

平成 23 年 2 月 14 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19740100

研究課題名 (和文) 巨大バイナリーブラックホール探査の新方法

研究課題名 (英文) New Approach for Probing Binary Supermassive Black Holes

研究代表者 早崎 公威 (HAYASAKI KIMITAKE)

北海道大学・大学院理学研究院・学術研究員

研究者番号：30374218

研究成果の概要 (和文)：

バイナリーブラックホールの合体過程は、銀河中心の巨大ブラックホール形成に重要な役割を果たしている。今回、数値シミュレーションによって、バイナリーブラックホールの周囲に三つのガス円盤 (三重円盤) が形成されることを示し、この系から放射されるエックス線や紫外線等は激しく周期変動し、可視光や赤外線はほとんど変動しないことが分かった。また、三重円盤との相互作用によってバイナリーブラックホールは宇宙年齢内に合体可能であることが示された。

研究成果の概要 (英文)：

Merging process of binary massive black holes plays a key role in a formation of supermassive black hole in a galactic nucleus. I and collaborators showed the formation of a triple disk, which are composed of an accretion disk around each black hole and a circumbinary disk surrounding them. We also found that there are characteristic signals from the BBH with the tripe disk. On the other hand, it is still unknown how the BBH evolves after its semi-major axis reached to the sub-parsec scale where the dynamical friction with the neighboring stars is no longer effective. I proposed a new mechanism that the interaction with the triple disk makes it possible for the binary to naturally coalesce within a Hubble time.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,200,000	0	1,200,000
2008 年度	600,000	180,000	780,000
2009 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,400,000	360,000	2,760,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：理論天文学

1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙は一千億個以上の銀河から構成されている。銀河は一千億以上の恒星から成り、その中心には太陽の百万倍以上の質量を持つ巨大なブラックホールが存在している (Kormendy & Richstone)。ここ最近、質量の大きな銀河には質量の大きなブラックホールが存在していることが分かってきた (Marrgorian 1998)。これは、銀河同士が合体成長するようにブラックホール同士も合体して成長することを示唆している。したがって、二つのブラックホールが重力で結ばれたバイナリーブラックホールの形成は自然な結果であるが、いくつかの候補天体はあるものの (e.g., Sillnpapa et al.1988)、未だに同定されていない。

(2) 一方で、バイナリーブラックホールの進化を考えると、バイナリーブラックホールは、その周囲の星との力学的摩擦によって、共通重心に落ち込み、重力波を放射して合体すると考えられている。しかし、ブラックホール同士の距離が約 1 パーセク (約 $3 \times 10^{18} \text{cm}$) になると、星の密度が薄まり、力学的摩擦が効かなくなる。その結果、宇宙年齢内にブラックホール同士が合体して成長できなくなる。この問題は、「ファイナルパーセク問題」という宇宙物理学上の最重要未解決問題の一つである (Begelman 1980)。

2. 研究の目的

上記の問題提起 (1) バイナリーブラックホールの存在を明らかにすること。及び、(2) ファイナルパーセク問題を解決すること。に対して理論モデルを構築し数値的、解析的に検証することによって、解決策を提案する。

3. 研究の方法

(1) バイナリーブラックホール同定の新方法

- ① 数値流体計算法の粒子法の一つで三次元 Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) を用いて、バイナリーブラックホールを二つの点状重力源と見なし、その周囲にガス円盤をモデル化する。
- ② 系が準定常状態になるまで計算を実行し、各ブラックホールへの降着率を求める。
- ③ 各ブラックホール周囲の降着円盤の温

度分布から放射スペクトルを求め、降着円盤からの放射光の時間変動性を求める。

(2) バイナリーブラックホールの進化

バイナリーのトルクとガス円盤の粘性トルクの釣り合いからバイナリーの角運動量輸送率を評価し、軌道長半径の減衰率と軌道離心率の減衰率を解析的に求める。

4. 研究成果

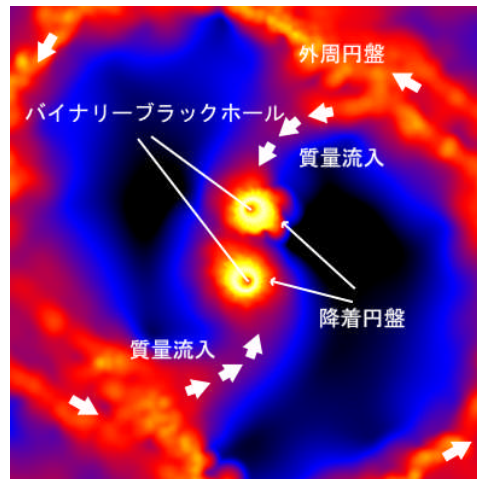


図1：三重円盤を伴うバイナリーブラックホールシステムの密度マップ。色はガス密度の濃さ（黄→赤→青→黒の順に密度が薄くなる）を表す。二つブラックホールを取り囲む外周円盤からブラックホールに向かってガスの輸送が行われ、両ブラックホールの周囲にも降着円盤が形成される。

(1) バイナリーブラックホールからの放射光

活動銀河中心核 (AGN) はガスの降着によって活動性を維持しており、その寿命は、典型的には 1 億年と考えられている。それゆえ AGN では、ブラックホールの近傍にガスが豊富にあると考えられている。中心領域の豊富なガスの中にバイナリーブラックホールがあると、その周囲のガスに角運動量を与えて、バイナリーを囲うガス円盤 (外周円盤) が形成されると考えられる。

そこで、バイナリーブラックホールを囲む外周円盤の存在を仮定し、数値シミュレーションによって、外周円盤とバイナリーブラッ

クホールとの相互作用を調べた。外周円盤とバイナリーブラックホールは潮汐-共鳴相互作用をする。その結果、外周円盤から中心のブラックホールに向かって周期的な質量輸送が行われることが示された (Hayasaki Mineshige and Sudou 2007)。さらに、質量輸送によってブラックホールの周囲に降着円盤が形成され、最終的に外周円盤と二つの降着円盤の三つのガス円盤から構成される系 (三重円盤系) となることが明らかになった (Hayasaki, Mineshige and Ho 2008) (図 1)。

図 1 の中心にある二つの降着円盤は、バイナリーの軌道運動とともに回転するので、降着円盤から放射される光もその軌道運動の情報を持っていると予想される。一見すると、あらゆる波長の光が周期的に変動するように見えるが、シミュレーションによって、そうではないことが分かった。シミュレーション結果を解析して、放射光を多波長で見ると、紫外線やエックス線の光学曲線は、軌道運動に依存して激しく変動する一方で、可視光や赤外線は、それらに比べるとほとんど変動しないことが分かった (図 2)。

この放射特性は、二つの物理が合わさって起こると理解できる。一つは、軌道周期毎に降着円盤の温度分布が高い場合と低い場合の両方が表れることである。これは、一軌道周期内に降着円盤の放射スペクトル (黒体放射) に軌道位相依存性が見られるということに対応する (図 3)。降着円盤が定常軸対称であると仮定すると、降着円盤の温度分布は、降着率の関数となる。通常の乱流粘性による降着では、その時間尺度が軌道周期をはるかに超えるために、降着率に対して軌道位相依存性を持つことは不可能である。

では、軌道周期内に降着率を変動させる機構はいったい何か。シミュレーション結果の解析から、周期的に外周円盤内縁から各ブラックホールに向かってガスが輸送されることが分かっている。ところが、ブラックホールの周囲には既に降着円盤があるので、輸送されたガスのブラックホールに対する動径成分は、動圧となって降着円盤の外壁を叩く。すると、円盤上に波が発生し、この波によってブラックホールに向かって質量が運ばれ降着率を変動する、というメカニズムになる。したがって、外周円盤内縁からの周期的なガスの輸送が、結果として放射スペクトルの軌道位相依存性を生み出していることが理解できる。

もう一つは、円盤の放射スペクトルは、低温側ではピークに向かって線形にのびる一方で、高温側ではピークから指数関数的に減少することである (図 3)。したがって、温度の低い軌道位相での放射スペクトルと温度の高い軌道位相での放射スペクトルの差

は、低温側では小さいが高温側では極端に大きな変動を引き起こす。これらの特徴は、三重円盤系に特徴的な光学曲線と考えられ、バイナリーブラックホール探査の基礎的なプローブになるであろう (Hayasaki, Mineshige, and Ho, 2008)。

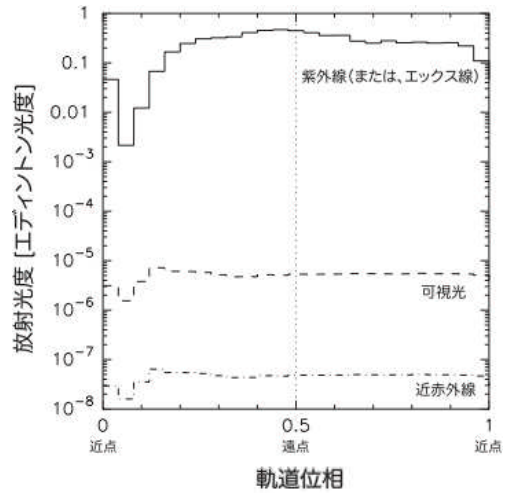


図 2 : 降着円盤からの一軌道周期あたりの放射光度曲線。

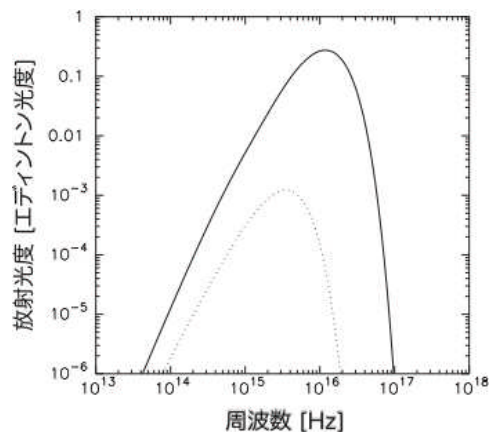


図 3 : 最も温度が高い軌道位相 (実線) と最も温度が低い軌道位相 (点線) における降着円盤の放射スペクトル。

(2) バイナリーブラックホールの進化

銀河同士の衝突の結果、中心のブラックホールは、星との力学的摩擦によって、角運動量を失い、その共通重心に向かって落ち込んで行く。ところが、中心から半径 1 パーセクのあたりで、星の密度が極端に薄くなり結果的に星との力学的摩擦が効かなくなる。すると、さらに中心に落ち込むのに宇宙年齢を超えてしまい合体できなくなる (ファイナルパーセク問題)。この理論が正しいとすると、宇宙のあらゆる銀河には 1 パーセクスケール

のバイナリーブラックホールがうようよ存在することになる。

ところが、先のマゴリアン関係 (Marrgorian et al, 1998) はブラックホール同士も合体して成長することを示唆している。したがって、星との力学的摩擦以外に、バイナリーブラックホールの角運動量を失う機構が要請される。

とはいえ、バイナリーブラックホールが 1 に近い軌道離心率を持っていてかつ質量比が 0.1 よりもはるかに小さい系では力学的摩擦による散逸の時間尺度が宇宙年齢を超えることはない、という研究結果も出ている。そこで、等質量のバイナリーブラックホールに注目する。

ブラックホールとガスとの相互作用を考えるにあたって、三重円盤モデルを導入すると、ファイナルパーセク問題は、角運動量輸送問題に帰着される。詳細な計算は省くが、合体の特徴的な時間尺度は、円盤の粘性時間に円盤質量とブラックホール質量の比をかけ合わせたものになる (Hayasaki 2009)。

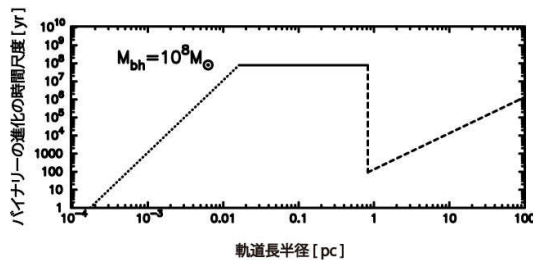


図 4 : バイナリーブラックホールの進化。縦軸は軌道長半径の収縮の時間尺度、横軸は軌道長半径。バイナリーブラックホールの総質量は 10^8 太陽質量、等質量バイナリーブラックホール。進化は三段階に分かれ、右から左に進む。

三重円盤モデルの導入によって、バイナリーブラックホールの進化過程は図 4 のようになる。この図は、バイナリーブラックホールは、お互いの距離が 1 パーセクのところで停滞することなく縮んでいき、最後には重力波を放射しながら合体することを示している。また、バイナリーブラックホールが三つのガス円盤を伴って進化している時間が長いから、この時期のバイナリーを同定できる可能性が高いことも示している。

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)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① Kimitake Hayasaki and Atsuo, T Okazaki, A new approach for probing circumbinary disks, *Astrophysical Journal Letters*, 査読有、2009 年、691 巻、5-8
- ② Kimitake Hayasaki, A new mechanism for massive binary black hole evolution, *Publications of Astronomical Society of Japan*, 査読有、2009 年、61 巻、65-74
- ③ 早崎公威、巨大バイナリーブラックホール探査の新方法、*日本物理学会誌*、査読無し、2009 年、64 巻 9 号、4
- ④ Kimitake Hayasaki, Naoki Isobe, Hiroshi Sudou, Hiromi Seta and Shin Mineshige, Probing a Supermassive Binary Black Hole with MAXI, *The 1st Int. Symp. On "MAXI workshop, San Francisco: ASP*、査読無し、2009 年
- ⑤ Kimitake Hayasaki, Shin Mineshige and Luis, C Ho, A supermassive binary black hole with triple disks, *Astrophysical Journal Letters*、査読有、682 巻、2008 年、2 号、1134-1140
- ⑥ Kimitake Hayasaki and Shin Mineshige, Periodic light variations from the triple-disk system around supermassive binary black holes, *The 10th Int. Symp. On "Origin of Matter and Evolution of Galaxies "*, (San Francisco: ASP)、査読有、2008 年
- ⑦ Kimitake Hayasaki, Shin Mineshige and Hiroshi Sudou, Binary black hole accretion flows in merged galactic nuclei, *Publication of Astronomical Society of Japan*、査読有、59 巻、2007 年、427-441

[学会発表] (計 17 件)

- ① 講演題目: 活動銀河中心核における巨大

- バイナリーブラックホールの質量関数
 会議名：日本天文学会
 場所：広島大学
 開催年月：2010年3月
 発表形式：口頭
- ② 講演題目：A new approach for probing supermassive binary black holes
 会議名：Workshop on Massive Binary Stars
 場所：北海道大学情報基盤センター開催
 開催年月：2010年3月
 発表形式：招待講演
- ③ 講演題目：巨大バイナリーブラックホール探査に向けて
 会議名：第三回 BH 磁気圏勉強会
 場所：大阪市立大学
 開催年月：2010年3月
 発表形式：招待講演
- ④ 講演題目：活動銀河中心核における巨大バイナリーブラックホールの質量関数
 会議名：「巨大ブラックホールと銀河の共進化」ワークショップ
 場所：筑波大学
 開催年月：2010年2月
 発表形式：口頭
- ⑤ 講演題目：MAXI で探る巨大バイナリーブラックホール
 会議名：「2009年度理論懇シンポジウム」
 場所：名古屋大学
 開催年月：2009年12月
 発表形式：口頭
- ⑥ 講演題目：巨大ブラックホールの起源：原始バイナリーブラックホールとその宇宙論的進化
 会議名：日本天文学会
 場所：山口大学
 開催年月：2009年9月
 発表形式：口頭
- ⑦ 講演題目：A new approach for probing a massive binary black hole
 会議名：Massive black hole binaries and their coalescences in Galactic Nuclei” Kavil Institute for Astronomy and Astrophysics at Peking University, China
 場所：Kavil Institute for Astronomy and Astrophysics in China (中国北京市)
- 開催年月：2009年7月
 発表形式：口頭
- ⑧ 講演題目：バイナリー原始ブラックホールの進化 I: 暗黒物質との相互作用
 会議名：日本物理学会
 場所：立教大学 (東京都豊島区)
 開催年月：2009年3月
 発表形式：口頭
- ⑨ 講演題目：原始バイナリーブラックホールの進化 I: 暗黒物質との相互作用
 会議名：日本天文学会
 場所：大阪府立大学 (大阪府堺市)
 開催年月：2009年3月
 発表形式：口頭
- ⑩ 講演題目：AU スケール巨大バイナリーブラックホールの検出に向けて
 会議名：巨大ブラックホール天文学研究会：「最新の動向と課題」
 場所：京都大学基礎物理学研究所 (京都府京都市)
 開催年月：2009年1月
 発表形式：招待講演
- ⑪ 講演題目：A new mechanism for merging massive binary black holes
 会議名：1st International Workshop on DECIGO
 場所：ISAS/JAXA
 開催年月：2008年12月
 発表形式：口頭
- ⑫ 講演題目：巨大ブラックホール合体の新機構
 会議名：日本天文学会
 場所：岡山理科大学 (岡山県岡山市)
 開催年月：2008年9月
 発表形式：口頭
- ⑬ 講演題目：Probing a supermassive binary black hole with MAXI
 会議名：1st International Workshop on MAXI
 場所：理化学研究所
 開催年月：2008年6月
 発表形式：口頭
- ⑭ 講演題目：A supermassive binary black hole evolving with triple disks
 会議名：APCTP-YITP 2008 Workshop on "Accretion and Outflow in Astrophysics" and the second Korea-Japan Young Astronomers Meeting (KJYAM)
 場所：本能寺会館 (京都市)
 開催年月：2008年1月
 発表形式：招待講演
- ⑮ 講演題目：Periodic light variations from the triple-disk system around

supermassive binary black holes
会議名：ORIGIN OF MATTER AND
EVOLUTION OF GALAXIES:
The 10th International Symposium
on Origin of Matter and Evolution of
Galaxies: From the Dawn of
Universe to the Formation of Solar
System.

場所：北海道大学

開催年月：2007年12月

発表形式：口頭

- ⑩ 講演題目：Periodic light variations
from a supermassive binary black
hole with triple disks
会議名：YITP Workshop on"
Quasi-Periodic Oscillations and
Time Variabilities of Accretion Flows"
場所：YITP, Kyoto University

開催年月：2007年11月

発表形式：口頭

- ⑪ 講演題目：銀河中心における巨大バイナ
リーブラックホールの進化」
会議名：日本天文学会
場所：岐阜大学（岐阜県岐阜市）
開催年月：2007年9月
発表形式：口頭

〔その他〕

新聞掲載

「双子」の巨大ブラックホール探査の新方を
発見」

朝日新聞（2008年7月23日 34面）、京都新
聞（2008年7月23日 30面）、産経新聞（2008
年7月23日 3面）、日刊工業新聞（2008年7
月23日 26面）、毎日新聞（2008年7月23
日 2面）および読売新聞（2008年7月28日
23面）

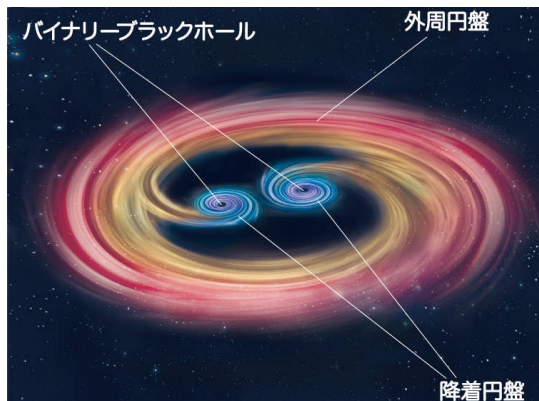


図5：バイナリーブラックホールを取り囲む
三重円盤の想像図（新聞掲載図）。

TV 掲載

TV ニュース：「ブラックホールは銀河に2つ
か」 NHK 総合テレビ（京都局発京都府内、大
阪局発京阪神地域）、NHK B S 1（全国）
NHKインターネットニュース、NHKデー
タ放送ニュース、NHK携帯端末ニュース

ホームページ等

<http://www.yukawa.kyoto-u.ac.jp/content/s/research/detail.php?RID=44>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

早崎 公威 (HAYASAKI KIMITAKE)

北海道大学・大学院理学研究院・学術研究
員

研究者番号：30374218

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし