

## 目で見る相対論 8. 宇宙の渦

福江 純\*

## 1. シルエットロマンス

相対論的な現象の視覚化について、数回にわたり紹介してきた。どうやら手持ちのネタも尽きたので、最後に、いささかカビのはえた話ではあるが、ブラックホールのまわりの降着円盤の見え方について述べよう。降着円盤については、たとえば天文月報1983年4月号、同5月号、1986年4月号、1987年10月号などを参照されたい。

降着円盤が今日の天体物理学の最前線に現れてから20年が経つ。しかしながらそれ以来、彼女は容易にその顔を見せてくれない。で、彼女を見たいと思うのは至極当然のことだろう。ブラックホール周辺の降着円盤を視覚化する最初の試みは、1979年、ルミネによってなされた。彼は“モノクロ”フィルムを使って、降着円盤の“全波長域の写真”を得た。それに対し、われわれはカラー写真の撮影を試みた。その種の写真は彼女の優美な肖像を与えるだけでなく、ブラックホール=降着円盤系の研究に対して天体物理学的にも役立つだろう。

次節では、被写体の状態と写真を撮影する方法について説明する。3節で写真をいくつか表示し、それらの特徴を述べよう。

## 2. 被写体と写真撮影の原理

まず被写体の状態と“撮影法”について(図1)。

## ☆被写体 1 ブラックホール

降着円盤の中心の重力天体として、ここでは質量  $M$  のブラックホールを選んだ。何故ならブラックホールは

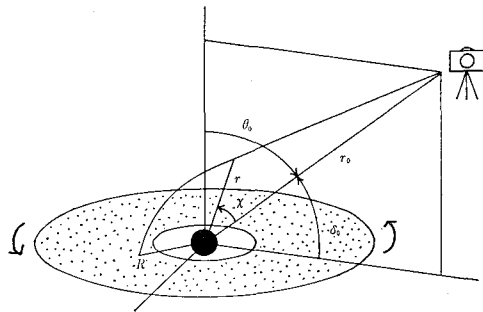


図1 被写体と撮影者の位置関係。中心の黒丸がブラックホール。内側の楕円は降着円盤内縁を表す。

\* 大阪教育大 Jun Fukue: Visual Relativity 8. Cosmic Maelstrom—The Accretion Disk

中性子星のような他の天体に比べもっとも単純だからである。宇宙のホールほとんどすべてはカー・ブラックホールだと思われるが、幸運なことに、われわれの目標は自転のないシュバルツシルト・ブラックホールだった。

ブラックホールはその名の通り、普通はまったく見えない。古今東西、いく人の人間がその姿をフォーカスしようと挑戦してきたかどうか知らないが、単独のブラックホールの写真を撮ろうとしても、真っ黒く写るのが関の山だったろう。

光でさえ出てこれないブラックホールを見ることは確かに難しい。これは黒い顔が闇夜に溶けるのと同じである。しかし闇夜の顔も背後から照明で照らせば、シルエットは見れるだろう。さらにひょっとすれば、顔の輪郭から誰だか見分けぐらいついかも知れない。

実際、今の場合も、周囲の光り輝くガス降着円盤の写真を撮ることにより、ブラックホールの存在が露わになってくるのである。

## ☆被写体 2 降着円盤

降着円盤には土星の環のように薄いやつも、ドーナツのように厚ぼったいやつもあるのだが、今回撮影したのは、幾何学的に薄い降着円盤だった。さらに図1に示したように円盤の中心には、ブラックホールの半径の3倍の半径を持つ円形の穴が開いている。これは連載第5回(1989年9月号)でもでてきた最終安定円軌道で、ブラックホールの近くでは、円運動にともなう運動エネルギー自体が重力として働くため、粒子が円軌道を維持できなくなるところである。この半径(限界安定半径)より内側では、幾何学的に薄い降着円盤は存在しないので、ここを降着円盤の内縁とした。なお図1で大きい方の楕円は、円盤であることを意味するために描いたもので、実際は円盤は周辺へずっと遠方まで広がっている。

幾何学的に薄い相対論的な円盤の標準モデルでは、円盤からの放射の輻射流束は次の式で与えられる:

$$F = \frac{3GM\dot{M}}{8\pi r_0^3} \frac{1}{(R-1.5)\sqrt{R^5}} \left[ \sqrt{R} - \sqrt{3} + \frac{\sqrt{1.5}}{2} \times \ln \left( \frac{\sqrt{R} + \sqrt{1.5}}{\sqrt{R} - \sqrt{1.5}} \frac{\sqrt{3} - \sqrt{1.5}}{\sqrt{3} + \sqrt{1.5}} \right) \right] \quad (1)$$

ただしここで  $R$  は、シュバルツシルト半径  $r_g$  を単位とした、降着円盤の赤道面内における中心からの動径距離であり、また  $\dot{M}$  はガス降着率である。

降着円盤の表面温度は、(1)式の輻射流束から、 $\sigma$  を

シュテファン・ボルツマン定数として、

$$T = (F/\sigma)^{1/4} \quad (2)$$

で与えられる。標準モデルでは、降着円盤の表面は黒体輻射をしていると仮定する。

上の (1) 式を微分すればわかるが、標準モデルでは輻射流束および温度は、およそ  $R=4.8r_g$  で最大となり  $R=3r_g$  で 0 となる。そこで質量やガス降着率の代わりに、 $\sim 4.8r_g$  での円盤の最大温度  $T_{\max}$  をパラメータとして用いよう。(1) 式と (2) 式から、 $\sigma T_{\max}^4 = 0.000917 \times 3GM\dot{M}/8\pi r_g^3$  となり、数値を代入して結局、

$$T_{\max} = 10^7 \text{ K } M_0^{-1/2} \dot{M}_{18}^{1/4} \quad (3)$$

が得られる。ただし  $M_0$  と  $\dot{M}_{18}$  は、それぞれ 1 太陽質量と  $10^{18} \text{ g} \cdot \text{sec}^{-1}$  を単位としたブラックホールの質量とガス降着率とする。

ここで紹介する写真では、写真うつり方がいいように、降着円盤内縁近傍のガスの温度  $T_{\max}$  を 1 万度 K とした (ま、一応は、活動銀河中心核に存在するタイプの降着円盤を考えている。銀河系内 X 線源のような恒星サイズのブラックホール周辺の場合は、降着円盤内縁近傍の温度は  $10^7 \text{ K}$  ほどにもなるだろう)。上に挙げた温度分布から、円盤のガスの温度は内縁近傍 ( $\sim 4.8r_g$ ) ほど高く、周辺に行くほど低くなっている。

なお円盤の回転はコンパクトディスクなどのようにどこでも同じ様に回転する剛体回転ではなく、中心ほど早く回る差動回転である。

☆撮影者

このようなブラックホール+ガス降着円盤に対して、撮影者は  $(r_0, \delta_0)$  に位置している (図 1)。ただし  $r_0$  はシュバルツシルト座標での中心からの撮影者の距離であり、 $\delta_0$  は降着円盤の赤道面から測った俯角とする。このうちで撮影者の距離は  $r_0 = 10^4 r_g$  に固定した。俯角はいくつかの場合を考える。ちなみにルミネは観測者を無限遠に置いた。

降着円盤は、撮影者から見て、その視線方向に対し反時計回りの方向に回転している。

☆光線の軌跡

円盤上のある点から発した光子はゼロ測地線に沿って旅し、観測者に受け取られる (あるいはフィルムを感光させる)。しかしここでは、フェルマーの原理にもとづき、撮影者から光の発した点まで連載第 6 回 (1988 年 11 月号) の (2) 式にしたがって、光線の軌跡を逆に追跡した (光線追跡法)。円盤上の光を発した点に到達した段階で、(1) 式と (2) 式から、その点の温度を評価した。

☆観測される輻射流束と観測される温度

連載第 1 回 (1988 年 1 月号) にもでてきたが、実際に観測される輻射流束  $F_{\text{obs}}$  と観測される温度  $T_{\text{obs}}$  は、相

対論的効果のために、(1) 式および (2) 式で与えられるものとは違う。すなわち赤方偏移を  $z$  として、

$$F_{\text{obs}} = F/(1+z)^4 \quad (4)$$

$$T_{\text{obs}} = T/(1+z) \quad (5)$$

となる。赤方偏移は、後述するように、円盤の回転に伴う撮影者に対するドップラー効果とブラックホールの存在による重力赤方偏移からなり、ルミネ (1979 年) の (19) 式で決定される。

3. ミ・レディ

さていよいよレディ——幾何学的に薄い降着円盤——の写真を幾葉かお見せしよう。

図 2 に示したのは、俯角を  $30^\circ, 20^\circ, 10^\circ$ 、そして  $5^\circ$  と変えた場合の、いろいろな姿である。撮影日時は 1987 年初夏。撮影諸元は、F 数が 8、シャッタースピードは 2 分の 1 秒で、フィルムは市販のものを用いた (ISO 100)。また撮影視野は、左右の差渡し  $50r_g$  程度 (奥行きは斜めからみているのもっとある) で、解像度は  $0.1r_g$  ぐらいだ。

全体の色調は、降着円盤表面の温度分布を反映して、中央の明るいところが白く、周辺の暗いところへいくにしたがい、黄色からオレンジ、赤へと変化している。あまりカラフルでないのは、降着円盤からのももとのスペクトルが連続的な黒体輻射なので、たとえば青や緑、紫が現れないためだ。

さてこれらの写真をいちべつして気付くのは、降着円盤が上下左右ともにゆがんだ、なかなか異様な姿をしていることである。円盤を赤道面近くから小さな俯角で見るほど、ゆがみ方は大きい。図 2 のように変形がゆがんだのは、もちろんブラックホールのせいなのだが、俯角が  $10^\circ$  の場合を例にとりて (図 3 上左 (=表紙))、少しばかりその謎解きをしておこう。

☆ただのガス円盤の場合

もしブラックホールがなくガス降着円盤だけがあった場合、しかも円盤が回転していない場合には (要するに普通の感覚では)、斜め上から  $10^\circ$  の角度で見おろすと、円盤は図 3 上右 (=表紙) のように見えるだろう。ガスの温度が高い中心部ほど明るく、しかも中心に開いたブラックホールの半径の 3 倍の半径の穴は、斜めから見ているために横に平べったい楕円に見えるはずだ。

☆ドップラー効果

まず図 3 上左 (=表紙) のゆがみのうち、左右の非対称性は円盤の回転によるドップラー効果が原因である。もしブラックホールはないとしてガス円盤の回転だけを考えて、図 3 下左 (=表紙) のような像が得られるだろう。写真の左側が明るいのは、図 4 左に示したように、円盤の向かって左側が撮影者に近づくように回って

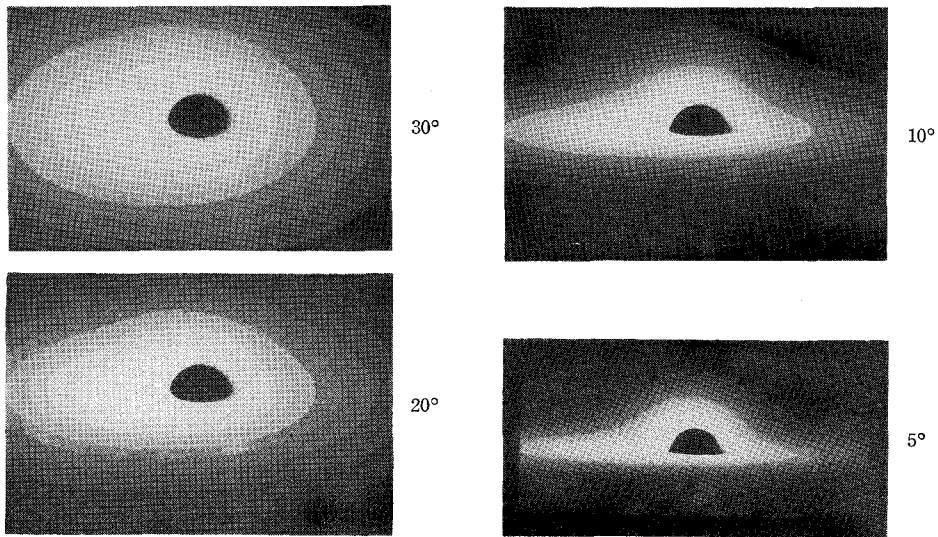


図2 いろいろな角度から見た場合の降着円盤の像。俯角は  $30^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $5^\circ$  である。

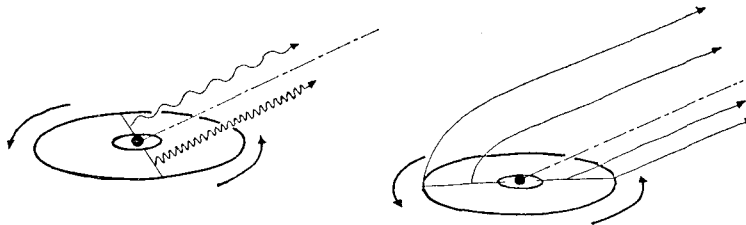


図4 ブラックホールのまわりの降着円盤像がいびつに見える理由。

左：降着円盤の回転によるドップラー効果。

右：ブラックホールの重力レンズ効果。

いるので、そこから放射された光は波長が短く青い方にドップラー偏移して、その結果エネルギーが高くなったためである。逆に右側からの光は、波長が長く赤い方に偏移して暗くなる。とくにブラックホール近くでは円盤は光速近くのスピードで回転しており、ドップラー効果の影響が非常に強く現れる。

#### ☆重力レンズ効果

一方、上下の非対称性の原因はブラックホールの強い重力場中の光線の曲がり、いわゆる重力レンズ効果である（連載第7回、1989年1月号）。たとえばもしブラックホールのみを置くと、図3下右（＝表紙）のようになるだろう（円盤の回転は考えない）。ガス円盤の手前側（写真では下側）から出た光は、ほぼ一直線に進んで撮影者に届くが、向こう側（写真では上側）から来る光は、ブラックホールの近くを通ってくるためにその経路が大きく曲がる。その結果、円盤の上半分が浮き上がって見えるのである。また横に細長い楕円状になるかと思われた円盤の中心の穴も、この歪みのために饅頭のように盛り上がって見えている。

実際は、降着円盤の回転によるドップラー効果と、重力場中での光線の曲がりの影響が合わさって、図2や図3上左（＝表紙）のように見えるのである。異様に歪ん

だ降着円盤の像は、ブラックホールによって歪められた時空のシルエットだといってもよいだろう。

#### ☆その他のコメント

まず写真中央の饅頭型の穴について：

注意1) 決して決して決して、ブラックホールがこういう形に見えるわけではない。ブラックホールはあくまでも球状で、もし見るとしたら、半径約  $2.6r_g$  の円として見える（連載第6回、1988年11月号）。

注意2) この饅頭型の穴は、 $3r_g$  にある降着円盤の内縁を表すのだが、左右の長さを測ると  $3r_g$  より長くなっている。この理由は、重力レンズ効果のために、見かけの大きさが単純に投影したものより大きくなっているためである。

注意3) 穴の右側の縁あたりをみると、降着円盤の表面温度が  $3r_g$  へ向かって0になっていることを反映して、暗くなっているのがわかる。

バグについて：プログラムに若干のバグがあったため、ごく初期にリリースした写真のいくつかには、ブラックホールのせいだけでなく、バグによるゆがみも生じていた。

その他、また色合いが階段的になっているのは、色調を16階調しか用いていないため。さらにブラックホー

ルの向こう側の浮き上がっている部分で縞模様みたいな錯覚が見えるのは、おそらく光線の軌跡の計算の終了判定が甘いためである。撮影には PC 98XA を使用した。

4. おわりに

今はまだ「コンピュータの中の宇宙」を撮影しただけだが、いつの日か現実の宇宙でもこのような写真を撮ることができるだろう。いや写真のように細かい分解こそできないが、現在でもガス降着円盤から発した光はX線天文衛星などで受け取っており、その光のメッセージは着実に解読されつつある。

実際、コンパクト天体のまわりの降着円盤が、相対論的な効果によっていびつに見えるという予想は、分解能の悪い現在でさえ、無視できない。たとえば、重力レンズ効果によって見かけ上、光度が大きくなる(カニンガム 1975年)。また内側の領域ほど、その効果は大きいので、スペクトルはハードになるだろう(チュルニーラ 1986年, 花輪氏 1989年)。降着円盤の掩蔽があれば、原理的には光度曲線が非対称になる(福江 1987年)。円盤上を熱点が軌道運動すれば、光度に大きな時間変動が見られるだろう(朝岡 1989年)。

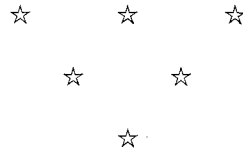
中心の天体がカー・ブラックホールの場合や、降着円盤がコロナを持つ場合、太り気味の円盤あるいは降着ト

ーラスの場合、さらにはジェットのある場合などの写真を撮影するのも今後興味深いだろう。

なお本稿で紹介した結果は、現大阪市立城東中学校教諭横山卓史氏との共同研究の一部です。また長い間、連載につき合って下さった読者の皆さん、月報編集部の皆さんに、この場を借りて感謝します。

参考文献

Asaoka, I. 1988, private communication.  
 Cunningham, C. T. 1975, *Astrophys. J.*, **202**, 788.  
 Czerny, B., Czerny, M. and Grindlay, J. E. 1986, *Astrophys. J.*, **311**, 241.  
 Fukue, J. 1987, *Nature*, **327**, 600.  
 Fukue, J. and Yokoyama, T. 1988, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **40**, 15.  
 Hanawa, T. 1989, private communication.  
 Luminet, J.-P. 1979, *Astron. Astrophys.*, **75**, 228.



お知らせ

三菱財団自然科学研究助成について

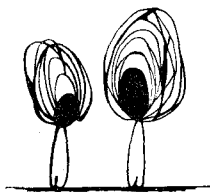
本会宛に表記の募集要項(1989年度)が来ています。応募を希望される方は学会事務所にご連絡下さるか、個別に下記宛「三菱財団自然科学研究助成応募要項」をご請求下さい。

宛先 財団法人 三菱財団

〒100 東京都千代田区丸の内 2-5-2

三菱ビル 15階 Tel. 03-214-5754

助成の金額は総額約2億2千万円、1件2千万円以内、研究期間は原則として1年、応募締切は1989年4月10日(月)必着。(極力早めにお出し下さい。)



ニューモデル・アストロマイドーム

(完全耐火構造)

当社は豊富な製作経験と独自の製作技術により美観、耐久性、経済性は抜群、アマチュア、一般向け安価マイドーム直径2~4m, オプション豊富で新登場。ドーム屋根、外装は耐蝕性に優れたカラーステンレス(18-8)フラットシーム葺、骨組は鉄骨構造で優れた特長をもっております。

★マイドームの特長★

- A. 高度な技術に基づく設計とニューモデル・アストロマイドームの構造美をフルに生かした優美なデザイン。
  - B. ドームの回転は当社独自の駆動システムにより静かにスムーズに駆動します。スリットドアの開閉操作も手軽に行なえます。
  - C. 風雪、風雨、台風等に完全に耐えうる二重安全システム装置が施されております。
  - D. その他、オプションとして、ウインドブレーカー昇降装置、パネルヒーター融雪装置、スリットドア電動開閉装置、二次風仕舞、他。
- ※天体ドーム、マイドーム、スライディングルーフなど詳しくはお問い合わせ下さい。

◆主な天体観測室ドーム納入先◆

宇宙科学研究所/東京大学教養学部/東京学芸大学/埼玉大学/福島大学/駿台学園一心荘(北軽井沢)/杉並区立科学教育センター/東海大学宇宙情報センター(熊本)/宇都宮子ども総合科学館 その他全国に150余基の実績。

アストロ光学工業株式会社

東京都豊島区池袋本町2-38-15 ☎03(985)1321