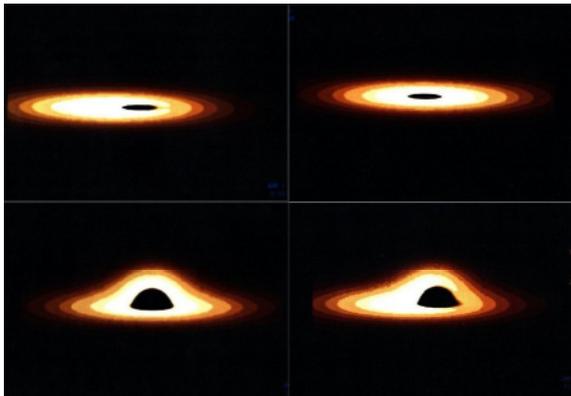






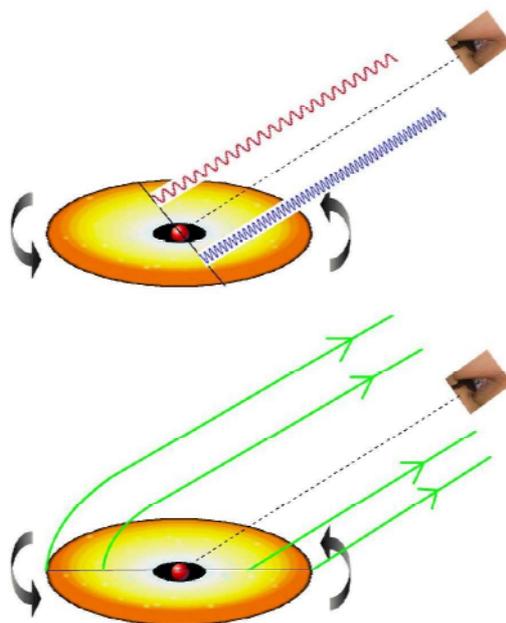
ルトの喉 (Schwarzschild throat) とも呼ばれるが、シュバルツシルト・ブラックホールの場合には、喉の半径はシュバルツシルト半径 (Schwarzschild radius) と呼ばれる。標準的な降着円盤、すなわち標準的なドレスの場合は、ドレスの襟はシュバルツシルト半径の3倍のところで断ち切られている。というのとは、ブラックホールの近く (シュバルツシルト半径の3倍より内側) では、ブラックホールのきわめて強い重力のため、ガスの回転運動が力学的に不安定になり、ガスが円盤状態を維持できずにブラックホールに即座に吸い込まれてしまうため、円盤のガス密度が急激に減少してしまうからだ。そのため、標準円盤では、シュバルツシルト半径の3倍より内側では光り輝くガスはほとんどない状態になっていて、円盤はそこで内縁 (inner edge) をもつ。この襟ぐり付近の問題については、4節でふたたび検討する。



<図3> 標準的なドレスを纏ったブラックホールのシルエット。幾何学的に薄く光学的に厚い標準的な降着円盤を俯角  $10^\circ$  から眺めた、(右上) 相対論的効果のない状況での見え方、(左上) 円盤ガスの回転に伴うドップラー効果だけを考慮したときの見え方、(左下) ブラックホールのまわりの光線の曲がりだけを考慮したときの見え方、(右下) 相対論的効果をすべて考慮した場合の見え方。可視光の波長領域での画像。

さらに、円盤のガスの温度は、写真写りがいいように中心付近で  $10$  万 K とした。したがって、今回の撮影では、活動銀河中心核の降着円盤を可視光で撮影したのだと考えてもらってよい (色目はやや強調してある)。このようなブラックホール+降着円盤に対して、撮影者は円盤面から俯角  $10^\circ$  の場所に陣取っている。最後に円盤は、撮影者から見て反時計回りの方向に回

っている。もし相対論的効果がまったくなければ (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右上のように見えるだろう。円盤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。ところが実際には、右下のような奇っ怪な表情だった。それなりの理由が2つある (図4)。

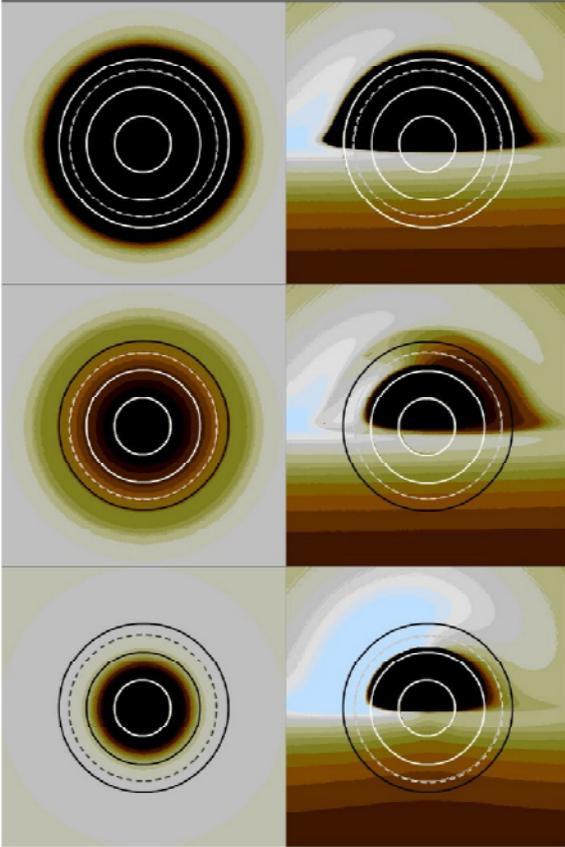


<図4> ドレスが歪む理由。ドレスの左右の非対称性は、円盤の回転に伴うドップラー効果が原因である。すなわち図の左側が明るいのは、円盤の向かって左側が撮影者に近付くように回っているのだから、そこから放射された光は波長が短く、青い方にドップラー偏移して、その結果エネルギーが高くなったためである。逆に右側からの光は、波長が長く赤い方に偏移して暗くなる。一方、ドレスの上下の非対称性は、ブラックホールの強い重力場による光線の曲がり原因である。ガス円盤の手前側から出た光は、ほぼ一直線に進んで撮影者に届くが、向こう側から来る光は、ブラックホールの近くを曲がる。その結果、円盤の上半分が浮き上がって見えるのだ。

円盤は左右にも上下にも歪んでいるが、まず左右の非対称性は、特殊相対論的なドップラー効果が原因である



いている場合である。ドレスの模様などが他のものとかかなり違うのがわかるだろうか？ \* 3

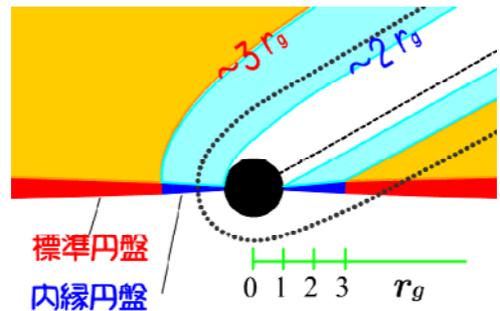


< 図 6 > < シャドー > 領域の拡大中央の < シャドー > 付近を拡大してみたもの。一番上の列は標準ドレス、真ん中の列は喉元までドレスがあり、一番下は喉下まで光り輝くドレスが続いている。左側は上から撮った写真で、右側は俯角 5° から撮った写真で、それぞれの写真の差し渡しは 10 シュバルツシルト半径である。実線で描かれた 3 つの円は、それぞれ、1 シュバルツシルト半径、2 シュバルツシルト半径、3 シュバルツシルト半径の円を表し、破線の円は、2.6 シュバルツシルト半径の円を表す。

新しいショットでは、襟ぐりの見え方、とくに中央にできるシルエットがシャドー > の大きさと形状に注目している。中央部を拡大した写真が図 6 である。図 6 は、図 5 に対応している。列が標準、ドレス、喉元まで、喉元まで光り輝いているドレスである。また左側が上から撮った写真で、右側が俯角 5° から撮った写真で、それぞれの写真の差し渡しは 10 シュバルツシルト半径である。写真に重ね

ていくつかの円が描いてあるが、実線で描かれた 3 つの円は、それぞれ、1 シュバルツシルト半径、2 シュバルツシルト半径、3 シュバルツシルト半径の円を表す。また破線の円は、2.6 シュバルツシルト半径の円を表す。実は、単独で存在するシュバルツシルト・ブラックホールの形式的な見かけの半径が、2.6 シュバルツシルト半径なのだ \* 4。

図 6 で強調したい点は、まず上方から見たとき、3 シュバルツシルト半径まで光っているのは標準ドレスで、1 シュバルツシルト半径より大きい場合は、1 シュバルツシルト半径より大きい目だといふ点だ。これは、光の曲がり具合が働き、標準ドレッシングの効果が 3 シュバルツシルト半径より大きく働いてくる。お、真横方向から見ると、シャドー > の形は円形ではなくなり、手前側がブラックホールの影の射影効果のためである。以上様子は図 7 で示すとおりだ。



< 図 7 > < シャドー > の説明図。右上からブラックホール & 降着円盤を覗いているときの、標準円盤の内縁 (3 シュバルツシルト半径) から発した光線の軌跡と、ブラックホールの喉元で光っている円盤の最内縁 (1 シュバルツシルト半径) から発した光線の軌跡を表したものである。破線は単独のブラックホールの見かけの大きさを表す、遠方で 2.6 シュバルツシルト半径となる光線の軌跡。目盛りなどの単位は シュバルツシルト半径を表す。

## 今後の期待：観測

今回紹介した時空のシルエット、いつの日になったら観ることができるといえるだろう。10数年前にはじめて計算した頃は、実際に観ることなど、とうぶらん無理だろうと思っていた。だからこれ一セッションしたわけだ。しかし、技術の進歩は早い。ブラックホール&降着円盤システムの実写は、もはや夢物語ではないかもしれない。次期スペースVLBI-VSOP2などをもってすれば、ブラックホール周辺の解像が可能になるかもしれないという5) 6)。そこで、われわれの銀河系中心核の場合について、少し数値をあたっておこう4)。

われわれの銀河系の中心核、いて座A\*には、さまざまな証拠から、260万太陽質量程度の巨大ブラックホールがあると考えられている。したがって、シュバルツシルト半径は約77億mとなり、銀河系中心までの距離を考えると、その見かけの半径は約6マイクロ秒角に相当する。

さて今回示した結果によると、もし銀河系中心のブラックホールが光り輝くドレスを纏っていたら、3シュバルツシルト半径までしかない標準ドレスの場合、<シャドー>の見かけの大きさは差し渡し6シュバルツシルト半径程度、すなわち36マイクロ秒角ぐらいになる。また喉元まで光るドレスがある場合は、<シャドー>の見かけの大きさは差し渡し4シュバルツシルト半径程度になる。また銀河系中心の場合は、おそらく円盤を真横方向から見ていることになるだろうから、<シャドー>の形は半円として見えるだろう。数年後の観測に期待したいものである。

なお、今回は着せていないが、厚みをもった超臨界降着円盤-ウエディングドレス? や、光学的には薄い幾何学的に厚い降着円盤-薄いレースのウエディングドレス-なども興味深いだろう。また、光る衣を纏わない単独のブラックホールも、ガス物質を吸い込むことによって輝く効果や、ブラックホールの重力レンズ効果による背景の星のパターン変動によって、“観測”ことができるかと推測している。今回は紙数の関係もあり省略したが、興味のある方は筆者のホームページ (<http://quasar.cc.osaka-kyoiku.ac.jp/~fukue>)などを参照されたい。視えないはずのブラックホールを観る研究は、まだまだこれからである。

## 参考文献

- 1) J.-P. Luminet: *Astron. Astrophys.* 75, 228 (1979).
- 2) J. Fukue and T. Yokoyama: *Publ. Astron. Soc. Japan* 40, 15 (1988).
- 3) C. Fanton et al.: *Publ. Astron. Soc. Japan* 49, 159 (1997).
- 4) J. Fukue: *Publ. Astron. Soc. Japan*, in press (2003).
- 5) M. Miyoshi and S. Kamen: *IVS 2002 General Meeting Proceedings*, in press (2002).
- 6) R. Takahasi and S. Mineshige: in preparation (2002).

## [注]

\*1: 専門的には、標準モデルでは、円盤ガスの運動は、相対論的なケプラー一回転をしており半径方向の落下速度は非常に小さい。円盤ガスの表面温度分布は、中心に向かって半径の $-0.75$ 乗で増加し、中心付近の最大温度は、今回の例では活動銀河中心核を念頭に置いて、10万Kと設定してある。写真の色変化は、橙色、黄色、薄い灰色、青みがかかった白の順に温度が高くなっている。

\*2: この例では、円盤ガスの運動は、3シュバルツシルト半径より外側では標準モデルと同じだが、内側では、単位質量当たりの角運動量もエネルギーも一定で落下していると仮定した(共に、3シュバルツシルト半径での値を与えてある)。また円盤ガスの表面温度は、3シュバルツシルト半径より内側では7000Kだと仮定した。

\*3: 最後の例では、円盤ガスの運動は、円盤全体にわたって、単位質量当たりの角運動量は一定だと仮定した(具体的には、3シュバルツシルト半径での値を与えた)。また単位質量当たりのエネルギーも一定と仮定した(具体的には、静止質量相当分のみとした)。また円盤ガスの表面温度分布は、半径のべき乗で変化すると仮定したが、この例では、中心に向かって半径の $-0.5$ で増加すると仮定した。さらにシュバルツシルト半径のそばでの最大温度を10万Kと置いた。

\*4: 無限遠から入射した光線の衝突パラメータが、 $\sqrt{27/4} = 2.6$ シュバルツシルト半径より大きければ、その光線はブラックホールに吸い込まれないが、2.6シュバルツシルト半径より小さな衝突パラメータをもつ光線はブラックホールに吸い込まれてしまう。