

# シン・ブラックホールシャドー

福江 純

〈〒606-8317 京都市左京区吉田本町 5-61〉

e-mail: KHF07427@nifty.com



ブラックホールシャドー“撮像”の劇的な発表から早5年も経った。最初に報告されたM87銀河に続き、天の川銀河中心SgrA\*のシャドーも報告され、現状の解像度では一段落したところだろう。この時期をとらえ、シャドー研究に多少は関わった一人として、理論面におけるブラックホールシャドー可視化の“歴史的な事実”を備忘録的にまとめてみた。①ブラックホール降着円盤と光子リングをはじめ“描いた”のはルミネ（1979）であった。②ブラックホール降着円盤をはじめ“CG（Computer Graphics）可視化した”のは福江と横山（1988）である。③光子リングをはじめ“CG可視化した”のは高橋（2004/2007）である。そして宇宙で最初に発見されたのは光子リングだった（発表2019）\*<sup>1</sup>。

## 1. はじめに

闇夜のカラスと同様、漆黒の宇宙空間に浮かぶブラックホールも、その姿を見ることは難しいだろう。しかし闇夜のカラスも背後からライトで照らせば、光の中にそのシルエットを浮かび上がらせる。同じように、ブラックホールといえども、輝く光の中に置かれれば、すべての光を吸い込むことはできずに、光の海を背景に暗黒の姿がシルエットとして現れ出でるはずだ。これがブラックホールシャドーの基本的な考え方である。

2019年4月10日、ApJL誌に約200人の著者からなる計6本の論文が掲載され[1]、全世界6ヵ所で同時記者会見が行われた。そして、約5500万光年の距離にある巨大楕円銀河M87中心のブラックホールシャドーの姿が公開された。2016年に発表された重力波の直接検出と並び、天文学

的な発見としては今世紀の一大発見の報だった。

ぼく自身、40年近く前から、銀河中心に鎮座する超巨大ブラックホールについて語り、その見え方なども研究してきたわけだが、こんなに早くに本当に“見える”なんて予想外だった。生きている間に起こるとは、理論家の端くれとしては研究者冥利に尽きる瞬間だった。一方で、内心は複雑で忸怩たる思いもあった。何で面倒で描かなかったセカンダリーイメージ（2次像）が見えたんや！

ことがブラックホールに関わるだけに、一般的にはなかなか理解されづらい。とくに観測された光子リングとブラックホールシャドー、そして光り輝く降着円盤の関係については、なかなか複雑である。すでに多くの解説\*<sup>2</sup>や書籍が出ているので詳細な説明はしないが、多少関わった一人として、本稿ではそれらの関連性と理論の歴史の流れの整理をしておきたい。

\*<sup>1</sup> “光子リング”を連呼しているが、実際には光学的に薄い降着流も存在しているはずだし、光子リング+降着流が見えた可能性も高い（編集委員の方からご指摘いただいた）。筆の勢いと思ってください。

\*<sup>2</sup> たとえば、『天文月報』2019年7月号（M87\*）、2021年12月号（M87\*偏光）、2022年8月号（Sgr A\*）に特集記事がある。

以下、大きく4つほどの段階にわけ、ブラックホールシャドウ研究の歴史を振り返ってみよう。

## 2. Luminet 1979

ブラックホール周辺での光線の軌跡などに関する研究は過去にも多かったが、降着円盤という光る衣を纏ったブラックホールの見え方をはじめ調べてたのはルミネ (Jean-Pierre Luminet; 1951~) というフランス人だ。

“Image of a Spherical Black Hole with Thin Accretion Disk” というタイトルの1979年の論文である [2]。この論文では、過去の研究にもとづき、降着円盤からブラックホールを回り込まずに直接到来する光線の軌道 (射影半径や等赤方偏移線など) だけでなく、光子リングの基礎である、ブラックホールの向こう側を回り込んで到来する帰還放射についても詳細に説明されている。前者が作る1次像に比して、後者が作る2次像やさらに高次の像は、指数的に暗くなることも指摘されている。そして最後に降着円盤を纏ったブラックホールの“リアル”なイメージが掲載されているのだ (図1)。

歴史的事実とはあまり関係ないが、この論文はルミネが28歳ぐらいのときのもので、後に国際会議で会ったときもまだ30代後半のイケメンパリジャンだった (図2)。ちょうどこのころ、ぼくたちも「ブラックホールのカラー画像」を作成していて、図2背景のポスターをみると、この研究会で発表していることがわかる。ぼくたちの“カラー画像”について、ルミネがとても面白いと褒めてくれたのは嬉しかった。半分リップサービスだとは思いますが、さすがパリジャン褒め上手だ。

さて、ぼく自身、図1はてっきりコンピュータグラフィックスCGで作成したものだと思い込ん

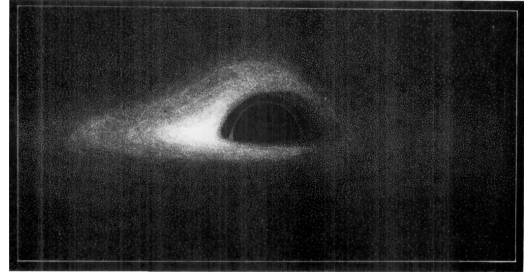


図1 スペクトル全波長域の放射強度で表したブラックホール降着円盤の“白黒像” [2]。中央の黒い領域に、半円状の細い光の環があることに注意して欲しい。これがブラックホールの裏側から曲がって到来する帰還放射でできた光子リングの上半分である (下半分は手前の降着円盤で隠されている)。



図2 ルミネと福江 (1988年, 山田コンファレンス, 東京にて)。福江の写真はどうでもいいが、後ろのポスター (カラー) に注意してほしい。

でいたし、長年にわたり解説本などでもそう説明してきた。論文でも、simulated photographと書いてある。しかし、ルミネの回顧録 [3] を読んでびっくり返った\*3。図1のイメージは、なんと手描きだったそうだ。等輝度線などの計算結果にも

\*3 このルミネの回顧録は、最初はルミネのホームページに書いていた内容をまとめたものようである。現在もAstro-phにしか見当たらないが、関連の研究がよくまとめられていて一読の価値がある。国際会議での出会いも含め、ぼくたちの仕事もかなり丁寧に書いてくれている。

とづいて、白地に黒で“点描”し、白黒反転したものらしい。論文のsimulatedは、コンピュータシミュレーションではなく、“似せた”という原義だったわけだ。

後知恵で考えてみれば、曲がった時空における光子軌道などの計算は、当時の大型コンピュータでできただろう。ルミネの回顧録でも、数値計算はムードン天文台のIBM 7040を使ったと書いてある（パンチカード時代!）。そしてその結果にもとづいて、当時使えた描画ソフトで等赤方偏移線や等輝度線を描いたそう。しかし、1979年当時では、2次元的な描画までは無理だっただろう。回顧録にも適当なソフトがなかったと書いてある。そして数千点を手で打つという現在のCGよりはるかに労力を要する大作画を描いたわけだ。**【教訓】** 論文の内容のみを鵜呑みにしないこと。論文に書かれなかったことを推測することも重要である。

### 3. Fukue and Yokoyama 1988

ルミネの論文はとても印象的で衝撃的で感動的だったが、一点だけ不満だったのは白黒イメージだった点だ。そこで、大阪教育大学に就職した直後、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してみることにした。実際、かなりの暴挙で、日本天文学会での発表前日に、“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、後にバグがあったことがわかり冷や汗ものだった。さいわい、学術論文として投稿する前に気づいて直せたので、結果オーライである。最終的に日本天文学会のPASJ誌に、“Color Photographs of an Accretion Disk around a Black Hole”というタイトルで光り輝くブラックホール降着円盤のカラー画像（図3）が掲載された [4]。またルミネの絵が手描きだった点を考慮すると、カラー可視化に加え、世界初の“CG可視化画像”でもあったことになる。

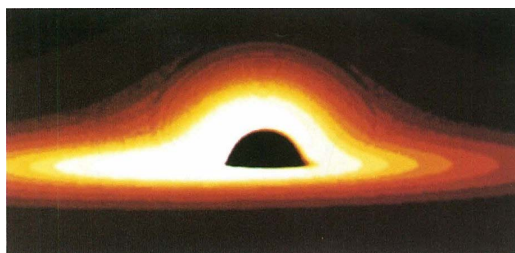


図3 可視域で表現したブラックホール降着円盤の“カラー写真” [4]。中心近傍の温度を10000 Kとして、大まかに可視光の色合いを着色した。ただし、裏から回り込んだ2次像（光子リング）は計算していない。

さて、図3を見てもらうとわかるように、光り輝く降着円盤は可視化されているが、シャドー領域に光子リングは見えていない。暗い2次像なので最初から計算を端折ったのだ。

実は図3の画像については2点ほど論文に書いていないことがある。一つは輝度を対数スケールにしていることだ。真数スケールだと中心部と外縁部でコントラストがつきすぎて、全体を表現できなかつたためである。もう一つは、可視域の色合いで、RGB値などの計算はしておらず、かなり感覚的に着色していることだ。

とはいうものの、1988年当時ではまだ技術的に難しかっただろう。図3の画像は、当時としては最高性能のPC（+BASIC言語!）で計算したものだが、一枚の画像を計算するのに17時間ぐらいかかっていた。適当な描画ソフトはやはりまだない時代で、ブラウン管 (!! ) の画面表示のみである。その画面をフィルム式 (!!! ) カメラで撮影したのだ。メインフレームではなくモニタのあるPCだからこそできた技である。

まあ、そういう昔なので、当時のPCのスペックでは光子リングの描画は画面解像度的にも厳しかっただろう（PC9801F2は640×400ピクセルだったが、図3の計算をしたのはたしかもう少し解像度の高いPC-100で720×512だった）。計算精度もあまりよくなくて、画像をよくみると三角

関数の精度が悪いのか周辺にモアレ模様なども出ている。さらに色数は512色中16色しか使えず、RGB値の計算どころか、そもそも色の割り当てに苦労した\*4。

よく個人としては図3だけで満足したのだが、基礎計算はルミネが行っているのだから、さすがに絵一枚では論文が受理されないだろうという程度の“常識”は持ち合わせていた(笑)。そこで、いわばアリバイ作りみたいな感じで、可視光やX線の画像や掩蔽光度曲線など、一応、それなりにアカデミックなものも“おまけ”に計算しておいた。本音は“カラー画像”にあるのだが、建前上は、カラー画像を“おまけ”にしたのである。

実際、編集部からはサイエンス以外の部分で表現方法などいくつか要請があった\*5。案の定、画像も不要じゃないかというコメントもあったがなんとか掲載してもらった\*6。たしかに、天文学的(学術的)には掩蔽光度曲線などの方が意味はあろう。しかし、掩蔽光度曲線が引用されたことはほとんどなく、歴史に名を刻んだのは(笑)カラー画像の方で、なかなか複雑な心境ではある。  
【教訓】レフリーや編集部の意見に納得しないときは、多少はゴネテみる、もとい、自分の意見を少しは主張することも必要だ。精神的にはかなり負荷がかかるが、悔いを残さないためにも。

#### 4. Falcke et al. 2000

ここでファルケたちの研究について触れておきたい(図4)。天の川銀河中心や楕円銀河M87中心の超巨大ブラックホール周辺は薄暗いため、光り輝く降着円盤はなく、希薄な高温ガスの移流

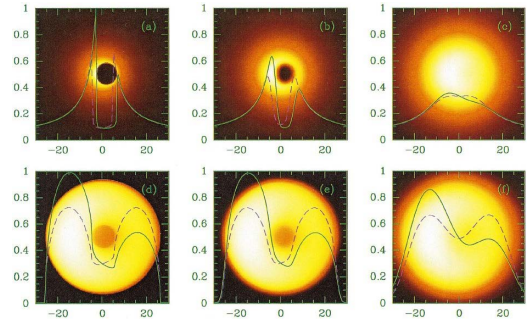


図4 薄衣を纏ったブラックホールシャドー [5]。上がカー・ブラックホール+自由落下ガス流(放射率は半径の逆2乗), 下がシュバルツシルト・ブラックホール+ケプラー回転ガス円盤(放射率は一樣)。左列が計算例, 中列が0.6 mmの電波で観測した予想図, 右列が1.3 mmの電波の予想図。

優勢な降着流(ADAF)的になっているだろうと思われていた。ガスの量が少ない、いわば薄衣を纏ったブラックホールの姿をはじめて示したのがファルケたちだ[5]。彼らの仕事は刺激的で大きな反響をもたらした。また“ブラックホールシャドー”という言い方をはじめたのも彼らからだと思う(論文内で大部分はたんにshadowと書いているが、一カ所だけ、the black hole shadowと書いている)。

速度場や放射率は簡単なモデルを使っているものの、ファルケたちは高温希薄プラズマ中におけるブラックホールシャドーを見事に描き出した。ただ、彼らのモデルではシャドーの縁が光子リングの位置になるはずだが、輝きは周辺に広がっていて、光子リング単体では独自には存在を主張していない。測地線に沿って放射率を積分したと書

\*4 輝度分布はどうしようもないが、色合いについてはPCの性能が向上してからRGB値の計算なども行い、論文や解説書などで報告した。またこの当時は完全黒体の金属体のように表面値だけで計算していたが、降着円盤は半透明なガス体なので、放射輸送の計算も行った。機に乗じて書いた『90分でブラックホールがわかる本』(大和書房、2020年)には、それらの画像も載せてある。

\*5 当時はすでにApJなどでもブラックホールを“チェシャ猫”と呼ぶ論文もあったし、敬愛する故森本雅樹おちさんが日本のスペースVLBI計画をVSOPと名付けていたころだから、多少のおふざけは問題ないと思ったんだけどね。

\*6 紙印刷時代なので、カラー紙面は1枚だけで目の玉の飛び出る掲載費がかかった。論文には科研費への謝辞があるので、幸い科研費が当たっていた時期で支払えたみたいだ。運もよかった。

いてあるので、1光路分を足し合わせただけで、周回光線は計算していないのかもしれない。

ところで、とくに理論家にとって、あるテーマを論文にできなかったケースには2つのタイプがあるだろう。

一つは、いいテーマが浮かんでも、解決する能力や技能が足りなくて解けなかったときだ。そしてほかのだれかが論文にしたときは、これは力量がなかったので、仕方がないと諦めるしかない。たとえば、ぼくの場合、カー・ブラックホール降着円盤の可視化などがそうだ。カー時空の取り扱いが不得手で、ダイナミクスはまだしも光線の軌道を描くことができなかった\*7。

もう一つのタイプは、そのときの自分の能力で解けたはずの問題なのに思いつかず、ほかのだれかが論文にしたときだ。これは悔しい。ファルケたちの仕事の少なくともシュバルツシルトの方は、すでに光学的に薄いADAFも知っていた1990年ごろにできたはずだ。光り輝いてブラックホールを浮き上がらせるのは降着円盤だ、という思い込みで、考えもしなかったのだ。

【教訓】 予断や先入観をもって研究テーマを探さないこと。いや、より正確には、まず予断や先入観をもってテーマを考えた後に、それ以外に見落としかないか徹底的に検討すること。

## 5. Takahashi 2004/2007

さてここで光子リングを最初に計算機で可視化したのは誰か、という“歴史的な事実”を書く予定であったが、それほど簡単な話ではないことがわかった。

2000年前後から、ブラックホールが観測的にどう見えるかという理論的な研究は急激に増えてきて、論文にも可視化画像がしばしば掲載されるようになった。ただ、何度か触れたように光子リングは2次元像なので、最初のうちはあまり重要視

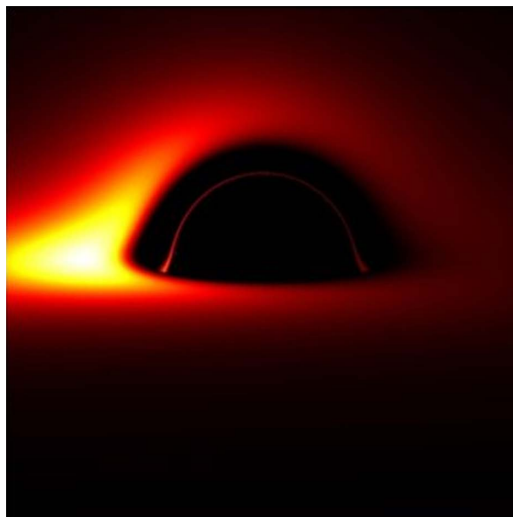


図5 シュバルツシルト・ブラックホール周辺の降着円盤可視化画像 [6]。半円状の光子リングがはっきりわかる。

されていなかったフシがある。数が多いので、見落としもあるかもしれない。ぼく自身が光子リングをはじめ“観た”のは、ネットで見つけたもので、高橋芳太さんが2004年に作成した画像だった(図5)。ただ、論文で見つからない。論文で見つけたのは2007年のものだった [7]。

今回、改めて高橋さんに尋ねてみたところ、図5の画像は博士論文 [6] 用に作成したものだったそうだ。ちなみに計算方法は、データの計算はC言語を用いてCPUで並列計算し、出力データを描画ソフトgnuplotで可視化したということだった。画像処理の技術的な進歩はあるにしても、解像度の高いスムーズな画像である。最初に観たときには、その美しさに目を瞠ったことを覚えている。

ところが、高橋さんによると、光子リングは、Begelman, M. and Rees, M. 1998, Gravity's Fatal Attraction: Black Holes in the Universe という本の表紙に描かれており(1996年の初版にはない)、最初に可視化したのは自分ではないと認識してい

\*7 少し見栄を張りました。カー時空での光線はいまも描けない。ダイナミクスも赤道面だけだったりする。

るとのことだった。イメージを計算したのは、Christopher, A. Perez and Robert, V. Wagoner (Stanford University) となっているらしいが、論文にはなっていないようだ。共著者のWagonerは降着円盤脈動論をやっていた人なので、指導院生の博士論文の一環だったのかもしれない。

なお、このころ、2000年代も後半になると、光学的に薄い降着流（+ジェット）のシミュレーション画像などでも、光子リングも描かれることが多くなってきた[8-11]。が、やはり主役ではなく添え物的な感じだったように思う。

科学研究は学術論文にしてナンボのもんなので、そういう観点からここでは節題をTakahashi 2004/2007としたが、これは身量肩かな。出版物になっているという観点からは、高橋さんの意も汲んでChristopher and Wagoner 1998とすべきかもしれない。ここでは以上の事実のみ列挙し、後は読者の方の判断に委ねたい。

【教訓】科学研究のプライオリティ（先取権）の問題は難しい。いまの時代の日本人にはわかるジョークだが、科学研究に2番はない！のだから。教訓というほどでもないが、とりあえず、論文しておくのは大事である。

## 6. Thorne 2015

以上までで、本稿で書きたかった理論面におけるブラックホールシャドーの“歴史的事実”の話は基本的には終わりである。ただ、ソーン<sup>\*8</sup>が関わっていることで有名にもなったし、やはり誤解している人も多いと思うので、映画『インターステラー』で出てきた画像についても、最後に触れておきたい（図6）。

ソーンらがブラックホールを可視化するために置いたのは、温度が4500 Kほどの帯状円盤だ（本

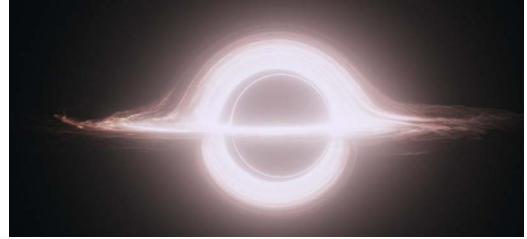


図6 映画『インターステラー』に使われたのと同種のイメージ[12]。通常の降着円盤に比べて半径方向の幅が非常に狭いリボン状の円盤を置いたので、内部のシャドー領域に円形の光子リング全体が見えている。

来の降着円盤とは異なり、動径方向に幅が狭い帯状のもの）。ブラックホールの上側から回り込んでくる光線による半円形の太いリング状の輝きと、下側から回り込んでくる光線による同様のもの、そしてブラックホールの前を横切るリボン状のガス円盤の輝きからできているのがわかる。さらにブラックホールシャドーの領域には細い円形のリング（光子リング）も見て取れる。

さて、図6であるが、図5と比べて大きく異なるのはすぐわかると思う。まず回転に伴うドップラー効果が入っていないので左右がほぼ対称になっている。また明るさ（輝度）のコントラストもまったく考慮されていない。それらを入れると絵的にはしよぼくなってしまふので、映画の画像としては採用できなかったそう（『インターステラー』自体はとてもよい作品だったと思う）。

実際、学術論文[12]の中では、色のシフトや輝度のシフトなどを考慮したケースも計算されていて、それらを入れたイメージがtrueに近いとちゃんと書かれている。また同時に、それら相対論的なすべての効果は、従来の研究ですで行われていると、きちんとフェアに書いてある。彼らの研究で新しく取り入れた効果は、仮にこのよう

<sup>\*8</sup> ソーン (Kip S. Thorne) は相対論の大家で、ぼくのような相対論を少し使う人間からすると、文字通り、雲の上の人だ。カール・セーガンのSF『コンタクト』（映画にもなっている）では、ソーンはワームホールタイムマシンのアイデアも出している（こちらも学術論文になっている）。SFを楽しみながら学術論文に仕立てるあたり、格は大きく違いますが同族の匂いがする（笑）。



図7 キップ・S・ソーン（1999年、京都にて）。

なブラックホールを写真撮影するとしたら、強い光源にカメラレンズを向けた際に生じる「レンズフレア」というレンズ光学系内での散乱を考慮したことがそうだ。その結果、映画的にはよりリアルでインパクトのある画像に仕立てることができたようだ。

しかしまあ、多数の先行研究が引用してあるのでレビューに近いとはいえ、レンズフレアだけで学術論文に仕立てるのはなかなかの力業だ。ソーンには国際会議で2度ほど会ったことがあるが、とても気さくに受け答えしてくれたのを覚えている。遠慮がちに写真を撮らせて欲しいと頼んだら、気恥ずかしそうにポーズを撮ってくれた（図7）。生真面目な人だという印象も受けた。だから、映画的にはあの画像を用意したけど、ほんとはこうなんだよ、とエクスキューズしておきたかったのかもしれない。

重力波の直接検出で理論面を担ったソーンが、

翌2017年のノーベル物理学賞を共同受賞したのは知っての通りである。

先にも書いたが、2000年ぐらいからは、ブラックホールシャドールの可視化はごく当たり前のことになってきた。いまでは、若い人（笑）は一般相対論的放射輸送の計算さえ、軽々やっつけてのける\*9。時代の流れを感じる。

【教訓】ヒトは種としては賢くなっていくものだ。ゾルトラークも80年経てば一般攻撃魔法になってしまう\*10。最初は3人しか理解できなかったという一般相対論も80年経てばみなが使える魔法になった。武器や魔法の開発と研鑽には不断の努力が必要である。

## 7. おわりに

実際に宇宙で最初に発見されたのは光子リングだった。M87銀河中心や天の川銀河中心は暗いので、光り輝く降着円盤がみえるとは思っていなかったが、光子リングだけしかみえなかった、というのは予想外だった。ブラックホールシャドールに関わる研究で、光子リングだけがみえる、と予想した理論家はいなかったように思う。自然はいつも嬉しい意味で予想を裏切ってくれる。

また、

- 100億K程度の高温希薄降着流
- シンクロトロン放射が卓越している
- 1.3 mmのミリ波電波では光学的に薄い
- 感度不足でジェットはみえない
- シミュレーション結果とも一致する

などなど、まあ、どれも納得できることではあるが、釈然としないのも事実だ。たしかに、光子

\*9 詳しい教科書さえ書かれるようになってきた：小島康史・小出真路・高橋芳太『ブラックホール宇宙物理の基礎 改訂版』（日本評論社、2024年）。かなり専門的なテキストだが、改訂版が出るぐらいに読者がいるのだ。

\*10 このような注釈は野暮の極みだが、いまの読者はともかく、80年後の読者のために書いておく。いま面白いコミック『葬送のフリーレン』（原作：山田鐘人／作画：アベツカサ）に出てくる話だ（アニメも絶賛ヒット中；笑）。大魔族のクヴァールが開発した対人必殺魔法がゾルトラークだが、その後、ヒトの魔法使いが解析を続け防御術式も開発されて、80年後には誰でも使える一般攻撃魔法となった。もっともフェルンのような優秀な使い手だと、間断のない飽和攻撃や魔力探知外からの超長射程射撃など、強力な力を発揮する。一般相対論もまだまだ使い方（使い手）次第で、新たな境地が開拓できると思う。

球には多方向からの光線が集束するため、光子球の射影像である光子リングは強められもする。にしても、もう少し周辺に広がりがあったらよさそうなものだ。とくに、ジェットが暗すぎて見えなかったとしても、ジェットも光源の一部になっているなら、非対称な影響が光子リングに現れてもいいだろう。

またガス温度は電子陽電子対発生の閾値（約60億K）を超えているので、電子陽電子対発生についても気になる。対平衡の上限値（閾値の20-40倍ぐらい）よりは低いので、対発生暴走は起こらず、光学的に薄い対平衡状態になっている可能性もある。対プラズマが多ければ、当然、シンクロトロン放射や偏光などに大きく影響するだろう。その方面の研究も進んでいるが、どうもよくわからない。

わからないことはまだまだ多い。まだ何か大きな見落としがないか、理論家はいま一度、熟考する時期かもしれない。

光子リングについて重要なアドバイスをいただいた高橋芳太さんに深く感謝します。

## 参考文献

- [1] EHT Collaboration, 2019, ApJL, 875, L1
- [2] Luminet, J.-P., 1979, A&A, 75, 228
- [3] Luminet, J.-P., 2019, astro-ph, arXiv: 1902.11196 L
- [4] Fukue, J., & Yokoyama, T., 1988, PASJ, 40, 15
- [5] Falcke, H., et al., 2000, ApJ, 528, L13
- [6] Takahashi, R., 2005, Ph. D. Thesis, Kyoto University
- [7] Takahashi, R., & Watarai, K., 2007, MNRAS, 374, 1515
- [8] Wu, K., et al., 2008, astro-ph, arXiv:0811.2060
- [9] Wu, K., et al., 2008, Chin. Astron. Astrophys., 8, 226
- [10] Lee, K-G., et al., 2009, Res. Astron. Astrophys., 9, 377 L
- [11] Broderick, A. E., & Loeb, A., 2009, ApJ, 697, 1164
- [12] James, O., et al., 2015, Class. Quantum Gravity, arXiv:1502.03808

### Black Hole Shadow: Novel and True

Jun FUKUE

Abstract: We present the visualization of the black hole shadow and the photon ring in early days. Luminet (1979) first drawn the black hole silhouette and a photon ring by hand. Fukue and Yokoyama (1988) drawn the black-hole accretion disk in color using the computer graphics. Takahashi (2007) published the CG photon ring in their paper.