

ブラックホール影は 見えるのか？

*No Black-Hole Shadow,
but Non Blackbody Star ?*

福江純(大阪教育大学)



話しの流れ

- ❁ **Black-Hole Silhouette vs. Black-Hole Shadow**
 - Geometrically thin standard disk
 - Geometrically thick slim disk
 - Geometrically thick, optically thin RIAF
- ❁ **Relativistic Optical Depth**
- ❁ **Optical Depth onto the Event Horizon**
 - Spherical flow under freefall
 - Non-relativistic case
 - Relativistic case
- ❁ **Unseen Black-Hole Shadow?**
- ❁ **Strategy**



Black-Hole Silhouette vs. Black-Hole Shadow

Black-Hole Silhouette

❁ Optically thick standard disk

- Luminet 1979
- Fukue & Yokoyama 1988
- Karas et al. 1992
- Jaroszynski et al. 1992
- Fanton et al. 1997
- Takahashi 2004, 2005

❁ Optically thick slim-like flow

- Fukue 2003
- Watarai et al. 2005
- Fukue 2011 (wind)

Black-Hole Shadow

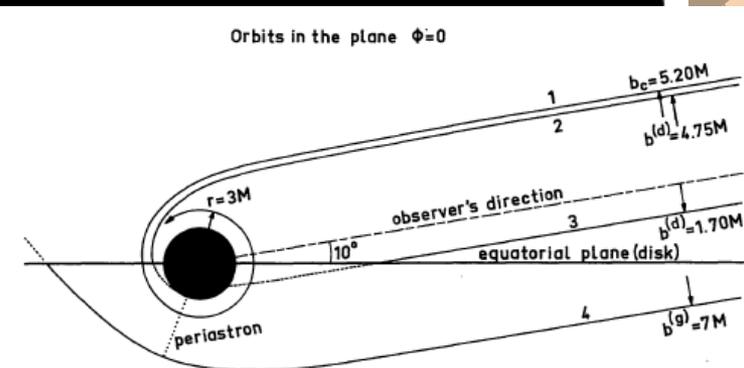
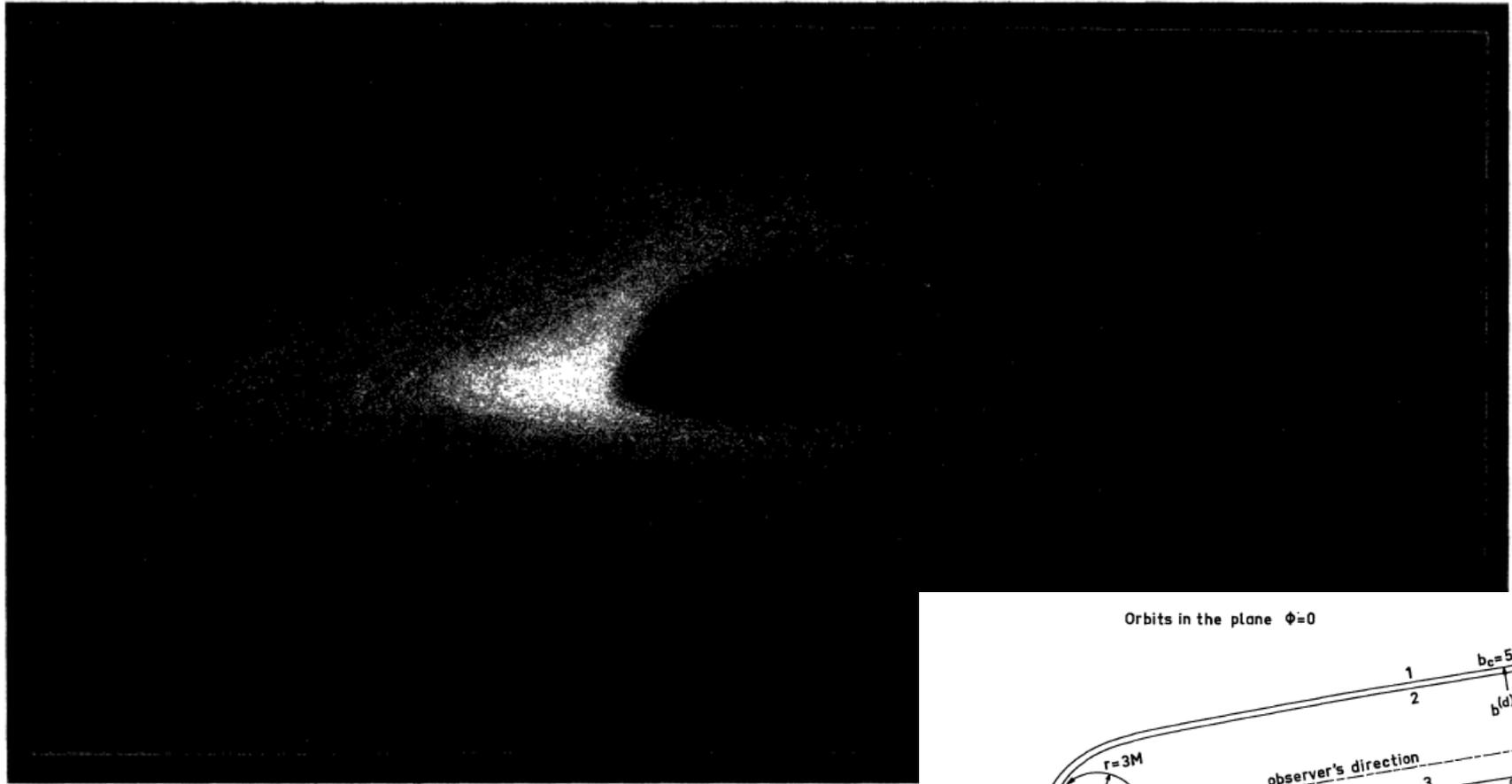
❁ Optically thin ADAF-like flow

- Falcke et al. 2000
- Broderick & Loeb 2005
- Broderick & Loeb 2009



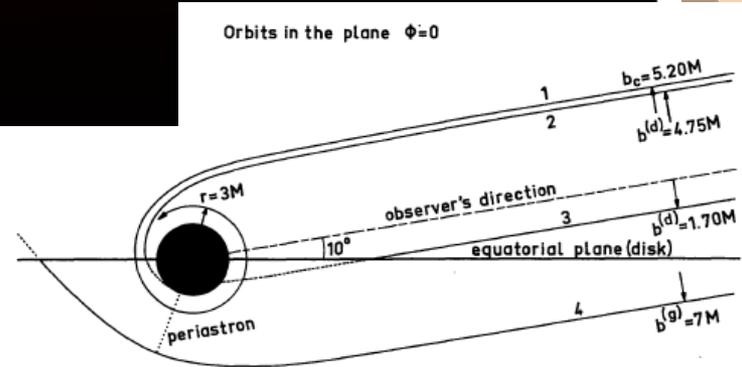
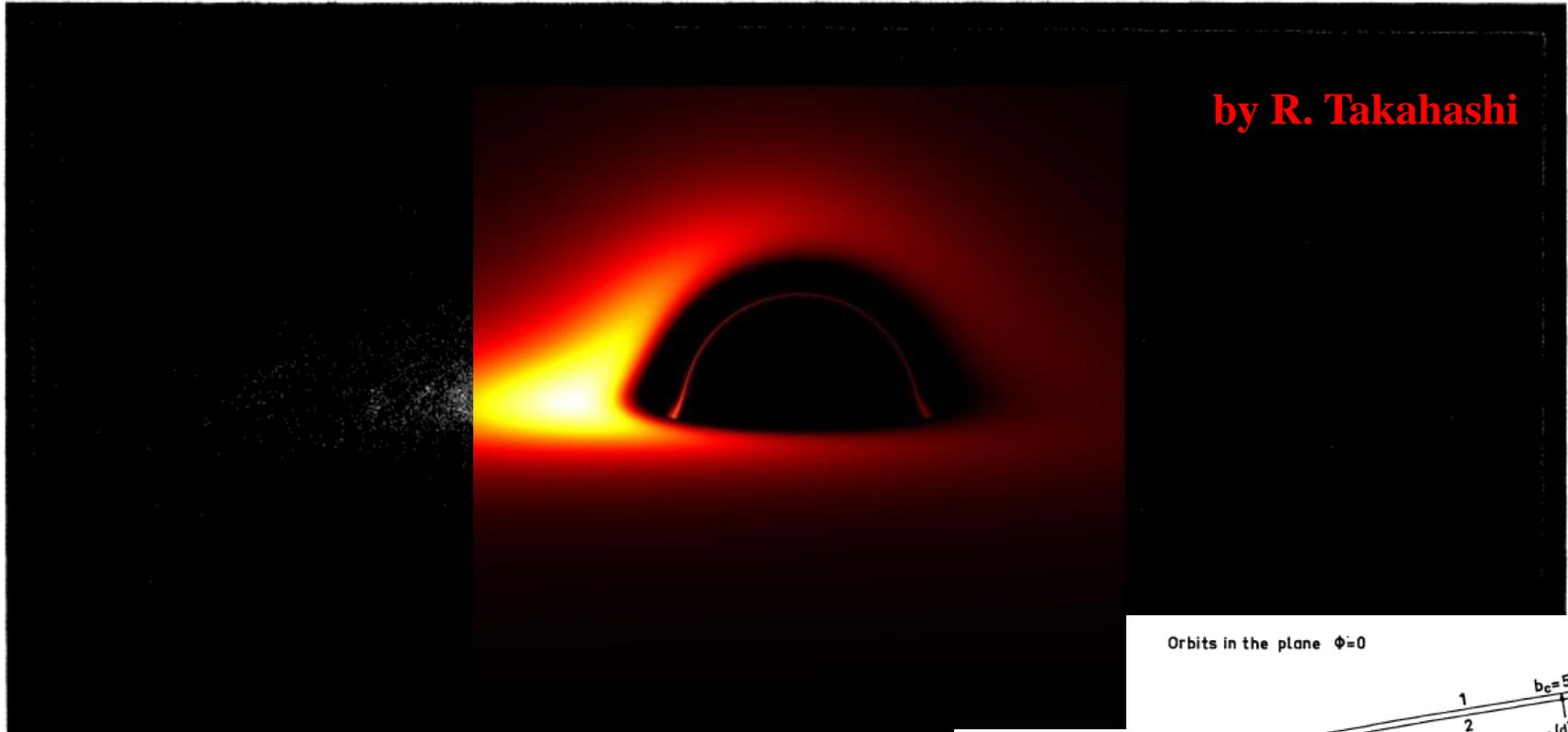


Schwarzschild/ photograph Luminet 1979



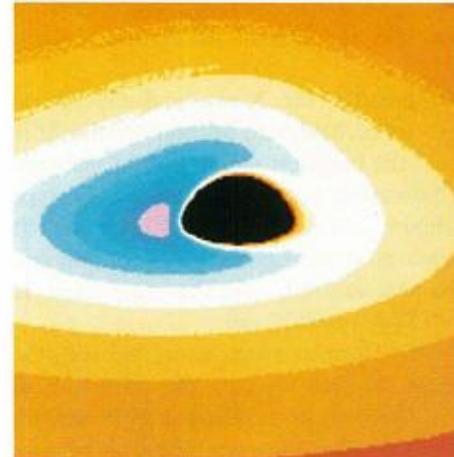
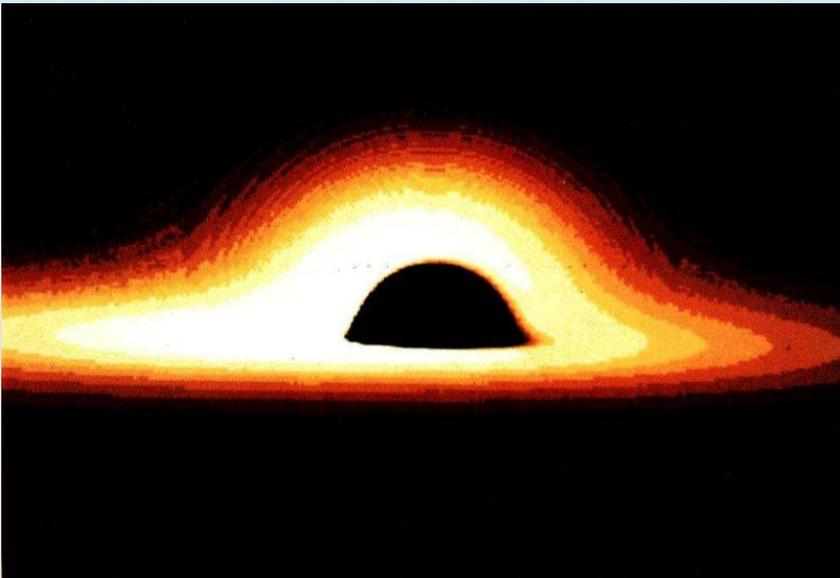


Schwarzschild/ photograph Luminet 1979



Schwarzschild/ color photo, X-ray

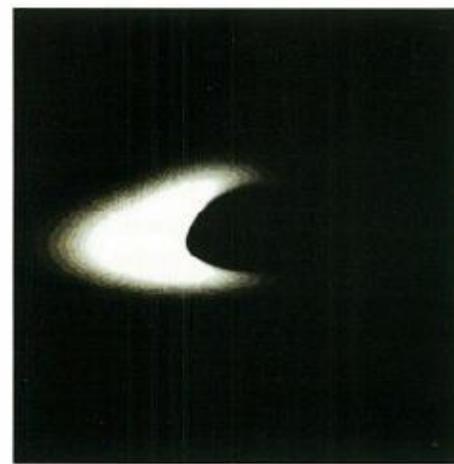
Fukue and Yokoyama 1988



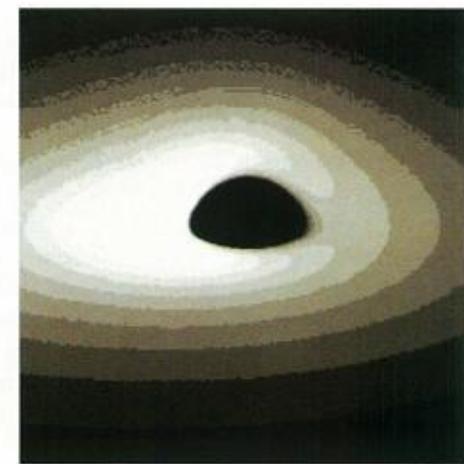
温度分布



全波長強度

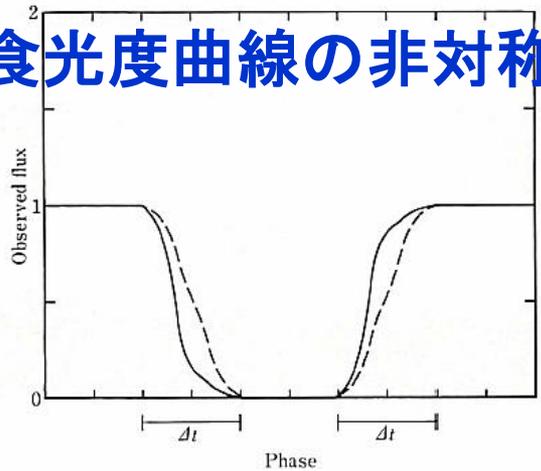


X線 (2-30keV)



可視強度

食光度曲線の非対称性



Sgr A



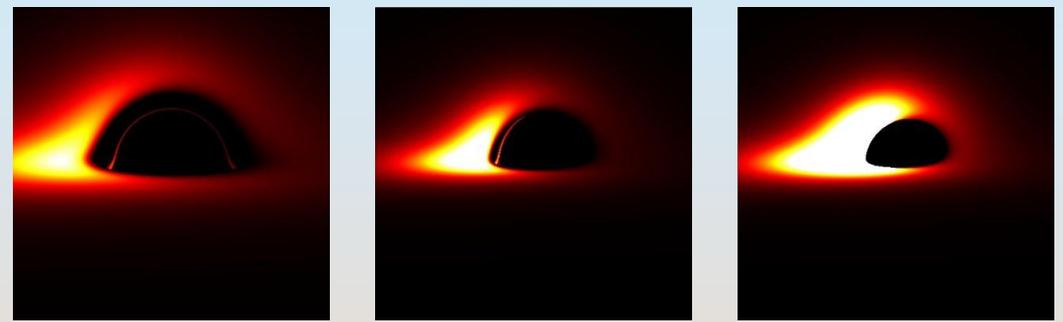


Kerr/ shadow shapes

Takahashi 2004

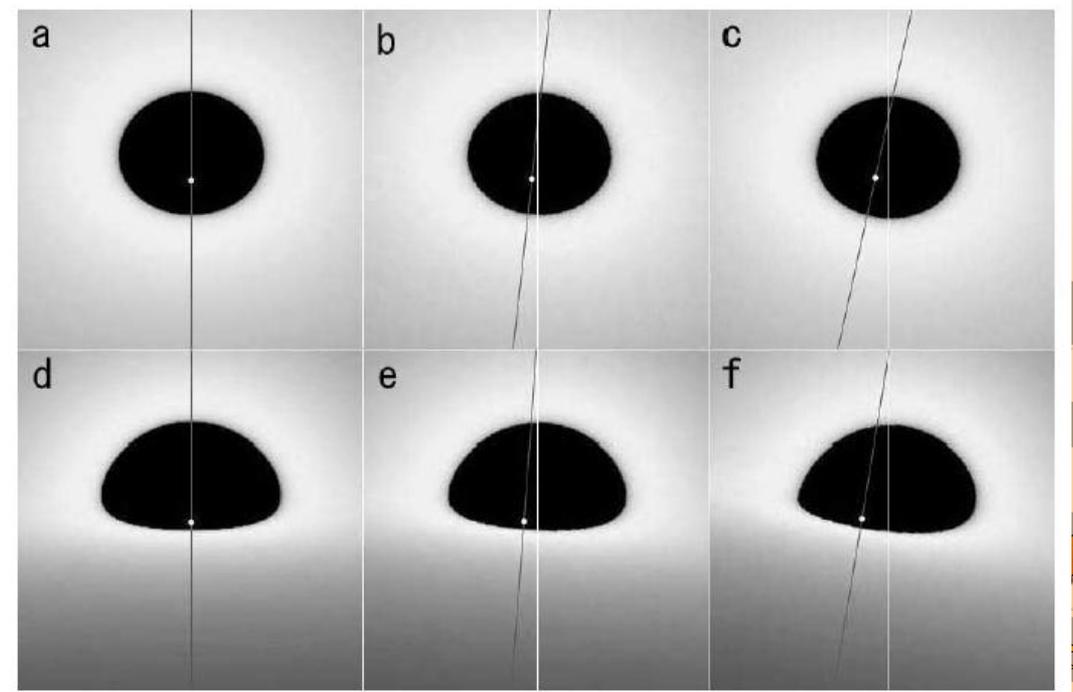


$a=0$
 $a=0.8$
 $a=0.998$



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

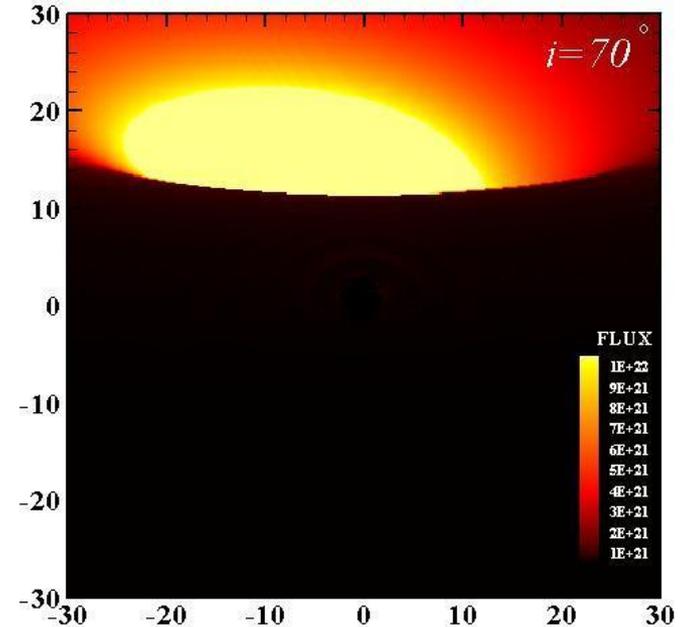
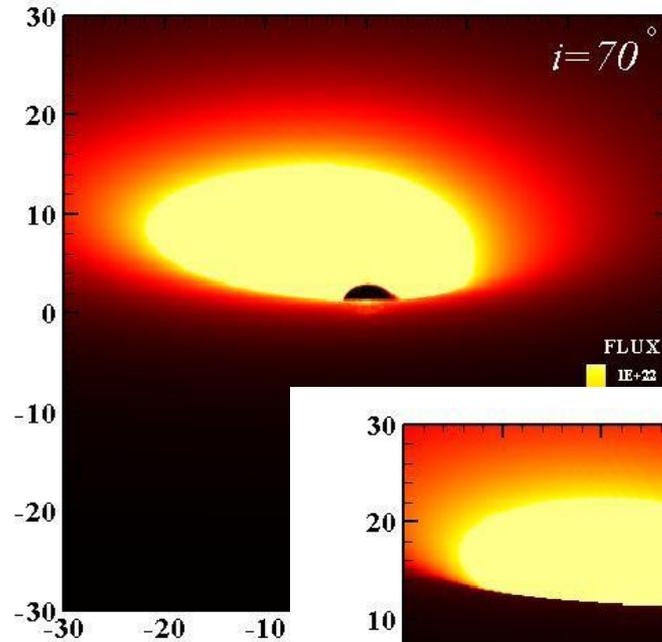
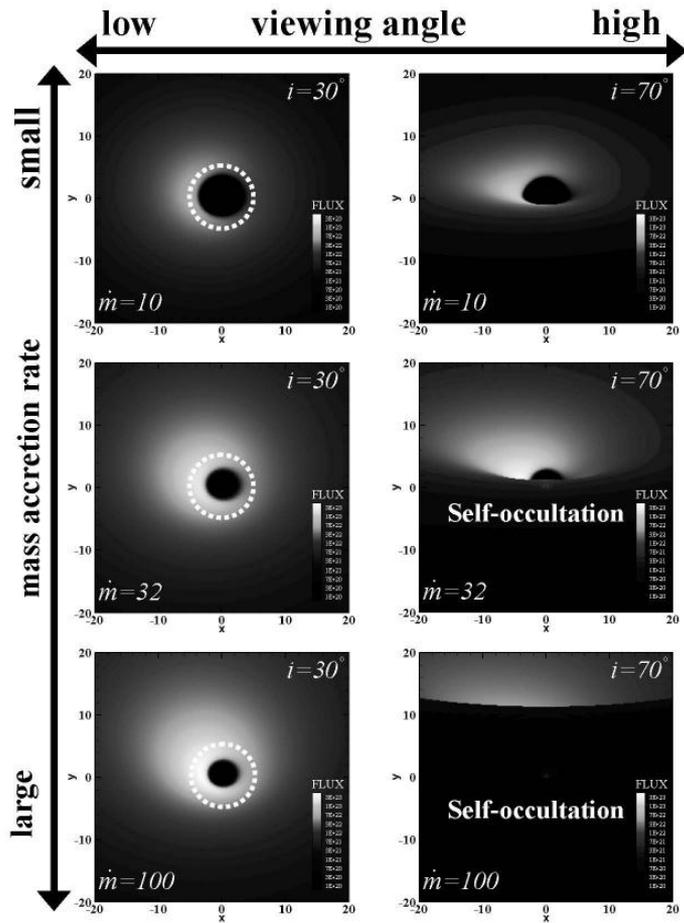




slim disk, self-occultation



Watarai et al. 2005





slim disk, self-occultation



Wu et al. 2007

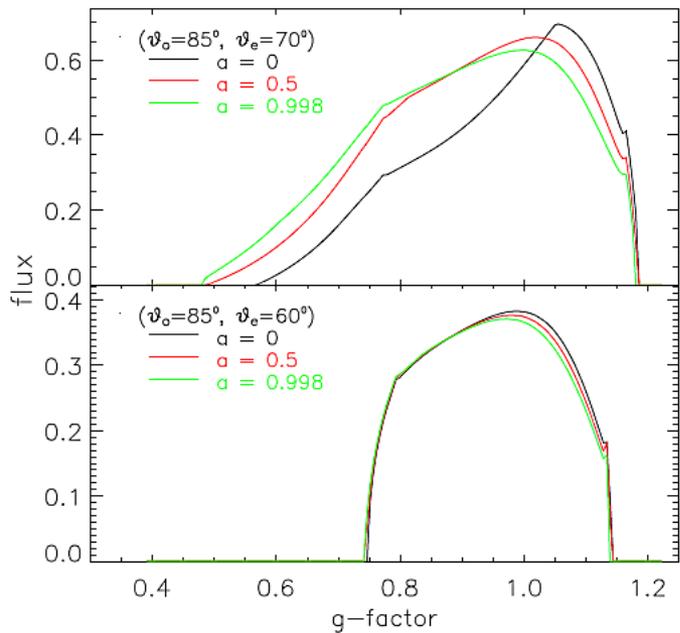


Figure 8. As in Fig. [6] but with the angles $\vartheta_o = 85^\circ$ and $\vartheta_e = 70^\circ$ (upper panel), 60° (lower panel).

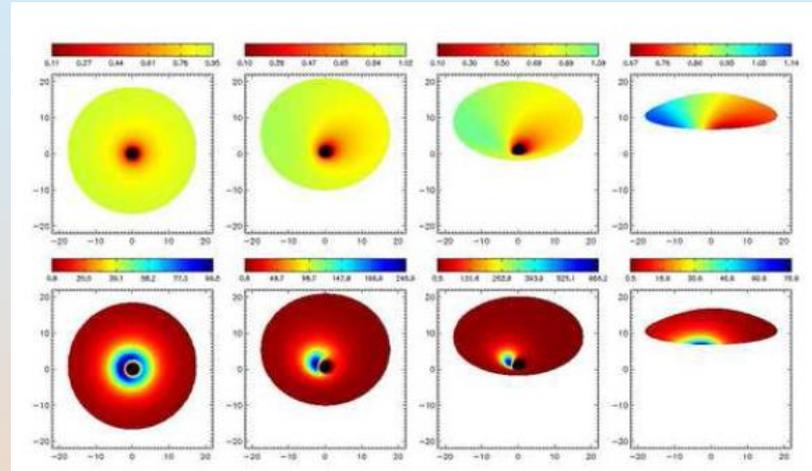


Figure 10. Redshift images (top row) and flux images (bottom row) of the accretion disc on the (α, β) plane for an extreme Kerr black hole. From left to right-hand side: $\vartheta_e = 5^\circ, 30^\circ, 55^\circ, 80^\circ$ and $\vartheta_o = 60^\circ$. Redshift images are colored by the associated values of g as measured by the infinity observer. Flux images are colored by $10^4 g^4$. The parameters n and p are both set to 3 and $f(\mu_\infty) \propto (1 + 2.06\mu_\infty)$.

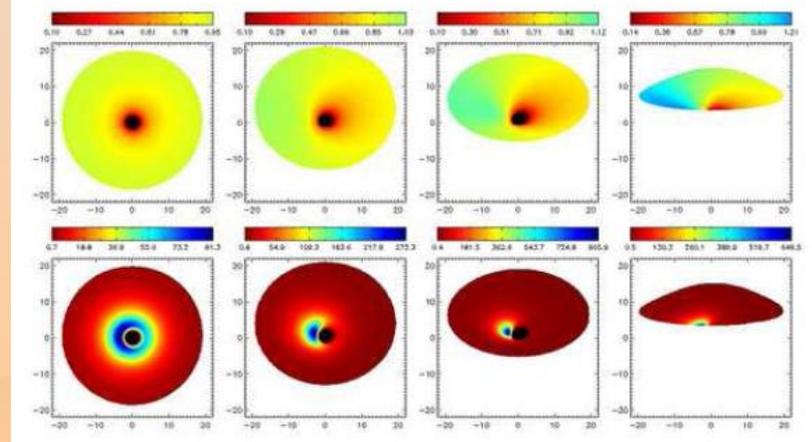


Figure 11. As in Fig. [10] but with the angle $\vartheta_e = 70^\circ$.



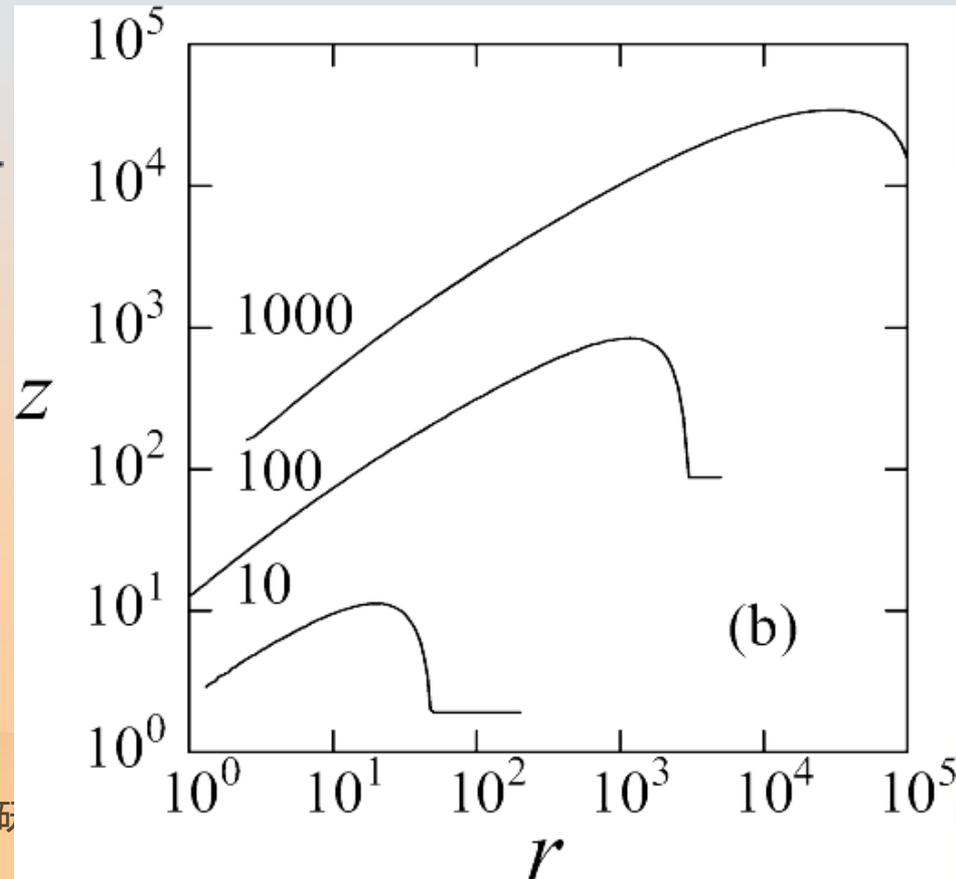
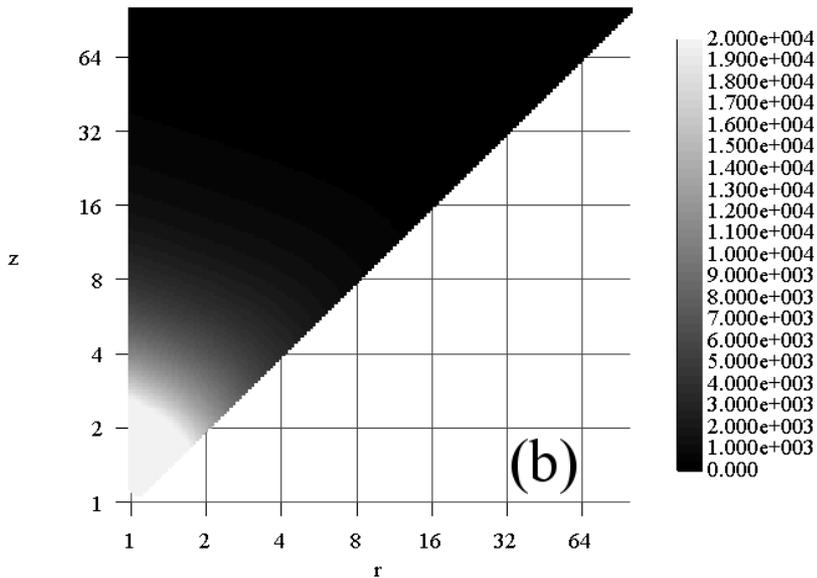
supercritical disk with wind



Fukue 2011

❁ 光学的に厚い風
密度分布

❁ 見かけの光球面(風中)
pole-on view / mdot





supercritical disk with wind



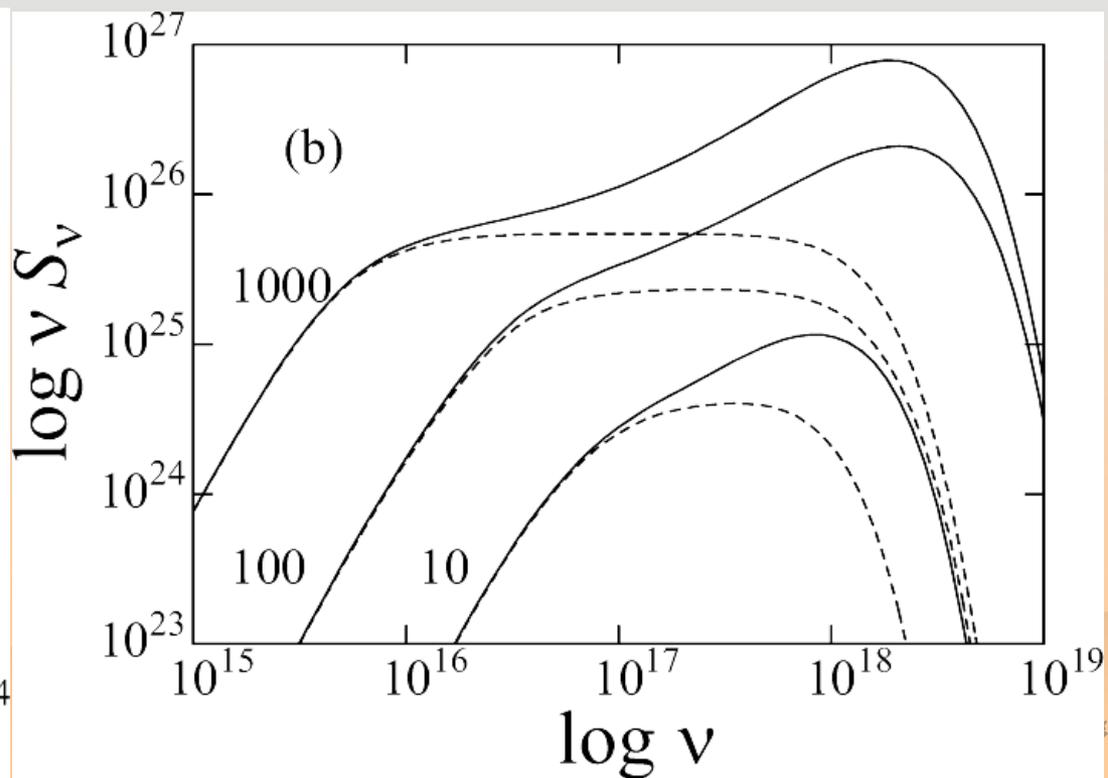
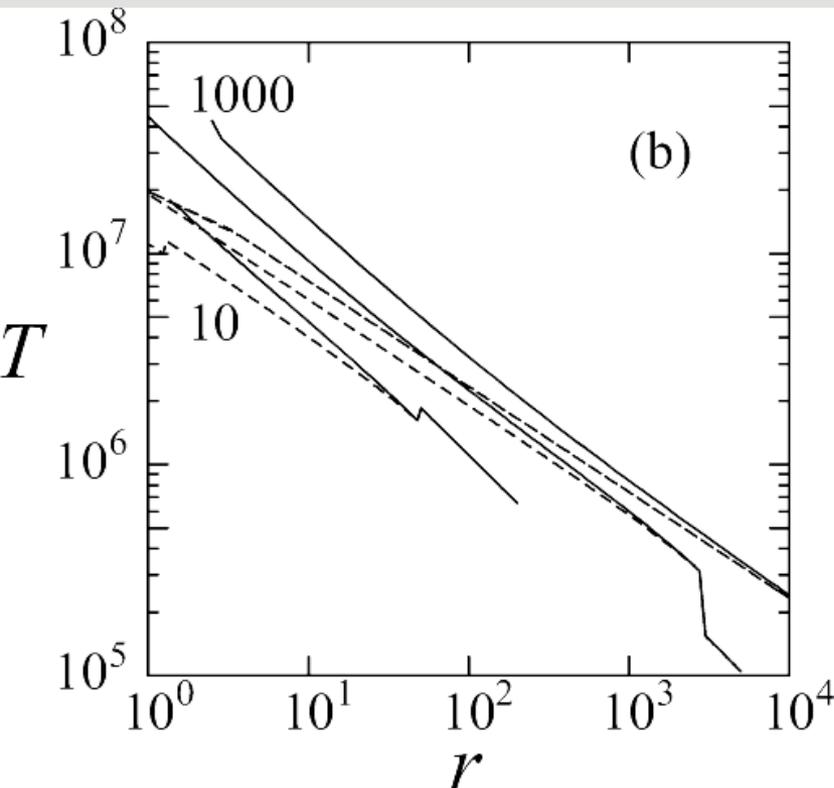
Fukue 2011

❁ 温度分布

- 共動系 (破線)
- 観測系 (実線)

❁ スペクトル分布 SED

- 共動系 (破線)
- 観測系 (実線)





ADAF-like flow

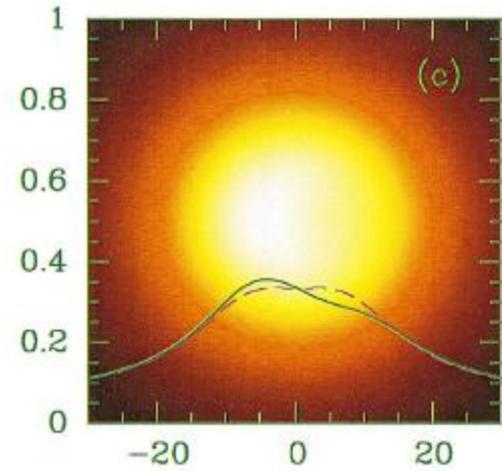
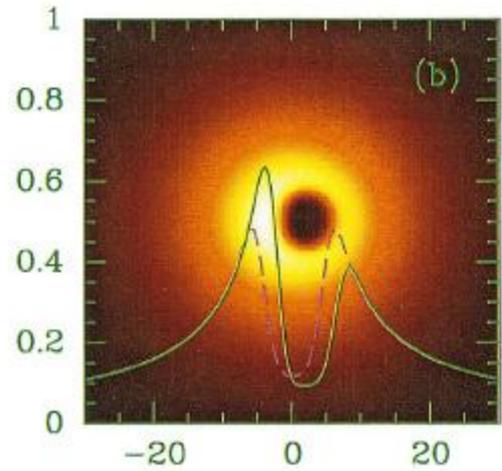
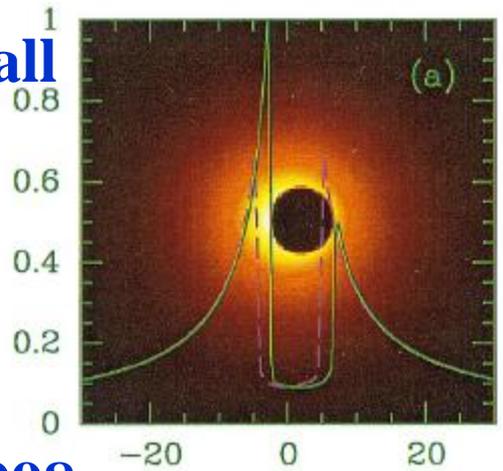
Falcke et al. 2000

ray-trace

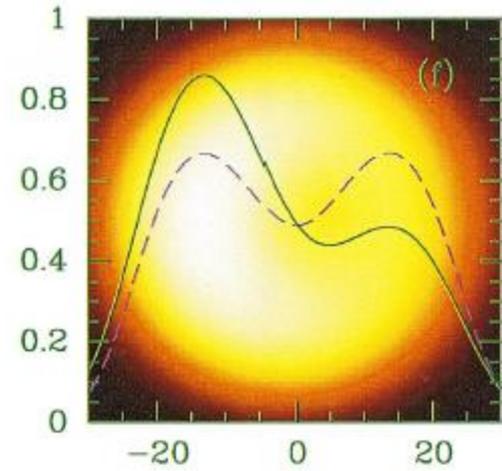
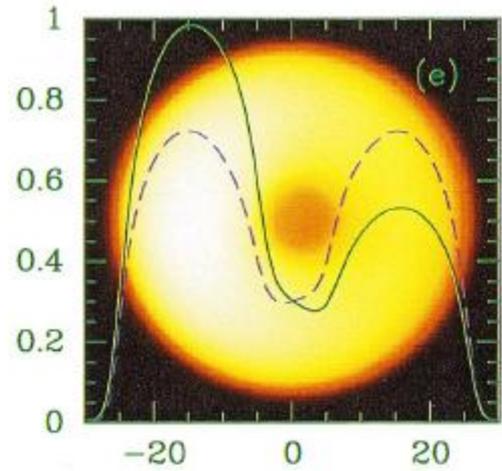
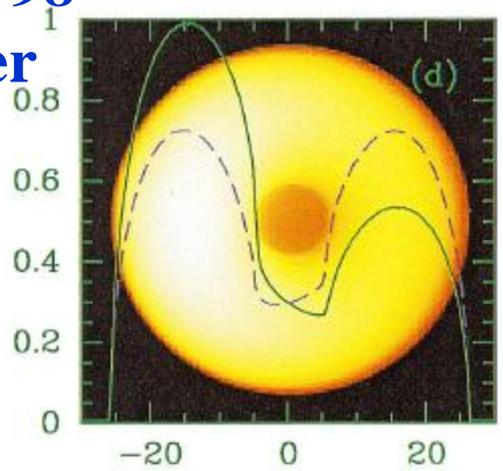
0.6mm

1.3mm

$a=0$
freefall



$a=0.998$
kepler
shell

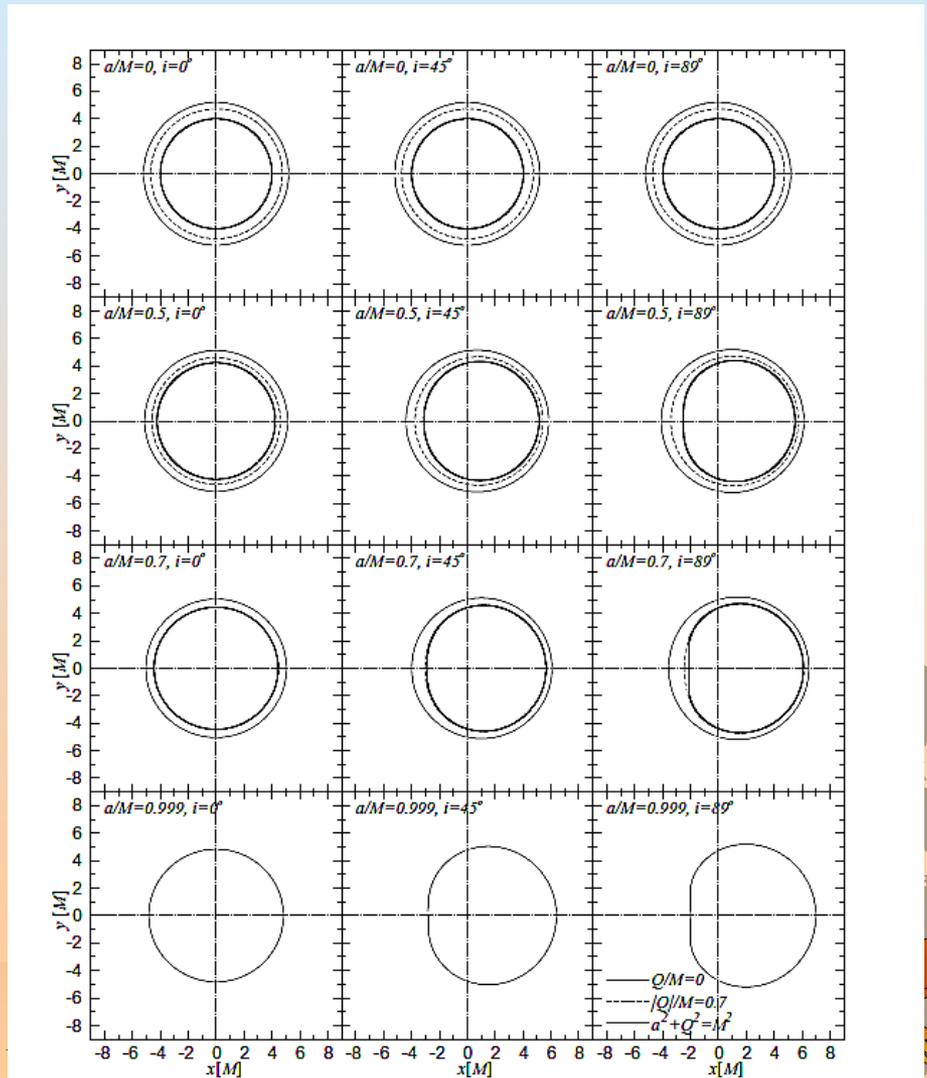




Kerr-Newman Takahashi 2005

$a=0, i=0^\circ, 45^\circ, 89^\circ$
 $a=0.5, i=0^\circ, 45^\circ, 89^\circ$
 $a=0.7, i=0^\circ, 45^\circ, 89^\circ$
 $a=0.9999, i=0^\circ, 45^\circ, 89^\circ$

細い実線: $a^2+Q^2=0$
 細い破線: $a^2+Q^2=0.7$
 太い実線: $a^2+Q^2=1$





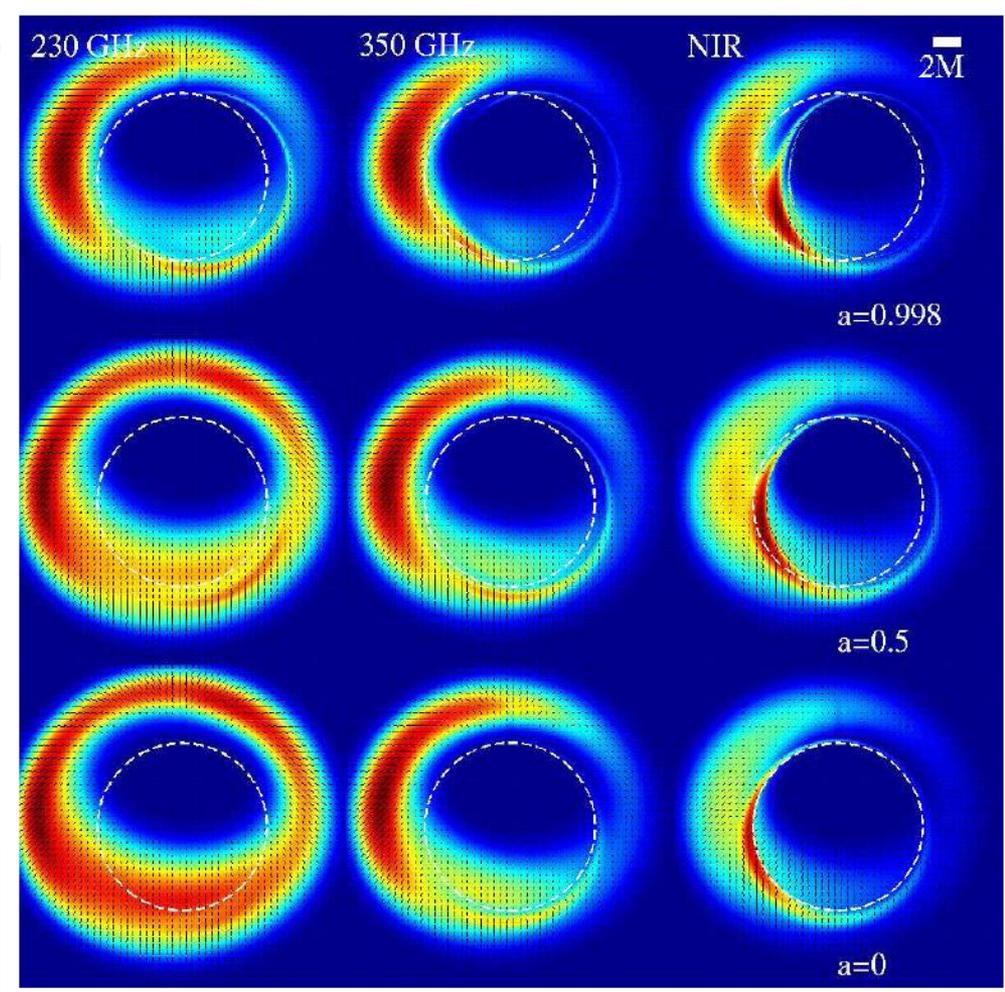
Optically-Thin Hot Spots

Broderick and Loeb 2006

- 半透明ホットスポットのイメージなど
- 輻射輸送 (散乱なし)

GR
 230GHz/350GHz/NIR
 $a=0, 0.5, 0.998$
 $i=45^\circ$

長時間積分をしたと想定して、軌道平均したイメージ





disk + jets

Broderick and Loeb 2009

M87: 1.3mm

TABLE 1
JET MODEL PARAMETERS

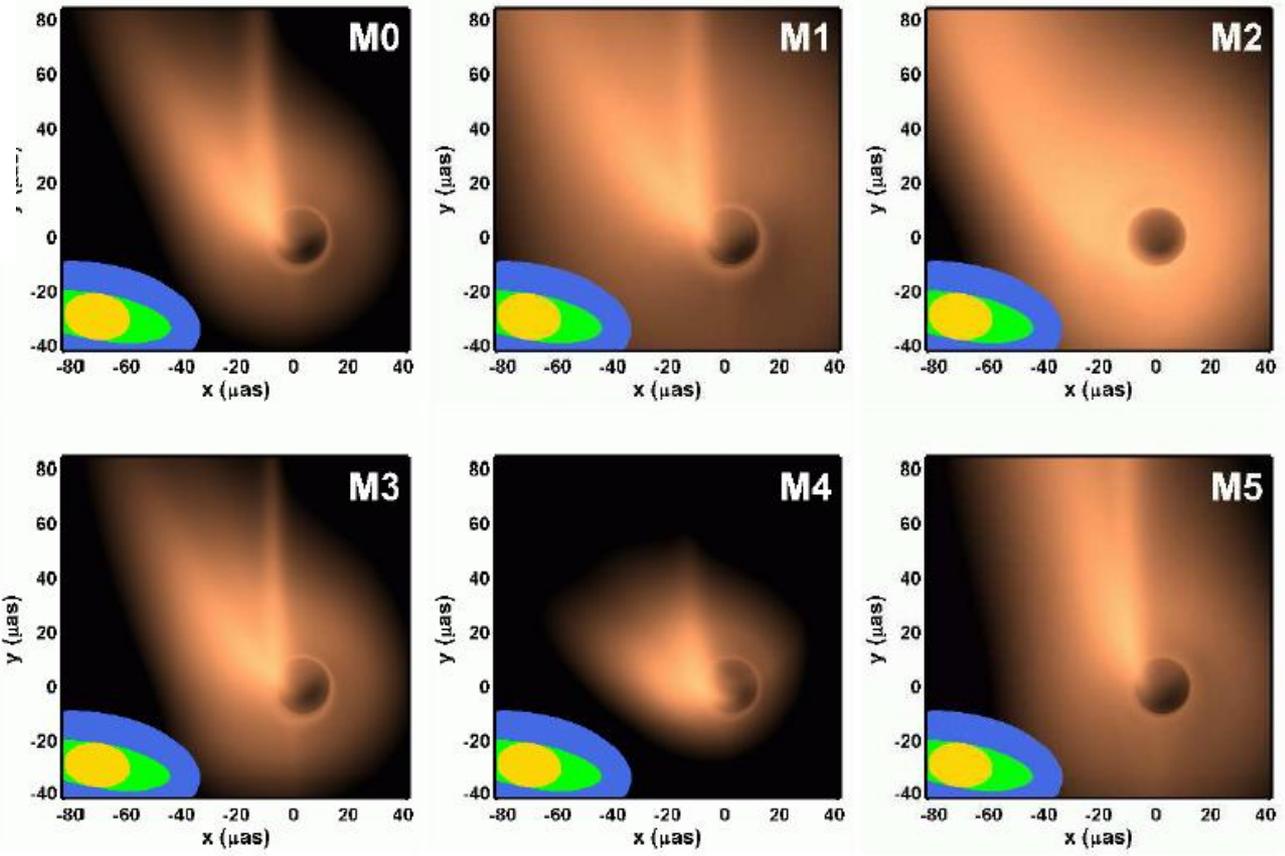
Model	$a(M)$	θ	$r_{fp}(GM/c^2)$	ξ
M0	0.998	25°	10	1/2
M1	0.998	25°	20	1/2
M2	0	25°	10	1/2
M3	0.998	40°	10	1/2
M4	0.998	25°	10	5/8
M5	0.998	25°	10	3/8

a : スピン

θ : 傾き

r_{fp} : 太さ

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





RT: GR transfer

Wu et al. 2008



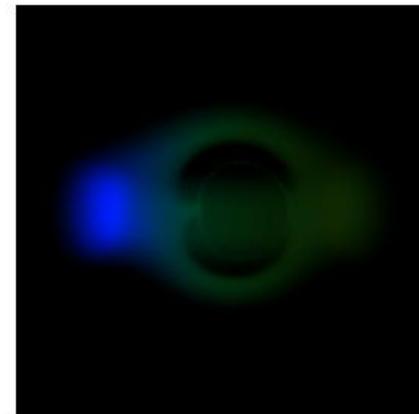
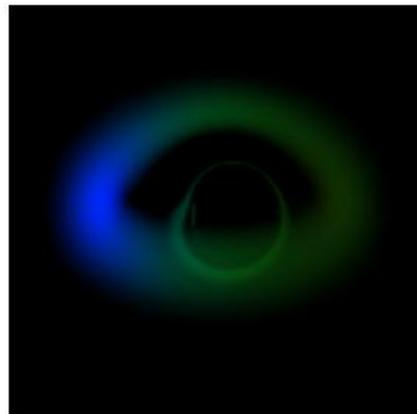
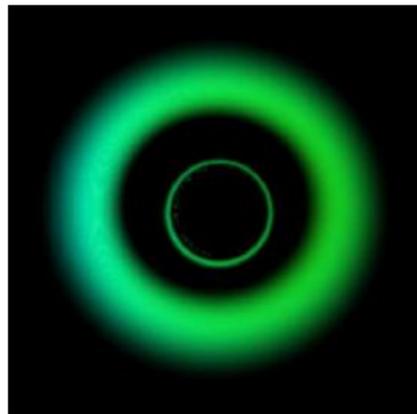
Fe-line torus

$a=0.998$

15°

60°

85°

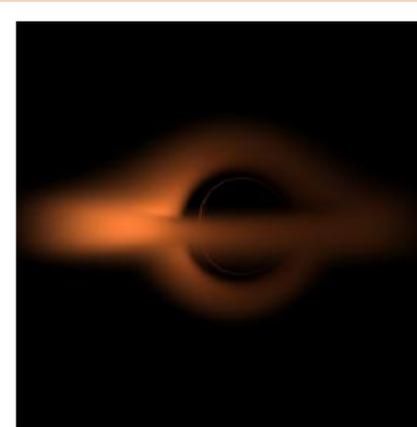
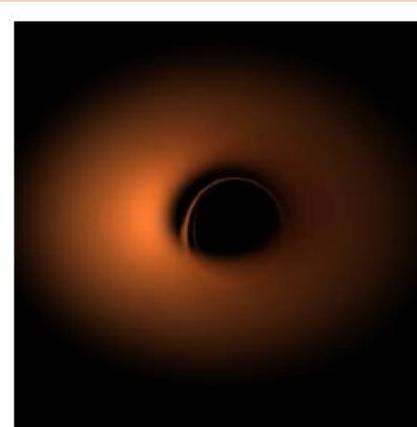


electron-scattering torus

$a=0.998$

45°

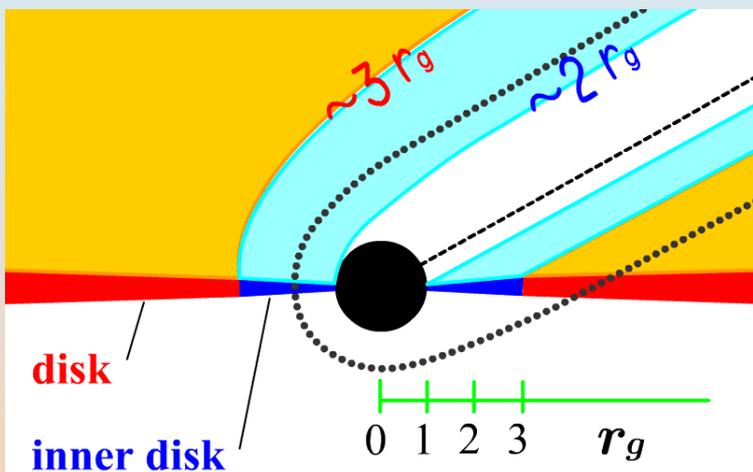
85°



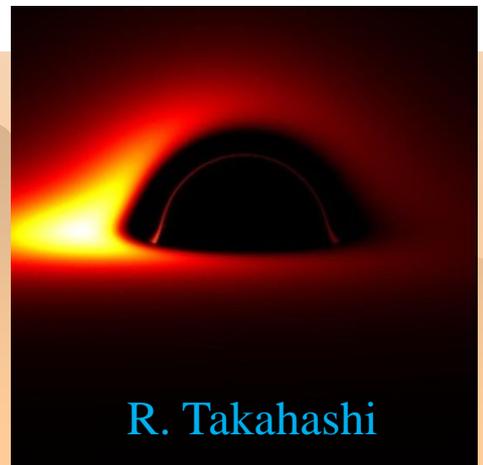
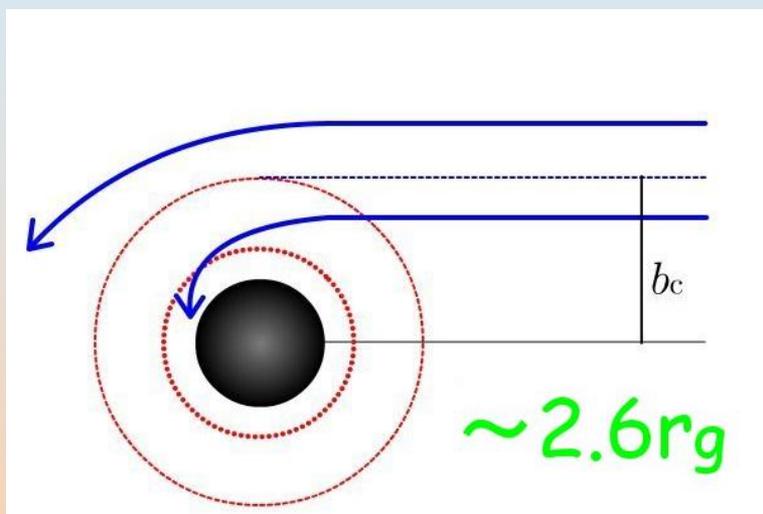


Black-Hole Silhouette vs. Black-Hole Shadow

Silhouette



Shadow



R. Takahashi

Sgr



回転していないブラックホール



最大回転するブラックホール





Black-Hole Silhouette vs. Black-Hole Shadow



Black-Hole Silhouette

Black-Hole Shadow

- ❁ Optically thick standard disk
 - ISMのscatteringの問題はあるが、原理的にはブラックホールシルエットが見えるだろう

- ❁ Optically thin ADAF-like flow
 - ISMのscatteringの問題はあるが、原理的にはブラックホールシャドウが見えるだろう

- ❁ Optically thick slim-like flow
 - 自己掩蔽に加え、光学的に厚い降着円盤風があるので、非常に難しい





Black-Hole Silhouette vs. Black-Hole Shadow

Black-Hole Silhouette

Black-Hole Shadow

- Optically thick standard disk
 - ISMのscatteringの問題はあるが、原理的にはブラックホールシルエットが見えるだろう

- Optically thin ADAF-like flow
 - ISMのscatteringの問題はあるが、原理的にはブラックホールシャドウが見えるだろう

- Optically thick slim-like flow
 - 自己掩蔽に加え、光学的に厚い降着円盤風があるので、非常に難しい



ものごとは“見た目”が大事

天体は“見た目”が10割

全体像(積分像)から詳細像(分解像)へ

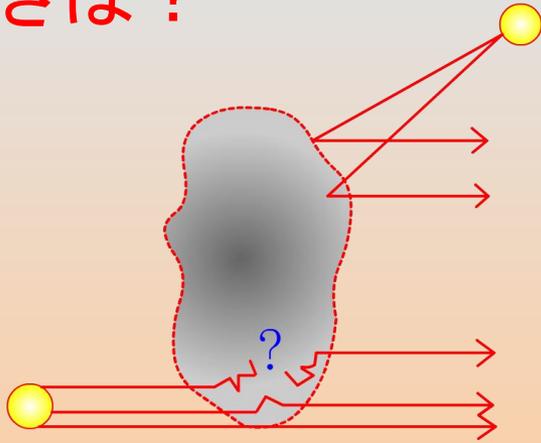
- ❁ 固有系における見かけ上の“光球”
 - 周縁減光効果
 - 光学的厚みへの相対論的影響
- ❁ 観測系における“見た目”
 - 光行差
 - ドップラー効果
 - 重力赤方偏移 & 光線の彎曲





雲ーガス体ーの“見た目”

- ❁ 半透明なガス体の表面はどこか？
- ❁ 背後から光が透け出てくるときは？



どこで反射するのか



どこで透過するのか

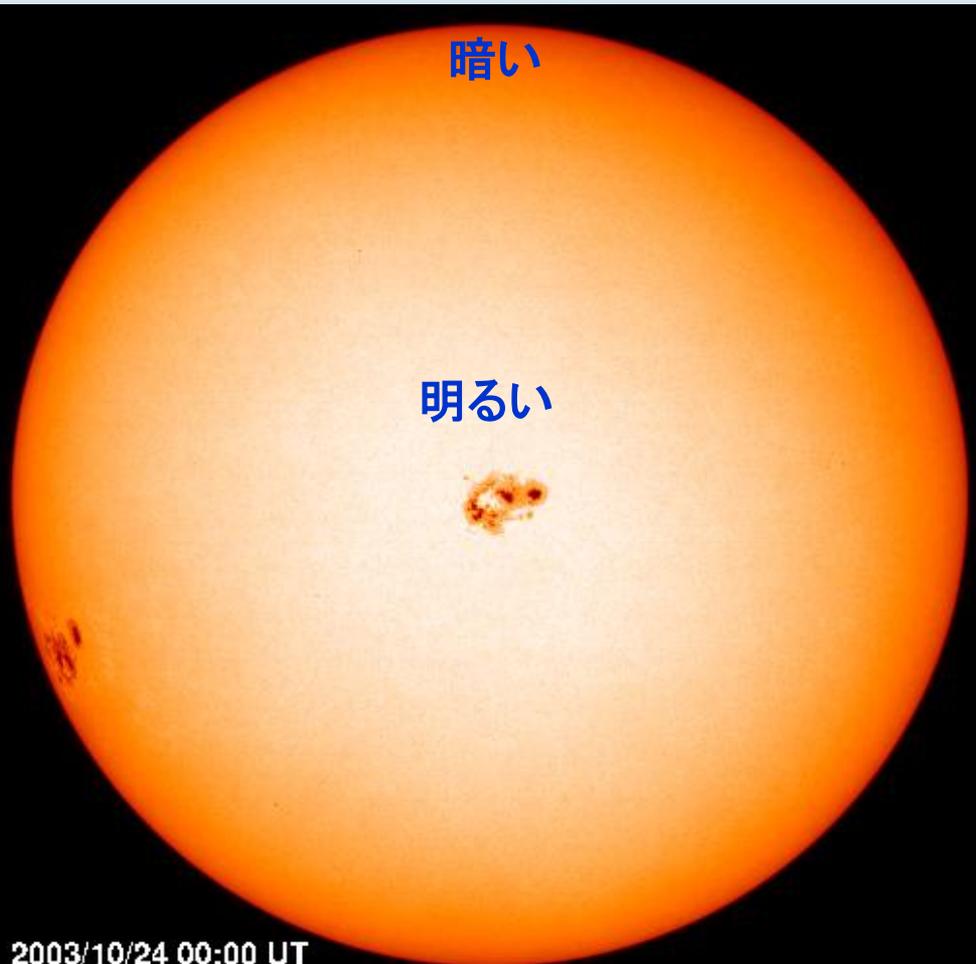
- ❁ ガスの密度分布や温度分布によって見える場所(深さ)は違う



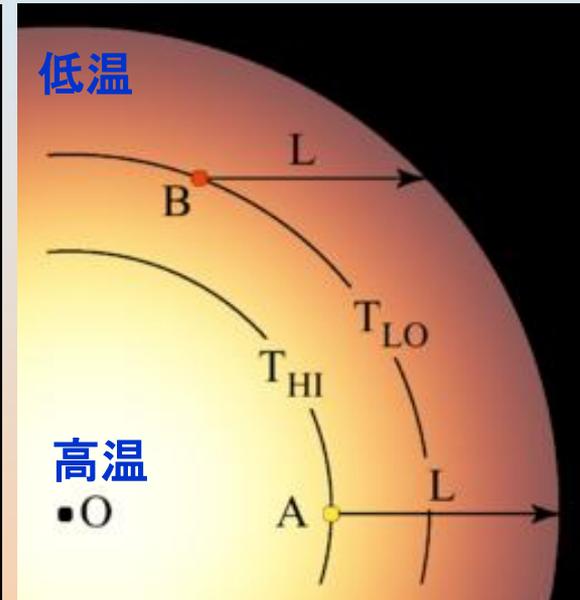


太陽の周縁減光効果

❁ 太陽の正面写真



❁ 太陽の断面図



周縁部
浅い場所
低温
暗い

中央部
深い場所
高温
明るい

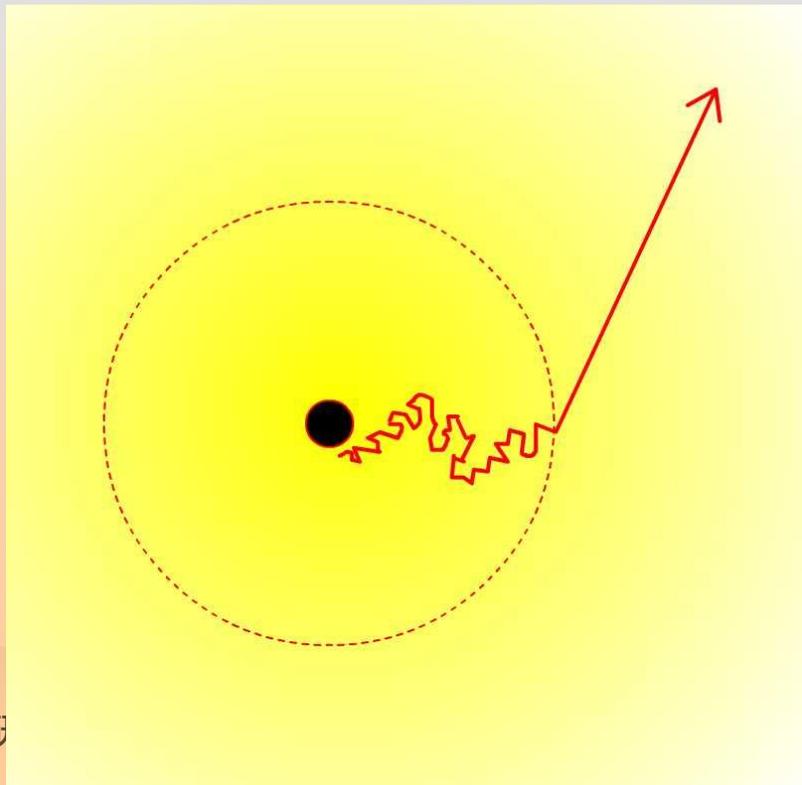
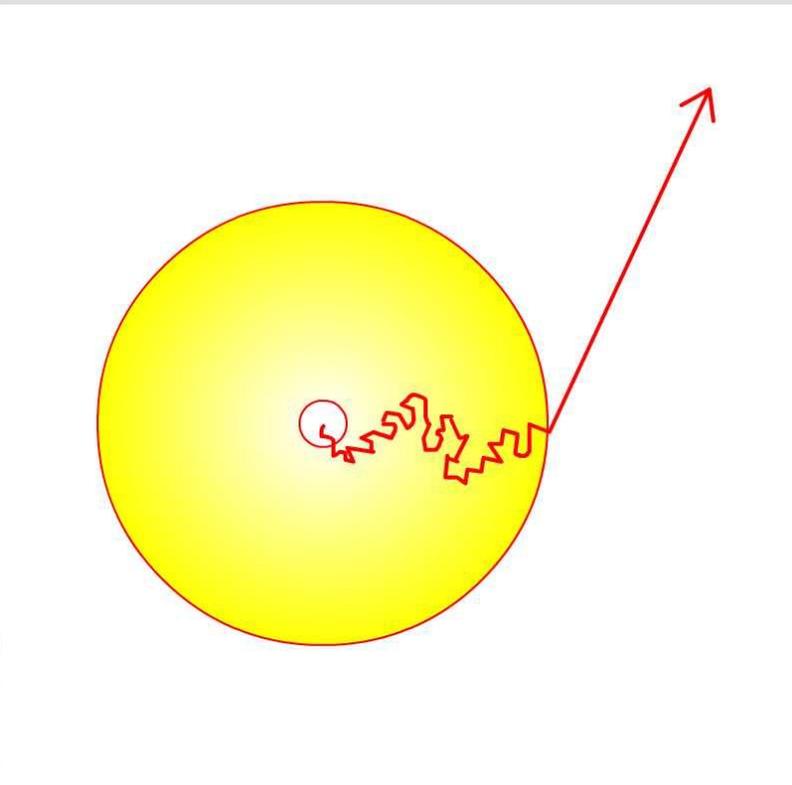
❁ どこを視ているのか





ふつうの星とブラックホール風

- ❁ “表面”がある
- ❁ ガスが静止している
- ❁ 広がっている
- ❁ ガスが動いている





ローレンツ=フィッツジェラルド短縮による光学的厚みの変化



- ❁ 行程 λ は、ローレンツ=フィッツジェラルド短縮で変わる
- ❁ 光学的厚み $d\tau$ は相対論的不変量
- ❁ 亜光速プラズマ流では、下流方向に向かって光学的厚み τ は見かけ上は小さくなる。上流方向に向かって大きくなる。

— Abramowicz et al. 1991

$$\lambda = \frac{1}{\gamma(1 - \beta \cos\theta)} \lambda_0$$

$$\beta = \text{速度 } v / \text{光速 } c$$

$$\gamma = \text{ローレンツ因子}$$

$$\cos\theta = \text{方向余弦}$$

$$d\tau = d\tau_0 = \kappa_0 \rho_0 ds_0$$

$$= \gamma(1 - \beta \cos\theta) \kappa_0 \rho_0 ds$$

$$\kappa_0 = \text{不透明度}$$

$$\rho_0 = \text{共動系でのガス密度}$$

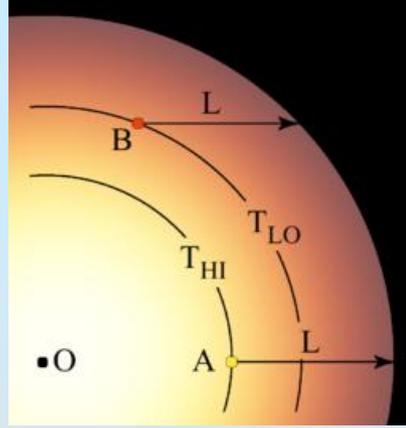
$$ds_0 = \text{共動系での光路長}$$

$$ds = \text{静止系での光路長}$$

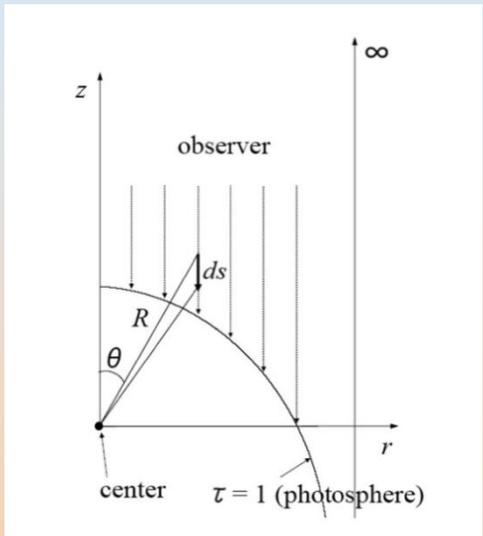




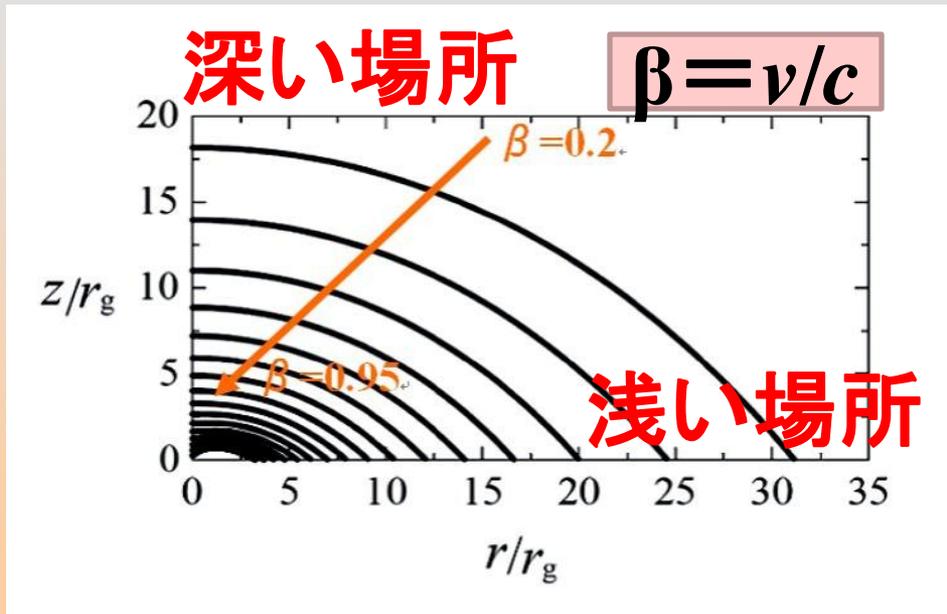
見かけの光球面



観測者は $z = \infty$ にいる



見かけの光球(見た目の表面)の位置



β 小: 周縁減光効果

β 大: 光球面収縮

β 大 ($> 2/3$): 中央で凹

— Abramowicz et al. 1991

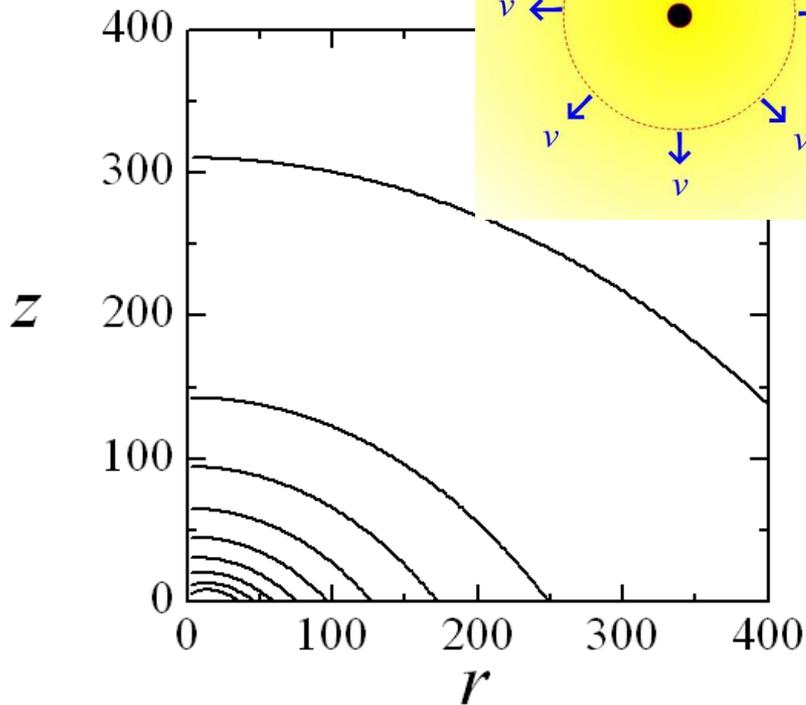
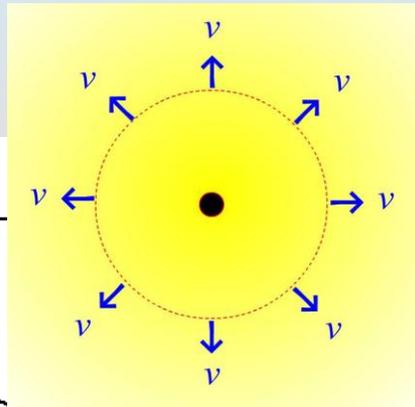
見かけの光球面の形状。速度は β が 0.2 から 0.95 まで 0.05 ずつ増えている。



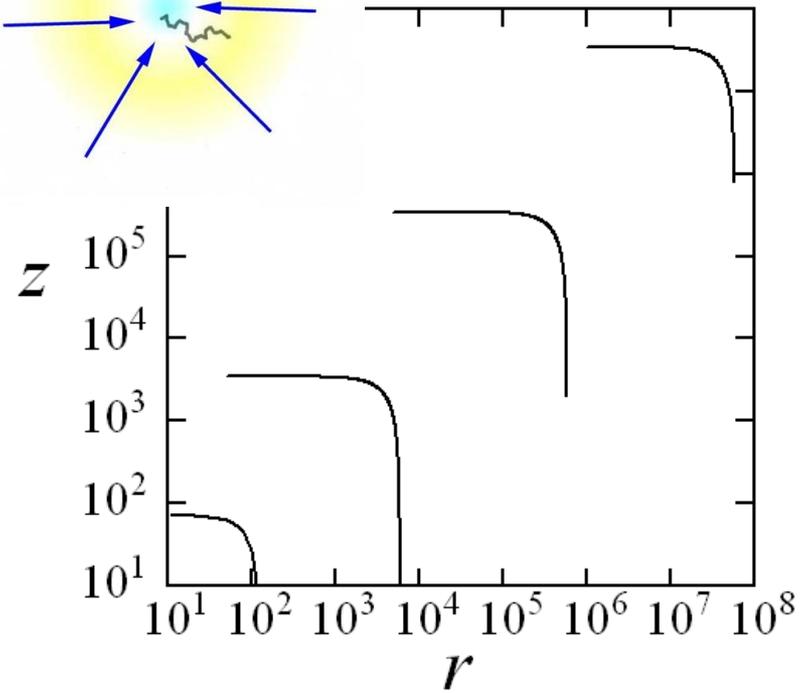
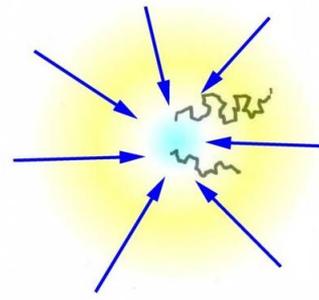


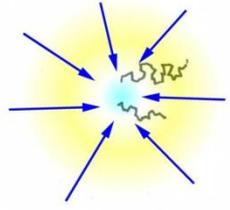
Wind vs Accretion

❁ ブラックホール風



❁ 球対称降着





球対称降着モデル

❁ 仮定

- シュバルツシルト時空
- 定常
- 球対称降着 (R)

- 自由落下

$$g_{00} = 1 - \frac{r_g}{R}$$

$$\rho_0 = \frac{\dot{M}}{4\pi\gamma\beta c} \frac{1}{R^2}$$

$$u = \gamma\beta\sqrt{g_{00}}$$

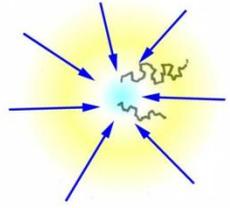
$$u = \beta = \sqrt{r_g / R}$$

❁ 無次元化

$$r = R / r_g$$

$$\dot{m} = \frac{\kappa_0 \dot{M}}{2\pi c r_g}$$





$$d\tau = -\kappa_0 \rho_0 ds$$

• NR ($dl=dr$)

$$d\tau = -\dot{m} \frac{1}{2 r^{3/2}} dr$$

$$\tau(r) = \dot{m} \frac{1}{r^{1/2}}$$

$$\tau(1) = \dot{m}$$

• GR ($dl=dr/\sqrt{g_{00}}$)

$$d\tau = -\dot{m} \frac{1}{2 r \sqrt{r-1}} dr$$

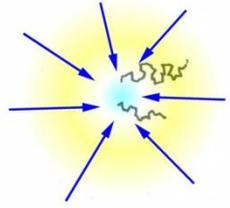
$$\tau(r) = \dot{m} \left(\frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \sqrt{r-1} \right)$$

$$\tau(1) = \dot{m} \frac{\pi}{2}$$





$$d\tau = - (1 - \beta \cos\theta) \kappa_0 \rho_0 ds$$



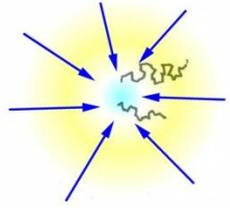
• NR ($dl=dr$)

$$d\tau = -\frac{\dot{m}}{2} \left(\frac{1}{r\sqrt{r-1}} + \frac{1}{r^{3/2}\sqrt{r-1}} \right) dr$$

$$\tau(r) = \dot{m} \left(\frac{\pi}{2} + 1 - \tan^{-1} \sqrt{r-1} - \sqrt{1 - \frac{1}{r}} \right)$$

$$\tau(1) = \dot{m} \left(\frac{\pi}{2} + 1 \right)$$





$$d\tau = - (1 - \beta \cos\theta) \kappa_0 \rho_0 ds$$

✿ GR ($dl = dr / \sqrt{g_{00}}$)

$$d\tau = -\frac{\dot{m}}{2} \left(\frac{1}{(r-1)r^{1/2}} + \frac{1}{(r-1)r} \right) dr$$

$$\tau(r) = \frac{\dot{m}}{2} \left(\log \frac{\sqrt{r} + 1}{\sqrt{r} - 1} + \log \frac{r}{r-1} \right)$$

$\tau(1) =$ 対数的に発散





Black-Hole Silhouette vs. Black-Hole Shadow

Black-Hole Silhouette

Black-Hole Shadow

- Optically thick standard disk
 - ISMのscatteringの問題はあるが、原理的にはブラックホールシルエットが見えるだろう

- Optically thin ADAF-like flow
 - ISMのscatteringの問題はあるが、原理的にはブラックホールシャドウが見えるだろう

- Optically thick slim-like flow
 - 自己掩蔽に加え、光学的に厚い降着円盤風があるので、非常に難しい





見えない場合の戦略

❁ by R. Takahashi



回転していないブラックホール



最大回転するブラックホール



見えない場合の戦略



回転していないブラックホール



最大回転するブラックホール



見えない場合の戦略

❁ Ray-Tracing Simulation

- Freefall case
 - Schwarzschild
 - Kerr
- RIAF model w/o outflow
 - Schwarzschild
 - Kerr

❁ 影のイメージング

- ブラックディスクではなく
- ブラックリング？
- ストレンジスター？

❁ 分光学的手法

- 連続スペクトルは縮退
- スペクトル線
- 分光偏光

