

X線による中質量ブラックホールの検出と多波長によるその成長過程の観測的研究

Detection and Multi-wavelength Observation of Intermediate Massive Black Hole (日本天文学会推薦)

代表研究者
共同研究者

京都大学 鶴 剛
京都大学 小山勝二

Kyoto University
Kyoto University

Takeshi TSURU
Katsuji KOYAMA

研究目的

これまで 2 種類のブラックホールの存在が知られていた。1 つは白鳥座 X-1 に代表される恒星質量ブラックホールである。これは太陽質量の 10 倍程度のブラックホールである。もう 1 つは銀河中心核の巨大ブラックホールであり、太陽質量の 100 万倍から 10 億倍の質量を持つ。

恒星質量ブラックホールは、重い恒星の一生の最後を起こす重力崩壊型超新星爆発から誕生すると考えられている。太陽質量の 8~30 倍の質量を持つ恒星の場合は、その後中性子星と呼ばれるほぼ中性子だけでできた星が誕生する。太陽質量の 30 倍より重い恒星の場合は、ブラックホールが誕生する。我々の銀河系やマゼラン星雲で発見された恒星質量ブラックホールは十数個であり、そのうち精度良く質量を決めることができたものは太陽質量の 3~20 倍である。上記のシナリオからは恒星質量ブラックホールの質量は元の恒星の質量を超えることはない、太陽質量の 200 倍程度が上限となり、観測と矛盾しない。一方、この質量を超えたブラックホールは、恒星の終末から直接誕生したわけではなく、別の誕生メカニズムによることを意味する。

活動銀河核と呼ばれ明るく活動的な中心核を持つ銀河がある。活動銀河核の明るさは暗いものでも 10^{35}W 、中には 10^{39}W を越え、短い時間変動も観測されている。これは、小さな領域から大きなエネルギーが放射されていることを意味、その中心にはブラックホールがあることを示唆する。しかしその絶対的な明るさから、その質量は 100 万倍から 10 億倍の質量を持つ。これは、小さな銀河に匹敵する巨大な質量である。

ハッブル望遠鏡などを用いた詳しい観測から、この巨大ブラックホールは活動銀河核のみならず、我々の銀河系やアンドロメダ銀河と言った静かな銀河の中心でも発見された。現在ではほとんど全ての銀河の中心核に存在する普遍的な存在であると考えられている。

この巨大ブラックホールは、宇宙初期に銀河が誕生する時期に誕生していると考えられているが、その具体的なメカニズムは全く不明である。

銀河は誕生する際に、活発なスターバーストと呼ばれる星生成活動を行うと考えられている。現在の観測技術では宇宙初期の誕生しつつある銀河や巨大ブラックホールを直接観測することは不可能であるが、このスターバースト活動を起こしている近傍の銀河を観測することにより、巨大ブラックホール誕生の瞬間を見ることができのかもしれない。我々はそう考え、近傍のスターバースト銀河の代表である M82 銀河を「あすか」衛星を用いて観測を行なった。その結果、時間変

動を起こす明るい X 線星を検出した。絶対光度からこの星はブラックホールであり、X 線光度から太陽質量の 700 倍以上の質量を持つことがわかった。さらに我々はチャンドラ衛星を用いて追観測を行ったところ、この X 線星は M82 の銀河中心核から 170pc (550 光年) 離れていること、質量の上限は太陽質量の 100 万倍であることが分かった。これまで知られていた恒星質量の上限と、巨大ブラックホールの下限、さらに巨大ブラックホールは銀河中心に存在することを考えると、M82 で我々が発見した X 線星は、この両者のちょうど中間の質量を持つ新しいタイプのブラックホールと結論できる。

一方、松下と川辺らは、野辺山ミリ波干渉計を用いた M82 の観測から、この中質量ブラックホールをほぼ中心とする膨張巨大分子雲を発見し、膨張速度と大きさ、分子雲の質量から、この領域で約 100 万年前に約 1 万個超新星爆発が起こったと結論した。これはこの領域に大規模な星生成活動が起こったことを意味する。

中質量ブラックホールと膨張巨大分子雲と言う 2 つの特別な天体が偶然同じ場所に居るとは考えられない。そこで我々は中質量ブラックホールが膨張巨大分子雲に附随する星生成活動から誕生したと結論した。我々は、これはまさに銀河中心の巨大ブラックホールの誕生の過程を見ている可能性に気が付いた。

以上の研究結果を受け、本研究ではまず多波長詳細観測を中心に、中質量ブラックホールの誕生と成長のメカニズムと銀河中心の巨大ブラックホールとの関係を探る。

本研究では観測的研究に並行し、X 線観測装置の開発を行う。ブラックホールの作る一般相対論的時空構造により、降着円盤からは X 線偏光が期待される。また、X 線偏光を詳細にしらべることで、質量と共にブラックホールの性質を決めている角運動量を測定することが可能である。観測で得られる角運動量は、合体と質量降着による中質量および巨大質量ブラックホールの進化の歴史を物語る。

そこで、次世代 X 線衛星の搭載を目指して、現在我々はワイドバンド偏光検出型ハイブリッド X 線撮像分光器の開発を進めている。この装置は厚い空乏層を備えた透過型 X 線 CCD と、偏光検出可能な $\mu\text{-PIC}$ ガス検出器を組み合わせ、0.1~50keV をカバーする。特に本研究では、新型の透過型 X 線 CCD の開発を行う。

研究経過と考察

1) M82 の中質量ブラックホールの赤外線観測

「あすか」衛星による観測結果を受けて、我々は既に 1999 年 3 月に「すばる」望遠鏡に取り付けた近赤

外冷却カメラ CISC0 を用いて近赤外イメージおよび分光観測を行っていた。本研究でその結果を解析したところ、年令 100 万年程度の若い星団を 7 つ発見した。チャンドラ衛星による X 線観測の結果と比較したところ、その中の 1 つの星団と中質量ブラックホールの位置に近いことが分かった。詳細な観測結果は現在まとめているが、「すばる」および「チャンドラ」の位置決定精度から考えて、中質量ブラックホールがその星団に含まれている可能性があると考えている。

さらに、中質量ブラックホールの質量を測定し、活動銀河核的な活動性を探ることを目的に、精密分光観測を「すばる」望遠鏡に取り付けられた近赤外観測装置 IRCS を用いて観測を行った。観測は 2001 年 4 月に行ったが、残念ながら悪コンディションのために質の良いデータを得ることができなかった。

2) 巨大ブラックホール形成のシナリオの構築

X 線、電波、さらに本研究で行った赤外線観測の結果をまとめ、理化学研究所の戒崎基盤研究部長および東京大学の牧野助教教授らのグループと共同で、中質量ブラックホールおよび巨大ブラックホール誕生の新しいメカニズムを提案した。まず、爆発的星形成で生まれた星団の中心部分で、恒星の合体により中質量ブラックホールが誕生する。それらが星団に抱かれつつ銀河中心へ落下し、最終的には重力波を放出しながら合体することで巨大ブラックホールへと成長する。このシナリオは、銀河の形成進化や活動銀河核の形成までを統一的に説明することが可能である。

3) 中質量ブラックホールの X 線放射メカニズム

恒星質量ブラックホールでは、標準降着円盤からの多温度黒体放射モデルで説明できる。また、明るさと温度にはきれいな正の相関があることが観測的に知られており、モデルもこれを自然に説明する。また、温度とブラックホール質量には負の相関があることが予測され、重いブラックホールほど温度が低くなると考えられている。

恒星質量ブラックホールと巨大ブラックホールの中間の質量を持つ中質量ブラックホールが、どちらの X 線メカニズムに近いかは興味ある問題である。そこで我々は「あすか」衛星によって得られた M82 の中質量ブラックホールの X 線スペクトルデータを詳細に解析した。その結果、スペクトルの形自体は恒星質量ブラックホールでよくみられる標準降着円盤からの多温度黒体放射モデルで説明できた。しかし、明るさと温度が正の相関をとらないこと、明るさから決めたブラックホール質量から見積もられる黒体放射温度よりも高い温度が観測された。よって、中質量ブラックホールの X 線放射メカニズムは標準円盤からの多温度黒体放射モデルでは説明できないことがわかった。さらに、降着円盤中で発生する熱エネルギーが放射の形で外に放射される前にブラックホールに落ち込む、スリムディスクと呼ばれるモデルを適用した。この場合、黒体放射温度の高さは説明可能であるものの、やはり明るさと温度が正の相関をとらないことを説明できないことがわかった。以上の結果は論文としてまとめ投稿を行った。

4) N 型 X 線 CCD の開発

CCD の高エネルギーバンドでの X 線検出効率を決め

る空乏層厚みを向上させるには、素材のシリコンの比抵抗を向上させるのが一般的であるが、それには限度がある。そこで我々は、もう一つのパラメータである易動度に着目した。易動度はホールに比べ電子が 3 倍大きい。よって、メジャーキャリアが電子である N 型を素材として CCD を作ることで(他のパラメータが同一の場合)空乏層を 1.5 倍厚くすることが可能である。さらに、N 型シリコンの方が大きな比抵抗を得ることが可能である。そこで、我々は浜松ホトニクス、国立天文台、大阪大学と共同で、従来の P 型に変え N 型を素材とした CCD の開発を開始した。開発の最終目標は、電子換算読み出しノイズ 3e(RMS)、空乏層厚み 300 μm である。

本研究では P 型 CCD のマスクをそのまま N 型に転写し、素材のみを変更することで試作を行った。その段階で空乏層厚み 130 μm 以上を達成した。現在使用されている最新の X 線 CCD の空乏層が 70 μm であることを考えると、2 倍近い向上である。さらに比抵抗を上げた CCD の試作も既に終了しており、現在性能評価試験の準備を行っている。

一方で、読み出しノイズとエネルギー分解能が悪いことも判明した。これに関しては、CCD メーカーと議論の上、プロセスの方法を変更するなど改善を行なう予定である。

5) 透過型 X 線 CCD の開発

N 型素材を用いた場合でも、現実的な空乏層厚みの最大値は 300 μm 程度であろう。この厚みでは、目標の 50keV まで十分な検出感度を持つことは不可能である。そこで、CCD で検出できなかった 20keV 以上の高エネルギー X 線は、その下に置いた硬 X 線カメラに入射、検出を行わせる。これが、我々の考案したワイドバンドハイブリッドカメラの基本的なアイディアである。そのためには、CCD の背面をささえるサポート構造を取り除き、中性領域を削り取る。これを透過型 X 線 CCD と呼ぶ。2001 年度よりこの型の CCD の検討を行い、従来十分使い慣れた P 型素材を用いて、2002 年度に試作を行った。試作の目的は、中性領域の研削など、透過型を製造する上での基本的なプロセスに問題がないことを確認することである。現在、その CCD の性能評価試験を行うために必要な準備を行っている。

P 型素材の場合は、空乏層厚み 70 μm 程度となり、自立して支えることが難しいため、X 線検出に関係のない中性領域も残さざるを得ない。上に示した N 型 X 線 CCD の開発が成功した場合には、P 型素材に変え、N 型とすることで、300 μm 空乏層のみを持つ透過型 X 線 CCD の製作を行う予定である。この CCD を用いてハイブリッドカメラを製作、最終的には 2010 年の打ち上げを目指す次世代 X 線天文衛星 NeXT に搭載したいと考えている。

6) N 型 X 線 CCD、透過型 X 線 CCD 試験装置の製作

上記の開発を進める上で、X 線 CCD 試験装置が必要である。従来われわれが使用していた試験装置は大きく移動が困難である。今後、X 線ビームラインや放射光施設で試験を行うことを考えると、小型で機動性の高い試験装置が必要となる。また、X 線 CCD は、 -100°C 程度に冷却する必要があるが、従来使用してきたペルチェ素子では投入電力に対し冷却効率が低いため、将

来の衛星では機械式冷凍機を導入することになる。そこで本研究の予算を用いて、衛星搭載型のオリジナルである住友重機械製の小型スターリング冷凍機を導入し試験を行ないながら、小型で可搬性のある X 線 CCD カメラ試験装置の製作を行った。上記の試験結果は、全てこの装置を用いて行われた。

小型スターリング冷凍機の性能は、冷却能力は十分であるものの大きな電流を投入するため、簡易な電源装置では CCD にノイズを与える可能性があることがわかった。

研究発表

口頭発表

1. T. G. Tsuru, H. Matsumoto, S. Matsushita, R. Kawabe, T. Harashima, F. Iwamuro, T. Maihara, T. Ebisuzaki, J. Makino; 「Discovery of Intermediate Massive Black Hole in M82, Birth and Evolution of Super Massive Black Hole」、日本物理学会（沖縄、2001）

2. T. G. Tsuru, T. Tanimori, A. Bamba, K. Imanishi, K. Koyama, H. Kubo, H. Matsumoto, K. Miuchi, M. Nagayoshi, R. Orito, A. Takada, S. Takagi, M. Tsujimoto, M. Ueno, H. Tsunemi, K. Hayashida, E. Miyata; 「Hybrid X-ray Imaging Spectrometer for NeXT and the Next Generation X-ray Satellites」、COSPAR meeting (Houston、2002)

3. T. G. Tsuru, H. Matsumoto, S. Matsushita, R. Kawabe, T. Harashima, F. Iwamuro, T. Maihara, T. Ebisuzaki, J. Makino; 「Discovery and Observation of Intermediate Massive Black Hole」、Eleventh Workshop on General Relativity and Gravitation（早稲田、2002）

4. 鶴 剛; 「偏光 X 線で切り開く宇宙物理と次期 X 線天文衛星計画」日本物理学会（草津、2002）

・ 鶴 剛、谷森達、他ハイブリッドカメラチーム; 「ワイドバンド偏光検出型ハイブリッド X 線カメラの開発」、日本天文学会（仙台、2003）

5. 高木慎一郎、鶴 剛、馬場彩、松本浩典、小山勝二、宮崎聡、鎌田有紀子; 「次期 X 線天文衛星 NeXT 搭載用 N 型 CCD の性能評価」、日本天文学会（仙台、2003）

6. 植野優、谷森達、鶴 剛、窪秀利、身内賢太郎、永吉勉、折戸玲子、高田淳史; 「位置検出型 μ -PIC を用いた X 線偏光測定のエネルギーおよびガス依存性」、日本天文学会（仙台、2003）

7. 松本浩典、鶴 剛、松下聡樹、川辺良平、小林尚人、舞原俊憲、戎崎俊一、牧野淳一郎、野本憲一、梅田秀之; 「チャンドラ衛星によるスターバースト銀河 NGC2146 の観測研究」、日本天文学会（仙台、2003）

誌上発表

1. Toshikazu Ebisuzaki, Junichiro Makino, Takeshi

Go Tsuru, Yoko Funato, Simon Portegies Zwart, Piet Hut, Steve McMillan, Satoki Matsushita, Hironori Matsumoto, Ryohei Kawabe; Missing Link Found? The “Runaway” Path to Supermassive Black Hole; Astrophysical Journal, 562, L19, 2001.

By using ASCA and Chandra, we discovered a new type of black hole, intermediate massive black hole (IMBH), at the off-center position in the starburst galaxy M82. We also found an expanding molecular super bubble (EMSB) surrounding the IMBH with Nobeyama Millimeter Array.

After the discoveries, we made follow-up IR observation of the IMBH with Subaru Telescope in this study and found seven young star clusters in the region. One of the seven star clusters, which we detected with Subaru Telescope observation, was identified with the IMBH within the absolute position accuracy. The results suggest the IMBH was formed in the starburst activity in $10^6 \sim 10^7$ yrs ago. We also introduced a new formation scenario of SMBH through the merging of IMBHs, which fall into galaxy center by the dynamical friction. We also made X-ray spectral studies for the IMBH in M82 and found that no model describes the spectral nature.

Next step of the research is to measure the angular momentum of a black hole by detecting X-ray polarization and investigate the evolution history of IMBH and SMBH. Thus, we have been developing a new type of X-ray imaging spectrometer, Hybrid X-ray Imaging Spectrometer, and back supportless X-ray CCD with a thick depletion layer used in the camera. By introducing N type wafer of silicon for the CCD, we achieve a thick depletion layer of $130\text{ }\mu\text{m}$, which is about twice thicker than the latest X-ray CCD onboard on X-ray satellite.