分解されると期待される。優れた空間分解能 ($\sim 1''$) を持つ Chandra 衛星による銀河面方向のアーカイブデータ (Chandra Multiwavelength Plane Survey: ChaMPlane) の中の比較的観測時間の長いデータの検出限界は $S = 1 \times 10^{-15} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ (0.5 - 2 keV) であるので、bump 状放射の一部が点源として見えてくる事が期待される。

そこで、私は ChaMPlane の中から $|b| \lesssim 3^\circ$ かつ、広視野 ($16' \times 16'$) の検出器である ACIS-I を用いた 3 つの観測を選び、解析を行った。ChaMPlane プロジェクトによって 0.5-2 keV のエネルギー範囲で $S/N > 3$ で、望遠鏡光軸から $400''$ 以内で検出された点源を足し合わせた X 線スペクトルを作成した (図??)。そのスペクトルは、吸収を受けたべき関数で表される成分 (power-law 成分) と、温度 0.9 keV 程度の熱的放射スペクトルで表される成分 (thermal 成分) の、2 成分からなる。点源の中に thermal スペクトルを持つ点源があると仮定し、そのスペクトルを持つ場合の個々の点源のエネルギーフラックスを求め、観測の検出限界エネルギーフラックスを推定した。その検出限界でモデル $\log N - \log S$ から期待される分解される点源のモデルフラックスを求め、これと点源の重ね合わせスペクトルの thermal 成分と比較すると、thermal 成分のフラックスは、モデル flux の 50% であった。次に、個々の点源の 1-2 keV の観測された光子数と 0-1 keV の光子数の比 (hardness ratio) を用いて、点源をスペクトルの硬さで分類した。その結果、thermal 成分を含むグループ、含まないグループに大まかに点源を分類する事ができた。その結果、(1) thermal 成分を含むグループのスペクトルには、すざく衛星で観測されたような ~ 0.9 keV にピークを持つ存在し、フラックスの和は、 $\ell = 235^\circ$ の 15%、 $\ell = 123^\circ$

の 10% であること (2) スペクトルは単一温度の thermal スペクトルでは表現できず、より高温の成分が必要であること、(3) thermal 成分を含むグループの点源だけで $\log N - \log S$ 関係を構築すると点源の数はモデルの 50% であること、がわかった。

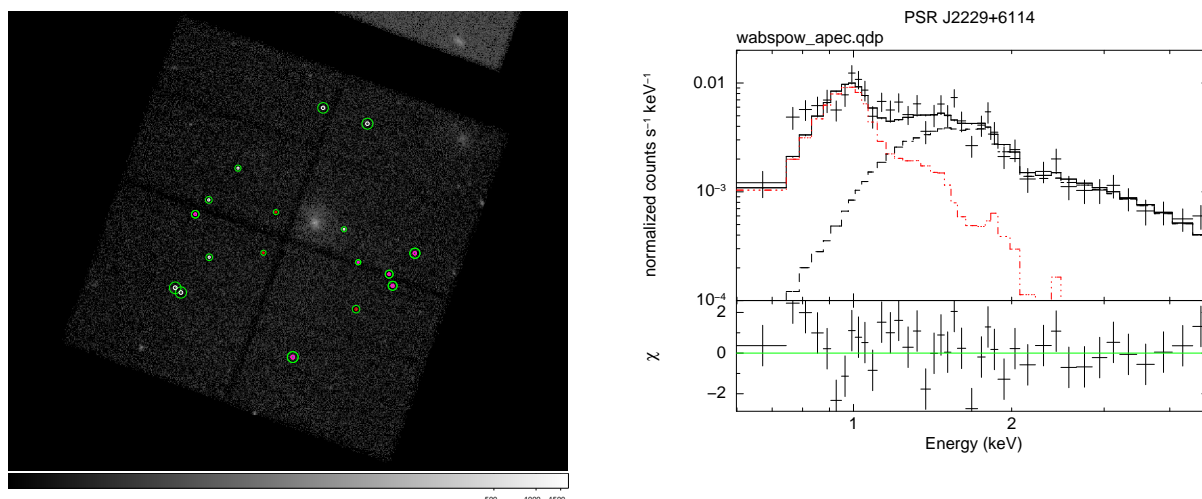


図 3: 左: PSR J2229+6114 領域の Chandra 衛星による X 線画像。Soft band (0.5 – 2 keV; 白丸)、hard band (2 – 8 keV; 赤丸)、その両方 (マゼンタ丸) で、それぞれ $S/N > 3$ で光軸から 400 "以内に検出された X 線源の位置を示す。点源の円と緑の円で作る円環部分がバックグラウンドとして取った領域。右: PSR J2229+6114 領域の soft band で検出された X 線源を重ね合わせた X 線スペクトル。べき関数型の放射に加えて、低エネルギー側に Bump 状放射と似た形の放射が存在する (赤)。

6 議論

すざくの新たな観測および ROSAT の再解析により、Masui et al. (2009) がすざくのスペクトルの中に発見した bump 状放射が、銀河面の複数の領域に存在していることがわかった。このことは、bump 状放射が観測される方向が銀河面の特殊な方向ではないことを示唆する。一方、Chandra の解析から、銀河面には bump 状放射と似たスペクトルを持つ点源が存在することがわかり、それらを加算した強度は、すざくが観測した $\ell = 235^\circ$ の bump 状放射の flux の 15%、 $\ell = 123^\circ$ の bump 状放射の flux の 10% であった。これは点源が全て星であると仮定したモデルから期待される量 (30%) の 1/2 である。Bump 状放射が全て真に空間的に広がった高温プラズマであると、高温プラズマの圧力は銀河面の全圧力を超えてしまう。しかし、約 1/2 は星起源であり、残りが真に空間的に広がった高温プラズマであれば、全圧力を超えることは避けられる。一方、本論文で構築した星の $\log N - \log S$ モデルは、近傍の限られた星の観測に基づいた X 線光度分布関数、回転楕円体で近似した星の数密度分布を仮定しており、大きな不確定性がある。従って、Chandra で分解できない暗さのところにモデルよりも多くの星が存在し、それが残る bump 状放射を全て説明する可能性も否定できない。

今後、M-band 問題の解決のためには、すざく衛星、あるいは同等の感度を持つ観測装置による銀河面のより広い領域観測と、Chandra よりも高感度な点源観測が必要である。本論文は、銀河からの 0.4-1 keV の X 線放射における星の寄与の理解の重要性を示している。このことは、たとえば、通常銀河、楕円銀河の X 線放射の研究においては星の寄与を検討する必要があることも示唆する。また、0.4-1 keV の X 線は、可視光や近赤外線に比べて銀河面をより遠くまで見通すことができるので、将来的には、X 線を用いてより遠方の星、特に dM 星の分布を計測することによって銀河構造の研究に寄与できる可能性も示している。