

「すざく」が解明した銀河中心の謎

小山 勝二

〈京都大学大学院理学研究科 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉

e-mail: koyama@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp



「すざく」搭載の X 線 CCD カメラ (XIS) による銀河中心観測で筆者らは、1) 広がった X 線放射が大規模な超高温プラズマ球 (温度は 7,000 万度) であることを証明し、2) 多数の超新星残骸とスーパーバブルの候補を発見し、そして 3) 大質量ブラックホールの 300 年前の大爆発と減光の叫びの木霊を聞いた。これらは XIS の性能を極限まで追求して初めてなした成果である。

1. はじめに

X 線天文衛星「ぎんが」は銀河中心とその周辺から半径 500 光年ほどに広がった 6.7 keV line (FeXXV- K_{α}) 放射を発見した^{1),2)}。これは約 1 億度の大規模な超高温プラズマ球の存在を示唆する。もしこれが真に拡散成分なら過去 10 万年以内に超新星千-1 万個分のエネルギー供給を必要とする。一方「あすか」は巨大分子雲 Sgr B2 から 6.4 keV line (FeI- K_{α}) 放射を発見した³⁾。もし、これが X 線照射 (X 線反射星雲) によるのなら、銀河中心の大質量ブラックホール Sgr A* が 300 年前に現在より 100 万倍も X 線で明るかった、つまり銀河中心大爆発の有力な証拠になる。このように銀河中心の活動性を解明する鍵は輝線が握っている。「すざく」⁴⁾ 搭載の X 線 CCD カメラ (XIS)⁵⁾ はこの謎にいちどむ最適の装置である。その観測と解析、そして結果を紹介する。

2. 「すざく」の特徴と銀河中心

日本の 5 番目の X 線天文衛星「すざく」は、京大、阪大、宇宙研、MIT ほかが共同開発した最新鋭の X 線 CCD カメラ (XIS) を搭載している⁵⁾。他の衛星にない特徴として、酸素の輝線あたり (0.5-0.7 keV) の高い分光能力 (有効面積とエネルギー分解能) が「公式発表」である。しかし XIS の最大

の武器 (筆者は確信しているが、ややもすると無視され、あるいは認識されていない) は鉄の KX -線 (~6 keV) から 12 keV のバンドにおける高分光撮像能力、エネルギー分解能のみでなく圧倒的に低い雑音、である⁵⁾。図 1 に銀河中心の広がった X 線放射のハードバンド (5.5-11.5 keV) 領域でのスペクトルを示す。6-7 keV にある 3 本の輝線は左から 6.4 (FeI), 6.7 (FeXXV), 6.97 keV (FeXXVI) K_{α} 線。6.97 keV のすぐ右には 7.05 keV (FeI- K_{β} 線) がある。7-8 keV バンドにある輝線群は FeXXV,

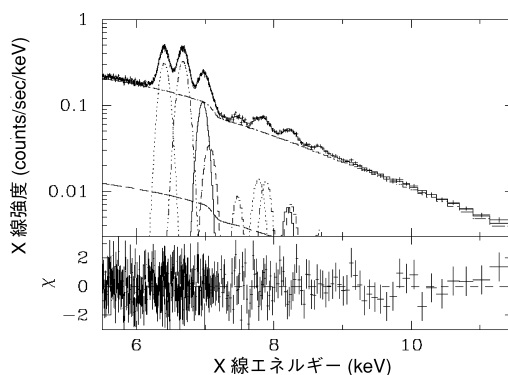


図 1 銀河中心の広がった X 線放射のスペクトル (5.5-11.5 keV). 6-7 keV にある 3 本の輝線は左から FeI, FeXXV, FeXXVI の K_{α} 線。FeXXVI- K_{α} 線のすぐ右に FeI- K_{β} 線がある。7-8 keV バンドにある輝線群は FeXXV, FeXXVI の K_{β} 線と NiI, NiXXVII, NiXXVIII の K_{α} 線である (Koyama, et al., 2007b より転載)。

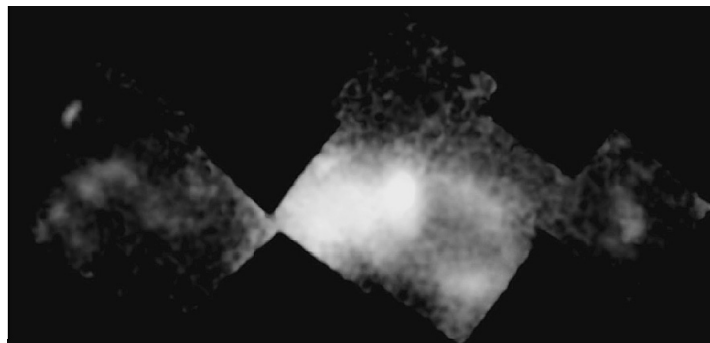


図2 2.45 keV (緑), 6.4 keV (青) および 6.7 keV (赤) line の合成図 (カラー図は表紙にあり). 寸法は縦 (銀緯) が約 ± 0.2 度, 横 (銀経) が約 ± 0.5 度であり, 中央の白く光る場所が銀河中心 (Sgr A*) とその近傍の SNR Sgr A East. 左端の青い領域が Sgr B2 分子雲, 近くの赤い広がりが新 SNR (G 0.61-0.01), 左上の赤い明るい天体は特異な星である.

FeXXVI の K_{β} 線と NiI, NiXXVII, NiXXVIII の K_{α} 線である. 8-12 keV ではほとんど構造がない. ここに示したエネルギーバンドでのスペクトルの質は「すざく」が Chandra, XMM-Newton をはるかに凌駕する. この利点がいままでにない, 新たな銀河中心の観測と解析, そして成果を生んだ.

XIS の優れた分解能はこのような輝線をよく分解する. この利点を活かして, 特徴的な輝線, 2.45 keV (SXV=He-like K_{α}), 6.4 keV および 6.7 keV line の合成カラー図を作り, 全体を概観してみよう. 図2がそれである.

3. 銀河中心 X 線は大規模, 超高温プラズマか

図2からまずわかることは, 赤い領域が広く覆っていることである. 6.7 keV line を放射する大規模な拡散 X 線成分である. 6.7 keV line (FeXXV- K_{α}) と 6.9 keV line (FeXXVI- K_{α}) は同一起源であることは疑いない. 問題はその起源である. X 線天文研究者なら, だれでもすぐに超高温プラズマが頭に浮かぶ. それが常識である. 筆者も「ぎんが」衛星で 6.7 keV line を発見したとき超高温プラズマが頭に浮かんだ^{1), 2)}. 実際に観測データをプラズマモデルで解析すると温度は約 1 億度になる. これが大きな問題になった. 超高温プ

ラズマは銀河の重力で引き止めておくことができない. プラズマのサイズは数百 pc だから, 約 1-10 万年で散逸してしまう. 一方, このプラズマの総エネルギーは 10^{53-54} erg (超新星 100-1,000 個分) と評価できるから, 過去 1-10 万年の間に超新星 100-1,000 個分のエネルギー注入が必要になる^{1), 2)}. これはたいへんなことである. とても信じられない. そんなわけで, 6.7 keV と 6.9 keV line の起源は超高温プラズマでなく, 鉄原子核 (宇宙線) が水素原子分子から電子を奪い取る (電荷交換反応) とする説が浮かび上がった (電荷交換反応については本特集 7 月号 (2007 年 7 月) の藤本龍一らの稿を参照).

まず, 6.7 keV line を考えよう. これは表 1 のようなエネルギーをもつ微細構造線の複合線である. どんな X 線 CCD でもこれら微細構造線は分解できない. 反応により, 微細構造線の間で強度比が違えば, 平均 (中心) エネルギーに違いが出

表 1 6.7 keV line の微細構造.

| Name | Transition | Energy (eV) |
|-----------------------------|--------------------------------|-------------|
| Resonance line (<i>r</i>) | $1s^2 \ ^1S_0-1s2p \ ^1P_1$ | 6,700.5 |
| Intercombination line | | |
| (<i>x</i>) | $1s^2 \ ^1S_0-1s2p \ ^3P_2$ | 6,682.4 |
| (<i>y</i>) | $1s^2 \ ^1S_0-1s2p \ ^3P_{01}$ | 6,667.6 |
| Forbidden line (<i>f</i>) | $1s^2 \ ^1S_0-1s2s \ ^3S_1$ | 6,636.7 |

る。6.7 keV の起源が高温プラズマ＝衝突励起なら、共鳴線の強度は禁制線より強い。荷電交換ではその逆である。その結果 6.7 keV line の中心値は前者では 6,680–6,685 eV、後者では 6,666 eV になる。これらの値は実験室、および標準的なプラズマコードが予言する値であり信頼できる。筆者らはこのエネルギーの違いを観測的に明らかにするため、XIS のエネルギースケールを徹底的に調べ上げた。詳しくは Koyama, et al., 2007b を参照していただきたい。そのエネルギー較正の結果、6–7 keV あたりでの絶対エネルギーの誤差は、CCD 全面にわたって、数 eV になった。CCD としては驚異的な精度である。

さて筆者らが観測した銀河中心の 6.7 keV line の中心値は 6,680 eV であった。これは高温プラズマ＝衝突励起の予言値と一致し、荷電交換の予言値より有意に高い。すなわち 6.7 keV line は高温プラズマ起源と結論できる。XIS の驚異的なエネルギー精度を達成したから、このような綺麗な議論が可能になったのだ。

次に 6.9 keV line の起源を考えよう。6.7 keV line と違い、内部構造が簡単で、本質的に 1 本の輝線といってよい。実際、図 1 のスペクトルの輝線部分をガウス関数でフィットすると、幅が 20 eV 以下の狭い輝線となる。もし荷電交換なら、鉄の原子核の速度は $1,000 \text{ km s}^{-1}$ 以下に相当する。このような低速衝突では電子の相対エネルギーは低いので、電子の多くは高励起（例えば主量子数 $n=8$ 以上）で小さな角運動量（例えば p 状態）状態に入る。この状態 (8p) は基底状態 (1s) に直接遷移できる。したがってそのエネルギー差、ライマンシリーズのリミット付近 ($\sim 9 \text{ keV}$)、に強いこぶがでる。ところが図 1 からわかるようにそのような構造は全くない。これは荷電交換説を完全に否定し、超高温プラズマ説をサポートする。こんなエレガントな議論ができたのも XIS のハードバンドにおける雑音が圧倒的に低いからである。

さて、6.7 keV と 6.9 keV line の起源が超高温プ

ラズマであることが確定した。筆者らは FeXXV, FeXXVI, NiXXVII, NiXXVIII の K_{α} , K_{β} 線の強度測定にも成功している。これらのライン強度比から、超高温プラズマの電離温度と電子温度が独立に求まる⁶⁾。その結果、電離温度＝電子温度＝6.5 keV と決まった。すなわち衝突電離平衡、温度 7,000 万度の大規模な超高温プラズマであることを疑う余地ない信頼度で決定したのである。重要なことは、いままで連続成分の形状からのみで決めざるをえなかった電子温度を初めて輝線強度比 (K_{β}/K_{α}) で決めることができたことである。

輝線強度比のみから衝突電離平衡、温度 7,000 万度と決まると、逆に連続成分の中に、非熱的成分が含まれていることが判明した。この成分の存在は銀河中心付近で宇宙線加速が効率的に行われていることを支持する。筆者らが実証した熱的成分や非熱的成分の分離方法は SNR、楕円銀河、銀河団などにも適用できるので、きわめて教訓的といえる。従来の方で解析すると「銀河中心は温度 10 keV 以上の電離非平衡プラズマである」と大きな間違いと誤解を招いたであろう。SNR、楕円銀河や銀河団のかつての解析でもこのような危険性をはらんでいたはずだ。

銀河中心の X 線放射が超高温プラズマ起源で

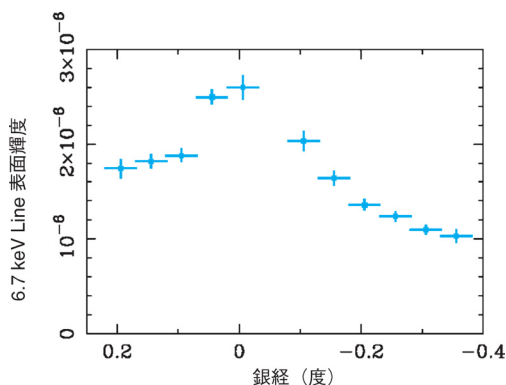


図 3 6.7 keV line の銀河面に沿った強度分布。分布は左右非対称である。0 度のすぐ右のデータの欠如は SNR Sgr A East を除いたことによる (Koyama, et al., 2007b より転載)。

あることははっきりした。次の重要な問題は、これが分解できない多数の点源（星）か希薄なガス成分かということである。ここでも 6.7 keV line が鍵を握る。銀河面に沿って 3'×6' の短冊状に分け、それぞれのスペクトルを求め、それから 6.7 keV line 強度を抽出した。それをプロットしたのが図3である。図3からわかるように 6.7 keV line の強度分布は銀河中心に対し、左右非対称である。星の分布は左右対称のはずだから、6.7 keV line の主要な起源は多数の点源（星）の集まりではない。残された可能性は真に希薄なプラズマからの放射である。

4. 高電離の特性 X 線は何を見たか

「すざく」は鉄の特性 X 線の銀河中心付近の分布観測に初めて成功した。多くの超新星残骸は大量の重元素を含むので、これは予想もしなかった若い超新星残骸 (G0.61+0.01) の発見や確認につながった⁷⁾。このことは未発見の超新星残骸が高電離の特性 X 線を使えばまだ多数発見できることを意味する。そこで SXV の K_{α} 線 (2.45 keV) の図をつくってみた (図4)。これは若い SNR に典型的な温度、1 keV のプラズマ分布に相当するからだ。図4から明らかのように、SNR 候補がいくつも見つかった。とくに重要な新発見は巨大なループやアーク状の構造の発見である。銀河中心付近にいくつものスーパーバブルが存在しているのだろう。

5. 銀河中心 (Sgr A*) の過去の雄叫びを X 線エコーで聞く

「あすか」衛星は銀河中心から 300 光年ほどの距離にある巨大分子雲 Sgr B2 から 6.4 keV line 放射を発見した³⁾。これは中性の鉄の K_{α} X 線である。分子雲は低温だから通常では絶対に X 線は出さない。しかし、特殊な条件下で外部からの強い X 線や電子線に照射されると 6.4 keV の輝線を放射する。前者の場合を筆者らは「X 線反射星雲」と名づけた⁸⁾。後者はまさに実験室における X 線発生装置そのものである。「すざく」はこの 6.4 keV の輝線の銀河中心での分布撮像に初めて成功した。図2の青で示したところである。

さて、この 6.4 keV の輝線の起源、分子雲を照射しているのは X 線だろうか、それとも電子線だろうか。これも発見当初からの論争だった。これを区別する物理量はまず 6.4 keV line の等価幅である。6.4 keV 輝線放出に関しては、内殻 (K-shell) 電子の電離が X 線か電子線かという差だけで、あとの素過程は全く同じである。背景となる連続 X 線がトムソン散乱 (X 線照射) か制動放射 (電子線照射) かによって強度が異なるので、等価幅に違いがでる。その値は初期条件で多少の違いはあるが、1–2 keV (X 線照射)、0.3–0.6 keV (電子照射) である。「すざく」が取得した最高品質の Sgr B2 分子雲 (図1の左端) のスペクトルと比較してみよう (図5)。

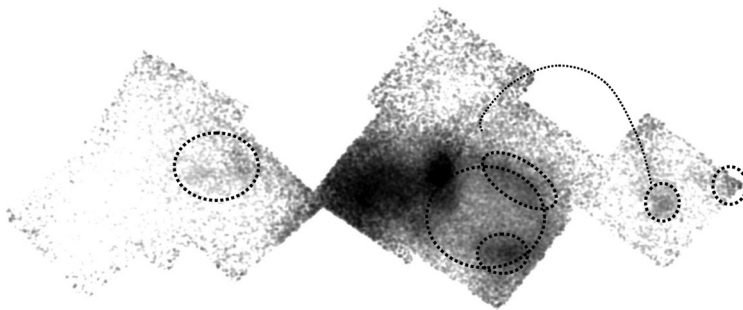


図4 銀河中心付近 500×100 光年の高電離硫黄 (左) の特性 X 線分布。ところどころにある塊が新たに発見された超新星残骸、スーパーバブルの候補。

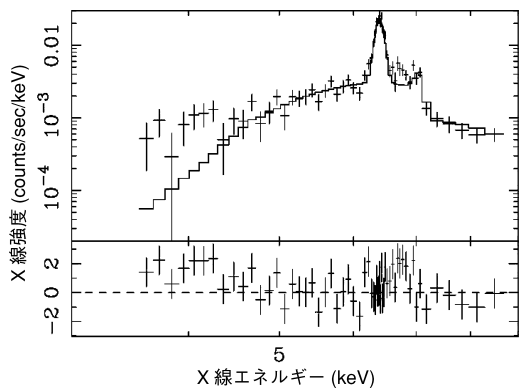


図5 Sgr B2のX線スペクトル (Koyama, et al., 2007d より転載).

図5のスペクトルを解析すると、等価幅は1.1 keV となった⁹⁾。他の分子雲でも1-2 keV ほどである。これらの値はX線照射の場合と一致し、この説を支持する。ところが反論がでた。銀河中心分子雲中の鉄組成が宇宙組成の3-4倍なら、電子照射でも説明がつくというのである。

では7.1 keV 吸収端の深さを検討しよう。X線照射の場合は内殻電離の最大断面積は7.1 keV 吸収端にあり、その値は 10^{-24} cm^2 、つまり光学的厚さは $N_{\text{H}} \sim 10^{24} \text{ H cm}^{-2}$ になる。一方、電子照射の

場合は $N_{\text{H}} \sim 10^{21-22} \text{ H cm}^{-2}$ である。図5のスペクトル解析では $N_{\text{H}} = 9.6 \times 10^{23} \text{ H cm}^{-2}$ となった⁹⁾。この値はX線照射の場合によくあう。つまりX線照射説を支持する。ところが、またしても反論がでた。“もし、電子照射がわれわれから見て分子雲の裏側なら、そこで発生したX線は分子雲自身の吸収を受けるから、大きな吸収量も説明できる”。“ああ言えばこう言う”と文句をつけたいが、一概に否定もできない。

ついに決定的な事実が発見された。Sgr B分子雲の強度を「あすか」(1994年)と「すざく」(2005年)で比較したところ「あすか」から「すざく」にかけて6.4 keV 強度が約半分に減少したのだ(図6)。Sgr B2のサイズは10光年以上ある。このような巨大な天体が10年間で強度変動できるには光の速度で相互作用が伝わらねばならない。電子照射では不可能であり、X線照射でしかありえない。

こうしてX線反射星雲説は少なくともSgr B2分子雲では確実なものになった。筆者らが描くシナリオは以下である。

“300年前にSgr A*は現在より100万倍も明るく輝き、その強いX線が300年経ってSgr B2に到達した。そのときの再放射(6.4 keV line)と反

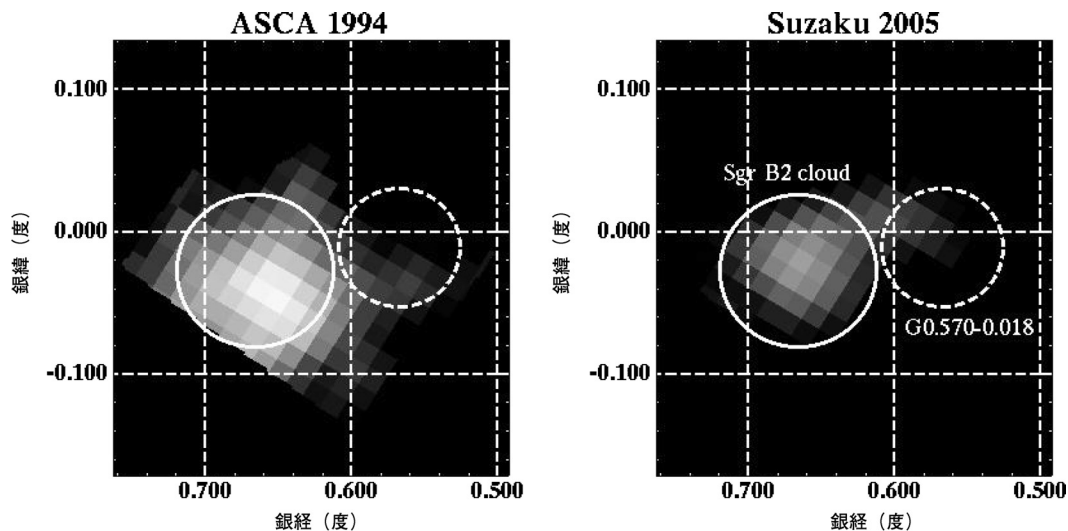


図6 Sgr B分子雲の6.4 keV lineの1994と2005年の姿、明らかな時間変動が見られる。

射（連続）X線を今X線反射星雲として見ている。Sgr A*のX線は減少に転じ、10年間で強度が半減した。それが「あすか」と「すざく」の強度変動に反映した。そしてSgr A*はさらに暗くなって現在に至っている”。われわれは山々で反射して、遅れてやってくる木霊を聞いているように、X線反射星雲を通して、300前のSgr A*の雄叫びを聞いたわけだ。

6. 初期観測で何を学んだか

銀河中心はだれでも興味をもつ。先行した衛星ChandraやXMM-Newtonでも、深いサーベイ観測が行われた。だから“いまさら何で「すざく」で”という抵抗が少なからず、「すざく」関係者にあったようだ。筆者は“「すざく」は必ず新たな地平を拓く”と反論し、かなりの観測時間を認めてもらった。正直なところ、そのときは100%の確信があったわけではない。しかし今は100%の確信をもっていえる。“「すざく」は銀河中心研究で名を残す衛星になる”。

しかし、通り一遍の観測や解析ではChandraやXMM-Newtonに比して、格段の成果は期待できない。解析では本稿で述べたように、CCDの限界まで追求することである。観測方法はChandraやXMM-Newtonの真似をして広いエネルギーバンドではダメだ。6.4, 6.7, 2.45 keV lineなど輝線のみを含む狭いバンドで深く観測することである。これが銀河中心の謎を解き、さらに全く新しい描像を浮かび上がらせる。その例を事実にして本稿は述べたつもりである。筆者らはChandraとXMM-Newtonの後追いや単なる確認、精密化を目指すのではなく、新たな地平を開きたいのである。本稿で立証したその確かな戦略と方法論を「すざく」関係者、観測提案レフェリーにぜひ理解していただきたい。

謝 辞

PASJ「すざく」特集号に掲載された一連の銀河

中心論文は筆者の研究室（京大宇宙線研究室）のスタッフと大学院生の緊密な共同研究の果実である。研究室のすべてに感謝したい。とくに乾達也、兵藤義明、内山秀樹君らの寄与が大きい。また本研究の柱、XISは、日米の多機関にわたる多くの研究者の永い共同開発によるものである。XIS関係者、ならびに「すざく」の製作、運用にかかわったすべての皆さんに深く感謝する。

参考文献

- 1) Koyama K., et al., 1989, Nature 339, 603
- 2) Yamauchi S., et al., 1990, ApJ 365, 532
- 3) Koyama K., et al., 1996, PASJ 48, 249
- 4) Mitsuda K., et al., 2007, PASJ 59, S1
- 5) Koyama K., et al., 2007a, PASJ 59, S23
- 6) Koyama K., et al., 2007b, PASJ 59, S245
- 7) Koyama K., et al., 2007c, PASJ 59, S237
- 8) Murakami H., et al., 2001, ApJ 558, 687
- 9) Koyama K., et al., 2007d, PASJ 59, S221

Suzaku Solved a Mystery of the Galactic Center X-rays

Katsuji KOYAMA

Department of Astronomy, Kyoto University,
Oiwake-cho, Kitashirakawa, Sakyo-ku, Kyoto 606-
8502, Japan

Abstract: The K_{α} line features of FeXXV (6.7 keV) and FeXXVI (6.97 keV) favor collisional excitation origin for the Galactic Center X-rays. The ionization and electron temperatures determined from the line flux ratios of K_{α} and K_{β} in highly ionized Fe and Ni indicate that the Galactic Center diffuse X-rays are due to a high temperature plasma in ionization equilibrium. The 6.7 keV line map exhibits a local excess, which could be a new young SNR. Similarly, the 2.45 keV line (SXV) map exhibits many sub-structures, which would be either new SNRs or supper bubbles. The 6.4 keV line also exhibits many clumps. Sgr B2 shows a time variability in 10 years, which provides strong evidence that Sgr B2 is an X-ray reflection nebula irradiated by strong X-rays from the past (300 years ago) active Sgr A*.