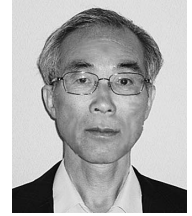


「すざく」がみた銀河中心の活動性

小山 勝二

〈京都大学名誉教授〉

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



銀河中心 X 線拡散放射 (GCDX) の最大の特徴は鉄元素からの強い K 殻遷移線である。それは中性鉄 (Fe I), ヘリウム状の鉄 (Fe XXIV) と水素状の鉄 (Fe XXV) からの放射で、エネルギーは 6.4 keV, 6.7 keV と 7.0 keV である。「すざく」の高いエネルギー分解能と低い雑音 (特に硬 X 線領域) はこれらの強度を正確に導くことに成功した。6.7 keV 線の経度方向と緯度方向の分布強度から GCDX の領域は $0.5^\circ \times 0.2^\circ$ (e-folding 値) となった。また 6.4 keV と 6.7 keV 線は、連続成分強度 (5–10 keV) との比例関係からずれるが、1 : 2 の強度配分の和は比例関係にあることがわかった。GCDX は一方では 6.5 keV プラズマと 6.4 keV 線+べき関数で記述でき、両者の強度はほぼ等しい。この一見矛盾する事実は 1/6 ほどの point-source の寄与を考慮すれば解決する。この寄与はスケールハイトの議論からの結論と一致する。視線方向の分子雲分布はスペクトルの吸収と 6.4 keV 線強度との相関から導出された。この分布が Sgr A* を焦点とする等到達時間線 (放物線) の上にほぼ乗る。分子雲からの 6.4 keV 線の時間変動は、過去 300 年ほどの Sgr A* のフレアと 10 年スケールの時間変動を示唆する。

1. はじめに

X 線天文学に残る発見は銀河系内円盤 (Galactic Ridge: 以後 GR) と銀河中心 (GC) から、約 1 億度もの超高温プラズマの存在を示唆する高電離鉄 K_α 線 (6.7 keV 線) が発見されたこと^{1), 2)} である (以下のそれぞれ、GRDX, GCDX と呼ぶ)。20 年以上経過した現在も GRDX, GCDX の起源は未解決な重大問題である。

ヘリウム状と水素状の鉄 K_α (6.7 と 7.0 keV) 輝線の強度比から確定した GCDX のプラズマ温度は約 7,000 万 K, その熱エネルギーは 10^{53-54} erg もの巨大さである。これは超新星 (SN) 100–1,000 個が解放するエネルギーに相当する。この超高温プラズマは銀河系の重力では束縛しきれず、冷却時間よりも早い時間で系外に散逸してしまう。その時間スケールは 10 万年である。したがって、GC プラズマを維持するためには 10 万年に

10^{53-54} erg のエネルギー注入がなくてはならない。すざく衛星は GCDX で真に拡散成分と点源 (星) 成分を定量評価した。

あすか衛星は GCDX から中性鉄の K_α 線 (6.4 keV 線) を発見した²⁾。その起源は X 線照射 (XRN) によると思われるが、照射源は謎であった。すざく衛星は 6.4 keV 線の照射源は過去に明るかった Sgr A* であることを示した。

2. 輝線の銀経、銀緯分布

図 1 右に 7.0 keV と 6.7 keV 線強度比分布を示した。これはプラズマの温度分布とみなされる。GRDX と GCDX の輝線の起源が共に point source なら温度は一定であるはずだ。結果は GCDX のプラズマ温度 (6.7 keV と 7.0 keV の強度比) は GRDX より高かった。

すざく衛星は 6.4, 6.7 および 7.0 keV 線の強度分布を調べた。図 1 左は 6.7 keV と 7.0 keV 線の

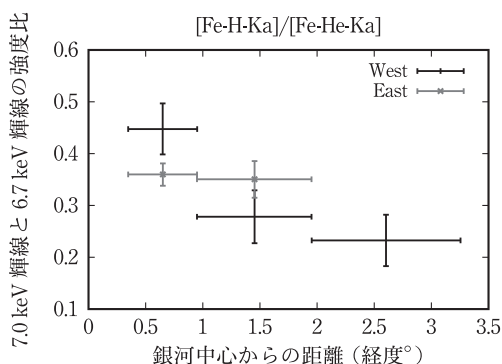
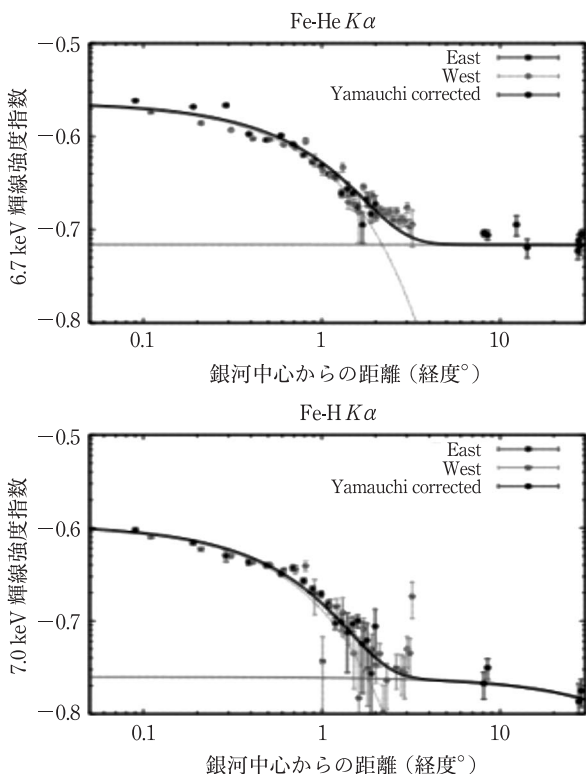


図1 左：6.7 keV (左上)と7.0 keV (左下)線の銀河面に沿っての強度分布. 黒は東側 ($l > 0^\circ$), グレーは西側 ($l < 360^\circ$). 左右 (東西)の非対称があるが, グローバルには2成分の指数関数分布でよく再現される. 右：7.0 keVと6.7 keV線強度比 (プラズマの温度) 分布.

銀河面に沿っての強度分布である. 東側 ($l > 0$) と西側 ($l < 360$) で非対称が見られるが, グローバルには銀経 (l) 1度あたりで, 分布が Flat に変わる. 実際2成分の指数関数分布でよく再現され, e-folding scale は0.5度と30度である. 前者が GCDX, 後者が GRDX であろう.

図2はGC中心付近 (l, b) = $(-0.05, -0.05)$ での銀緯 (b) 方向の6.7 keV線の強度分布である. 明らかに2-scale height成分があることがわかる. 一つはscale height 0.2度成分であり, これはSNなど massive star 起源であろう. 他はscale height 1度の成分であり, white dwarf, active stars など low mass stars 起源であろう. Revenitzev らは銀河中心付近をChandraで深く観測し, GRDXの6.7 keV付近の大部分を点源(星)に分離した³⁾. この位置は図2の矢印の位置である. これはほとんどが1度のscale height成分であることがわかる. これを中心方向に外挿すると, GCDXの10-20%

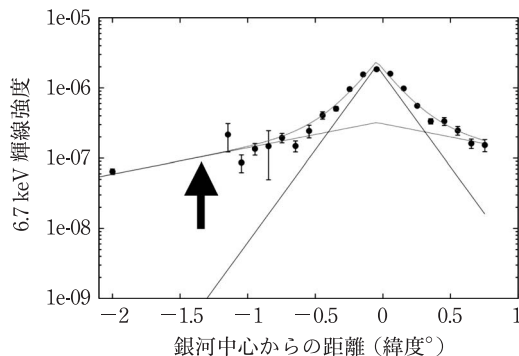


図2 6.7 keV線強度の緯度分布である. 二つのscale height成分があることがわかる.

が点源(星)であると推定できる.

3. 輝線による連続成分分離

GCの2視野からスペクトルを取得し, 5-10 keV bandで現象論的モデル (Power-law plus Iron K-edge plus 5 Gaussians) でFitし, 6.4 keV線, 6.7

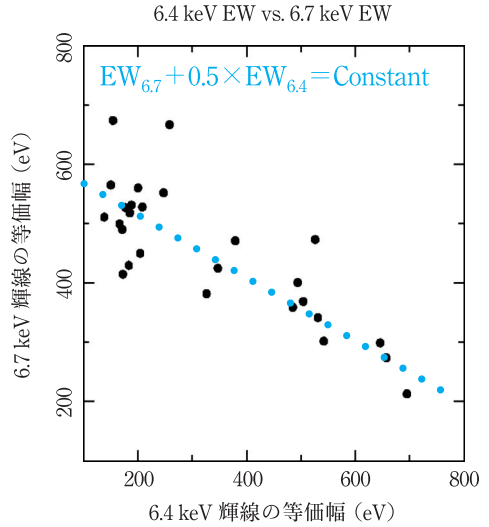
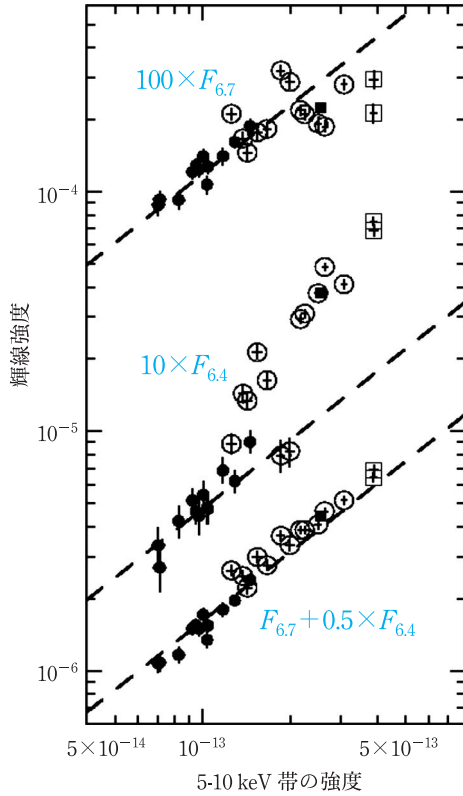


図3 左: F_{5-10} に対する $F_{6.7}$ (上) と $F_{6.4}$ (中) の強度相関図。黒丸は GC 西側, 白丸は東側。いずれも高強度側で比例関係 (波線) から大きくずれている。一方 $F_{6.7} + 0.5 \times EW_{6.4}$ (下) と F_{5-10} の間にはきれいな比例関係がなりたっている。
右 6.4 keV 線と 6.7 keV 線の等価幅 ($EW_{6.4}$ $EW_{6.7}$) の相関図。点線は $EW_{6.7} + 0.5 \times EW_{6.4} = \text{Constant}$ の関係。

keV 線と 5-10 keV バンドの強度 ($F_{6.4}$, $F_{6.7}$ および F_{5-10}) と 6.4 keV 線と 6.7 keV 線の等価幅 ($EW_{6.4}$ および $EW_{6.7}$) を求める。その相関を示したのが図3である⁴⁾。

図3左(上, 中)からわかるように, F_{5-10} と $F_{6.7}$ や $F_{6.4}$ の間に良い比例関係はなく, 線強度の強い領域で比例関係からのずれが大きい。この事実はこれらの成分が同一起源でないこと (すべてが point source 起源ではありえない) を示す。では, F_{5-10} は $F_{6.4}$ と $F_{6.7}$ とどんな関係になっているだろうか? そこで, $F_{6.7} + 0.5 \times F_{6.4}$ と F_{5-10} との相関をとる。すると 1 桁以上にわたって, 綺麗な比例関係が発見された。これを別の形で表現したのが図3右である。これらの結果は F_{5-10} がほぼ 2 : 1 (1 : 0.5) の割合で, 6.7 keV 線と 6.4 keV 線に付随する成分に分解できることを物語る。

一方, 小山らは GC のスペクトルは輝線比 (7.0

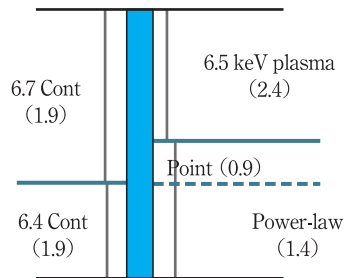


図4 GCDX の連続成分の分解。青い柱は GCDX の F_{5-10} の全 Flux を示す。右側は GCDX が 6.5 keV プラズマ (近似的に $\Gamma=2.4$) と power-law ($\Gamma=1.4$) に 2 等分されたことを示す。左側は GCDX が (現象的に) 1 : 0.5 (2 : 1) で 6.7 keV と 6.4 keV 線に分配されることを示す (本文参照)。この左右の配分比の“矛盾”は point sources (べきは $\Gamma=0.9$: 輝線は 6.7 keV が主要) の寄与が約 1/6 あるとすると解消する。

keV/6.7 keV) から決めた温度 6.5 keV のプラズマと $\Gamma=1.4$ の power-law 成分にほぼ 2 等分されることを明らかにした⁵⁾。また $F_{6.4}$ と $F_{6.7}$ (強度) もほぼ等しい⁵⁾。したがって GCDX のスペクトル強度はその約半分 (3/6) が 6.5 keV プラズマ (べきにするとほぼ 2.4), 残り半分 (3/6) はべき 1.4 の power-law である (図 4)。一見矛盾しているように見えるこの配分比は, 3/6 を占める power-law 成分のうち 2/6 が 6.4 keV 線に付随する成分 (べき = 1.9), 残りの 1/6 が point source 起源 (べき = 0.9, 6.4 keV 輝線は弱い⁶⁾) とすると説明できる。

4. 巨大分子雲帯の 3 次元分布

銀河中心における星生成やブラックホール成長などの解明に分子ガスの空間分布が鍵を握っている。前述のように銀河中心領域に一様に存在する超高温 (約 7,000 万度) のプラズマがあり, X 線を

放射している。分子雲はその中に浮かんでいる。この 2 次元分布は, 6.4 keV 線からわかる (図 5 上)。我々からみて分子雲の背後からである GCDX は分子雲で吸収されるが前面からの GCDX は吸収されない。我々が観測する銀河中心付近の X 線はこれらの混合になり, 混合比がプラズマ中の分子雲の位置 (奥行き方向) を表す。そこで Sgr B, Sgr C 領域を細分し, そのスペクトルを解析した結果が図下である。図 5 上と合成すれば分子雲の 3 次元の空間分布がわかる。それは約 30 度傾いた棒状の分布である⁷⁾。

5. 6.4 keV Clump の時間変動

最近, 二つの XRN(Sgr B2, Radio Arc) から, 数年の時間変動が見つかった⁸⁾⁻¹⁰⁾。その例を表紙図に示す。「あすか」(1994 年に観測) から Chandra (2000), XMM-Newton (2004), 「すざく」

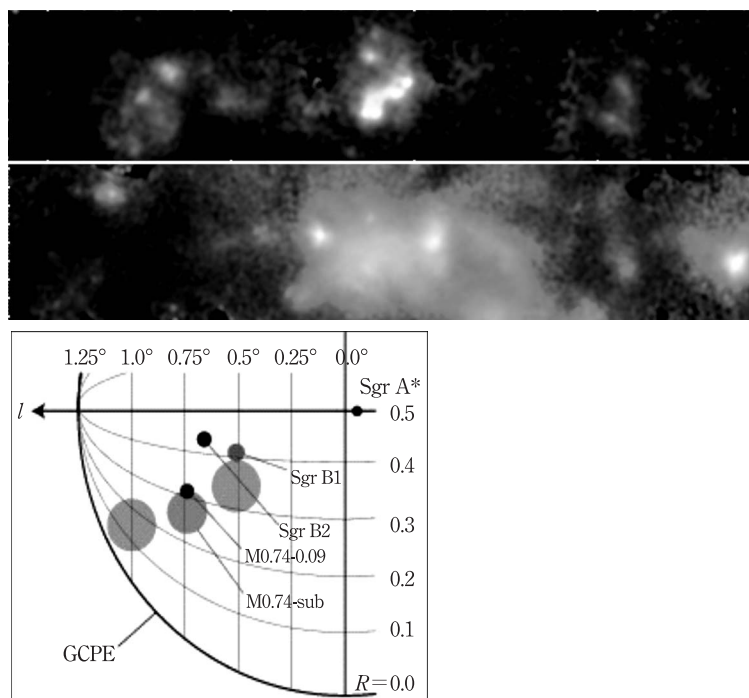


図 5 上: 6.4 keV 線の強度分布。これは分子雲の 2 次元投影図に相当する。中: 高電離イオウ輝線バンドの強度分布。GCDX の分子雲による吸収を受けやすいバンドである。東 (左) 側の Sgr B 領域では吸収が大きい (分子雲が手前にある) が, 西 (右) 側の Sgr C 領域では吸収が少ない (分子雲は背後にある)。下: スペクトル解析から決めた分子雲の奥行き分布。上図とあわせて 3 次元分布 (Sgr B 領域) になる。

(2005) の 10 年間にわたる Sgr B2 領域 (分子雲複合体) の観測から得られた 6.4 keV 表面輝度 (衛星間の相対感度の違いは補正してある) の変動を示した。10 光年サイズの天体が数年で全体の形態と強度を変えるほどに変動したのである。

「Chandra」と「XMM-Newton」の深観測があるにもかかわらず、これだけ多くの新たな成果が短期間で生みだされたことこそ、GC が宇宙物理学の宝庫であり、「すざく」に適した実験室であることを雄弁に物語る。特に強調したいのは、これらの発見は 6.4 keV、6.7 keV と 7.0 keV 線が基礎になったことである。新構造 (ソース) を従来の連続波 (ASCA, Chandra, XMM-Newton の観測戦略) で見ることに比べ、はるかに高いコントラストで浮かび上がらせたのだ。

参考文献

- 1) Koyama K., et al., 1986, PASJ 38, 121
- 2) Koyama K., et al., 1996, PASJ 48, 249
- 3) Revnivtsev M., et al., 2009, Nature 458, 1142
- 4) Koyama K., et al., 2008, PASJ 60S, 201
- 5) Koyama K., et al., 2007, PASJ 59S, 245
- 6) Munro M P., et al., 2004, ApJ 613, 1179
- 7) Ryu S., et al., 2009, PASJ 61, 751
- 8) Koyama K., et al., 2009, PASJ 61S, 255
- 9) Inui T., et al., 2009, PASJ 61S, 241
- 10) Munro M. P., et al., 2007, ApJ 656, 69

The Galactic Center Activities Observed with Suzaku

Katsuji KOYAMA

Professor Emeritus of Kyoto University

Abstract: The most pronounced features of the Galactic center diffuse X-rays (GCDX) are the K-shell transition lines from neutral (Fe I), He-like (Fe XXIV), and H-like (Fe XXV) irons at energies of 6.4 keV, 6.7 keV, and 7.0 keV, respectively. With the high energy-resolution and low background, particularly in the hard X-ray band, we obtain accurate fluxes of these lines. We constrain the GCDX region using the longitude and latitude distribution of the 6.7 keV lines; The GCDX is 0.5 deg and 0.2 deg for the longitude and latitude e-folding scales. Neither the 6.4 keV nor 6.7 keV line flux shows close proportionality to the continuum flux (5–10 keV band). On the other hand, the sum of the 6.4 keV plus 6.7 keV line fluxes with the ratio of 1 : 2 shows good proportionality to the continuum flux, hence we phenomenologically decompose the continuum flux of the GCDX into the 6.4 keV- and 6.7 keV-associated continua with the flux ratio of 1 : 2. The GC spectrum is also fit by the 6.5 keV-temperature plasma and the power-law of index 1.4 with the same flux. Based on these facts, we estimate that the integrated flux of point sources is 1/6 of the total GCDX flux, consistent with that derived from the scale-height analysis. We also quantitatively estimate the line-of-sight positions of the molecular clouds (MCs) from the absorption of the GCDX spectra and show that the MCs lie on the parabola with the focus at Sgr A*, and equi-delay time of about 300 light years. Thus Sgr A* exhibited a large flare about 300 years ago with the variability time scale of about 10 years.