

氏 名	せん だ あつ し 千 田 篤 史
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2869 号
学位授与の日付	平 成 17 年 3 月 23 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	A STUDY OF THERMAL AND NONTHERMAL X-RAY STRUCTURES IN THE GALACTIC CENTER REGION (我々の銀河系中心領域の熱的および非熱的 X 線構造の研究)
論文調査委員	(主 査) 教 授 小 山 勝 二 教 授 谷 森 達 教 授 今 井 憲 一

論 文 内 容 の 要 旨

我々の銀河系の中心には最近傍の大質量ブラックホール (Sgr A*) が存在しておりまた複数の高エネルギー現象が集中している領域である。中心核の周囲300光年四方の領域を電子温度約数 10keV 、総熱エネルギー 10^{54}ergs に達する大規模な高温プラズマが取り巻いており、また大小無数の非熱的電波フィラメントが周囲1000光年四方に分布していることが従来の観測から明らかになっている。さらにごく最近では TeV ガンマ線の検出例が複数報告されている。一方で、これら銀河中心領域の高エネルギー現象の起源は現在も謎に包まれたままである。解決を困難にしている最も大きな要因は、我々と銀河中心領域の間に横たわる多量の銀河面物質による強い星間吸収である。これにより、我々は限られた帯域 (電波・赤外線・硬 X 線・ガンマ線) でしか、銀河中心を見通すことが出来ない。

申請者は、X 線天文衛星 Chandra および XMM-Newton を用いた銀河中心領域の高空間分解・高感度観測の詳細解析から、二つの熱的構造および十数の非熱的構造を新たに発見した。

熱的構造はいずれも比較的若い超新星残骸 (SNR) の性質を示した。これらはいずれも大規模高温プラズマの生成源と考えられる。特に Sgr B2分子雲近傍で発見された G0.570-0.018に関しては、その非常に小さな直径 (約 0.8pc)、極端に小さい電離非平衡パラメータ ($n_t \sim 1.7 \times 10^{10}\text{cm}^{-3}$) から、X 線で観測される SNR に典型的である断熱膨張段階 (Sedov 段階) に達する以前の、自由膨張段階にある年齢約100年程度の極めて若い SNR の可能性が高いと結論付けた。

一方で、多数発見された非熱的 X 線ノットの大部分は以下のような共通の性質を持つことを観測的に見出した。(1)銀河系中心核から半径 20pc 以内の領域に局在している(2)星間吸収量は $N_H \sim (5-20) \times 10^{22}\text{cm}^{-2}$ で揃い、銀河中心の距離に位置する天体と考えてコンシステント(3)楕円体形状を有しており見かけ上の空間スケールは約 $20'' \times 5''$ で均一に揃っている、および(4)X 線スペクトルの光子指数は $1-2$ の冪関数で極めて良く再現され、その傾きは活動銀河核ジェットで観測されている典型的値に一致すること。これらに加え、発見されたうちの3つの X 線ノットは、中心核から北西方向に一直線上に沿って並んで分布しており、またそれぞれの楕円体長軸方向もその直線方向に一致していた。他の X 線ノットも、Sgr A* の位置を中心として放射状に分布していることを示した。以上の観測事実は、全ての非熱的 X 線ノットの生成起源が単一である、つまり中心核ブラックホールから断続的に噴出したジェットであることを示唆する。さらに、ノットの X 線放射が高エネルギー粒子と磁場の相互作用によるシンクロトロン起源である場合、銀河中心近傍の強磁場 ($B \sim 1\text{mG}$) 環境下ではわずか数年で冷却されてしまうため、観測された X 線ノット構造が存在し続けるためには、何らかの恒常的エネルギー供給源の存在が不可欠である。つまりこれら X 線ノットは、Sgr A* からの初めてのジェット検出例としてのみならず、宇宙線加速源の候補として極めて重要な意味を持つ。

論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

銀河中心領域での高エネルギー現象の起源は、その存在の発見以来20年以上にわたる大きな問題である。その解明は、中

心核ブラックホールと周辺領域の相互作用の理解のためのみならず、最近傍の銀河の中心のサンプルとして、銀河の形成・進化の理論に多大な情報をもたらす重要課題である。申請者はこれを解決するための最も有効な手段として硬 X 線観測を選んだ。その理由は以下の通りである。(1)高温プラズマの熱的放射および高エネルギー粒子からの非熱的放射の双方をカバーし得る唯一の帯域であること、(2)近年の観測技術の進歩により光学観測並の高い空間分解能 ($\Delta\theta \sim 0.5''$)、高いエネルギー分解能 $E/\Delta E \sim 50$ が達成可能となったこと、および(3)イメージング可能な帯域の中では最も高エネルギーの帯域であること。これらのいずれ 1 つが欠けても本研究の発見は不可能であった。研究テーマに対する申請者の先見の明が伺われる。

実際に申請者は、最新鋭の X 線天文衛星 Chandra および XMM-Newton 衛星により取得されたデータを最大限駆使し、その詳細な解析から 10 を越える熱的 X 線放射および非熱的 X 線放射の双方を新たに発見した。特に、得られた銀河中心領域の非熱的 X 線放射天体のサンプル数は過去最大であり、これらのスペクトルおよびイメージは S/N 比および空間情報の精度の高さにおいて過去最高品質のデータセットを提供している。さらに非熱的 X 線放射の系統的解析を行ったのは本研究が世界で初めてである。これだけでも本研究の価値の高さは明らかである。

本論文の最も重要な結果は、非熱的 X 線放射の空間分布およびスペクトル解析の結果から、(1)これらの起源が中心核ブラックホール Sgr A* から噴出したジェットである可能性が高いこと、および(2)銀河中心領域での宇宙線加速源の存在を示したことにある。現在は極めて静穏である Sgr A* が約 300 年過去には今より 100 万倍の明るさで輝いていたことが近傍分子雲の X 線観測から示唆されているが、本研究はこれとは全く独立に過去約 400-1000 年の Sgr A* の活発な活動性を示唆するものである。一方、現在空間的に同定されている唯一の宇宙線加速源は若い超新星残骸の衝撃波面によるフェルミ加速であるが、その最高加速到達エネルギーは高々 10^{14} eV のオーダーであり、銀河系内起源と呼ばれる knee energy ($10^{15.5}$ eV) には約一桁足りない。これに対し、銀河系内で最も深い重力ポテンシャルを持っている Sgr A* が銀河系内最大宇宙線加速源である可能性は十分に考えられる。申請者はこの可能性を初めて観測的に実証した。

一方で、熱的放射については今回新たに発見されたものがいずれも比較的若い超新星残骸であることを観測的に明らかにし、その物理量を高い精度で求めることに成功している。なかでも、年齢 100 年余りの極めて若い超新星残骸が見つかったことは、銀河中心領域の大規模高温プラズマが 1 event/50-100 年の高頻度の超新星爆発により生成されていることを示唆する重要な発見である。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。