

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：13902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24540268

研究課題名(和文)「観測的ブラックホール時空研究」に向けての理論研究

研究課題名(英文) Theoretical Study for the detection of Astrophysical Black Hole Spacetime

## 研究代表者

高橋 真聡 (Takahashi, Masaaki)

愛知教育大学・教育学部・教授

研究者番号：30242895

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：ブラックホールが作る曲がった時空における高エネルギー天体現象の理解のため、ブラックホール周辺の磁気圏の構造についての研究を深化した。銀河系中心やコンパクトX線天体の中心では激しい天体現象が発現しているが、その活動性の原因にはブラックホールが深く関与していると考えられている。ただし、そのようなブラックホールの存在は直接観測的には未だに確認されていない。私は、観測されているような激しい活動性を引き起こすようなブラックホールの周辺環境モデルを構築した。また、その様子をどのように観測的に確認できるのかについて、電波VLBI天文観測および近赤外線天文観測の分野と協力して、方策を検討した。

研究成果の概要(英文)：The structure of magnetosphere of a black hole is studied to understand the high-energy astrophysical phenomena in active galactic nuclei and some compact X-ray sources. Such high-energy phenomena are due to a massive black hole with magnetized plasma accretion, where the effects of strong gravity (i.e., the general relativistic effects) have a crucial role in the system around the black hole. I and collaborators make a project to detect some information about the black hole's curved spacetime by radio VLBI observation and near-infrared observation.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：ブラックホール 一般相対論 磁気流体力学 高エネルギー天体現象 サブミリ波VLBI観測 衝撃波  
ガンマ線バースト S2天体の近日点移動

## 1. 研究開始当初の背景

銀河中心核、近接連星系、ガンマ線バースト現象において、ブラックホールの存在を示唆する観測的証拠が多数観測されている。その根拠は、多くの場合非常にコンパクトな重力源の存在や膨大なエネルギー放出である。しかしながら、ブラックホールが宇宙に存在することについての直接観測的な証拠は得られていない(補足: 2016年2月にアメリカの重力波観測チームによって重力波が検出されブラックホールの存在が観測的に確認された)。

近年、サブミリ波 VLBI 観測による「ブラックホール影の撮像計画」や近赤外線による銀河系中心を周回する S2 天体の近日点移動の観測(超強力重力場の効果)、また X 線天体衛星によるブラックホール周辺プラズマからの鉄輝線観測(重力赤方偏移の検出)など、観測的ブラックホール研究に高い関心もたれるようになってきた。これら観測的ブラックホール研究の動機は天体物理学の観点から、また一般相対性理論の検証の観点から以前からあるものだが、近年の急速な動向変化の背景には巨大観測装置の整備や観測機器技術のめざましい発展がある。

また、本研究の開始時期には銀河系中心に G2 天体が発見され(近赤外線観測による)中心巨大ブラックホールにガス降着を引き起こすのでは?と、社会的にも大きな話題となった。実際に然るべき量のガス降着が起これば、X 線や電波でもフレア現象として観測されることになるので、いくつかの波長帯でのモニター観測が行われた。

## 2. 研究の目的

ブラックホール時空における天体物理的現象についての理論的研究は、一般相対論的なアプローチによる時空研究から始まり、最近では一般相対論的流体力学・電磁流体力学の研究として発展してきている。近年の観測的側面からのブラックホール研究は、それらの理論研究を基盤として進められている。本研究では、従来の理論研究を拡張・発展させ、観測的ブラックホール研究との融合を目指す。この目的のため、特にブラックホール周辺のプラズマ環境(降着ガス円盤+磁気圏)のモデルを構築する。既存の観測データの中に相対論効果が潜んでいないか探るとともに、近い将来観測データが得られると期待される様々な天体現象にも備える。

## 3. 研究の方法

(1) ブラックホール磁気圏の磁場形状: ガンマ線バースト現象や宇宙ジェットにおけるプラズマ加速や形状の理解のために、磁場が支配的な磁気圏における磁場形状についてのモデルを構築してきた。手法としては、一般相対論的な磁気流体流の定常解を解く作業となるが、モデルにプラズマの慣性の効果を取り入れることで、従来は扱えなかった

効果を議論できるようになった。ブラックホールの周辺の電磁場分布を解くことで、電磁場によるブラックホール回転エネルギーの引く抜き効率も評価でき、観測されている膨大なエネルギー放出の源として有効か否か、さらにその機構について理解できるようになる。

(2) ブラックホール影: 銀河系中心に存在するとされる巨大ブラックホール撮像観測(ブラックホール影)に向けて、ブラックホールの周りを周回するホットスポットの見え方について数値計算した。このような計算は、Ray-tracing 法を利用して容易に計算可能である。例えば、ブラックホール降着流中に巨大なフレア現象が発生した場合、どのような光度変化するか推定しておくことが出来る。この場合、光源から直接的にやってくる光線に加えてブラックホールの周りを一周してからやってくる光線も若干の時間差を持って観測されると期待されるので、両者の光度比からブラックホールの質量や角運動量が推定可能である。

(3) ブラックホール降着流からの高エネルギー放射: ブラックホール磁気圏における磁気降着流についての温度分布を調べる。最初の試みとして磁気圏の磁場形状を放射状と仮定するが、磁力線の回転角速度やプラズマの降着率やエネルギー・角運動量はパラメータとして様々な組み合わせでの数値計算を実施する。これにより磁気圏内の温度分布の解が得られる。最も高温となる領域がどこに現れるかを調べ(回転軸付近?赤道面近傍?など)そこでの温度と密度の値を用いて逆コンプトン散乱による高エネルギー放射のモデルを構築する。磁気圏のどのような物理パラメータがどのようなスペクトルを生じさせ、観測データを説明可能か調べた。

## 4. 研究成果

(1) ブラックホール磁気圏の磁場形状: ブラックホール磁気圏についての自己矛盾のない定常解については、Force-free 極限におけるものが知られているが、我々はこれに慣性の効果を摂動的に取り入れて、慣性の効果による磁場形状の修正について調べた。磁気圏中に(慣性の効果を無視しない)プラズマ流があることで、磁力線を横切る電流の成分が発生しトロイダル方向の磁場成分が影響を受ける様子を明らかにした。また、太陽物理学分野で知られる数値解析手法をブラックホール磁気圏に応用して、磁気圏磁場の構造の数値的解法を実施した。磁気圏磁場の回転速度や他の物理パラメータに依存して、磁力線が回転軸に沿う方向に湾曲したり、逆に離れていく条件について調べた(数値計算はモンタナ州立大学との共同研究)。

(2) ブラックホール周辺でのホットスポットの時間変動: ブラックホール周辺のダイナミカルな現象の理解のため、ブラックホール半径の数倍のところを「ホットスポット」が

周回運動をしているとし、観測されるべき光度変化を計算した。重力赤方偏移とドップラービーミング効果のため、この時間変動は単純な正弦関数にはならず大きく外れた特徴的な光度曲線となった。ホットスポットから放射されブラックホールを一周してから観測者に到達する光線についても光度の時間変化の様子を調べた。後者の光度は一般に弱いのだが、1周期のあるフェーズにおいて増光することが確認できた。観測的にはパルサー的な様相を示すと思われる。

(3) ブラックホール磁気圏における磁気流体波の伝播：ブラックホール周辺での天体構造形成に関し、磁気流体力学観点からのエネルギー・角運動量輸送、および情報伝達（因果関係）を調べた。ブラックホール周辺での磁場分布や流体分布を仮定し、磁気流体波についての「magnetosonic metric」を定義した。これにより、「magnetosonic Horizon」や「magnetosonic Ergoregion」を定義した。この背景時空中における波の射線ベクトルを解いていくことで波面の伝播を議論した。同様の議論は、磁場無しの音波についてのものがあるが、今回の研究は磁場を取り入れ、磁気流体波としての方程式系を整備した点が新しい。ガス円盤プラズマと逆向きの角運動量を持つ磁気流体波は、(i)円盤の内端領域あるいは(ii)ファンネルに沿って回転軸方向に伝搬していくことが示された。波面の伝播方向について(i)となるか(ii)となるかは、磁場の強度分布に依存して決定することが示された。磁場の導入により、磁気音波についての有効ポテンシャルの振る舞いに新たな特徴が現れ、新たに波の閉じ込め等、磁化したガス円盤の不安定性に繋がりそうな状況のあることもわかってきた。

(4) ブラックホール磁気圏での Penrose Compton 散乱過程：ブラックホール近傍からの超高エネルギー放射として、ブラックホール時空中に特有の放射機構を考察した。ブラックホールの周りに大局的な電磁場が分布している場合、ブラックホールの自転による時空の引きずりの効果のため、静電ポテンシャルの値が負となる領域が可能となる。この負ポテンシャル領域において、荷電粒子についての所謂ペンローズ機構を考察する。放射機構のためには、Compton 散乱（Penrose Compton 散乱）を適用する。簡単な衝突過程の元ではあるが、入射した光子がこの機構によって膨大なエネルギーを獲得し、超高エネルギー放射を生成することが示された（観測から示唆される超高エネルギー領域にまで延びたパワーロススペクトルを構築できた）。このとき引き抜かれるのは静電エネルギーとしてではあるが、負ポテンシャル領域を生じさせるのは「時空の引きずりの効果」が原因である（ブラックホールに特有な効果）。負のポテンシャル領域はブラックホール・エルゴ領域の外側に発生することも可能であるので、エネルギー発生領域の体積はオリジ

ナルのペンローズ過程による発生よりも大きくなり、総輻射量としても十分な量となるものと期待できる（磁場分布に依存する）。

(5) ブラックホール磁気降着流からの高エネルギー放射：活動銀河中心核からは非対称で広がった鉄輝線が観測されているが、ブラックホール時空中での相対論効果によるものと考えられている。このような鉄輝線は多くのブラックホール候補天体で確認されているが、どのようなブラックホール周辺環境において実現しうるのかについては未解明の問題が多く残されている。先行研究では、ブラックホール回転軸領域に超高温プラズマ領域（ホットスポット）が発生すれば、ここからの放射が赤道面を照らし、その反射光が観測されるような輝線を生じさせることが明らかにされている。残る課題は、如何にして回転軸近傍にホットスポットを形成するかである。そしてそのようなホットスポットの振る舞いが、観測されている鉄輝線の形や強度、時間変動を再現しうるかである。この目的のため、ブラックホール磁気圏モデルにおいて様々なパラメータの組み合わせにおいてブラックホール降着流を数値計算し、得られた温度分布と密度分布より逆コンプトン効果によるスペクトル計算を行った。今回の計算によるスペクトルは、ホットスポットからの直接成分のみだが、降着流の角度分布等を調整することで観測データに適合可能なパラメータセットを見いだせることがわかった。回転軸領域に超高温のホットスポットを作るためには、降着流分布に角度依存性が無い状況が都合良いこともわかった。

(6) ブラックホール時空探査計画：銀河系中心ブラックホールの存在を観測的に検証するため、(i)電波サブミリ波VLBI観測によるブラックホール影および周辺ガス円盤の撮像計画、(ii)近赤外線観測によるS2天体についての一般相対論効果の検出について共同研究を推進した。(i)については計画のプロジェク化に際して、定期的に勉強会・研究会を開催するなどして探査計画の意義や到達目標について掘り下げた議論を行った。現段階では（共同研究者による）観測実施に向けての観測装置製作や観測地点の気象条件調査などを行っている段階である。(ii)については、ブラックホール時空の歪みの効果がブラックホールを周回するS2天体の軌道にどの程度の影響を与えるか、またS2天体からの光線が我々に至るまでにどの程度の一般相対論効果（重力レンズ効果）を受けるかについて評価しているところである。2018年のS2天体の近星点通過（中心ブラックホールに最も近づく）の磁気に向けて、理論研究と期待される観測データとの擦り合わせ作業を行っている。

(7) 科研費研究による上記の研究成果や研究の過程で得られた知見は、高校生や一般の市民にもわかるように噛み砕き、ブラックホールについての関心を高めてもらえるように啓蒙活動を進めている。具体的には、日本学

術振興会の補助による「ひらめき ときめきサイエンス」講習会を実施した。また、スーパーエンス高校の研究活動などをサポートした。

#### 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 3 件)

高橋真聡、見えないブラックホールを見る、数理科学、サイエンス社、査読無、630巻、2016、15-20

Liebmann, A.C.; Haba, Y.; Kunieda, H.; Tsuruta, S.; Takahashi, M.; Takahashi, R., Dynamical Behaviour of X-Ray Spectra from Markarian 766, The Astrophysical Journal, 査読有、780, 2014, 35-49

Saitoh, T.R.; Makino, J.; Asaki, Y.; Baba, J.; Komugi, S.; Miyoshi, M.; Nagao, T.; Takahashi, M.; Takeda, T.; Tsuboi, M.; Wakamatsu, K., Flaring up of the compact cloud G2 during the close encounter with Sgr A\*, Publication of the Astronomical Society of Japan, 査読有、66, 2014, 1-9

[学会発表](計 55 件)

高橋真聡、ブラックホール方のエネルギー引き抜き、第9回ブラックホール磁気圏研究会、2016年3月3日、夕張マウントレースイホテル(夕張市)

Takahashi, M., MHD Shock in Accretion onto a Black Hole, The 28<sup>th</sup> Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, 2015.12.15、Geneva (スイス)

Takahashi, M., MHD Wave Propagation in a Black Hole Magnetosphere, The 25<sup>th</sup> Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, 2015.12.08、基礎物理学研究所(京都市)

高橋真聡、ブランドフォード=ツナジェック効果レクチャー、第29回ブラックホール地平面勉強会、2015年9月14日、慶応大学(横浜市)

高橋真聡、ブラックホール磁気圏の磁場構造と宇宙ジェット構造、降着円盤大研究会 2015、2015年6月21日、京都大学(京都市)

高橋真聡、ブラックホール降着円盤の偏光ベクトルの回転、第27回ブラックホール地平面勉強会、2015年6月6日、名古屋大学(名古屋市)

高橋真聡、Negative Energy MHD Inflows、第8回ブラックホール磁気圏研究会、2015年3月3日、広島大学(東広島市)

高橋真聡、銀河系中心に潜むブラックホールの探査計画、第5回慶応大学インターネット望遠鏡ネットワークシンポジウム、2015年2月28日、慶応大学(横浜市)

高橋真聡、ブラックホール探査に向けて

の理論的取り組み、長野ブラックホール天文教育研究会、2014年11月15日、長野高専(長野市)

Takahashi, M., Time Variability of an orbiting Hot spot around a Black Hole, The 24<sup>th</sup> Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan 2014.11.11、東京大学(柏市)

高橋真聡、BHからのエネルギー抽出機構の基礎知識、第7回ブラックホール磁気圏研究会、2014年3月3日、熊本大学(熊本市)

高橋真聡、ブラックホール降着流モデル、ALMA 銀河系中心ワークショップ 2013、2013年11月26日、慶応大学(横浜市)

高橋真聡、幾何学的に薄い降着円盤が作る磁気圏構造、第7回ブラックホール磁気圏研究会、2014年3月3日、熊本大学(熊本市)

Takahashi, M., Magnetic Penrose Process in a Black Hole Magnetosphere, The 23<sup>th</sup> Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, 2014.11.06、弘前大学(弘前市)

高橋真聡、ブラックホールは見えるか? エルゴ領域での衝撃波形成、銀河系中心ブラックホール 2013 研究会、2012年11月7日、宇宙科学研究所(相模原市)

Takahashi, M., GRMHD inflows and outflows in a BH Magnetosphere, The sixth Workshop on Black Hole Magnetosphere, 2013.3.5, Hsinchu (Taiwan)

高橋真聡、ブラックホール地平面プロジェクトメンバー、きゃらばんサブミリ計画: ブラックホールと周辺環境の探査、宇宙懇シンポジウム、2012年12月21日、国立天文台(三鷹市)

[図書](計 1 件)

高橋真聡、他(福江純、澤武文編、6名共著)超・宇宙を解く、恒星社厚生閣、2014、286(13-25, 50-52, 61-71, 101-105, 180-183, 195-198, 229-232)

[その他]

ホームページ等

ブラックホール地平面プロジェクト

[http://www.phyas.aichi-edu.ac.jp/~takahashi/Project\\_Horizon/](http://www.phyas.aichi-edu.ac.jp/~takahashi/Project_Horizon/)

ブラックホール磁気圏研究会

<http://www.phyas.aichi-edu.ac.jp/~takahashi/BHmag2016/>

天文月報『BH時空』特集

<http://www.phyas.aichi-edu.ac.jp/~takahashi/T-Geppou/>

長野ブラックホール天文教育研究会

<http://www.phyas.aichi-edu.ac.jp/~takahashi/GCF2015/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

高橋 真聡 (TAKAHASHI, Masaaki)

愛知教育大学・教育学部・教授

研究者番号 : 30242895