

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：82645

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06897

研究課題名(和文) 高感度X線観測を用いた活動銀河核アウトフローによるエネルギー放出機構の研究

研究課題名(英文) A Study of Energy Release Mechanism of AGN outflows with High Sensitivity X-ray Observations

研究代表者

萩野 浩一 (Hagino, Kouichi)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号：70762061

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、銀河とブラックホールの共進化において重要な働きをしているとされる超高速アウトフローという現象の物理的性質を明らかにするために、X線観測衛星ASTRO-Hを開発すると同時に、モンテカルロシミュレーションによる新手法を用いて既存のデータを解析した。

ASTRO-H衛星は打ち上げ後約一ヶ月で通信途絶し、超高速アウトフローの高感度観測は実現できなかったが、私が開発に携わった硬X線撮像検出器は想定通りの高性能を示し、将来の高感度観測の実現に向けて有意義な結果が得られた。

一方で、新手法によるデータ解析では、ブラックホールのスピン測定やアウトフローの形成機構にインパクトを与える成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：We developed the X-ray astronomical satellite, ASTRO-H, and applied a new analysis method utilizing Monte-Carlo simulations to the data which already observed with current instruments, for the purpose of revealing physical properties of the ultra-fast outflows (UFOs), which are thought to play an important role in the coevolution of galaxies and black holes. Unfortunately, we were not able to realize high-sensitivity observations of UFOs with ASTRO-H due to the mishap occurred 1 month after the launch. But we successfully confirmed good performances of the hard X-ray imager which we had been developed. These results would be very important and useful for future high-sensitivity missions. On the other hand, by the analyses with the new method, we obtained results which could have impacts on spin measurements of black holes and studies on acceleration mechanisms of the UFOs.

研究分野：高エネルギー宇宙物理学

キーワード：活動銀河核 超高速アウトフロー 半導体検出器 X線天文学

1. 研究開始当初の背景

銀河とその中心の超巨大ブラックホールの互いの質量の間に存在する強い相関関係は、ブラックホールと銀河の共進化を示唆しており、そこにはブラックホールから銀河への何らかのエネルギー輸送過程が存在しているはずである。近年続々と発見されている超高速アウトフローは、最大で光速の30パーセントもの速度で大量の物質を放出していると考えられ、銀河とブラックホールの共進化において重要な役割を果たしている可能性が高い。

その重要性にも関わらず、超高速アウトフローの形成機構や物理的性質は明らかになっていない。その原因として、超高速アウトフローが観測される約8 keV以上のエネルギー帯域での信号雑音比が悪いこと、超高速アウトフローによる吸収・散乱・反射で歪められたX線スペクトル構造の精密なモデル化が難しいことがあげられる。すなわち、超高速アウトフローの物理的性質や形成機構を探るためには、8 keV以上の帯域で優れた感度を持つ検出器の開発と、超高速アウトフローからのX線スペクトルの精密なモデル化が必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、超高速アウトフローの形成機構と物理的性質を明らかにすることで、銀河と超巨大ブラックホールの共進化という重要課題を解明することである。

3. 研究の方法

本研究では、超高速アウトフローの物理的性質の精密な評価のために、10 keV以上の硬X線帯域で2015年まで稼働していたすざく衛星の100倍もの感度を実現する硬X線撮像検出器(HXI)を開発する。HXIは、硬X線望遠鏡によって集光された5-80 keVの硬X線を検出する焦点面検出器である。井戸型のBGOアクティブシールドの中に、Si及びCdTeの半導体検出器を積層した主検出器を設置することで、低バックグラウンドと高い検出効率を実現する。

さらに、これと並行して、我々が独自に開発してきたモンテカルロシミュレーションによる超高速アウトフローの精密なX線スペクトルモデルを用いて、既存のX線観測衛星による超高速アウトフローの観測データを解析する。我々のモンテカルロシミュレーションでは、超高速アウトフローを構成する光電離プラズマとX線光子との間の主要な物理過程に加えて、特殊相対論的な効果も考慮している。さらに、複雑なアウトフロー形状における計算が可能であるため、現実的なアウトフローの仮定の下でのX線スペクトルを精密に計算することができる。

4. 研究成果

(1) HXIの開発及び軌道上較正

HXIは、2016年2月17日に打ち上げられた

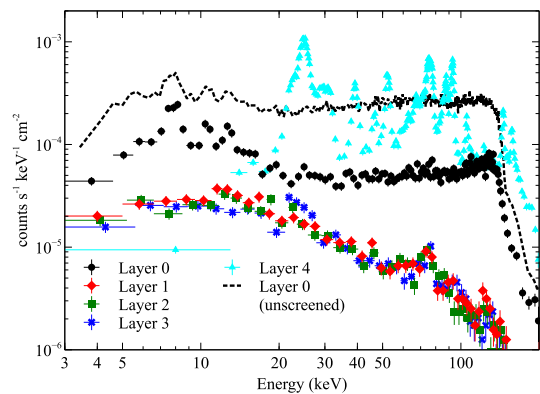


図1 HXI2の各層の軌道上バックグラウンドスペクトル。黒のダッシュはSiの1層目(Layer 0)のバックグラウンドを示し、衛星位置によるスクリーニングをすることで、約1/10(黒丸)にまで低減された。

X線観測衛星ひとみ(ASTRO-H)に搭載され、姿勢系の不具合によって3月25日に通信途絶するまでの間、軌道上で想定通りの性能を発揮した。通信途絶はHXIの立ち上げが完了してから約10日後であったため、残念ながら本研究で目的としていたASTRO-H衛星による超高速アウトフローの高感度観測は実現することができなかった。しかしながら、HXIの軌道上データを詳細に解析することで、軌道上較正及び性能評価を行い、将来の高感度硬X線観測に繋がる重要な知見を得ることができた。具体的には、外部搭載機器に対する軌道上バックグラウンドの主要因を解明し、また、高精度な検出器応答関数を構築することにも成功した。

HXIの軌道上バックグラウンドは、すざく衛星の経験から、Siでは軌道上中性子が支配的であり、CdTeでは南太平洋異常帯にトラップされた宇宙線陽子によるCdTe及びBGOの放射化が影響すると考えられていた。しかし、実際の軌道上データでは、図1にダッシュで示したように、4層あるSi検出器のうち1層目のバックグラウンドが想定外に高いことが判明した。詳細な軌道上データ解析の結果、このバックグラウンドは高エネルギーにもかかわらず低い透過力を示し、さらに、このバックグラウンドの緯度・経度依存性が、フランスの地球観測衛星によって得られた軌道上の低エネルギー電子の分布と一致した。異常の事実から、このバックグラウンドが軌道上低エネルギー電子に由来することが明らかになった。

さらに、この低エネルギー電子バックグラウンドが衛星の位置(緯度・経度)に強く依存することを利用することで、約1/10にまで低減する手法を確立した(図1の黒丸)。電子は透過力が非常に低いため、電子バックグラウンドが問題となるのはHXIのような衛星の外部に搭載された機器の場合のみであるが、将来の硬X線観測衛星の計画においても同様に衛星の外部に搭載されることが想定される。したがって、HXIの軌道上データによって得られた低エネルギー電子バックグラウンドに関する知見は、今後の高感度硬X線観測の実

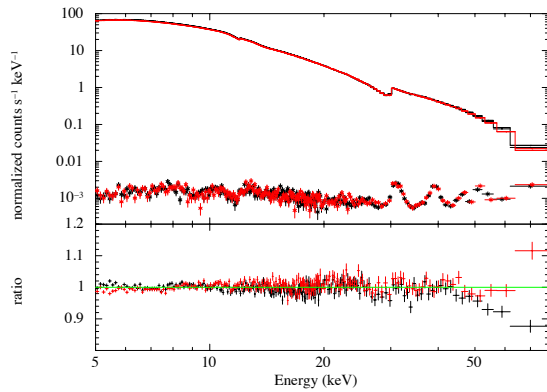


図 2 HXI によって観測されたかに星雲の X 線スペクトルと応答関数で畳み込んだべき関数モデルの比較。上段はかに星雲の観測データとモデルスペクトル及びバックグラウンドスペクトル。下段にモデルとデータの比を示す。HXI1 のモデル・データを黒、HXI2 を赤で示した。

現のために、不可欠かつ極めて重要なものである。

検出器の性能を最大限に生かすには、正確な検出器応答のモデル(応答関数)を構築し、それを使って観測データから入射 X 線の情報に変換する必要がある。我々は、かに星雲の観測データと地上較正試験データを用いて、検出器周辺の物質による影響を再検証した結果、図 2 の下段に示すように、科学的な解析の精度に直結する検出器応答関数の不定性を約 5 パーセント以下にまで低減した。

上記の結果のうち、HXI の衛星搭載品の基本性能については雑誌論文③として出版している。

(2) “ディスクライン”天体 1H 0707-495 の解析

ASTRO-H 衛星による超高速アウトフローの高感度観測は実現できなかったが、既存の衛星による観測データに対し、モンテカルロシミュレーションによる X 線スペクトルモデルを用いた解析を適用することで、超高速アウトフローの研究を大きく進展させることができた。

1H 0707-495 という天体は、X 線スペクトルの 7 keV 付近に特徴的な落ち込みを持つことで知られている。従来の主流の解釈では、相対論的効果によって非常に大きく広がった鉄輝線構造(“ディスクライン”)であるとされ、超巨大ブラックホールが一般相対論で許される限界に近い速度で高速回転している証拠であるとされていた。しかしながら、この解釈では、上記の高速回転に加えて、X 線放射領域がほぼブラックホールの事象の地平面に位置している必要があり、さらに太陽の元素組成比と比べて 1 桁ほど多くの鉄元素が存在していなければならない。

我々は、この天体の特徴的な X 線スペクトル構造が、超高速アウトフローによる吸収構造であるという新解釈を提案した。さらに、この新解釈に基づき、モンテカルロシミュレーションによる X 線スペクトルモデルを構築し、実際の観測データと比較した。その結果、

欧州の XMM-Newton 衛星とすざく衛星による計 15 回もの観測データ全てに対して、光速の 20 パーセント程度の速度の超高速アウトフローを考えることで、7 keV 付近の特徴的なスペクトル構造を再現することに成功した。この新解釈では、従来の極端な状況を要求せずに、超高速アウトフローのみによって X 線スペクトル構造を説明できる。

これは、超高速アウトフローの研究にとどまらず、ブラックホールの基本的な物理量であるスピン(回転速度)の測定方法に対しても大きなインパクトを持つ結果である。

この結果は、雑誌論文②として出版するとともに、2つの国際学会(②, ④)においても発表した。

(3) 重力レンズ天体 APM 08279+5255 の解析

APM 08279+5255 は、赤方偏移 $z=3.91$ という遠方に位置しながらも重力レンズ効果によって既存の X 線観測衛星でも検出可能な明るさで観測される。高赤方偏移であるために、通常 8 keV 以上で観測される超高速アウトフローによる吸収線を、既存の検出器でも信号雑音比が十分に良い帯域である 2 keV 付近で観測することができる。実際に、この天体の静止系で 50 keV に相当する高エネルギーの X 線まで観測できており、その結果として超高速アウトフローによる吸収構造が明瞭に観測できている。

先行研究によると、この天体の超高速アウトフローは光速の約 70 パーセントもの速度を持つとされている。これは、アウトフローの形成に磁気圧が効いている場合にしか実現できない速度であり、アウトフローの形成機構に強い制限を与える結果である。

我々は、モンテカルロシミュレーションによる超高速アウトフローのスペクトルモデルに加えて、他の多数の天体で観測されている比較的低電離な吸収体を考慮し、観測データと比較した。その結果、光速の 10-20 パーセント程度の速度の超高速アウトフローによって、米国の Chandra 衛星、欧州の XMM-Newton 衛星及びすざく衛星によって観測された全ての X 線スペクトルを説明できることを示した。すなわち、この天体のスペクトルを説明するためには、必ずしも磁気圧によるアウトフロー形成機構が必要なわけではないことを意味している。

さらに、我々の解析によって、放射圧によって形成されたと考えられる紫外領域のアウトフローと関連した変動を示すこと、放射圧が効率的に働きやすい多波長スペクトルを示すことが明らかになった。これは、この天体の超高速アウトフローの形成に磁気圧よりもむしろ放射圧が効いていることを示唆している。

これらの結果は、雑誌論文①として出版されている。

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)

甲南大学 (兵庫県神戸市)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① K. Hagino et al., “Revisiting the extremely fast disc wind in a gravitationally lensed quasar APM 08279+5255”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 468(2), 1442-1452, 2017, DOI: 10.1093/mnras/stx559
- ② K. Hagino et al., “A disc wind interpretation of the strong Fe K α features in 1H 0707-495”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 461(4), 3954-3963, 2016, DOI: 10.1093/mnras/stw1579
- ③ G. Sato, K. Hagino et al., “The Si/CdTe semiconductor camera of the ASTRO-H Hard X-ray Imager (HXI)”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 831, 235-241, 2016, DOI: 10.1016/j.nima.2016.03.038

[学会発表] (計 5 件)

- ① K. Hagino, “An X-ray spectral variability of fast disk winds in AGN”, RIKEN symposium 7 years of MAXI: monitoring X-ray transients, 2016 年 12 月 6 日, 理化学研究所 (埼玉県和光市)
- ② K. Hagino, “Ultra-fast disk wind from a high accretion rate black hole 1H 0707-495”, BREAKING THE LIMITS Super-Eddington Accretion on Compact Objects, 2016 年 9 月 20 日, サルデーニャ (イタリア)
- ③ 萩野浩一, “X 線天文衛星「ひとみ (ASTRO-H)」搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI) の軌道上動作”, 日本天文学会, 2016 年 9 月 15 日, 愛媛大学 (愛媛県松山市)
- ④ K. Hagino, “Disk wind interpretation of the strong iron K features in 1H 0707-495”, Workshop on “Prospects, challenges and evolution of AGN modeling in the Astro-H Era”, 2015 年 10 月 22 日, 立教大学 (東京都豊島区)
- ⑤ 萩野浩一, “ASTRO-H 衛星搭載 硬 X 線撮像検出器 (HXI) の現状 打上げに向けて”, 日本天文学会, 2015 年 9 月 11 日,

6. 研究組織

(1) 研究代表者

萩野 浩一 (HAGINO, Kouichi)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・
宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号 : 70762061