

見えない？  
ブラックホールシャドウ！

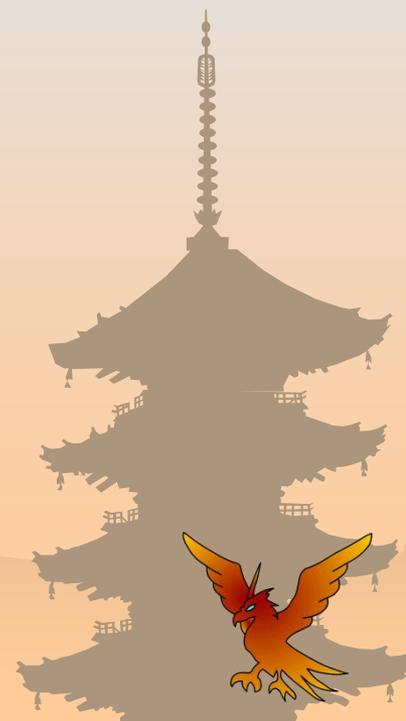
*No Black-Hole Shadow,  
but Non Blackbody Star ?*

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

## Black-Hole Shadow

### ❁ 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 thin ADAF-like flow

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

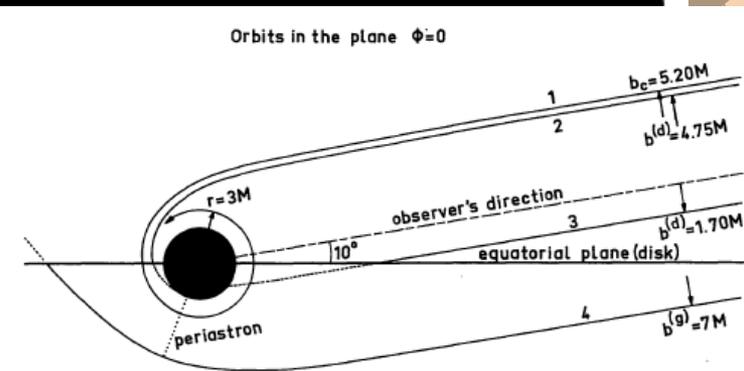
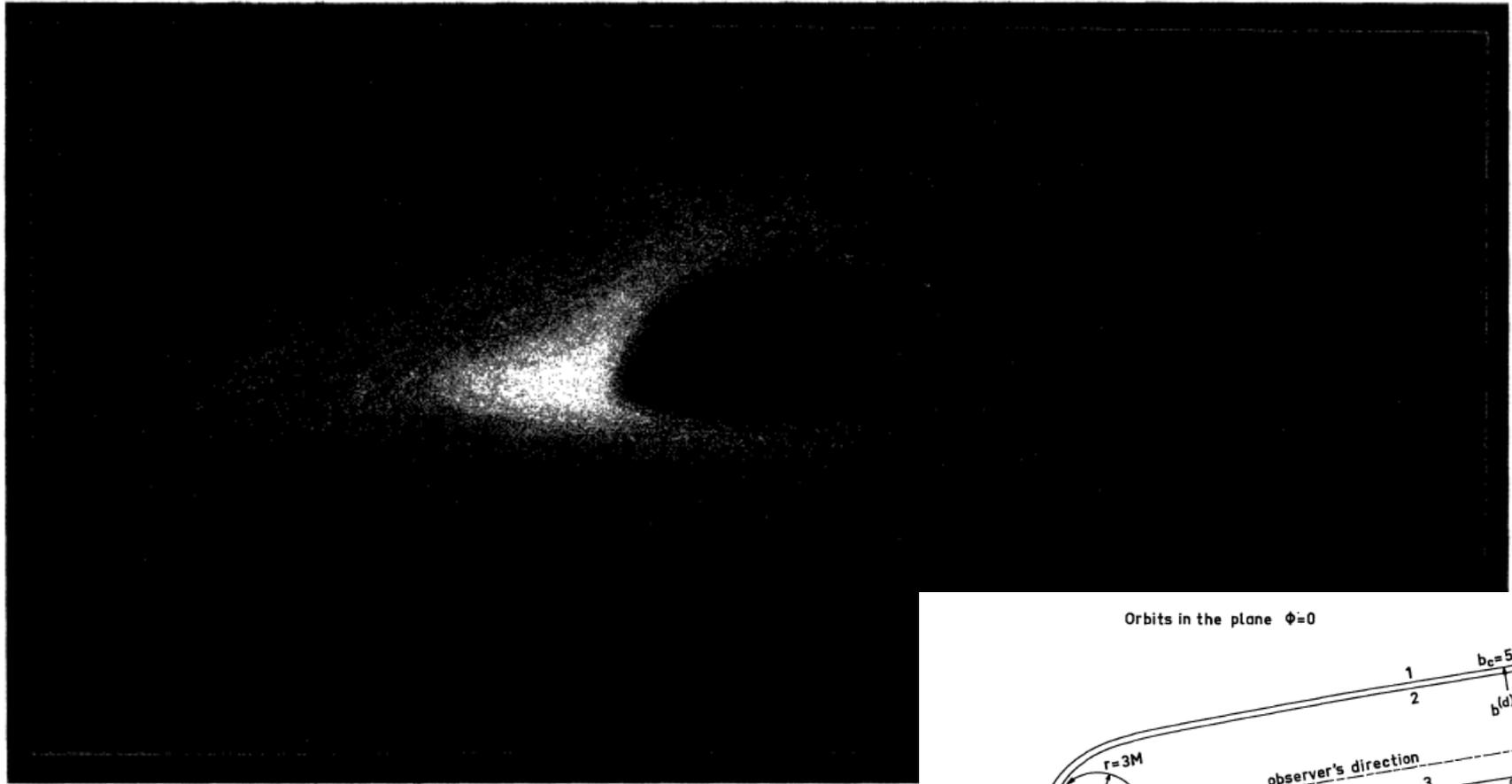
### ❁ Optically thick slim-like flow

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



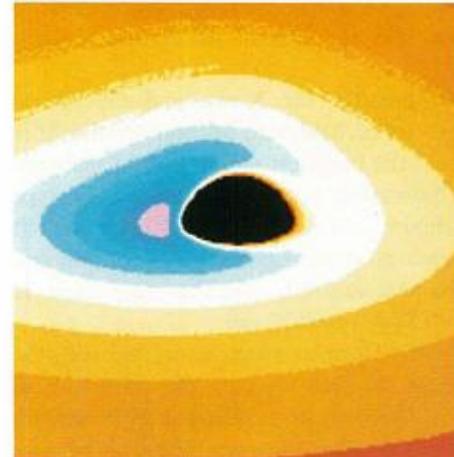
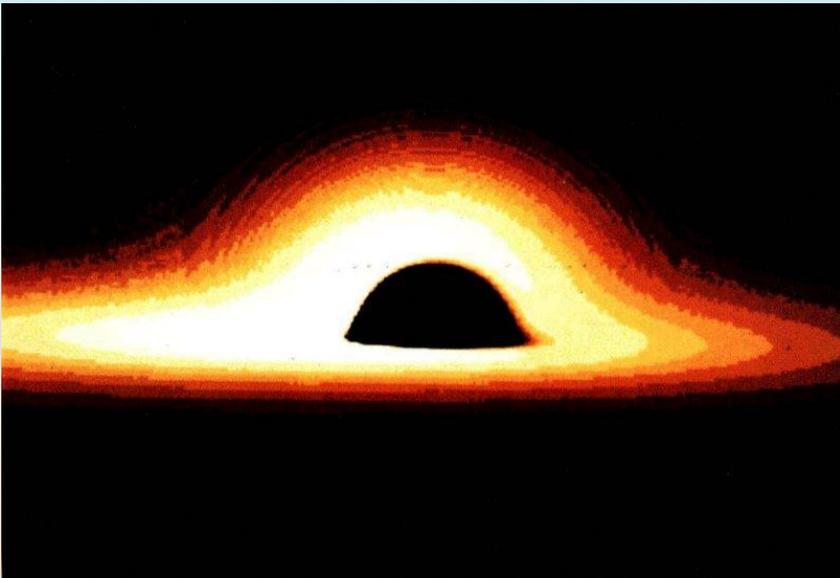


# Schwarzschild/ photograph Luminet 1979



# Schwarzschild/ color photo, X-ray

## Fukue and Yokoyama 1988

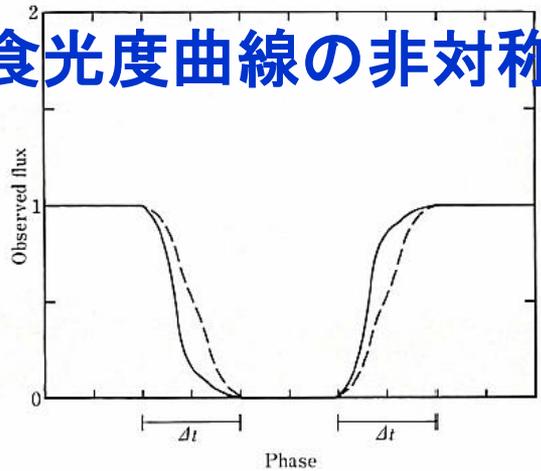


温度分布



全波長強度

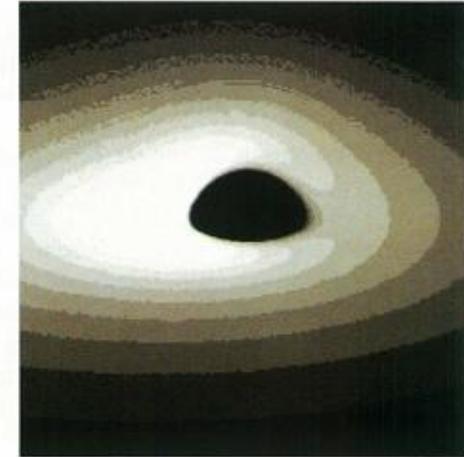
### 食光度曲線の非対称性



Sgr A



X線 (2-30keV)



可視強度

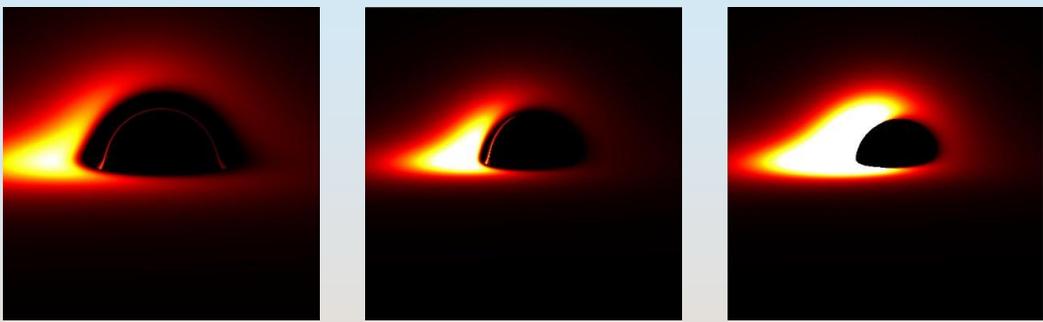




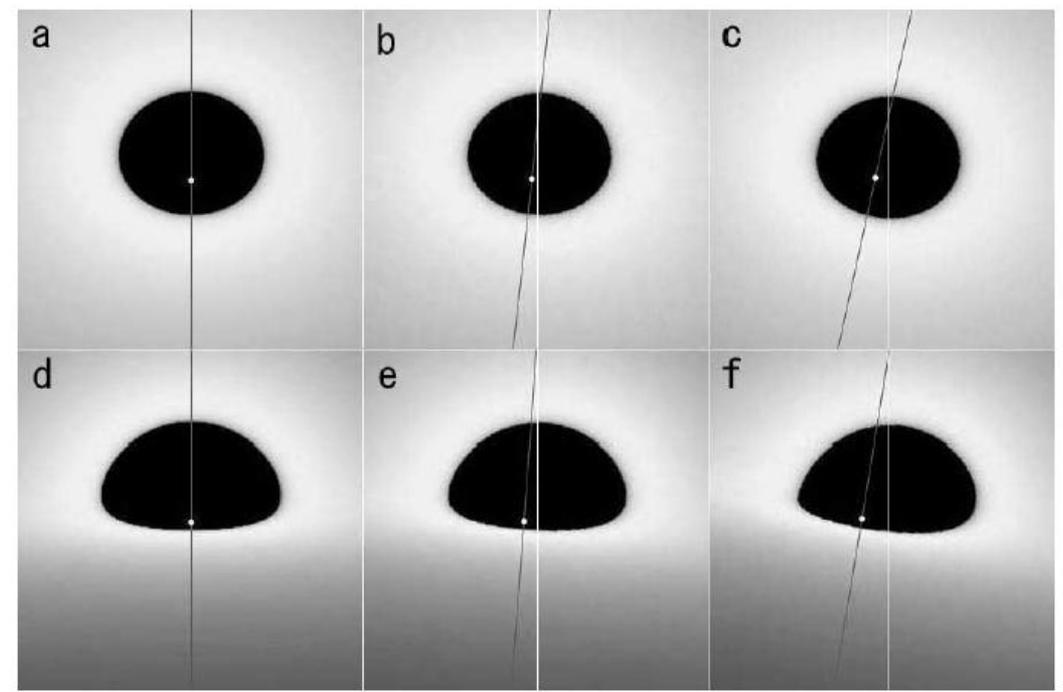
# Kerr/ shadow shapes

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

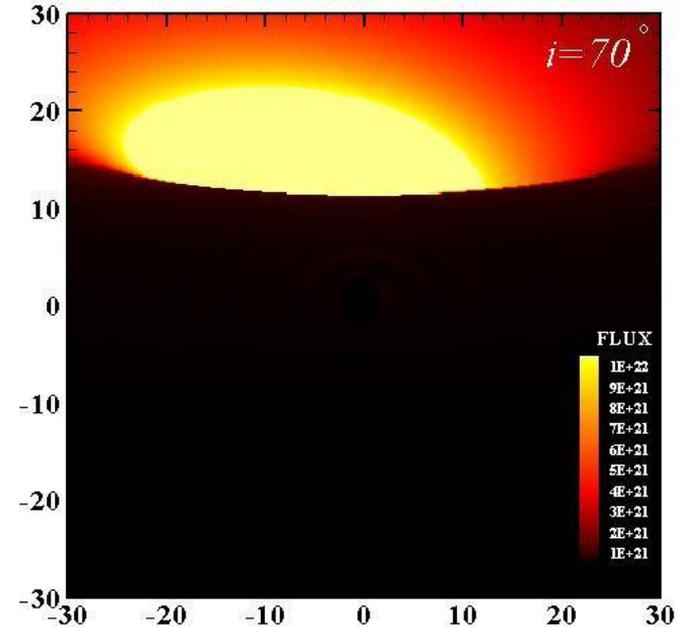
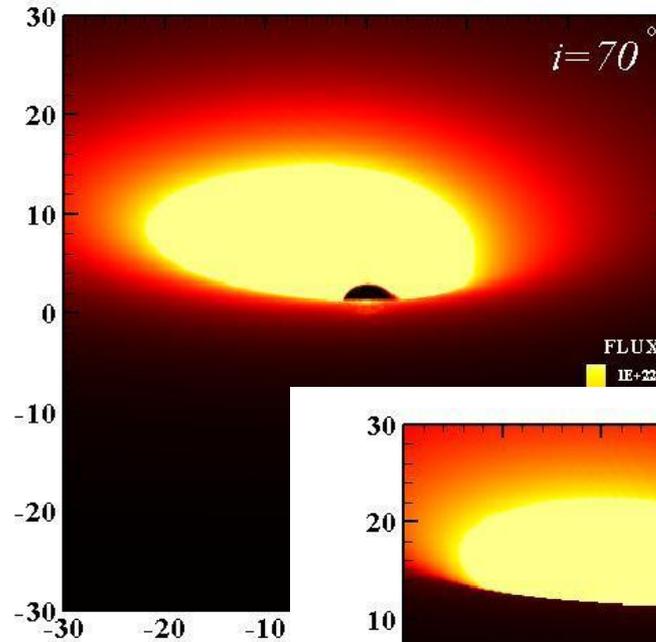
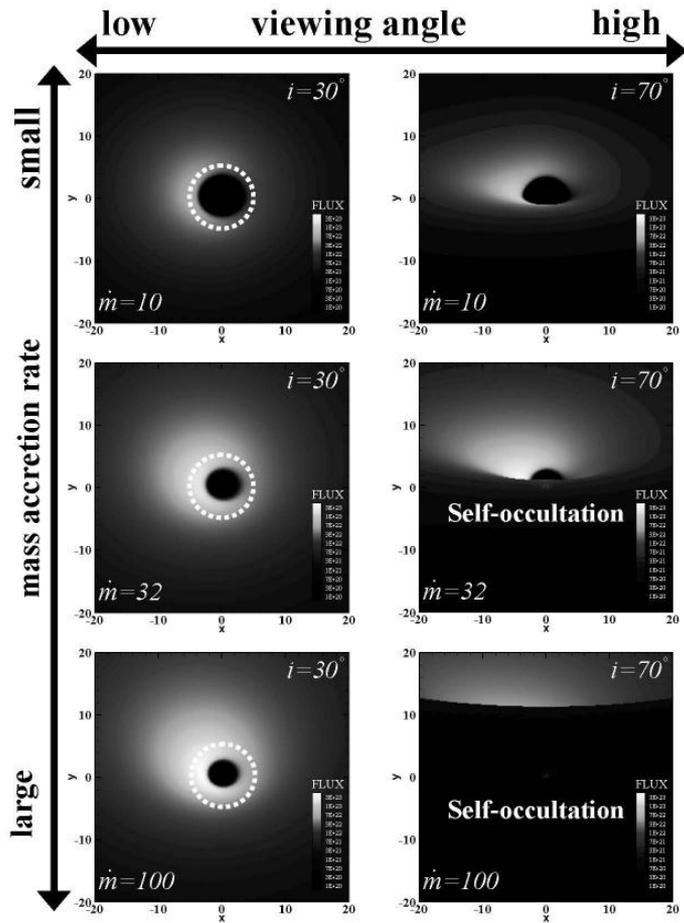




# slim disk, self-occultation



## Watarai et al. 2005





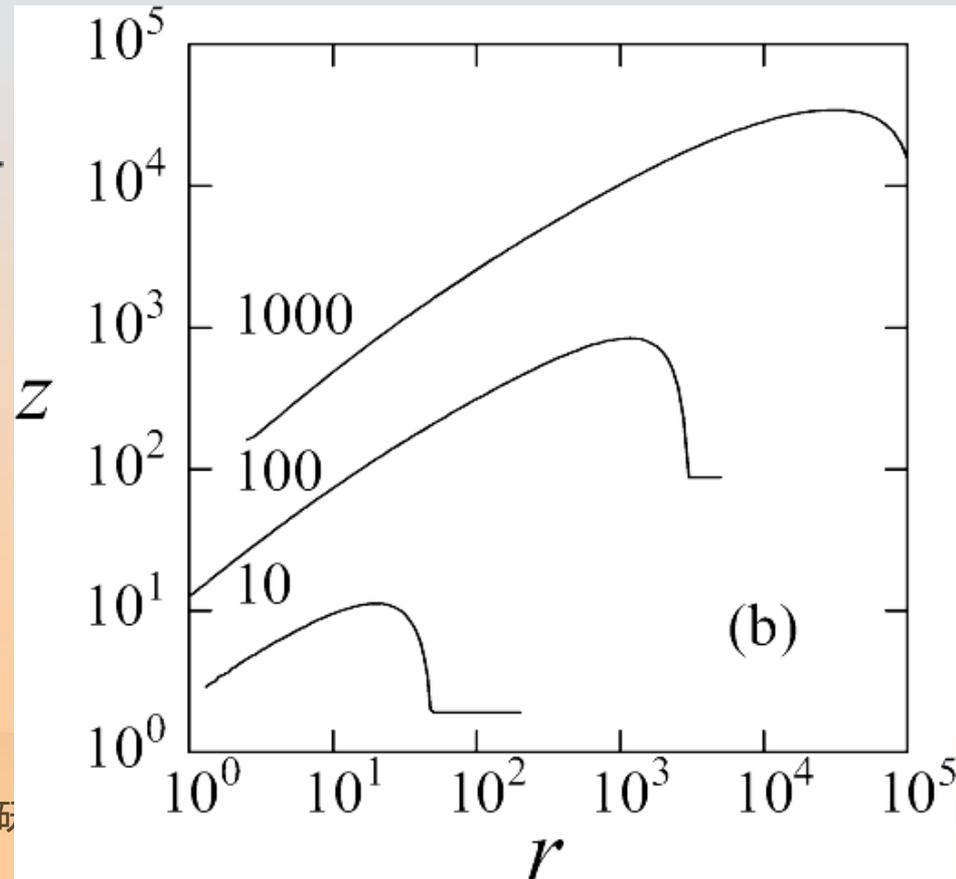
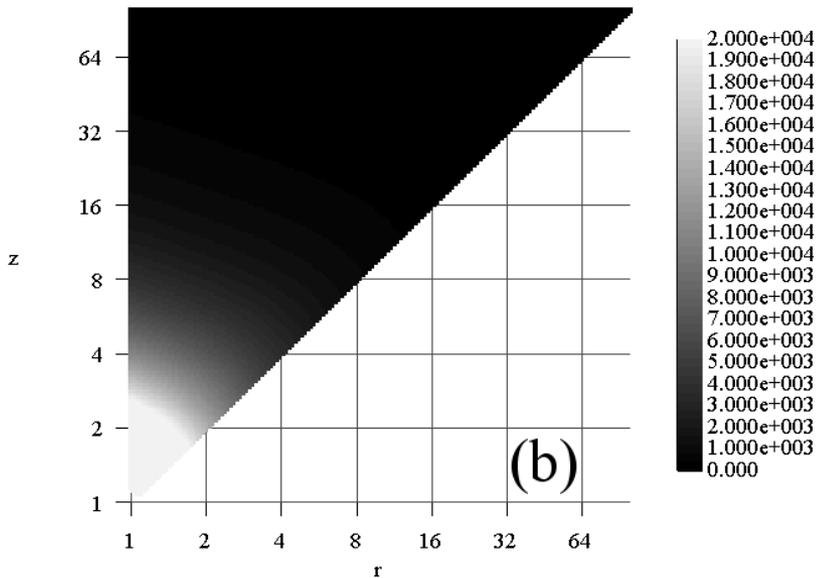
# supercritical disk with wind



## 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



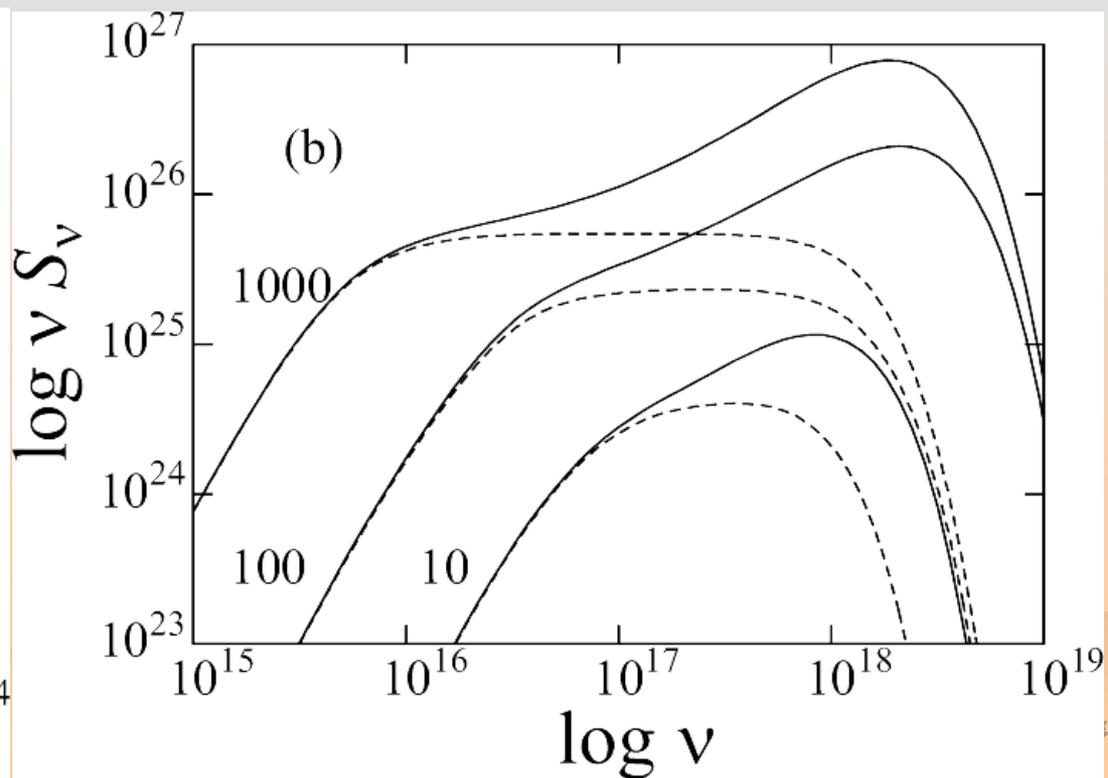
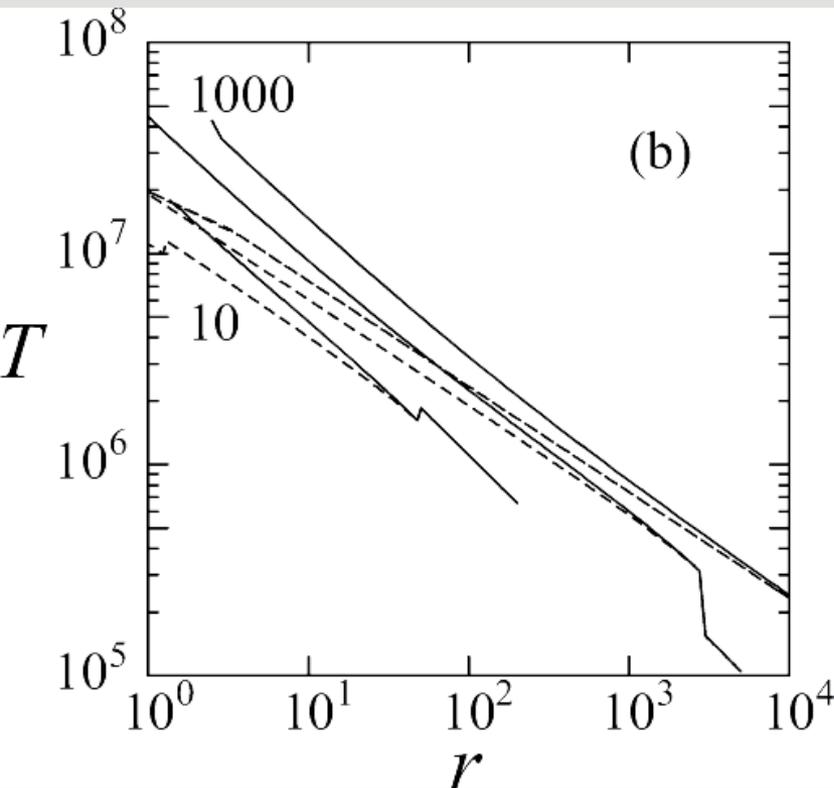
## Fukue 2011

### 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

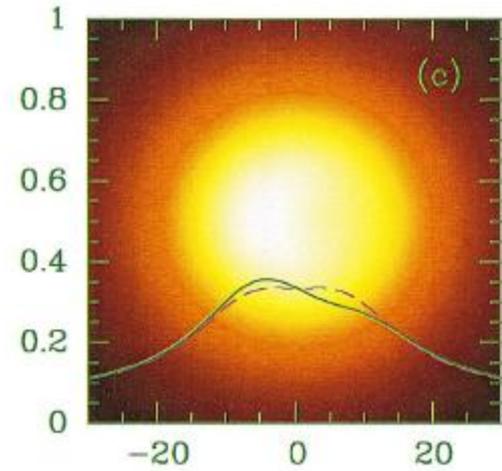
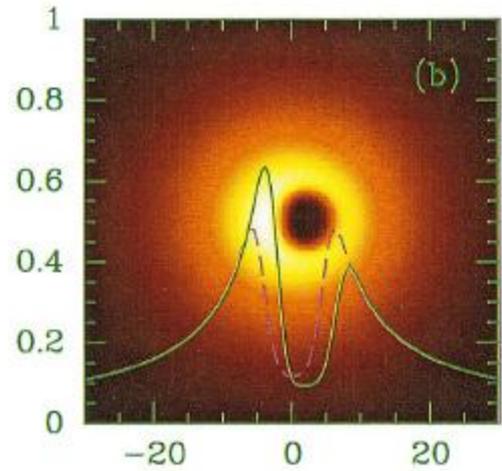
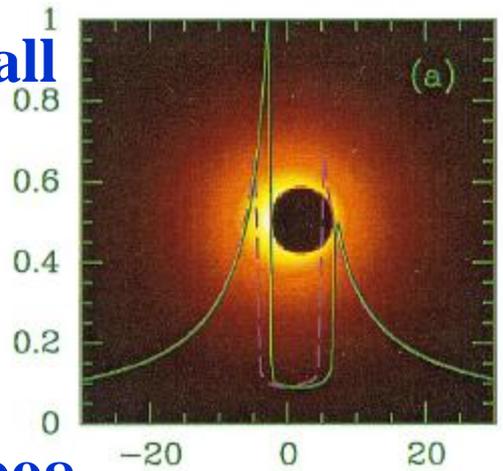
## Falcke et al. 2000

ray-trace

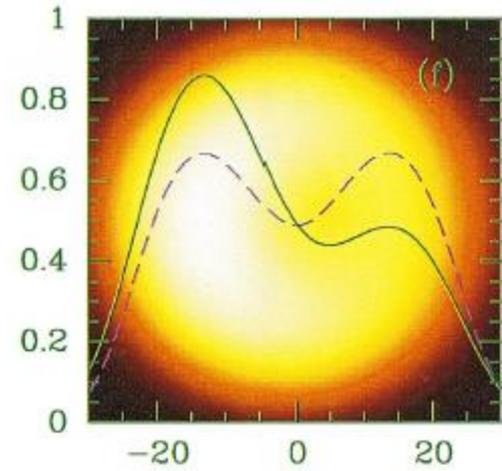
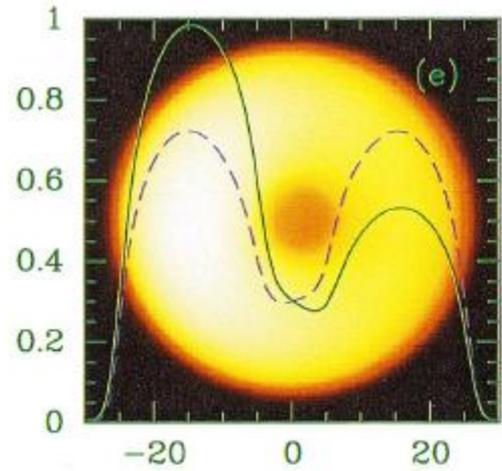
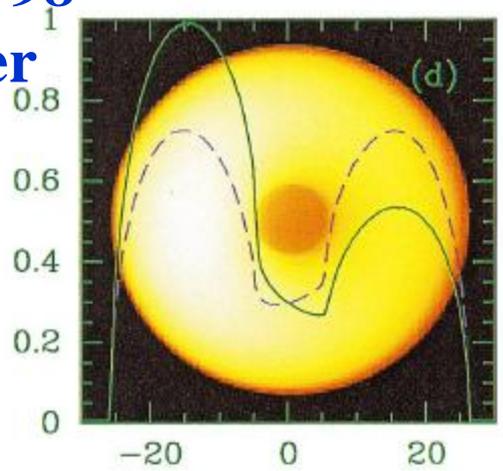
0.6mm

1.3mm

$a=0$   
freefall



$a=0.998$   
kepler  
shell

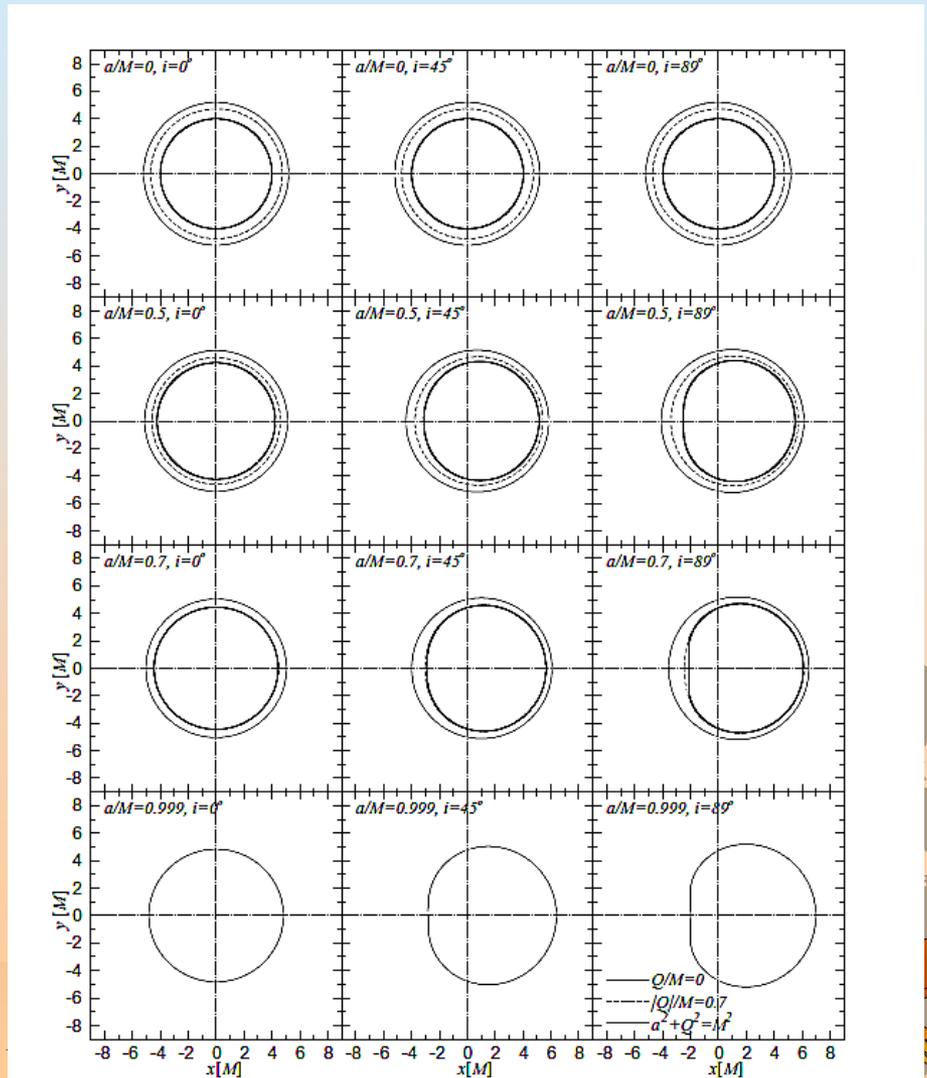




# Kerr-Newman Takahashi 2005

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

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

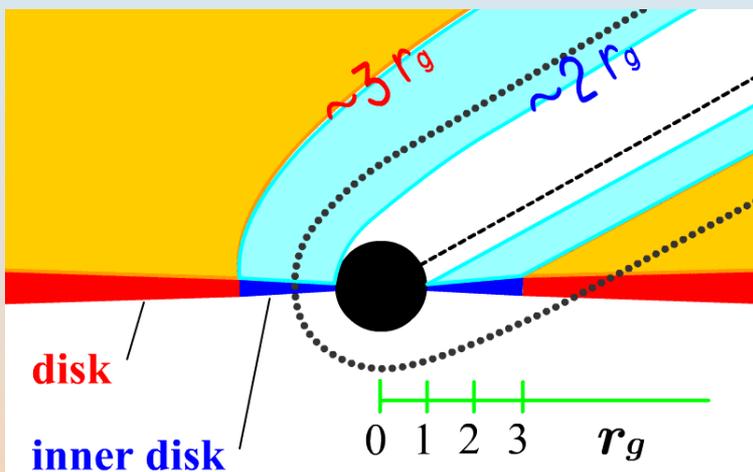




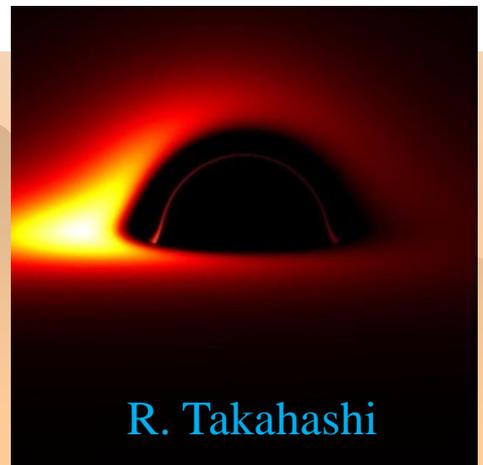
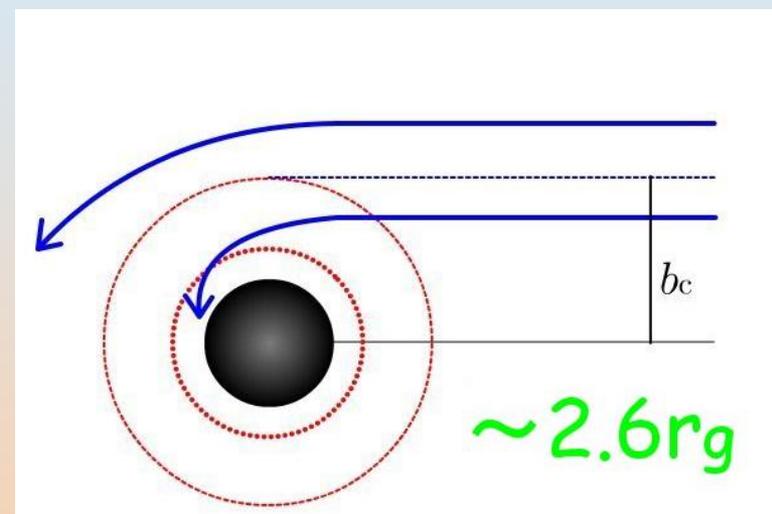
# Black-Hole Silhouette vs. Black-Hole Shadow



## Silhouette



## Shadow



Sgr





# 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

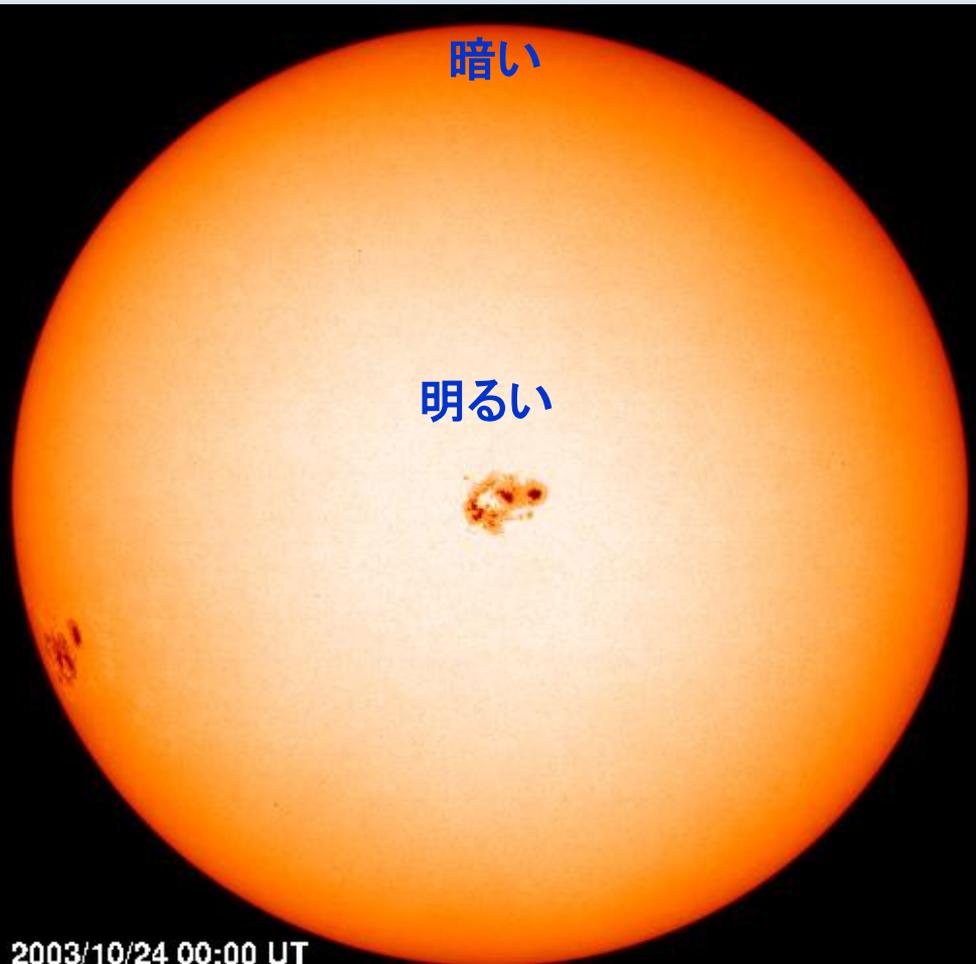
- ❁ 固有系における見かけ上の“光球”
  - 周縁減光効果
  - 光学的厚みへの相対論的影響
- ❁ 観測系における“見た目”
  - 光行差
  - ドップラー効果
  - 重力赤方偏移 & 光線の彎曲



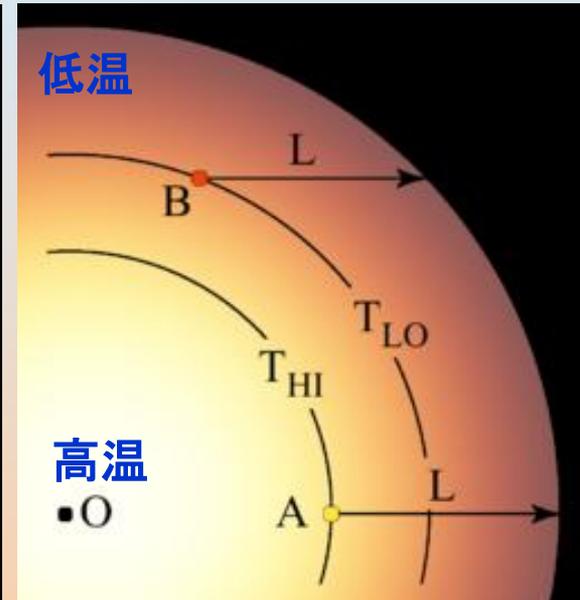


# 太陽の周縁減光効果

## ❁ 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

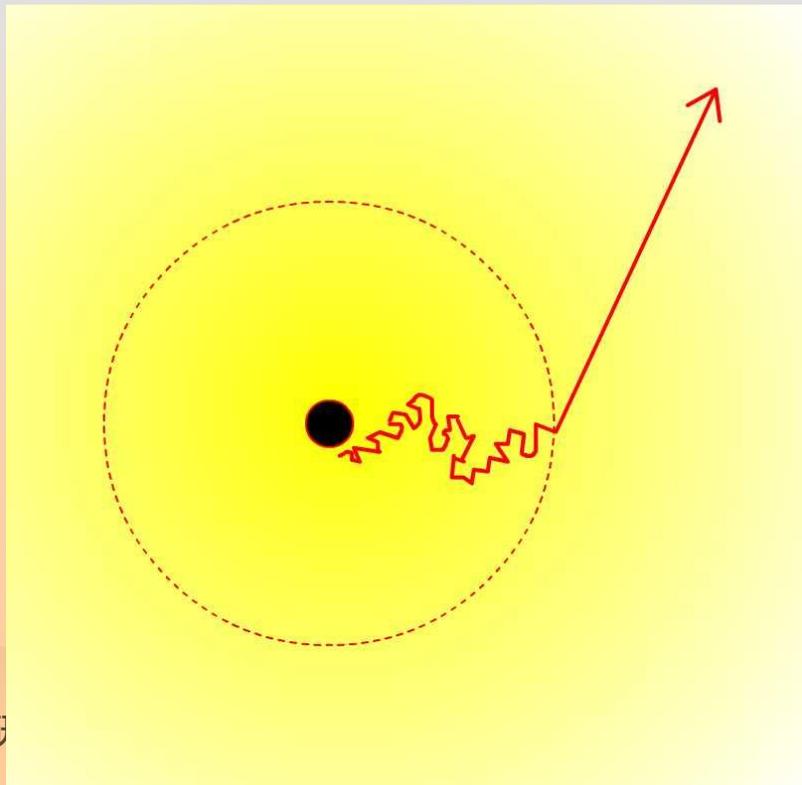
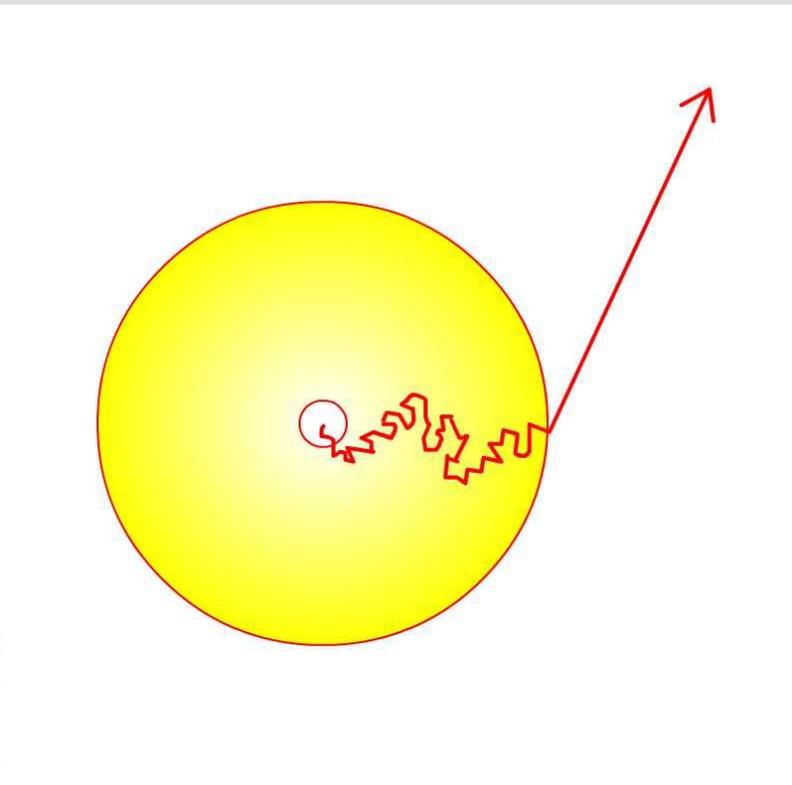
## ❁ どこを視ているのか





# 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 $\lambda$ 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 $\tau$ 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

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

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

$$\gamma = \text{ローレンツ因子}$$

$$\cos \theta = \text{方向余弦}$$

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

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

$$\kappa_0 = \text{不透明度}$$

$$\rho_0 = \text{共動系でのガス密度}$$

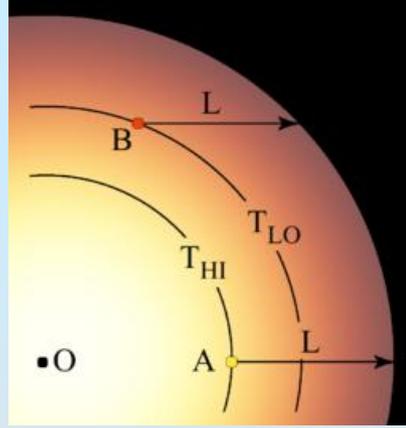
$$ds_0 = \text{共動系での光路長}$$

$$ds = \text{静止系での光路長}$$

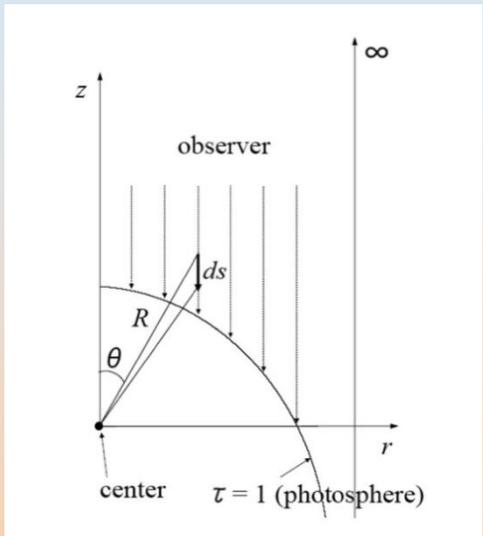




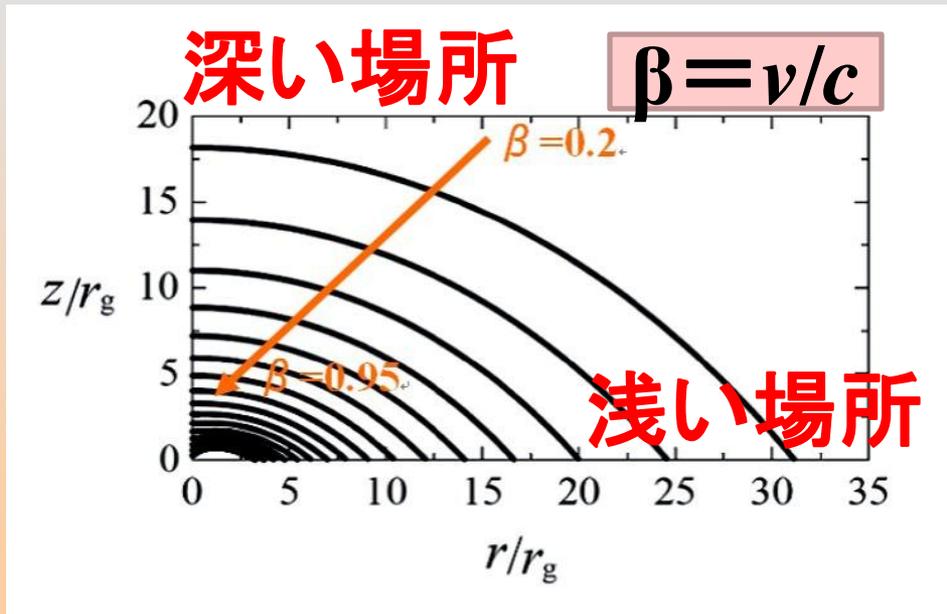
# 見かけの光球面



観測者は  $z = \infty$  にいる



見かけの光球 (見た目の表面) の位置



$\beta$  小: 周縁減光効果

$\beta$  大: 光球面収縮

$\beta$  大 ( $> 2/3$ ): 中央で凹

— Abramowicz et al. 1991

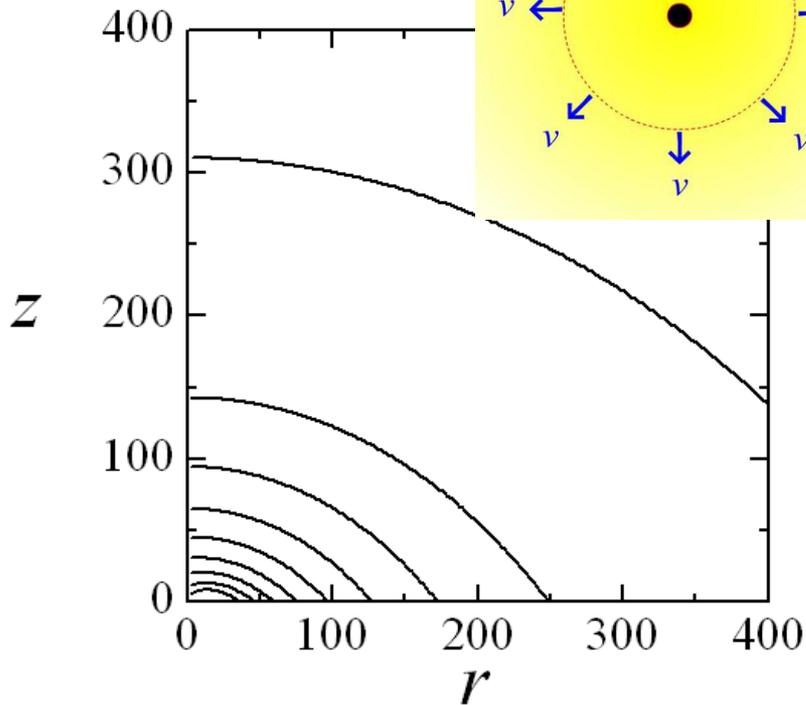
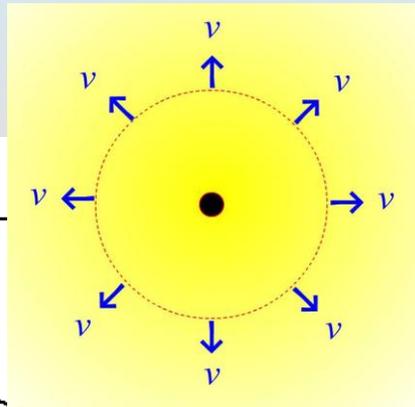
見かけの光球面の形状。速度は  $\beta$  が 0.2 から 0.95 まで 0.05 ずつ増えている。



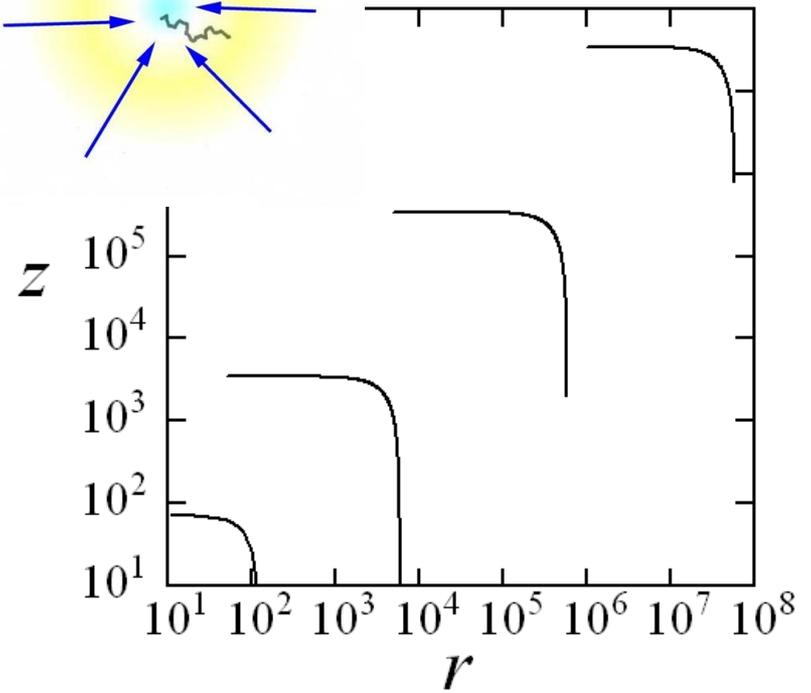
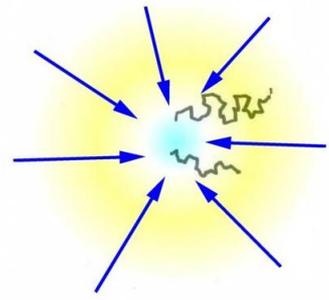


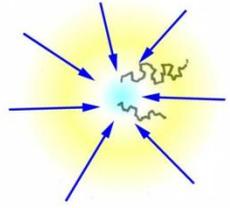
# Wind vs Accretion

## ❁ 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

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

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

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

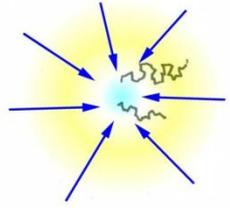
$$u = \beta = \sqrt{r_g / R}$$

## ❁ 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 ( $dl=dr/\sqrt{g_{00}}$ )

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

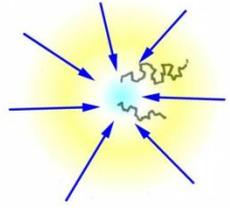
$$\tau(r) = \dot{m} \left( \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \sqrt{r-1} \right)$$

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





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



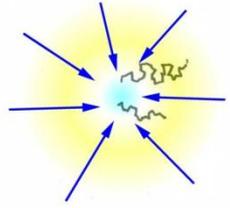
❁ NR ( $dl=dr$ )

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

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

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





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

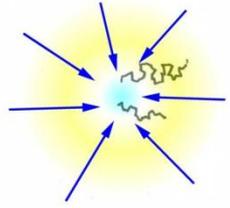
✿ GR ( $dl = dr / \sqrt{g_{00}}$ )

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

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

$\tau(1) =$  対数的に発散





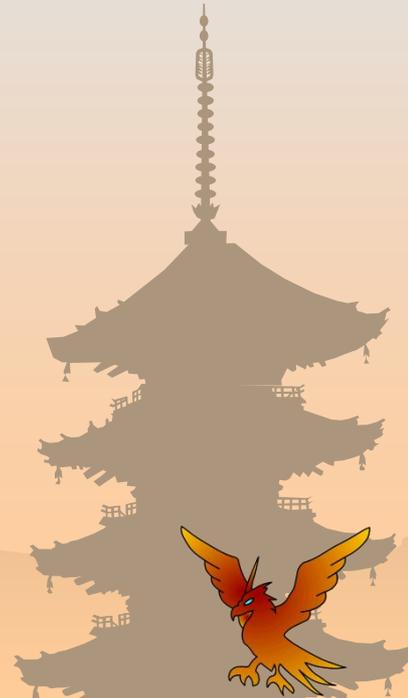
$$d\tau = - (1 - \beta \cos\theta) \kappa \rho_0 ds$$

✿ GR ( $dl = dr / \sqrt{g_{00}}$ )

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

or

$$\sqrt{r} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{\tau}{\dot{m}}}}$$





# 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

## ❁ 若い人

