

バイナリー巨大ブラックホール探査に向けて*

A new approach for probing binary supermassive black holes

早崎 公威[†]

北海道大学大学院理学研究院

概要.

互いの重力で結ばれた二つの巨大ブラックホール（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ます。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ました。そして、この系から放射される光にユニークな特徴、すなわち、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判明しました。今後、観測によってこのようなユニークな変動が見つければ、バイナリーブラックホールの証明となります。

一方で、二つのブラックホール間の距離が1パーセク（ $\sim 3.1 \times 10^{13}$ km）程度のところでブラックホール同士の接近が停滞して合体できないという宇宙物理学上の重要な未解決問題があります。三重円盤という幾何学構造は、このバイナリーブラックホールの進化に伴う理論的問題を解決しつつ、観測可能な特徴をも併せ持つ自然なモデルになっています。実際に、銀河の中心のブラックホールにこのような構造が普遍的に存在することが観測によって示されれば、それは人類の宇宙観を大きく変えることになると考えています。

1. はじめに

かつてブラックホールは、一般相対論の予言する理論上の産物でした。ところが現在では、観測技術の発達によって現実の宇宙に実在する天体であることが広く認知されています。これまで、「単一」のブラックホールについての多くの研究の結果、宇宙の様々な活動現象の黒幕として重要な役割を果たしていることが分かって来ました。ところが最近では、「二つ」のブラックホールが互いの回りをくるくると運動しているバイナリーブラックホールの存在が指摘されはじめています。

バイナリーブラックホールとは、二つのブラックホールが互いの重力で引き合いケプラーの第三法則に従って運動している天体、と定義できます。単一のブラックホールと同様に、質量による分類を行うことができ、星質量、中間質量、巨大質量（巨大）バイナ

* 物理学会誌 2009年9月号「話題」掲載分（2009年4月3日原稿受付）を加筆修正

[†] 短期滞在中：京都大学基礎物理学研究所 Email: hayasakin@astro1.sci.hokudai.ac.jp

リーブラックホールの三種類に分けられます。現在、いずれの質量でもバイナリーブラックホールは見つかっておらず、また、どのように形成され進化してゆくのかもほとんどわかっていません。

近年、あらゆる銀河の中心には、太陽の 10 万倍～10 億倍の質量 ($1 \text{ 太陽質量} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$) を持つ巨大ブラックホールが存在することがほぼ確定しています [1]。一方で、最近、銀河とその中心にある巨大ブラックホールが共に進化しているという観測的な示唆が得られました。これらの示唆に基づくと、発達した銀河の中心には、巨大バイナリーブラックホールが存在する可能性がでてきます。では、それらはどのように形成されるのでしょうか。また、もし存在するとしたら、なぜ観測で検出されていないのでしょうか。以下では、「銀河とその中心のブラックホールとの共進化」という枠組みの中で、巨大バイナリーブラックホールの理論と観測の話を進めます。

1.1 巨大ブラックホール

巨大ブラックホールが存在すると考える観測的根拠は基本的には 2 種類あります。一つは、中心核の非常に狭いところから非常に大量のエネルギーが放射されているというものです。明るさの変動の時間尺度から、明るく光っている領域の上限値をつけることができます。例えば活動銀河核 (AGN) では、その領域のサイズは数十天文単位 (1 天文単位 $\sim 1.5 \times 10^8 \text{ km}$) になります。一方で、明るさの絶対値から中心領域の質量に下限値が与えられ、クェーサーや活動銀河核では太陽の質量の約 1 億倍になります。放射されるエネルギーの大きさから、ブラックホールのような非常に強い重力源に周囲のガスが降着する時に解放される重力エネルギーで光ると考えられています。

もう一つの観測的な根拠は、銀河の中心付近のガスや星の運動です。観測によって、中心からある距離にあるガスや星の速度を同定することができます。それらのガスや星が力学平衡にあると仮定し、さらに質量分布が球対称であると仮定すれば、その半径の内側にある質量を見積もることができます。同定された半径の内側が本当にブラックホールなのかどうか、というところには議論の余地が残されていますが、現在ではそれを疑う人は少なくなってきました。

ここ最近、天の川銀河の中心の巨大ブラックホールをサブミリ波の超長基線電波干渉法 (VLBI) によって直接撮像しようという動きが活発になってきています [2]。直接撮像というのは、ブラックホールの事象の地平面をブラックホール周囲の降着円盤から放射される光に照らされた影として捉えるということです。影の形によって、ブラックホールの時空構造やスピンや電荷が明らかにされるという理論的な予測もなされています [3]。うまくいけば数年以内にサブミリ波 VLBI で事象の地平面を捉えられる可能性があるとのことなので、おおいに期待しましょう*¹。

*¹ 詳細は、本研究会初日講演参照

1.2 巨大ブラックホールと母銀河との共進化

銀河は大きく分けて楕円銀河と渦巻き銀河の二種類に分かれます。渦巻き銀河はバルジと呼ばれる銀河中心部の球状のふくらみとそれを取り囲む円盤部分から構成されます。楕円銀河と渦巻き銀河のバルジは非常に似た特徴を示しており、以下では特に注意がなければ、渦巻き銀河のバルジ部分と楕円銀河の区別をせずに「銀河」として取り扱うことにします。

銀河の質量は、銀河の明るさから求めることができます。一方で、銀河の絶対光度と銀河の速度分散には、相関があることが経験的に分かっています（フェイバー・ジャクソン則 [4]）。実際に、36 天体^{*2}について、ブラックホールの質量とその母銀河の速度分散をプロットすると、驚くべきことに、全ての銀河についてブラックホールの質量は銀河の質量の約 0.2% と非常にコンパクトな値で一致しています（マゴリアン関係 [5]）（図 1）。互いに独立な物理量と考えられていた上に、3 桁も異なる大きさの物理量に相関がある、というのは大変奇妙な話です。

このような相関関係に理論的な説明を与える試みが、現在も色々なされています。その中でも重要な問題が、巨大ブラックホールの起源です。恒星質量ブラックホールは、星の終焉に重力崩壊によって形成されることが分かっています。しかし、太陽の 10 万倍以上の巨大な質量を持つブラックホールがどのように形成されたのかは依然として謎のままです。ゆえにこの巨大ブラックホールの形成問題を、銀河とその中心のブラックホールとの共進化の枠組みで解釈する必要があります。

階層的構造形成シナリオによれば、銀河は小さな塊が合体してできあがったと言えます。そこで、銀河と巨大ブラックホールとが共に進化しているなら、銀河が合体成長するとともに周囲のガスを吸い込みながらブラックホール同士も合体して成長するはずですが、すると、合体する前に、お互いのまわりをまわるバイナリーブラックホールがあると推測できます。しかし、今のところ軌道長半径が 1 パーセク以下の「近接」のバイナリーブラックホールは同定されていません。したがって、このような近接バイナリーブラックホールの存在は、銀河とその中心のブラックホールとの共進化を説明するためのミッシングリンクと言えるのです。

2. バイナリーブラックホールからの放射光

銀河の中心の巨大ブラックホールが単一なのかバイナリーなのかを判別するためには、中心領域から放射される光にそれらを判別するための情報が含まれている必要があります。また、仮に含まれていたとしてもそれらの情報を抽出できるかどうかも吟味しなければなりません。単一なのかバイナリーなのかを判別する方法の一つに、放射光に周期性が

^{*2} 現在では 76 天体について調査されています [6]。

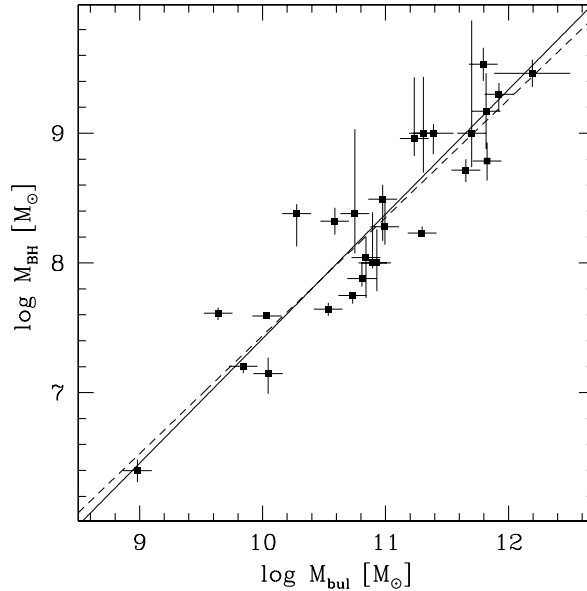


Fig. 1. ブラックホール質量と銀河 (バルジ) 質量の相関図 [7]。サンプルは近傍銀河の 27 天体。縦軸はバルジ質量、横軸は中心の巨大ブラックホール質量を表示。両軸とも対数軸。実線と点線は、最小二乗法による近似曲線と線形回帰曲線。

あるかどうかを見るということが考えられます。

2.1 三重円盤モデル

例えば、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ます。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ます。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、何が起こるのでしょうか。バイナリーブラックホールは回転しているため、二つのブラックホールが銀河の中心の 1 パーセク以内まで接近する間に、その周囲のガスに角運動量を与えて、バイナリーを囲う巨大なガス円盤 (外周円盤) が形成されると考えられています。

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の相互作用を調べました。外周円盤とバイナリーブラックホールは潮汐-共鳴相互作用をします。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ました [8] さらに、質量輸送による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) となることが分かったのです [9]。

図 2 は、三重円盤系の想像図です。中心に二つのブラックホールがあり、個々のブラックホールの周囲に降着円盤があります。そして、それらを取り囲む外周円盤から個々の降着円盤に対してガスが渦をまくように流れ込み、降着円盤からはブラックホールへとガス

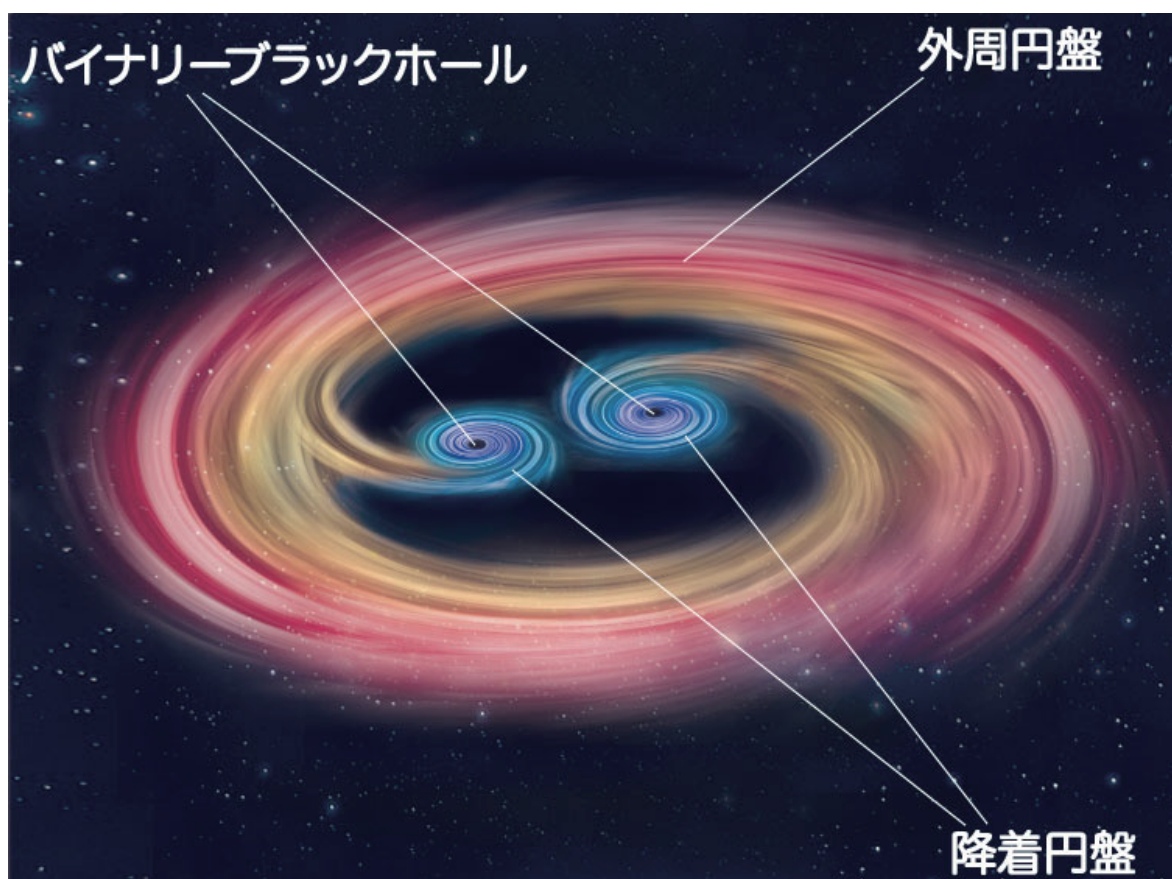


Fig. 2. 三つのガス円盤を伴うバイナリーブラックホールの想像図 [10]。個々のブラックホールの周囲に形成される降着円盤と、それら全体を取り巻く外周円盤から形成される。

が落ち込んで行きます。

2.2 降着円盤からの放射光

図2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ぐるぐると回ります。すると、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考えられます。そこで、降着円盤からの放射光を詳細に調べるために、外周円盤からの質量輸送を境界条件として置くことで、降着円盤に焦点を絞った高解像度のシミュレーションを行いました [9]。

軌道運動の情報とは、端的にいえば放射光が周期的に変動する、ということです。一見すると、あらゆる波長の光が周期的に変動すると思いがちですが、シミュレーションによって、そう単純ではないことが分かったのです。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りま

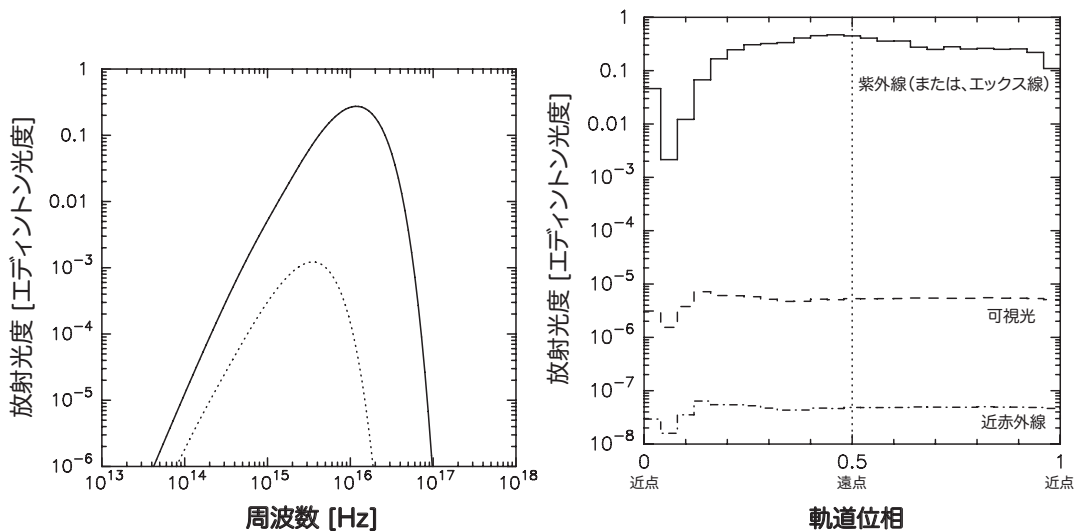


Fig. 3. 最も温度が高い軌道位相 (実線) と最も温度が低い軌道位相 (点線) における降着円盤のスペクトルエネルギー分布 (左図) と、降着円盤からの軌道位相平均した放射光度曲線 (右図) [9]。

した (図 3)。

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ます。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す。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です。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、降着率の関数となります。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す。

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でしょうか。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ます [8]。ところが、ブラックホールの周囲には既に降着円盤があります。な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きます。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に変動する、というわけです。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分かったのです。

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す。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します。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普遍的な性質を示していると言えます [9]。

3. 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きます。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ります。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ります [12]。この問題は、「ファイナルパーセク問題」と呼ばれ宇宙物理学上で重要な未解決問題の一つとされています。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ります。ところが、先のマゴリアン関係 (1.2 参照) 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ます。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ます。

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ます [13, 14]。しかしここでは、等質量のバイナリーブラックホールがガスとの相互作用によってエネルギーや角運動量が散逸して、軌道長半径が短くなるというお話をします。

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、一つのモデルを仮定します。それが、我々の提案する三重円盤モデルです。このモデルを導入すると、ファイナルパーセク問題というのは、角運動量輸送問題に帰着されます。詳細な計算は省きますが、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たものになります [10]。

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のようになります。この図は、ブラックホール同士の距離が100パーセクからサブミリパーセクまで進化する間に、バイナリーブラックホールとしての滞在時間がどの程度かを表わしています。この図によれば、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が分かります。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ます [10, 11]。

実際に観測にかかる軌道長半径は、周期が10年以下のバイナリーブラックホールであるので、図4に示されている a_{\max} から a_d の間であると考えられる。 a_d より小さな軌道長半径では、外周円盤からの質量輸送が起こらないために本文で述べた機構による周期変動性は見られないと予想できる。この先どのような進化を経て合体するのは、一般相対論的な考察も必要になってくるでしょう。今後の研究が望まれます。

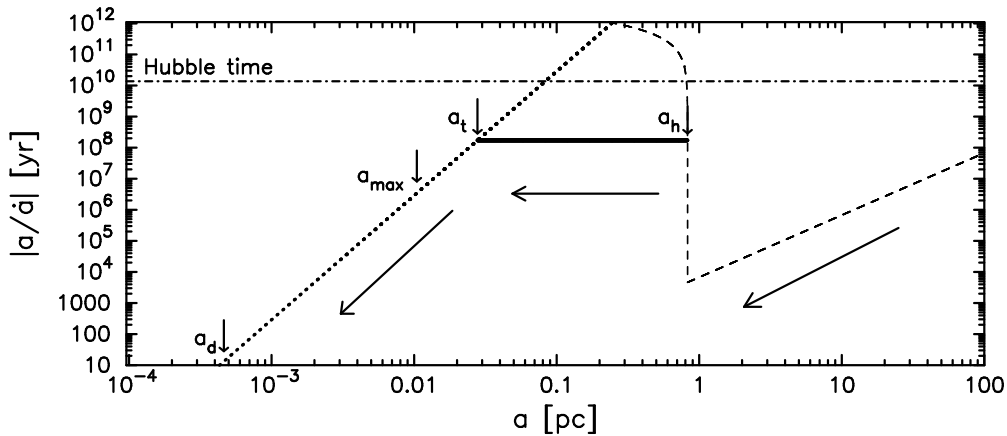


Fig. 4. 巨大バイナリーブラックホールの進化の道筋：横軸は二つのブラックホール間の距離： a 、縦軸はバイナリーブラックホールの進化の時間尺度： a/\dot{a} 。等質量バイナリーブラックホールで、ブラックホールの総質量は $10^8 M_\odot$ 。破線は、力学的摩擦による角運動量損失によって二つのブラックホールが近づいて行く道筋。点線は、重力波の放出によるエネルギー・角運動量損失によって軌道長半径が縮む道筋。実線はガス円盤との相互作用による散逸によって収縮する新しい進化の道筋。点破線は、宇宙年齢（ハッブル時間 $\sim 1.37 \times 10^{10}$ [yr]）を、三つの矢印は進化の方向を示している。 a_h はバイナリーブラックホールの硬化半径。ここで星の平均の運動エネルギーと単位質量あたりのバイナリーの束縛エネルギーがつりあう。 a_t は遷移半径。ここで、ガス円盤優勢進化のフェーズから重力波放射優勢進化のフェーズへと遷移する。 a_{\max} は、軌道周期が10年に相当するバイナリーの軌道長半径を表す。 a_d は剥離半径。ここで、外周円盤内縁とバイナリーが切り離され、バイナリーは外周円盤と重力相互作用できなくなり二重円盤系となる [10, 11]。

4. 観測に向けて

現在考えられる観測機器を想定すると、バイナリーブラックホールを検出するための最も簡単な方法は、その周期性を確定することです。一般に、連星のように周期的に軌道運動する天体の周期を明確に同定するためには、2、3周期計測する必要があります。今、二つのブラックホールの距離が0.1パーセクとすると、軌道周期はざっと見積もると300年であり、同定するための計測時間は約1000年程度必要であり、当然ながら現実的ではありません。人間のライフタイム（人生）を思うと、軌道周期が10年以下のバイナリーブラックホールをターゲットにするという段取りになります。では、実際にそのような周期の短いバイナリーブラックホールの候補天体（図4中の a_{\max} から a_d までの間の軌道長半径を持つバイナリーブラックホール候補天体）は存在するのでしょうか。

AGNの中でもブレーザーと呼ばれる一群に分類される OJ287 という天体があります。この天体は100年間以上に渡って約12年周期でバースト現象を起こしていることが観測で分かっており [15]、現在バイナリーブラックホールの候補天体として筆頭的な存在です

が、可視光のアウトバーストであることから、ジェットの周期運動を見ているという向きもあり、周期性が本当にバイナリー起源かどうかは議論の余地が残ります。また、周期性を同定するための3、40年という年月は、研究者としての寿命の大部分を注がなければならず、決して経済的とは言えません。他にも、ブレーザーであるがゆえにブラックホールの質量を独立に同定できない等、多くの問題を抱えており、議論が分かれています [16]。そこで、より軌道周期が短くバイナリーブラックホールの探査が可能で、かつ、エクス線のようにブラックホール近傍から放射されるような高エネルギー波長での観測が望まれています。

今年の6月に打ち上げ予定の全天エクス線監視装置 (MAXI)^{*3} [17] は、国際宇宙ステーションに搭載され、地球軌道を周回しながら、全天をスキャンしてエクス線源を探査する装置です。その視野の広さから、時間変動するエクス線源の探査に適しています。MAXIの稼働時間は最大2年(プラス3年の計5年というオプションあり)であると言われていています。

三重円盤モデルによれば、降着円盤の高温側では激しく変動し、低温側ではほとんど変動しないということが分かりました。MAXIで、高温側の変動性が同定されれば、それがモデルの検証の第一歩となります。降着円盤の低温側での変動性を確認するために、近赤外線や可視光によるフォローアップ観測、すなわち、同じ天体を捉えて同じ軌道位相で、高温側の変動性と低温側の変動性を比較検討する必要があります。

また、観測によって仮に前向きな結果が得られたとしても、AGNでは、一般に中心領域からジェットを放射しており、降着円盤の放射特性とジェットの放射特性との切り分けができなければなりません。このように、問題は山積していますが、一つ一つクリアしていけば、三重円盤モデルの検証を通してバイナリーブラックホールの同定が可能であると考えています。

5. おわりに

宇宙にある数多くの銀河の中心が単一なのかバイナリーなのかを判別することは、宇宙の階層的構造形成シナリオの検証や巨大ブラックホールの起源を探る上で非常に重要な問題です。しかし、現状の観測技術や理論の進捗状況を思うと、非常に挑戦的な課題であるとも言えます。この分野は開拓されたばかりであり、果てしない荒野が広がっています。我々は、多くの挑戦者、参入者を待っています。そして、この宇宙にバイナリーブラックホールが当たり前前に存在すると思われる日々を夢見て研究にいそんでいます。

謝辞 京都大学基礎物理学研究所在籍時に公私ともに支えていただき、ご指導くださった京都大学大学院理学研究科嶺重慎教授、本研究のきっかけを与えてくださった北海道大学理学部兼古昇名誉教授、大学院入学時から現在まで、多岐に渡る支援及びご指導を

^{*3} 実際には、約1ヶ月遅れの2009年7月16日に打ち上げ成功した。

してくださった北海道大学大学院理学研究院藤本正行教授、北海学園大学岡崎敦男教授、公私ともに著者を叱咤激励してくださった北海道大学大学院工学研究科丹田聡教授、浅野泰寛講師に対し、この場をお借りして心から感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Kormendy, J., & Richstone, D, 1995, ARA&A, 33, 581
- [2] Doeleman, S.S., et al., 2008, Nature, 455, 78
- [3] Takahashi, R., 2004, ApJ, 611, 996
- [4] Faber, M.S., & Jackson, R.E, 1976, ApJ, 204, 668
- [5] Magorrian, J., et al., 1998, AJ, 115, 2285
- [6] Graham, A.W., 2008, PASA, 25, 167
- [7] Marconi, A., & Hunt, L.K, 2003, ApJL, 589, 21
- [8] Hayasaki, K., Mineshige S., & Sudou H, 2007, PASJ, 59, 427
- [9] Hayasaki, K., Mineshige, S., & Ho, C. Luis, 2008, ApJ, 682, 1134
- [10] Hayasaki, K, PASJ, 2009, 61, 65
- [11] Hayasaki, K., Ueda, Y., & Isobe, N, arXiv:1001.3612
- [12] Begelman, M.C., Blandford, R.D., & Rees, M.J, 1980, Nature, 287, 307
- [13] Merritt, D., & Milosavljević, M, 2005, Living Rev. Relativity, 8, 8
- [14] Matsubayashi, T., Makino, J., & Ebisuzaki, T, 2007, ApJ, 656, 879
- [15] Sillanpää, A., Haarala, S., Valtonen, M., Sundelius, B., & Byrde, G.G, 1988, ApJ, 325, 628
- [16] Valtonen, M. J., et al., 2008, Nature, 452, 851
- [17] Matsuoka, M., et al., 2009, PASJ, 61,999

早崎 公威 (非会員) 〒060-0810 札幌市北区北 8 条西 10 丁目

北海道大学工学部応用物理学科卒 (1999 年)。北海道大学大学院理学研究科物理学専攻博士課程修了 (2004 年)。理学博士。北海道大学院工学研究科 COE 研究員、京都大学基礎物理学研究所非常勤研究員を経て、現在、北海道大学大学院理学研究院学術研究員。専門は、ブラックホール天文学 (理論)。