

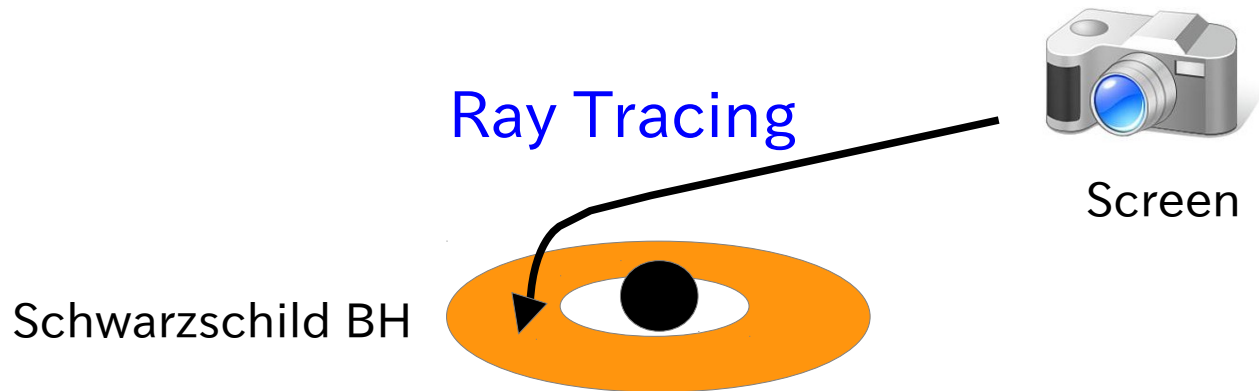
2014/02/02(日)
BH研究会発表

「Binary Black Hole (BBH)による
重力レンズ写像」

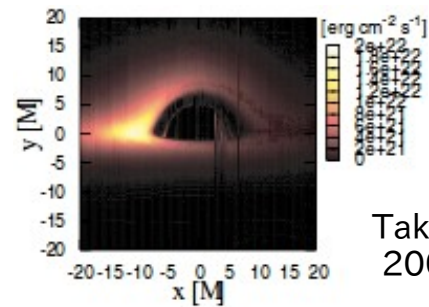
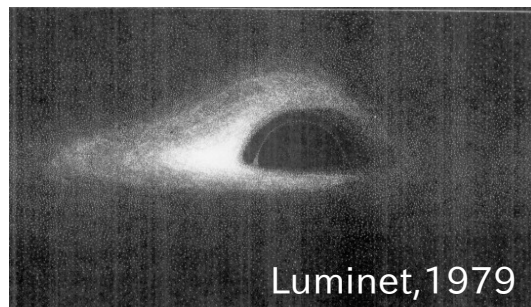
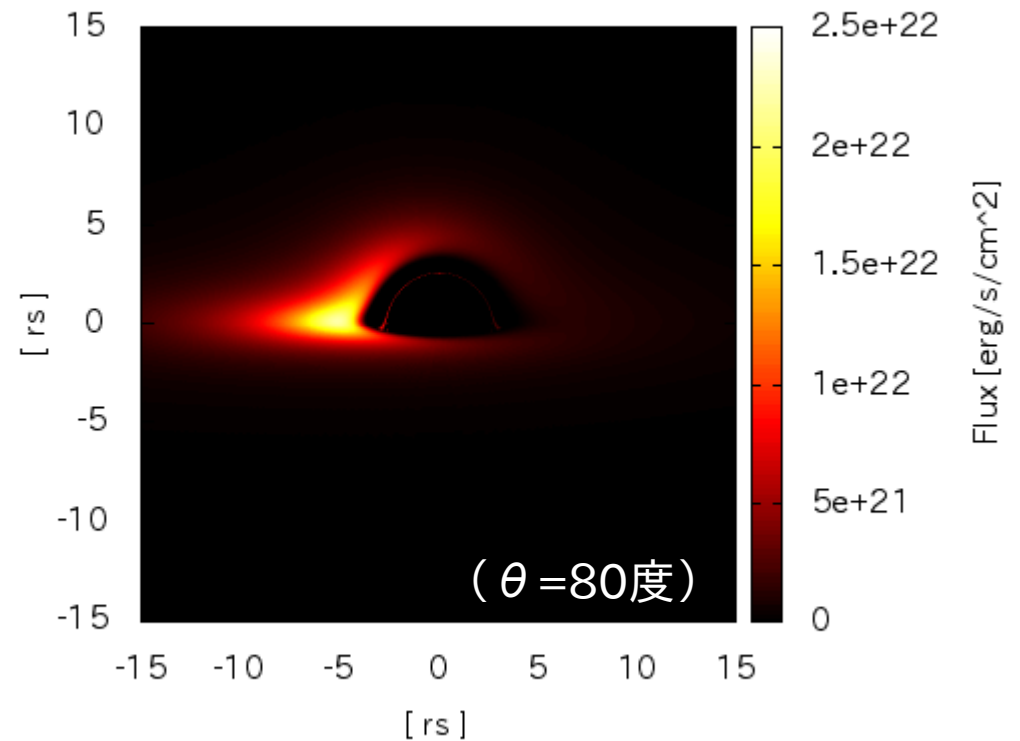
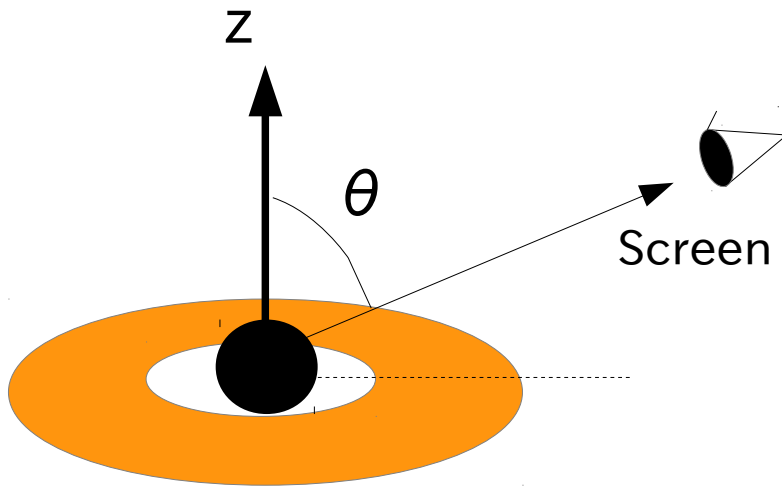
京大宇宙物理学教室M1 伊地知翔真

Abstract

- 測地線方程式を用いた ray tracing を行い、降着円盤画像のシミュレーションを行った (Luminet, 1979 ; Fukue+, 1988)
- 単独 Schwarzschild BH でテストを行い、それを Binary BH (BBH) の場合へ拡張した



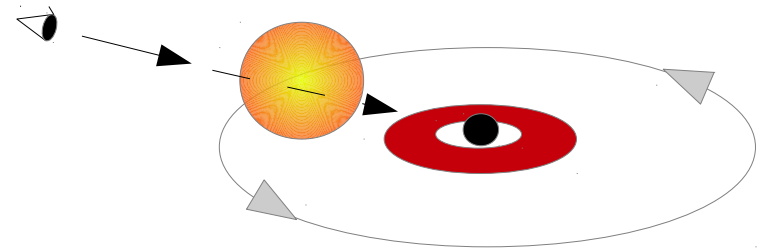
単独 Schwarzschild BH でのテスト



Takahashi+,
2007

応用例

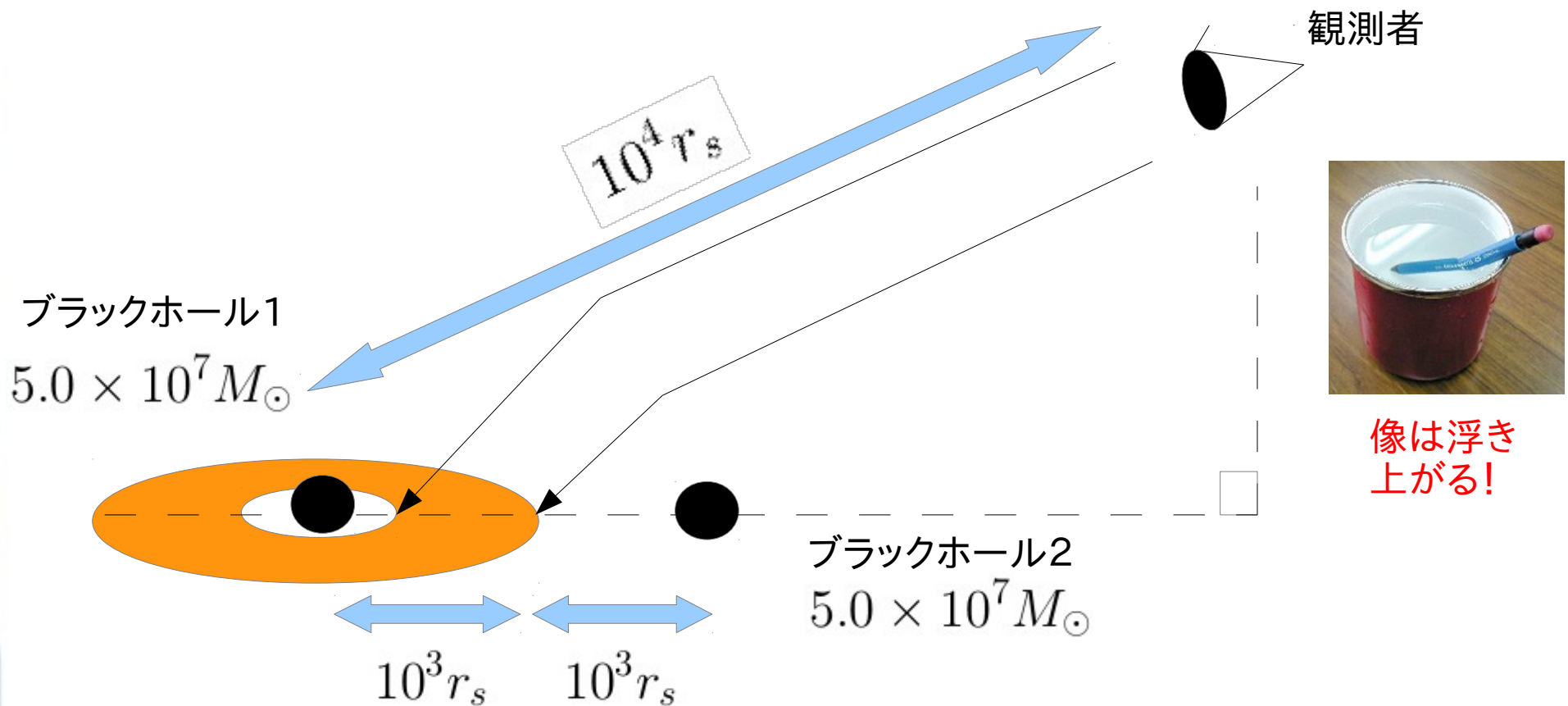
- 降着円盤の、伴星による「食」における光度変化
- Binary Black Holeでの重力レンズ効果を受けた写像



Screen

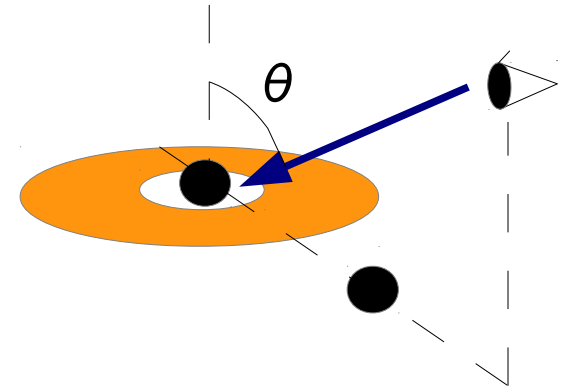
BBH での ray tracing

- 2つのBHと観測者が同一平面上の時



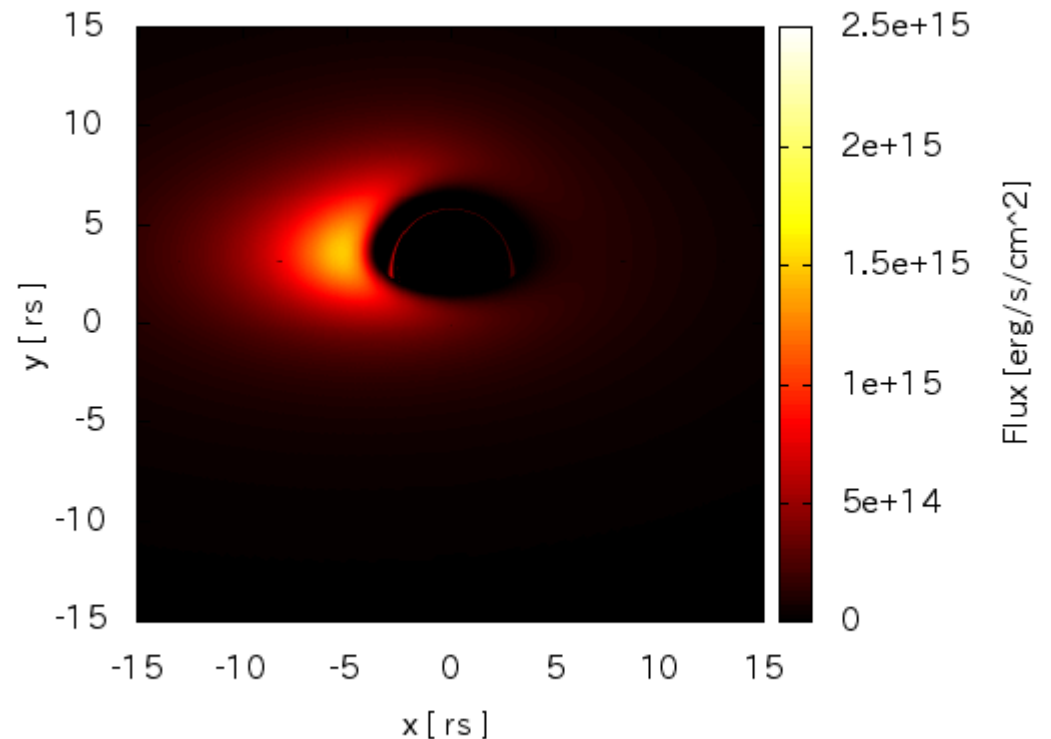
BBH 結果①

- θ を変化させたパラパラ漫画
($\theta = 60$ 度 ~ 80 度、10度間隔)
→ 像は徐々に上に浮き上がる



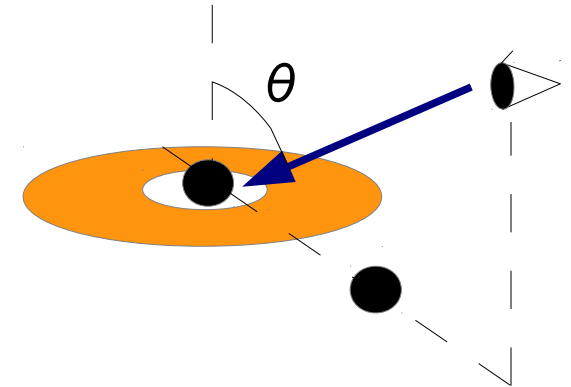
θ	単独BH での写像	BBH での写像
70度	$2.0e+47$	$2.0e+47$
80度	$1.3e+47$	$1.3e+47$
85度	$8.3e+46$	$8.7e+46$

ルミノシティ比較 [erg/s]



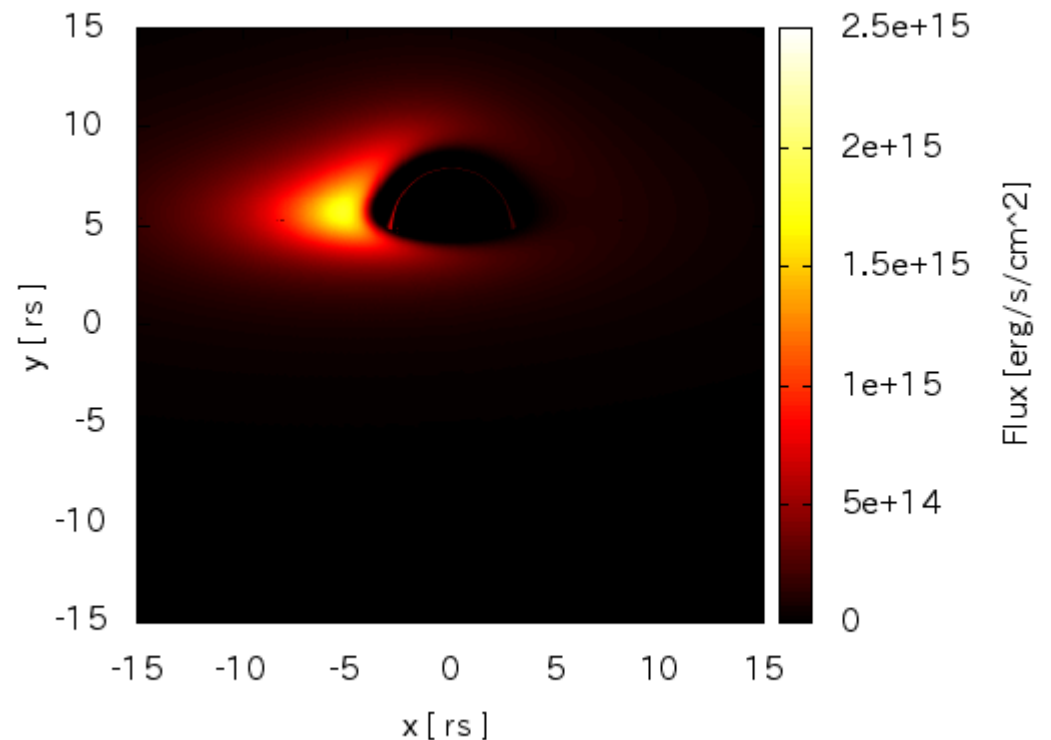
BBH 結果①

- θ を変化させたパラパラ漫画
($\theta = 60$ 度 ~ 80 度、10度間隔)
→ 像は徐々に上に浮き上がる



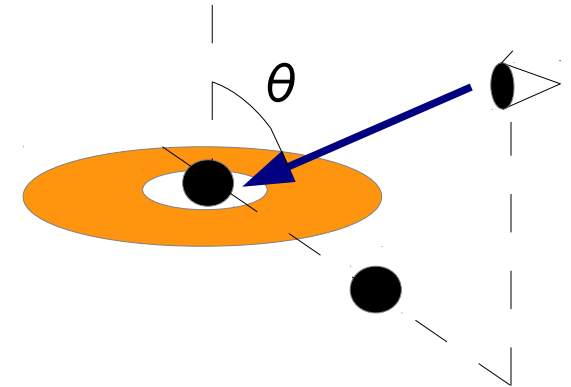
θ	単独BH での写像	BBH での写像
70度	$2.0e+47$	$2.0e+47$
80度	$1.3e+47$	$1.3e+47$
85度	$8.3e+46$	$8.7e+46$

ルミノシティ比較 [erg/s]



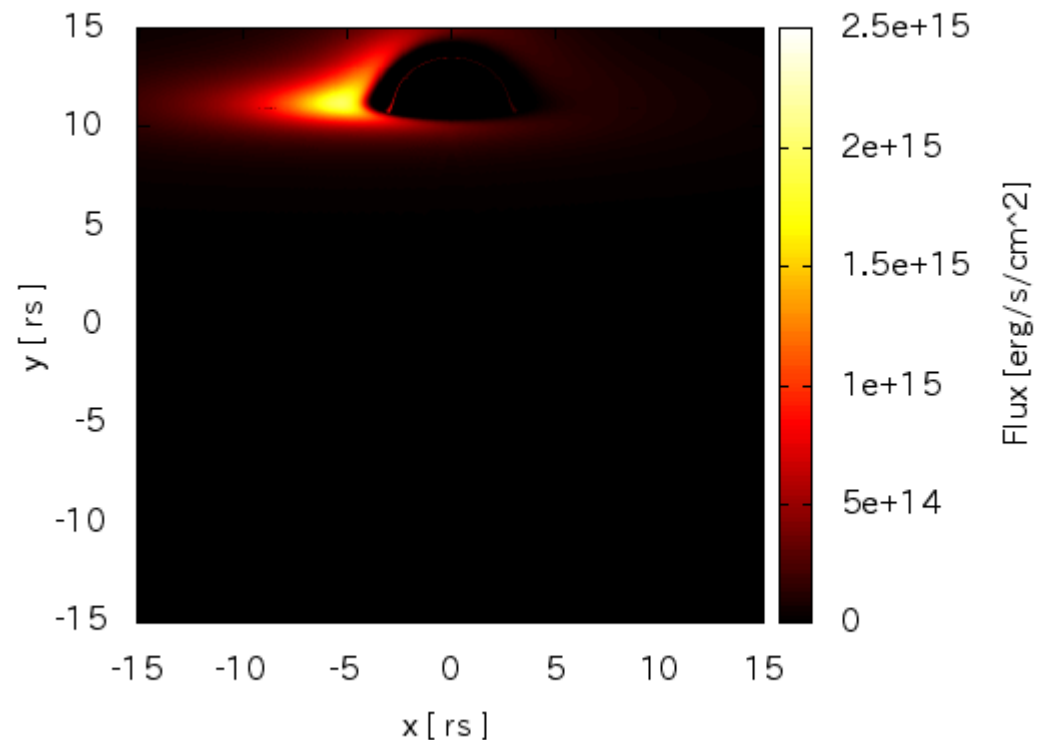
BBH 結果①

- θ を変化させたパラパラ漫画
($\theta = 60$ 度 ~ 80 度、10度間隔)
→ 像は徐々に上に浮き上がる



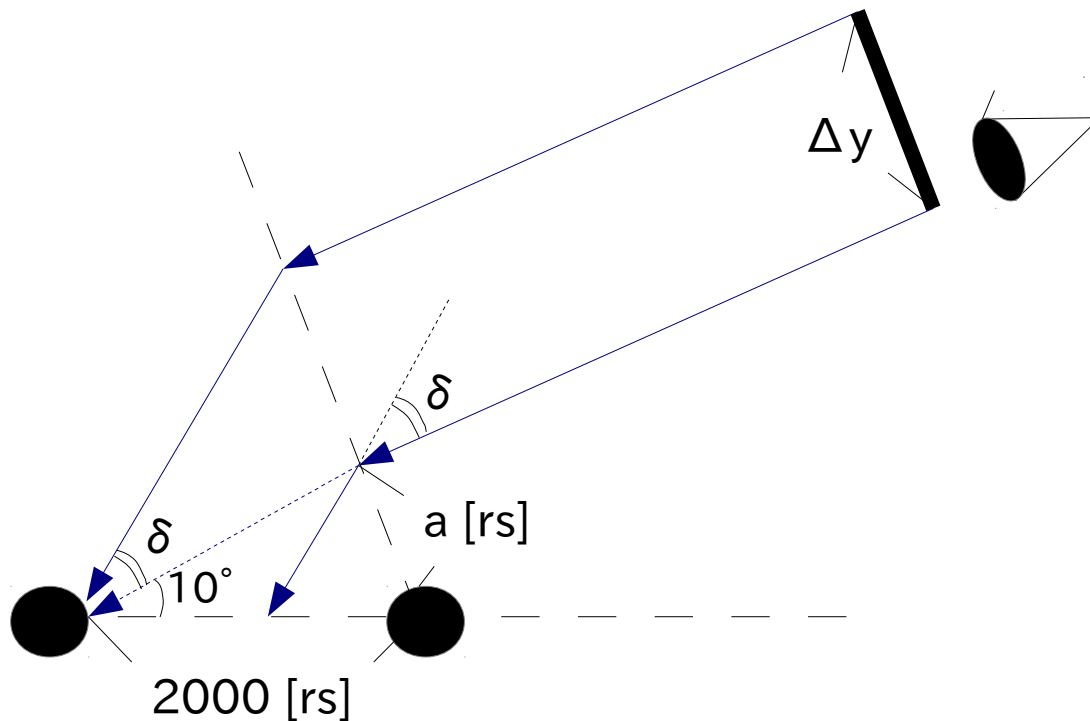
θ	単独BH での写像	BBH での写像
70度	$2.0e+47$	$2.0e+47$
80度	$1.3e+47$	$1.3e+47$
85度	$8.3e+46$	$8.7e+46$

ルミノシティ比較 [erg/s]



BBH 考察

- どれほど上側にシフトするのか？ ($\theta = 80$ 度の時)



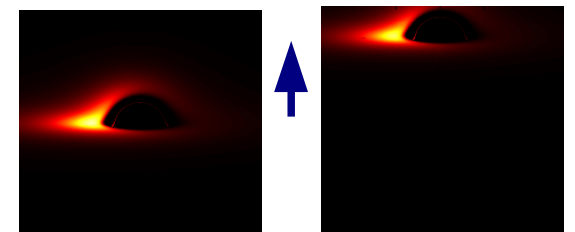
近似測地線の
折れ曲がり角で考える

$$\delta \simeq \frac{2}{a}$$

$$a \simeq 2 \times 10^3 \sin 10^\circ \\ = 3.47 \times 10^2 [\text{rs}]$$

$$\Delta y \simeq 2 \times 10^3 \cos 10^\circ \tan \delta \\ = 11.3 [\text{rs}]$$

→ スクリーン上で
約11rsズれる!

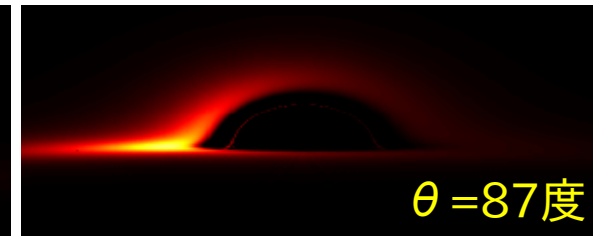
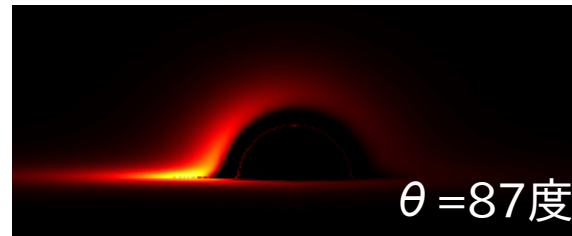
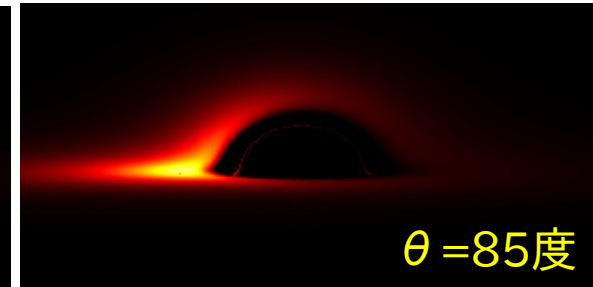
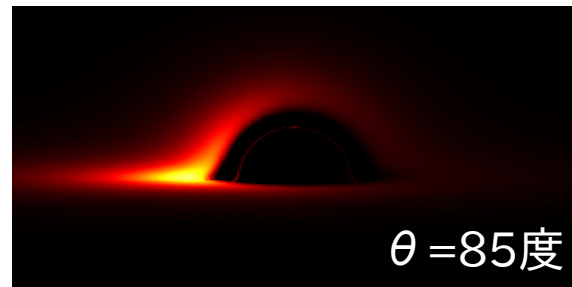
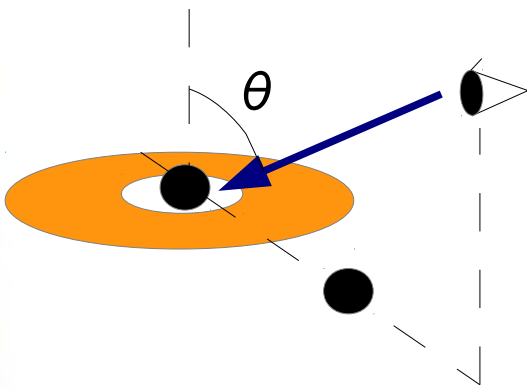


BBH 結果②

- 単独BHでの場合のフラックスと、BBHレンズによるフラックスとの比較

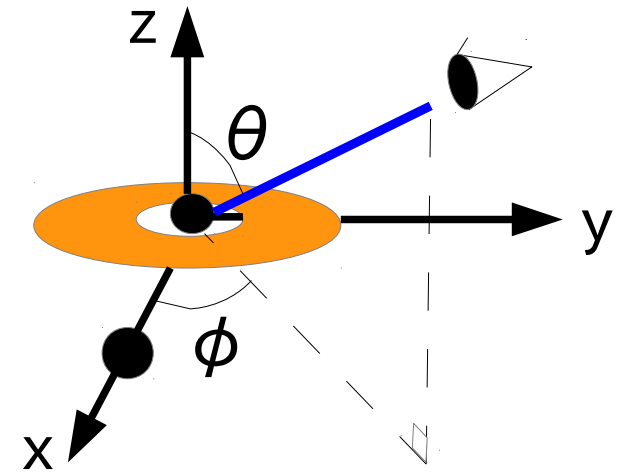
単独BHの
場合の写像:

BBHの場合の
重力レンズ写像:

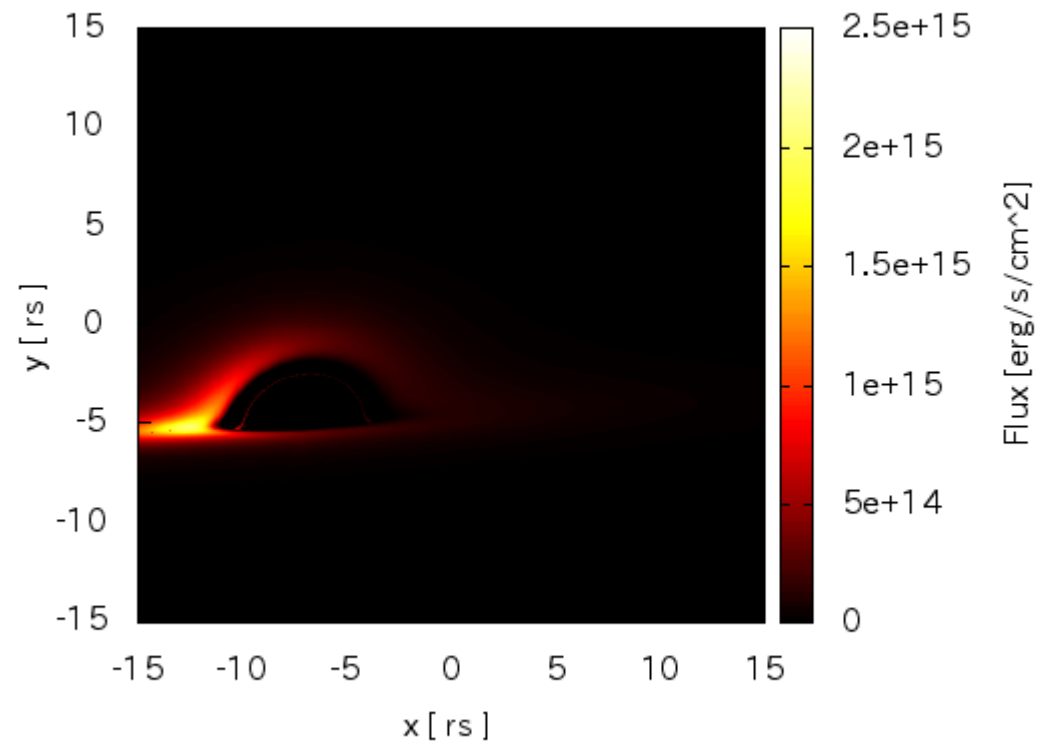


BBH 結果③

- $\theta = 85$ 度固定、 ϕ を变化
($\phi = -2$ 度・ 0 度・ 2 度の画像)
→ 像に歪みが生じている

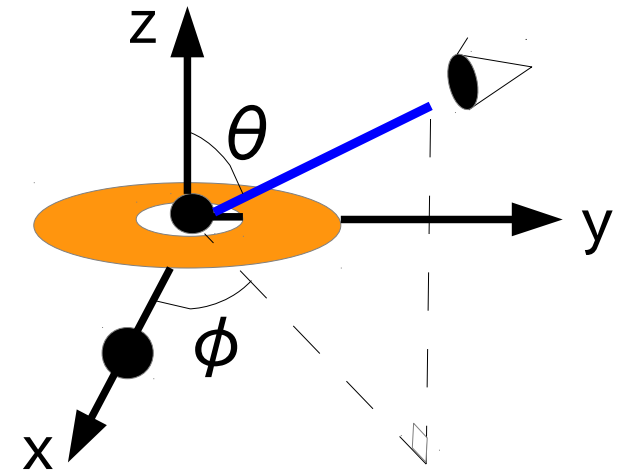


ϕ	ルミノシティ [erg/s]
0度	$8.7e+46$
1度	$8.9e+46$
2度	$8.8e+46$
3度	$8.6e+46$
4度	$8.4e+46$
5度	$8.3e+46$

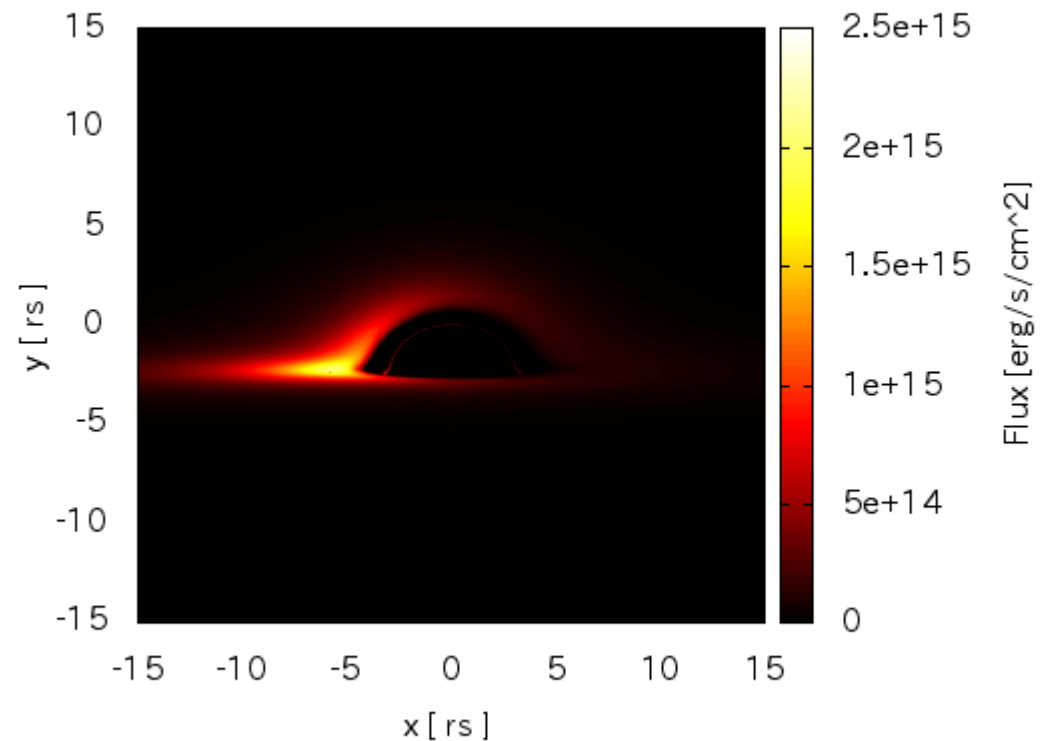


BBH 結果③

- $\theta = 85$ 度固定、 ϕ を变化
($\phi = -2$ 度・ 0 度・ 2 度の画像)
→ 像に歪みが生じている

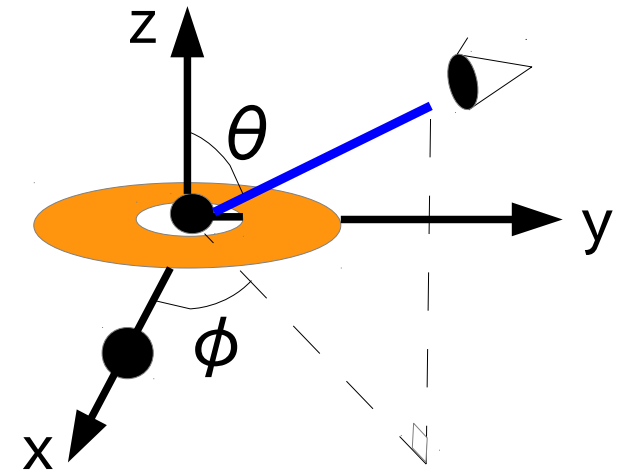


ϕ	ルミノシティ [erg/s]
0度	$8.7e+46$
1度	$8.9e+46$
2度	$8.8e+46$
3度	$8.6e+46$
4度	$8.4e+46$
5度	$8.3e+46$

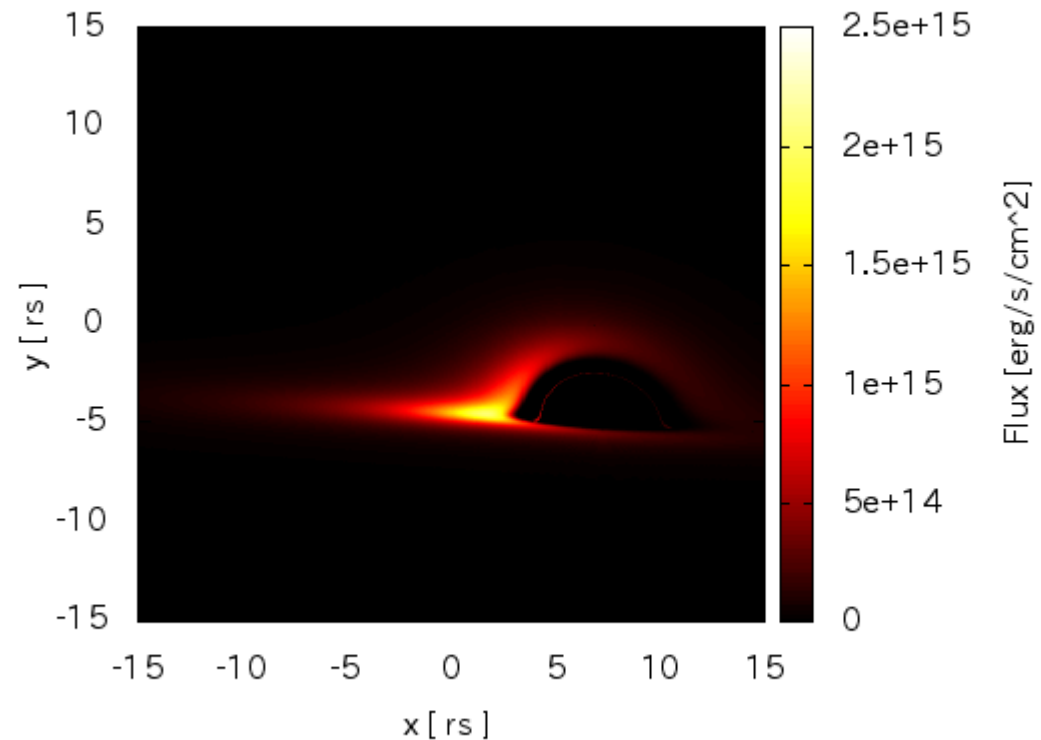


BBH 結果③

- $\theta = 85$ 度固定、 ϕ を变化
($\phi = -2$ 度・ 0 度・ 2 度の画像)
→ 像に歪みが生じている

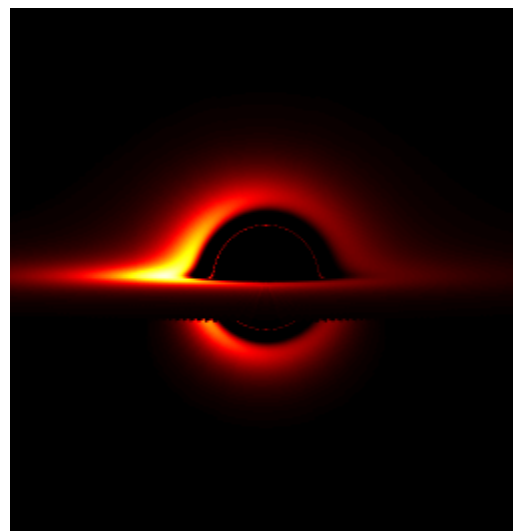
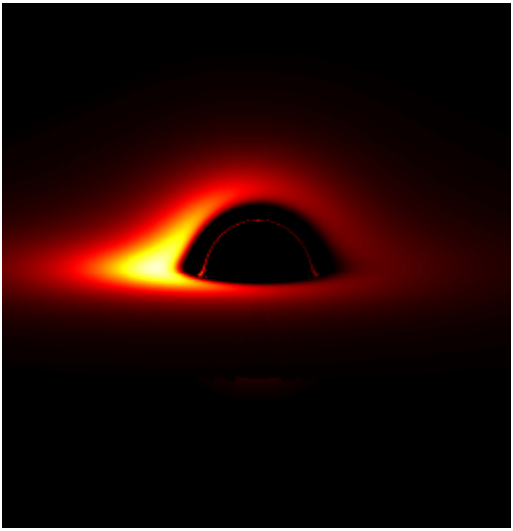
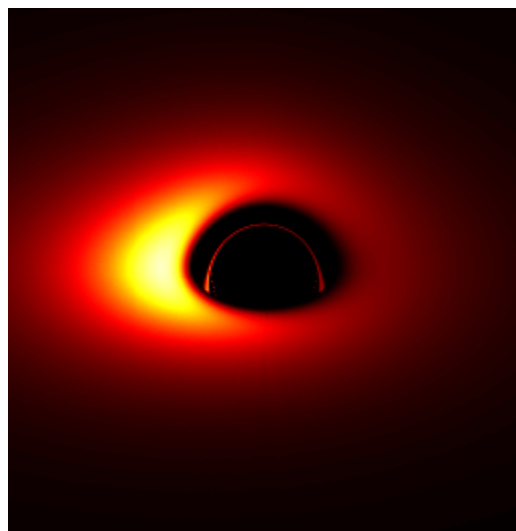
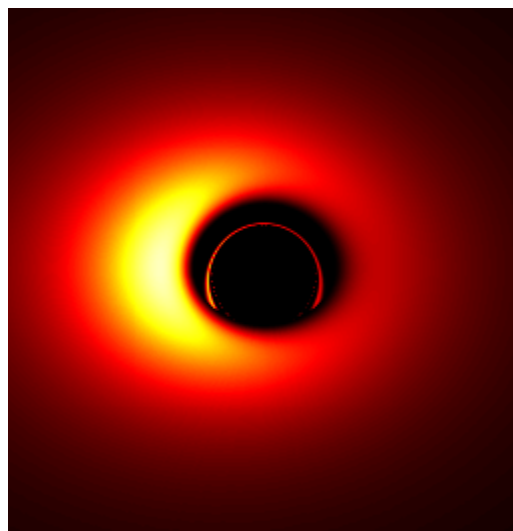
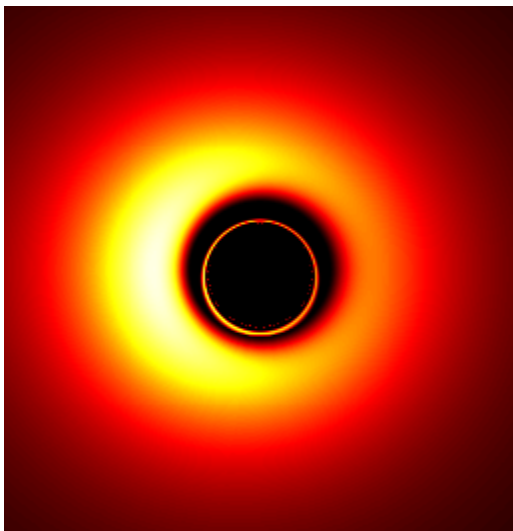
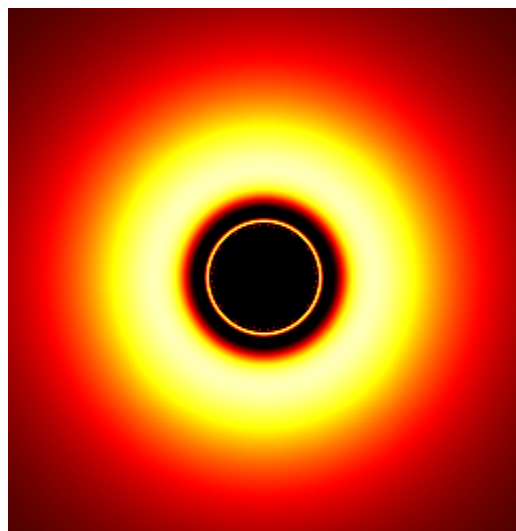


ϕ	ルミノシティ [erg/s]
0度	$8.7e+46$
1度	$8.9e+46$
2度	$8.8e+46$
3度	$8.6e+46$
4度	$8.4e+46$
5度	$8.3e+46$



以上です

補足資料



パラメータ

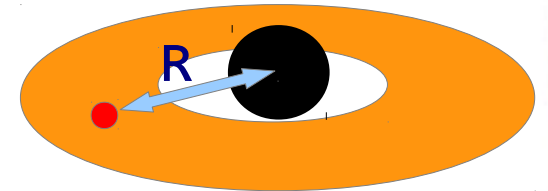
- 連星系 Schwarzschild (単独)Black Hole
として以下のように値を設定

$$r_s \equiv \frac{2GM}{c^2}$$

- 円盤内縁: $3r_s$
- 表示範囲: $30r_s \times 30r_s$
- 解像度: $0.1r_s \times 0.1r_s$
- 観測者までの距離: $10^4 r_s$
- BH mass: $M = 10[M_\odot]$
- 降着率: $\dot{M} = \dot{M}_{\text{crit}} \equiv L_{\text{Edd}}/c^2$

降着円盤からのフラックス

- 相対論的降着円盤からの全波長フラックスは、Black Hole までの距離Rの関数として以下の式で与えられる：
(Page & Thorne, 1974)



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

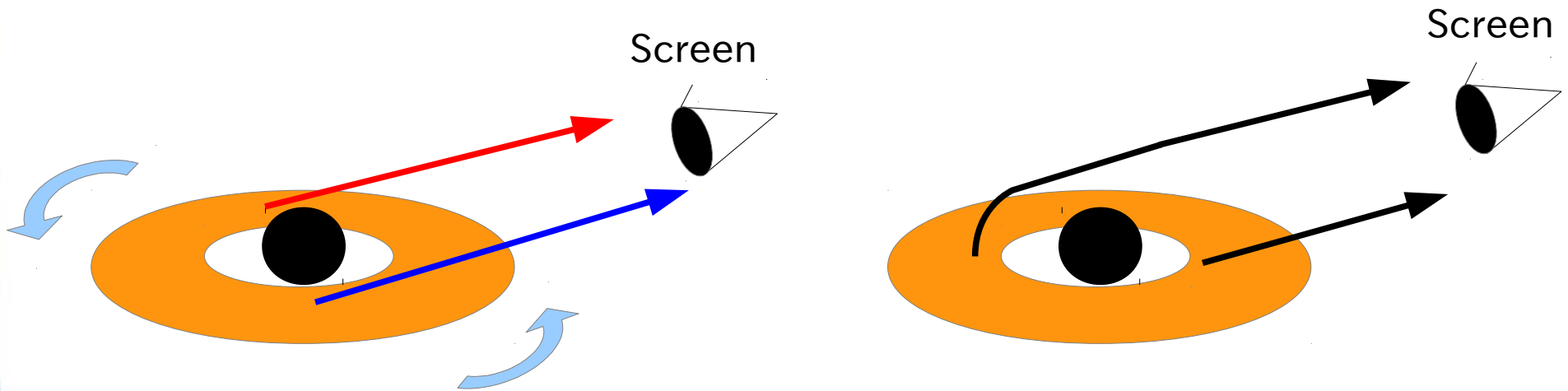
$$r_s \equiv \frac{2GM}{c^2} \quad : \text{Schwarzschild 半径}$$

- 円盤表面温度は、Stefan-Boltzmann の法則より

$$T = \left(\frac{F}{\sigma} \right)^{1/4} \quad \sigma : \text{Stefan-Boltzmann 定数}$$

赤方偏移

- 相対論的効果による赤方偏移
 - 円盤回転によるドップラー効果
 - 重力赤方偏移



赤方偏移

- 半径Rでの赤方偏移は以下で表せる:
(Luminet, 1979)

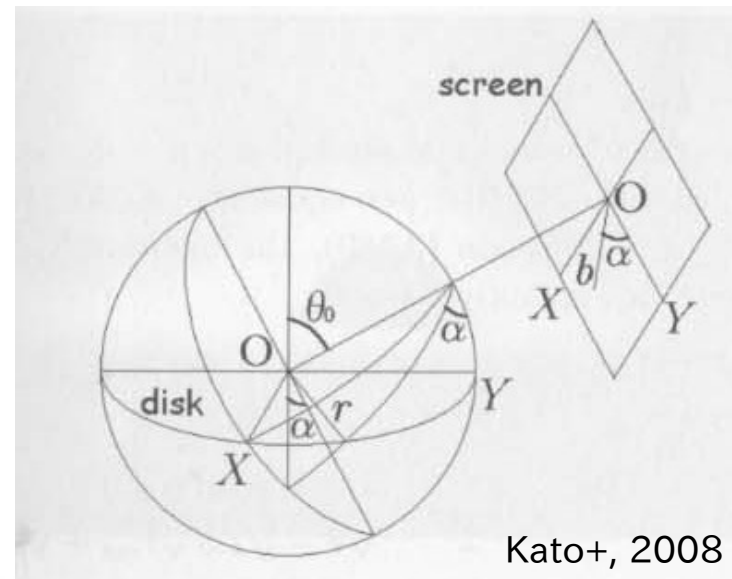
$$1 + z = \left(1 - \frac{3}{2R}\right)^{-\frac{1}{2}} \left[1 + \left(\frac{b^2}{2R^3}\right)^{\frac{1}{2}} \sin \theta_0 \sin a\right]$$

重力赤方偏移

回転によるDoppler効果

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

$$T_{\text{obs}} = \frac{T}{(1+z)}$$



Kato+, 2008

Ray Tracing 法

- 降着円盤から出た光は測地線方程式に従い、Screen上の各点へ到達する
- Screen上から軌跡を逆にたどることによって光の放射点を突き止めることができる



Parameter

- 2つの Schwarzschild BinaryBH (BBH) を考え、パラメータは以下のようにした

- BH質量: $M_1 = M_2 = 5.0 \times 10^7 M_\odot$
- BH間距離: $a = 0.01[\text{pc}] \simeq 2 \times 10^3 r_s$
- 回転周期: $P_{orb} \simeq 9.4 [\text{yr}]$
- 降着円盤内縁: $r_{in} = 3r_s$
- 降着率: $\dot{M} = 0.05 [M_\odot/\text{yr}]$