

ブラックホールシャドー ザ・ヒストリー

*Black Hole Shadow
The History*

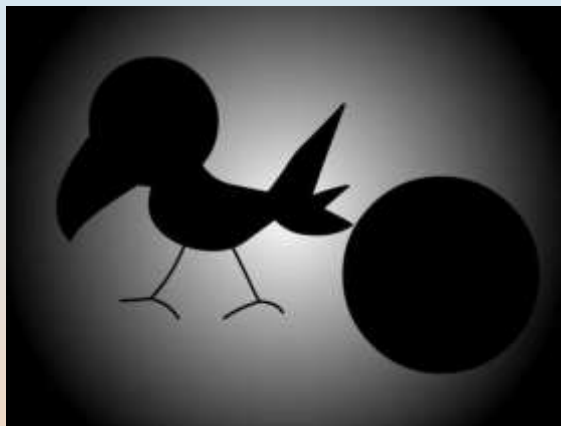
福江純(大阪教育大学)



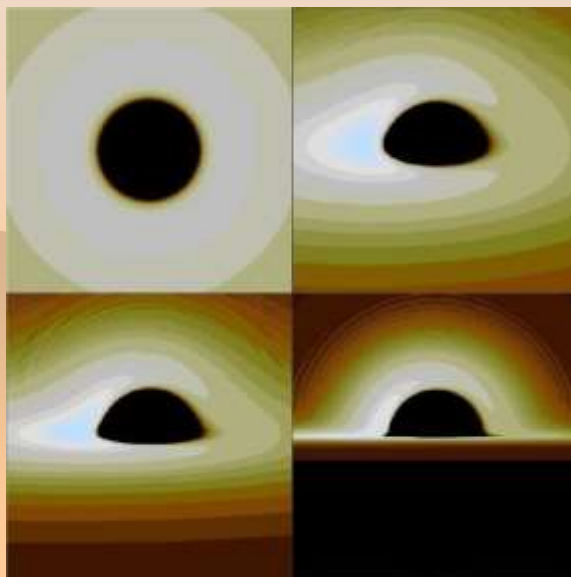


ブラックホールシャドー 闇夜のカラスを見る方法

❁ 闇夜のカラスを見る方法

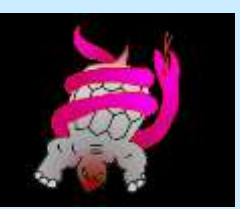


❁ ブラックホールは光でさえ出てこられない天体だ。だから観ることはできないような気がするが、決してそうではない。光り輝く衣を纏うことによって、ブラックホールのシルエットを見ることが可能になる。それを**ブラックホールシャドー (black hole shadow)**と呼ぶことがある。



ブラックホールのシルエット。見る角度が違う。





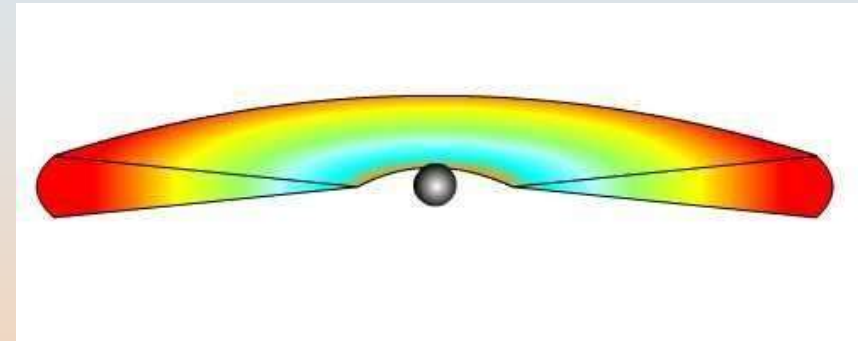
ブラックホール周辺の光る衣 ーバックライトー



近接連星系



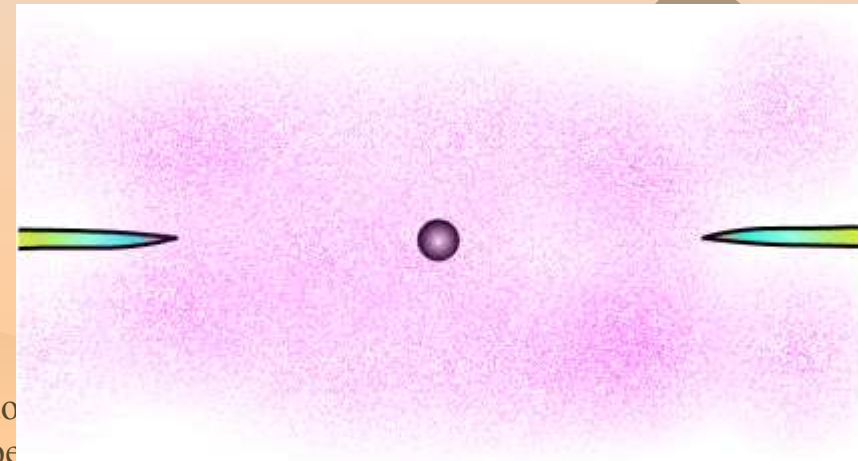
光り輝くガス円盤 (降着円盤)



活動銀河中心核

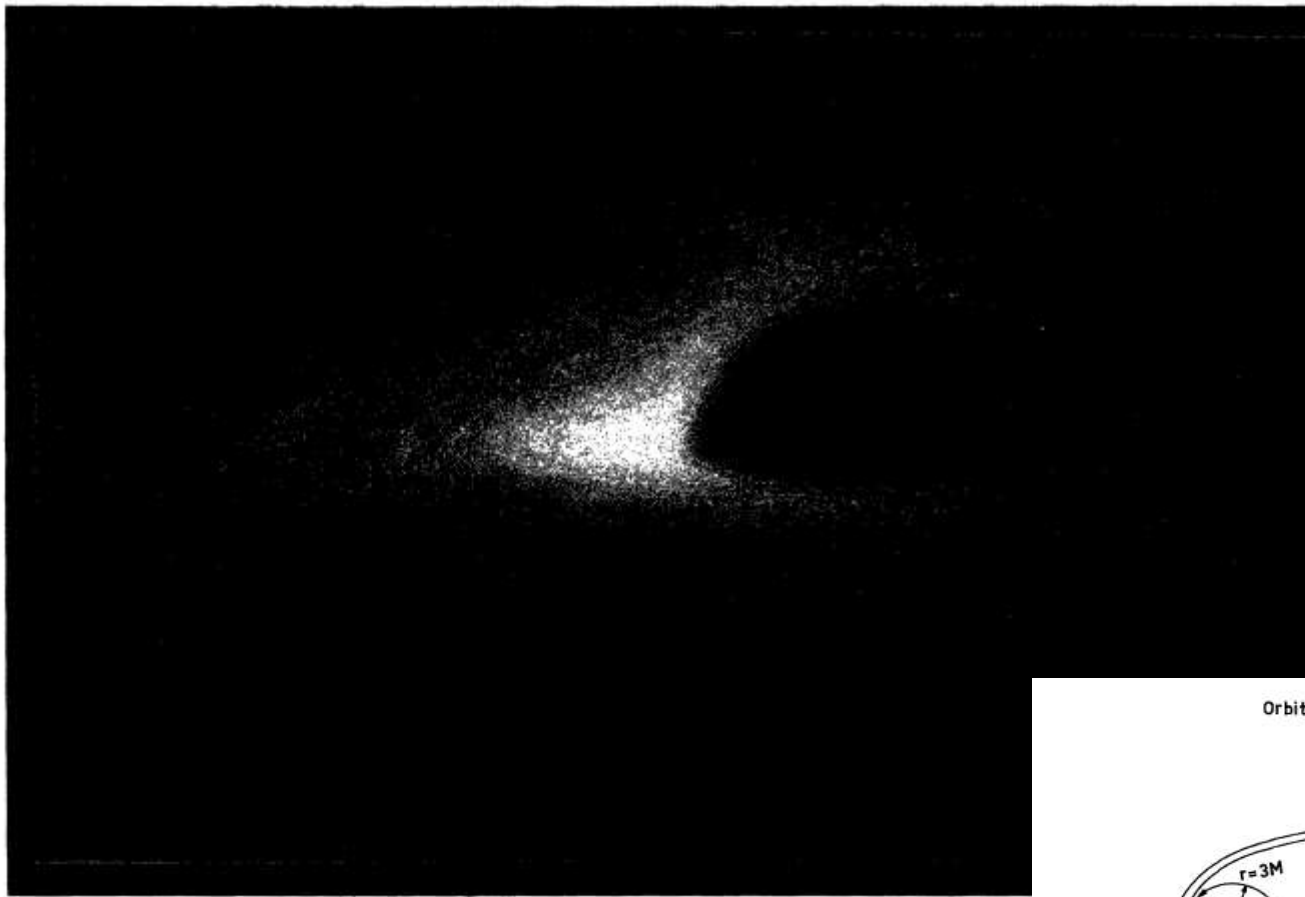


薄く広がった高温ガス

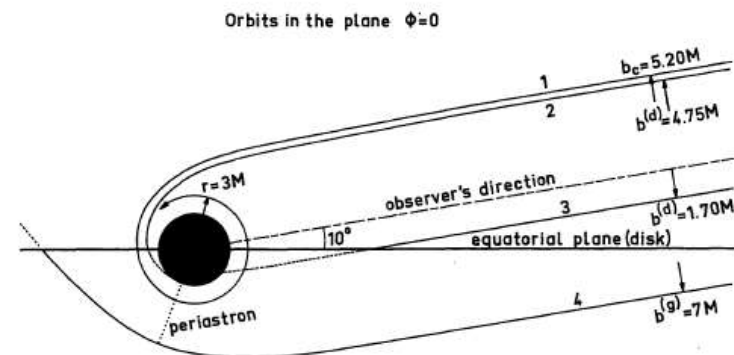


高温ガスの降着円盤 初撮影

Luminet 1979



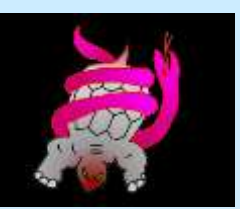
Luminet
1988年



2019/7/20

Black Hole Shadow and
Observational Appearance

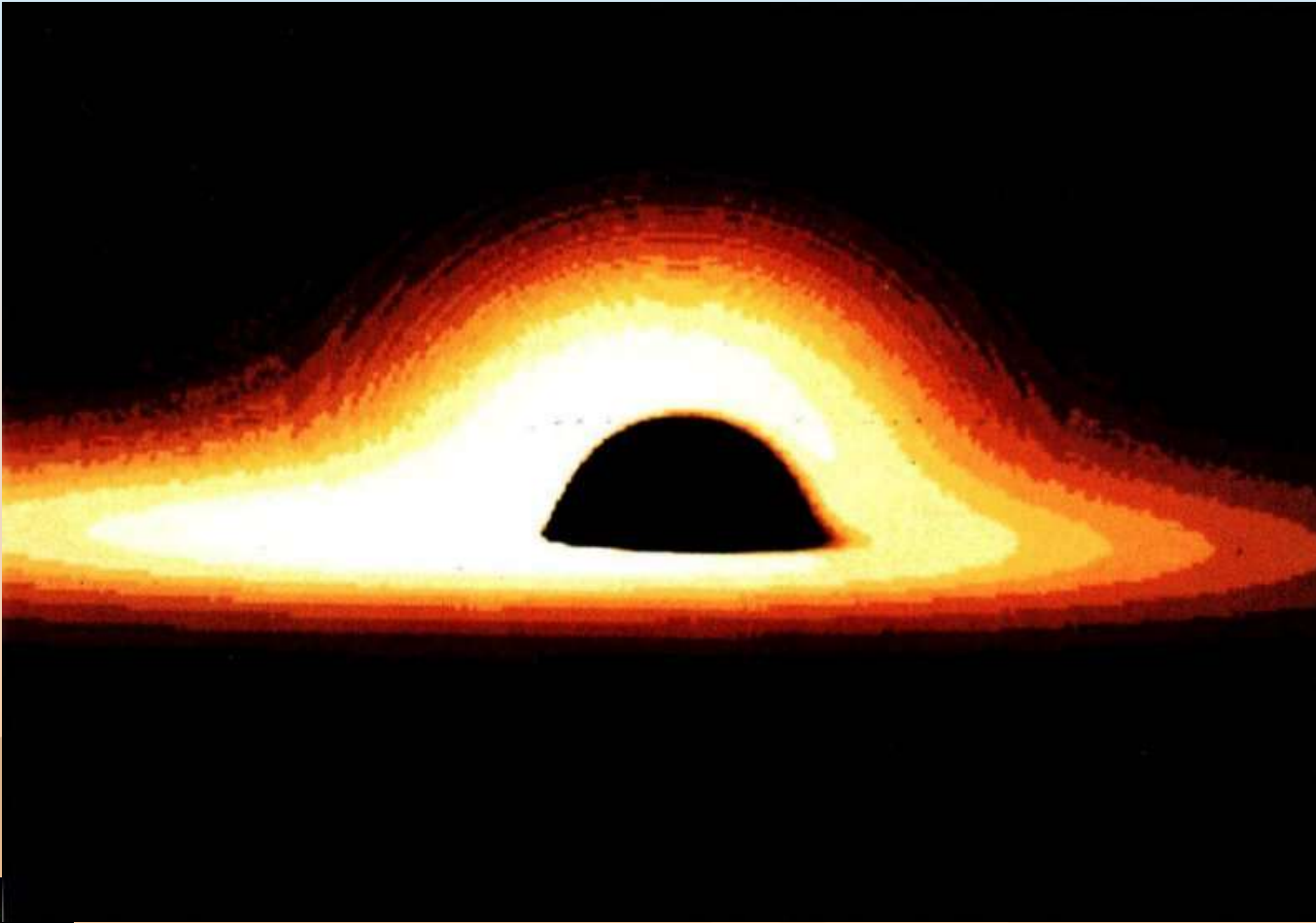




初カラー“撮像”

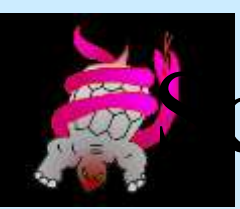


Fukue and Yokoyama 1988



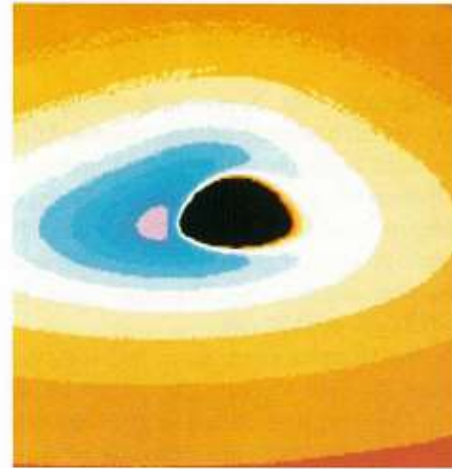
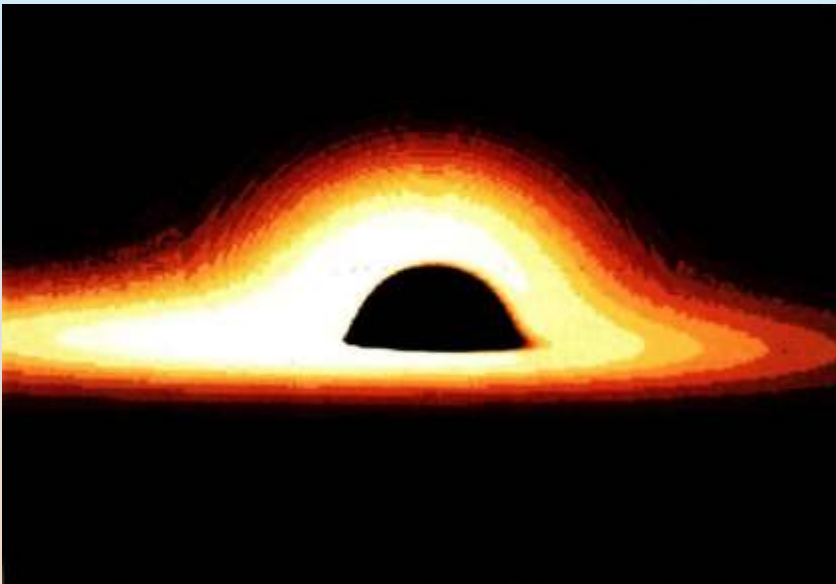
Fukue
1988年





Schwarzschild/ color photo, X-ray

Fukue and Yokoyama 1988



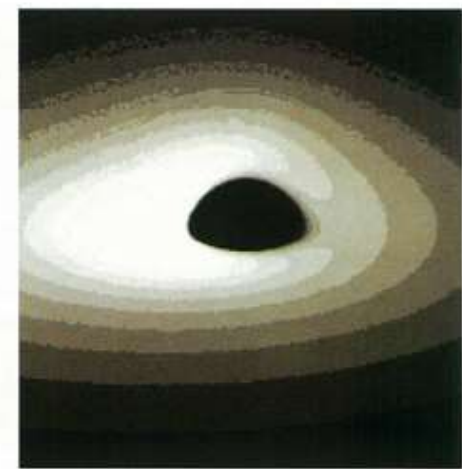
温度分布



全波長強度

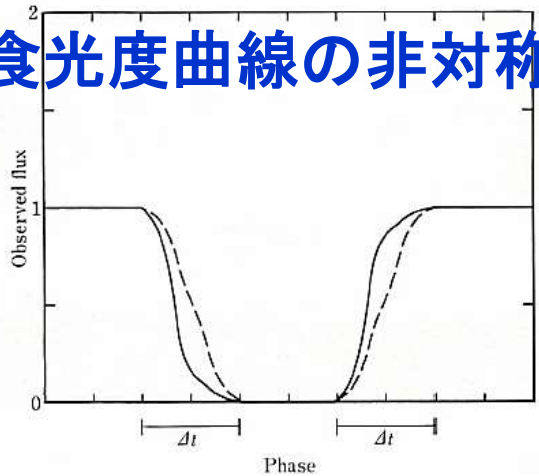


X線 (2-30keV)



可視強度

食光度曲線の非対称性



Black Hole Observation

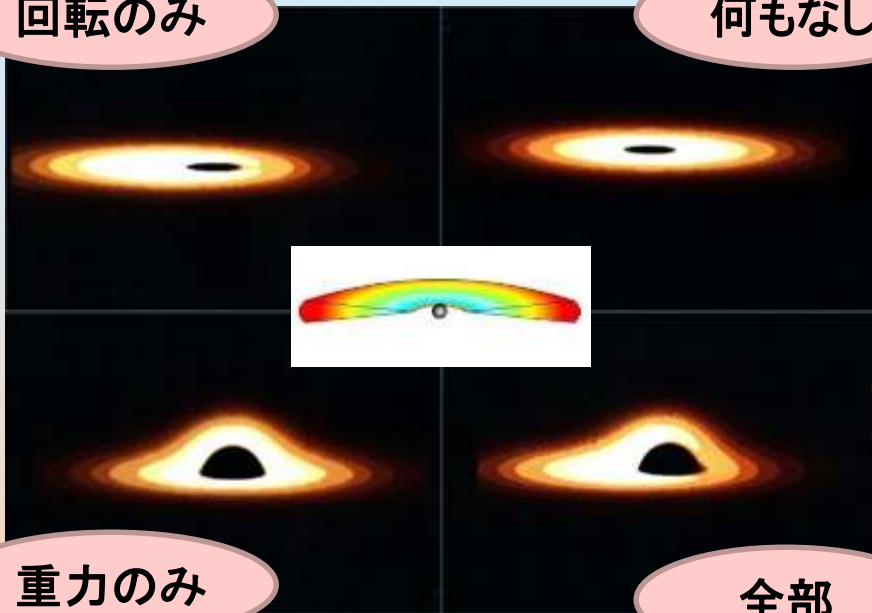




歪むシルエット

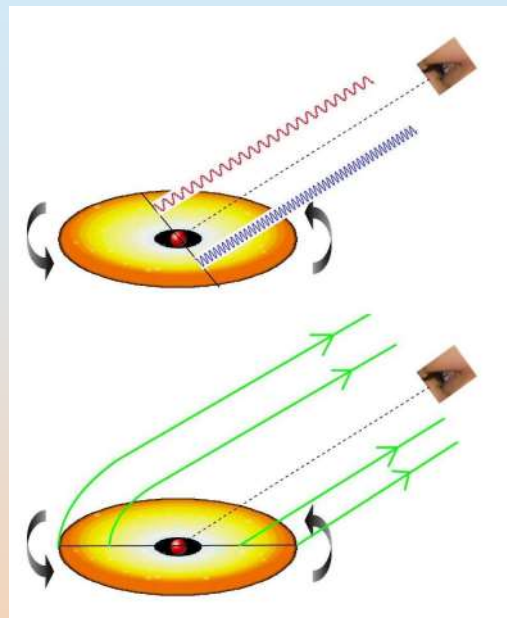
回転のみ

何ものなし



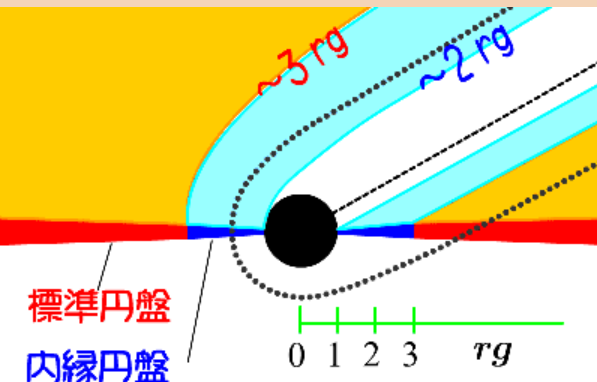
重力のみ

全部



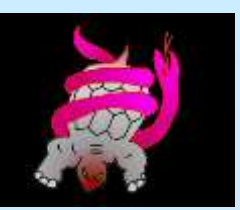
ドップラー効果

光線の曲がり



ブラックホール＝降着円盤の姿が歪んで見える理由は2つある。まず円盤のガスはブラックホール近傍では光速近くのスปีドで回転しているため、手前に近づく側のガスから出た光は非常に強められる(右図の上)。その結果、円盤の画像は左側が明るくみえる(左図の左上)。一方、ブラックホール近傍では空間が歪んでいるため、光線が曲げられる(右図の下)。その結果、円盤の画像は向こう側が浮き上がったようにみえる(左図の左下)。これらの効果が合わさって、いろいろなシルエットになる。





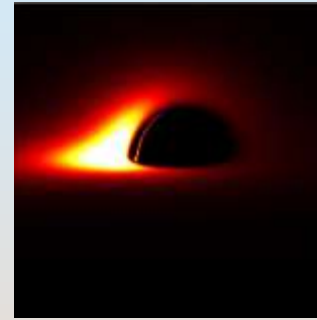
Kerr/ shadow shapes

Takahashi 2004

$a=0$

$a=0.8$

$a=0.998$



(a) $a=0, i=45^\circ$

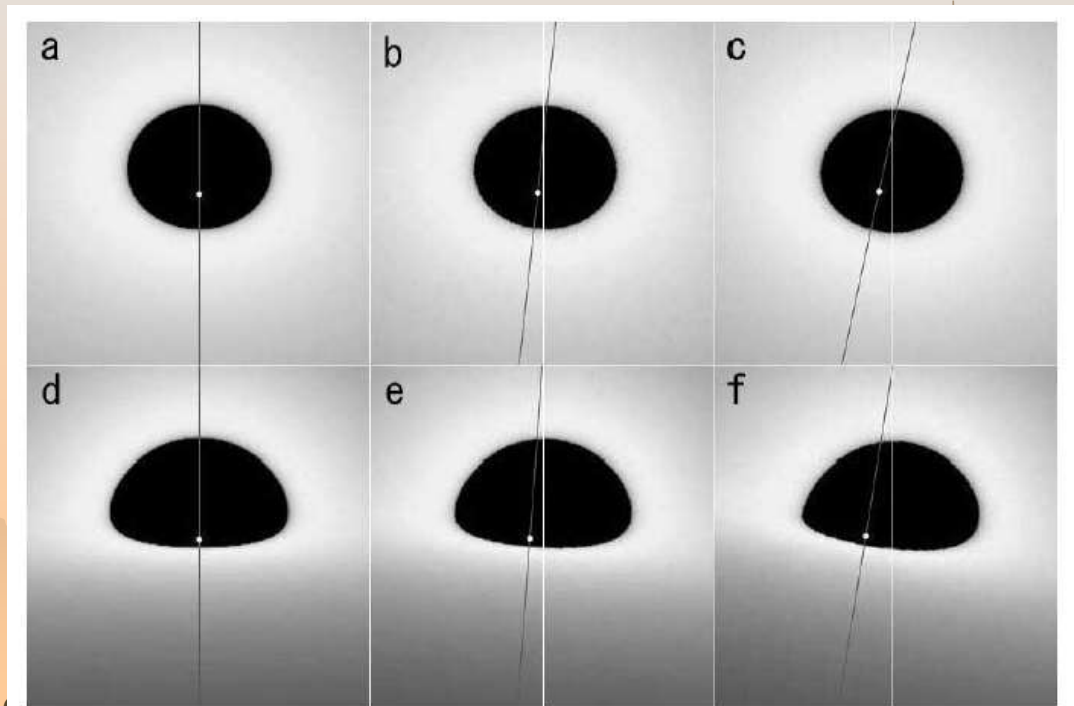
(b) $a=0.5, i=45^\circ$

(c) $a=0.958, i=45^\circ$

(d) $a=0, i=80^\circ$

(e) $a=0.5, i=80^\circ$

(a) $a=0.955, i=80^\circ$



希薄な高温ガス中のシャドー

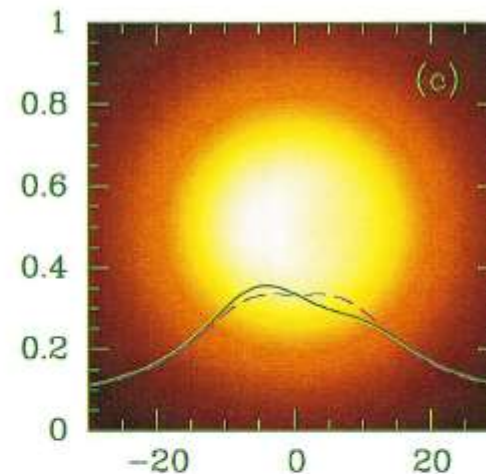
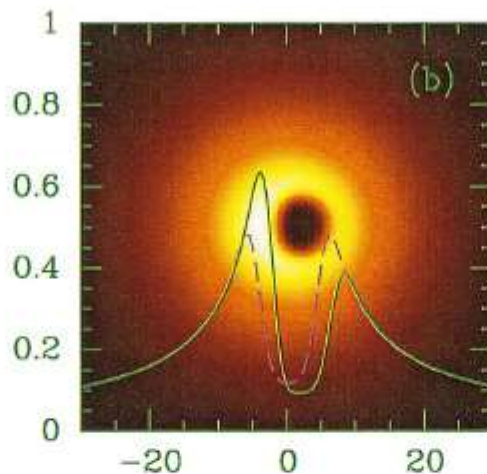
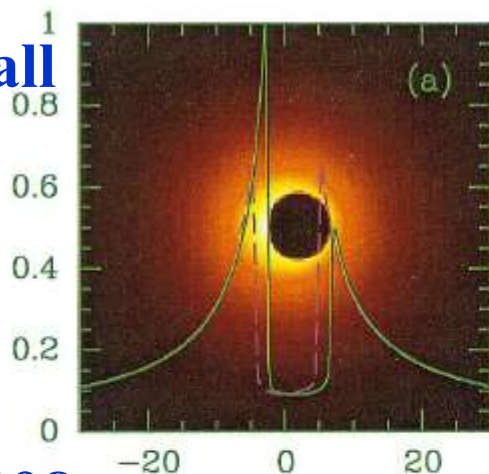
Falcke et al. 2000

ray-trace

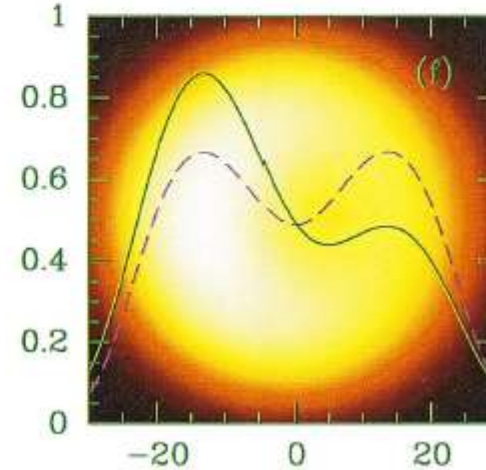
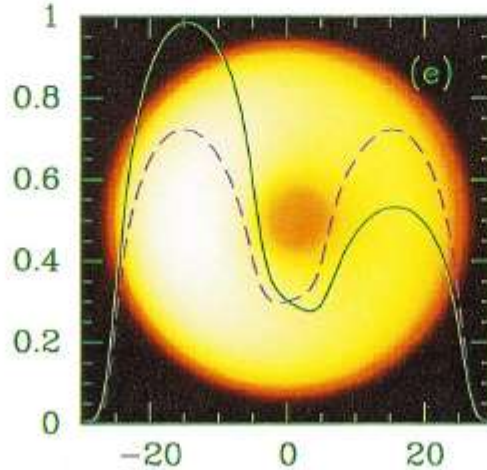
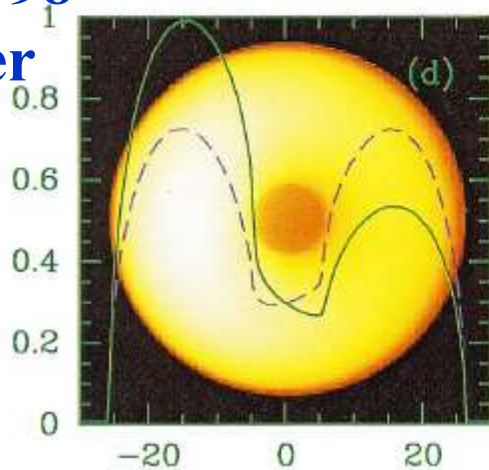
0.6mm

1.3mm

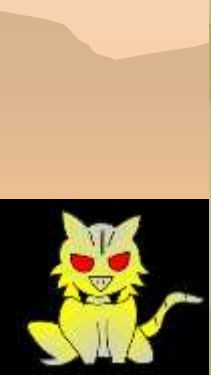
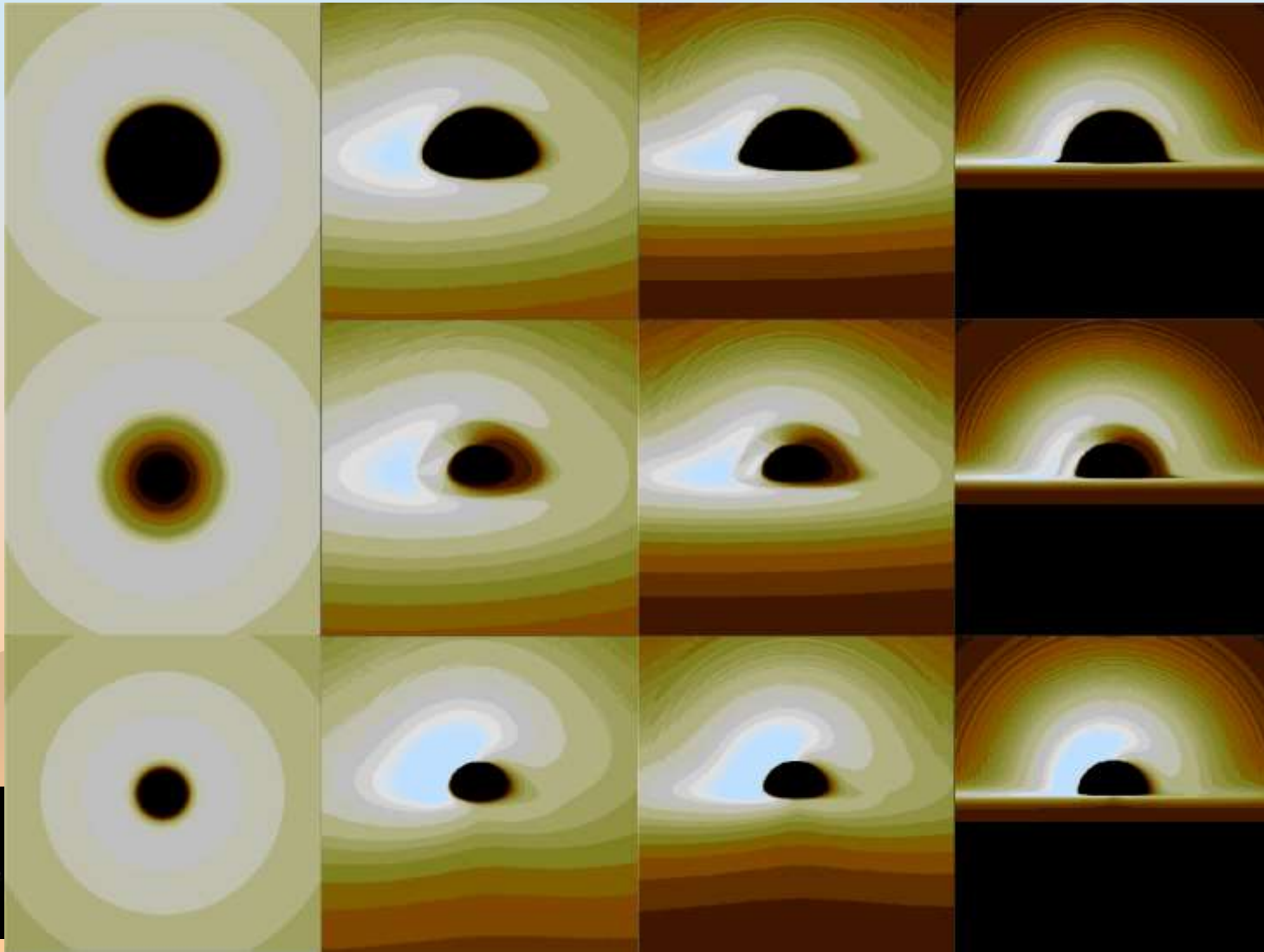
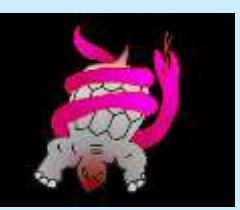
$a=0$
freefall

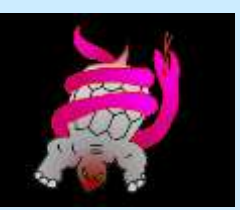


$a=0.998$
kepler
shell



slim-like disk Fukue 2003





disk + jets

Broderick and Loeb 2008

M87: 1.3mm

TABLE 1
JET MODEL PARAMETERS

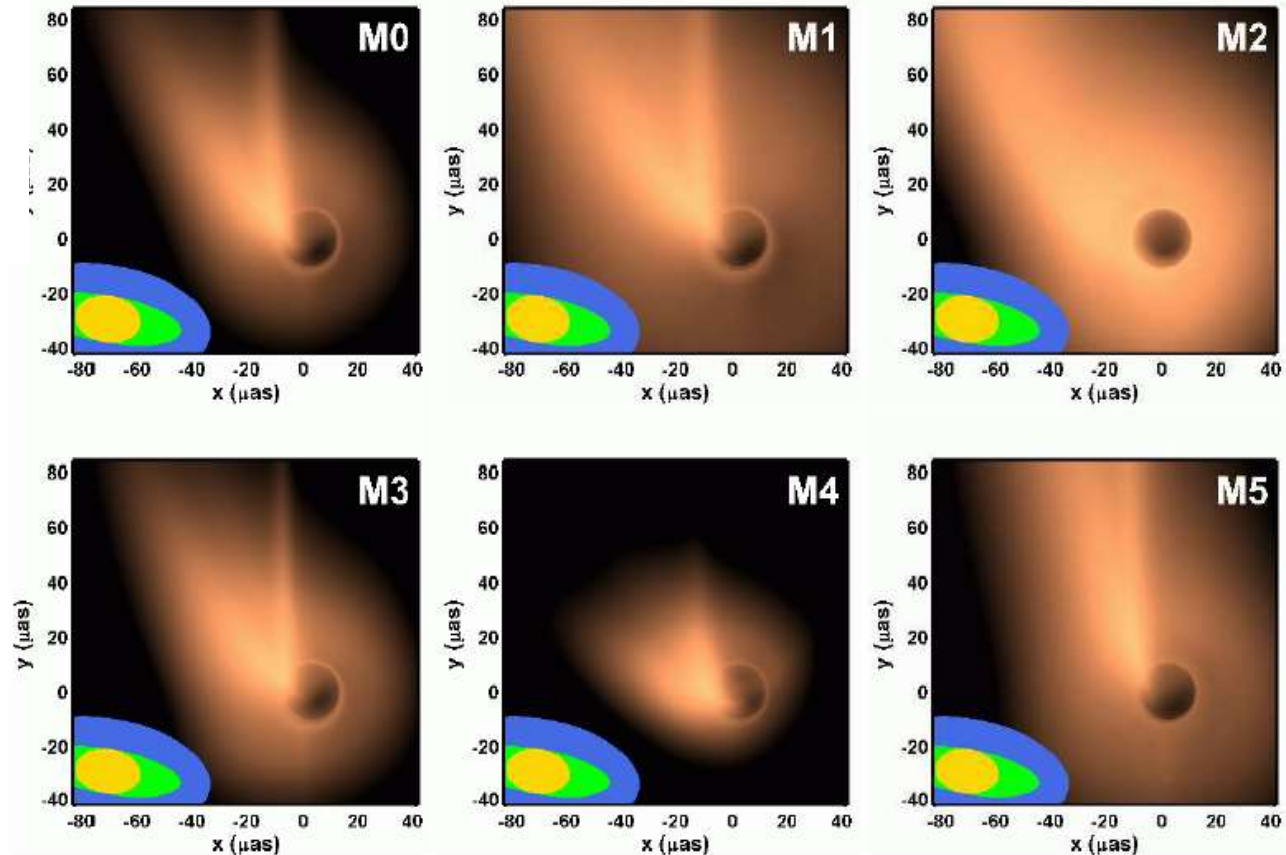
| Model | $a(M)$ | θ | $r_{fp}(GM/c^2)$ | ξ |
|-------|--------|------------|------------------|-------|
| M0 | 0.998 | 25° | 10 | 1/2 |
| M1 | 0.998 | 25° | 20 | 1/2 |
| M2 | 0 | 25° | 10 | 1/2 |
| M3 | 0.998 | 40° | 10 | 1/2 |
| M4 | 0.998 | 25° | 10 | 5/8 |
| M5 | 0.998 | 25° | 10 | 3/8 |

a : スピン

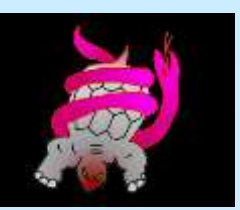
θ : 傾き

r_{fp} : 太さ

$\xi \propto R \propto z^\xi$

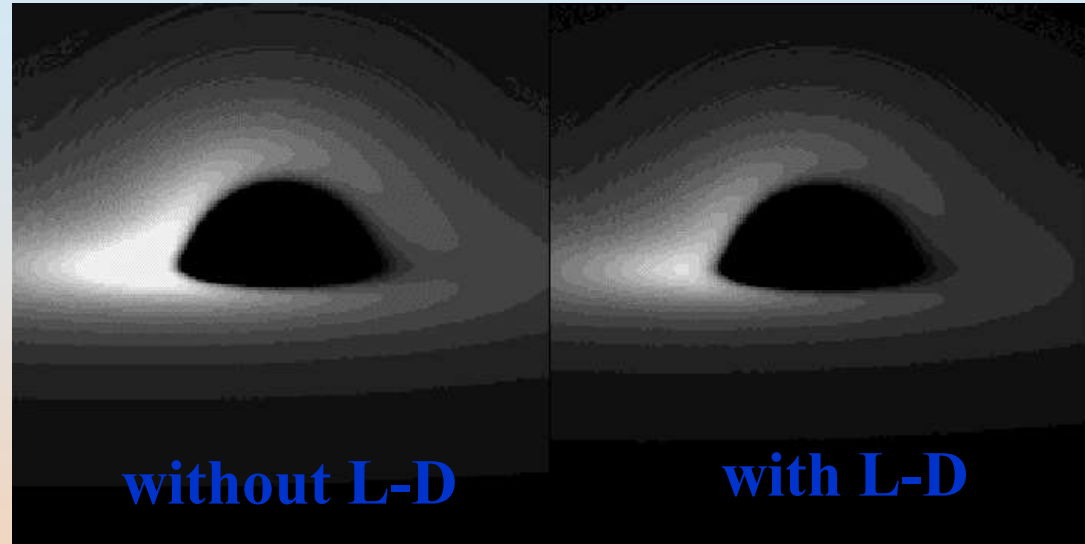


2019/7/20

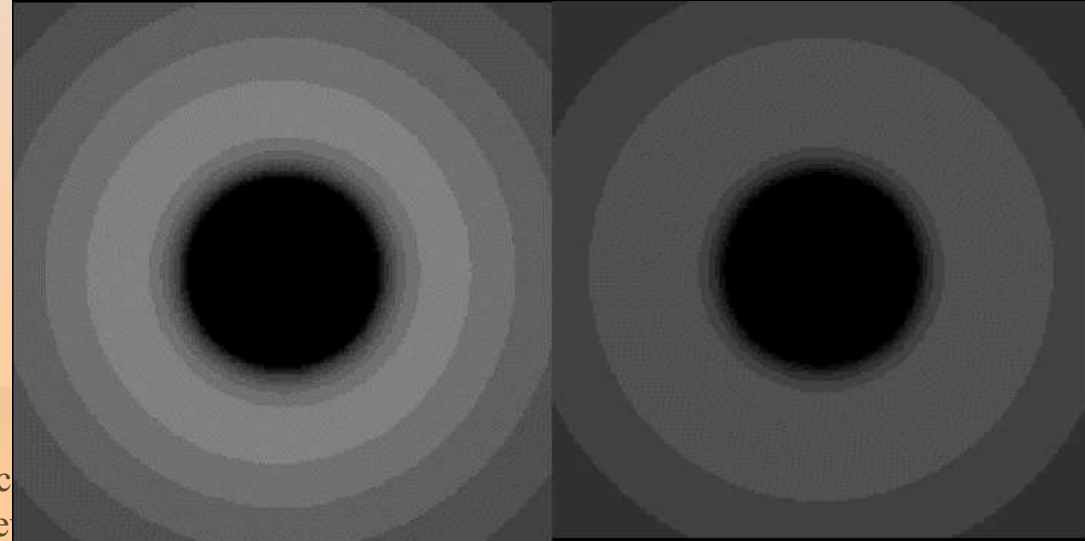


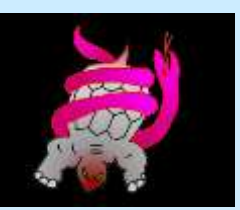
よりリアルな画像を Fukue and Akizuki 2006

❁ 斜めから見ると暗くなるby周縁減光



❁ 上から見ても暗くなるby光行差



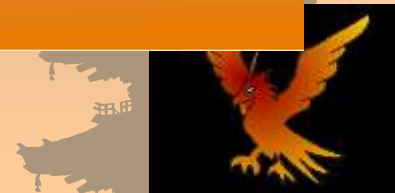
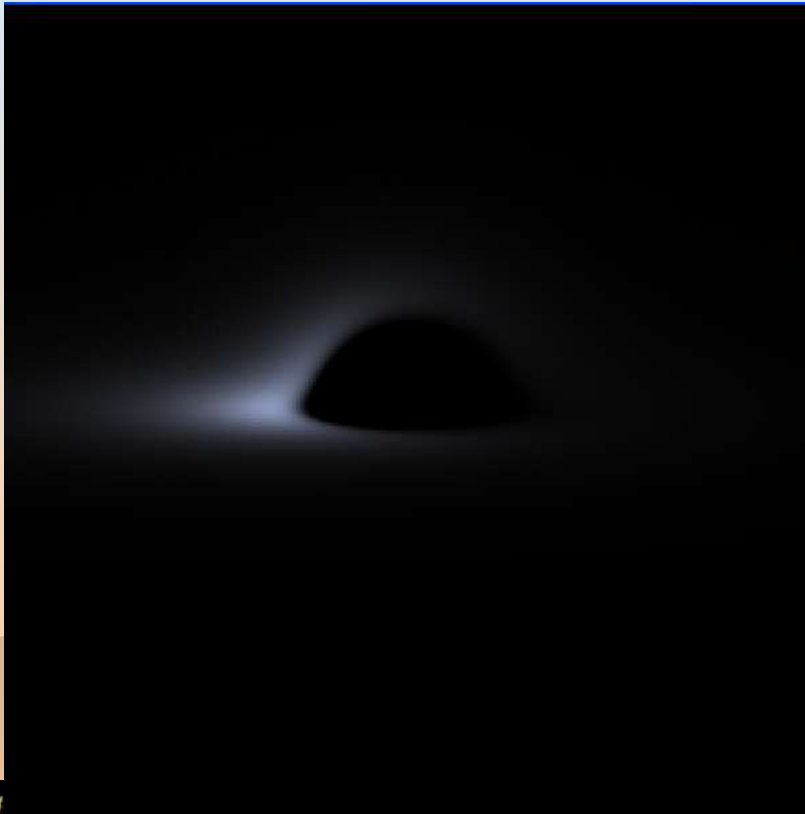


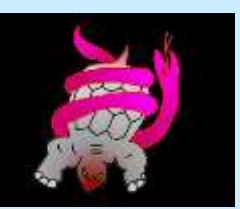
さらにリアルな画像を Fukue 2009



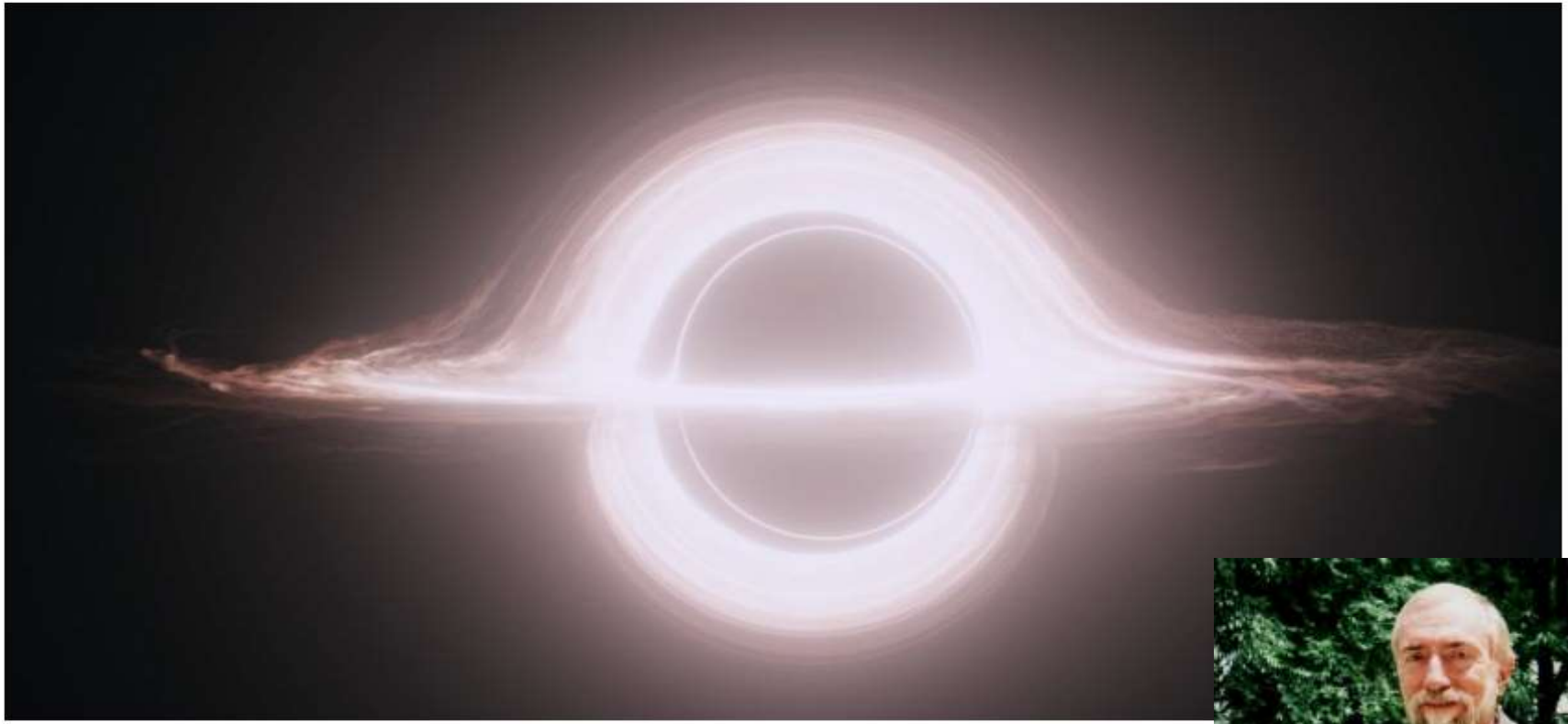
❁ リアルな輝度分布

❁ リアルなRGB着色画像





映画『インターステラー』 James+Thorne+2015



Thorne
1999年

2019/7/20

ブラックホール活動天体

32



ブラックホールシャドウ発見





巨大楕円銀河M87

❁ おとめ座、5500万光年

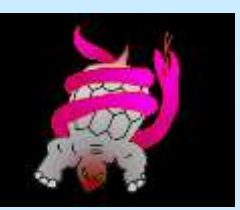


イベントホライズン望遠鏡EHT

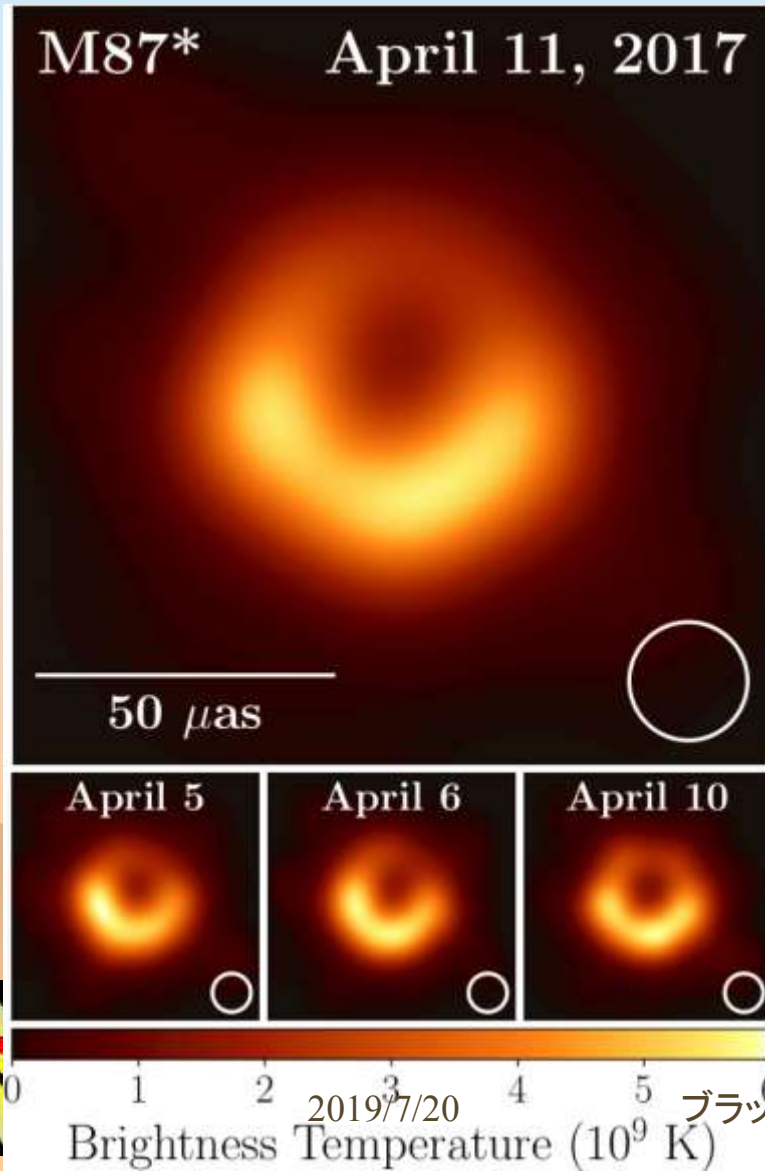


- ❁ 6カ所、8台
- ❁ **電波望遠鏡干渉計**
- ❁ 実効口径1万km
- ❁ 波長1.3mm
- ❁ 視力300万
- ❁ (月面のテニスボール)
- ❁ 18カ国、200人



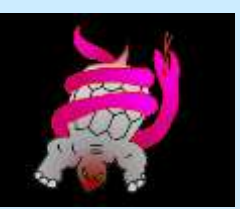


観測は2017年

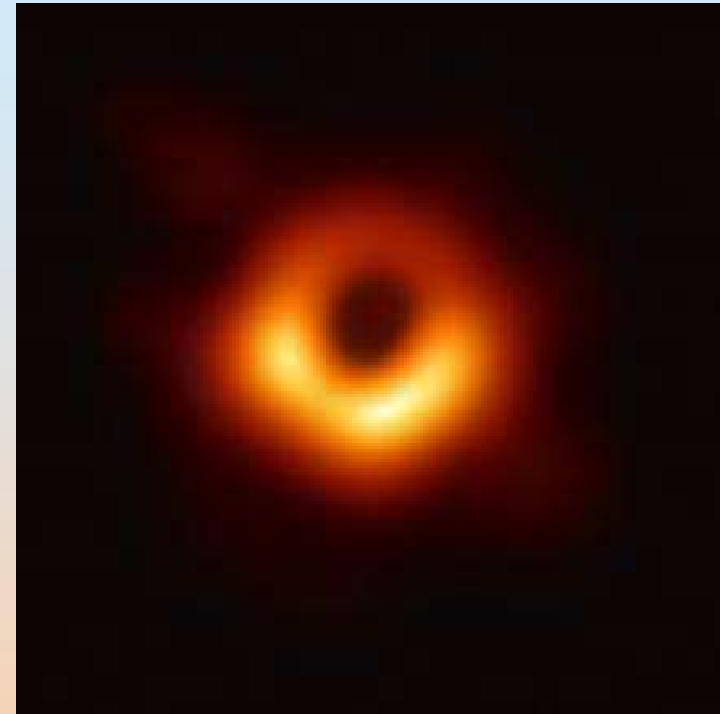
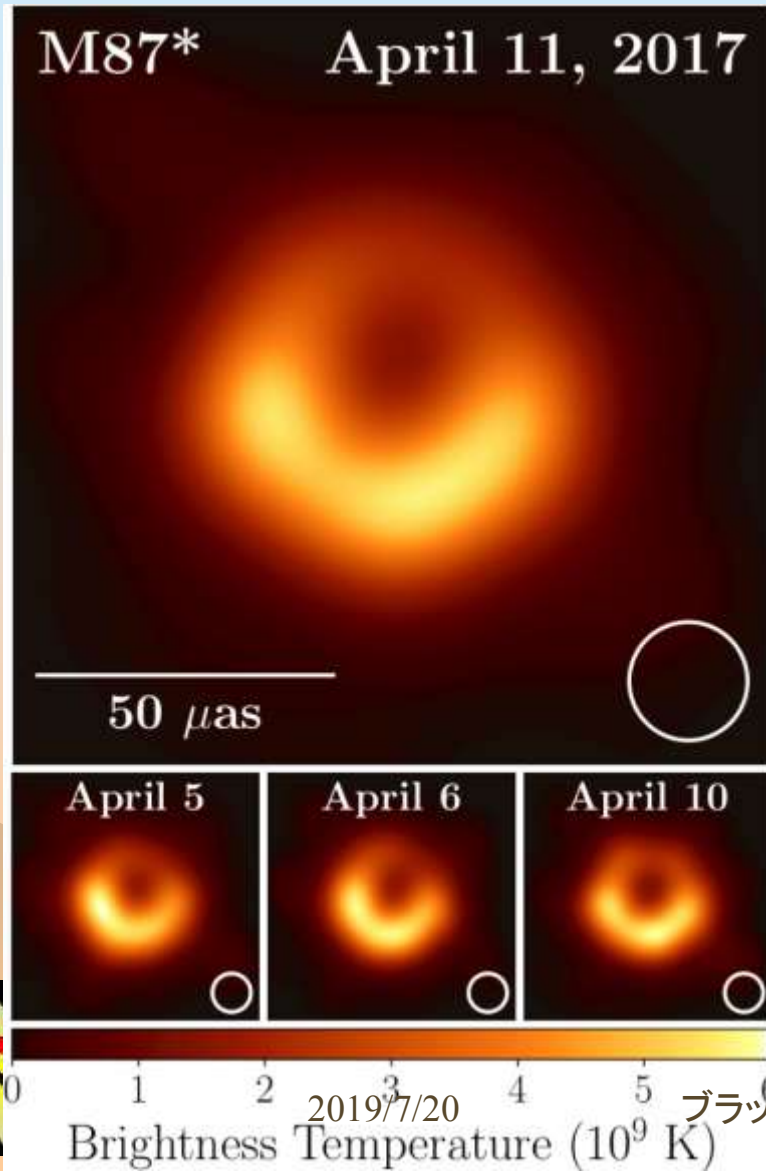


- ❁ 最初のイメージ
- ❁ 明るいリング
- ❁ ほぼ円形のシャドー
- ❁ 時間的に変動がない
- ❁ 2年間にわたる解析
- ❁ 2019年4月10日に
- ❁ 世界6カ所で同時発表





何がわかったのか



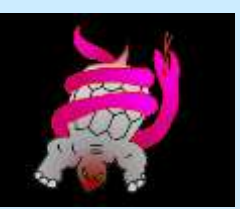
- ❁ 10 μ 秒角程度 (10^{-8} 度)
- ❁ 0.01光年 \sim 500億km
- ❁ **65億太陽質量**

2019/7/20

ブラックホール活動天体

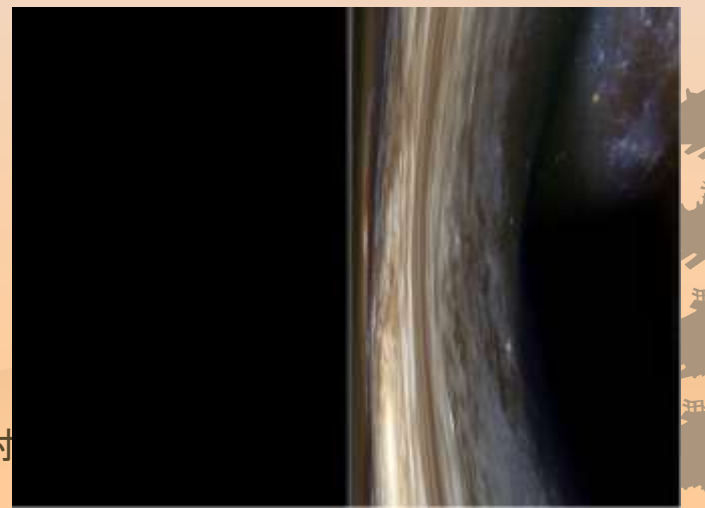
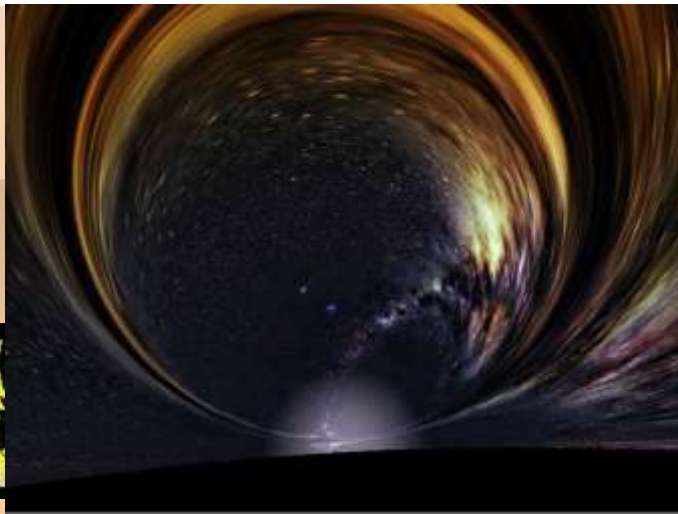
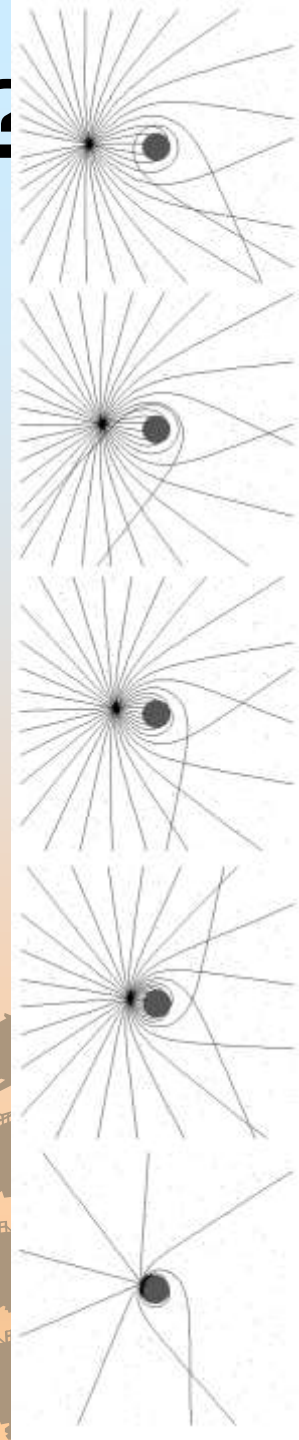
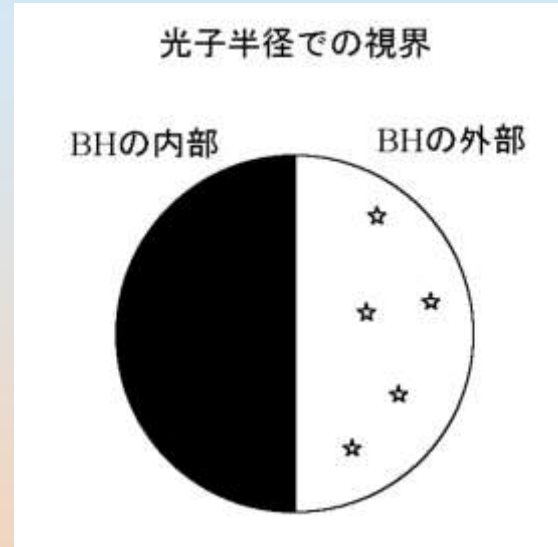
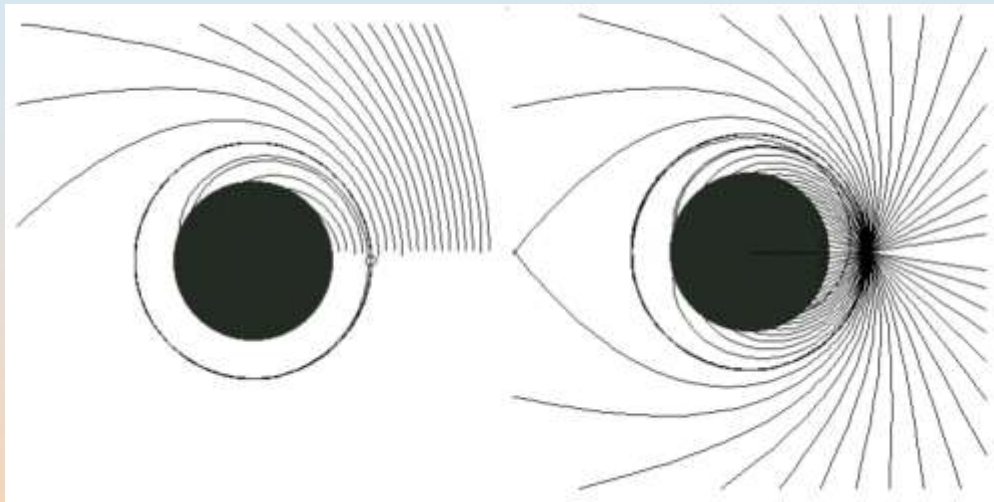
37





5 ブラックホール近傍では？ 光子半径と時空の合わせ鏡

🌀 光子半径



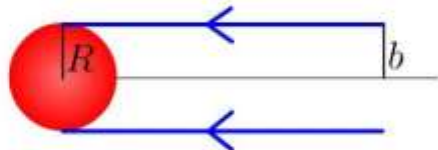
相対



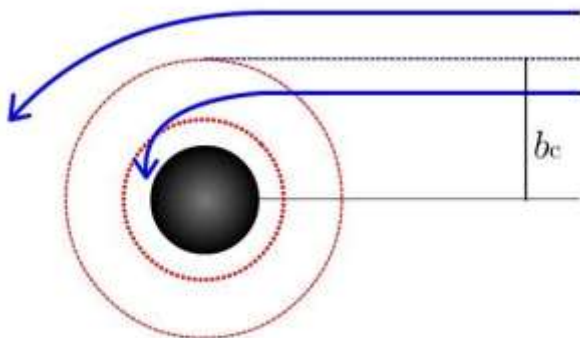
ブラックホールの見かけの大きさ



- 光線が曲がるとブラックホールの見た目は大きくみえる。☆見た目が10割！



b : 衝突パラメータ



b_c : 臨界衝突パラメータ

光線の曲がりがないければ、無限遠に射影した球の半径 b は、当然ながら、もとの球の半径 R に等しい。、無限遠から見た大きさはもとの大きさと変わらない。

ところが、光線が曲がると話は違って来る。衝突パラメータ b が十分大きければ、光線はブラックホールをそれるが、 b が小さくなるにつれてブラックホール近傍での光線の曲がり大きくなり、ついにはある b 以下で光線はブラックホールに吸い込まれるようになる。このときのギリギリの b のときが、ブラックホールから発した光線(というものがあれば)が無限遠に届くときなので、無限遠から眺めたブラックホールの大きさにほかならないわけだ。

このときの衝突パラメータ b の値は、

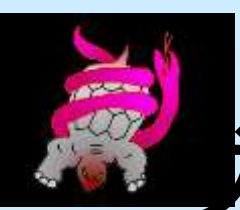
$$b_c = (3\sqrt{3}/2) r_g \sim 2.60 r_g$$

となる。すなわち、無限遠に射影したブラックホールは、もとのサイズよりも、**2.6倍**も大きく見えるのである。

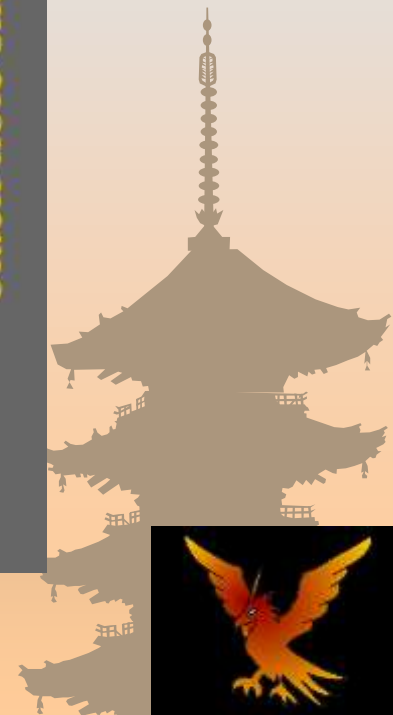
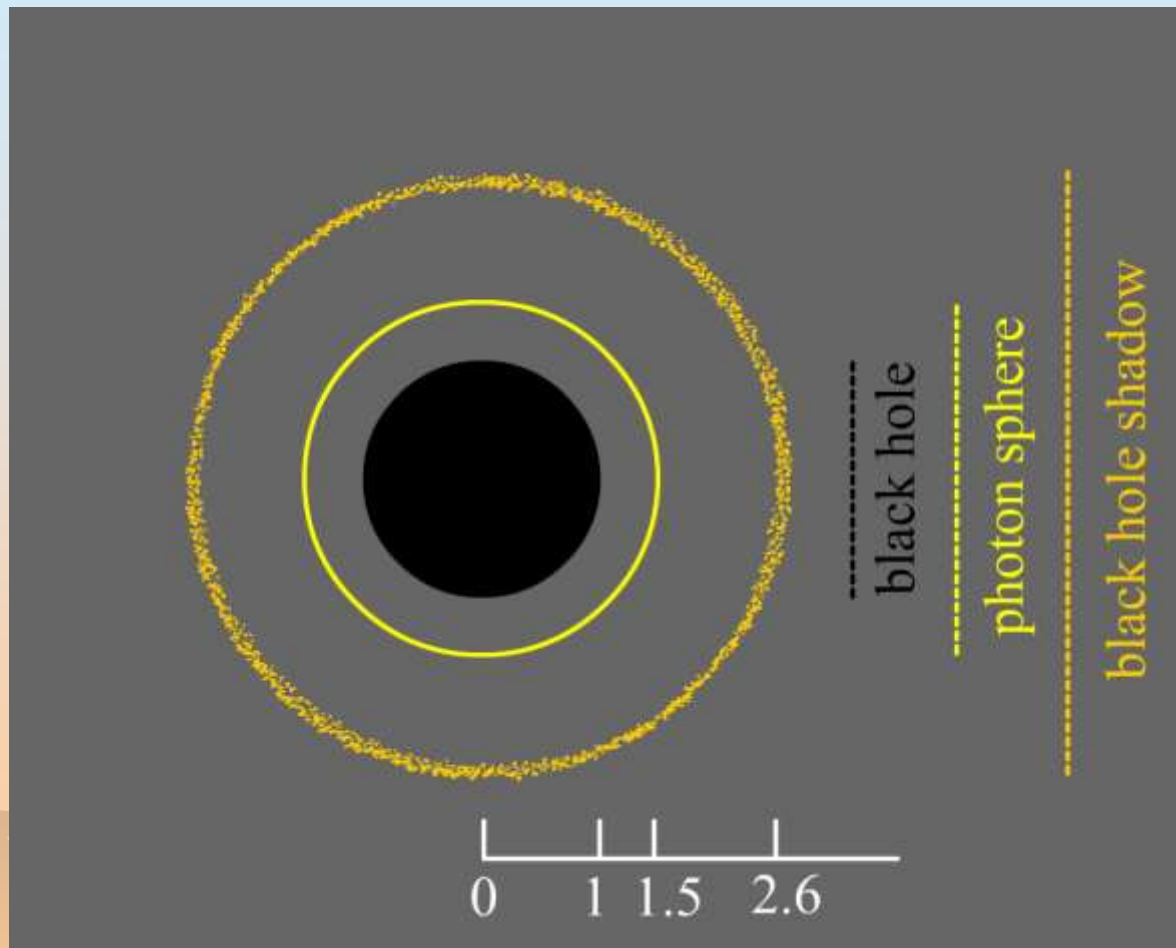
$$b_c \sim 2.6 r_g$$

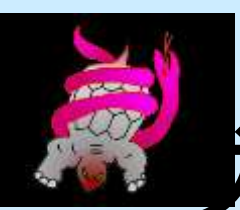
ホール活重



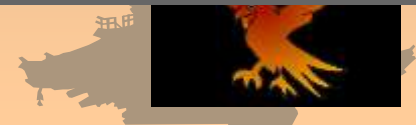
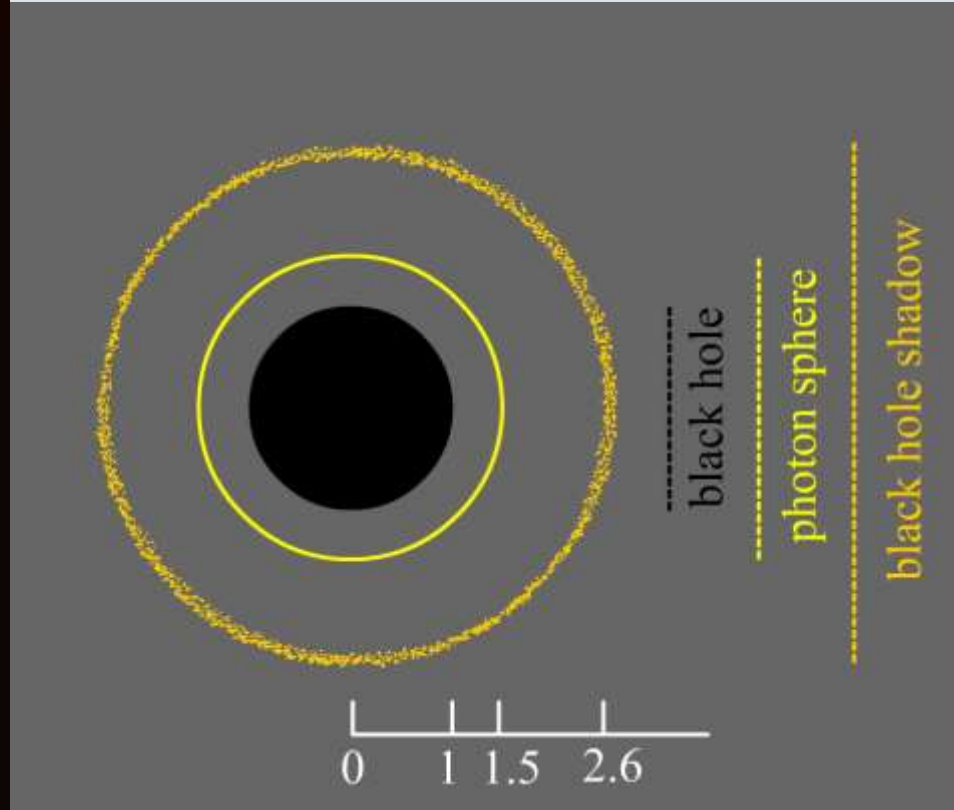
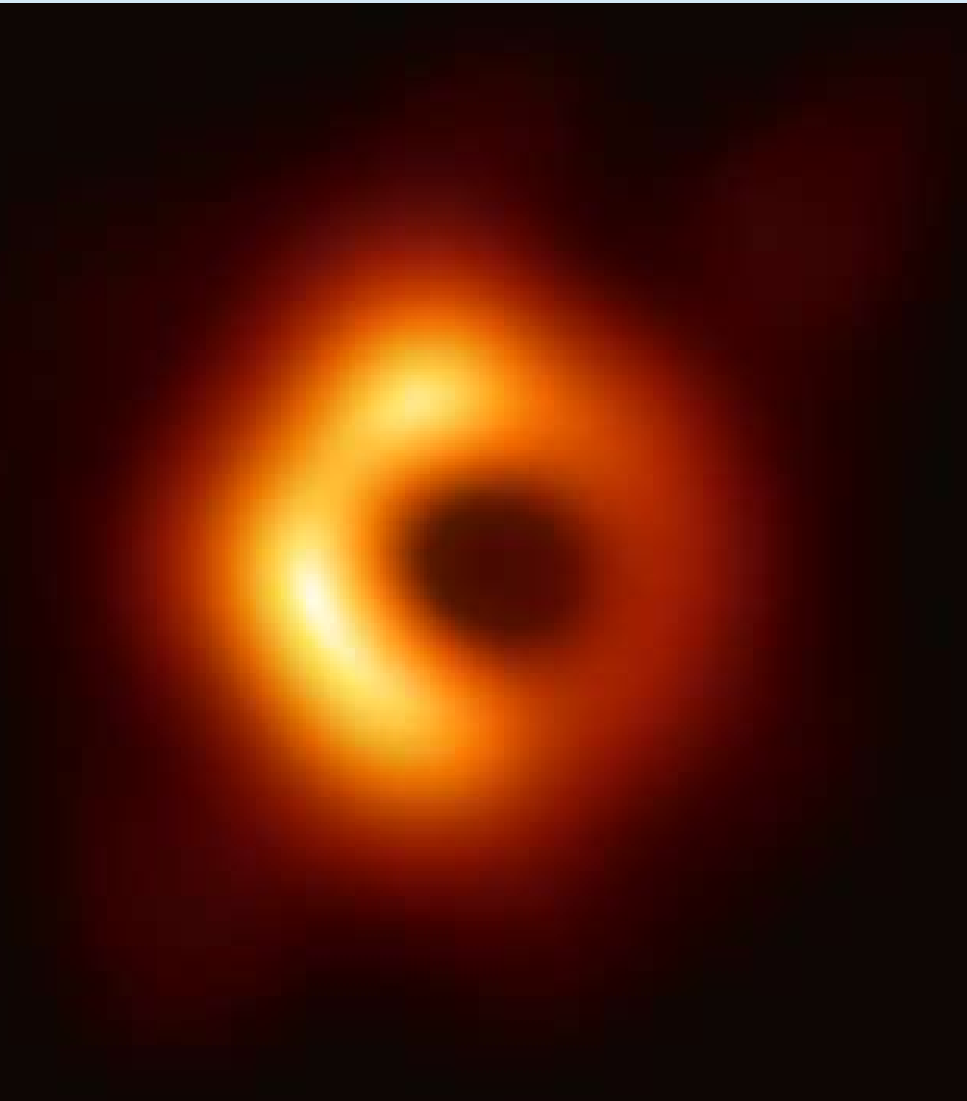


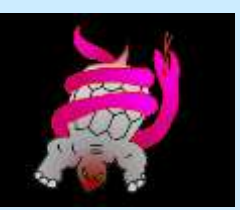
ブラックホール, 光子球, シャド





ブラックホール, 光子球, シャド





ブラックホールシャドー

- 予想通りのブラックホールシャドー
- 予想外のブラックホールリング
- まだまだ謎は尽きない
- ブラックホール研究は新たなステージへ

