

氏名	むら かし ひろ し 村 上 弘 志
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2441 号
学位授与の日付	平成 14 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	理学研究科物理学・宇宙物理学専攻
学位論文題目	High Resolution X-Ray Observations of the Galactic Center Region (我々の銀河中心領域の X 線による高空間分解観測)

論文調査委員 (主査) 教授 小山勝二 教授 西川公一郎 教授 谷森 達

論 文 内 容 の 要 旨

我々の銀河の中心核には、太陽の数百万倍もの質量をもつ巨大ブラックホールが存在する。これは我々からもっとも近い巨大ブラックホールであるが、銀河面上の厚い吸収物質に遮られて可視光や紫外線・近赤外線の波長の電磁波では観測が不可能であり、その性質には謎が多い。

これに対して、電磁波の中でも最も透過力の強い領域の一つである数 keV 以上の硬 X 線は、中心核を探る最も有力な手段である。日本の X 線天文衛星「あすか」は、初めてこの硬 X 線領域で画像を得ることを可能にし、我々の銀河中心領域から多くの新発見を行った。中でも重要なのは、以下の三点である。

- (1)低温ガス雲と一致した場所から強い中性鉄輝線が検出された
- (2)巨大ブラックホールは X 線の領域では非常に暗い
- (3)銀河中心領域は数百光年もの広がりをもつ高温プラズマで満たされている。

この三点は、それぞれ重大な謎を含んでいる。一般的に X 線は高温のプラズマから放出されるが、中性すなわち電離していない鉄からの輝線は、低温の鉄から X 線が出ていることを示しており、何か特別な機構が働いていることを意味する。巨大ブラックホールは、質量降着率から予測される明るさより10桁近く暗い。最後に高温プラズマは巨大なエネルギーを内在しており、その起源が謎である。

申請者は、この中性鉄輝線に着目し、「あすか」と、さらに空間分解能に優れたアメリカの X 線天文衛星「チャンドラ」を用いて銀河中心領域の低温ガス雲の詳細な解析を行った。その結果、射手座 B2, 射手座 C, 電波 Arc 領域の M0.11-0.08, Clump 2 という四つの低温ガス雲すべてから強い輝線を検出した。さらに、最も強く中性鉄輝線を放射する射手座 B2 の観測結果から、

- X 線のピークの位置が低温ガス雲の中心から銀河中心角方向にずれている
- 等価幅2keV にもなる強い中性鉄輝線が存在する
- 連続 X 線は、星間吸収の10倍近い大きな吸収を受けている

という特徴を明らかにし、この低温ガス雲が銀河中心核方向にある外部の X 線源に照らされて蛍光・散乱 X 線を放射している天体だと結論した。このように間接 X 線だけで光っている天体はこれまでにはなく、新種の X 線天体である。これを「X 線反射星雲」と名付けた。

さらに、電波の観測によって得られた低温ガスの密度分布を用いて数値計算を行い、実際に低温ガス雲が外部の X 線源に照らされた場合の X 線の空間分布およびスペクトルを予測し、「チャンドラ」の観測結果と比較した。数値計算は観測結果を良く再現しており、「X 線反射星雲」の仮説を補強することに成功した。さらに、数値計算のパラメータとして低温ガスの元素組成と質量を考慮しており、同時にこれらの物理量に制限を与えている。元素組成や質量は過去・現在の星生成率にも関わる非常に基本的で重要な物理量であるが、銀河中心領域の天体に対して X 線で制限を与えることに成功したのはこ

れが初めてである。

「X線反射星雲」説を確定する上でもっとも重要なのはその照射源である。射手座 B2からの蛍光・散乱 X 線を説明するためには非常に明るい X 線源が必要であり、実際申請者は数値計算の結果から 10^{39} erg s⁻¹ 程度の X 線強度が必要であると見積もっている。これほど強い X 線を放出している天体は射手座 B2 近辺にはない。そこで、中心核ブラックホールが数百年前の過去に明るかったのではないかという仮説をたてて、現在の射手座 B2からの蛍光・散乱 X 線を説明している。中心核から低温ガスまでの距離に相当する光路差の分、間接 X 線は遅れて届くのである。この仮説を検証するため、申請者は他の三つの低温ガスからの間接 X 線についても照射 X 線強度を求め、射手座 B2と比較している。その結果から、中心核起源ですべての低温ガスからの間接 X 線が説明できることを確認し、さらに各低温ガスまでの光路差に相当する 100—2000 年までの過去の中心核ブラックホールの光度変動を得た。これにより、中心核は数百年前までは現在の百万倍ほど明るく、それから次第に暗くなり現在の明るさになったという描像を明らかにした。

この発見は、現在暗いことが問題になっている中心核ブラックホールに対して新たな観測事実を加えた。近年「チャンドラ」の観測により射手座 A East が一万年程昔に爆発した超新星の残骸であることが明らかになったが、この爆発により生じた衝撃波により周辺の物質がはき寄せられ、千年ほど前に中心核ブラックホールを通過したと推測される。この説と X 線反射星雲から求められた過去の光度変動は概ね一致した傾向を示しており、「暗い」中心核ブラックホールが一時的な姿に過ぎないことが明らかになってきた。衝撃波が物質を持ち去ってしまったために現在は一時的に暗くなってしまっているのだ。このように、(1)中性鉄輝線の起源、と(2)非常に暗い中心核、の問題を一度に解決した。

申請者はさらに、(3)高温プラズマの起源、についても関連した新たな観測事実を報告している。「チャンドラ」の高空間分解能により、銀河中心領域から新たに二つの超新星残骸が発見されたのだ。すでに超新星残骸であることが明らかになっていた射手座 A East とあわせ、三つの超新星残骸が新たに発見されたことになる。この発見は、高温プラズマが超新星残骸の集まりである可能性を示唆する。実際には高温プラズマは超新星残骸 1000 個分のエネルギーをもっているので個数は足りていないが、1. 新しく発見された G0.570—0.018 の年齢は約 80 才であり、予想される超新星爆発のレート、50 年に一つ、に近い 2. 発見された超新星残骸の温度は、銀河系内の他の領域のものより高く、高温プラズマの温度である一億度に近い、という二つの結果が超新星残骸起源を支持している。

そのほか、「チャンドラ」の高空間分解能で新たに発見された広がった個別の構造についても解析を行い、鉄輝線の有無や中心エネルギーによって分類し、さらなる X 線反射星雲や超新星残骸の候補であると示唆している。

論文審査の結果の要旨

銀河中心領域から検出された中性鉄輝線に注目し、新種の X 線天体「X 線反射星雲」という分類を確立したところに、本論文の最大の独自性がある。「X 線反射星雲」は間接 X 線のみが観測される特異な天体であり、まだ研究がほとんどなされていない分野である。この種族を確立し、さらに銀河中心領域を系統的に探査したことで、本申請論文は世界的にも飛び抜けた業績となっている。

この発見を可能にした理由として、申請者の着眼点が多岐にわたったことはもちろんであるが、それに加え光子一つ一つについて位置・時刻・エネルギーの四つの情報を一度に得ることができる X 線検出器の特徴を活かした解析方法が挙げられる。申請者は鉄輝線を含むエネルギー帯域だけでイメージを作ることで鉄輝線を強く放出している場所を決定し、さらにその領域のスペクトルを得て、実際に中性鉄からの輝線が強く放出されていることを確定している。中性鉄輝線が連続 X 線や高電離鉄輝線よりも集中して分布していることを利用した、効率的な方法である。

新種天体の発見という意義に加えて、この天体を銀河中心領域の過去の活動・環境を探る手段とした点も重要な功績である。我々の銀河の中心核ブラックホールが X 線領域で暗過ぎることは大きな謎であり、放射効率が低い降着流のモデルが提唱されたり、さらには巨大ブラックホールの存在自体が疑われるなど、現在も重要な問題となっている。申請者はこれに対して「X 線反射星雲」という新しい道具を用いて中心核ブラックホールの過去の光度変動を調べ、現在の百万倍も明るく輝いていたという結論を導いている。これは中心核ブラックホールの存在を補強すると共に、降着流モデルの議論にも一石を投じる重要な観測結果である。

さらに銀河中心領域の低温ガスの質量や元素組成に制限を与えているが、これは X 線では「X 線反射星雲」を用いることで初めて可能になった。基本的な物理量に対して、単純な物理機構から放射される X 線で独立に求めたことに重要な意義がある。X 線の放射機構を完全に理解し、本質をとらえたことによる成果であり、申請者の優れた直感力が伺える。実際数値計算を行う際には、必要最低限のモデルを用いて解析的に（確率過程を用いることなく）計算を行っており、パラメータの変化に対する応答について考察することを容易にし、観測結果と物理量パラメータを結びつけることに成功している。

銀河中心領域の低温ガスを系統的に探査した点も評価できる。四つの低温ガス雲すべてから中性鉄輝線を検出し、すべてが「X 線反射星雲」モデルで説明できることを示したことで、

1. それぞれの低温ガスまでの光路差に相当する過去のある期間の中心核の光度を組み合わせてより長い期間の光度変動を得る
2. 質量や元素組成について統計的に調査することにより、場所ごとの違いを議論する
3. X 線の輝度分布や、将来的には散乱 X 線の偏光の向きから照射源の方向を確定し、これを複数の低温ガスで行うことで中心核を一意に決定する、ということが可能になった。2, 3についてはまだ統計不足や検出器の制限等で意味のある結果は得られていないが、1については実際重要な情報を得たことは先に述べた通りである。

解析の手段としては、最新の成果をいち早く利用したことでこの研究の価値は飛躍的に増大している。1999年に打ち上げられた「チャンドラ」はこれまでの100倍優れた空間分解能により続々と新しい成果を発表しているが、申請者はその性能を存分に活用している。これにより点源の寄与をほぼ完全に取り除くことができ、低温ガスが外部から照射されていることの強い証拠を得た。また、広がった天体を研究する際にはその詳細な分布を知ることが重要であるが、これも「チャンドラ」の空間分解能を用いることで可能になった。この成果は、照射源の方向の推測、および観測結果と数値計算結果の比較、に用いられている。

超新星残骸や、新たな広がった構造の発見も、「チャンドラ」の高空間分解能を活用した結果であり、重要な業績となる。この発見をもとに、中性鉄輝線の起源、暗い中心核ブラックホールに並ぶ大問題である銀河中心領域を満たす高温プラズマの起源について申請者は迫ろうとしている。まだ発見された超新星残骸の数は少ないが、年齢・温度が高温プラズマの起源として適当である、という結果を新たに得、さらに超新星残骸の候補天体を発見したことで今後のさらなる発展が期待される。

本申請論文は、X 線の観測結果に加えて、他波長、特に電波の観測が重要な役割を果たしている。「X 線反射星雲」は低温ガスとの相関が最も重要な判断基準であるが、これには分子輝線の観測が用いられている。超新星残骸は、高速電子からのシンクロトン放射を電波領域でも捕えることで、その存在がより確実となっている。このように、本研究は X 線に限ることなく全波長にまたがった解析を行うことで、より信頼性の高い結果を得ている。

以上のように本申請論文は、最新の、多波長にわたる観測結果を用いて独自の方法で我々の銀河中心領域に対し種々の新知見を与えている。よって本申請論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。主論文および参考論文に報告されている研究業績を中心として、これに関連した研究分野について口頭試問し合格と認めた。