

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2016

課題番号：15H05437

研究課題名(和文) 偏光理論と一般相対論的電磁気学を駆使したブラックホールジェット駆動機構の解明

研究課題名(英文) Revealing the driving mechanism of black hole jets through polarization and general relativistic electromagnetism

研究代表者

当真 賢二 (Toma, Kenji)

東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教

研究者番号：70729011

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,400,000円

研究成果の概要(和文)：ブラックホールは周囲の物質を全て吸い込んでしまうというイメージがあるが、実際には物質の一部は高エネルギーを獲得し遠方まで逃げる事ができる。そのような過程の中で最も顕著なものが、ブラックホール近傍から光速に近い速さで吹き出すプラズマ(ジェット)である。本研究では、一般相対論的電磁気学を駆使し、ブラックホールの回転エネルギーがジェットの電磁エネルギー流にどう変換されるかの深い物理の理解に成功した。またガンマ線バーストの偏光からジェットの放射機構を強く制限できることを確認した。その他、電波観測によるジェット駆動機構の検証方法の新提案や重力波天体の偏光について予想以上の成果を上げた。

研究成果の概要(英文)：Black holes are widely thought to absorb all ambient materials, but in reality, a fraction of them can obtain high energies and escape. Most remarkable one of such phenomena is plasma jet with speed close to light speed from the vicinity of black holes. This project research has utilized general relativistic electromagnetism and succeeded in understanding the detailed physics on how the black hole rotational energy is converted to electromagnetic energy flux of jet. This project research has also confirmed that the emission mechanism of jets can be strongly constrained through polarization of gamma-ray bursts. Furthermore, this project has achieved extra things such as proposition of a new method to examine the jet driving mechanism with radio observations and theoretical interpretation of the first polarimetric observation of a gravitational wave emitter.

研究分野：高エネルギー天体物理学

キーワード：ブラックホール 相対論的ジェット 偏光 一般相対性理論 活動銀河核 ガンマ線バースト

1. 研究開始当初の背景

過去 40 年ほどの多波長電磁波観測の結果、宇宙にはブラックホールと考えられる天体が多数存在することが明らかになってきた。しかしながら、それらのブラックホール候補天体周辺の時空と物質の詳細な性質については、未だ不明な点が多い。ブラックホール周辺の現象のうち、最も理解されていない謎の一つが光速に近い速さの噴流（ジェット）である。ジェットは、活動銀河の中心に存在する超巨大ブラックホールに付随している。ガンマ線バーストもジェット放出現象であり、星の重力崩壊などによって誕生した恒星サイズブラックホールが駆動するものと理解されている。ジェットについての大きな問題は以下の2つである。(1) ジェットの放射機構がよく理解されていない。そのためジェットのエネルギー構成や磁場構造などが確定できない。(2) ジェットの駆動機構がよく分からない。これはブラックホール周辺の磁場構造や粒子の振る舞いの理解が不十分であることによる。これら2点は宇宙物理学における大問題とみなされており、国内外で活発に観測的・理論的研究が行なわれている。

(1) ジェット天体の中で、ガンマ線バーストの放射機構が特に分かっていない。電磁波の「強度」と「スペクトル」の観測結果を用いたこれまでの議論では、有力モデルを一つに絞ることができていない。それに対し、電磁波の「偏光」は全く新しい情報をもたらす (Toma et al. 2009)。2010 年、日本の観測グループが自前の検出器を使って、ガンマ線バーストのガンマ線偏光の検出に世界で初めて成功した。研究代表者は唯一の理論メンバーとして参加し、限られた観測データから、ジェット放射はシンクロトロン機構、ジェット駆動は電磁的機構が有力であると強く制限した (Yonetoku et al. 2011; 2012)。

(2) ジェットの駆動機構は、上述の偏光観測も含め様々な観測結果を総合すると、ブラックホールの回転エネルギーの電磁的抽出が最も有力なモデルである。これは、回転ブラックホールを貫く磁力線の間で電位差が生じ、磁力線に沿って電磁エネルギー流束が定期的に生じるという過程 (Blandford-Znajek 過程) に基づいている。しかし、この過程には特別な状況下での数学的解があるのみで、未だ満足な物理的説明が無い。Koide et al. (2002) から始まったブラックホール磁気圏の磁気流体シミュレーションが近年発展、活発化し、この過程を再現したという報告が数多くあるが、電磁エネルギー流束の量がどのように決まるのか、流束の源がどこにあり、そこで時空の回転エネルギーがいかにして電磁エネルギーに転換されるのか、などの基本的な疑問に答えてはいない。この問題に対し、研究代表者はシミュレーション研究で再

発見された一般相対論的電磁気学の定式化に注目し、それを解析的議論に使う方法を見出した。その結果、特に、赤道面を貫く磁力線に対し、電磁エネルギー流束の源の場所と流束量の決まり方を明らかにした (Toma & Takahara 2014)。

2. 研究の目的

本研究の目的は、研究代表者がこれまでに進めてきた偏光輸送理論と一般相対論的電磁気学を用いた研究を進展させ、ブラックホールジェットの駆動機構を解明することにある。偏光輸送理論をガンマ線バーストに適用し、ガンマ線放射機構を確定させる。これはジェットの駆動機構の制限につながる。また同時に、ジェット駆動に最も有力と考えられるブラックホール回転エネルギーの電磁的抽出過程の解析的理解を深化させ、物理的なエネルギー抽出メカニズムと抽出が起こる場所を明らかにすることを目指す。これらの成果は他の様々な宇宙物理分野や数値シミュレーション研究にインパクトをもたらすと期待される。

3. 研究の方法

(1) 放射機構の有力モデルは2つあり、シンクロトロン機構と準熱的機構である。上述した偏光観測は前者を支持するが、2つを組み合わせたとようなモデルも依然可能である。本研究では、これら2つからモデルを一つに絞れることを示す。2つのモデルは偏光のエネルギー依存性（すなわち偏光スペクトル）が決定的に異なると考えられる。そして偏光スペクトルには、これまで考えられてこなかったジェット放射領域でのファラデー効果が重要となる。私はガンマ線バーストの残光の研究において、相対論的に熱いプラズマ中でのファラデー効果を先駆的に調べてきた (Toma et al. 2008)。その理論をジェット放射領域に適用する。ファラデー効果の現れ方が2つのモデルで異なることを明確にする。また近年、ジェット放射後早期の残光の可視偏光観測が実現したが、まだ理論的考察は広く進んでいない。早期の可視偏光観測から明らかにすることも整理する。

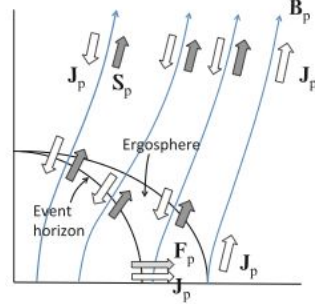
(2) 「赤道面」を貫く磁力線に対しては、エネルギー源は赤道面近傍における電流が磁力線を横切る場所である。その場所で時空のエネルギーから電磁エネルギーへの転換の詳細を明らかにする。そして、「地平面」を貫く磁力線に対して、電磁エネルギー流束の源を突き止める。一般に、エネルギー源は、force-free 近似が破れ電流が磁力線を横切る場所であることがわかっている。地平面を貫く磁力線に対しても電流が磁力線を横切る場所が存在可能かを明らかにする。エネルギー源を含む電磁場構造に対して、正負荷電

粒子の2流体の構造が物理的に矛盾ないものか調べる。

4. 研究成果

(1) 一般相対論的電磁気学を駆使したジェット駆動機構の解析的研究について、「赤道面を貫く磁力線に沿う電磁エネルギー流は、そこで負エネルギー粒子が生成されることのフィードバックとして作られる」「地平面を貫く磁力線に沿う電磁エネルギー流を作る電流構造は、定常に至るまでの非定常過程で作られる」「定常状態でのブラックホール回転エネルギー

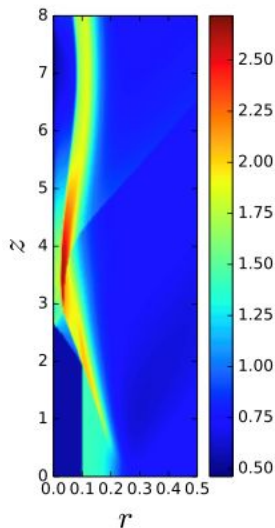
の減少は負エネルギーを介するのではなく、直接電磁エネルギー放出によって起こる」ことが分かり、当初の目的を達成することができた (右図; 雑誌論文)



(右図は、縦軸が回転軸、横軸が赤道面である Blandford-Znajek 過程の概念図。) この解析の中で、これまで解析的な研究で注目されていなかった非定常過程、二つの座標系での解析、エネルギー密度の座標依存性などが重要になることが明らかとなり、予想以上の成果となった。

ジェット駆動機構についての一連の研究を国際会議で発表したり、物理学会誌で論じたり (雑誌論文) するうち認知度が上がった。それにより急速に進んで来た活動銀河核ジェットの観測と関連する共同研究がいくつか立ち上がり、後に述べる新しい研究テーマを生み出すことができた。

(2) ジェット駆動はブラックホール回転エネルギーの電磁的抽出で起こるとするのは本研究の解析的理論および他の数値実験で強く示唆されるが、観測的検証が未だなされていない。ジェット駆動についても一つ議論されるモデルは、ブラックホール周囲の降着流の回転エネルギーを抽出することであり、どちらがエネルギー的に重要なかが問題である。研究代表者は、特殊相対論的流体シミュレーションを行い、ブラックホール駆動と降着流駆動がともに重要である場



合に想定される2成分ジェットが常に伝播途中で不安定になることを示した (右図; 雑誌論文) (右図は、2成分ジェットの軸対称計算であり、エンタルピー密度である。非軸対称計算を行うと、 $z=4$ 付近で Rayleigh-Taylor 不安定となる。) これは電波帯域で観測されている活動銀河ジェットの散逸領域と対応している可能性がある。

この研究はジェット遠方の電波観測からジェットの駆動機構に迫ることができる新たな方向性を示したという点で意義深い。今後電磁場を考慮したシミュレーションを行い、2成分ジェットが現実的かどうか精査する必要がある。

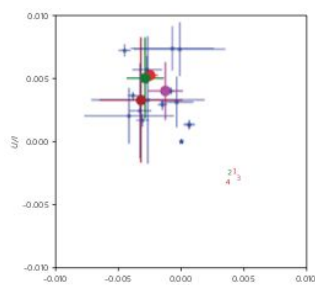
(3) ジェット遠方の電波観測からジェット駆動機構に迫るという目的で、もう一つ新しい研究を行なった。高解像度電波観測されているジェットは、その端が明るいことが多い。それが大抵ジェットの軸に対称な構造をしていることに注目した。ジェット加速の定常モデルにおいてシンクロトロン放射計算を行い、ブラックホール駆動ジェットが観測を再現できることがわかった。降着円盤駆動ジェットは明るい端が非対称になる。このことは Takahashi, Toma, Kino, Nakamura & Hada (2018) として The Astrophysical Journal に投稿し、レフェリーから好意的なコメントをもらっている。

この研究から、ジェット内には高エネルギー電子が端に注入されなければならないことがわかった。近いうちに Event Horizon Telescope というブラックホール近傍を観測する国際観測プロジェクトが結果を出し始める。その解釈に、我々の電子注入モデルが重要になることは間違いない。

(3) 重力波の初検出がなされ、連星ブラックホール合体時に電磁波が放射されるかが国内外で活発に議論された。その中で、一つのブラックホールの降着円盤が放射冷却に伴って低電離度になり降着が止まると予想した論文がある。合体時には降着が一気に進み、明るい電磁波放射が起こるとしている。しかし研究代表者は、降着率の時間進化をより詳細に解析し、合体以前に降着が再開し、合体時の電磁波放射は先行研究に比べて非常に暗くなることを示した (雑誌論文)。

(4) 2017年、連星中性子星合体時の重力波も初検出された。それに伴って可視・赤外放射も観測された。世界中の望遠鏡が測光、分光観測する中、研究代表者を含む研究グループは唯一、偏光観測を行なった。伝播中のダストによって作られる以上の偏光は検出されなかった。このことは、連星中性子星合体時に r-process 元素が作られ、それが光の散乱を支配していることと無矛盾であることがわかった (下図; 雑誌論文) (下図は、観測された連星中性子星合体後の天体の偏光

の Q,U 値と周囲の恒星の Q,U 値。) 金などの重元素は未だ起源が明らかでなく、本研究は測光、分光観測だけでなく偏光観測からもその



起源に迫れることを示したことが大きい。偏光観測は放射体の幾何形状も制限することになるため、今後の観測と詳細な理論シミュレーションで連星中性子星合体の物理の研究に貢献することができると期待される。

(5) ガンマ線バーストジェットの偏光輸送計算については、冷却電子がシンクロトロン自己吸収で再加熱される可能性を当初考慮していなかったことに気付いた。しかしながら、研究協力者と議論を重ね、最初から加速されていない電子は加熱されないことがわかり、当初の考え通り、低エネルギー電子が X 線偏光をファラデー消偏光させるという結論に至った。このことについては、上記(4)の中性子星合体時の偏光の理論研究や、共同研究チームがガンマ線バーストの電波偏光を初検出したことに対する理論研究のため進行が遅れたが、その後再開し、2018 年 5 月現在、論文を作成中である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

Kenji Toma, Fumio Takahara, “Causal production of the electromagnetic energy flux and role of the negative energies in the Blindfold-Znajek process”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 査読有, 2016, 2016, 3E01

DOI: <http://dx.doi.org/10.1093/ptep/ptw081>

Kenji Toma, Sung-Chul Yoon, Volker Bromm, “Gamma-Ray Bursts and Population III Stars”, *Space Science Reviews*, 査読有, 202, 2016, pp 159-180

DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11214-016-0250-7>

堂真賢二, 「ブラックホールが駆動する相対論的ジェットの物理」, *日本物理学会誌*, 査読有, 72, 2017, pp 19-27

Shigeo S. Kimura, Kenji Toma, Takeru K. Suzuki, Shu-ichiro Inutsuka, “Stochastic Particle Acceleration in Turbulence Generated by the Magneto-rotational Instability”, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 822, 2016, pp 88-100

DOI: <https://doi.org/10.3847/0004-637X/8>

22/2/88

Shigeo S. Kimura, Sanemichi Z. Takahashi, Kenji Toma, “Evolution of an Accretion Disk in Binary Black Hole Systems”, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 465, 2017, pp 4406-4413

DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/stw3036>

Kenji Toma, Serguei, S. Komissarov, Oliver Porth, “Rayleigh-Taylor instability in two-component relativistic jets”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有, 472, 2017, pp 1253-1258

DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/stx1770>

S. Covino, K. Wiersema, Y.-Z. Fan, K. Toma, et al., “The unpolarized macronova associated with the gravitational wave event GW 170817”, *Nature Astronomy*, 査読有, 1, 2017, pp 791-794

DOI: <https://doi.org/10.1038/s41550-017-0285-z>

〔学会発表〕(計 10 件)

Kenji Toma, “First Stars Signatures in GRBs”, ‘GRBs: A Tool to Explore the Young Universe’, 招待講演, 2015 年 4 月, China

Kenji Toma, “Relation between Blindfold-Znajek Process and Penrose Process”, ‘Relativistic Jets: Creation, Dynamics, and Internal Physics’, 口頭, 2015 年 4 月, Poland

Kenji Toma, “Causal Production of the electromagnetic energy flux in Blandford-Znajek process”, ‘M87 Workshop’, 口頭, 2016 年 5 月, 台湾

Kenji Toma, “Causal Production of the electromagnetic energy flux in Blindfold-Znajek process”, ‘IAU324: New Frontiers in Black Hole Astrophysics’, 口頭, 2016 年 9 月, Slovenia

Kenji Toma, “Radio Polarimetric Study of Gamma-Ray Bursts”, ‘SMA science in the next decade’, 招待講演, 2016 年 10 月, 台湾

Kenji Toma, “Acceleration and Collimation of Relativistic Jets”, ‘Challenges of AGN Jets’, 招待講演, 2017 年 1 月, 国立天文台

Kenji Toma, “Theoretical Studies of GRBs with Multi-wavelength Polarimetry”, ‘Cosmic Polarimetry from Micro to Macro Scales’, 招待講演, 2017 年 2 月, 広島大学

Kenji Toma, “Theoretical and Observational Studies on Relativistic

Jets Driven by Black Holes ”, `The 27th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan', 招待講演, 2017年11月, 広島大学

當真賢二, 「GRBの偏光」, `ガンマ線バースト研究の新機軸', 招待講演, 2017年11月, 東大宇宙線研究所

當真賢二, 「一般相対論が絡むプラズマ過程」, `日本物理学会第73回年次大会プラズマ宇宙物理3学会合同シンポジウム', 招待講演, 2018年3月, 東京理科大学

〔その他〕

ホームページ等

<https://www.astr.tohoku.ac.jp/~toma/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

當真 賢二 (TOMA, Kenji)

東北大学・学際科学フロンティア研究所・
助教

研究者番号: 70729011