

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400228

研究課題名(和文) X線観測による活動銀河核フィードバックの研究

研究課題名(英文) Study of Active Galactic Nucleus Feedback with X-ray Observations

研究代表者

上田 佳宏 (Ueda, Yoshihiro)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：10290876

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：近傍宇宙の多数の活動銀河核に対して、「すざく」とXMMニュートン衛星のX線スペクトルを系統的に解析した。その結果、電波銀河の約半数が超高速アウトフローをもつこと、トーラスの平均立体角が、中～高光度の範囲では光度と逆相関するが、低光度側では光度と正相関すること、AGNフィードバックを決定する鍵パラメータがエディントン比であることを発見した。超高光度X線源の可視分光観測により、それらが「超臨界降着流」状態にあり、大量のガスを円盤風として周囲に吹き出していることを発見した。

研究成果の概要(英文)：We systematically analyzed the X-ray spectra of many active galactic nuclei in the local universe observed with Suzaku and XMM-Newton. We have found that (1) about half of radio galaxies have ultra fast outflows, (2) the mean solid angle of tori increases with luminosity at low luminosities, and (3) a key parameter that determines AGN feedback is the Eddington ratio. By optical spectroscopic observations of ultra-luminous X-ray sources, we have revealed that they are in the supercritical accretion state, ejecting a large amount of gas via disk winds.

研究分野：X線天文学

キーワード：活動銀河核 ブラックホール X線

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙の歴史において巨大ブラックホールが果たしてきた役割の解明は、「ブラックホール天文学」という狭い分野に留まらず、現代天文学に課せられた大問題であり、高エネルギー天文学と多波長観測との連携によって初めて決着の付けられる課題である。最近の観測により、活動銀河核からの相対論的ジェットや円盤風による周辺環境への影響 (AGN フィードバック) こそが、銀河・ブラックホール共進化の起源の理解の鍵を握ることが明らかになってきた。AGN からのアウトフローは、周辺のガスを掃討・加熱することで、ブラックホールへのガス降着と星生成を阻害し、それらの成長を調整する。AGN フィードバックに関して、現在大きな未解決問題となっているのは、「どのような条件でブラックホールからのフィードバックが起こるか (ブラックホール降着流におけるアウトフロー発生メカニズムの理解)」「AGN は宇宙論的タイムスケールでどのように周辺環境に影響を与えてきたか」という2点である。

## 2. 研究の目的

ブラックホール降着流からどのような条件で、相対論的ジェットや円盤風が放出されるかという物理的理解は、「すざく」などの活躍により一定の進展が見られているものの、大きな謎として残されている。本研究は、様々な質量範囲のブラックホールを多波長分光観測することにより、アウトフローを支配する共通の物理を解明することを第一目的とする。さらに、AGN フィードバック現象を宇宙論的タイムスケールで系統的に調査するために、X線深サーベイの電波を含んだ多波長同定を進めることを第二の目的とする。

## 3. 研究の方法

「すざく」はこれまで100以上の近傍AGNを分光観測している。本研究では「すざく」およびXMM-Newtonの利用可能な全データを用い、強力な相対論的ジェットをもつAGN (電波銀河) ともたないAGNについて、降着円盤の最内縁の構造、円盤風、および周辺物質の違いに着目することで、ジェット生成の起源について解答を得る。より精度のよいブラックホール降着流の観測を行なうべく、超高光度X線源や銀河系内ブラックホール連星も研究対象とする。さらに、AGNフィードバックの進化を理解するために、かつてない広さと深さを同時に実現した「すばる」XMMニュートン深サーベイ (SXDS) を進め、電波を含めた多波長での同定作業を

完了させる。

## 4. 研究成果

### (I) 電波銀河からの高速円盤風の系統的観測

活動銀河核フィードバックを理解する上で重要な研究対象が、相対論的ジェットをもつ「電波で明るい」活動銀河核 (電波銀河) である。本年度は、近傍宇宙における電波銀河の大サンプルに対して、「すざく」および「XMM-Newton」衛星のデータを利用して、系統的なX線スペクトルの解析を進めた。その結果、超高速アウトフロー (Ultra Fast Outflow) の証拠を27%の天体から発見した (Tombesi et al. 2014)。検出効率を補正すると、およそ半数の天体が超高速アウトフローを持つことを示唆する。この事実は、強いジェットのあるなしに関らず、活動銀河核の降着円盤からはしばしば強い円盤風が放出されていることを意味する。

### (II) プレーザー天体の時間変動の調査によるジェット発生機構の研究

活動銀河核からの相対論的ジェットの機構を理解するため、ジェットが観測者の方を向いている「プレーザー天体」のうち最もX線で明るい天体「Mrk 421」に着目し、全天X線監視装置 (MAXI) のデータを用いて、その時間変動の性質を調査した (Isobe et al. 2014)。MAXIの提供する3年間にわたる光度曲線は過去最長で、これまでで最も低い周波数における変動率を決定することに成功した。その結果、約1日のタイムスケールにおいてパワースペクトルが折れ曲がりをもつこと、その低周波数側での傾きが (強いジェットを持たない) セイファート銀河のそれと似た値であることが判明した。この事実は、ジェットの活動性の長期変動が、降着円盤内縁における物理に起因して生じていると考えて矛盾しない。

### (III) AGN トーラス構造の解明

活動銀河核 (AGN) 中の巨大ブラックホールを取り巻く「トーラス」構造は、降着円盤からのアウトフロー (円盤風) そのものによって形成されている可能性がある。したがって、トーラスの構造が中心核光度やエディントン比 (ブラックホール質量で規格化した質量降着率) にどのように依存するかを調べることは、AGNフィードバックの物理を理解する上で重要な課題である。これまでに「すざく」衛星によって観測された、適度に吸収をうけた近傍AGN (45天体) と光度の低い近傍AGN (10天体) に対して、Swift/BATのデータも含めた広域X線スペクトルを系統的に解析した (Kawamuro et al. 2016a, 2016c)。そ

の結果、トラス立体角の平均値は、中～高光度の範囲では光度と逆相関するが、低光度がわでは、光度と相関することを発見した。また、低光度 AGN のうち、エディントン比がひじょうに小さい天体ではトラス構造がほとんど発達しておらず、AGN フィードバックを決定する鍵パラメータがエディントン比である示唆を得た。

(IV) 超高光度 X 線源および銀河系内ブラックホール X 線連星からのアウトフローの観測

活動銀河核フィードバックのパワーを担う、相対論的ジェットや降着円盤風の放出には、ブラックホール質量に依らない、共通の物理機構が働いていると考えられる。特に、ブラックホールへの質量降着率が極めて高く、エディントン光度に相当する「臨界降着率」に近付いた時に、降着流と放出流がどのような振舞を示すかということは、極めて重要な基本問題である。そこで、近傍銀河に存在する「超高光度 X 線源」の可視スペクトルの研究を進めた。その結果、これらの多くが、銀河系内の唯一の定常ジェット天体 SS 433 と同じスペクトルの特徴を示すことを発見した (Fabrika et al. 2015)。この事実は、超高光度 X 線源が大量のガスを円盤風として周囲に吹き出している「超臨界降着流」状態にあることを強く示唆するものである。さらに、銀河系内ブラックホール X 線連星・白鳥座 V404 星のアウトバーストの可視 X 線データを解析し、降着円盤内側での熱的不定性が、従来考えられていたよりもずっと質量降着率の小さいときにも起こり得ることを指摘した (Kimura et al. 2016)。

(V) X 線深サーベイの多波長同定

活動銀河核フィードバックの宇宙論的進化を理解するためには、遠方宇宙における活動銀河核の無バイアス探査が欠かせない。長年来、共同研究者と協力して進めてきた「すばる」XMM ニュートンディープサーベイで見つかった X 線天体の多波長同定のカタログをまとめ、電波で明るい AGN の割合を導出した (Akiyama et al. 2015)。このカタログは、今後の研究の基礎データベースとなる。この成果も含めた、X 線観測による AGN の宇宙論的進化をまとめたレビュー論文を執筆した (Ueda 2015)。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 34 件)

1. Tombesi, F. et al. (Ueda, Y.) “Feeding and Feedback in the Powerful Radio Galaxy 3C 120” *The Astrophysical*

*Journal*, 838, 2017

2. Oda, S., Tanimoto, A., Ueda, Y. et al. “Shedding Light on the Compton-thick Active Galactic Nucleus in the Ultraluminous Infrared Galaxy UGC 5101 with Broadband X-Ray Spectroscopy” *The Astrophysical Journal*, 835, 2017

3. Ichikawa, K., Ricci, C., Ueda, Y., et al. “The Complete Infrared View of Active Galactic Nuclei from the 70 Month Swift/BAT Catalog” *The Astrophysical Journal*, 835, 2017

4. Kawamuro, T., Ueda, Y., Tazaki, F., Terashima, Y., Mushotzky, R. “Study of Swift/Bat Selected Low-luminosity Active Galactic Nuclei Observed with Suzaku” *The Astrophysical Journal* 831, 2016

5. Kawamuro, T., Ueda, Y., Shidatsu, M. et al. “Hard X-ray luminosity function of tidal disruption events: First results from the MAXI extragalactic survey” *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 68, 2016

6. Hitomi Collaboration (Ueda, Y.) “The quiescent intracluster medium in the core of the Perseus cluster” *Nature*, 535, 2016, 117-121

7. Kawamuro, T., Ueda, Y., Tazaki, F., Ricci, C., Terashima, Y. “Suzaku Observations of Moderately Obscured (Compton-thin) Active Galactic Nuclei Selected by Swift/BAT Hard X-ray Survey” *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 225, 2016

8. Tanimoto, A., Ueda, Y., Kawamuro, T., Ricci, C. “Suzaku follow-up of heavily obscured active galactic nuclei detected in Swift/BAT survey: NGC 1106, UGC 03752, and NGC 2788A” *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 68, 2016

9. Tachibana, Y., Kawamuro, T., Ueda, Y., et al. “A soft X-ray lag detected in Centaurus A” *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 68, 2016

10. Rivers, E., Brightman, M., Bianchi, S., Matt, G., Nandra, K., Ueda, Y. “Suzaku confirms NGC 3660 is an unabsorbed Seyfert 2” *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 68 2016

11. Shidatsu, M., Done, C., Ueda, Y. “An Optically Thick Disk Wind in GRO J1655-40?” *The Astrophysical Journal*, 823, 2016

12. Stalevski, M., Ricci, C., Ueda, Y., et al. “The dust covering factor in active galactic nuclei” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 458, 2016,

- 2288-2302
13. Kimura, M., Isogai, K., Kato, T., Ueda, Y. et al. "Repetitive patterns in rapid optical variations in the nearby black-hole binary V404 Cygni" *Nature*, 529, 2016, 54-58
  14. Berney, S. et al. (Ueda, Y.) "BAT AGN spectroscopic survey-II. X-ray emission and high-ionization optical emission lines" *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 454, 2015, 3622-3634
  15. Ricci, C., Ueda, Y. et al. "Compton-thick Accretion in the Local Universe" *The Astrophysical Journal Letters*, 815, 2015
  16. Ueda, Y. et al. "[O iii]  $\lambda$ 5007 and X-Ray Properties of a Complete Sample of Hard X-Ray Selected AGNs in the Local Universe" *The Astrophysical Journal*, 815, 2015
  17. Toba, Y. et al. (Ueda, Y.) "Hyper-luminous dust-obscured galaxies discovered by the Hyper Suprime-Cam on Subaru and WISE" *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 67, 2015
  18. Akiyama, M., Ueda, Y. et al. "The Subaru-XMM-Newton Deep Survey (SXDS). VIII. Multi-wavelength identification, optical/NIR spectroscopic properties, and photometric redshifts of X-ray sources" *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 67, 2015
  19. Fabrika, S., Ueda, Y. et al. "Supercritical accretion disks in ultraluminous X-ray sources and SS 433" *Nature Physics*, 11, 2015, 551-553
  20. Ueda, Y. "Cosmological evolution of supermassive black holes in galactic centers unveiled by hard X-ray observations" *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 91, 2015, 175-192
  21. Gandhi, P. et al. (Ueda, Y.) "A Compton-thick AGN in the barred spiral galaxy NGC 4785" *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 449, 2015, 1845-1855
  22. Miyaji, T. et al. (Ueda, Y.) "Detailed Shape and Evolutionary Behavior of the X-Ray Luminosity Function of Active Galactic Nuclei" *The Astrophysical Journal*, 804, 2015
  23. Ichikawa, K. et al. (Ueda, Y.) "The Differences in the Torus Geometry between Hidden and Non-hidden Broad Line Active Galactic Nuclei" *The Astrophysical Journal*, 803, 2015
  24. Krumpke, M. et al. (Ueda, Y.) "Chandra survey in the AKARI North Ecliptic Pole Deep Field - I. X-ray data, point-like source catalogue, sensitivity maps, and number counts" *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 446, 2015, 911-931
  25. Isobe, N., Sato, R., Ueda, Y. et al. "MAXI Investigation into the Long-term X-Ray Variability from the Very-high-energy gamma-Ray Blazar Mrk 421" *The Astrophysical Journal*, 798, 2015, id.27.
  26. Castro, A. et al. (Ueda, Y.) "AKARI infrared camera observations of the 3.3  $\mu$ m PAH feature in Swift/BAT AGNs" *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 66, 2014, id. 110
  27. Ricci, C., Tazaki, F., Ueda, Y. et al. "Suzaku Observation of IRAS 00521-7054, a Peculiar Type-II AGN with a Very Broad Feature at 6 keV" *The Astrophysical Journal*, 795, 2014, id. 147
  28. Ichikawa, K., Imanishi, M., Ueda, Y. et al. "AKARI IRC 2.5-5  $\mu$ m Spectroscopy of Infrared Galaxies over a Wide Luminosity Range" *The Astrophysical Journal*, 794, 2014, id.139
  29. Tombesi, F., Tazaki, F., Mushotzky, R. F., Ueda, Y. et al. "Ultrafast outflows in radio-loud active galactic nuclei" *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 443, 2014, 2154-2182
  30. Ricci, C., Ueda, Y., Paltani, S., Ichikawa, K., Gandhi, P., Awaki, H. "Iron K $\alpha$  emission in type-I and type-II active galactic nuclei" *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 441, 2014, 3622-3633
  31. Hori, T., Ueda, Y. et al., "SUZAKU Observation of the Black Hole Binary 4U 1630-47 in the Very High State" *The Astrophysical Journal*, 790, 2014, id.20
  32. Shidatsu, M., Ueda, Y. et al. "Spectral and Timing Properties of the Black Hole X-Ray Binary H1743-322 in the Low/Hard State Studied with Suzaku" *The Astrophysical Journal*, 789, 2014, id. 100
  33. Ricci, C., Ueda, Y. et al. "The narrow Fe K $\alpha$  line and the molecular torus in active galactic nuclei: an IR/X-ray view" *Astronomy & Astrophysics*, 567, 2014, A142
  34. Ueda, Y., Akiyama, M., Hasinger, G., Miyaji, T., Watson, M.G. "Toward the Standard Population Synthesis Model of the X-Ray Background: Evolution of X-Ray Luminosity and Absorption

Functions of Active Galactic Nuclei Including Compton-thick Populations”  
The Astrophysical Journal, 786, 2014,  
id. 104

〔学会発表〕(計 4 件)

1. Ueda, Y. "X-ray View of Obscured Accretion” European Week of Astronomy and Space Science 2016 (招待講演), 2016年07月04日~2016年07月08日, アテネ(ギリシア)
2. Ueda, Y. "Broadband X-ray Spectra of AGNs and Synthesis of the X-ray Background” Prospects, challenges and evolution of AGN modeling in the Astro-H Era (招待講演), 2015年10月21日~2015年10月22日, 東京(日本)
3. Ueda, Y. "Cosmological Evolution of X-ray Selected AGNs and Synthesis of the X-ray Background", Torus 2015(招待講演), 2015年09月14日~2015年09月17日, ウィンチェスター(イギリス)
4. Ueda, Y. "X-ray view of active galactic nuclei” 10th Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics (招待講演), 2015年06月15日~2015年06月19日, ステブルノ・イエツェロ(セルビア)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上田佳宏 (UEDA YOSHIHIRO)  
京都大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号: 10290876

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: