

「すぎく」と銀河中心が織りなした 驚きのドラマ

小山 勝二

〈京都大学理学研究科 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉

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



銀河中心の電波源Sgr A*は約4百万太陽質量のブラックホールである。しかしこのブラックホールは何故か極めて静かである。最近Sgr A*は小規模（静穏期フラックスの最大50倍程度）な爆発を頻繁に起こしていることが観測された。もっと大規模な爆発が過去にあったか。「すぎく」はその確かな痕跡として複数のX線反射星雲の存在とそれらの時間変動を発見し、また別の痕跡候補として再結合優勢プラズマを発見した。その結論は「銀河中心の過去は現在よりはるかに活動的だった」。

1. はじめに、研究の背景

過去のX線天文衛星「てんま」と「ぎんが」は銀河面と銀河中心方向から約6.7 keVの強い輝線放射を発見した^{1), 2)}。それは高電離鉄(Fe)のK-shell X線、すなわち起源は高温(～10 keV)プラズマであることは疑いない(銀河高温プラズマ)。筆者はこれを真に拮がった成分(以後、拡散説)と考え、このプラズマの生成、維持のために巨大なエネルギーを供給した天体現象が過去にあったと提案した。魅力的な説だが、巨大エネルギー供給源が不明であった。それゆえ、対案が出された。弱い点源(Cataclysmic Variable; CV+Active Binary; AB)の集まり(点源説)である。

実は銀河高温プラズマの輝線エネルギーは電離平衡プラズマ(CIE)の予想より微妙に低く、場所によっても異なっていた。これは重要な意味もっていたのだが、当時は「超新星残骸のような電離優勢プラズマ(IP)であろう」と気にとめなかった。スペクトルの質がそれ以上の追求を許さなかったからだ。その本質解明の緒を開いたのは「あすか」である。6.7 keV輝線を6.4, 6.7, 7.0 keV

の3本に分離したのだ³⁾。それぞれ中性鉄、ヘリウム状鉄、水素状鉄のK-shell X線である。以後、それぞれFe-K α 、Fe-He α 、Fe-Ly α と表記する。ほかの元素も同様である。

特に強いFe-K α が巨大分子雲Sgr B2から観測された。筆者はこれを「過去のSgr A*の大爆発のX線エコー(X線反射星雲)」と考え、「Sgr A*は過去、高い活動のエポックがあった」と提案した。「Fe-He α とFe-Ly α を出す高温プラズマのエネルギー源はこの大爆発だったのだろう」という見解とともに。

「すぎく」は鉄輝線エネルギー付近では過去最高の感度とエネルギー分解能をもつ^{4), 5)}。その優位性を最大限生かし、Sgr A*の過去の高い活動性の発見と、それに密接に絡むであろう諸現象を発見し、銀河中心の実態を究明した。本稿は「すぎく」と銀河中心が織りなした約10年の壮大なドラマの実録である。

2. 銀河高温プラズマを3成分に分解する

「すぎく」はそのライフ約10年間、毎年銀河中

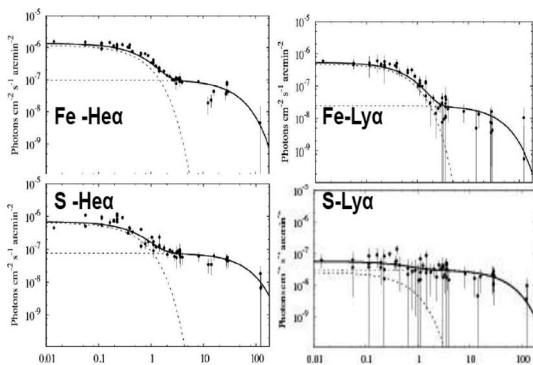


図1 鉄 (Fe) と硫黄 (S) の Heα と Lyα と銀河面強度分布. 点線がGXCEとGRXEの分布である⁶⁾. 横軸は銀河中心Sgr A*から銀径に沿った距離 (度).

心の拡散X線を観測した. 最大の特徴は強いK-shell X線の存在であった. そこで特に強い鉄と硫黄 (S) の Heα と Lyα の銀河面に沿う強度分布をつくり図1に示した. 分布の特徴は銀河座標 ($|l|, |b|$) $< (1^\circ, 0.5^\circ)$ に強度が集中していることであった. これをGalactic Center X-ray Emission (GXCE) と呼ぶ. その周りを囲む弱い放射をGalactic Bulge X-ray Emission (GBXE), 銀河面に沿う放射をGalactic Ridge X-ray Emission (GRXE) と呼ぼう.

図1に示すようにHeαとLyαの銀河面に沿った強度分布は鉄と硫黄で大きく異なる. 鉄は約7 keV, 硫黄は約1 keVのプラズマが放出するから, GCXEとGRXEプラズマは最低2温度成分 (~7と~1 keV) をもち, GCXEとGRXEではその混合比が互いに異なる. すなわち両者は同一起源ではないことを意味する.

3. Sgr A* がつくるX線反射星雲

GCXE中の高電離の鉄輝線 (Fe-Heα, Fe-Lyα) がスムーズな分布をする (図1) のに対して低電離の鉄輝線 (Fe-Kα) はクランプ状に分布し, 強度のピークは分子雲Sgr A, B, C, D, Eに一致していた. 図2にSgr B2のスペクトルを示す⁷⁾. 強いFe-Kαと7.1 keVの中性鉄吸収端が顕著である. これはほかの分子雲でも同様の特徴である.

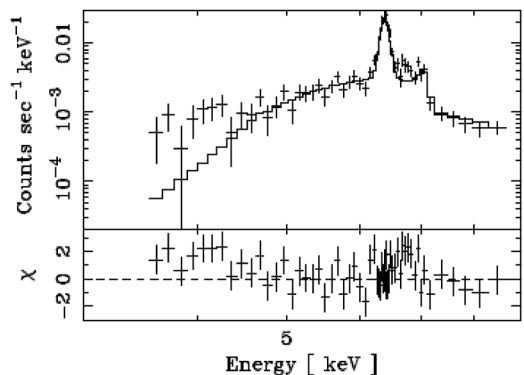


図2 Sgr B2のスペクトル. 強いFe-Kαと顕著な鉄吸収端 (7.1 keV) が見える⁷⁾.

Fe-Kαは中性鉄を含む分子雲に高エネルギー粒子 (陽子, 電子, X線) があたると生成される (蛍光X線). 鉄の吸収端の強度は $N_H \sim 10^{24} \text{ H cm}^{-2}$ に相当する. 陽子や電子はこんなに深く侵入できない. X線でのみ実現できる吸収端強度である. X線照射とすると, その強度は最低 $10^{37} \text{ erg s}^{-1}$ は必要であるが, そのように明るいX線源はどの分子雲の近くにも存在しない. 突発X線天体が候補になりうるが, 分子雲のサイズは数光年ほどだから, この光度が数年は維持されなくてはならない. そんな突発X線天体はいままで観測されていない.

結局残された可能性はSgr A*の巨大フレアでしかない. この説 (X線エコー) をX線反射星雲と命名し, すでに「あすか」時代にSgr B2観測結果に対して提唱したが³⁾, 当時は「そんなこと信じられない」と疑いの目で見られた. 無理もない, 提唱した本人も「勇気がいった」のだから. 「すぎく」はその疑いを完全に晴らした. Sgr B2のX線は年程度の短時間変動をしていたのだ⁸⁾⁻¹⁰⁾ (図3).

この発見は筆者にとっては新鮮な驚きであり, 感動的でした. 「数光年のサイズの拡散X線天体 (X線反射星雲) の強度が数年以内で大きく変動するとは!」. この発見に触発されて欧米の研究者らはXMM, Chandraを用いて, Sgr A分

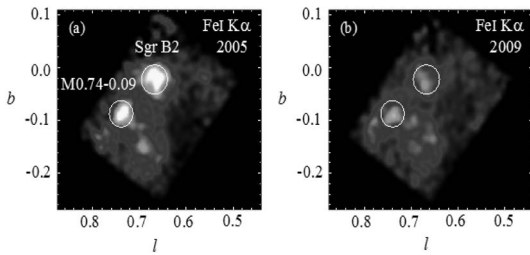


図3 「すざく」が観測したSgr B2からのFe-K α の時間変動。左は2005年、右は2009年の強度分布。時間の経過とともに急激に強度が落ちた¹⁰⁾。

子雲群からも同様な時間変動を発見した。減光のみでなく増光もあった。

集積された多くのX線反射星雲（X線エコー）を用いてSgr A*の光度曲線（フレア強度とエポック）の決定するにはSgr A*とX線反射星雲との真の距離が必要である。いかんせん、真の距離は他波長をもってしてもよくわかっていない。

真の距離（3次元位置）を決めるために、X線反射星雲がGCXEの中にありその吸収が大きいこと（ $N_{\text{H}} \sim 10^{24} \text{ H cm}^{-2}$ ），そこで視線上の位置によりGCXEスペクトルの吸収構造が異なることを利用した。この視線上の位置（3次元位置）決定方法を「X線トモグラフィー」と呼び¹¹⁾，Sgr B, C分子雲群の視線方向距離をX線として初めて決めた¹²⁾。それらの距離から算定した過去のSgr A*のX線強度曲線を図4に示す。現在のSgr A*のX線強度は約 $10^{34} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$ だから数百年前まではその10万倍以上も明るかった。

X線反射星雲（X線エコー）はGRXEの中にもあるかもしれない。図5はGRXEの銀経 $|l|=1.5\text{--}3.5^\circ$ の鉄輝線強度分布である¹³⁾。Fe-He α が東西対称なのに対してFe-K α は東側で強い。そしてここには分子雲のバーがある。「なぜ東側のみFe-K α の強度が高いか」の理由ははっきりしたわけではないが、これもX線反射星雲とすれば、Sgr A*の高い活動性は700–1,100年（投影された距離で評価）前までさかのぼることができる。すなわち、時間の経過とともに強度は減少し、図4に

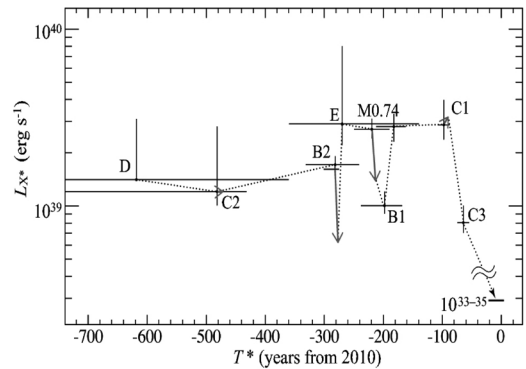


図4 3次元距離から決めたSgr A*のX線光度曲線。横軸の原点(0)は現在、左にlook-back time (year)¹²⁾。Sgr Dは写影距離を用いた。

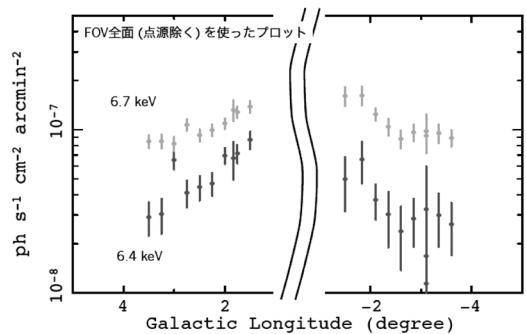


図5 GRXEの銀経 $|l|=1.5\text{--}3.5^\circ$ の鉄強度分布。Fe-He α 強度は東西対称なのに対してFe-K α は東側で大きい¹³⁾。

示した強度に連続的につながる。

4. 再結合優勢プラズマの発見

巨大フレアの別の痕跡は銀河中心から約 $1\text{--}2^\circ$ 南に発見されたプラズマ雲の中にあった。筆者はそのスペクトルをみて驚いた。銀河中心に限らず、通常のプラズマは電離平衡（CIE）または電離優勢プラズマ（IP）が理論的にも観測的にも常識である。ところが図6中段で明らかのように、再結合優勢のときのみ現れる再結合連続線のバンプ（Si-RRC, S-RRC）があったのだ。これは再結合優勢プラズマ（RP）に違いない¹⁴⁾（図下）。「銀河中心でこんな意外な事実が未発見だったと

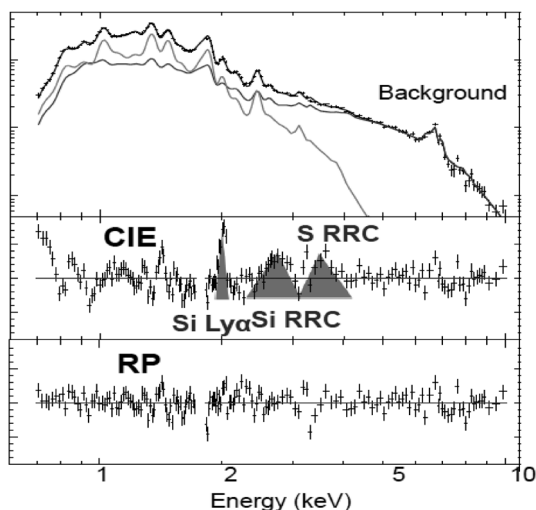


図6 GCから約1-2°南に発見されたプラズマ雲のスペクトル。CIEやIPプラズマでは記述できず、RPが必要だった¹⁴⁾。

は！」。

Sgr A*の過去の強いX線や粒子線が周辺ガスを選別的に電離し、強いX線や粒子線が消えた現在、プラズマは再結合のフェーズに入ったと考えればRPは説明できる。

電離の時期と光度の評価は難しいが、約 10^5 年前にSgr A*が巨大フレアを起こしたかもしれない¹⁴⁾。いまや時のスター、Fermi bubblesはさらに過去の巨大フレアを示唆している。Sgr A*は静かなブラックホールではなく活動的ブラックホールだったのだ。「すざく」はわれわれの固定観念を打ち破った。

再結合優勢プラズマ (RP) はHe α トリップレット (禁制線, 共鳴線, 中間結合線) に特徴的な強度比を与える。この特徴を利用すればAstro-HでSgr A*のごく近傍でRPが発見される可能性は高い。これはSgr A*の過去の活動性の確かな証拠を提供する重要な観測になるだろう。

5. 銀河中心の元素組成を決める

銀河中心付近の元素組成が太陽組成より高いことは光赤外観測から知られていた。銀河中心の活

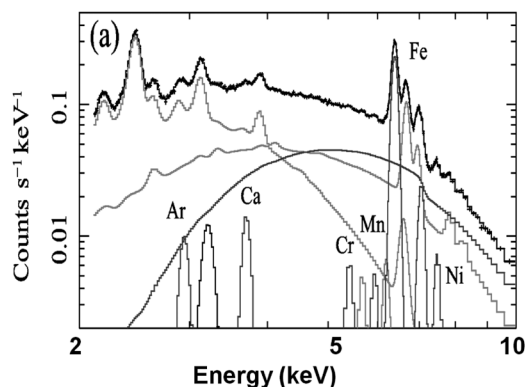


図7 Sgr A付近のスペクトル。共存する高温プラズマの高電離元素とX線反射星雲の中性元素の輝線が見事に分離できた¹⁵⁾。

発な星生成と超新星爆発 (SN) のためと思われる。図7はSgr A領域でのX線スペクトルである。この領域は高温プラズマとX線反射星雲が共存している。X線反射星雲からは中性鉄以外に中性の硫黄 (S), アルゴン (Ar), カルシウム (Ca), ニッケル (Ni) の輝線が初めて見つかった¹⁵⁾。一方GCXEの高温プラズマは高電離S, Ar, Ca, Fe, Ni輝線を放射していた¹⁵⁾。これら輝線生成の素過程は単純で明快だから、観測強度から信頼おける元素組成がだせる。すなわち高電離輝線からはS-Caは1.7-1.9太陽組成, Feは1.2-1.3太陽組成だった^{6), 15)}。その比は約1.5である。

一方、中性輝線からはFeに対するAr, Caの比は約1.4となり¹⁵⁾、これらは互いに一致する。Ar, Caの組成は高い (1.7-1.9倍の太陽組成) がFeの組成は対して高くない (約1.2太陽組成)。「すざく」が出したX線としては最も信頼性の高い元素組成評価の結論である。

重力崩壊型SN (CC-SN) は中間質量元素 (S-Ca) を多く合成し、核暴走型SN (Ia-SN) では鉄元素を多く作る。すなわち、銀河中心ではIa-SNよりCC-SNの頻度が高かったようだ。「この活発な超新星活動もまたGCXEの高温プラズマ形成に寄与した」のだろう¹⁶⁾。

GCXEには驚きが多い。例えばSgr Dの付近に

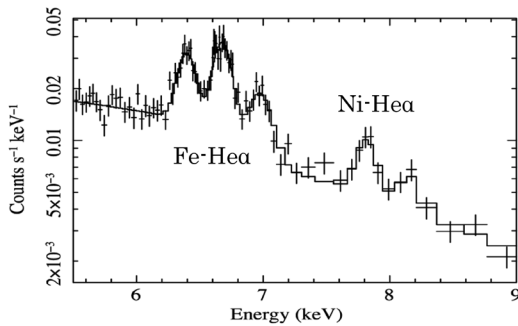


図8 Sgr D付近のNi異常 (7.8 keV) スペクトル¹⁷⁾. Ni-Heα (7.8 keV) と Fe-Heα (6.7 keV) の強度比0.2は全天体の中で最大である。

Ni-Heα (7.8 keV) と Fe-Heα (6.7 keV) の強度比が約0.2 (Fe/Niの太陽組成比は0.05) のホットスポットが見つかった¹⁷⁾ (図8). これから算出されたNi/Fe組成比はどのSNRより高く、すべての天体種族の中でも最大であった。これはいったい何を意味するのだろうか? こんな驚きを銀河中心は至るところに隠している。銀河中心はまさに驚きが詰まった「宝石箱」だった。「すぎく」はそれを開けたのだ。

6. 星とGCXE, GRXEの分布は同じか

GCXE, GBXEとGRXEに対する点源説の根拠は「鉄輝線の強度分布が星の分布とよく似ており、微弱な星まで数え上げれば鉄輝線強度も再現できる」である。Chandraは $(l, b) = (0.1^\circ, -1.4)$ で深観測を行い、鉄輝線強度の約80%を個々の点源に分解した¹⁸⁾。これを点源説の直接的な根拠と信じている人は多い。しかしこの位置は銀河バルジ (GBXE) に相当し、低質量星 (CVやAB) が多い。GCXEは大質量星が多いのでGBXEと同じく点源説 (CV, AB) とすること自体無理がある。

GCXEとGRXEの間ですら起源が同じでない (スペクトルが違う) ことは前章で示した。図5でも示したようにFe-HeαとFe-Kαの銀河面に

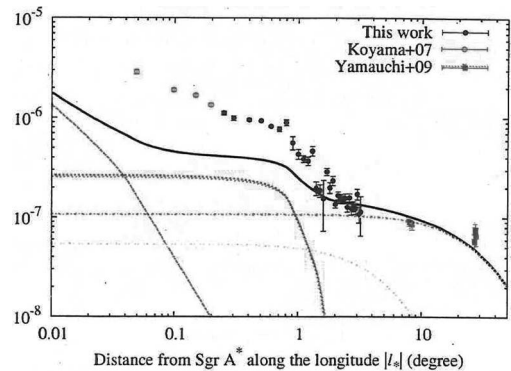


図9 銀河面に沿うFe-Heαの強度分布と星の質量分布モデル。銀河中心に向かってFe-Heαの強度超過が顕著になっている¹⁹⁾。縦軸は光子数 ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{arcmin}^{-2}$)

そったGRXEの強度分布にも明らかな違いが見られた¹³⁾。GCXEと同様にGRXEもFe-KαとFe-Heαを一まとめにして起源を議論してはいけないのだ。「スペクトルや分布の形状が似ているから」というだけで結論を急ぎ、数値的検定を怠ってはならない。X線天文学は数理科学であって形態学ではないのだ。「すぎく」はそれを教えてくれた。

GCXEにおいて、点源説と拡散説を比較検定するためにFe-Heαの強度分布と星の質量分布を図9に示した¹⁹⁾。銀河中心に向うにつれFe-Heαの強度分布が星の質量分布から大きく超過していく。図9の星の質量分布はCOBE²⁰⁾、IRAS²¹⁾、IRT²²⁾の赤外表面輝度データからつくったモデルだが、SIRIUSによる銀河中心の広域赤外線星サーベイで観測された個々の星の数分布でも同様な傾向が確認された²³⁾。この超過成分こそ拡散高温プラズマに違いない。

7. 星とGCXEの等価幅から起源に迫る

GCXEの起源を議論するときに鉄輝線の等価幅 (EW) が鍵になる。GCXEの点源説では最低2種類の星を必要とする。主にFe-Heαを担うABと

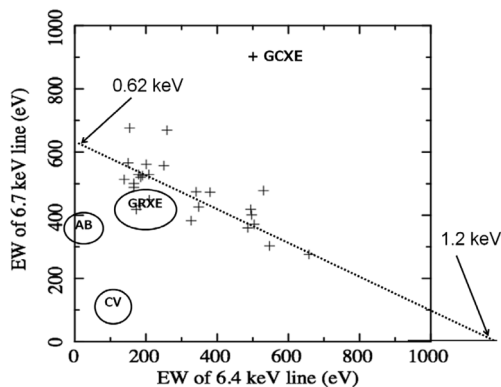


図10 GCXEのFe-K α とFe-He α の等価幅(EW)の分布(+印)とその相関(斜線)。

Fe-K α を担うCVである。そこでFe-K α とFe-He α のEWを分離、決定するために両者の相関をとった(図10)。図中の斜線が縦、横軸を切る値(620 eVと1,200 eV)が本来のFe-K α (例えばCVの)とFe-He α (ABの)のEWである。「すぎく」のアーカイブを用いて、ABとCVの集積スペクトルをつくり、それらのFe-He α とFe-K α のEWをもとめ図10に加えた。EWの分散がFe-K α ではFe-He α より2倍ほど大きいこと自体点源説を否定する。さらにABとCVのいかなる混合比にしてもEWはGCXEに対して約3倍は小さい。これに対して「銀河中心は元素組成が高いから、銀河中心以外のいろいろな箇所集積した星のEWは銀河中心より3倍くらい小さくてもいい」という反論を聞く。しかし5章で述べたように銀河中心元素組成はFeでは約1.2倍程度にすぎない。GCXEで点源説に立つなら、「未分解の点源は既知の同種の点源に対し鉄組成は3倍ある」ことを観測で実証しなければならない。それがなければ、「すぎく」の高精度スペクトルは「銀河中心の激動の産物、高温拡散プラズマの存在」を裏づけたとすべきだろう。すなわち「銀河中心は静穏」とするわれわれの先入観を完全に打ち破った。

8. おわりに、謝辞と激励を兼ねて

「すぎく」は誕生直後にカロリメーター喪失という悲劇に見舞われた。名づけの親を自負する筆者としては、この不運を乗り越えすばらしい「すぎく人生」を送らせた。「すぎくでしかできない研究は何か」と不眠不休で考えた。検出器の性能は隅々まで知っている。そして到達した一つが「銀河中心観測」である。しかし「銀河中心はXMMやChandraの長時間観測がすでにある。すぎくで新たに何ができるか」と米国の科学者を中心にクレームが出た。いかにも秀才らしい意見だ。

筆者は「鉄輝線バンドの高感度、低バックグラウンド、高精度キャリブレーション等「すぎく」はXMMやChandraの追随を許さない。銀河中心解明の鍵は拡散成分だ。そこに「すぎく」で重要な発見をしてみせる」と反論し、観測時間を獲得した。啖呵を切った以上、実績を示さないと信用を失い継続観測は絶望だ。多くの若手諸君が観測終了後、すぐ解析を全力で進めてくれた。予想を上回る新知見が得られた。それを根拠に説得力ある次の観測提案を必死で考え、次の観測時間を獲得する。こうした「奮戦」積み重ねの10年だった。個人名は挙げないが、この研究に多大な貢献をした若手、特に京大院生諸君(参考文献の著者)に特に深い謝意を表したい。彼らもまた研究の醍醐味を満喫してくれただろう。

奮戦10年の結果、50編近い査読論文が生まれた。X線反射星雲とその時間変動^{8), 9)}、再結合優勢プラズマ¹⁴⁾、異常Ni天体¹⁷⁾、トルネードからの双極ジェット²⁴⁾の発見は特筆すべき成果だ。後3者は「すぎく」なしでは絶対になしえなかったはずだ。前2者は今後の大きな発展が期待でき、銀河中心研究史上に残る成果と断言できる。これらの成果は「既存の概念、知見、モデルに観測を合わせる」研究姿勢では生まれえない。「観測結果の一見些細のような事実も見逃さず、その意

味を真底追求する」という実験・観測研究の基本に忠実だった賜物だ。

次期衛星 Astro-H は前人未到の性能をもつ。そこに未知の新宇宙が見えるだろう。予期せぬ新発見も絶対にある。「既存の概念、知見、モデルに合わせるべく観測をする」では Astro-H を殺してしまう。「既存の知識を超える新発見にこそ実験宇宙物理の醍醐味がある」と特に将来を担う若手研究者に言いたい。Astro-H で X 線天文の醍醐味を実感し、研究の原動力にしてくれることを念願してやまない。

参考文献

- 1) Koyama K., et al., 1986, PASJ 38, 121
- 2) Koyama K., et al., 1989, Nature 339, 603
- 3) Koyama K., et al., 1996, PASJ 48, 249
- 4) Koyama K., et al., 2007, PASJ 59, 23
- 5) Koyama K., et al., 2007, PASJ 59, 245
- 6) Uchiyama H., et al., 2013, PASJ 65, 19
- 7) Koyama K., et al., 2007, PASJ 59, 221
- 8) Koyama K., et al., 2008, PASJ 60, 201
- 9) Inui T., et al., 2009, PASJ 61, 241
- 10) Nobukawa M., et al., 2011, ApJL 739, L52
- 11) Ryu S.-G., et al., 2009, PASJ 61, 751
- 12) Ryu S.-G., et al., 2013, PASJ 65, 33
- 13) Nobukawa K. K., et al., 2015, ApJL, in press
- 14) Nakashima S., et al., 2013, ApJ 773, 20
- 15) Nobukawa M., et al., 2010, PASJ 62, 423
- 16) Koyama K., et al., 1986, PASJ 38, 503
- 17) Nobukawa M., et al., 2015, in preparation
- 18) Revnivtsev M., et al., 0000, Nature 458, 1142
- 19) Uchiyama H., et al., 2011, PASJ 63, 903
- 20) Boggess N. W., et al., 1992, ApJ 397, 420
- 21) Clegg P. E., 1980, Phys. Scr. 21, 678
- 22) Koch D., et al., 1982, Opt. Eng. 21, 141
- 23) Nishiyama S., et al., 2014, Suzaku-MAXI Conf., p. 8
- 24) Sawada M., et al., 2011, PASJ 63, 839

A Research Drama of the Galactic Center with Suzaku

Katsuji KOYAMA

*Department of Astromy, Kyoto University,
Kitashirakawa Oiwake-cho, Sakyo-ku,
Kyoto 606-4502, Japan*

Abstract: The high quality Suzuki spectra in the Galactic center region (GC) provide key information for the GC activity: the high temperature diffuse plasma, time variable X-ray reflection nebulae and recombination dominant plasma. These support that the GC and Sgr A* have been very active in a few thousands years ago.