

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月10日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2012

課題番号：21244017

研究課題名（和文）硬X線観測によるCompton Thick 活動銀河核の解明

研究課題名（英文）Hard X-ray studies of Compton thick active galactic nuclei

研究代表者

粟木 久光 (AWAKI HISAMITSU)

愛媛大学 大学院理工学研究科・教授

研究者番号：30252414

研究成果の概要（和文）：Compton thick 活動銀河核は、活動銀河核の中心が非常に濃い物質で隠されている天体であり、活動銀河核の進化の解明に重要な天体である。我々は、X線天文衛星「すざく」等を使い、その中心核を隠している物質と活動性等を明らかにした。また、銀河核の解明には大型高精度X線望遠鏡が必要である。高精度薄板基板の製作、レプリカ用ガラスマンドレルの研磨等、大型望遠鏡開発に必要な要素技術を開発した。

研究成果の概要（英文）：Compton-thick active galactic nucleus (AGN) are objects whose nucleus are heavily obscured by thick matter ($N_H > 10^{24} \text{ cm}^{-2}$), and are key objects to study the evolution of AGN. We have explored the characteristics of bright Compton-thick AGNs such as nuclear activity and obscuring column with X-ray satellites, Suzaku and so on. A large X-ray observatory is crucial to reveal the nature of AGNs. We have developed elemental technologies for production of a large X-ray telescope.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,800,000	2,640,000	11,440,000
2010年度	10,600,000	3,180,000	13,780,000
2011年度	9,000,000	2,700,000	11,700,000
2012年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
年度			
総計	35,300,000	10,590,000	45,890,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：宇宙物理、X線天文学、活動銀河核、望遠鏡

1. 研究開始当初の背景

(1) 活動銀河核(AGN)は、宇宙の中で最も活動的な天体の一つであり、銀河中心に存在する超巨大ブラックホールに物質が降着することでその物質の持つ重力エネルギーが解放され、エネルギーを作っていると考えられている。しかし、この超巨大ブラックホールがいつどのように誕生し、成長してきたのか、未知のままであり、現代天文学が解明すべき最重要課題の一つとなっている。ブラックホールと

銀河の共進化の可能性が指摘されており、ブラックホールの誕生と進化の研究は、その重要性を増している。

(2) 進化を解明するには、遠方を観測するための大型望遠鏡が必要である。X線は斜入でしか反射しないため、ウォルター型で代表される斜入射光学系をX線望遠鏡で使っている。この光学系では、集光力を向上させるため、タマネギ状に反射鏡を重ねて並べる必要が

あり、大型化のためには薄く軽量の反射鏡基板が求められる、しかし、このような基板で高形状精度のものを作るのは困難であり、大型X線天文台実現のため世界中で開発が進められている。

2. 研究の目的

(1) ブラックホールの成長を含むAGNの進化の解明には、隠されたAGN,特にCompton thick天体と呼ばれる非常に強い吸収($N_H > 10^{24} \text{ cm}^{-2}$)を受けた天体への理解が鍵となる。それは、Risalitiら (1999)がCompton thick天体が全AGNの半分以上を占めていると指摘したことなどによる。さらに、Worsleyら(2005)は宇宙X線背景放射と既知のAGNとの比較から未検出のCompton thick天体が多数存在している可能性を示し、この未検出天体が赤方偏移 $z > 1$ の天体であると指摘している。このことは過去に降着物質を多くまとったAGNが多数存在していることを意味しており、ブラックホールが濃いガスの中で誕生し、大量の物質を降着し成長していることを連想させる。しかし、Compton thick天体は、10 keV以下のエネルギー帯で、ほぼ完全に隠されているため、中心核の活動性、隠している物質の量とその構造など、その素性はほとんどわかっていない。本研究では、このCompton Thick天体を解明することを目的とする。

(2) 望遠鏡の大型化で遠方の天体からの光を集めることができるが、遠方天体など見かけ上微弱な天体は天空での空間密度が高い。このため、各天体に分離できるだけの角度分解能が必要となる。我々は、10-20秒角の角度分解能を目標とし、それに必要な要素技術の開発を目的とする。この開発は、次世代のX線望遠鏡を見据えたものである。

3. 研究の方法

(1) 観測的研究

我々は、「ぎんが」衛星により2型セイファート銀河の中心核が隠されている直接証拠を発見し、隠されたAGNが宇宙X線背景放射の説明に必要であることを世界で初めて指摘した(Awaki et al. 1990)。その後の「あすか」衛星の観測により、2型セイファート銀河が隠されたAGNであるとする描像が確立した。

2型セイファートと銀河の成果は、X線の優れた透過力を利用したものであり、X線は隠された活動銀河核の解明に適している。特に10 keV以上の硬X線観測は、Compton thick天体の活動性解明に必須である。「すざく」衛星は10 keV以上のエネルギー帯域で観測能力を持っており、我々は「すざく」等のX線天文衛星

を用いて、次の項目にしぼって研究を進める。

① 「すざく」衛星等を用いて、近傍活動銀河核の性質(X線スペクトル、時間変動など)を明らかにする。Compton thick天体については、我々が開発したX線放射モデル(以下、トーラスモデル、Ikeda et al. 2009)を適用し、Compton thick天体の物質分布ならびに活動性を得る。

② Swift/BATやINTEGRAL衛星などの硬X線で検出された天体や赤外線検出された隠されたAGNについての研究を行う。

(2) 硬X線望遠鏡の開発

高角度分解能硬X線望遠鏡作成のため、私たちは「あすか」「すざく」「ASTRO-H」衛星で用いられた薄板多重望遠鏡を高性能軽量化する方法を選んだ。この望遠鏡実現に必要な要素技術を①-④に細分化し、それぞれの項目で開発を行う。

① 非球面薄板基板製作

ASTRO-H搭載硬X線望遠鏡では0.2mm厚のアルミニウム基板を用いているが、基板形状の高精度化のため、厚さ0.4mm以内を用いる。また、軽量化のため、密度がアルミニウムよりも小さい材質を用いて開発する。

② 多層膜レプリカ法の確立

「すざく」衛星以前は、単層膜による全反射で、X線を反射させていたが、全反射では硬X線の反射率が低く、高い集光力を上げることが困難である。そこで、多層膜によるブラッグ反射を利用した反射鏡を製作する。これに必要な要素技術を開発する。

③ 研磨工程の開発

レプリカ法で高角度分解能望遠鏡を製作する場合、レプリカで用いるガラスマンドレルに高形状精度が求められる。しかし、高形状精度と滑らかな表面を合わせ持つガラスマンドレルは入手が困難であり、大型非球面マンドレルでは、加工自体も困難である。我々は研削と研磨の両方を使い、大型非球面マンドレルの製作に必要な技術を開発する。

④ 反射鏡の組み上げ等に関する調査

結像性能向上には、反射鏡を精度良く、設計値の位置に保持する必要がある。このための機構を開発する。さらに、将来の飛行体実験のために、打ち上げ振動環境下での反射鏡の振る舞いを調査し、反射鏡や保持機構の設計に必要な基礎データを提供する。

4. 研究成果

(1) 観測的研究

① 近傍活動銀河核の性質に関する研究

[OIII]輝線の明るいCompton thick天体のX線スペクトルを従来の反射成分+吸収を受

けたベキ成分で再現し、吸収量の分布ならびに活動性を明らかにした。また、Swift/BATでCompton thick 活動銀河核と分類された天体に対し、トーラスモデルを適用し、トーラスの構造に対して制限を与えるとともに、活動性を推定した。トーラスモデルでは吸収体がトーラス状に分布しており、従来の円盤状に分布しているモデルより現実的である。

激しい時間変動を示す天体に着目し、ブラックホール質量の小さい天体を複数個発見した。この天体は成長途中の巨大ブラックホールである可能性があり、この天体の詳細観測を通して、活動銀河核の進化解明が前進すると期待される。

また、赤外線観測とX線観測データを系統的に調べ、隠された活動銀河核の分類規準の作成を試みた。この規準を現有の赤外線、X線カタログに適用することで、まだ、発見されていないCompton thick 天体が発見できる可能性がある。Compton thick 天体の存在割合を検証する上で重要であり、Compton thick 天体のサンプル数の増加は分類や進化の解明に大きく貢献する。

(2) 硬 X 線望遠鏡の開発

① 非球面薄板基板の開発

アルミニウムの約2/3の密度であるマグネシウムを材料とし、放物面側、双曲面側でそれぞれ数 μm の母線形状精度を持つ基板を製作した。また、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)を基板材料に用いた開発にも着手し、 $\sigma_{\text{rms}} \sim 3\mu\text{m}$ の母線表面形状をもつ基板も製作した。

我々の開発する基板はウォルター形状をしているため、アライメント誤差の影響を受けにくい。基板表面の小さな凹凸をレプリカ法等で平滑化できれば、「すざく」「ASTRO-H」の基板よりも高角度分解能が期待でき、まさに、次世代の反射鏡の基板になりうる。

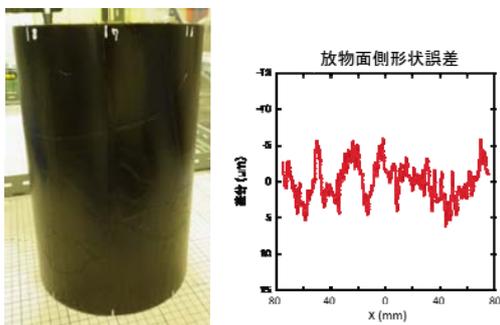


図 1 CFRP 製非球面円筒基板 (左) とその形状誤差 (右、放物面側)

② 多層膜レプリカの開発

連携研究者を中心に、多層膜レプリカの開発を行った。放物面、双曲面をそれぞれ円錐近

似したもので、表面粗さ 0.4nm でのレプリカが可能となった。この表面粗さにより、約 70 keV の X 線まで集光できる。この技術をウォルター形状に適用することで、高角度分解能を持つ反射鏡基板が製作可能である。

③ レプリカ母型の開発

我々は形状精度の高い滑らかな面を形成する方法として、研削により形状を整えた後、その面を研磨する手法をとった。自動研磨装置を開発し、研削後の円筒ガラス管の表面粗さを $1\mu\text{m}$ から 5nm 以下にすることに成功した。この技術を向上させることで、入手困難であった高精度レプリカ母型の製作が安価にできる。

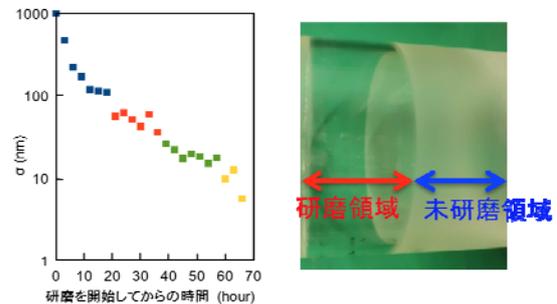


図 2 研磨時間と表面粗さ
表面粗さはミットヨ SJ-400 で測定

④ 反射鏡の位置決めと打ち上げ時の挙動についての研究

ハウジング内に反射鏡を入れた場合に、反射鏡が衛星打ち上げ時の振動等でどのように振動するか解析を行い、その挙動を明らかにした。また、ハウジング内に入れた反射鏡の位置を X 線像を見ながら調整できる機構を開発した。この機構は ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線望遠鏡の光学調整にも使われ、性能改善に大きく貢献した。



図 3 ピエゾ素子を用いた反射鏡位置調整機構

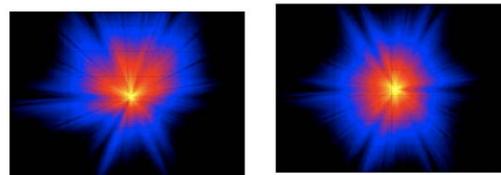


図 4 調整前後の焦点画像 (左: 調整前、右: 調整後)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 36 件)

(1) Ricci, C., Paltani, S., Awaki, H., Petrucchi, P., Ueda, Y., Brightman, M., “Luminosity-dependent unification of active galactic nuclei and the X-ray Baldwin effect”, *A & A*, 553, 29, 2013. (査読有) 10.1051/0004-6361/201220324

(2) Terashima, Y., Kamizasa, N., Awaki, H., Kubota, A., Ueda, Y., “A Candidate Active Galactic Nucleus with a Pure Soft Thermal X-Ray Spectrum”, *Astrophys. J.*, 752, 154, 2012. (査読有)

10.1088/0004-637X/752/2/154

(3) Awaki, H., Kunieda, H., Ogi, K., Kosakata, T., Namba, Y. 他 20 名, “Current status of ASTRO-H Hard X-ray Telescopes (HXTs)”, *Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray. Proceedings of the SPIE 8443*, pp. 844324, 2012. (査読無)

10.1117/12.926753

(4) Eguchi, S., Ueda, Y., Awaki, H., Aird, J., Terashima, Y., Mushotzky, R. F., “Suzaku view of the Swift/BAT Active Galactic Nuclei III. Application of Numerical Torus Models to Two Nearly Compton Thick AGNs (NGC 612 and NGC 3081)”, *Astrophys. J.*, 729, 31, 2011. (査読有)

10.1088/0004-637X/729/1/31

(5) Noguchi, K., Terashima, Y., Ishino, Y., Hashimoto, Y., Koss, M., Ueda, Y., Awaki, H., “Scattered X-rays in Obscured Active Galactic Nuclei and Their Implications for Geometrical Structure and Evolution”, *Astrophys. J.*, 711, 144, 2010 (査読有)

10.1088/0004-637X/711/1/144

[学会発表] (計 74 件)

(1) 栗木久光、中出章太、岡山美帆子、難波義治

「X線望遠鏡用ガラスマンドレルの研磨システムの開発I」日本天文学会2012年秋季年会、2012年09月19日～2012年09月21日、大分大学

(2) 平田義孝、寺島雄一、栗木久光、鳥羽儀樹、大藪進喜、松原英雄、「「あかり」中間・遠赤外線全天サーベイカタログとXMM-Newton Serendipitous Source カタログを用いた活動銀河の分類」日本天文学会 2010 年秋季年会、2010 年 9 月 22 日～9 月 24 日、金沢大学

(3) Awaki, H., Kunieda, H., Ogi, K., Kosakata, T., Namba, Y. 他 18 名. “Current status of the Hard X-ray telescope onboard ASTRO-H, SPIE, June 27-July 2, 2010, San Diego, USA.

(4) 栗木久光、寺島雄一、上田佳宏、「すぎ

く」衛星で探る近傍 Compton Thick 活動銀河核」日本天文学会 2009 年秋季年会、2009 年 9 月 14 日、山口大学

(5) Terashima, Y., “AGN Observations with Suzaku”, *X-ray Astronomy 2009*, Sep. 9, 2009, Bologna, Italy.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

栗木久光 (AWAKI HISAMITSU)

愛媛大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：30252414

(2) 研究分担者

寺島雄一 (TERASHIMA YUICHI)

愛媛大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：20392813

黄木景二 (OGI KEIJI)

愛媛大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：70281194

高坂達郎 (KOSAKA TATSURO)

高知工科大学・工学部・准教授

研究者番号：80315978

(3) 連携研究者

國枝秀世 (KUNIEDA HIDEYO)

名古屋大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：00126856

難波義治 (NAMBA YOSHIHARU)

中部大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：40029129