

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 17 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24540237

研究課題名(和文) X線スペクトルと時間変動解析によるブラックホール降着流の状態遷移機構の解明

研究課題名(英文) X-ray study of state transitions of black hole binaries

研究代表者

久保田 あや (Kubota, Aya)

芝浦工業大学・システム理工学部・准教授

研究者番号：00391938

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：恒星質量ブラックホールと通常の恒星と近接連星系を形成したブラックホール連星(BHB)は、質量降着が極端に少ない静穏状態から、中心部への降着による急激な増光により状態の遷移がはじまる。状態遷移を理解し、エネルギー放出効率の変化を引き起こすパラメータを導くには、遷移の過渡状態であるvery high状態(VHS)の理解が欠かせない。研究代表者らは、放射モデルを構築し、これを日本のX線天文衛星「すざく」で観測されたBHBのVHSデータに応用した。その結果、VHSにおいて、円盤が徐々に内側にむけて成長していくこと、また、非熱的電子が大きな役割を果たすことを示した。

研究成果の概要(英文)：The two best known black hole binary states are the low/hard and high/soft states. The low/hard state is dominated by hard Comptonised emission from a hot, optically thin flow whereas the high/soft state is instead dominated by soft, blackbody emission from a cool, optically thick disk. To understand what makes the transition is the key issue to understand important parameters which determine the emission efficiency. Especially the very high state (VHS) is the key to understand the transition since it is the intermediate state between the high state and the low state. We developed a physical model for the accretion flow structure in the VHS, in which both thermal and non-thermal electrons are taken into account. Then we fit good VHS data observed with Suzaku, and found that the disk is truncated in the VHS and the corona can be understood with fully non-thermal electrons.

研究分野：X線天文学 ブラックホール観測

キーワード：X線 ブラックホール 降着流 状態遷移 すざく衛星 very high state

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

銀河系には、恒星質量ブラックホール(以後 BH) と通常の恒星と近接連星系を形成したブラックホール連星 (以後 BHB) が 30 個程度知られる。Cyg X-1 など定常的に輝く天体を除くと、ほとんどの BHB は質量降着が極端に少ない静穏状態から、降着円盤外縁部の不安定性に端を発し、中心部への降着による急激な増光、すなわちアウトバーストが始まる。アウトバーストにおけるスペクトル変化は、光子指数 1.4 程度の硬 X 線が卓越した low/hard 状態から強度を増し、光子指数 2.5-3 の硬 X 線放射を示す Very high 状態 (VHS) に移行した後、最終的に軟 X 線放射が卓越する high/soft 状態に遷移する (low-to-high 遷移)。両者の違いは、軟 X 線の起源である光学的に厚い降着円盤が BH 近傍に到達しているか否かが本質である。

何がこの遷移を引き起こすかを理解することは、BH 降着流のエネルギー放出の効率を決める物理量を確定する鍵となる。とくに、過渡状態である VHS の放射機構を理解することが遷移の理解に直結する。しかし、研究開始当初は、VHS スペクトルを記述する物理的なモデルは、円盤とコロナからの熱的放射を独立に扱うか、研究代表者らが構築した、円盤とコロナのエネルギーカップリングを考慮しつつも、熱的な放射のみ扱うモデル(dkbbfth : Done, Kubota 2006) に限られていた。VHS は非熱的放射が卓越しており、既存のモデルで解釈することは大きな制限があった。

2. 研究の目的

low-to-high 遷移の本質は、降着円盤が内側に成長する過程にあり、本研究の目的は遷移を引き起こし、円盤の成長を決める物理量に制限をつけることである。そのために、とくにVHS状態のBHBに着目し、非熱的電子と熱的

電子の役割が遷移過程でどのように変化し、放射効率のよい円盤からの放射が卓越した high/soft状態に移行するのかを突き止めることを目的とした。

3. 研究の方法

状態遷移の理解の鍵は VHS の理解であり、そのためには非熱的電子をスペクトル解析から理解する必要がある。研究代表者は、イギリスの Chris Done 教授と共同で、非熱的電子分布を考慮したスペクトルモデルを構築するとともに、X 線天文衛星「すざく」、RXTE 衛星、swift 衛星の公開データに基づき、特に VHS におけるスペクトルと時間変動を徹底的に再解析した。

4. 研究成果

(1) VHS スペクトルモデルの応用

Done, Kubota 2006 において、VHS の X 線スペクトルを記述する dkbbfth モデルを構築していたが、モデル構築当時は、これを応用できるデータは、低エネルギー側を観測する「あすか」衛星と高エネルギー側をカバーする RXTE 衛星の同時観測データに頼るしかなかった。しかし、2005 年に打ち上げられた広帯域に高感度を誇るすざく衛星による BHB の観測が進み、2007 年 2 月には、GX339-4 という BHB のひじょうに明るい VHS の観測が行われ、これまでにない詳細な VHS のスペクトルが得られた。研究代表者は、Chris Done 教授、および、当時芝浦工業大学の大学院生であった田村らとともに、このデータに dkbbfth モデルをあてはめ、硬 X 線が卓越した VHS では、円盤の内縁が最終安定軌道まで到達しておらず、過渡的な状態であることを突き止めた。この結果は Tamura, Kubota et al. 2012 として Astrophysical Journal に発表済みである。

(2) 非熱的エネルギー分布を考慮した円盤 コロナモデル構築と GX339-4 への適用

VHS に見られる高エネルギースペクトル dk は、円盤の周りに形成された高エネルギーコロナによる逆コンプトン散乱と理解されている。初期の dkbbfth モデルでは、高エネルギー電子の起源として、高温電子のみを考えていた。しかし、実際の硬 X 線スペクトルは熱的折れ曲りが検出されず、電子が非熱的エネルギー分布を持つことを示唆した。そこで研究代表者は、2013 年、2014 年にダラム大学に短期滞在し、Chris Done 教授とともに、非熱的電子による硬 X 線放射を記述する eqpair モデル (Coppi et al. 1992) を応用し、円盤とコロナのエネルギー分布を無矛盾に記述する円盤コロナモデル(diskEQ モデル)を構築した。このモデルを (1) で用いた GX339-4 の VHS のすざく衛星による観測データに応用し、コロナがほぼ 100%非熱的電子による放射であることを突き止めた。同時に、Tamura et al. 2012 の結果である円盤が最終安定軌道より手前で消失していることを追確認した。これらの結果は Kubota & Done 2016 として Monthly Notice 誌に掲載済みである。

(3) diskEQ モデルの MAXI J1659-152 への応用

研究代表者は、2015 年にダラム大学に短期滞在した折、Chris Done 教授と共同で、(2) で構築した diskEQ モデルを、やはりすざく衛星で観測した BHB である MAXI J1659-152 の VHS に応用した。GX339-4 と同様に質のよいデータであるが、この天体は low/hard 状態から VHS に以降する bright hard 状態にあると考えられ、硬 X 線は熱的な折れ曲りを示していた。研究代表者は、diskEQ モデルをもちいることで、この熱的

折れ曲りは完全に非熱的な分布をもつ、高エネルギー電子が円盤からの冷却によって、熱的な折れ曲りが形成できることを示した。この結果は、2016 年 6 月のフランスにおける ULX 研究会において口頭発表した。

(4) diskEQ モデルの超光度 X 線への応用

研究代表者は diskEQ モデルを、近傍銀河に観測される超光度 X 線源(ULX)に応用した。ULX は通常の恒星質量 BH のエディントン限界を超えて輝く天体で、超臨界降着流状態の恒星質量 BH なのか、それとも BHB と活動銀河中心核の間の質量を持つ、中間質量 BH なのか、長年議論となっている天体である。DiskEQ モデルで検証した結果、ULX も BHB の VHS と同様に非熱的コロナが卓越した状態としてよく理解できることがわかった。しかし、コロナの物理的性質は、BHB と比較して、光学的厚みが大きく(すなわち X 線に対して不透明であり)、BHB の VHS と同様の物理過程がなりたっていると結論づけることは難しいと考えられる。この結果は、前述のフランスにおける ULX 研究会で口頭発表した。

<引用文献>

- Done, C., Kubota, A., 2006 MNRAS 371, 1216
Coppi P. S., 1992, MNRAS, 258, 657

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 11 件)

- Aharonian et al. (他 217 共著者)
Hitomi Constraints “on the 3.5 keV Line in the Perseus Galaxy Cluster”,
The Astrophysical Journal Letters,
Volume 837, Issue 1, article id.

L15, 9, 2017

DOI: 10.3847/2041-8213/aa61fa

Hitomi collaboration (216 著者) "The quiescent intracluster medium in the core of the Perseus cluster" *Nature*, Volume 535, Issue 7610, pp. 117-121, 2016 DOI: 10.1038/nature18627

Kubota A., Done C "Tracking the energetics of the non-thermal disc-corona-jet in the very high state GX 339 - 4" *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 458, Issue 4, p.4238-4249, 2016

DOI: 10.1093/mnras/stw585

Koyama, Shu; Yamada, Shin'ya; Kubota, Aya; Tashiro, Makoto S.; Terada, Yukikatsu; Makishima, Kazuo "Suzaku observation of X-ray variability in soft state LMC X-1" *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Volume 67, Issue 3, id.469, 2015

DOI: 10.1093/pasj/psv017

Hori, Takafumi; Ueda, Yoshihiro; Shidatsu, Megumi; Kawamuro, Taiki; Kubota, Aya; Done, Chris; Nakahira, Satoshi; Tsumura, Kohji; Shirahata, Mai; Nagayama, Takahiro "SUZAKU Observation of the Black Hole Binary 4U 1630-47 in the Very High State" *The Astrophysical Journal*, Volume 790, Issue 1, article id. 20, 11, 2014

DOI: 10.1088/0004-637X/790/1/20
Shidatsu, M.; Ueda, Y.; Yamada, S.; Done, C.; Hori, T.; Yamaoka, K.; Kubota, A.; Nagayama, T.; Moritani, Y. Spectral and Timing

"Properties of the Black Hole X-Ray Binary H1743-322 in the Low/Hard State Studied with Suzaku" *The Astrophysical Journal*, Volume 789, Issue 2, article id. 100, 12 2014 DOI: 10.1088/0004-637X/789/2/100
Yoshida, Tessei; Isobe, Naoki; Mineshige, Shin; Kubota, Aya; Mizuno, Tsunefumi; Saitou, Kei "Two Power-Law States of the Ultraluminous X-Ray Source IC 342 X-1" *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol.65, No.2, article id.48, 14 2013

DOI: 10.1093/pasj/65.2.48

Yamada, S.; Torii, S.; Mineshige, S.; Ueda, Y.; Kubota, A.; Gandhi, P.; Done, C.; Noda, H.; Yoshikawa, A.; Makishima, K. Highly Ionized Fe-K Absorption Line from Cygnus X-1 in the High/Soft State Observed with Suzaku" *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 767, Issue 2, article id. L35, 6, 2013

DOI: 10.1088/2041-8205/767/2/L35

Isobe, Naoki; Kubota, Aya; Sato, Hiroshi; Mizuno, Tsunefumi "Suzaku Investigation into the Nature of the Nearest Ultraluminous X-Ray Source, M33 X-8" *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol.64, No.6, article id.119, 10, 2012 DOI: 10.1093/pasj/64.6.119

Tamura, Manami; Kubota, Aya; Yamada, Shinya; Done, Chris; Kolehmainen, Mari; Ueda, Yoshihiro; Torii, Shunsuke "The Truncated Disk

from Suzaku Data of GX 339-4 in the Extreme Very High State” The Astrophysical Journal, Volume 753, Issue 1, article id. 65, 11, 2012
DOI : 10.1088/0004-637X/753/1/65
Terashima, Yuichi; Kamizasa, Naoya; Awaki, Hisamitsu; Kubota, Aya; Ueda, Yoshihiro “ A Candidate Active Galactic Nucleus with a Pure Soft Thermal X-Ray Spectrum” The Astrophysical Journal, Volume 752, Issue 2, article id. 154, 8, 2012
DOI: 10.1088/0004-637X/752/2/154

〔学会発表〕（計 3 件）

Aya Kubota, “ Disk-corona model for highly accreting black holes and its application to ULX ” 研究会 “ ULXs and their environment ” 2016 June France

久保田あや, Chris Done, “ GX 339-4 の Very high state における円盤コロナおよび内縁流の幾何学的配置の観測的決定 ”, 日本天文学会 2015 年秋季年会, 甲南大学

久保田あや, Chris Done, “ 非熱的電子を考慮した円盤コロナ放射モデルの構築とブラックホール天体 GX 339-4 の Very High State のすざく観測データへの適用 ”, 日本天文学会 2015 年春季年会, 大阪大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

久保田 あや (KUBOTA, Aya) (芝浦工業大学 システム理工学部 准教授)

研究者番号 : 00391938

(4) 研究協力者

クリス ドーン (Chris Done)