

令和元年5月23日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03954

研究課題名(和文) 巨大ブラックホール降着流におけるX線放射領域の形成と時間変動機構の解明

研究課題名(英文) Formation of X-ray Emitting Regions and the Origin of Time Variabilities in Accretion Flow onto a Supermassive Black Hole

研究代表者

松元 亮治 (MATSUMOTO, Ryoji)

千葉大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：00209660

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：ブラックホール降着流の3次元輻射磁気流体シミュレーションを実施し、高温低密度の降着流における降着率が増加して球対称降着流の上限降着率の10%程度に達した場合、ブラックホール近傍の高温降着流と遠方の低温円盤が共存し、その遷移領域に蓄積された磁気エネルギーが解放されて間歇的にジェットを噴出することを明らかにした。また、この遷移領域が活動銀河中心核の一種であるセイファート銀河の増光に伴って出現する軟X線超過領域に対応している可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光学的に薄い高温領域と光学的に厚い低温領域を同時に計算可能な3次元輻射磁気流体コードを適用することにより、ブラックホール候補天体の増光時に観測される硬X線放射が卓越した状態から軟X線放射が卓越した状態に遷移中の降着流の構造と時間変動を、現象論的なパラメータを導入しない直接計算によって明らかにした。本研究を通して、巨大ブラックホール降着流における硬X線放射領域と軟X線放射領域の位置関係を明らかにすることができ、X線スペクトルを予測することも可能になった。

研究成果の概要(英文)：Time evolution of black hole accretion flows during the transition from X-ray hard state to X-ray soft state is studied by carrying out three-dimensional global radiation magnetohydrodynamic simulations. It has been shown that when the accretion rate is about 10% of the Eddington accretion rate corresponding to the upper limit for spherical accretion flows, optically thin hot accretion flow near the black hole co-exists with outer optically thick cool disk and that jets are ejected intermittently by releasing the magnetic energy amplified and stored in the intermediate region. This transition layer can be the soft X-ray excess region observed during the hard-to-soft transition in Seyfert galaxies.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：理論天文学 活動銀河中心核 X線天文学 ブラックホール 磁気流体シミュレーション 宇宙ジェット
状態遷移 輻射スペクトル

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

1. 研究開始当初の背景

(1) 活動銀河中心核 (Active Galactic Nuclei: AGN) で観測される X 線放射は、銀河中心に存在する巨大ブラックホール近傍の物理状態を知る鍵になる。しかしながら、巨大ブラックホールの周りの光学的に厚い降着円盤の温度は数十万度以下であるため、この円盤からの放射は紫外線領域にピークを持ち、X 線放射は弱い。このため、X 線放射領域は降着円盤コロナ、円盤から噴出するジェット、あるいは光学的に薄い高温降着円盤と考えられる。しかしながら、これらの放射領域の位置関係と各領域の寄与の度合いが不明だった。

(2) 日本の X 線観測衛星「すざく」を用いた観測により、セイファート銀河からの X 線放射領域には硬 X 線放射領域と軟 X 線放射領域があり、光度上昇に伴って軟 X 線放射領域が占める割合が増えることが明らかになってきた。また、2016 年打ち上げの Astro-H 衛星によって高い波長分解能で X 線スペクトル観測が可能になり、X 線放射領域の構造やダイナミクスを明らかにできると期待されていた。

(3) ブラックホール降着流の大局的 3 次元輻射磁気流体シミュレーションコードが開発され、光学的に薄い高温領域と光学的に厚い低温領域が共存するブラックホール降着流の時間発展を、現象論的な粘性パラメータを導入することなく、直接計算によって調べることが可能になった。

2. 研究の目的

(1) 「すざく」衛星によるセイファート銀河の X 線観測によって見出された時間変動する硬 X 線・軟 X 線放射領域の形成と光度上昇に伴う軟 X 線放射領域の拡大機構を解明する。

(2) 磁気エネルギー解放によるコロナ加熱と輻射冷却、熱伝導を考慮したシミュレーションを実施し、変動 X 線放射領域の構造と降着率依存性を明らかにする。

(3) X 線放射領域の位置関係を仮定したり、X 線連続光のスペクトルをパワーローモデルの重ね合せ等によって近似したりすることなく、輻射磁気流体シミュレーション結果に基づいて X 線スペクトル等を計算して観測結果を説明する。

3. 研究の方法

(1) 降着円盤の理論シミュレーション、太陽フレアの磁気流体シミュレーション、ブラックホール候補天体の X 線観測を実施してきた研究者が連携することにより、巨大ブラックホール降着流の構造と時間変動、特に高温円盤と低温円盤が共存する状態における X 線放射領域の形成と時間変動機構を明らかにすることを目指した。このため、磁気流体シミュレータ改訂版、シミュレーション実施班、観測連携班を設けて研究を実施し、年 2 回のワークショップを開催して進捗状況の確認と研究の方向付け、研究成果の取り纏めを行った。

(2) 時間依存する輻射輸送方程式を角度方向に積分したモーメント式を、クロージャ関係を仮定して解く 1 次モーメント法 (M1 法) のコードを v/c の 1 次の項まで残して非相対論化することによって演算量を減らし、高次精度の磁気流体コード CANS+ と結合した。この円筒座標系 3 次元輻射磁気流体コード CANS+R を国立天文台等の計算機に実装して、球対称降着流の上限度 (エディントン光度) に対応する降着率の 10% 程度の場合のシミュレーションを実施した。また、熱伝導、イオン温度と電子温度の違い等を考慮するモジュールを実装した。

4. 研究成果

(1) 磁気流体方程式の数値解法として HLLD 法に基づく近似リーマン解法を用い、MP5 法を用いて空間 5 次精度化した磁気流体コード CANS+ を国立天文台の XC30 計算機に実装して、銀河系中心ブラックホール Sgr A* に落下するガス雲と降着円盤の相互作用の大局的 3 次元磁気流体シミュレーションを実施した。ガス雲の質量は降着円盤と同程度、その軌道は 2013 年から 2014 年にかけて Sgr A* に接近した G2 雲を模して再接近時にブラックホールから 2000 シュバルツシルト半径まで接近するとして降着円盤の回転軸とガス雲の運動面のなす角度をパラメータとして計算を実施した。その結果、ガス雲が潮汐破壊されながら降着円盤の赤道面と角度をなして衝突する場合、ガス雲の角運動量が受け渡されて降着円盤の回転軸が変化すること、円盤内部の乱流磁場が衝突の擾乱によって散逸した後、10 年程度かけて増幅され、衝突前よりも強くなることなどが示された。この結果は G2 雲との衝突後、10 年程度で Sgr A* の活動性が高まることを示唆している。この成果は Publ. Astron. Soc. Japan 誌に掲載された (Kawashima, T., Matsumoto, Y., Matsumoto, R., 2017)。

(2) 3 次元円筒座標系版 CANS+ の回転軸付近の扱いを改訂して数値的安定性と計算精度を高めた。このコードを「京」や国立天文台の XC50 計算機向きに最適化してブラックホール降着流の大局的 3 次元磁気流体シミュレーションを実施した。その結果、従来の空間 2 次精度の磁気流体コードにくらべてより少ないメッシュ数で数値散逸の少ない計算結果が得られるようになった。また、磁気圧がガス圧の 100 倍程度大きな強磁場領域でも数値的に安定に計算できるよう

になり、輻射冷却によって高温降着流が冷えて円盤が鉛直方向に収縮する過程で形成される磁気圧優勢領域を数値的に安定に計算することが可能になった。

(3) M1法に基づく円筒座標系3次元輻射磁気流体コードCANS+Rを国立天文台のXC50計算機に実装してブラックホール降着流の時間発展をシミュレートした。まず、輻射冷却を考慮せずに、初期に弱いポロイダル磁場を持つ回転トーラスの大局的3次元磁気流体シミュレーションを実施し、トーラス内部で磁気回転不安定性が成長して磁気乱流が生成され、角運動量が効率的に輸送されて高温降着流が形成される過程を計算した。図1の上図に、この状態における密度、プラズマ（ガス圧と磁気圧の比）温度分布を示す。光学的に薄い高温降着流(Radiatively Inefficient Accretion Flow: RIAF)が形成されている。円盤温度は 10^9 Kを超え、硬X線が放射される。この状態は硬X線放射が卓越するハードステートに対応する。

次に、この準定常状態における降着率がエディントン降着率の10%程度になるように円盤密度を選んで円筒座標系3次元輻射磁気流体コードCANS+Rを用いたシミュレーションを実施した。この円盤密度は、光学的に薄いRIAFと光学的に厚い標準円盤の中間に相当し、硬X線が卓越したハードステートから軟X線が卓越したソフトステートに状態遷移中の降着流に対応する。

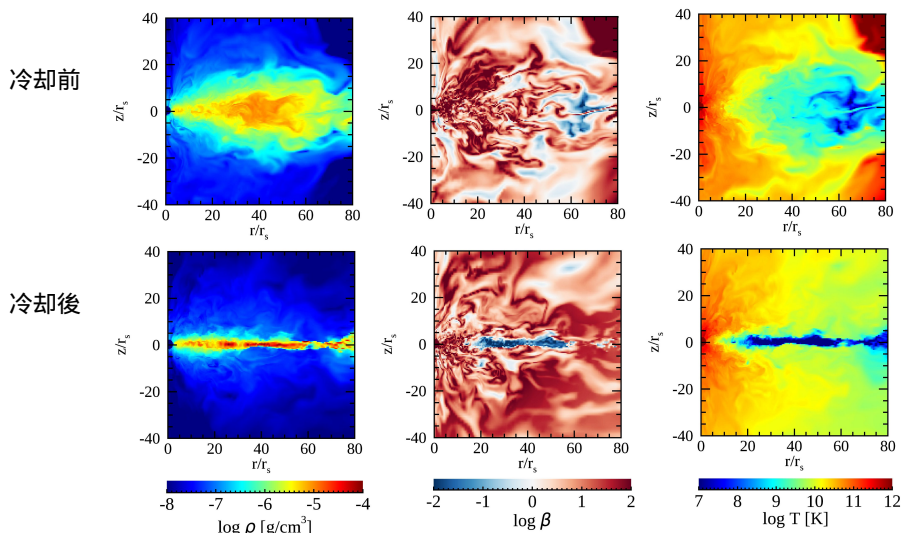


図1：ブラックホール降着流の大局的3次元輻射磁気流体シミュレーション結果。密度、プラズマ、温度分布を示す。長さの単位はシュバルツシルト半径。上図は輻射冷却が無視できる場合の準定常状態。下図は輻射を考慮した結果。

シミュレーションの結果、ブラックホール質量が10太陽質量の場合には図1下図に示したようにブラックホール近傍の光学的に薄い高温降着流と20シュバルツシルト半径より外側の光学的に厚い低温円盤が共存し、輻射冷却によって高温円盤が鉛直方向に収縮した領域で方位角磁場が強められて磁気圧で支えられた状態になること、この領域で強められた磁場が高温領域に輸送され、磁気エネルギーが間歇的に解放されてジェットが噴出することが示された。この状態では低温領域からの放射よりもブラックホール近傍の高温降着流からの硬X線放射が卓越し、銀河系内ブラックホール候補天体の増光時に観測される「明るいハードステート」を説明することができる。高温領域では円盤ダイナモによる方位角磁場の反転やジェット噴出が10回転程度の間隔で生じる。この間隔は、恒星質量ブラックホール候補天体のハード・ソフト状態遷移過程で観測される5-10Hzの準周期振動(Quasi-Periodic Oscillation: QPO)の周期に近く、この準周期振動が円盤の磁気活動によって生じることを示唆している。

中心天体が巨大ブラックホールの場合についても3次元輻射磁気流体シミュレーションを実施し、降着率がエディントン降着率の10%程度の場合、ブラックホール近傍の高温降着流と20シュバルツシルト半径より外の輻射圧優勢な低温円盤が共存すること、両者の境界付近で、回転時間程度の周期の準周期振動が発生することが示された。セイファート銀河の増光時に観測される軟X線放射領域は、この境界領域であることが示唆された。

(4) 磁場方向に依存する非等方熱伝導を考慮した円筒座標系2次元軸対称磁気流体コードを実装して状態遷移シミュレーションを実施し、輻射冷却によって温度が低下した領域とその周辺の高温領域間の熱伝導により、境界領域のサイズが拡大することが示された。3次元シミュレーションを効率的に実施するため、太陽コロナの計算等に適用されてきたSuper Time Stepping(STS)法を用いて熱伝導方程式を陽的に解くモジュールの実装を進めた。また、太陽プロミネンス形成の磁気リコネクション・凝縮モデルを回転円盤に適用して、加熱・冷却を考慮した磁気流体シミュレーションを実施し、磁束浮上によって形成された磁気アーケードが円盤の差動回転等によって膨張し、磁気リコネクションを経てFlux Ropeを形成、その下部に集積した星間ガスが冷却不安定性によって凝縮して円盤プロミネンスを形成することを示した。

(5) ジェットと星間雲相互作用の3次元シミュレーションを実施し、星間雲が占める体積の割合が高い場合には弧状の分子雲、割合が低い場合には直線状に並んだ分子雲が形成されることを示した。SS433のジェットと星間ガスの相互作用についても共同研究を実施した。イオン温度と電子温度が異なる場合に適用できる2温度磁気流体コードを作成してジェット伝播計算に適用し、ジェットの終端衝撃波や内部衝撃波におけるイオン加熱によって2温度プラズマが形成されること、イオンと電子のクーロン衝突によってジェットのコクーン内の電子が加熱され、X線放射が強くなる可能性があることが示された。

(6) 本研究期間中に MAXI J1535-571、MAXI J1820+070 等の銀河系内ブラックホール候補天体の増光が観測された。これらの天体はハードステートからソフトステートへの遷移時に中間状態に長く留まり、その最大光度はエディントン光度に近づいていることが示唆された。本課題で実施した3次元輻射磁気流体計算では、この増光過程のスナップショットにあたる短い期間の時間発展しか追跡することができないが、ハード・ソフト状態遷移中に観測された5-10Hzの準周期振動、増光に伴う軟X線放射領域の拡大等を再現することができた。

(7) 観測との連携においては、「ひとみ」衛星が捉えた巨大ブラックホール周辺の鉄の蛍光輝線の精密分光から、降着円盤の形状に制限を与えた。また、X線のスペクトル解析に機械学習を導入し、プラズマ診断を高速化することに成功した。

(8) 2018年8月にスウェーデン Sigtuna で開催したワークショップ “Time for Accretion” において、本課題の研究グループから10件の研究発表を行い、コンパクト天体への降着流の研究をリードしている海外の研究者との研究交流、情報交換を行った。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 56 件)

Nakamura, K.E., Machida, M., Matsumoto, R., 2D MHD Simulations of the State Transitions of X-Ray Binaries Taking into Account Thermal Conduction, *Galaxies*, 7, 22 (13 pages), 2019, 査読有

DOI: 10.3390/galaxies7010022

Ohmura, T., Machida, M., Nakamura, K.E., Kudoh, Y., Asahina, Y., Matsumoto, R., Two-Temperature Magnetohydrodynamics Simulations of Propagation of semi-Relativistic Jets, *Galaxies*, 7, 14 (14 pages), 2019, 査読有

DOI: 10.3390/galaxies7010014

Kaneko, T., Yokoyama, T., Impact of Dynamic State on the Mass Condensation Rate of Solar Prominences, *Astrophysical Journal*, 869, id 136 (11 pages), 2018, 査読有, DOI: 10.3847/1538-4357/aaee6f

Ichinohe, Y., Yamada, S., Miyazaki, N., Saito, S., Neural network-based preprocessing to estimate the parameters of the X-ray emission of a single-temperature thermal plasma, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 475, 4739-4744, 2018, 査読有

DOI: 10.1093/mnras/sty161

Sakemi H., Machida M., Akahori T., Nakanishi H., Akamatsu H., Kurahara K., Farnes J., Magnetic field analysis of the bow and terminal shock of the SS 433 jet, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 70, 27 (14pages), 2018, 査読有

DOI: 10.1093/pasj/psy003

Hitomi Collaborations, S. Yamada (208人中193番目), Hitomi observation of radio galaxy NGC1275: The first X-ray microcalorimeter spectroscopy of Fe-K line emission from an active galactic nucleus, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 70, id.13 (20 pages), 2018, 査読有 10.1093/pasj/psx147

T. Kawano, C. Done, S. Yamada, H. Takahashi, M. Axelsson, Y. Fukazawa, Black hole spin of Cygnus X-1 determined from the softest state ever observed, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 69, id. 36, 2017, 査読有

DOI: 10.1093/pasj/psx009

Kawashima, Tomohisa; Matsumoto, Yosuke; Matsumoto, Ryoji, A possible time-delayed brightening of the Sgr A* accretion flow after the pericenter passage of the G2 cloud, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 69, 43 (8 pages), 2017, 査読有

DOI: 10.1093/pasj/psx015

Y. Asahina, T. Kawashima, N. Furukawa, R. Enokiya, H. Yamamoto, Y. Fukui, and R. Matsumoto, Magnetohydrodynamic Simulations of the Formation of Molecular Clouds toward the Stellar Cluster Westerlund 2: Interaction of a Jet with Clumpy Interstellar Medium, *Astrophysical Journal*, 836, 213 (11 pages), 2017, 査読有

DOI: 10.3847/1538-4357/aa5c86

Chih-Han Peng, Ryoji Matsumoto, Formation of Galactic Prominence in the Galactic Central Region, *Astrophysical Journal*, 836 (8 pages), 2017, 査読有
DOI: 10.3847/1538-4357/aa5be8

〔学会発表〕(計 163 件)

R. Matsumoto, Flux Emergence and Eruptions in Accretion Disks and Galactic Gas Disks, Flux Emergence Workshop 2019 (FEW2019), 2019
五十嵐太一、加藤成晃、高橋博之、大須賀健、松元亮治、セイファート銀河の降着流における X 線放射領域形成の 3 次元大局的輻射磁気流体シミュレーション、日本天文学会 2019 年春季年会、2019
R. Matsumoto, Formation of soft X-ray emitting regions in Seyfert galaxies, Time for accretion, 2018
S. Yamada, ASTRO-H/Hitomi and the next mission, Time for accretion, 2018
M. Machida, T. Kawashima, Y. Kudoh, Global MHD simulations of accretion disks using CANS+, Time for accretion, 2018
T. Igarashi, Radiation MHD simulations of hard-to-soft state transitions in BH accretion flows, Time for accretion, 2018
R. Matsumoto, Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of Black Hole Accretion Disks, 8th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, and Astrophysical Plasmas (EASW8), 2018
R. Matsumoto, C.H. Peng, Formation of Molecular Gas Prominences in Galactic Central Region, 42nd COSPAR Scientific Assembly, 2018
R. Matsumoto, Magnetohydrodynamic Simulations of Disk Dynamo and State Transitions, Max-Planck/Princeton Center for Plasma Physics Workshop, 2018
松元亮治、松本洋介、五十嵐太一、川島朋尚、ブラックホール降着流における高温・低温円盤共存状態の磁気流体モデル、日本物理学会第 73 回年次大会、2018
町田真美、川島朋尚、工藤祐己、磁気回転不安定性の飽和値に対する方位角方向解像度依存性、日本天文学会 2018 年春季年会、2018
中村賢仁、町田真美、松元亮治、X 線連星のスペクトル状態遷移に関する熱伝導を考慮した 2 次元数値実験、日本天文学会 2018 年春季年会、2018
五十嵐太一、松元亮治、加藤成晃、高橋博之、モーメント法に基づく輻射磁気流体コードを用いたブラックホール降着円盤の状態遷移シミュレーション、日本天文学会 2018 年春季年会、2018
R. Matsumoto, Astrophysical Dynamos in Rotating Disks - Magnetohydrodynamic Simulations of Accretion Disks and Galactic Gas Disks, 1st Asia-Pacific Conference on Plasma Physics AAPPs-DPP2017, 2017
T. Yokoyama, H. Iijima, MHD waves and jets in the solar atmosphere, 1st Asia-Pacific Conference on Plasma Physics AAPPs-DPP2017, 2017
大村匠、町田真美、中村賢仁、工藤祐己、朝比奈雄太、松元亮治、ブラックホール降着円盤からの二温度ジェット伝搬計算、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017
R. Matsumoto, Magnetic Field Amplification and Magnetic Energy Release in Astrophysical Objects, US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection, 2017
T. Yokoyama, Y. Oi, T. Kaneko, S. Wang, Magnetic reconnection as triggers of solar plasma eruptions and filament formations, US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection, 2017
T. Kaneko, T. Yokoyama, MHD simulations of prominence formation and oscillation, ISSI-BJ workshop on MHD seismology of the solar corona, 2017
H. Iijima, T. Yokoyama, 3D MHD simulations of chromospheric jets launched by twisted magnetic field lines, ISSI-BJ workshop on MHD seismology of the solar corona, 2017

〔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

<http://www.astro.phys.s.chiba-u.ac.jp/agndisk/>

6 . 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：横山 央明
ローマ字氏名：(YOKOYAMA, takaaki)
所属研究機関名：東京大学
部局名：大学院理学系研究科
職名：准教授
研究者番号(8桁)：00311184
研究分担者氏名：山田 真也
ローマ字氏名：(YAMADA, shinya)
所属研究機関名：首都大学東京
部局名：大学院理学研究科
職名：助教
研究者番号(8桁)：40612073
研究分担者氏名：花輪 知幸
ローマ字氏名：(HANAWA, tomoyuki)
所属研究機関名：千葉大学
部局名：先進科学センター
職名：教授
研究者番号(8桁)：50172953
研究分担者氏名：町田 真美
ローマ字氏名：(MACHIDA, mami)
所属研究機関名：九州大学
部局名：大学院理学研究院
職名：助教
研究者番号(8桁)：50455200

(2)研究協力者

研究協力者氏名：大須賀 健
ローマ字氏名：(OHSUGA, ken)
研究協力者氏名：川口 俊宏
ローマ字氏名：(KAWAGUCHI, toshihiro)
研究協力者氏名：川島 朋尚
ローマ字氏名：(KAWASHIMA, tomohisa)
研究協力者氏名：久保田 あや
ローマ字氏名：(KUBOTA, aya)
研究協力者氏名：高橋 博之
ローマ字氏名：(TAKAHASHI, hiroyuki)
研究協力者氏名：中村 賢仁
ローマ字氏名：(NAKAMURA, kenji)
研究協力者氏名：根来 均
ローマ字氏名：(NEGORO, hitoshi)
研究協力者氏名：野田 博文
ローマ字氏名：(NODA, hirofumi)
研究協力者氏名：廣瀬 重信
ローマ字氏名：(HIROSE, shigenobu)
研究協力者氏名：町田 正博
ローマ字氏名：(MACHIDA, masahiro)
研究協力者氏名：朝比奈 雄太
ローマ字氏名：(ASAHINA, yuta)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。