

図1 上: 銀河中心 2度×0.8度 (1,000 光年×400 光年) 領域の 6.4 keV 輝線強度分布. 横軸と縦軸はそれぞれ銀径と銀緯 (単位は度). 小さい黒円は銀河中心ブラックホール Sgr A*の位置を示す. 下: 上図と同じスケールの硫化炭素分子輝線 ($J=1-0$) の強度分布¹⁾.

特性 X 線である. 一方で 6.4 keV は電離していない中性状態の鉄原子からの特性 X 線である. すなわち, 銀河中心拡散 X 線は電離状態の異なる二つの成分から構成していると考えられた.

「すざく」搭載 X 線撮像分光器 XIS は 5 keV 以上の高エネルギーバンドで他衛星をしのぐ高い性能をもつ. バックグラウンドが低く安定しており, エネルギー分解能が高いため, 銀河中心拡散 X 線のような「輝線をもつ広がった淡い」天体に史上最高感度をもっている. われわれは「すざく」による観測を 2005 年の打ち上げから現在まで継続してきた. その結果, 6.7 keV, 7.0 keV 輝線は数千万度の高温プラズマからの放射であることを確定し, 詳細な空間分布を初めて得るなど, 多くの成果を上げてきた^{5), 6)}. しかし, このプラズマが実際に空間的に広がっているのか, 非常に多くの暗い X 線天体の集まりなのか, 現在においても議論は続いている. 本稿は 6.4 keV 輝線に着目するので, 6.7 keV, 7.0 keV 輝線のプラズマ成分に関

しての詳細は割愛する. 詳しくは天文月報 2007 年 9 月 (第 100 巻第 9 号) の「特集: 朱雀『すざく』, 天空を見つめて一年 (その 5): すざくが解明した銀河中心の謎」, 2009 年 12 月 (第 102 巻第 12 号) の「すざくが見た銀河中心の活動性」をご覧ください.

2. X 線で輝く巨大分子雲

6.4 keV 輝線は中性鉄原子の特性 X 線である. つまり, 数千万度にもなる高温プラズマではなく, 低温物質からの放射であることを示している. 図 1(上) は「すざく」を用いて撮影した 6.4 keV 輝線の強度マップである. X 線放射は一様に広がっているのではなく, clumpy な構造をしていることがわかる. さて, 6.4 keV マップで Sgr A (銀径 0.1 度), B (0.7 度), C (359.4 度) 領域には広がった天体が存在している. そして, これらの領域には電波などで巨大分子雲が観測されている (図 1 下). 分子雲の温度は 10–100 K (ケルビン)

である。6.4 keV 輝線はこの分子雲に含まれる大量の鉄原子からの放射であると考えられる。さらに、分子雲の X 線スペクトルは強い 6.4 keV 輝線に加えて連続成分が付随している。

3. 背後に潜む高エネルギー現象

しかしながら、ただか 100 K の低温物質から何もしないで X 線が出てくることはありえない。X 線が放射されるためには外部から高エネルギー粒子によって鉄原子が電離される必要がある。

可能性の一つは宇宙線粒子による衝突電離である。特に、数十 keV の低エネルギー電子が分子雲に衝突し鉄原子を電離している（電子衝突星雲）シナリオが考えられた^{7),8)}。このとき、制動放射によって連続成分も放射される。実際、銀河中心で観測されている TeV^{*3}ガンマ線や非熱的電波放射から高い宇宙線密度が示唆されている。さらに、銀河中心における分子雲の温度（数十 K）が他の領域（～10 K）に比べて高いことも、分子雲が宇宙線照射を受けている証拠だと主張された。

もう一つの可能性は、外部から X 線に照射されているという X 線反射星雲シナリオである。外部 X 線が分子雲内部の鉄原子を光電離して輝線が放射され、トムソン散乱によって連続成分が生成される。このシナリオでは非常に明るい ($L_x > 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ ^{*2}) 照射天体が必要となり、400 万太陽質量をもつ銀河中心ブラックホール Sgr A* が有力候補に挙げられた^{4),9)}。現在の Sgr A* の X 線光度は $10^{33}\text{--}10^{34} \text{ erg s}^{-1}$ であるが、分子雲との距離が離れていることから、数百年前に明るかったのかもしれないと考えられた。

いずれにしても銀河中心 6.4 keV 輝線放射の背後には高エネルギー現象が潜んでいることは間違いない。しかし、これまで起源に関して観測的決

定打はなかった。それは「すぎく」以前では十分な精度のスペクトル情報が得られていなかったからである。

4. 多種元素の中性輝線の発見¹⁰⁾

分子雲中には鉄以外にもアルゴンやカルシウムなど多種類の重元素が存在している。しかし、鉄以外の中性状態の輝線（中性輝線）は検出されたことはなかった。そこでわれわれは「すぎく」による長時間観測を行い、6.4 keV 輝線が最も強い Sgr A 領域の分子雲から過去最高精度の X 線スペクトルを取得した（図 2）。3 本の鉄輝線だけでなく、硫黄、アルゴン、カルシウムなど他の重元素の輝線もはっきりと分離されていることがわかる。

詳細なスペクトルは対象の物理状態を詳細に物語る。しかし、このスペクトルは分子雲からの成分だけでなく、先述の高温プラズマ成分も混合している。多くの輝線はヘリウム状、あるいは水素状イオンのものであり、高温プラズマ起源である。そこでモデルフィッティングを行い、二つの成分を分離した。図 2 で、グレーのモデルが高温プラズマ成分、青のガウシアンが中性輝線を表している。さらに中性輝線に付随する連続成分を黒色のモデルで加えている。

これまでに銀河中心領域からは鉄に加えてニッケルの中性輝線も発見されている。そこでまず、鉄とニッケルの輝線を加えて観測スペクトルをモデルフィットしてみたところ、四つの輝線状の残差が残った（図 2 中段の青破線で示したところ）。そこで、四つの輝線を加えたところ、図 2 下段のように残差はきれいに解消した。輝線のエネルギーはそれぞれ、 2.94 ± 0.02 , 3.69 ± 0.02 , 5.41 ± 0.04 , $5.94 \pm 0.03 \text{ keV}$ で、これらはアルゴン、カルシウム、クロム、マンガンの中性輝線の値 (2.96,

*2 光度（エネルギー放射率）の単位。 $1 \text{ erg s}^{-1} = 10^{-7} \text{ J s}^{-1}$ 。

*3 TeV = テラ電子ボルト。

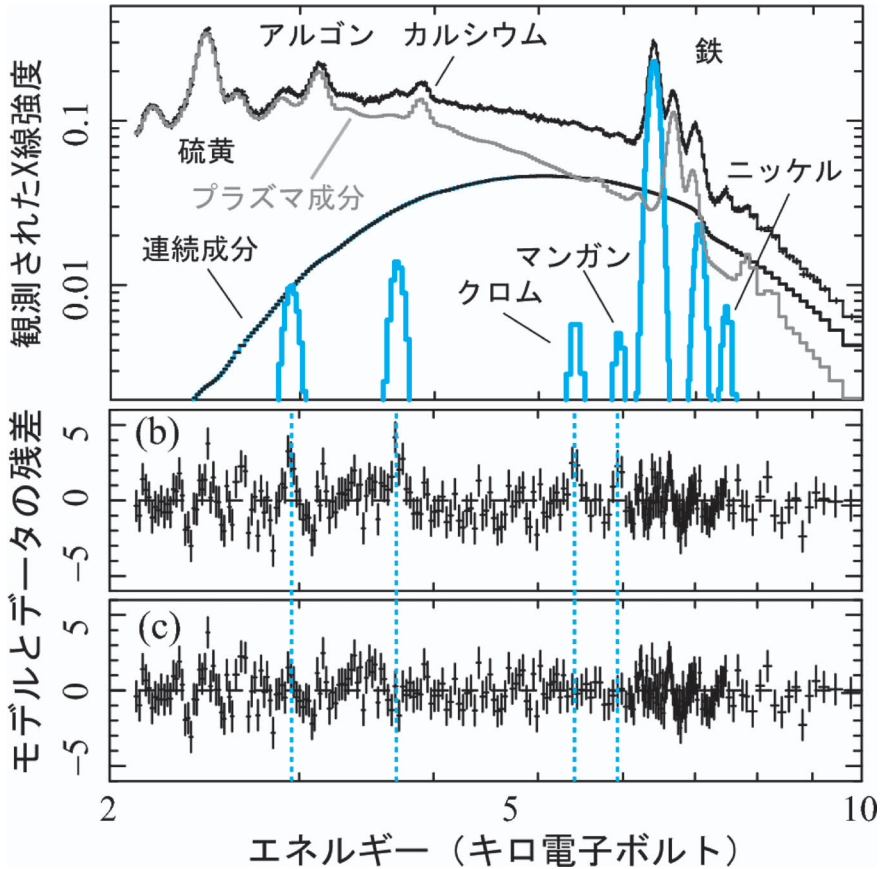


図2 (a) X線スペクトル。高温プラズマ（グレー）と中性輝線（青），および連続成分（黒）でのベストフィット結果。(b) 中性輝線に鉄とニッケルのみを加えたモデルとデータとの残差。青破線で示したところに輝線状の残差が見える。(c) アルゴン、カルシウム、クロム、マンガンの中性輝線を加えた場合、残差が綺麗に解消している。

3.69, 5.41, 5.90 keV) と見事に一致した。さらに中性輝線の等価幅（黒色の連続成分に対する強度比）も精度良く求めることができた（図3）。

さて、得られた結果から中性輝線（と連続成分）が電子衝突星雲と X 線反射星雲のいずれが起源なのかを区別したい。X 線反射星雲シナリオでは光電離による輝線とトムソン散乱による連続成分が放射される。一方で、電子衝突星雲モデルでは衝突電離による輝線と制動放射による連続成分が放射される。両者では物理プロセスが異なるので、当然観測される X 線スペクトルも異なる。そこで、両シナリオで期待されるスペクトルを計算

してみたところ、輝線等価幅が大きく異なることがわかった。すなわち輝線等価幅は起源の判定に有力な指標になるのである。分子雲内の重元素組成が太陽のものと同一であると仮定した場合の鉄輝線等価幅は X 線反射星雲シナリオで 1 keV、電子衝突星雲シナリオで 0.3 keV となる。その他の輝線についても図3の実線のように求められた。

いずれのシナリオも観測データよりも不足しているので、分子雲の重元素量が太陽のものよりも大きい。X 線反射星雲シナリオの場合は 1.6 倍の組成量でアルゴンからニッケルまでをうまく合わせることができる。一方で、電子衝突星雲シナリ

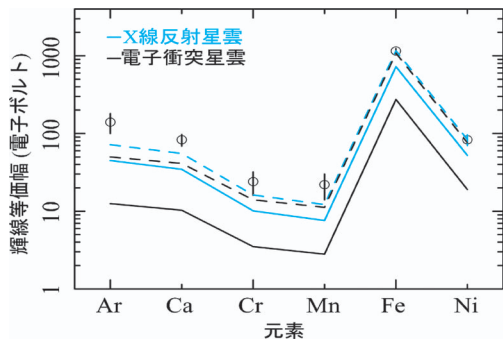


図3 観測から得られた輝線等価幅（連続成分との強度比）。実線は分子雲の重元素組成が太陽と同じである場合の、X線反射星雲（青）と電子衝突星雲（黒）の等価幅（計算値）。青破線は1.6倍の太陽組成の場合のX線反射星雲シナリオのもの。黒破線は4倍太陽組成のときの電子衝突星雲シナリオのもの。

オでは、4倍の組成量となり、アルゴンやカルシウムではうまく合っていない。また、高温プラズマ成分の重元素量は1-2倍であった。分子雲は周囲のガスが凝縮してできるので、高温プラズマと同程度の組成量になるだろう。したがって、分子雲からのX線放射は電子衝突では説明は難しく、外部からのX線を反射したものだと言える。

われわれはSgr A付近以外にも、Sgr B, C領域のX線を放射する分子雲についても観測を行った¹¹⁾⁻¹³⁾ (図1上)。どの分子雲のスペクトルからも、大きな鉄輝線等価幅(1-2 keV)が測定された。すなわち、これらの分子雲もX線反射星雲であると考えられる。

5. 照射天体は銀河中心ブラックホール¹⁴⁾

前節までの議論から、分子雲が外部からX線を照射されて輝いていることがわかった。しかし、何が照らしているのかわかっていない。銀河中心ブラックホールSgr A*が有力候補に考えられているが、上記の観測だけでは明らかではない。銀河中心には明るいX線連星系が複数見つ

かっているが、その天体起源の可能性を否定できないのである。われわれは分子雲からのX線を通して、間接的に照射天体を見ているため、決定的な情報を得るのが難しい。

近年、Sgr B2やSgr A近傍の分子雲からのX線放射強度が数年間で時間変動していることが見つかった¹⁵⁾⁻¹⁷⁾。大きさ約10光年の分子雲が数年間で形状や密度を変えることはないので、これは照射天体が少なくとも数年間で変動を起こしていたことを示している。

Sgr B2の時間変動観測¹⁵⁾は「あすか」(1994年)、「チャンドラ」(2000年)、「ニュートン」(2001, 2004年)、「すざく」(2005年)による結果であり、衛星間の系統誤差が大きかった。そこで、われわれは「すざく」を用いて2009年に2005年と全く同じ視野を観測した。その結果、図4に示したように、2005年に輝いている二つの分子雲(Sgr B2とM0.74-0.09)からの6.4 keV輝線強度が4年後の2009年には半減していることが明らかになった。さらに、6.4 keV輝線に相関して、8-10 keVの連続成分でも暗くなっていることを初めて明らかにした。

4年間で半減したということは、照射天体は定常的に輝いていたわけではなく、短時間に明るかったことを示している。分子雲の大きさが10光年程度なので、10年以下の短いフレアを起こしていたと考えられる。このとき、X線フレアは分子雲全体ではなく、一部分を照らしているだろう。したがって、分子雲の密度とX線強度、およびフレアの継続時間(t)、照射天体と分子雲の距離(d)を元に照射天体の光度を以下のように見積もることができる¹⁸⁾。

$$L_x = 6 \times 10^{40} \left(\frac{t}{10 \text{年}} \right)^{-1} \left(\frac{d}{300 \text{光年}} \right)^2 \text{ erg s}^{-1} \tag{1}$$

二つの分子雲(Sgr B2とM0.074-0.09)が同様に時間変化していることから、これらは同一天体に照らされていると考えられる。また、二つの分

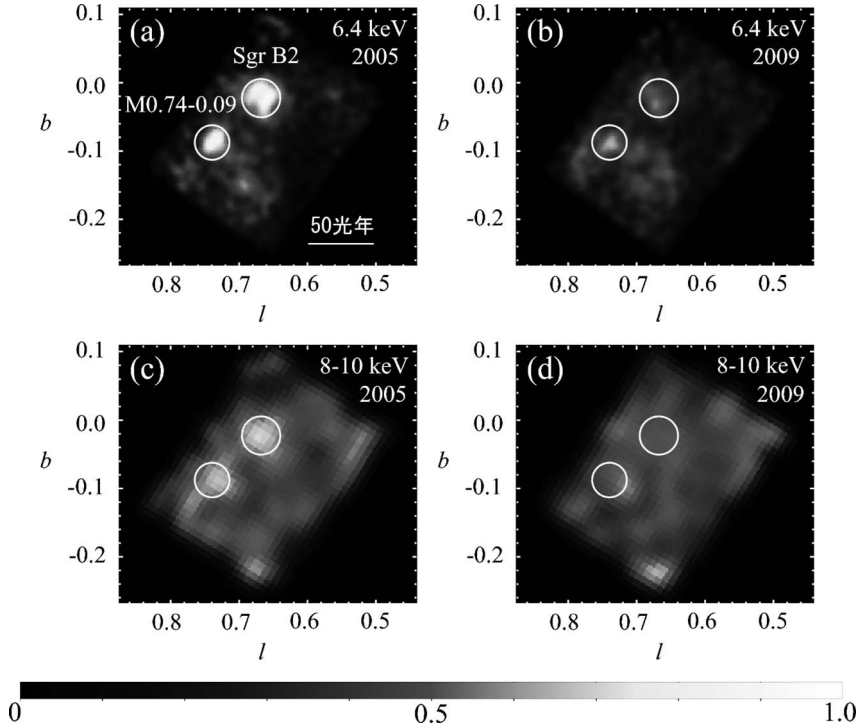


図4 Sgr B2 領域の X 線強度マップ。縦軸と横軸は銀径と銀緯を示す。単位は度。(a) 2005 年の 6.4 keV 輝線強度マップ。明るい二つの分子雲 (Sgr B2 と M0.74-0.09) が見える。(b) 2009 年の 6.4 keV 輝線強度マップ。二つの分子雲は暗くなっている。(c) 2005 年の 8-10 keV 連続成分の強度マップ。二つの分子雲に放射の超過が見える。(d) 2009 年の 8-10 keV 連続成分強度マップ。二つの分子雲は周囲に埋もれて見えなくなった。

子雲は 50 光年離れている。片方の近傍に照射天体があるとしても、もう一方の分子雲からは 50 光年の距離があることになる。すなわち、少なくとも照射天体までの距離 d は 50 光年以上あることがわかる。フレアの継続時間 t は 10 年以下なので、式 (1) から照射天体の光度は $2 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ 以上必要であることが求められる。これは中性子星のエディントン限界に匹敵する。INTEGRAL などがモニター観測しているが、銀河中心領域で 10 年間にわたって恒常的にこれほど明るい天体は見つかっていない。突発的な天体はあるが、期間は 1 カ月以下なので、10 年間で平均すると必要光度を満たさない。

以上のことから、照射天体が太陽質量の X 線連星系や突発天体では説明ができない。太陽の

400 万倍の質量をもつ銀河中心ブラックホール Sgr A* が唯一の照射天体候補である。Sgr A* は Sgr B2 と 300 光年離れているので、必要光度は $6 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ 以上である。現在観測されている X 線光度は $10^{33} - 10^{34} \text{ erg s}^{-1}$ だが、時おり数十倍のフレアが観測されている。X 線を放射する分子雲は、数百年前に Sgr A* がさらに大きな 100 万倍以上の大フレアを起こしたことの証拠なのである。

6. Sgr A* の過去の大フレアが照らす分子雲群¹⁹⁾

これまでに、Sgr B2 領域の分子雲が Sgr A* によって照らされたことを示した。銀河中心領域にはほかにも X 線で輝く分子雲が存在している。これらの分子雲は個別の天体によって照らされてい

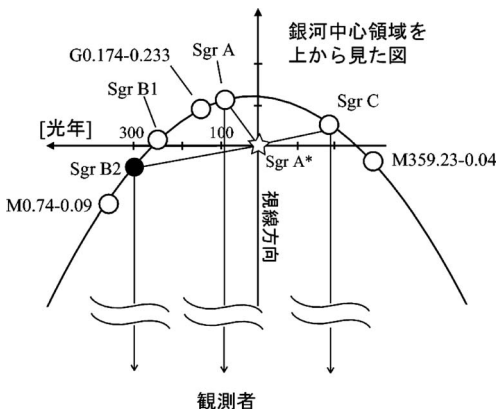


図5 銀河中心領域を上から見た模式図。すべての分子雲がSgr A*の単一フレアで照らされているとした場合、すべての分子雲から観測者(われわれ)に同時にX線が到着する。すなわち、すべての分子雲はSgr A* (中央の星印)と分子雲(円)、および観測者の距離が等しい放物面上に整列する。Sgr B2²⁰⁾(黒丸)を起点に、その他の分子雲の位置を決定した。

るのだろうか。それとも単一の照射天体(Sgr A*)なのだろうか。さらには単一天体起源だとしても、一度のフレアで同時に照らされているのかもわかっていない。そこで、X線を放射するすべての分子雲がSgr A*の単一フレアで説明できるかを検討する。

式(1)から、すべての分子雲の必要光度を見積もる。Sgr B2を除いて²⁰⁾、分子雲とSgr A*の距離はよくわかっていない。しかし、同時に照らされているということは、Sgr A*から分子雲を経由してわれわれ観測者までの距離はすべて同じである。すなわち、分子雲はSgr A*を焦点とする放物面上に並んでいると考えることができ、距離が求められる(図5)。先と同様にフレアの継続時間(t)は10年と仮定する。その結果、Sgr B2を含めてすべての分子雲から求めたSgr A*の光度はおおよそ同じ値 $6-12 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ となった。Sgr A*の過去の大フレアが一度に分子雲を照らしたという説は観測結果をうまく説明することができる。

最後に一言

私が京都大学大学院に入学して研究を始めたのは「すざく」打ち上げ直後の2006年4月でした。その頃はちょうどPASJの「すざく特集号」のために先輩諸兄は必死にデータ解析・論文執筆をしており、研究室はまさに鉄火場でした。私もそのような状況の中で最初にSgr B1分子雲の観測データ解析に取り組み、1年後に論文にまとめました。大学院5年の間に別の天体にも気が移りましたが、最後は戻って来て、このように「すざく」の研究成果をまとめることができるとも良かったと思っています。

Sgr A*が大フレアを起こしたというわれわれの仮説が正しいならば、数年後には分子雲からのX線は消えてしまうはずですが、「すざく」を使った追観測を行い、そのことを確認したいと考えています。

謝辞

本稿は筆者が京都大学大学院でまとめた博士論文の内容が基になっています。大学院5年間で厳しく優しく懇切丁寧に指導していただいた小山勝二名誉教授、鶴剛准教授には心より感謝しております。本研究は筆者一人で為し得たものではなく、多くの諸先輩、後輩の皆様のおかげでもあります。名を挙げればきりがないので割愛させていただくことをご容赦ください。最後に、「すざく」の開発・運用に携わる皆様に感謝を述べさせていただきます。

参考文献

- 1) Tsuboi M., Handa T., Ukita N., 1999, ApJS 120, 1
- 2) Kawai N., et al., 1988, ApJ 330, 130
- 3) Koyama K., et al., 1989, Nature 339, 603
- 4) Koyama K., et al., 1996, PASJ 48, 249
- 5) Koyama K., et al., 2007a, PASJ 59, S245
- 6) Uchiyama H., et al., 2011, PASJ, submitted
- 7) Valinia A., et al., 2000, ApJ 543, 733
- 8) Yusef-Zadeh F., et al., 2007, ApJ 656, 847
- 9) Murakami H., et al., 2000, ApJ 534, 283
- 10) Nobukawa M., et al., 2010, PASJ 62, 423
- 11) Koyama K., et al., 2007b, PASJ 59, S221
- 12) Nobukawa M., et al., 2008, PASJ 60, S191
- 13) Nakajima H., et al., 2009, PASJ 61, S233
- 14) Nobukawa M., et al., 2011, ApJL, submitted
- 15) Inui T., et al., 2009, PASJ 61, 000
- 16) Ponti G., et al., 2010, ApJ 714, 732
- 17) Terrier R., et al., 2010, ApJ 719, 143
- 18) Sunyaev R., Churazov E., 1998, MNRAS 297, 1279
- 19) Nobukawa M., 2011, Ph.D. thesis, Kyoto University
- 20) Ryu S. G., et al., 2009, PASJ 61, 751

Study of X-ray Emission from the Giant Molecular Clouds in the Galactic Center Region

Masayoshi NOBUKAWA

Hakubi Center/Department of Physics, Faculty of Science, Kyoto University, Kitashirakawa, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan

Abstract: K-shell emission lines from neutral Fe (Fe I K_{α}) associated with giant molecular clouds in the Galactic center (GC) region have been detected. The Fe I K_{α} emission is one of the keys to understand the structure and activity of the GC, including the super-massive black hole Sagittarius (Sgr) A*. In order to resolve the origin of the Fe I K_{α} , we performed deep observations of molecular clouds emitting the Fe I K_{α} line in the Sgr A, B, and C regions with Suzaku. We discovered K_{α} lines of neutral Ar, Ca, Cr, Mn atoms in addition to those of Fe and Ni from the Suzaku data. The spectral feature indicates that the X-ray emission from the cloud is produced by photo-ionization due to X-ray irradiation. The photo-ionization scenario can also explain the X-ray emission from the other clouds in the GC region. We found that the Fe I K_{α} fluxes of the two clouds in the Sgr B2 region had decreased in correlation to the continuum fluxes by half from 2005 to 2009. From all the Suzaku results, we reach a possible scenario that the super-massive black hole Sgr A* made a single X-ray flare several hundred years ago and illuminated the molecular clouds in the vicinity.