

# ブラックホールと降着円盤の研究

金光研究室 本村 沙耶香

## 1. 序論

地球でも月でも太陽でも、天体といえば、大概が「丸い」と相場が決まっている。尤も、回転が入れば別である。例えば、土星の輪、太陽系、そして銀河系や他の円盤銀河などは、どれも偏平な円盤状である。ただし、これらは、互いに重力以外の相互作用をしない粒子からできた系であり、星のような重力以外の相互作用を持つガス系は、やはり丸いというのが常識であった。

ところが、近年このような天体に対するイメージが大きく変わってきている。ガス系でも極度に回転が大きいため、偏平な円盤状になった天体がクローズアップされてきたからである。その名を降着円盤 (Accretion Disk) という。降着円盤は、簡単に言うと、重力源である中心の天体 (恒星、原始星、白色矮星、中性子星、ブラックホール) の周囲をめぐるガスの円盤である。

本研究では、ブラックホールと降着円盤について調べ、ブラックホールのまわりの降着円盤を観察できるようなパソコンシミュレーションを作る。

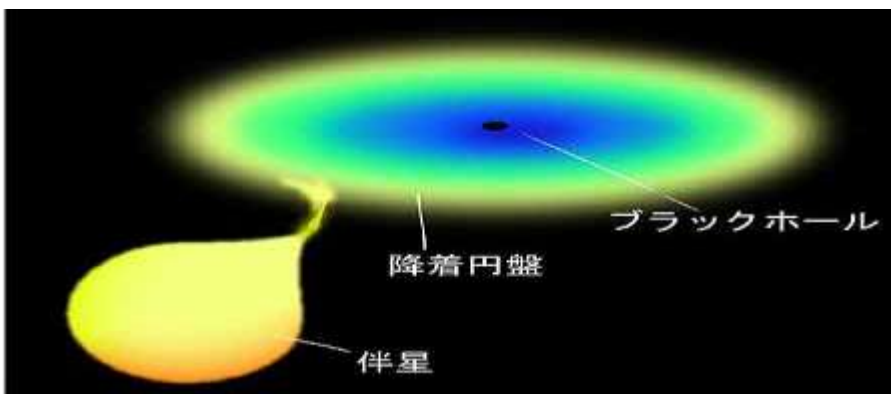
## 2. ブラックホール

ブラックホールは莫大な重力のために光さえ外に出ることができない天体である。普通、星が球状の姿を保っているのは、重力と圧力が釣り合っているためである。しかし非常に強い重力を及ぼす星では、力の釣り合いを保てずに重力崩壊を起こして収縮を続け、最後には一点に崩壊してしまう。これがブラックホールが創られる大まかなシナリオである。

1916年カール・シュバルツシルトは、アインシュタインの一般相対性理論から重力場を記述する最初の解を見つけた。それは、質量をもつ「もの」の大きさをどんどん小さくして、ある大きさ以下にすると、そこからは光さえも出ることができなくなるということを予言するもので、ブラックホールという概念の誕生であった。この「ある大きさ」は、発見者の名前にちなんで「シュバルツシルト半径」と呼ばれている。例えば、太陽なら半径を3 kmに、地球なら1 cmにまで縮めるとブラックホールになるということである。

## 3. 降着円盤

降着円盤とは、原始星 (PS) ・白色矮星 (WD) ・中性子星 (NS) ・ブラックホール (BH) など、重力を及ぼす天体のまわりに形成された回転ガス円盤のことである。宇宙の様々な階層で発見されており、星形成やX線星や、クェーサーや宇宙ジェットなど、しばしば活動的な現象を引き起こしていると考えられている。



左図は、ブラックホールと降着円盤の想像図。

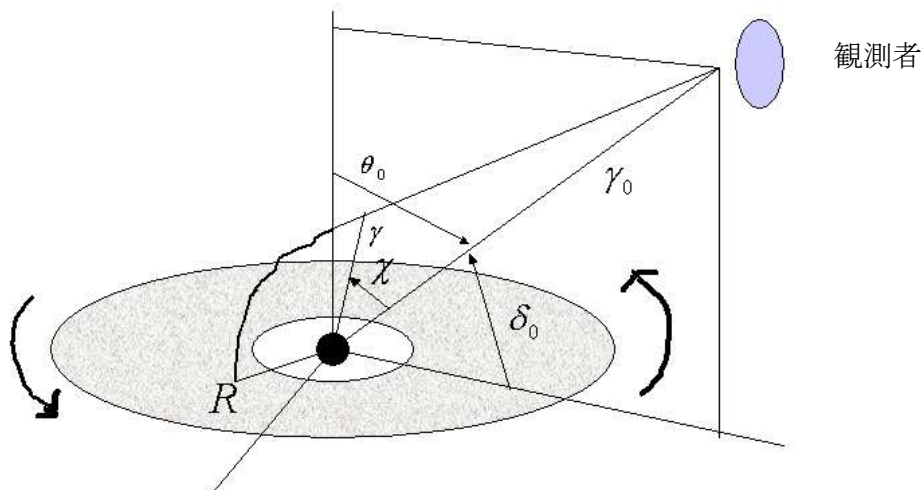
光を出さないブラックホールをどうやって見ることができるのだろうか。手がかりは「ものがブラックホールに落ちる」ことにあり、ブラックホールが普通の星と近接連星系をなしている場合、相手の星の外層大気がブラックホールの強い重力に引かれ、ブラックホールのまわりを少しずつ回転しながら落ち込んでいく。このようにして形成されるガス円盤を「降着円盤」と呼んでいる。ブラックホールの極めて強い重力のため、ガスは激しく回転し、膨大な摩擦熱によってこの円盤の中心近くではガスの温度は数百万度から 1000 万度にもなって、X 線で明るく輝く。このような X 線を観測することによって、ブラックホールを間接的に見るのできるのである。

降着円盤は中心に向かうほど温度が高くなり、最も中心に近いところでは X 線が放射される。では、「最も中心に近いところ」とはどこだろうか。ブラックホールには「表面」はないが、ブラックホールが降着円盤の中心にいる以上、円盤はどこまでも存在するわけではなく、あるところで消えてしまう。そこより内側では、円盤を作っていたガスはもはやブラックホールの周りを安定に回ることができなくなり、ブラックホールに落ちていくのである。理論的には、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周りを安定に回転できる軌道は存在しない、と考えられている。よって、降着円盤の最も内側の半径はシュバルツシルト半径のちょうど 3 倍に一致しているのではないかと考えられている。

降着円盤は、円盤の温度が高いほど、また面積が大きいほど明るくなり、X 線での観測は降着円盤の中心付近をみているので、X 線スペクトルから降着円盤の最も内側の半径を直接測定することができるのである。ブラックホール連星の多くは明るさが大きく変化し、中には 10 倍以上の変動を見せるものも少なくない。また、X 線でだんだん暗く(明るく)なるにつれて、円盤の温度は低く(高く)なるけれども、円盤の内側の半径は常に一定に保たれているということが観測からわかり、これは円盤の半径が、相手の星から落ちてくるガスの量に関係なくブラックホール自体の性質で決まる、ということの強い証拠になっている。

#### 4. シミュレーション

まず、被写体と撮影側の位置関係について説明する。



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。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。

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

ただし、ここでRは、シュバルツシルト半径 $\gamma_g$ を単位とした、降着円盤の赤道面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。

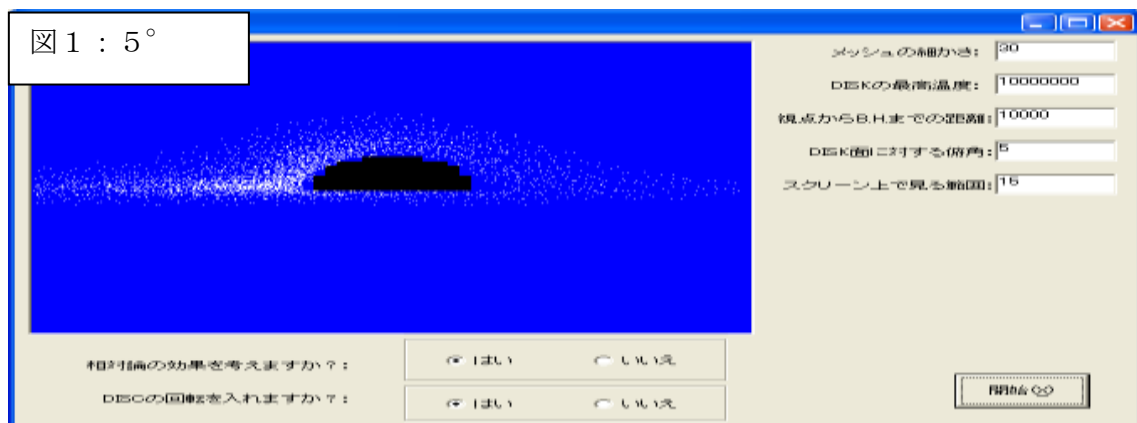
降着円盤の表面温度は、(1)式の輻射流束から、 $\sigma$ をシュテファン・ボルツマン定数として、 $T = (F/\sigma)^{1/4} \dots (2)$ で与えられる。標準モデルでは、降着円盤の表面は黒体輻射をしていると仮定する。

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

$T_{\max} = 10^7 KM_0^{-1/2} \dot{M}_{18}^{1/4}$ が得られる。ただし、 $M_0$ は1太陽質量を単位としたブラックホールの質量、 $\dot{M}_{18}$ は $10^{18} \text{ g sec}^{-1}$ を単位とした降着率とする。

このようなブラックホールとガス降着円盤に対して、撮影側は $(\gamma_0, \delta_0)$ に位置している。ただし、 $\gamma_0$ はシュバルツシルト座標での中心からの撮影側の距離であり、 $\delta_0$ は降着円盤の赤道面から測った俯角とする。撮影側の距離は十分遠方( $\gamma_0 = 10^4 \gamma_g$ )に固定した。俯角はいくつかの場合を考える。なお、降着円盤は、撮影側から見て、その視線方向に対し反時計回りの方向に回転している。

プログラムを実行し、まず像の縦横をいくつぐらいのメッシュに分割するのかが入力し、次に降着円盤の内縁近傍の温度( $T_{\max}$ :降着円盤の最高温度)を入力する。さらに、観測側の位置( $\gamma_0$ :観測側の距離、 $\delta_0$ :観測側の俯角)を、それぞれシュバルツシルト半径と角度を単位として、入力する。また、スクリーン上で見える範囲はシュバルツシルト半径を単位にして、SIZE:表示範囲を入力する。最後に相対論の効果と降着円盤の回転を入れるかどうかを、それぞれ選択する。相対論の効果を入れると、光線の曲がりを計算して重力レンズ効果が現れ、円盤の回転を入れると、回転に伴うドップラー効果が考慮される。



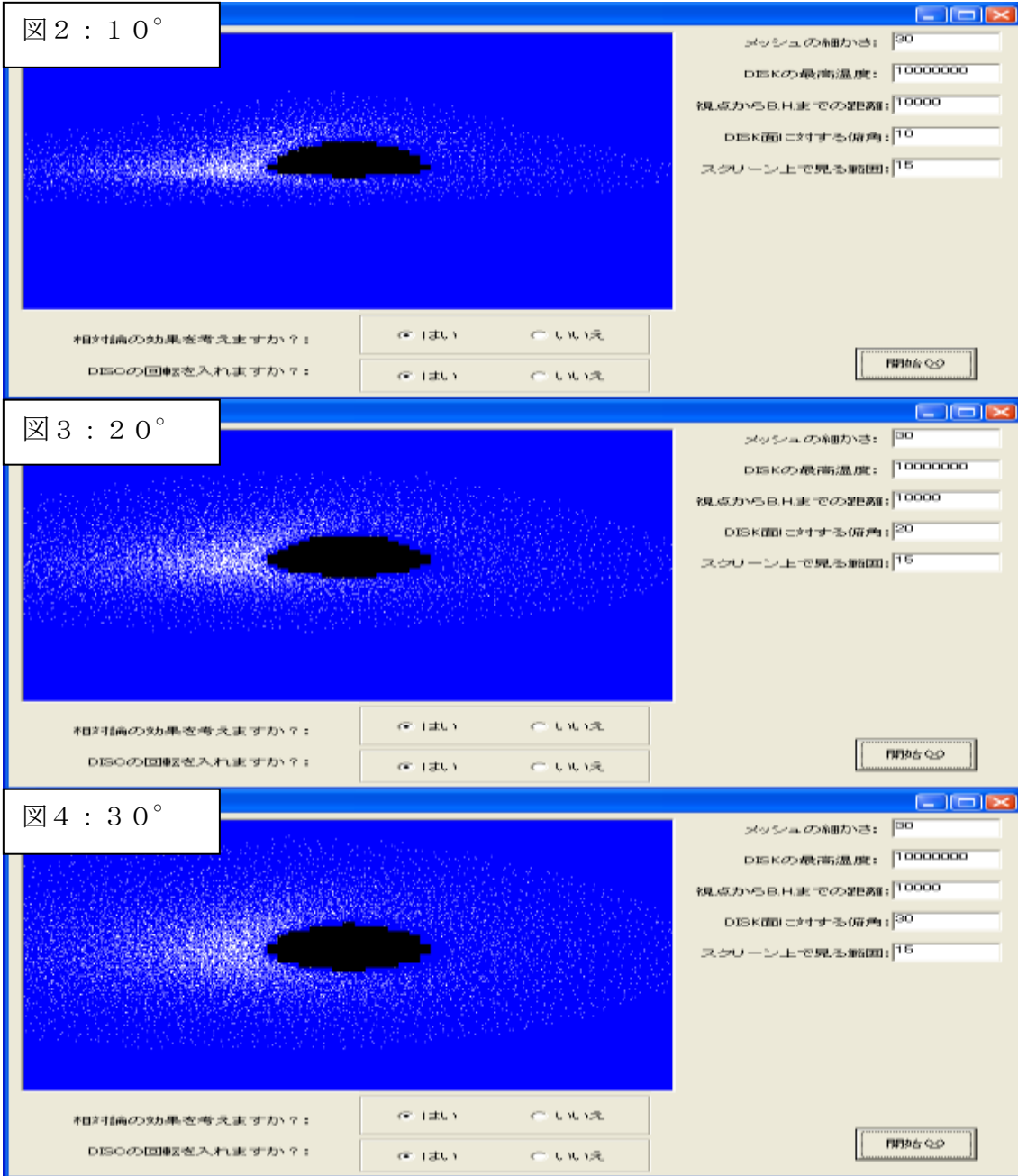


図1から図4に示したものは、俯角を $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ と変えた場合のブラックホールのまわりの降着円盤の姿である。全体的に、降着円盤が上下左右ともに歪んだ異様な姿をしていて、円盤を赤道面近くから小さな俯角で見るほど、歪み方は大きい。

## 5. まとめ

今回の研究では、標準的な降着円盤を用いてシミュレーションしたが、別のタイプの降着円盤にも適用できるようにすることが課題である。また、視覚的に捉えやすいように、シミュレーションの図を曲線的に描けるようにプログラムを改善していく必要がある。