

相對論的運動体の 観測的特徴

*Observational Appearance of
Relativistic Movers*

福江 純 @ 大阪教育大学

連星・変光星・低温度星研究会 @ 鹿児島大学





相対論的運動体の 観測的特徴



ものごとは“見た目”が大事
全体像(積分像)から詳細像(分解像)へ

- 1 相対論的運動体
- 2 “見た目”光球面の光学的深さ
- 3 いろいろな相対論的運動体の“見た目”光球面
- 4 軌道黒体の光度曲線
ケプラー円盤の光度とスペクトル
- 5 今後の課題





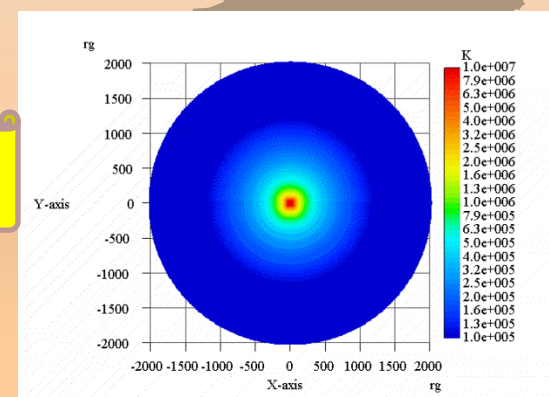
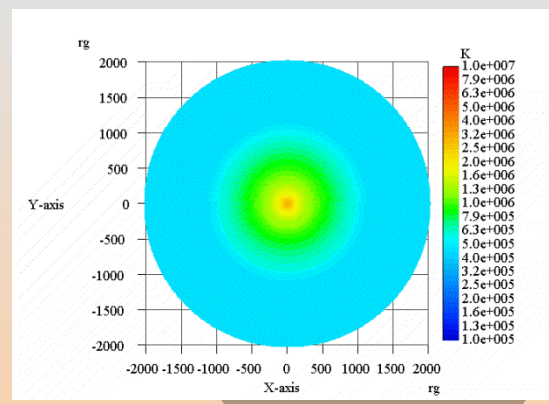
天体は“見た目”が10割 相対論的天体の“見た目”

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



ブラックホール風の“見た目”

Sumitomo et al. 2008

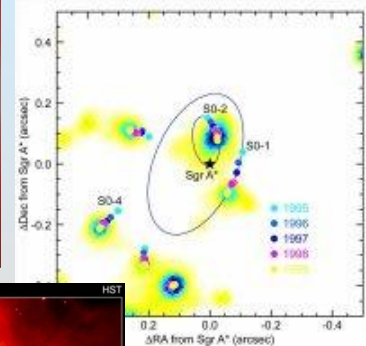
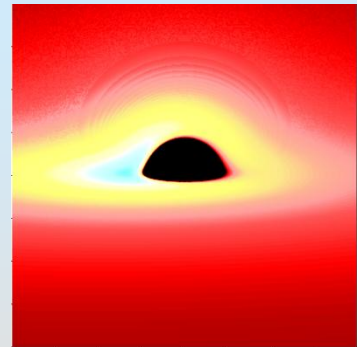




いろいろな相対論的運動体

❁ ブラックホール降着円盤

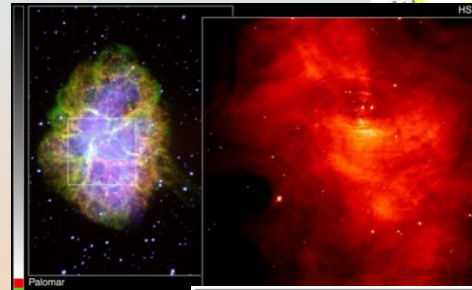
– 内縁公転速度が $\sim 0.4c$



❁ 亜光速運動星・軌道運動星

❁ 亜光速自転星

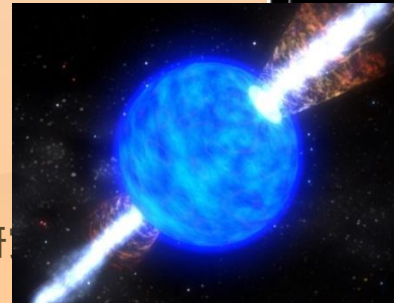
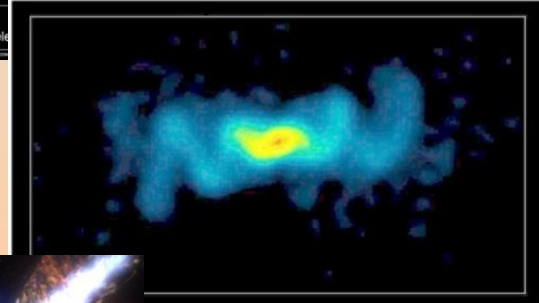
– ミリ秒パルサーだと $0.2c$



❁ ブラックホール風・ジェット

❁ 相対論的ファイアボール

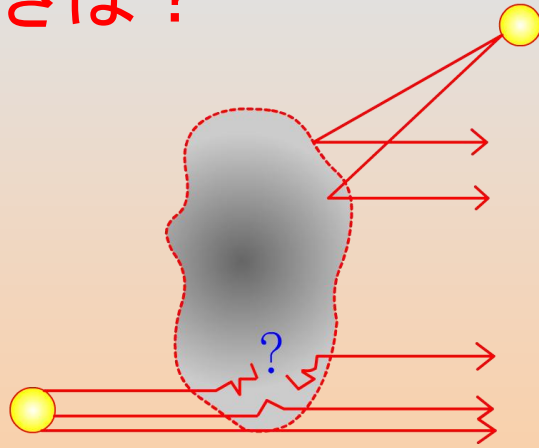
– GRBは $0.9999c$





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

2008/12/2

連星・変光星・低温星

@鹿児島大

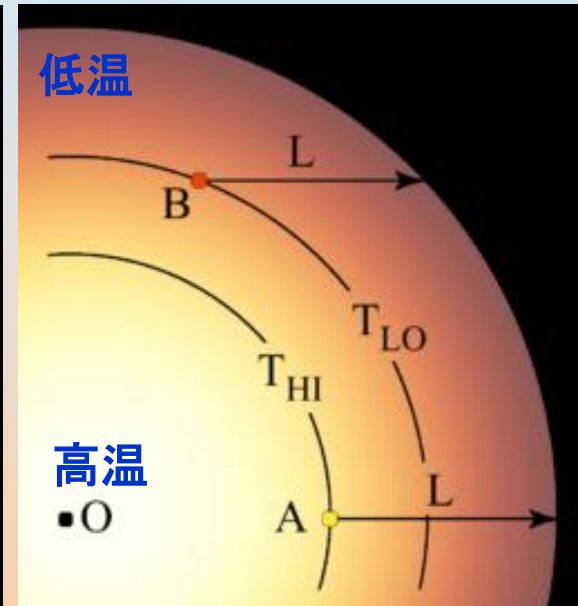
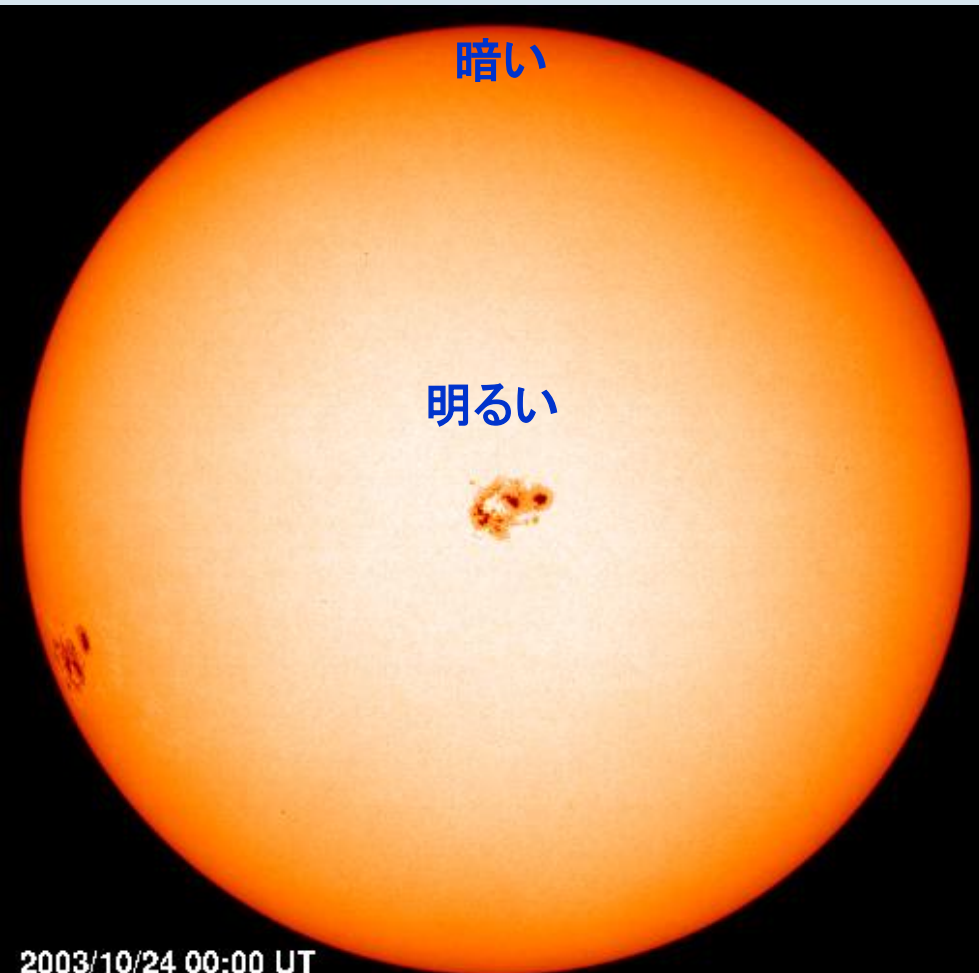




周縁減光効果

❁ 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



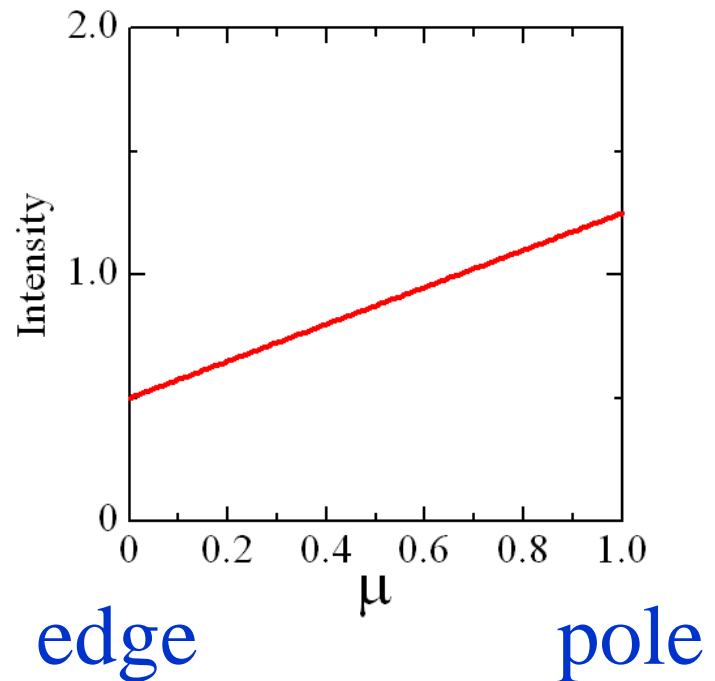
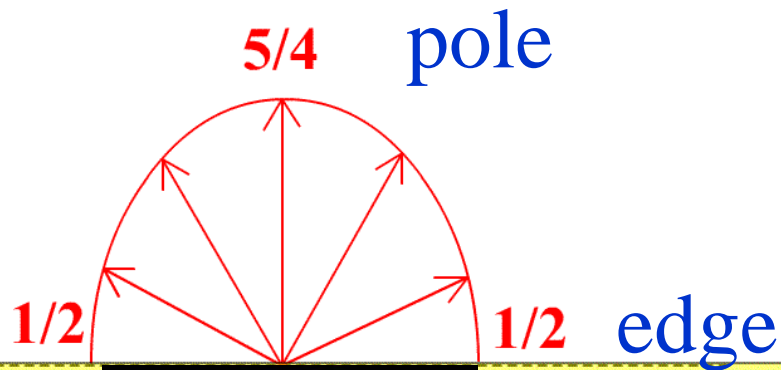


静的平行平板大気 Milne-Eddington解

❁ 表面での強度：
周縁減光効果

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

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





“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

$$\mathbf{s}_0 = \frac{1}{\gamma(1 - \mathbf{v} \cdot \mathbf{s})} \left[\mathbf{s} + \left(\frac{\gamma - 1}{v^2} \mathbf{v} \cdot \mathbf{s} - \gamma \right) \mathbf{v} \right]$$

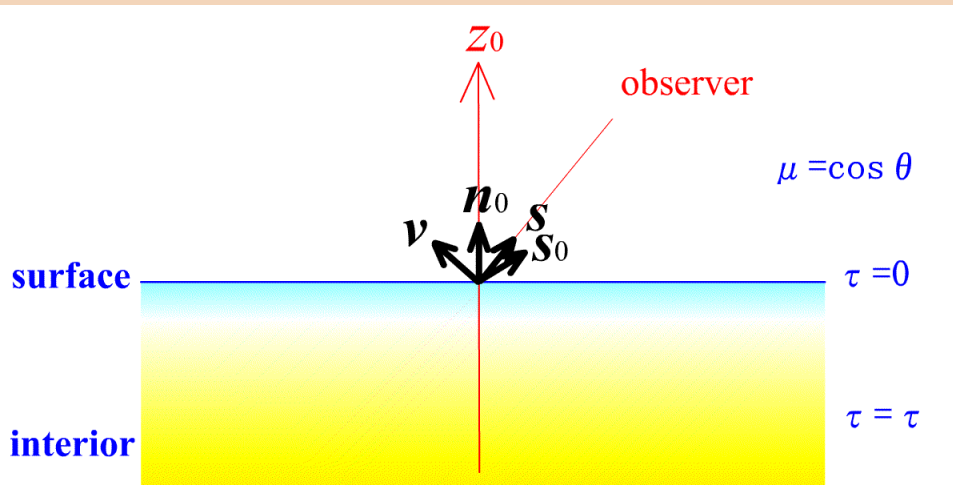
❁ 視線方向 τ 、鉛直方向 τ_{ph}

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

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

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

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





“見た目”光球面の温度

❁ 共動系でME大気

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

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

1. 輻射輸送効果なし
2. 周縁減光効果のみ
3. + 光行差

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

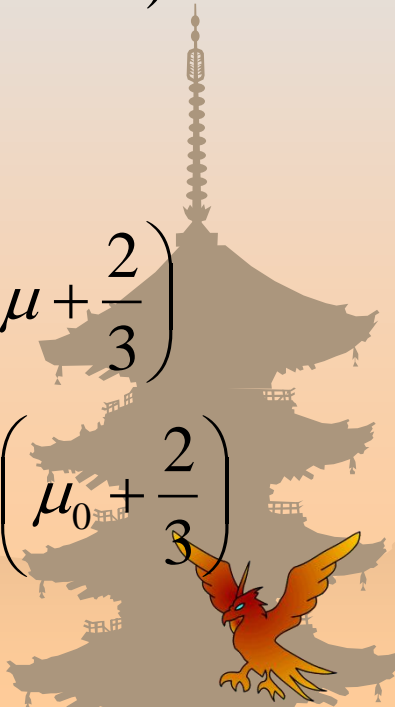
$$T_{\text{co}}^4 = T_{\text{eff}}^4 \frac{3}{4} \left(\tau_{\text{ph}} + \frac{2}{3} \right)$$

$$T_{\text{obs}} = \frac{1}{1+z} T_{\text{co}} = \frac{1}{\gamma(1-\mathbf{v} \bullet \mathbf{s})} T_{\text{co}}$$

$$\tau_{\text{ph}} = \frac{2}{3}; T_{\text{co}}^4 = T_{\text{eff}}^4$$

$$\tau_{\text{ph}} = \mu; T_{\text{co}}^4 = T_{\text{eff}}^4 \frac{3}{4} \left(\mu + \frac{2}{3} \right)$$

$$\tau_{\text{ph}} = \tau_{\text{ph}}; T_{\text{co}}^4 = T_{\text{eff}}^4 \frac{3}{4} \left(\mu_0 + \frac{2}{3} \right)$$



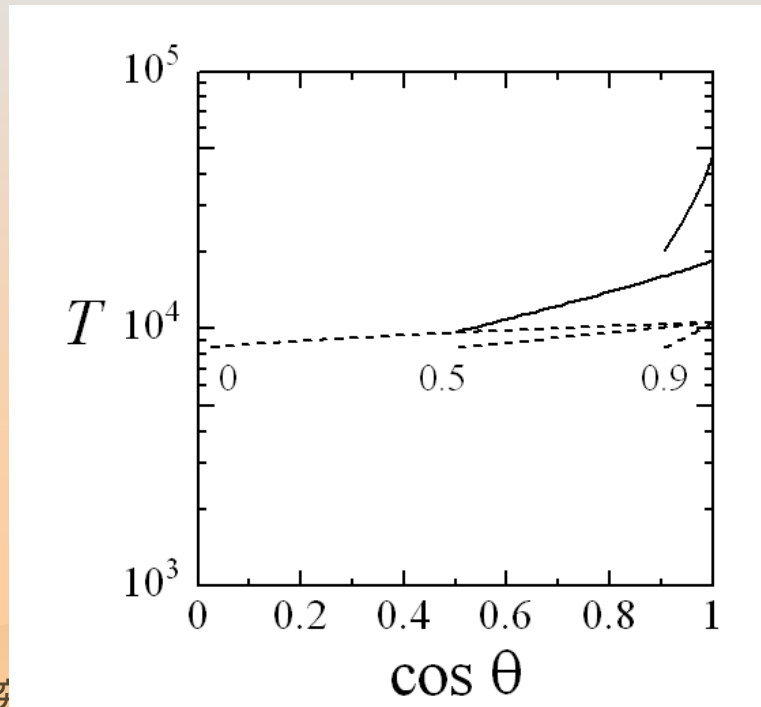
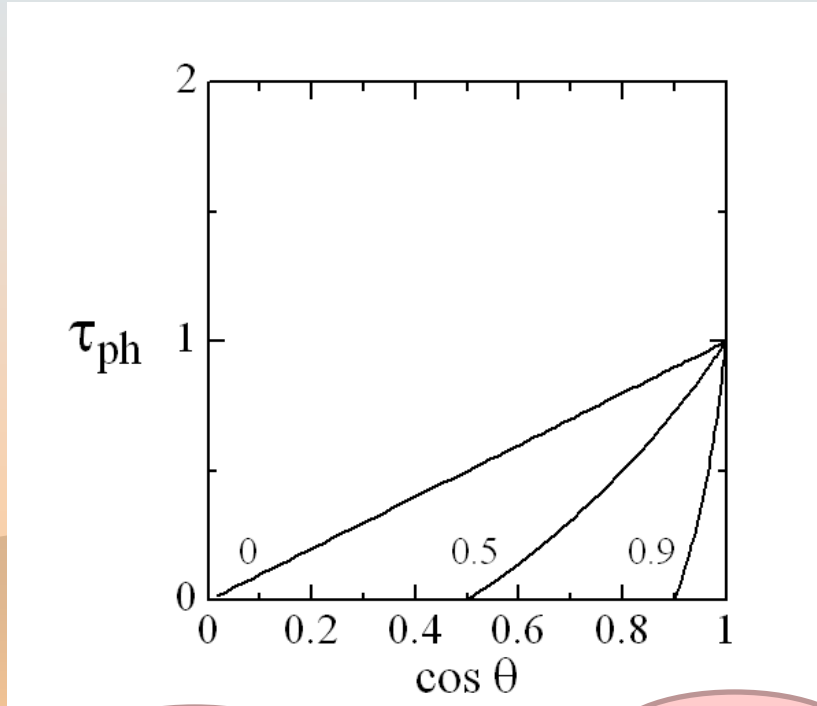


相対論的運動体の“見た目”光球面 突進する平面



❁ “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

真下



2008/12/2

連星・変光星・低温度星研究

@鹿児島大学



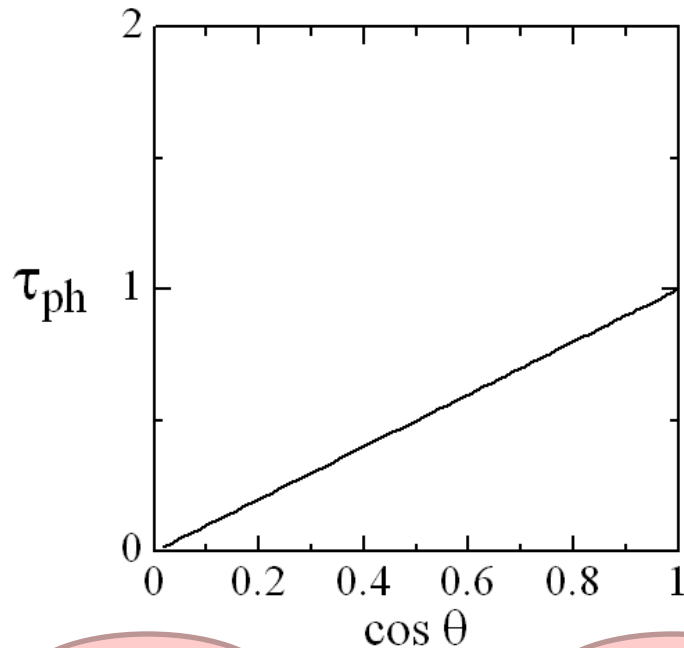
相対論的運動体の“見た目”光球面 突進する球体



❁ “見た目”光球面の
光学的深さ

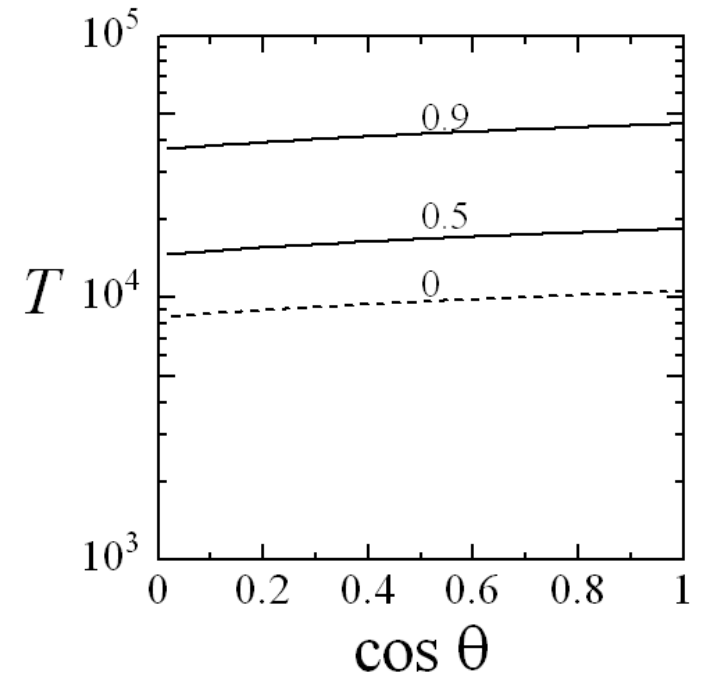
❁ 静止系温度

❁ 速度: $0, 0.5c, 0.9c$



周縁

中央



2008/12/2

連星・変光星・低温度星研
@鹿児島大学





相対論的運動体の“見た目”光球面 回転する円盤

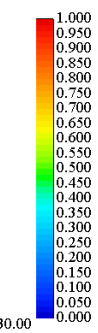
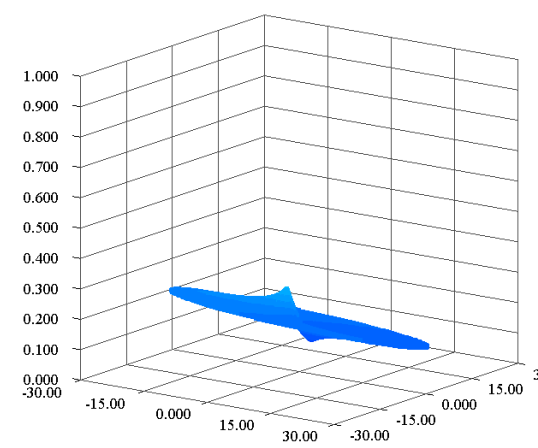
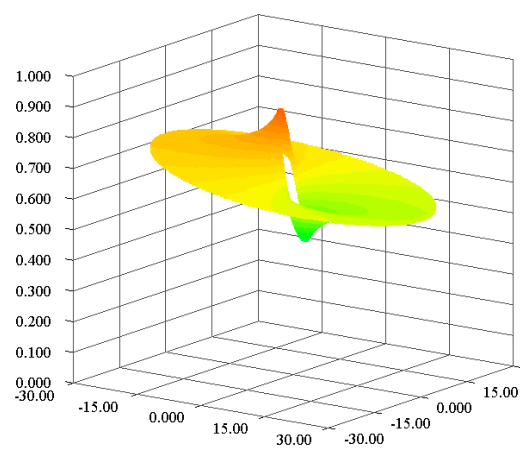
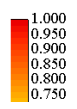
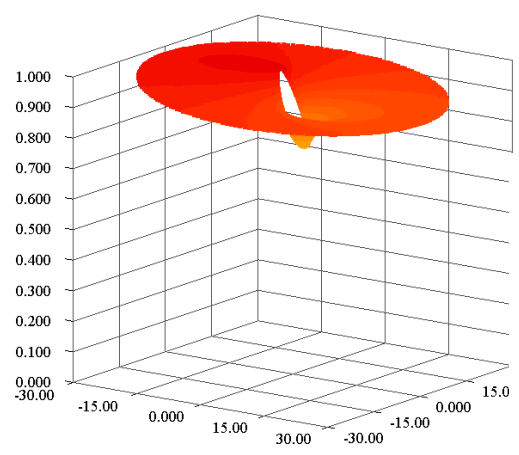


❁ “見た目”光球面の
光学的深さ

❁ ケプラー円盤 (NR)

❁ 軌道傾斜角

20°, 50°, 80°



2008/12/2

連星・変光星・低温度星研究会
@鹿児島大学



相対論的運動体の“見た目”光球面

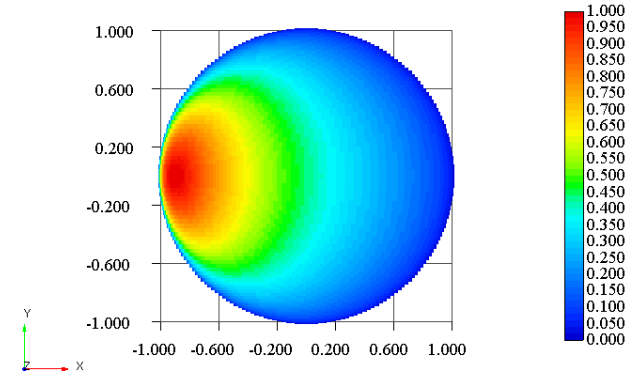
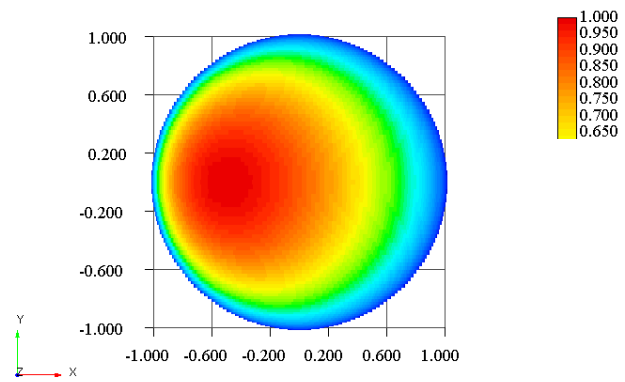
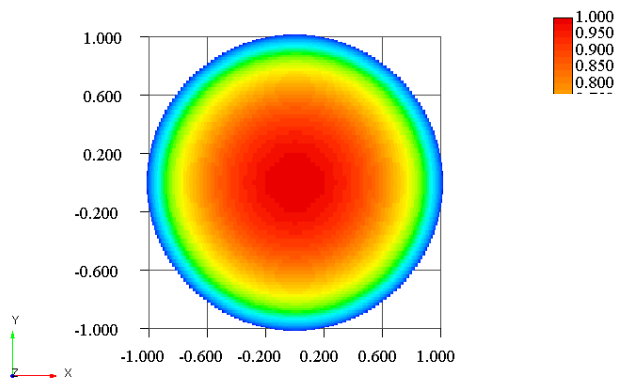
自転する球体



“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

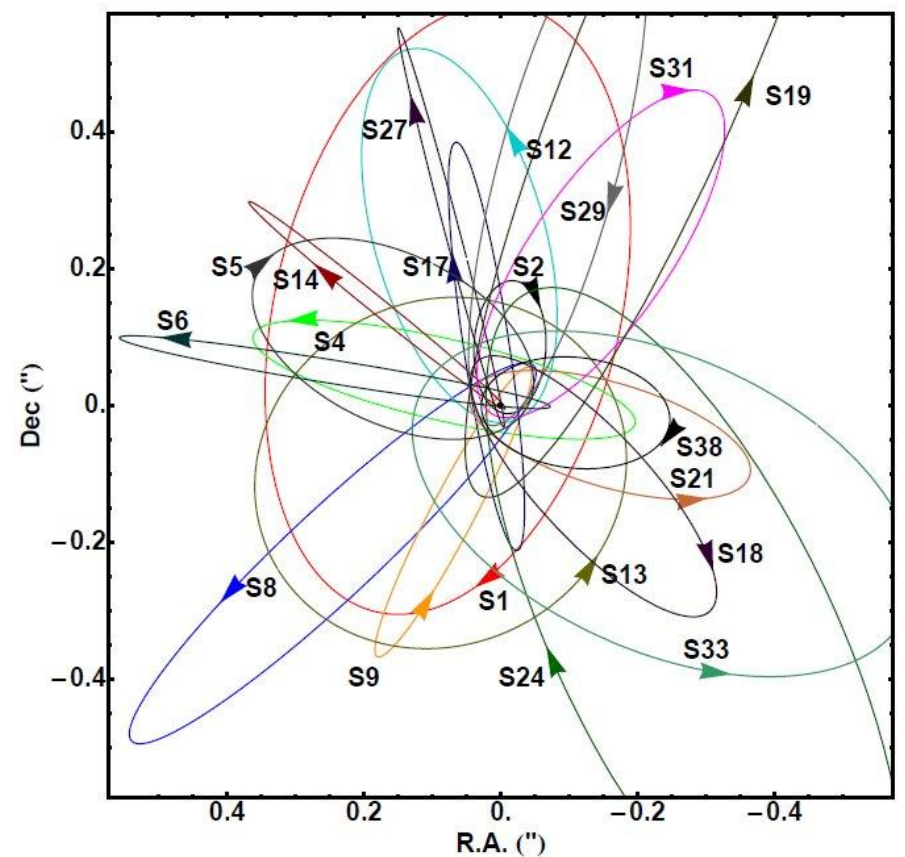
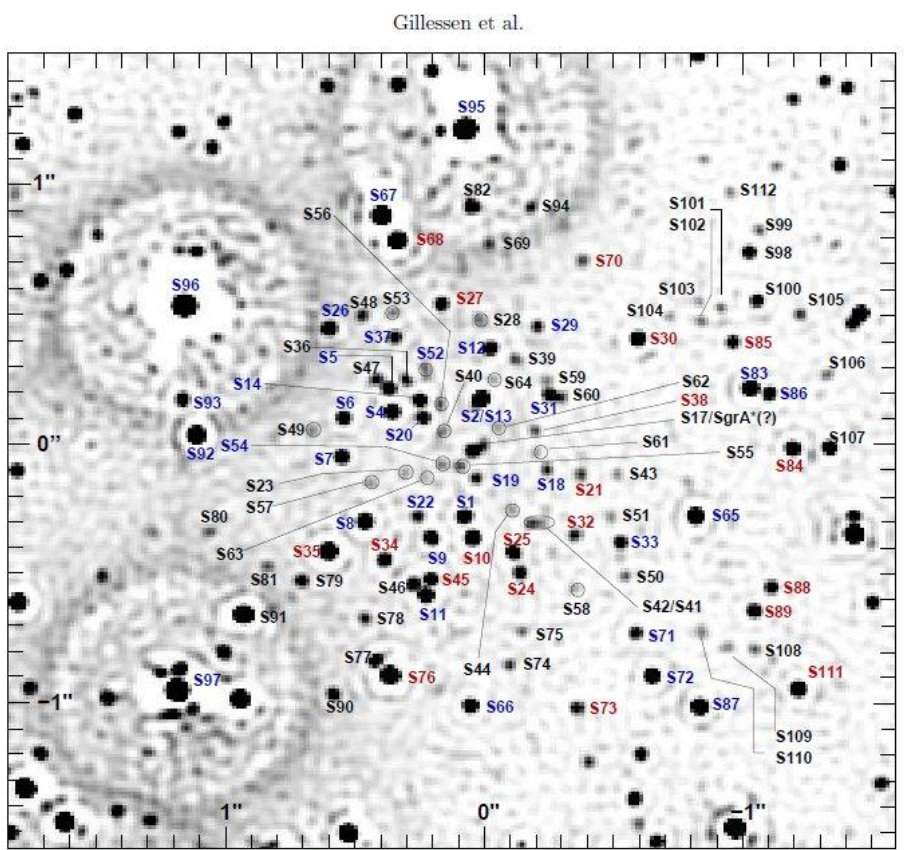




軌道黒体の光度曲線

❁ Sgr A* 周辺の軌道星

(Gillessen+2008)



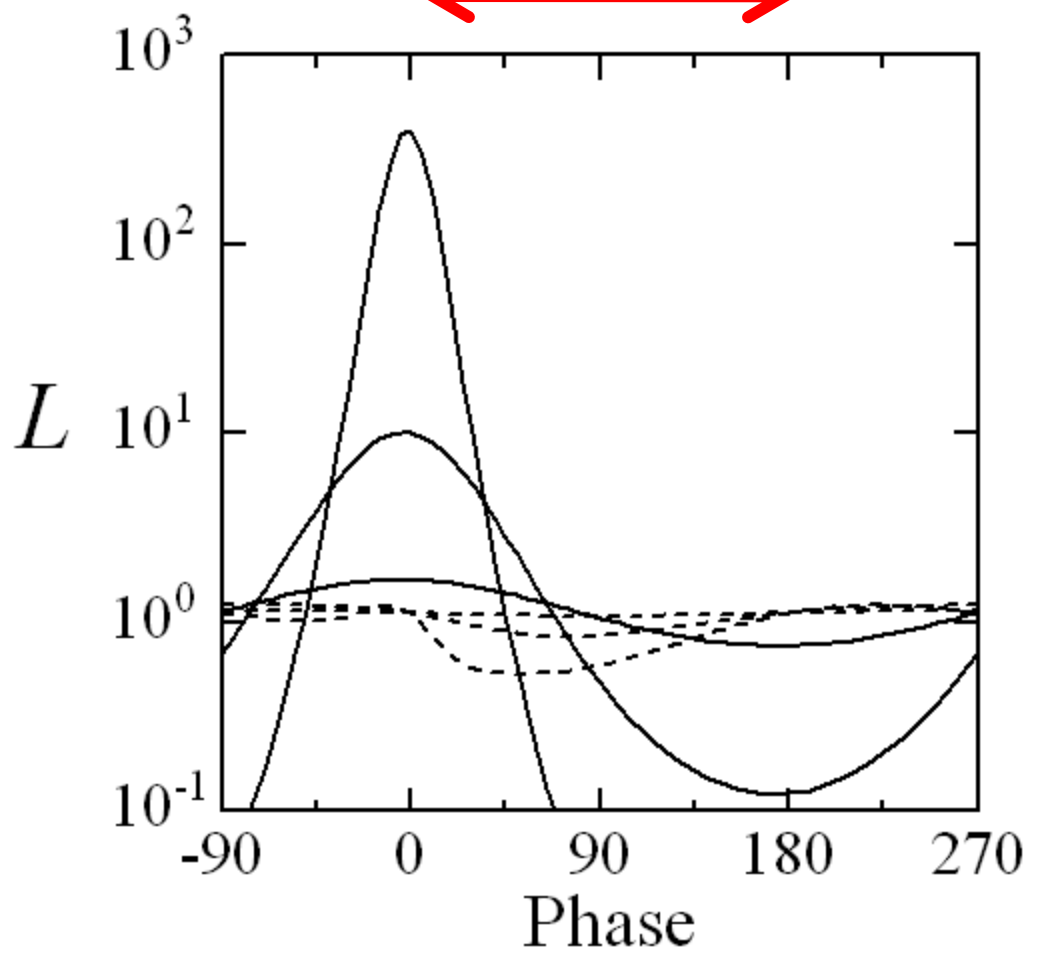


軌道黒体の光度曲線

- ❁ 円軌道
- ❁ 赤道面から観測
- ❁ 公転速度
 $0.1c, 0.5c, 0.9c$

- ❁ 破線: 共動系
- ❁ 実線: 観測系

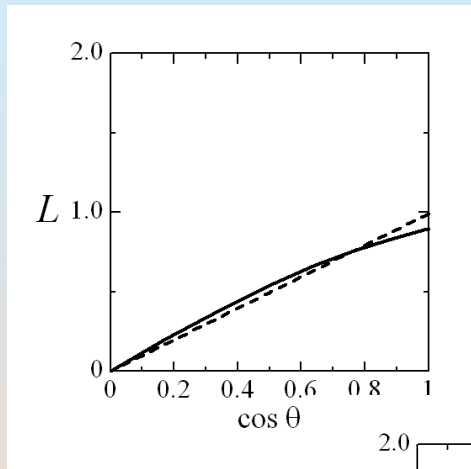
手前側
←→



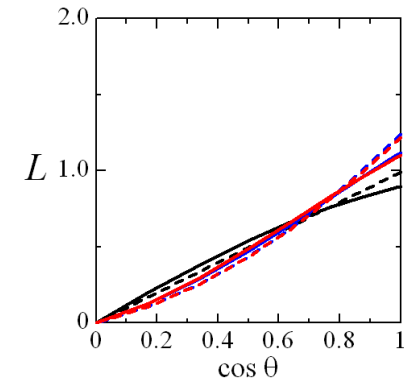
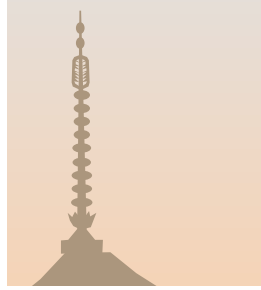
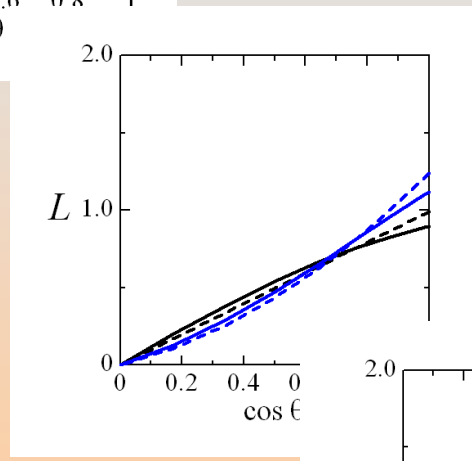


ケプラー円盤の光度

- ❁ 標準降着円盤(NR)
- ❁ GR省略
- ❁ SR考慮



1. 黒: 輻射輸送効果なし
 2. 青: 周縁減光効果
 3. 赤: +光行差
- ❁ 破線: 共動系
 - ❁ 実線: 観測系





ケプラー円盤のスペクトル

❁ 標準降着円盤 (NR)

❁ GR 省略

❁ SR 考慮

0° , 40° , 80°

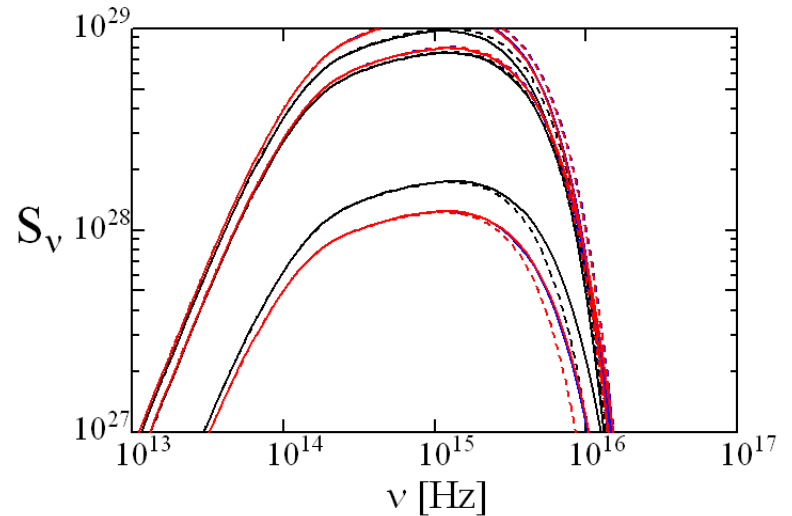
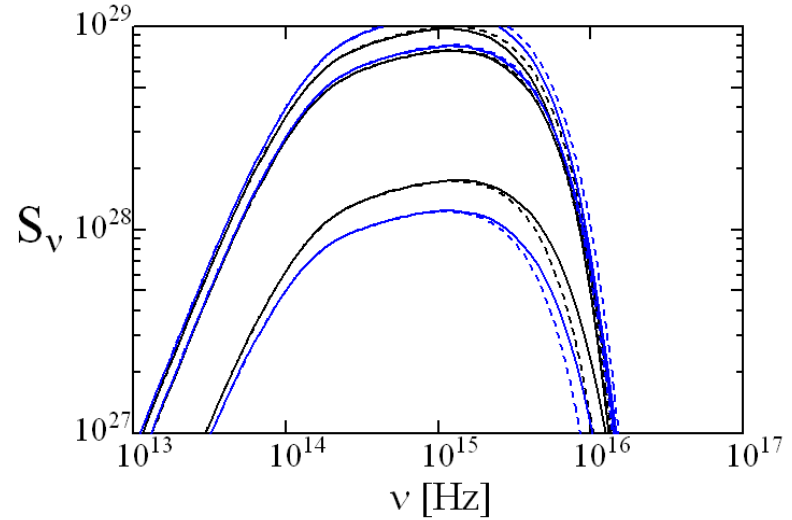
1. 黒: 輻射輸送効果なし

2. 青: 周縁減光効果

3. 赤: + 光行差

❁ 破線: 共動系

実線: 観測系





相対論的運動体の見え方 まとめ

- ❁ 光学的に厚い相対論的運動体は、どこを視ているかを注意深く考えないといけない
- ❁ 周縁減光効果は、光行差による影響を受ける
 - 視線//垂線 (pole-on) × 視線//速度 ◎
 - 視線//垂線 (pole-on) × 視線⊥速度 ×
 - 視線//表面 (edge-on) × 視線//速度 △ (limb)
 - 視線//表面 (edge-on) × 視線⊥速度 ×
- ❁ 観測光度はドップラーブーストで高くなる
 - 光行差効果 = < 周縁減光効果 << ドップラーブースト





相対論的運動体の見え方 今後の課題

- ME/黒体輻射でないときは？
- 線スペクトルへの影響
- 偏光への影響
- ブラックホール風のモデル改
 - ファイアボール $\gamma \propto R$ (Paczynski)
 - ブラックホール輻射風 (Akizuki&F)
- 非球対称の場合は？

