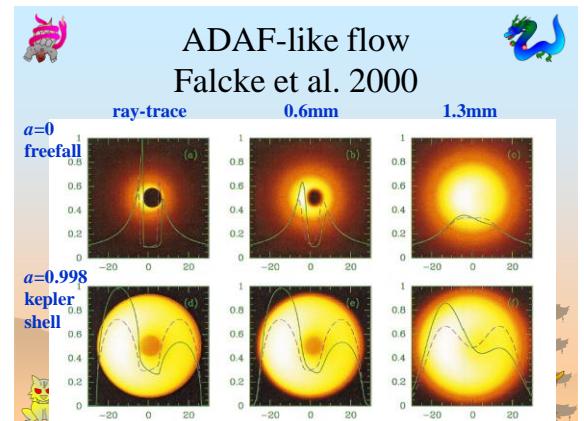
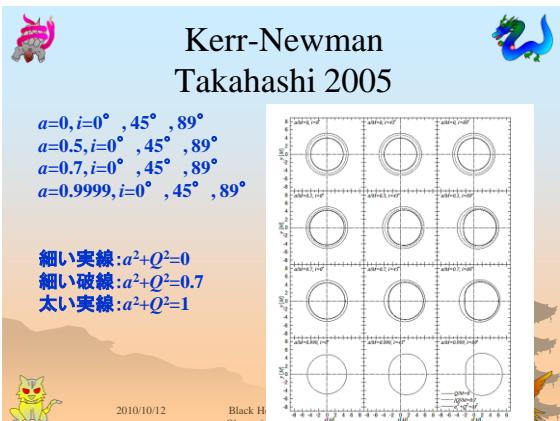
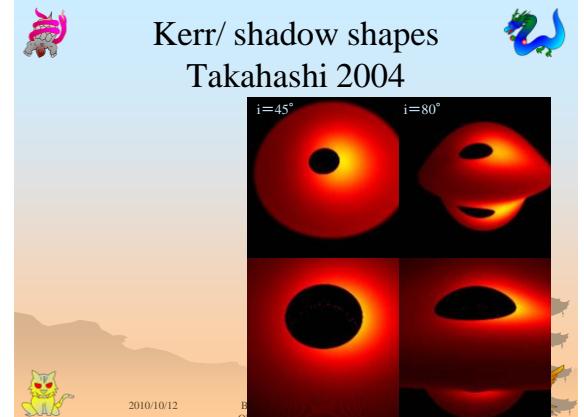
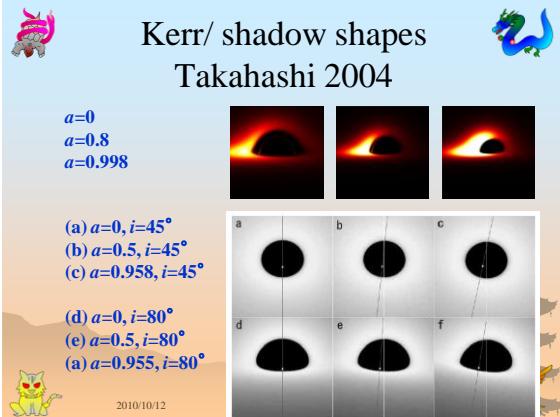
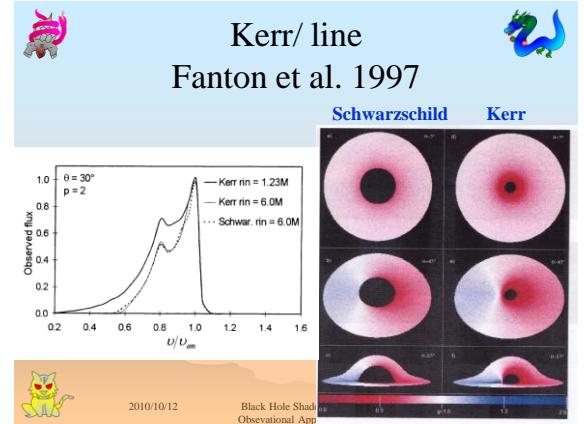
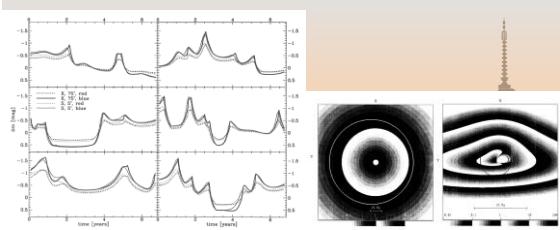
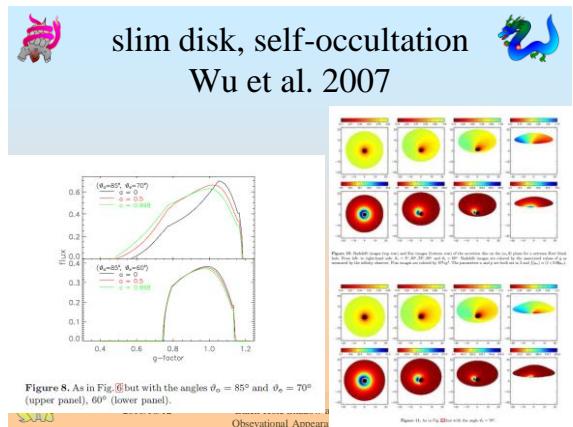
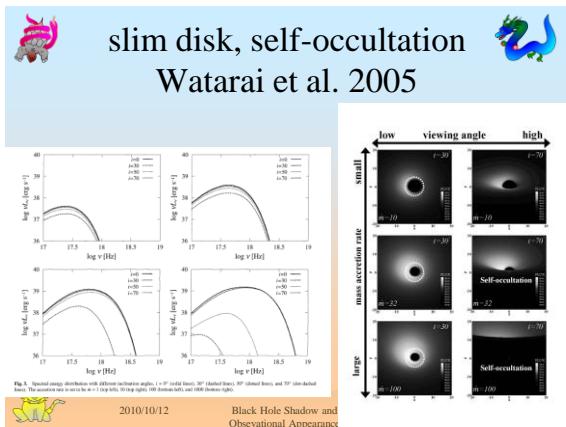
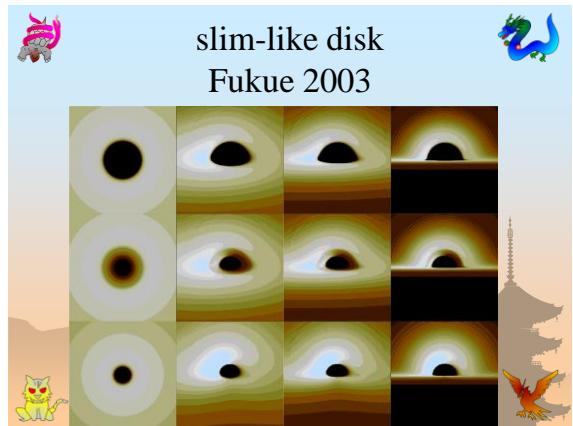
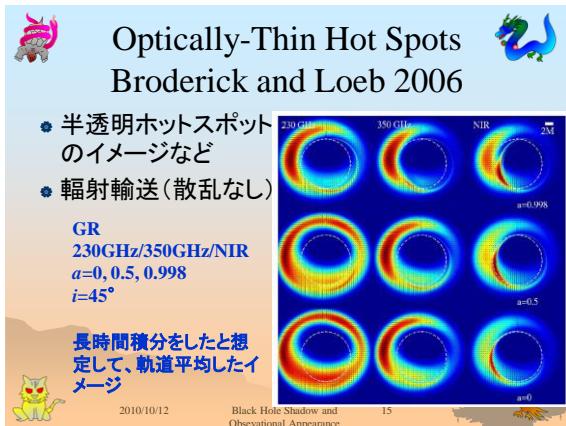
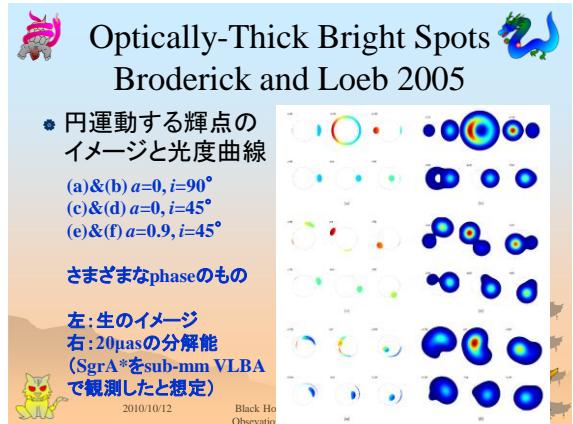
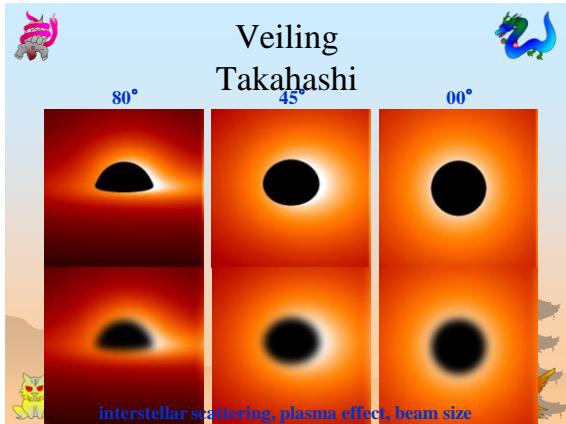
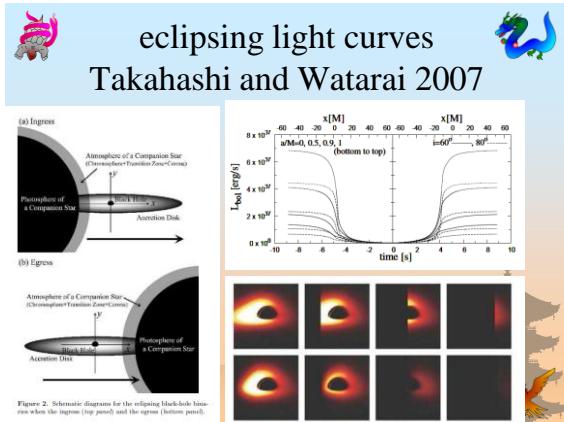


 Kerr/ microlensed light curve   
 Jaroszynski et al. 1992  
 Jaroszynski, Wambsganss, Paczynski 1992  
 Yonehara+ 1998



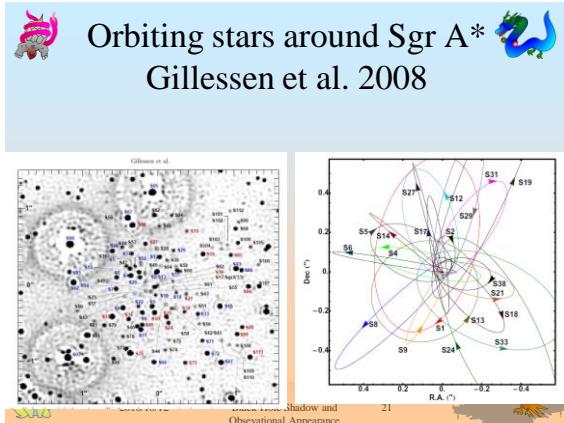




## eclipsing light curves Takahashi and Watarai 2007



20



## G-Lensing of orbiting stars Alexander and Sternberg 1999

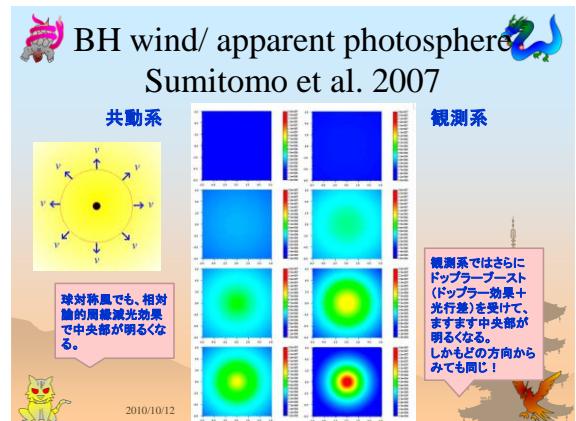
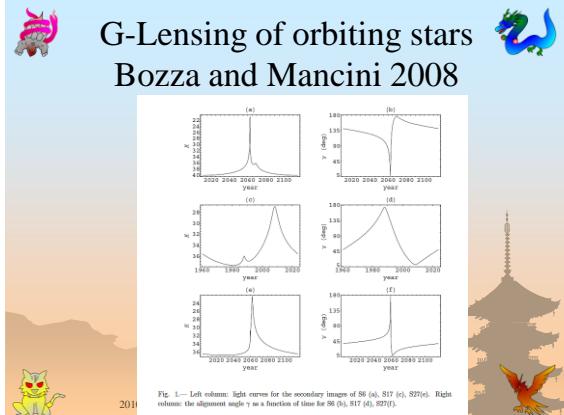
The effective size of a gravitational lens at the lens plane is set by the Einstein radius,  $R_E$ ,

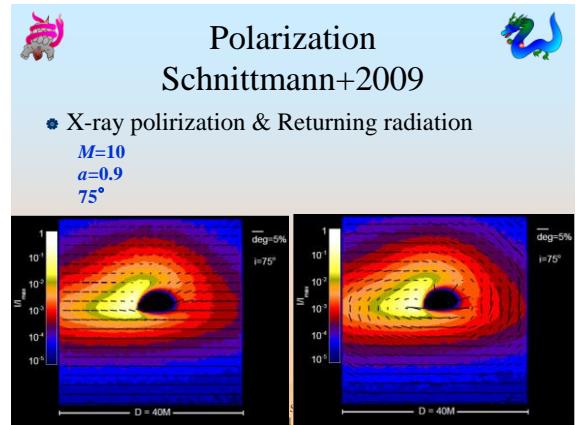
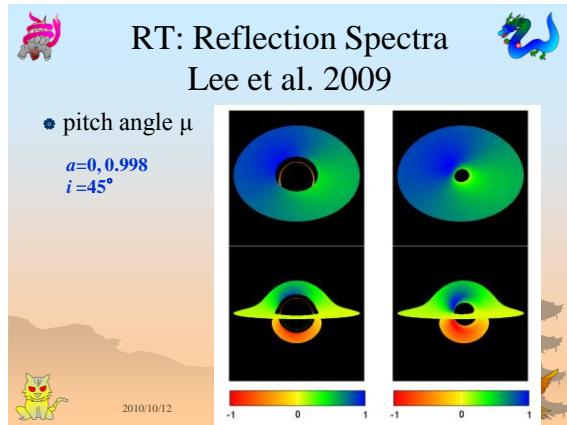
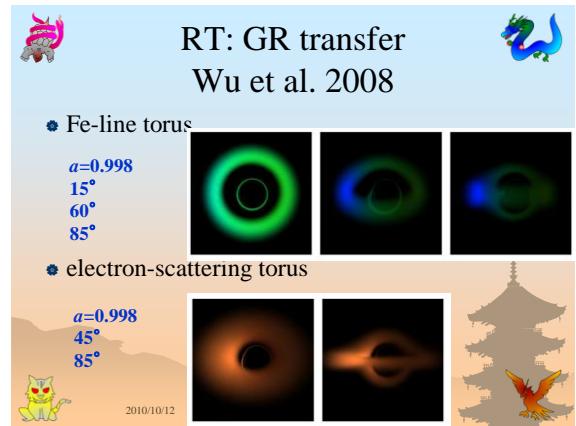
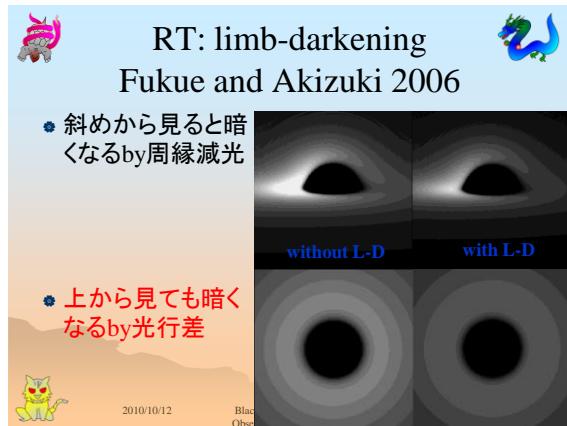
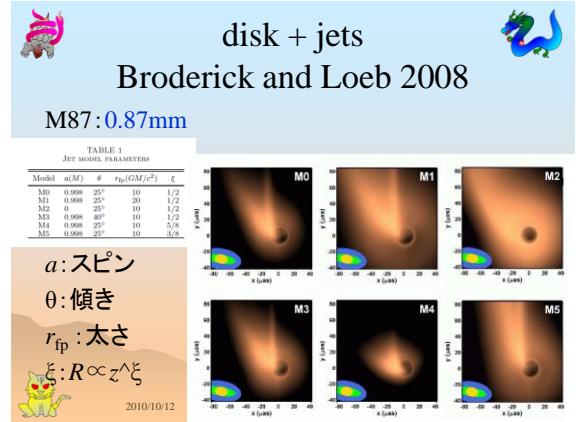
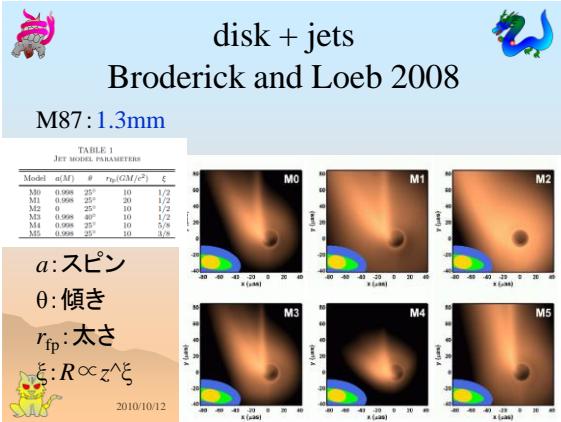
$$R_E = \left( \frac{4GM_\bullet}{c^2} \frac{Dd}{D+d} \right)^{1/2} \sim 2.2 \times 10^{15} (M_{2.6} d_1)^{1/2} \text{ cm}, \quad (1)$$

where  $G$  is the gravitational constant,  $c$  is the speed of light,  $M_\bullet$  is the lens mass (here the black hole mass), and  $D$  and  $d$  are the observer-lens and lens-source distances, respectively (see, e.g., review by Bartelmann & Narayan 1998). We assume, as will be justified below, that  $d \ll D$  and define  $M_{2.6} = M_\bullet / 2.6 \times 10^6 M_\odot$  and  $d_1 = d/1 \text{ pc}$ . The effective size of the lens at the source plane is  $R_S = R_E(D+d)/D \sim R_E$ . The angular size of the Einstein radius,  $\theta_E$ , is

$$\theta_E \sim 0.018 D_8^{-1} (M_{2.6} d_1)^{1/2}, \quad (2)$$

where  $8D_8$  kpc is the Sun's Galactocentric distance (Carney et al. 1995).





## 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响
- 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

2010/10/12 Black Hole Shadow and Observational Appearance 31

## いろいろな相対論的運動体

- ブラックホール降着円盤
  - 内縁公転速度が $\sim 0.4c$
- 亜光速運動星・軌道運動星
- 亜光速自転星
  - ミリ秒パルサーだと $0.2c$
- ブラックホール風・ジェット
- 相対論的ファイアボール
  - GRBは $0.9999c$

2010/10/12 Black Hole Shadow and Observational Appearance 32

## 雲—ガス体—の“見た目”

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

2010/10/12 Black Hole Shadow and Observational Appearance 33

## ガス体や雲の“表面”

- 晴れた日には数km先まで見えるが霧が濃いときには1m先ぐらいまでしか見えないこともある。星間空間では何万光年も彼方の星が見えるが、太陽内部では0.5cm先ぐらいでしか見えない。
- ガス体は半透明で、温度などの状況によって見える深さ(場所)も違う。

雨の日 黄砂の日 2010/10/12 Black Hole Shadow and Observational Appearance 34

## 太陽の周縁減光効果

- 太陽の正面写真
- 太陽の断面図
  - どこを観ているのか

2010/10/24 00:00 UT 35

## 静的平行平板大気 Milne-Eddington解

- 表面での強度:
 
$$I(\tau, \mu) = \frac{3F_s}{4\pi} \left( \frac{2}{3} + \tau + \mu \right).$$
- 周縁減光効果
 
$$I(0, \mu) = \frac{3F_s}{4\pi} \left( \frac{2}{3} + \mu \right).$$

## “見た目”光球面の光学的深さ

- 光学的に厚いガス体
- 平行平板近似
- 共動系でME大気
- 相対論的速度で運動
- 光行差

**光行差**

$$s_0 = \frac{1}{\gamma(1-\mathbf{v} \cdot \mathbf{s})} \left[ \mathbf{s} + \left( \frac{\gamma-1}{\gamma^2} \mathbf{v} \cdot \mathbf{s} - \gamma \right) \mathbf{v} \right]$$

**視線方向τ、鉛直方向τ<sub>ph</sub>**

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

$$ds_0 = \frac{dz_0}{(\mathbf{s}_0 \cdot \mathbf{n})}$$

$$\tau = -\frac{1}{(\mathbf{s}_0 \cdot \mathbf{n})} \int_{z_0}^{z_{ph}} \kappa_0 \rho_0 dz_0 = 1$$

$$\tau_{ph} = (\mathbf{s}_0 \cdot \mathbf{n})$$

左の式は、単に、共動系の周縁減光効果を表しているだけだが、光行差で視線方向が変化する。

## “見た目”光球面の温度

- 共動系でME大気

$$I(\tau, \mu) = \frac{3F_s}{4\pi} \left( \frac{2}{3} + \tau + \mu \right)$$

$$I(0, \mu) = \frac{3F_s}{4\pi} \left( \frac{2}{3} + \mu \right)$$

- 輻射輸送効果なし
- 周縁減光効果のみ
- +光行差

$$\tau_{ph} = (\mathbf{s}_0 \cdot \mathbf{n})$$

2010/10/12 Black Hole Shadow and Observational Appearance 38

## 相対論的運動体の“見た目”光球面 突進する平面

- “見た目”光球面の光学的深さ
- 共動系温度(破線)  
静止系温度(実線)
- 速度: 0, 0.5c, 0.9c

真横 2010/10/12

真下 Black Hole Shadow and Observational Appearance

## 相対論的運動体の“見た目”光球面 突進する球体

- “見た目”光球面の光学的深さ
- 静止系温度
- 速度: 0, 0.5c, 0.9c

周縁 2010/10/12

中央 Black Hole Shadow and Observational Appearance

## 相対論的運動体の“見た目”光球面 回転する円盤

- “見た目”光球面の光学的深さ
- ケプラー円盤(NR)
- 軌道傾斜角  
 $20^\circ, 50^\circ, 80^\circ$

軌道傾斜角が大きくなると、通常の周縁減光効果で光学的深さは全体的に浅くなる。さらに光行差による視線方向の変化で、観測者に近く円盤左側(遠ざかる右側)は光学的深さが深くなる(浅くなる)。光行差の効果は円盤中央付近が顕著である。

2010/10/12 Black Hole Shadow and Observational Appearance

## 相対論的運動体の“見た目”光球面 自転する球体

- “見た目”光球面の光学的深さ
- 剛体回転球(赤道面)
- 赤道回転速度  
0, 0.5c, 0.9c

自転していないときは通常の周縁減光効果になっているが、自転していると観測者に近く左側(遠ざかる右側)は深いところ(浅いところ)を観ることになる。

2010/10/12 Black Hole Shadow and Observational Appearance

