

# 銀河系中心の過去を映す大きな鏡

村上弘志

〈宇宙科学研究所 高エネルギー天体物理部門 〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1〉

e-mail: hiro@astro.isas.ac.jp

我々の銀河系中心部は様々な天体が集中する特異な領域であり、数多くの観測が行われているにも関わらず多くの謎に満ちている。中でも最大の謎として、中心核の大質量ブラックホールが非常に暗いことが挙げられる。我々は、銀河系中心領域の分子雲からの反射 X 線を観測するという新しい手法で、大質量ブラックホールの過去の明るさを知ること成功した。得られた結果は、銀河系中心の大質量ブラックホールは実は数百年前までは現在の百万倍も明るかったという驚くべきものであった。

## 1. 銀河系中心に潜むブラックホール

ほとんどの銀河の中心部には、太陽の数百万倍から数億倍もの重さの大質量ブラックホールが存在すると考えられている。私たち人類の住む銀河系の中心核もその例外ではなく、太陽の約 300 万倍もの質量が非常に狭い範囲に集中していることが、中心近傍の星の運動から明らかにされている。銀河系の中心核つまり重力中心は射手座 A\* である。観測が進むにつれてその大きさにはどんどん厳しい制限がつけられ、最新の結果ではついに 17 光時以下にまで絞られている<sup>1)</sup>。このような狭い範囲に安定に存在するものは、ブラックホール以外には考えにくい。この大質量ブラックホール候補天体は全宇宙で最も我々に近い場所にあるので、放射機構などの性質を探るのに格好のターゲットであり、数多くの観測が行われている。しかし、それにも拘わらずこの天体の性質はよく分かっていない。その最大の問題は、このブラックホールが暗すぎることである。

光も脱出できない“ブラック”ホールなのだから、まっくらでも何も問題がないような気もするが、実際にはそうとも限らない。ブラックホールは、その強い重力により周りのガスを引き付ける。引き付けられたガスは一千万度近くの高温まで加熱され、X

線を放射する。したがって、一般的にブラックホールの質量が重いほど X 線では明るく輝く。

我々の銀河系中心には大質量星が密集しており、星風によりガスを多く放出している。すなわち、引き付けられるガスはたくさんあるはずである。しかし、「あすか」や「チャンドラ」らの X 線天文衛星の観測により、銀河系中心のブラックホールは  $10^{33} \text{ erg s}^{-1}$  程度の X 線しか放射していないことが明らかになった。普通の中性子星連星系などでも、 $10^{36} \text{ erg s}^{-1}$  程度の放射は普通に見られる。太陽の数百万倍もの質量をもつのにこの明るさでは、とても寂しすぎる（周辺のガス密度から標準的なガス円盤モデルを用いて予想される値は  $10^{41-42} \text{ erg s}^{-1}$  程度<sup>2)</sup>）。

この暗さを移送優勢降着流 (ADAF) などの新しいモデルで説明することもできるが<sup>3)</sup>、一方で我々の銀河系中心にはブラックホールではなく、ニュートリノやフェルミ粒子のかたまりがあると論じる人々もいる<sup>4), 5)</sup>（最新の観測でそろそろ否定されつつあるようだが）。ブラックホールが暗すぎることはそれだけ大問題なのである。

本当に我々の銀河系中心には大質量ブラックホールは存在するのだろうか？ この問題を解く鍵は、意外にもブラックホール周辺の分子雲からの X 線放射に見つかった。高エネルギーの現象を示唆する X 線と、様々な天体の中でももっとも低温な

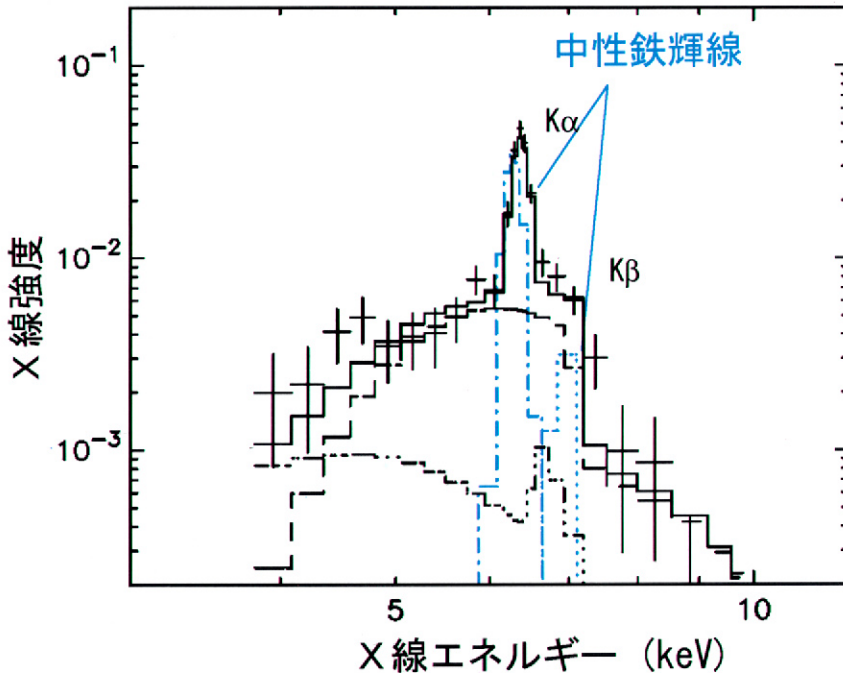


図3 射手座 B2 の X 線スペクトル。分子雲内の X 線点源からの放射を点線で示した。

部類になる分子雲、この奇妙な組み合わせから、我々は全く予想外の結論を導き出した。

## 2. 分子雲からの奇妙な X 線

そもそのはじまりは、日本の X 線天文衛星「あすか」の銀河中心領域の観測にさかのぼる<sup>6)</sup>。「あすか」以前の観測で、銀河系中心部は高温のプラズマで満たされていることがわかっていた<sup>7)</sup>。しかし、これとは別に新たに冷たい物質に特有の中性鉄輝線が検出されたのだ。X 線のエネルギーは温度にすると一千万度以上に相当するため、高温の物体から放射される。その場合、鉄などの原子は中性の状態ではいられない。その熱エネルギーによって激しく運動する原子同士が衝突することにより電子が剥ぎ取られて、電子がほとんど残らない状態まで電離してしまうからだ。したがって、全く電離していない中性の鉄の輝線は、高温ガスからは決して放射されえない。この中性鉄輝線がどの

ような仕組みで放射されているのか、それが問題であり、新しい発見のきっかけとなった。

中性鉄からの X 線放射は、分布も一様に広がる高温プラズマからの X 線とは違っており、異なったものから放射されていることが裏付けられる。図 1 (表紙) に、「チャンドラ」によって得られた銀河系中心領域の中性鉄輝線のイメージを示した。射手座 B2、射手座 C、電波アーク付近が明るく輝いている。実は、これらは巨大分子雲が存在している領

域である。なかでも特に明るく輝いている射手座 B2 領域には、銀河中心領域でも最大級の巨大分子雲がある。

我々はこの射手座 B2 領域に注目し、X 線放射を詳しく調べた。すると、次々とその特異な性質が明らかになっていった。まず、図 2 (表紙) に射手座 B2 の場所の X 線像を示す。分子雲の右下側、すなわち銀河中心方向に片寄って明るく輝いていることがわかる。分子雲全体から X 線が放射されているわけではない。

この領域からとったスペクトルが図 3 である。これは、X 線スペクトルとしては非常に異様な形をしている。まず目につくのは強い中性鉄輝線である。輝線の中心エネルギーから鉄の電離状態がわかるので、実際に中性の鉄から放射されていることが確認できた。7 keV 付近には中性鉄の Kβ 線も見つかっている。輝線以外の連続成分に目を向けると、低いエネルギーの側では X 線強度は小

さく、4 keV から下のエネルギーにはほとんど放射が見られない。また、 $K\beta$ 線より少し高エネルギーのあたりで急激に落ち込んでいる。一般的には、エネルギーが低くなるほどX線は吸収されやすくなる。非常に濃い物質をX線が通り抜けてくるために、低エネルギーのものはほとんど吸収されてしまっているのだと考えられる。 $K\beta$ 線の上の落ち込みは、鉄の吸収端による構造であり、これも吸収が大きいせいである。落ち込みぐあいから吸収物質の量を見積もることで、水素換算でおよそ  $10^{24}$  個  $\text{cm}^{-2}$  というガスの柱密度を得た。ちょうど分子雲を横切ると同程度である。銀河中心までの円盤上の物質による吸収は、その 1/10 程度でしかない。

### 3. 奇妙な X 線の起源を解き明かす

#### 3.1. 中性鉄輝線の起源は？

中性ということはすなわち、X線は冷たい物質から来ていることを意味する。実際、電波観測では分子雲の温度は 30–80 K 程度であり、熱的 X 線を放射する数千万度という温度と比べると非常に冷たい。しかし、冷たい物質はそれ自身で X 線を放射することはできない。では、どのように X 線が放出されるのであろうか？ その答えは簡単、外からエネルギーが与えられればよいのだ。すなわち、X 線に照射されることによって励起され、決まったエネルギーの X 線を再放出する「蛍光」である。

実は、中性鉄輝線自体は特別に不思議なものではなく、銀河系外の活動銀河中心核等ではしばしば観測される。この場合、中心核の大質量ブラックホールから放射された X 線が周りのガスにより吸収され、蛍光 X 線として再放出されていると考えられる。蛍光であれば低温の物質からも X 線が放射されうるのだ。しかし、今回の場合分子雲の中には強い X 線源は存在しない。それが一番の問題なのだ。射手座 B2 分子雲は星生成領域としても有名であり、空間分解能のよいチャンドラ衛星

ではいくつかの X 線源が発見されている。しかし、その点源からの X 線を寄せ集めても蛍光 X 線の数%にしか満たない。これでは全然足りない。

さらに不思議なのは、X線の分布が銀河中心方向に片寄っていることである。よく見てみると、ちょうど太陽に照らされて輝く月のような形をしている。もしかすると、分子雲を照らす X 線星は分子雲の外にあるのではないだろうか？

#### 3.2. 新種天体発見！

しかし、このように全く自分自身では X 線を放射していない天体というのはこれまでに見つからない。本当に外部から照らされたら観測データのように見えるのかどうかは誰にもわからなかったのだ。そこで、我々は実際に分子雲が外部から照らされた場合の反射 X 線の強度分布、スペクトル、を数値計算し、観測と比較した。すると予想通り、イメージもスペクトルも再現することに成功したのである<sup>8)</sup>。

分子雲の照射源側が明るくなるのは計算するまでもなくすぐわかりそうだが、実際にはそう単純ではない。月と違って分子雲は非常に密度が低い。したがって分子雲の縁で X 線が反射しているわけではなく(縁自体決めにくい)、密度によって反射 X 線の見え方が変わるのだ。密度が濃すぎると X 線は中心まで入っていきえずに、表面近くだけが明るくなる。また、逆に薄すぎるとほとんど吸収されないために分子雲全体が輝いてしまう。電波観測から得られる密度分布は、観測結果をうまく再現できるものであった。また、スペクトルの連続成分に見られた強い吸収は、分子雲の奥深くで反射されていることで説明がつく。分子雲からの奇妙な X 線放射は、実は分子雲の外からの X 線によって生じていたのである。

前述したように、現在まで蛍光 X 線のみを放射する天体は他に知られてはいない。したがって、この天体は新種の X 線天体である。我々のグループはこれを「X 線反射星雲」と名付けた。

表1 分子雲からの反射 X 線強度と照射 X 線強度

	距離 (光年)	反射強度	照射強度 $\times 10^{38} \text{erg s}^{-1}$
射手座 B2	350	5.6	9
射手座 C	240	1.4	3
電波アーク	90	3.7	0.7

## 4. 大質量ブラックホールの過去に迫る!

### 4.1. 照射源はどこに?

分子雲が外部からの X 線に照射されて蛍光 X 線を放射しているとする事で分子雲からの奇妙な X 線放射については説明できた。しかし、すると新たに問題が生じる。それはもちろん、照射源が何者かということである。まさに謎が謎をよぶ（または一難去ってまた一難?）、だ。

蛍光 X 線の強度から照射 X 線の強さを計算してみると、およそ  $10^{39} \text{erg s}^{-1}$  と、たいへんに明るいことがわかった。銀河系中心にはいくつか中性子星連星系など明るい点源があるが、それらは  $10^{36} \text{erg s}^{-1}$  程度で、まったく光度が足りない。バスターなど一時的に増光する天体もあるが、相手は百光年近くの大きさをもつ分子雲であるから、全体を照らすためには少なくとも百年間は明るく輝いていなくては行けない。そもそも  $10^{39} \text{erg s}^{-1}$  という値は中性子星が放射できる限界光度を越えてしまっているのだ。

そこで注目すべきが、銀河系中心のブラックホールが現在異常なほど暗いという事実である。もしかしたらブラックホールは昔明るかったのではなからうか。射手座 B2 分子雲は、大質量ブラックホール射手座 A\* から約 350 光年離れている。ブラックホールが照射源だとすると、直接今みているよりも数百年前のブラックホールの明るさを反映することになるのだ。

### 4.2. 他の分子雲は?

銀河系中心のブラックホールが過去に明るかったことを確認するには、同程度の距離にある他の巨大分子雲を調べるのが良い。銀河系中心領域全体の中性鉄輝線分布は、分子雲と相関があるように見えた。これらの分子雲は、皆同じ X 線天体に照らされて輝いているのだろうか?

そこで我々は、射手座 C、電波アーク領域の巨大分子雲からの反射 X 線強度を調べた。表1に結果を示す。この値から射手座 B2 と同様に照射源の強度を計算すると、 $10^{38-39} \text{erg s}^{-1}$  程度と求められた。射手座 B2 と同程度の値となったことから、同じ X 線源に照らされている可能性が高い。やはり銀河系中心のブラックホールは昔はたいへんに明るく、分子雲からの反射 X 線はそのなごりなのだ。

それぞれの分子雲は銀河系中心からそれぞれ約 240, 90 光年離れている。この距離をそのまま時間に置きかえて、大質量ブラックホールの過去の X 線光度をプロットしたのが図4である。数百光年前は現在の百万倍もの明るさだったのが次第に暗くなってきた様子がわかる。現在の“暗い”銀河系中心は、ほんの一瞬の休息期間に過ぎないのかもしれない。

### 4.3. 超新星爆発に身ぐるみはがされたブラックホール?

銀河系中心のブラックホールが、数百年前というごく最近は明るかったことに対する有力なサポート

が二つある。

一つは、射手座 A 領域の電離ガスである。この領域のガスがなぜ電離されたのかは銀河系中心領域の謎の一つであるが、ブラックホールが非常に明るければ光電離によって電離ガスが生じる。再結合のタイムスケールは約 300 年なので、これまたごく最近の過去の活動を示す痕跡と考えることができるのだ。

もう一つは、射手座 A イーストである。この電波で非常に明るい構造は、射手座 A\* を覆うように広がっているが、「チャンドラ」によりここから高温プラズマ

が発見され、超新星残骸であることがほぼ確実になった。さらに、年齢は一万歳程度と求められた。この結果、興味深い事実が浮かび上がる。時間をさかのぼると、約千年ほど前に超新星爆発による衝撃波が、射手座 A\* を通過することになるのだ。すると次のようなことが起きたと推測される<sup>9)</sup>。

- 1) 超新星爆発により衝撃波形成
- 2) 衝撃波が周辺の物質を掃き寄せながら膨張
- 3) 射手座 A\* を衝撃波通過。この時点までは掃き寄せられた物質が大質量ブラックホールに吸い寄せられ明るく輝く
- 4) 衝撃波通過後は物質が持ち去られてしまい、一時的に大質量ブラックホールに落ち込むガスが減少し、暗くなる

この描像は、反射 X 線から見積もられた大質量ブラックホールの超長期的時間変動をうまく説明する。この仮説によれば、結局のところ今は落ち込む物質がなくて暗いだけということになる。

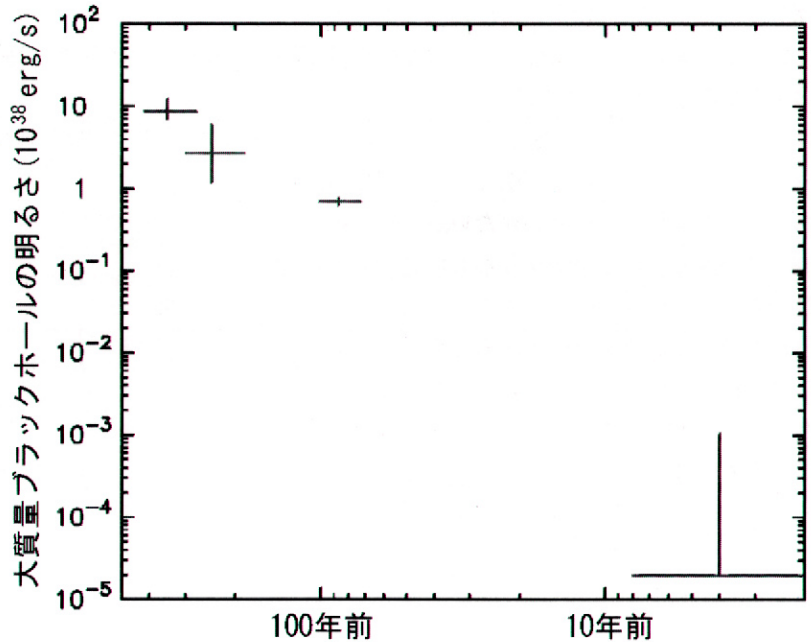


図4 それぞれの分子雲からの反射 X 線強度から計算した銀河中心ブラックホールの過去の光度変動。

## 5. まとめ

X 線天文学が始まったのは今から四十年ほど前のことになるが、このように分子雲での反射を利用することによって、それよりずっと昔の我々の銀河系の様子を知ることができた。今は鳴りを潜めているものの、私たちの銀河系の中心には確かにブラックホールがあって、かつては激しく輝いていたこと、の確かな証拠を得たのだ。

この「X 線反射星雲」を用いた研究は今後も発展の余地が大いにある。例えば、より遠方の分子雲を観測してさらに過去の光度を測定するとか、分子雲を細かい部分に分けて短いスケールの時間変動を知る、などである。いずれも今より質のよい観測データが必要である。また、活動銀河中心核程度にブラックホールが明るければ、銀河一面に広がっている中性水素による散乱 X 線も充分観測可能との試算もあり<sup>10)</sup>、今後空間分解能が向上するにつれて他の銀河へも適用できるであろう。

また、「X 線反射星雲」は銀河系中心の過去を

探る以外の用途にも使える。放射機構がちょうど X 線の蛍光診断と同じなので、分子雲中の各元素の量を知ることができるのだ。すなわち、他波長とは全く独立に分子雲の質量や組成比を測定できる。分子雲の三次元的形状が不明であるなどの問題もあり、まだ実用的とはいいがたいが、銀河系の中心領域を探る新たな手がかりとして発展する可能性がある。

以上のように色々な応用が考えられるが、結論の重要性や、数百年と宇宙にとっては非常に短い時間の出来事であること、また新種の天体ということもあり、今後も多方面からの検証を続けていくことが重要である。「X 線反射星雲」は観測結果をすべてうまく説明することができるが、これまで思ってもいなかったような現象が起きている可能性も完全には否定できない。

とは言うものの、ほんのちょっと昔に我々の銀河系の中心が明るく輝いていたと想像するのは非常に魅力的である。最近の X 線の観測により、Sgr A\* の場所からのフレアや周辺のジェット状構造など、激しい活動を示すものが他にもいくつも見つかっている。チャンドラのイメージを眺めていると、大質量ブラックホールが荒れ狂うさまがまざまざと目に浮かんでくるようだ（主観に大きく影響されているのは確かであるが）。我々の銀河系中心部の大質量ブラックホールが再び暴れだす日が、近い将来やってくるかもしれない。

## 謝辞

この研究は、大学院での 5 年間を通して指導していただいた小山勝二教授、前田良知さん、坂野正明さんの助力を得て進められています。たいへん感謝しております。また、特に電波領域での観測など、学会や研究会の場で多くの方々に助言をいただきました。この場を借りてお礼申し上げます。日本学術振興会には経済的に援助していただいております。そして最後に、私を支え続けてくれた理解ある両親、またいつも励ましてくれる妻に感謝します。

## 参考文献

- 1) Schödel R., et al., 2002, Nat 419, 694
- 2) Genzel R., 1998, Nat 391, 17
- 3) Narayan R., Mahadevan R., Grindlay J. E., Popham R. G., Gammie C., 1998, ApJ 492, 554
- 4) De Paolis F., Ingrosso G., Nucita A. A., Orlando D., Capozziello S., Iovane G., 2001, A&A 376, 853
- 5) Munyaneza F., Viollier R. D., 2002, ApJ 564, 274
- 6) Koyama K., Maeda Y., Sonobe T., Takeshima T., Tanaka Y., Yamauchi S., 1996, PASJ 48, 249
- 7) Koyama K., Awaki H., Kunieda H., Takano S., Tawara Y., 1989, Nat 339, 603
- 8) Murakami H., Koyama K., Maeda Y., 2001, ApJ 558, 687
- 9) Maeda Y., et al., 2002, ApJ 570, 671
- 10) Sazonov S. Y., Sunyaev R. A., Cramphorn C. K., 2002, A&A 393, 793

## The Huge Mirror Reflecting the Past Activities of the Massive Black Hole at the Galactic Nucleus.

Hiroshi MURAKAMI

High Energy Astrophysics Division Institute of Space and Astronautical Science

Abstract: Our Galactic center region is one of the most interesting targets in astronomy with various objects, and there are many questions till now. The most puzzling problem is the massive black hole at the Galactic nucleus. The luminosity is anomalously low for the black hole with the mass of 3 times  $10^6 M_{\odot}$ . We discovered new X-ray objects of "X-ray Reflection Nebula" which emit fluorescent X-rays irradiated by the massive black hole. By using the intensity of reflected X-rays, we can obtain the past luminosity of the black hole. Some hundreds of years ago, it was  $10^6$  times as luminous as the present.