

見えない影が現れた

福江 純

〈大阪教育大学 〒582-8582 大阪府柏原市旭ヶ丘 4-698-1〉

e-mail: fukue@cc.osaka-kyoiku.ac.jp



ブラックホールシルエットのカラー写真を激写した 1988 年以来、苦節(?) 20 年、2009 年の春季年会ではついに企画セッションが開かれる時代になった(嬉)。生きててよかった(笑)。本稿では、ブラックホールシルエット/シャドウにまつわる歴史をとりまとめ、最近の進展を紹介し、今後 20 年の方向性をもたらしたい(望)。

1. シルエットとシャドウ

企画セッションでの講演を依頼するメールが三好さんから届いたのが 2008 年 10 月始めで、ブラックホールシルエットのレビューを行うことになった。ただ、レビューだけでは少し物足りないので、“天体は見た目が 10 割”主義に従って、春の学会に向けて相対論的運動体の観測的な見え方についての計算も開始することにした。しかし準備を始めると、あれよあれよと言う間に内容が膨らんで、まゝ、最終的に、この記事までたどり着いた次第だ。

という経緯で、本稿では、ブラックホールシルエットとブラックホールシャドウの歴史をまとめてみたい。なお、“シルエット (silhouette)”と“シャドウ (shadow)”の使い分けだが、ここでは、歴史のないきがかかり上、光学的に厚い降着円盤がある場合を“シルエット”，ない場合を“シャドウ”と呼んでいる。

またスペクトルや光度曲線についても多くの研究があるが、それらはテキストリを見てもらうこととして、ここでは画像があるものに絞ってレビューしていく。以下、2 節で準備として光子半径と射影半径を説明し、3 節でこれまでの歴史を振り返り、4 節で最近の進展と今後の方向性を検討する。5 節はおまけである。

2. 光子半径と射影半径

ブラックホールの周りでは光線が曲げられ、しかも曲がる程度はブラックホールに近いほど大きい(図 1)。そこで、円周方向に光線を発射すると、発射位置がブラックホールに近づくにつれて光線はブラックホールのほうに曲げられ、ついには、発射した光線がブラックホールの周りをぐるりと回って発射位置まで戻ってくるという、とんでもない事態が起こる。

円周方向に発射した光線が時空の曲がりに沿って進みもとの位置に戻る半径を「光子半径 (photon radius)」と呼んでいる。シュバルツシルト・ブラックホールでは、光子半径はシュバルツシルト半径の 1.5 倍になる。光子半径は、ブラック

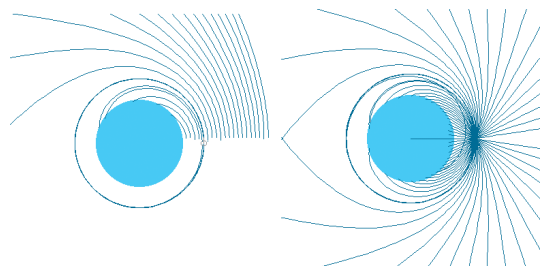


図 1 ブラックホール周辺の光線の軌跡。いろいろな半径から円周方向に発射した場合(左)と光子半径からいろいろな方向に発射した場合(右)。

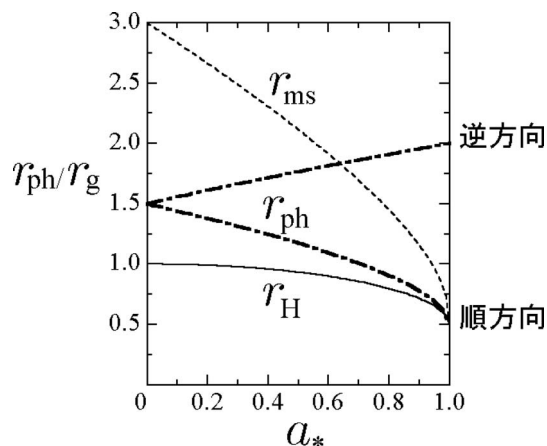


図2 光子半径. 横軸はスピンパラメーターで、縦軸は事象の地平面の半径 r_H 、最終安定円軌道の半径 r_{ms} 、光子半径 r_{ph} .

ホール光学において、重要な値の一つだ。

カー時空の場合にも光子半径は存在する(図2)。ただし、カー時空の自転方向に光子を発射したときには、時空のひきずりによって光子が“落ちにくくなるので”，光子半径はスピンパラメーターの増加とともに減少する。一方、自転と逆方向に光子を発射したときは、時空のひきずりが邪魔をして、光子半径は増加する。

次に、ブラックホールの“見かけの大きさ”，すなわち「射影半径 (projection radius)」について考えてみよう(図3)。半径 R の球を無限遠から見たときに、球の見た目の半径は、球の中心から発した光が無限遠に届く位置と、球の縁から発した光が無限遠に届く位置の差 b で与えられる。この無限遠に射影した球の半径 b は、光線を逆にたどれ

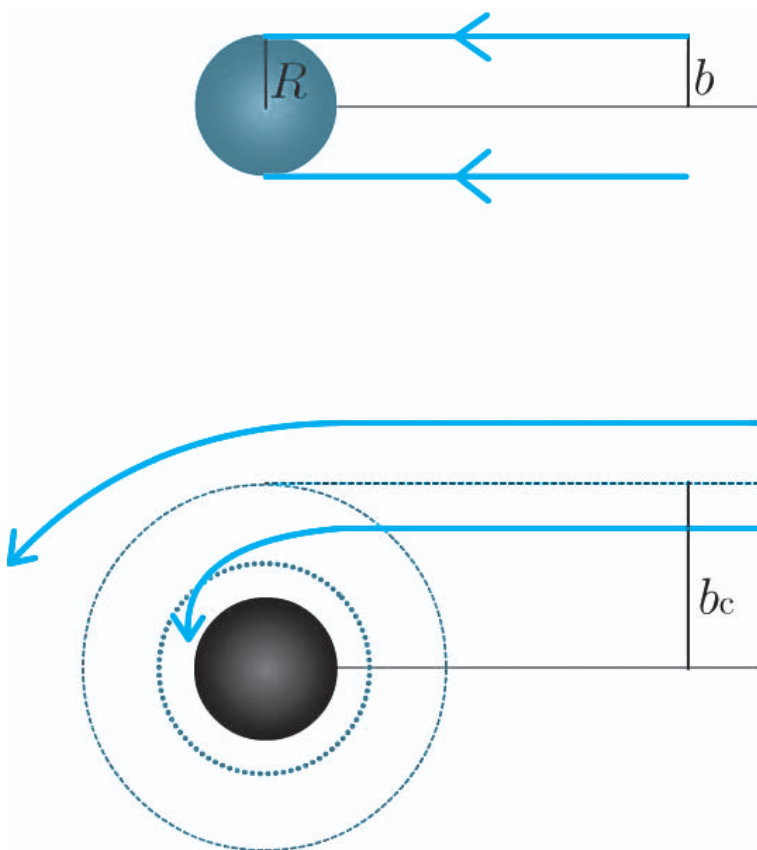


図3 無限遠から見たブラックホールの射影サイズ。

ば、無限遠から球に向けて発した光線が球にぶつかるぎりぎりの半径なので、「衝突パラメーター (impact parameter)」と呼ぶ。

もし空間が平坦で光線の曲がりがないければ、無限遠に射影した球の半径 b は、当然ながら、もとの球の半径 R に等しい。ところが、光線が曲がると話は違ってくる。衝突パラメーター b が十分大きければ、光線はブラックホールをそれるが、 b が小さくなるにつれてブラックホール近傍での光線の曲がりが大きくなり、ついにはある値以下で光線はブラックホールに吸い込まれるようになる。このときのぎりぎりの b のときが、ブラックホールから発した光線（というものがあれば）が無限遠に届くときなので、無限遠から眺めたブラックホールの大きさにほかならない。

このときの衝突パラメーター b の限界値 b_c は、シュバルツシルト・ブラックホールの場合、シュバルツシルト半径の $(3\sqrt{3}/2)$ 倍（約 2.60 倍）になる。すなわち、無限遠に射影したブラックホールは、もとのサイズよりも、2.6 倍も大きく見えるのである。この射影半径も重要な値である。

3. この 20 年の進展

シルエットやシャドウの見え方について、降着円盤モデルに対応して、大まかに三つに分けて紹介していこう。

3.1 光る衣を纏ったブラックホールシルエット

すべては 30 年前のルミネの論文 (1979 年)²⁾ から始まった。先に述べた射影半径の解析的導出や、赤道面の射影、等赤方偏移線などなど、基礎的な事項はすべて述べられている。そしてもちろん、それらに基づいたブラックホール降着円盤の“リアル”イメージが撮影されたのだ (図 4)。ルミネが撮影したのは、シュバルツシルトブラックホール周辺の、幾何学的に薄く光学的に厚い、いわゆる「標準降着円盤」である。

ルミネの論文を読んだのは大学院修士のころだったろうが、とても印象的で感動的だった。と

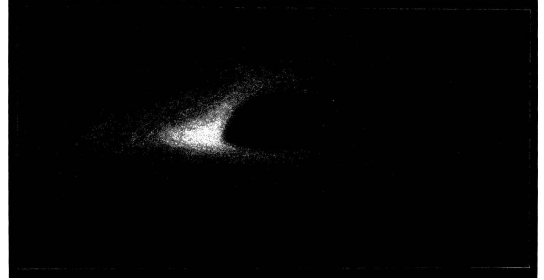


図 4 ブラックホール降着円盤の“白黒”写真。全波長の放射強度を点描で示したもの。この図ではわからないが、裏側から曲がって到来する“帰還放射 (returning radiation)”も計算されている。

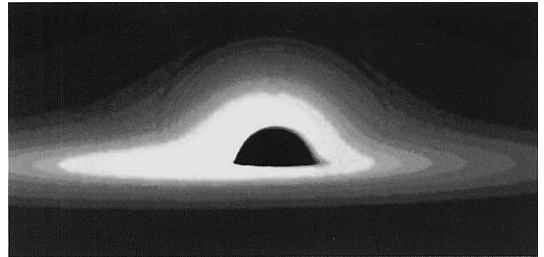


図 5 ブラックホール降着円盤の“カラー”写真。

同時に、いつの日にか、降着円盤をカラーで撮影したいと思ったものだ。そして大阪教育大学に就職した後、2 期目の学生だった横山卓史くんが関心をもったので、無謀にも卒論でチャレンジと相成ったわけである³⁾。

ま、実際、かなり無謀で、学会発表の前日に、“世界初、ブラックホールのカラー画像撮影”という見出しで、読売新聞の一面を飾った写真は、実は後にバグがあったことがわかった（論文ではちゃんと直したけど；図 5）。

もちろんカラー画像だけでは論文にはならないだろうから、全波長領域や可視光や X 線（ぎんが衛星に合わせた 2–30 keV）などの画像や、掩蔽光度曲線⁴⁾なども“おまけ”に計算した。もっとも論文の構成上はカラー画像をおまけのようにせざるをえなくて、実際、当時の編集部からもカラー画像は不要だろうなどというクレームもついたぐらいだ。天文学的には掩蔽光度曲線などのほうが意

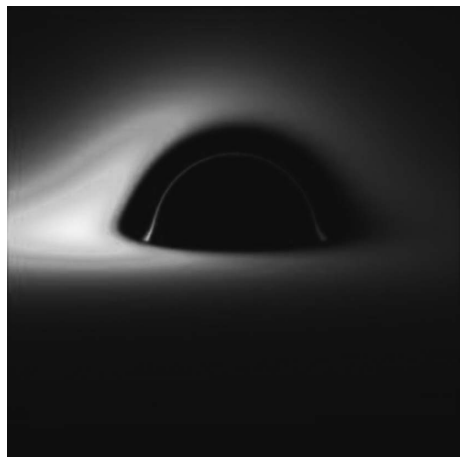


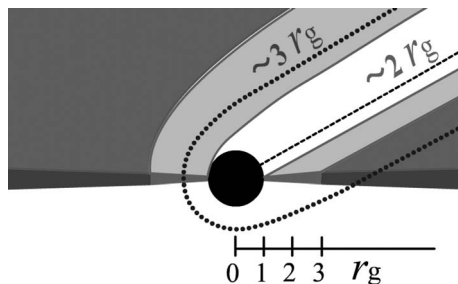
図6 最近の美しいカラー写真.

義があるが、海外の教科書やネーチャーなどで紹介され歴史に名を刻んだのは(笑)、カラー画像のほうで、なかなか複雑な心境ではある。

もう一つ裏話だが、当時のパソコンのスペックだと、1枚の画像を計算するのに17時間ぐらいかかっていた。しかもBasicでプログラムを組んでいたので16色しか使えず、倍精度までなので桁落ちによる三角関数のモアレなども出た。後年、高橋芳太くんが作成した美しい写真(図6)を眺めると、感慨深いものがある⁹⁾。

さて、光る衣—降着円盤—をまとったブラックホールのシルエットだが、念のために書いておくと、これはブラックホールそのものの影ではない。

ブラックホールの周辺においては、図2に示した最終安定円軌道より内側でガス粒子の軌道が不安定になり、円軌道を維持できなくなる。そのため、標準降着円盤ではシュバルツシルト半径 r_g の3倍に内縁があって、それより内側では光るガスはないと仮定する。その光っていない空洞領域が黒いシルエットとして見えているものだ。また降着円盤を斜めから眺めると、通常では楕円に射影されたシルエットになるが、ブラックホール周辺では光線が曲がり、ブラックホールの向こう側の円盤が浮き上がったように見えるため(重力レン



silhouette $\sim 6r_g - 4r_g$ across

図7 シルエットの差し渡しは $6r_g$ 強あるが、シャドー/射影直径(点線)は約 $5.2r_g$ になる。

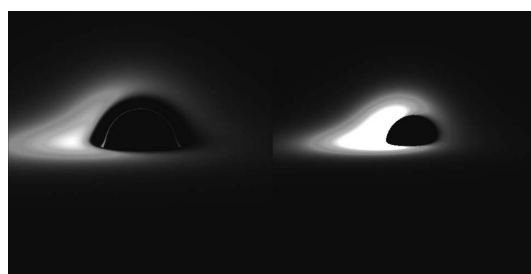


図8 シュバルツシルトブラックホール(左)と最大回転カーブラックホール(右)におけるシルエットの違い⁹⁾。

ズ効果)、シルエットは饅頭のような形状に射影される。

シルエットの具体的なサイズは、シュバルツシルトブラックホールの場合、やはり重力レンズ効果で、影の左右の差し渡しは $6r_g$ よりやや大きくなる(図7)。一方、後で述べるように、シャドーの場合の影のサイズは、先に触れた射影直径(シュバルツシルトブラックホールでは $5.2r_g$)になる。このサイズの違いが、シルエットとシャドーの定量的な違いである。

また、カーブラックホールの場合、スピンパラメータの増加とともに、最終安定円軌道すなわち降着円盤の内縁が小さくなるので(図2)、それに対応して、ブラックホールシルエットのサイズも小さくなる(図8)。

標準降着円盤のカラー画像などは、その後も、ブラックホールを公転するホットスポットの光度

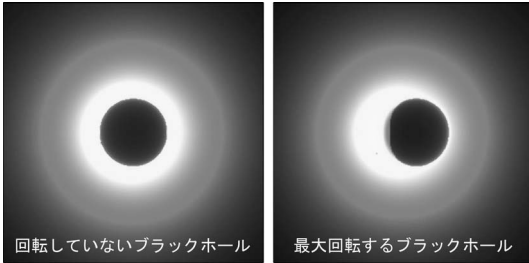


図9 ブラックホールシャドー (提供: 高橋芳太).

曲線^{5), 6)}, 重力レンズを受けた降着円盤⁷⁾, 非対称なスペクトル線プロファイル⁸⁾, シャドーの形⁹⁾, 内部円盤の掩蔽光度曲線¹⁰⁾などのからみで, しばしば撮像されている。

3.2 薄衣をまとったブラックホールシャドー

標準降着円盤の場合に比べて, ブラックホールに降ってくるガスの量が少ないと, ガスは希薄になると同時に, 放射冷却が効かなくなって非常に高温になり, 膨れあがって, いわゆる「放射不良降着流」¹⁾となる。これはブラックホール周辺がポーと光る高温プラズマガスに取り囲まれたような状態だ。このような場合にも, ブラックホール近傍が黒く見えることを初めて示したのが Falcke ら¹¹⁾である (図9)。

この, いわば薄衣をまとったブラックホールでは, プラズマ自体は半透明で向こうまで透けているが, ブラックホールの存在によって, ブラックホールの向こう側から届く光の量が激減し, その結果, ブラックホールシャドーができる。シャドーの具体的なサイズは, 先に述べた射影直径で, シュバルツシルトブラックホールではシルエットよりも小さな $5.2r_g$ になる。

その後も, ブラックホールが帯電していたり自転しているとき¹²⁾や, ブラックホール周辺の高温プラズマ中を光るプラズマ雲が公転しているとき^{13), 14)}などについて, シャドーの形状や見え方が調べられている。

3.3 隠されるシルエット

逆に, ブラックホールに降ってくるガスの量が

非常に多いと, やはり円盤は膨れあがり, 光学的に厚く幾何学的にも厚い, いわゆる「超臨界降着流」¹⁾となる。このような超臨界降着流では, 標準降着円盤で想定したような内縁は消失し, ブラックホールの地平面まで光るガスが円盤状に存在していると考えていい。

そのような場合には, 当然, シルエットのサイズは小さくなり¹⁵⁾, また膨らんだ円盤自身による「自己掩蔽効果 (self-occultation)」のため, 斜めから見ると中心部が隠されスペクトルも高エネルギー側で減少したものとなる¹⁶⁾。この自己掩蔽効果については, その後, 連続スペクトルに与える影響¹⁷⁾や, 線スペクトルの変化¹⁸⁾などが調べられている。膨れあがったトーラスの見た目^{19), 20)}なども表現されている。

4. 今後 20 年の方向

ブラックホールシルエット/シャドーがらみの問題で, 今後, 特に理論面で重要になるだろう方向を二つほど議論しておきたい。

4.1 ブラックホールの環境問題

一つ目は環境問題だ。

シルエット/シャドーが見える見える, と言いながら, おそらく多くの研究者はずいぶん前から, “見えないんじゃないかな”とっていたはずである。望遠鏡の分解能の問題ではない。風やジェットやコロナなど, 降着円盤周辺 (上空) のプラズマガスのためだ。

例えば, 高温で希薄なプラズマが拡がっている放射不良降着流の場合は, プラズマの散乱によって, 少なくとも電波領域ではシャドーがぼけてしまうと予想されている。

逆に, 大量にガスが降ってくる超臨界降着流の場合は, 自己掩蔽効果はもちろんだが, 光学的に厚い円盤風によって, 中心部は隠されてしまうだろう²⁰⁾。そのような場合には, むしろ「ブラックホール風 (black hole wind)」の見た目を問題にすべきだと思う^{21), 22), 31)}。

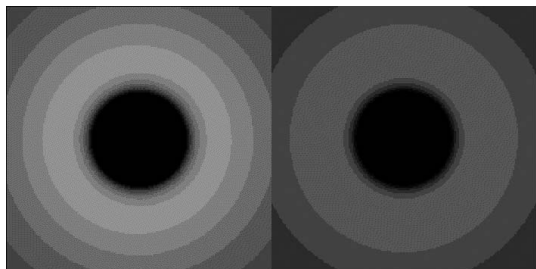


図10 周縁減光効果のない場合(左)と効果を入れた場合(右)の撮像イメージ²⁴⁾.

標準降着円盤の場合にも降着円盤風やジェットは吹くが、ガスが希薄なら、中心部まで見えるかもしれない。円盤からジェット(風)が吹いている場合の見え方などの研究²³⁾もある。

まあ、天文の業界でも、ブラックホール周辺にせよ、最初の星周辺にせよ、銀河周辺にせよ、いわゆる“環境問題”は大きな課題なのである。

4.2 一般相対論的輻射輸送

もう一つは輻射輸送問題だ。

ブラックホールシルエットなどを計算する際に、しばしば降着円盤が黒体放射をしていると仮定して、その光り具合を計算する。しかし数年前までは、黒体放射をしている“ガス”円盤を撮像したのではなく、黒体放射をしている“金属”円盤を撮像したものが多い。周縁減光効果だとか、散乱による黒体放射からのずれなどが撮像イメージに与える影響は、ほとんど調べられていない。

たとえば、「周縁減光効果(limb-darkening effect)」を入れると^{24), 25)}、降着円盤を斜めから観測したときには、浅くて温度の低い層を観測するために、通常の周縁減光効果で全般的には暗くなる。一方、真上から観測しても暗くなる(図10)！その理由は、ガスが回転しているために光行差が生じ、真上から見ても、ガスの共動系では斜めから見ていることになるためだ。

なお、どっから見ても暗くなるわけではない。周縁減光効果では光束は円盤上方へ強くなるが、これは静止系では、円盤の回転方向に光が強くなることを意味する。

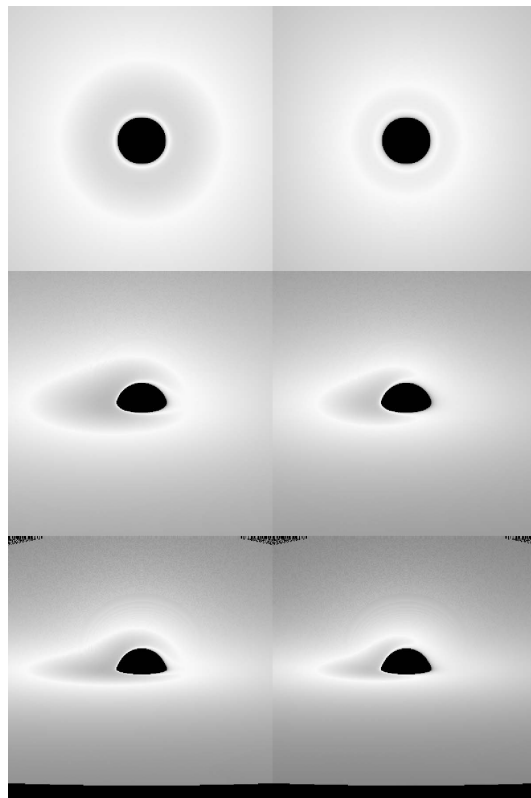


図11 周縁減光効果のないRGBカラー写真(左)と効果を入れたRGBカラー写真(右)。ただし色値(彩度)だけを表現したもので、輝度まで考慮するとコントラストが付きすぎて周囲がわからなくなる。

さらに、最終的には「一般相対論的輻射輸送(general relativistic radiation transfer)」という難易度の超高い問題をゴリゴリ解いていく必要が出るだろうし、実際、希薄な高温プラズマの場合^{13), 14), 26)-28)}や、トーラス状の場合²⁹⁾など、いくつかの研究が出ている。またいろいろな分野で今後重要になるだろう「偏光」についても、帰還放射によって反射X線の偏光がどうなるか³⁰⁾などの研究が始まっている。

まあ、ぼくはこころへんで脱落しそうなので、後は頑張っって欲しい。

5. ホントの色

冒頭で書いたように、企画セッションのために、相対論的運動体の観測的な見た目をいろいろ計算し、その後、論文にまとめた²⁵⁾。レフリーの丁寧なコメントに従って改訂した際に、おまけ的に、黒体放射の RGB 値を各場所できちんと計算して着色した“カラー写真”を作成した(図 11)。

大昔に適当に色づけた場合とかなり違うのはもちろんだが、周縁減光効果のない場合とある場合とでも、青味や赤味の色合いが微妙に異なることがわかるだろう(カラーならば)。

謝 辞

今回の企画セッションおよび特集記事を世話された三好 真さん、根来 均さん、高橋真聡さんたちには、いい機会を与えてもらいました。また準世話人の高橋芳太さんには画像を提供してもらいました。この場を借りて感謝します。

参考文献

- 1) Kato S., Fukue J., Mineshige S., 2008, *Black-Hole Accretion Disks—Towards a New Paradigm* (Kyoto University Press, Kyoto)
- 2) Luminet J.-P., 1979, *A&A* 75, 228
- 3) Fukue J., Yokoyama T., 1988, *PASJ* 40, 15
- 4) Fukue J., 1987, *Nature* 327, 600
- 5) Karas V., Vokrouhlicky D., Polnarev A. G., 1992, *MNRAS* 259, 569
- 6) Fukue J., 2003, *PASJ* 55, 1121
- 7) Jaroszynski M., Wambsganss J., Paczynski B., 1992, *ApJ* 396, L65
- 8) Fanton C., Calvani M., de Felice F., Cadez A., 1997, *PASJ* 49, 159

- 9) Takahashi R., 2004, *ApJ* 611, 996
- 10) Takahashi R., Watarai K., 2007 *MNRAS* 374, 1515
- 11) Falcke H., Melia F., Agol E., 2000, *ApJ* 528, L13
- 12) Takahashi R., 2005, *PASJ* 57, 273
- 13) Broderick A. E., Loeb A., 2005, *MNRAS* 363, 353
- 14) Broderick A. E., Loeb A., 2006, *MNRAS* 367, 905
- 15) Fukue J., 2003, *PASJ* 55, 155
- 16) Fukue J., 2000, *PASJ* 52, 829
- 17) Watarai K., Ohsuga K., Takahashi R., Fukue J., 2005, *PASJ* 57, 513
- 18) Wu S.-M., Wang T.-G., 2007, *MNRAS*
- 19) Fukue J., Yamanaka K., Furukubo M., 1992, *PASJ* 44, 521
- 20) Ohsuga K., Mori M., Nakamoto T., Mineshige S., 2005, *ApJ* 628, 368
- 21) Sumitomo N., Nishiyama S., Akizuki C., Watarai K., Fukue J., 2007, *PASJ* 59, 1043
- 22) Fukue J., Sumitomo N., 2009, *PASJ* 61, 615
- 23) Broderick A. E., Loeb A., 2009, *ApJ*, in press
- 24) Fukue J., Akizuki C., 2006, *PASJ* 58, 1039
- 25) Fukue J., 2009, *PASJ* 61, 645
- 26) Broderick A. E., Loeb A., 2006, *JPhCS* 54, 448
- 27) Broderick A. E., 2006, *MNRAS* 366, 10
- 28) Yuan Y.-F., et al., 2009, *ApJ*, submitted (arXiv:astro-ph/0904.4090)
- 29) Wu K., Ball W., Fuerst S. V., 2008, arXiv0811.2060
- 30) Schnittman J. D., Krolik J. H., 2009, arXiv0902.3982
- 31) Fukue J., 2009, *PASJ* 61, in press

The Appearance of Black-Hole Silhouettes and Shadows

Jun FUKUE

Astronomical Institute, Osaka Kyoiku University, Asahigaoka 4-698-1, Kashiwara, Osaka 582-8582, Japan

Abstract: I review the history to take photographs of black-hole silhouettes and shadows during this two decades. I also prospect the next two decades.