

バイナリーブラックホール降着円盤の重力レンズ撮像

伊地知 翔真 (京都大学大学院 理学研究科)

Abstract

銀河は合体しながら成長すると考えられているが、その際に中心部分のブラックホール同士はバイナリーブラックホールと呼ばれる連星系を形成するはずである。しかし、サブパーセクスケールのバイナリーブラックホールは未だに同定されていない。そこで本研究では、サブパーセクスケールのバイナリーブラックホールにおける各ブラックホール周囲の降着円盤が実際に撮像された時にどのような性質が得られるのかを重力レンズ撮像シミュレーションによって調べた。本研究は二段階で行った。まずはじめに、シュバルツシルト時空の測地線方程式を解いて単一のブラックホール近傍の光子の軌道を計算し降着円盤の撮像計算を行った。その結果、撮像フラックスや降着円盤スペクトルは先行研究と一致することを確認した。次に、この手法をサブパーセクスケールのバイナリーブラックホールへと拡張する。各ブラックホール周囲に降着円盤があると仮定すると、重力レンズ効果により降着円盤の像を歪め合うはずである。数値計算の結果、重力レンズによる歪みに加えて、像の位置変化と光度変化が得られた。像の位置の変化については重力レンズによる像の屈折が原因であり、これは近似計算をすることで計算の妥当性を確認した。光度の変化は単一のブラックホールの場合には見られない増光機構であり、最大で 10 倍もの光度変化が生じることが分かった。

1 Introduction

宇宙にある大半の銀河の中心には太陽質量の数十万～数百億倍もの超大質量ブラックホールが存在すると考えられているが、その形成や成長過程はよく分かっていない。銀河は銀河同士の衝突合体によって成長するのは良く知られている。同様にそれぞれの銀河の中心のブラックホール同士も合体し成長する ($M-\sigma$ 関係, Haring et al. (2004)) とすれば、合体銀河の中心でブラックホール同士のバイナリー (バイナリーブラックホール) が必然的に形成されるはずである。そして周囲のガスによる粘性や重力波の放出によって角運動量を失い、最終的に衝突してひとつの大きなブラックホールが作られると考えられる (Hayasaki et al. 2007)。しかし、サブパーセクスケールのバイナリーブラックホールはいくつかの候補天体が指摘されているものの未だに同定されていない (Yokosawa and Inoue 1985; Sudou, et al. 2003; Sillanpaa et al. 1988)。一方、近年の観測技術の向上によって、近い将来には直接ブラックホール近傍の撮像も期待されているため、ブラックホールの撮像シミュレーションは急務の課題となっている。そこで本研究では、サブパーセクスケールのバイナリー

ブラックホールにおける各ブラックホール周囲の降着円盤が実際に撮像された時に、どのような性質が得られるのかを重力レンズ撮像シミュレーションによって調べた。

2 Methods

本研究ではまず単独のシュバルツシルト・ブラックホールとその周りにある標準降着円盤を仮定し、レイ・トレーシングを行った (Luminet 1979; Fukue and Yokoyama 1988)。降着円盤から出た光が遠方の観測者に届くまでの経路は一般相対性理論における測地線方程式 (1) に従う。

$$\frac{d^2}{d\phi^2} \left(\frac{1}{r} \right) + \frac{1}{r} = \frac{3GM}{c^2} \frac{1}{r^2} \quad (1)$$

ここで G は重力定数、 M は中心天体 (ブラックホール) の質量、 c は光速、 r と ϕ は二次元極座標を表す。この式を逆方向へ解くことによって降着円盤のどの位置から出た光なのかを求める手法がレイ・トレーシング (光線追跡法) である。一般相対論的な標準降着円盤の温度分布は Page and Thorne (1974) における計算結果を用いており、それにより円盤表面

からの放射フラックス (式 (2)) は降着率と放射位置の円盤半径によって一意に決まる。

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

ここで \dot{M} は降着率、 $r_s \equiv 2GM/c^2$ はシュバルツシルト半径、そして半径 R は r_s 単位で書かれており、 $F(R)$ が半径 R からの放射フラックス (次元: [erg/s/cm²]) を表している。さらにこれに円盤回転によるビーミング効果と重力赤方偏移効果を加味し、観測者のスクリーン上へ到達するフラックスとして計算・描画した。降着円盤と観測者の位置関係を図 1 に示す。

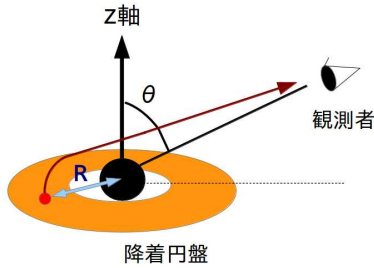


図 1: ブラックホール、降着円盤と観測者の位置関係

次に、二つの大質量シュバルツシルト・ブラックホールがサブパーセクスケールで回転しているバイナリーブラックホールモデル (図 2) を考えた。ブラックホール同士は十分に離れているとし、それぞれ独立な重力場を持つとしてレイ・トレーシングを行う。それぞれが降着円盤を持っていると仮定し、公転することで降着円盤の画像は時間によって変化すると予測される。また、手前のブラックホールの重力によって像は曲げられ、edge-on に近いほど曲りは大きくなるだろうとも予測される。

3 Results

単独シュバルツシルト・ブラックホールでのレイ・トレーシング撮像結果を図 3, 図 4 に示す。ブラックホールの質量は $10M_\odot$ とし、降着円盤内縁は $3r_s$ 、外縁は $1000r_s$ 、降着率は $\dot{M} = \dot{M}_{\text{crit}} \equiv L_{\text{Edd}}/c^2$ とした。観測者は $10^6 r_s$ 離れているとし、スクリーンは

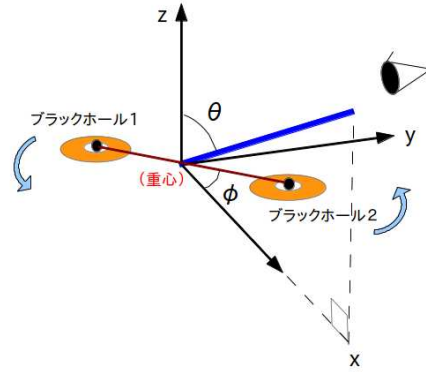


図 2: バイナリーブラックホールと観測者の位置関係

$30r_s \times 30r_s$ 、解像度は $0.05r_s$ としている。図 3 は inclination angle が $\theta = 0$ [deg] つまり face-on から見た図で、内縁から離れたところではほぼ R^{-3} でフラックスが落ちていく (cf. 式 (2))。中央の黒い穴はブラックホールを示している。図 4 は $\theta = 80$ [deg] のほぼ edge-on から見た図であり、上下左右に非対称な円盤画像が見て取れる。上下方向に非対称なのは強い重力によって光が曲げられ、ブラックホール後ろ側の円盤が浮き上がって見えているからである。左右方向の非対称性は円盤回転によるビーミング効果が原因であり、視線方向に対して反時計回りに回転しているために円盤左側のフラックスが強められているのが分かる。円盤内縁よりも内側には、ブラックホールの側を複数回回転して円盤に到達する光 (multiple images と呼ばれる) も見られたが、光度は極端に少ないので観測には適さないだろう。なお、これらの画像は全波長帯で積分した Bolometric フラックスを示している。また、X 線領域や可視光領域の各領域で積分したフラックス画像も計算した。X 線領域の場合ではフラックスはほとんど変わらなかったが可視光域では緩やかなコントラストを描いていた。

最後に、バイナリーブラックホールモデルでの計算結果を示す。各ブラックホールの質量は $5 \times 10^7 M_\odot$ 、ブラックホール間距離は 0.01 [pc] $\simeq 2 \times 10^3 r_s$ 、降着率は $\dot{M} = 0.05$ [M_\odot/yr]、公転周期は $P_{\text{orb}} \simeq 9.4$ [yr] とした。降着円盤の前にもうひとつのブラックホールがあるとき、 θ を変化させると図 5 のように θ が大きくなるほど像が歪められている様子が見られた。図 6 は $\theta = 90$ [deg] の edge-on から見た場合に、公

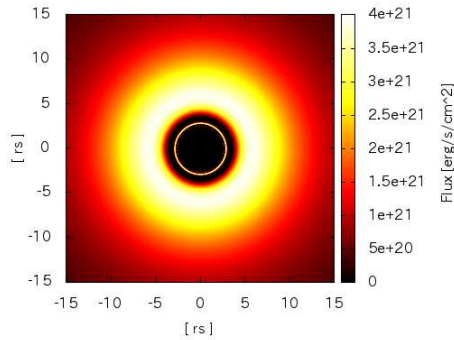


図 3: $\theta = 0$ [deg] より見た降着円盤の Bolometric フラックス画像。横軸、縦軸は r_s 単位でのスクリーンの大きさを示す。中央の黒い穴はブラックホールを表す。式 (2) より、フラックスの強さは外縁へ向けて R^{-3} で落ちていく。

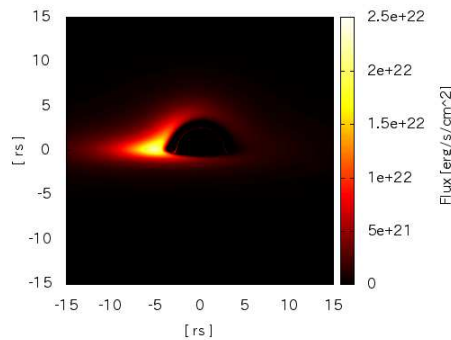


図 4: $\theta = 80$ [deg] より見た降着円盤の Bolometric フラックス画像。ブラックホールの強い重力と円盤回転のビーミング効果により上下左右非対称な像となっている。

転運動により手前のブラックホールが奥側のブラックホールの前を通り過ぎるときにアインシュタインリングをつくる様子を表している。また、スクリーン上で積分した光度の変化を表しているのが図 7 である。縦軸は最大値で規格化した光度 (次元:[erg/s])、横軸は公転の回転角 ϕ [deg] にとっている。それを異なる inclination angle θ [deg] ごとにプロットしている。図 7 を見ると inclination angle が $\theta = 88$ [deg] 以上の場合に、アインシュタインリングができるときに光度が増加しているのが分かる。 $\theta = 90$ [deg] ではおよそ 10 倍もの光度増加を引き起こしている。

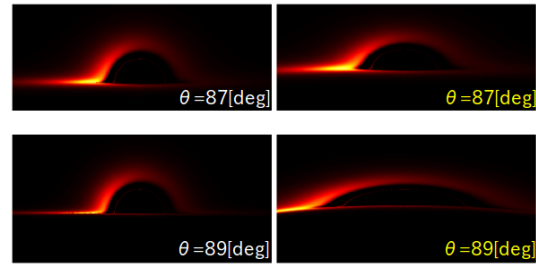


図 5: 左側二つは降着円盤画像 (図 4) における θ の値を変えた画像。右側二つはそれらが、手前にあるもうひとつのブラックホールによって像が歪みを受けている様子を表している。

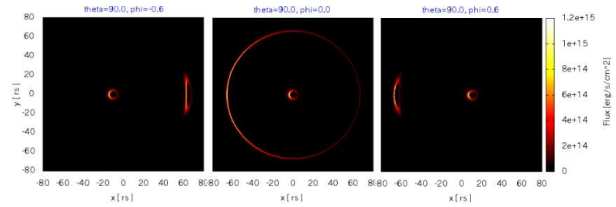


図 6: バイナリーブラックホールが公転運動することによりアインシュタインリングができる様子。inclination angle は $\theta = 90$ [deg] (edge-on) に固定している。左から順に、公転の回転角 $\phi = -0.6, 0, 0.6$ [deg] ごとに撮像したもの。

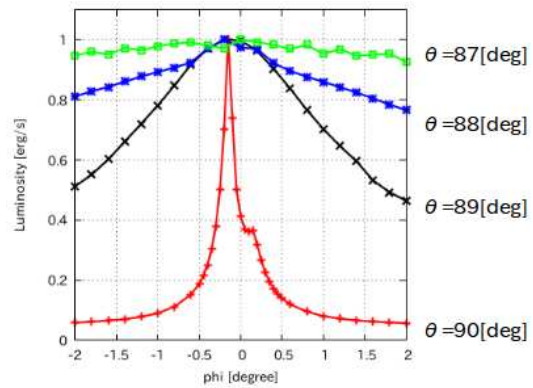


図 7: バイナリーブラックホールの公転運動により光度変化が起こる様子。縦軸は最大値で規格化した光度 (次元:[erg/s])、横軸は公転の回転角 ϕ [deg] にとっている。それを異なる inclination angle θ [deg] ごとに色別でプロットしている。

4 Discussion & Conclusion

本研究ではシュバルツシルト・ブラックホールまわりの相対論的降着円盤の撮像計算を行った。強い重力場と円盤回転によるビーミング効果による非対称性を持つ特徴的な円盤画像が得られた (図 3, 図 4)。この撮像結果と降着円盤スペクトルは先行研究の結果と一致させることができた (Luminet 1979; Takahashi and Watarai 2007; Takahashi and Harada 2010)。また、X 線領域ではフラックスはあまり変わらないが可視光域では緩やかなコントラストを描いた。この理由としては、 10^7 [K] の黒体放射は 2.4 [keV] にピークがあるため、X 線が支配的である。そのため、X 線の画像と Bolometric 画像はあまり変わらず、円盤の外側へ向けてフラックスは R^{-3} で急激に落ちる (cf. 式 (2))。一方、可視光のスペクトルは降着円盤スペクトルの Rayleigh-Jeans slope にあたり、フラックスは R^{-4} に依存するため Bolometric に比べコントラストは緩やかになっていると考えられる (Fukue and Yokoyama 1988)。

そして、バイナリーブラックホールでの撮像計算も行った。降着円盤の前にもうひとつのブラックホールがあるとき、その重力場によって像が歪むことが確認された (図 5)。なお、像の歪みに加えて像の位置変化も観察されたが、これについては近似測地線方程式を解くことにより位置変化の大きさを計算することができ、レイ・トレーシングの計算結果が妥当であることを示せた。バイナリーブラックホールが公転運動する際はアインシュタインリングが見られる場合があり (図 6)、このリングも前述のように近似測地線方程式によって位置が予測でき妥当な計算結果であることを示せた。特に、edge-on に近いほど光度が 10 倍も変化していることが分かった (図 7)。この増光は、降着円盤がビーミング効果によりフラックスを強めている部分 (図 4 左側) から出た光が、手前側のブラックホールによって進路を曲げられスクリーンへ集中的に当たっているためである。これは Hayasaki et al. (2008); Yan et al. (2014) に挙げられているような増光とは異なる増光機構であり、バイナリーブラックホールの新しい観測的手段を提供できるかもしれない。

Acknowledgement

共同研究者の方々や本研究について有益な議論をして下さった皆様に感謝申し上げます。

Reference

- Fukue, J. and Yokoyama, T. 1988, PASJ, 40, 15
- Haring, N. and Rix, H. -W. 2004, ApJ, 604, L89
- Hayasaki, K., Mineshige, S., and Sudou, H. 2007, PASJ, 59, 427
- Hayasaki, K., Mineshige, S., and Ho, L., C. 2008, ApJ, 682, 1134
- Luminet, J. -P. 1979, A&A, 75, 228
- Page, D. N. and Thorne, K. S. 1974, ApJ, 191, 499
- Sillanpaa, A., Haarala, S., Valtonen, M. J., Sundelius, B., and Byrd, G. G. 1988, ApJ, 325, 628
- Sudou, H., Iguchi, S., Murata, Y., and Taniguchi, Y. 2003, Science, 300, 1263
- Takahashi, R. and Watarai, K. 2007, MNRAS, 374, 1515
- Takahashi, R. and Harada, T. 2010, CQG, 27, 075003
- Yan, C. -S., Lu, Y., Yu, Q., Mao, S., and Wanbganss, J. 2014, ApJ, 784, 100
- Yokosawa, M. and Inoue, M. 1985. PASJ, 37, 655