

# 銀河中心の巨大ブラックホールの影

高橋 芳太

〈東京大学大学院総合文化研究科広域システム科学系宇宙地球科学 〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1〉

e-mail: rohta@provence.c.u-tokyo.ac.jp

近年の干渉計技術の目覚ましい進歩により、将来、数十マイクロ秒角から数百ナノ秒角 (!) という超高分解能の観測が実現されると考えられている。このような超高分解能観測装置により、銀河中心に存在すると予想されている巨大ブラックホールがイメージとして直接観測されることが期待されている。銀河中心に存在すると考えられているブラックホールはブラックホールに流入する降着流中で生成される光子の中の影として観測される。ブラックホールの直接観測は強重力場での一般相対性理論の検証・ブラックホールの実存性の確認につながるなど、それ自体でもたいへん興味深いのであるが、その先にはさらに豊富なサイエンスが存在する。そのようなサイエンスとして、まずブラックホールの物理量 (質量・スピン・電荷) の決定が挙げられる。この直接観測による方法はモデル依存性が少ないために、決定的なブラックホールの物理量の測定方法となりうる。

## 1. 見かけの大きいブラックホール候補天体

ブラックホールをイメージとして直接撮像するという考えは、今から 10-30 年以上前に Cunningham, Bardeen, Lunin, 福江, 横山らのパイオニア的な研究<sup>1)4)</sup>により提案された。その当時は、おそらく具体的な観測計画がなかったために、純粹に理論的な研究として行われていたのであるが、近年、ブラックホールの直接撮像の可能性を秘めた観測計画が複数立ち上がっている。具体的な観測計画に話を移す前に、直接撮像を考えた場合のブラックホールの候補天体について概観してみよう。

まず、われわれから見た場合に見かけの重力半径<sup>\*1</sup>の大きさが最も大きいブラックホール候補天体として Sgr A\* が挙げられる。この天体はわれわ

れの銀河中心に存在し、距離 8 kpc, ブラックホールの質量は  $\sim 2 \times 10^6$  太陽質量程度と見積もられているので、見かけの重力半径の大きさは 3.2 マイクロ秒角程度である。次に、大きいのはおとめ座銀河団中心に存在する楕円銀河 M87 の中心にあるブラックホール候補天体である。このブラックホール候補天体の場合、見かけの重力半径は約 2.2 マイクロ秒角である。ブラックホールの影の大きさはブラックホールのスピンや傾き角、降着流の最内縁の位置によって決まるほか、観測波長域でのブラックホール周りの降着流の光学的深さにも依存し、あとで述べるように、その大きさはだいたい重力半径の 4 から 15 倍の間の大きさ程度と計算される。よって、上に挙げた二つのブラックホール候補天体の影の大きさは最大で、Sgr A\* の場合には約 48 マイクロ秒角、M87 の場合には約 33 マイクロ秒角程度になる可能性がある<sup>\*2</sup>。

\*1  $GM/c^2$  と定義する。シュバルツシルト半径の 1/2 である。

\*2 ほかに、3C66B という対をなすブラックホールの候補天体が提案されており、Sgr A\* よりも見かけのサイズが大きい可能性があるが、パルサー・タイミング観測により対をなす超巨大ブラックホールの可能性は否定されている<sup>5)</sup>。

## 2. 近未来の超高分解能干渉計

超高分解能の観測を実現すると考えられている干渉計としては電波干渉計と X 線干渉計がある。まず、電波干渉計についてであるが将来のスペース VLBI (Very Long Baseline Interferometer) 計画の一つである VSOP-2 計画 (宇宙科学研究本部)<sup>\*3</sup> により、観測振動数 43 GHz で 38 マイクロ秒角という前人未到の分解能が実現されると考えられている。この VSOP-2 計画は、過去に超高分解能観測の実績を残してきた VSOP 計画の後継計画であり、技術的に実現される可能性は極めて高いと考えられる。しかも、近未来にである。

一方、NASA の将来計画 “BEYOND EINSTEIN”<sup>\*4</sup> の一部として X 線干渉計 MAXIM が計画されており (現時点では 2025 年打ち上げ予定)、300 ナノ秒角程度の超高分解能観測を目指している。この分解能では M87 のブラックホールは影のサイズの 100 分の 1 以下の分解能で分解できることになるので、ブラックホールの影だけでなく周囲の降着流の輝度分布などもかなり詳細に観測されるであろう。

これらの計画で超高分解能の観測が実現されるのであるが、実はわれわれの銀河中心 Sgr A\* のブラックホールを直接観測することはできないと考えられている。理由は、VSOP-2 の 43 GHz 帯では電子プラズマによる星間散乱のため<sup>6)</sup>、MAXIM の軟 X 線領域ではダストによる散乱のために Sgr A\* の中心部分のイメージが著しくぼかされていると考えられるからである。実際に、両計画共に Sgr A\* ではなく、見かけの大きさが次に大きいブラックホールをもつ M87 を観測ターゲットとして挙げている。

われわれの銀河中心 Sgr A\* のブラックホールはどの波長域で見ればよいのであろうか? 結論からいうと、サブミリ波領域と硬 X 線から TeV

以下の  $\gamma$  線領域である。この 2 領域が光学的に薄い周波数帯である。電波領域は電子プラズマによる散乱やシンクロトロン自己吸収、赤外から軟 X 線領域ではダストによる散乱、高い周波数の  $\gamma$  線領域では  $\gamma$  線光子と赤外光子との対消滅により、ブラックホール近傍のイメージは著しくぼかされていると思われる。というわけで、われわれの銀河中心のブラックホールを直接観測しようと思うならば、サブミリ波又は硬 X 線から  $\gamma$  線で数十マイクロ秒角以上の超高分解能観測装置が必要となる。実際、国立天文台の三好 真らのグループによりサブミリ波 VLBI が提案されており、今後の進展が楽しみである<sup>7)</sup>。

## 3. 光学的に薄い降着流中のブラックホールの影

銀河中心の巨大ブラックホールはどのように見えるのだろうか? ブラックホールの見え方を理解するためには、まずブラックホールの周囲で光

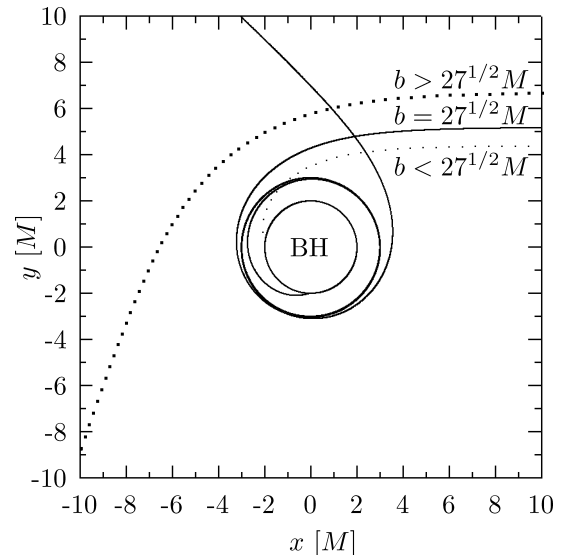


図1 回転なしのブラックホールの周囲での無限遠で平行光線である光の軌道。

\*3 <http://www.vsop.isas.ac.jp/vsop2/>

\*4 <http://universe.gsfc.nasa.gov/>

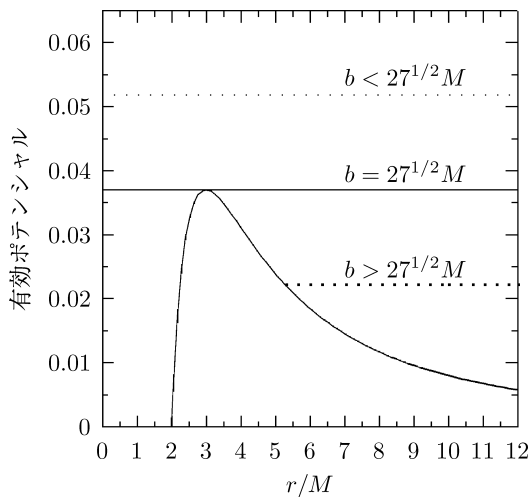


図2 回転なしのブラックホール（シュバルツシルト・ブラックホール）の有効ポテンシャルと3タイプの光の軌道. 分類は図1に対応している.

の軌道がどのように振舞うのかを理解する必要がある. 図1は回転しないブラックホールの周囲での光の軌道の例である. 衝突係数により, ブラックホールに落ち込む軌道, ブラックホールに落ちずに無限遠から無限遠につながる軌道, この2タイプの境界をなす軌道, の3タイプに分類され

る. 境界をなす軌道の光子はブラックホールの周囲を回り続ける. 図2はこれらの軌道とブラックホールによる有効ポテンシャルを示したものである. 図1に対応する3パターンの軌道に対応する平行線も示してある. 線種は図1と対応している. ポテンシャルの壁を越える軌道がブラックホールに落ち込む軌道である. 光学的に薄い物質中でのブラックホールの見え方はこれらの軌道により決められる.

図3は光学的に薄い降着流中のブラックホールの影のイメージである<sup>8)</sup>. 左の完全な円形の図は, 回転していないブラックホール（シュバルツシルト・ブラックホール）の影である. 右の少し縦長になっている方は回転するブラックホール（カー・ブラックホール）の影である. まず, 左の回転していない場合に注目しよう. この図は, ブラックホールの周囲に光子を放出する一様な降着流を仮定している. 簡単のため, 光子を放出しているのであるが吸収・散乱が効かない光学的に薄い状況を仮定している. ブラックホールの影で暗く表示されている部分からも光はきているのであるが, その部分はきている光の量が最も少ない部分なのでわざと暗く表示させている. 光子を生成する降

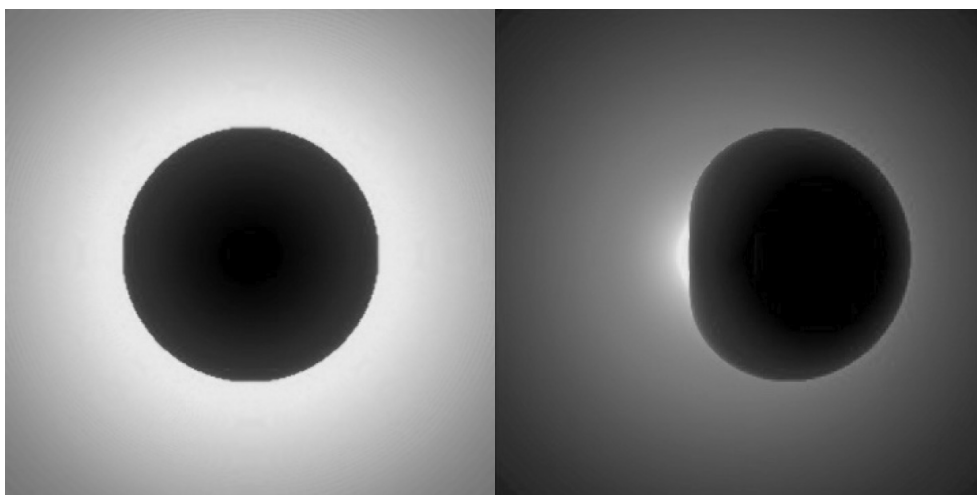


図3 光学的に薄い降着流中のブラックホールの影: 回転なしのブラックホールのイメージ (左図), 最大回転するブラックホールを回転軸に対して垂直な方向から見たイメージ (右図).

着流は、ブラックホールの近傍で広く分布していると考えられるので、ブラックホールは図3のように光の量が周囲と比べて相対的に少ない領域、つまり暗い領域として観測される。この光子の量が少ない領域は表示の仕方によっては明るい降着流中の影のように見える。われわれに届く光の量はその光の経路に沿って足し合わされた光の量で決まる。空間中の光の放射率が一樣であるならば経路が長い部分で、光の量が多くなる、つまり中心に比べて明るく見える。

ブラックホールから遠方の観測者に平行光線として届く光の軌道は図1と図2で説明したように3タイプに分類される。ブラックホールにつながる軌道はブラックホールに落ち込まず無限遠から無限遠に続く軌道と比較して軌道の長さが短い。しかも、重力赤方偏移によってブラックホール近傍からの光は非常に暗く見える。よって、ブラックホールに落ち込む軌道と落ち込まない軌道では、落ち込む軌道に相当する部分の方が相対的に暗く見える。一樣に光源が分布していること、軌道が短いこと（軌道に沿って積分される光子量が少ないこと）、重力赤方偏移の効果により相対的に暗く見えるのである。よって、図3のブラックホールの影の輪郭は、ブラックホールに落ち込む軌道と落ち込まない軌道の境界の軌道に相当する部分であることになる。

#### 4. ブラックホールの回転の効果

以上はブラックホールが回転していない場合であったが、図3の右図にブラックホールが回転している場合のイメージを示してある。これは、最大回転するブラックホールを回転軸に垂直な方向から見た場合の図である。影の位置・形状が回転していない場合と明らかに異なる。これはどのように理解されるのであろうか？上で説明したように、光学的に薄い状況では影の輪郭は光の軌道の性質によって決められていた。図4に回転するブラックホールの赤道面上での光の軌道をいくつ

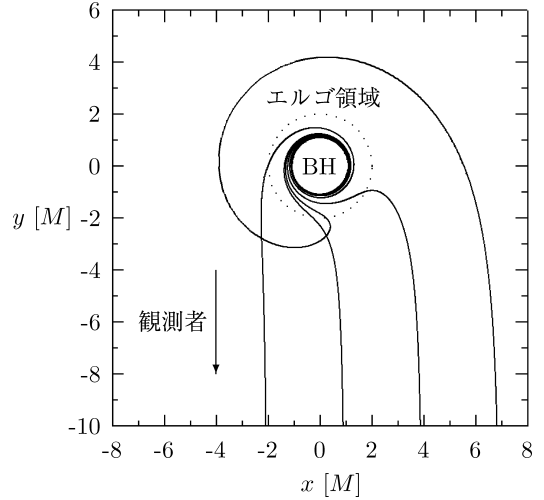


図4 最大回転するブラックホールの周囲の赤道面上の光の軌道。

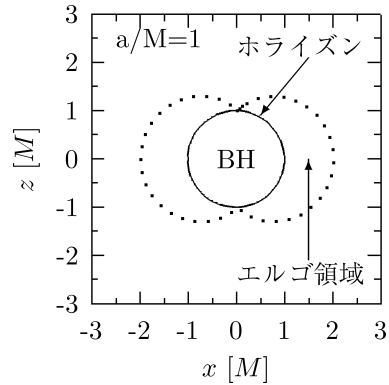


図5 回転するブラックホールの周りのエルゴ領域。

か示した。ブラックホールが回転している場合には、周りの時空をブラックホールの回転方向に引きずる効果が現れる。この時空の引きずりの効果により、光の軌道がブラックホールに一方に巻きついているようになっているのがわかる。この時空の引きずりの効果はエルゴ領域と呼ばれる部分で特に激しいのであるが、この領域の外でも引きずりの効果は効く(図5)。具体的には、ブラックホールの回転による時空の引きずりの角運動量はブラックホールのスピンの比例し、中心からの距離の3乗に反比例する。特に、時空の引きずり

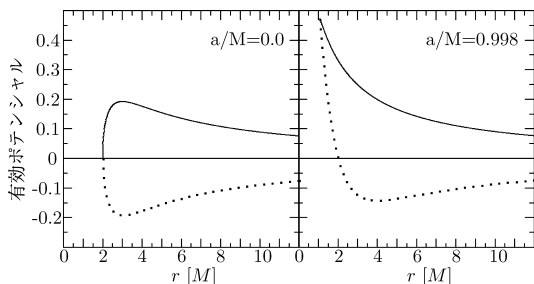


図6 赤道面上の光子軌道に対する有効ポテンシャル: 回転していない場合 (左), 最大回転している場合 (右).

の効果はブラックホールから離れると急激に弱くなる。

図4からわかるように、時空の引きずりの効果があるとブラックホールの角運動量と同符号の角運動量をもつ光子と逆符号の角運動量をもつ光子の軌道の対称性がなくなる。このことは図6に示した有効ポテンシャルからも判断できる。図6の左図は回転がない場合、右図は最大回転している場合の赤道面での有効ポテンシャルである。ブラックホールと同符号の角運動量をもつ光子と逆符号の光子とで有効ポテンシャルがことなる。これを上下の図で表している。この図より光子がブ

ラックホールに落ち込むか落ち込まないかの境界となる軌道の衝突係数が異なることがわかる。

このことは、ブラックホールの影の見え方にも現れている。ここで、図3の左図のブラックホールが最大回転している場合の影のイメージに戻る。今、説明したように光の軌道がブラックホールに引きずられる効果により、ブラックホールの影の左右の対称性がなくなり、影の輪郭の一方はブラックホール近くに位置し、他方は相対的にブラックホールから遠いところに位置するようになる。このことから、もし光学的に薄い波長でブラックホールの影を観測することができれば、影の形状からブラックホールのスピンを測定することが可能となる。

### 5. 光学的に厚く幾何学的に薄い降着円盤中のブラックホールの影

図7は、光学的に厚く幾何学的に薄い降着円盤を仮定した場合の降着円盤中心のブラックホールの影のイメージである。回転していないブラックホールでのこのようなイメージは、Luminet<sup>3)</sup>や福江 純ら<sup>4)</sup>により得られた。図7では、降着円盤の光っている部分の最内縁を marginally stable

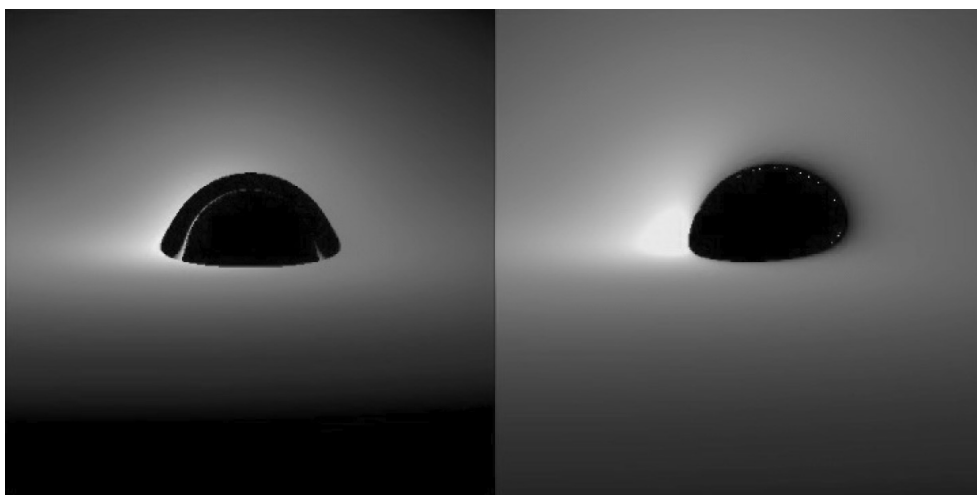


図7 光学的に厚く、幾何学的に薄い降着円盤中心に見えるブラックホールの影のイメージ: 回転なしのブラックホール (左図), 最大回転するブラックホール (右図).

orbit としている. 左図は回転していない場合, 右図は最大回転している場合である. 両方とも無限遠の観測者の方向とブラックホールの回転軸のなす角度が 80 度の場合のイメージである. 回転なしのブラックホールの場合には, 降着円盤の最内縁が作る影の輪郭の内部に, ブラックホールの周りを周回する軌道に対応する部分が見える. 最大回転するブラックホールの場合には, 円盤最内縁がブラックホールのホライズンに対応するので, 周回軌道に対応する部分は見えない.

輪郭の形状はブラックホールのスピン, 傾き角, 降着円盤の最内縁によって決められる. 影の輪郭は, 楕円関数を用いて解析的に書くことができる. 大雑把に言うと, ブラックホールの回転により影の位置・形が非対称になり, 傾き角が影の形の扁平さ(円形からの)を決め, 降着円盤の最内縁の位置が影のサイズを決める<sup>9)</sup>.

ブラックホールのサイズがどのようにスピン・傾き角・円盤の最内縁の位置に依存するのかを図

8 にまとめた. 降着円盤の最内縁が marginally stable orbit の場合(実線), 最内縁が事象の地平線の場合(点破線), 図 3 のように光学的に薄い降着流の場合(点線)を考えている. 線の太さの違いは傾き角の違いを示している. 降着円盤の光っている部分の最内縁の位置がどこにあるのかは未解決な問題であるのだが, 最内縁の位置がわからない場合でも降着円盤が軸対称であるという過程を認めれば, 影の輪郭の形状・サイズからもブラックホールのスピンの決められることがわかっている. 影のサイズや輪郭を決める物理量はいくつか存在するのであるが, 影の非対称性を生み出すのはブラックホールの回転による時空の引きずりの効果のみであるので, 光学的に薄い場合と同じようにスピンを決めることができる.

## 6. ブラックホールの電荷の測定

ブラックホールの物理量はスピンのほか, パラメーターとしてなら電荷もちうる. 実際の宇宙にあるブラックホールの周囲の降着流中には, 両方の電荷の粒子が存在しているので, 一方の電荷をブラックホールが担ったとしてもすぐに逆電荷の粒子を選択的に吸い込み電荷的に中性になると考えられる. 現実の宇宙に存在するブラックホールは電荷的に中性であると予想される. しかし, 観測的に電荷的に中性であることを確かめた例は存在しないばかりか, それを確かめる方法すら提案されていなかった. ブラックホールの影のイメージからブラックホールの電荷量も決めることができる. ブラックホールが電荷的に中性である場合には, 中性であるということを確認することができ, 万が一, 帯電していた場合にも電荷量を見積もることが可能である. 図 9 に同じスピンをもつブラックホールで, 電荷をもった場合と電荷をもっていない場合のブラックホールの影の輪郭を示した. ブラックホールが電荷を担うと, 相対的にサイズが小さくなり, さらに縦長になる. 電荷をもつとサイズが小さくなるのはホライズンの

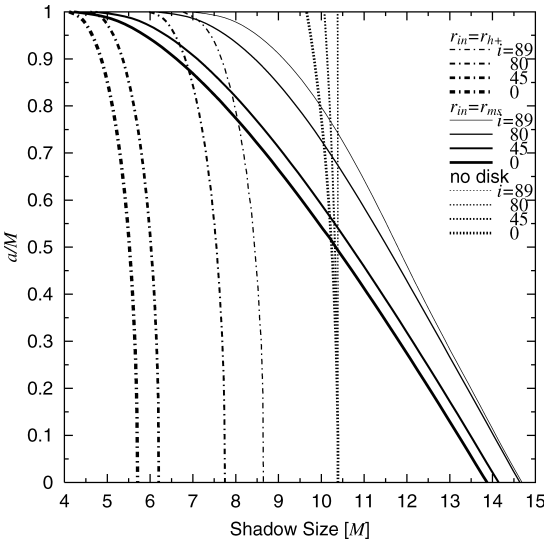


図 8 降着流中のブラックホールの影の最大幅サイズ: 光学的に厚く幾何学的に薄い円盤で最内縁が marginally stable orbit の場合(実線), 同じく最内縁がブラックホールのホライズンの場合(点破線), 光学的に薄い降着流の場合(点線).

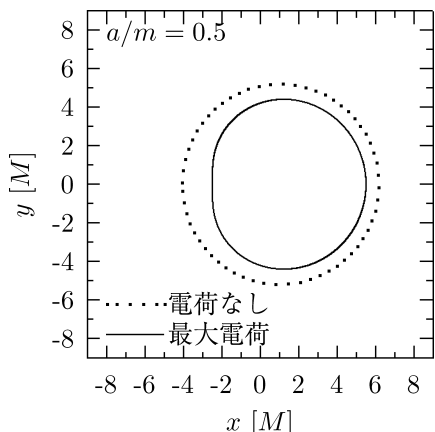


図9 光学的に薄い降着流中のブラックホールの影に対するブラックホールの電荷の効果: 電荷なしの場合(点線), 最大電荷の場合(実線). スピンは共に0.5で傾き角は90度. 電荷の効果により, 影のサイズが小さくなるとともに縦長になる.

サイズが小さくなるからであり, 縦長になるのは中心ほど時空の引きずりの効果が大きいからである. 電荷をもつとホライズンが小さくなるのは, 質量の担うエネルギーが電荷の担うエネルギーに対して相対的に小さくなるからである. この輪郭を記述する解析的な式も得られており, 他の物理量と縮退することなく電荷量も影の輪郭から決められることが示されている<sup>10)</sup>.

## 7. 残された課題

今まで記述してきた話は, 影の輪郭に焦点をあてていたが, ブラックホールの影の近傍の降着流の見え方に関する研究もいくつかなされている<sup>11)-13)</sup>. また, 以上で計算してきたブラックホールの影は, かなり単純化した降着流中の影である. 光学的に薄い波長が存在する場合には, その波長で図1のような影の輪郭が見えるであろう. しかし, 光学的に厚い波長で見える場合には, 現実の降着流は厚さをもつであろうし, 観測する波長やブラックホールへの質量降着率によっては光学的に薄い部分と厚い部分が空間的に混在している

と思われる. そもそも, ブラックホールの周りは3次元的に何らかの物質が分布していると考えられる. よって, 現実のブラックホールの影がどのように見えるかを調べるには現実的な降着流モデルを用いて計算するのが望ましい. 基礎物理過程をすべて考慮し, かつ現在までのブラックホール候補天体の観測を全て説明する降着流モデルは残念ながら現時点では存在しない. しかし, 現象論的に観測結果を説明する降着流モデルは存在する. 将来の干渉計での観測ターゲットとなっている Sgr A\* や M87 中心のブラックホールは低輝度で質量降着率の小さい降着流の中に存在することが観測的にわかっている. これらの降着流は, ADAF (Advection Dominated Accretion Flow)<sup>14)</sup> と呼ばれる降着流や, ADAF も含んだより広い意味での低輝度・低質量降着流である RIAF (Radiatively Inefficient Accretion Flow)<sup>15)</sup> と呼ばれる降着流でスペクトルや偏光などの観測が説明されている. これらの降着流の中で光の測地線に沿った輻射輸送方程式を解くことにより, より現実的なブラックホールの影のイメージを計算できる. 実際に筆者, 大須賀 健 (立教大), 嶺重 慎 (京都大) らの計算により, より現実的な降着流中の輻射輸送計算による基本的なイメージは作成されている. しかし, 現象論的に観測結果を説明する ADAF や RIAF モデル自体の欠陥も指摘されており, 改良の余地があると考えている<sup>16)</sup>. 特に, 今回注目しているブラックホールの超近傍付近の降着流に関する研究の必要性は今後高まっていくであろう. よって, 現実的な状況でのブラックホールの影の近傍のイメージを計算することや, そのような計算によりどのようなサイエンスができるのか, などは将来的に研究すべき課題であると考えている.

## 謝 辞

この研究は, 筆者がまとめた博士論文の一部のもとに作成したものです. 指導教官である嶺重

慎教授（京都大学）には、学部時代から多大なご指導をいただきました。京都大学基礎物理学研究所の方々、（同）宇宙物理学教室の方々、（同）天体核教室の方々ほか、多くの方々に多大なご尽力、ご助言をいただきました。また、平林 久教授（JAXA）、井上 允教授（国立天文台）、三好真主任研究員（同）、亀野誠二主任研究員（同）をはじめとする方々から夢のような観測計画のお話を聞かせていただくことが、研究を行ううえでの大きな原動力になりました。本研究を遂行するにあたり、京都大学 21 世紀 COE プログラム「物理学の多様性と普遍性の探求拠点」および独立行政法人日本学術振興会から援助を受けています。

### 参考文献

- 1) Cunningham C. T., Bardeen J. M., 1972, ApJ 173, 137
- 2) Bardeen J. M., 1973, in Black Holes, ed. C. DeWitt and B. S. DeWitt (New York: Gordon and Breach), p. 215
- 3) Luminet J.-P., 1979, A&A 75, 228
- 4) Fukue J., Yokoyama T., 1988, PASJ 40, 15
- 5) Jenet F. A., Lommen A., Larson S. L., Wen L., 2004, ApJ 606, 799
- 6) Falcke H., Melia F., Agol E., 2000, ApJ 528, L13
- 7) Miyoshi M., Kameno S., Ishitsuka J. K., Shen Z.-Q., Takahashi R., Horiuchi S., 2004, ALMA Memo Series, 499
- 8) Takahashi R., 2005, Ph.D. thesis, Kyoto University
- 9) Takahashi R., 2004, ApJ 611, 996

- 10) Takahashi R., 2005, PASJ 57, 273
- 11) Bromley B. C., Melia F., Liu, S., 2001, ApJ 555, 83
- 12) Fukue J., 2003, PASJ 55, 155
- 13) Watarai K., Ohsuga K., Takahashi R., Fukue J., 2005, PASJ 57, 513
- 14) Kato S., Fukue J., Mineshige S., 1998, Black-Hole Accretion Disks (Kyoto: Kyoto University Press)
- 15) Yuan F., Quataert E., Narayan R., 2003, ApJ 598, 301
- 16) 嶺重 慎, 2005, ブラックホール天文学入門 (裳華房)

### Shadow of Black Hole in Accretion Flow

Rohta TAKAHASHI

*Department of Earth Science & Astronomy,  
Graduate School of Arts and Sciences, University  
of Tokyo, 3-8-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo  
153-0041, Japan*

Abstract: Thanks to the revolutionary progress in the technique of the interferometry, there emerges the possibility of resolving the black hole in the galactic center in near future. The black hole in the galactic center is seen as a shadow in the accretion flow plunging into the black hole. From the images of the black hole shadows, the physical parameters of black holes, i.e. mass, spin and charge, can be determined without degeneracies between these parameters.