

輻射圧優勢 ブラックホール風の 観測的特徴

*Observational Appearance of
Black-Hole Winds*

福江 純、住友那緒子

(大阪教育大学)





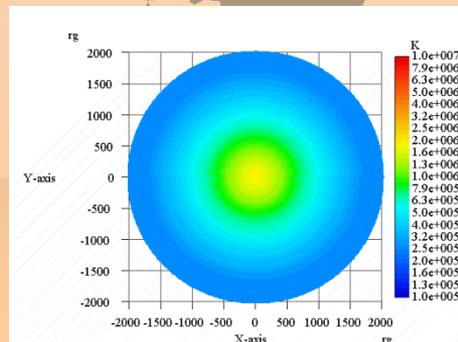
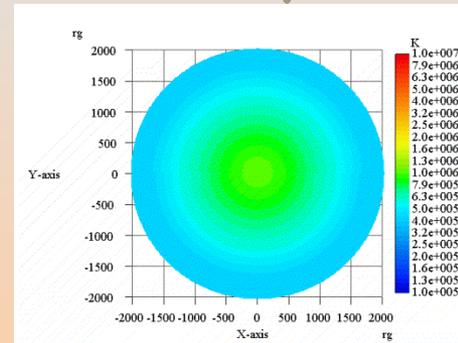
輻射圧優勢ブラックホール風の



観測的特徴

かつて誰も考えなかった ブラックホール風の“見た目”

- 1 ブラックホール風・ジェット天体
- 2 雲ーガス体ーの“見た目”
- 3 “見た目”の光学的深さ
- 4 ブラックホール風の“見た目”
- 5 今後の課題

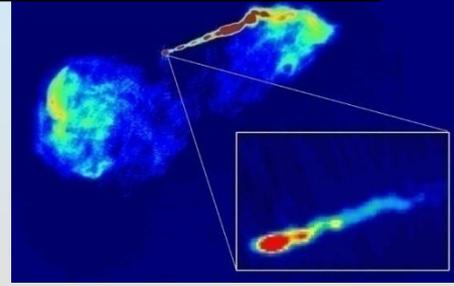




ブラックホール風・ジェット

- ❁ ブラックホールは黒い穴ではなく、物質を吸い込み**光輝く**。
- **降着円盤**と呼ぶ。
- ❁ さらに物質を吸い込むだけでなく、**高温プラズマの噴流を吹き出す**。
- **宇宙ジェット**と呼ぶ。
- ❁ 降着円盤や宇宙ジェットは、ブラックホール周辺で生じる**活動的で普遍的な現象**である。

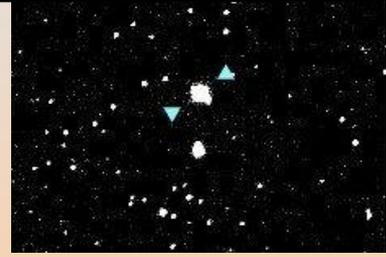
活動銀河 M87



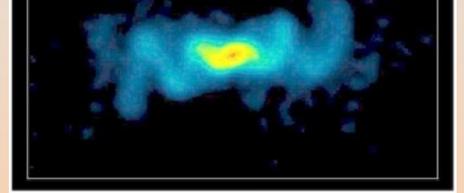
クェーサー 3C273



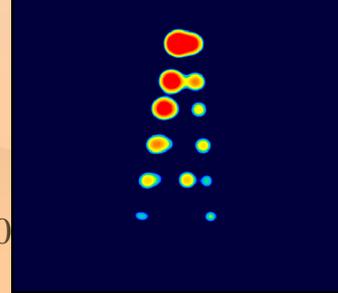
X線星 Cyg X-1



マイクロクェーサー SS433



マイクロクェーサー GRS1915

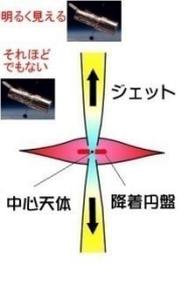


ガンマ線バースト

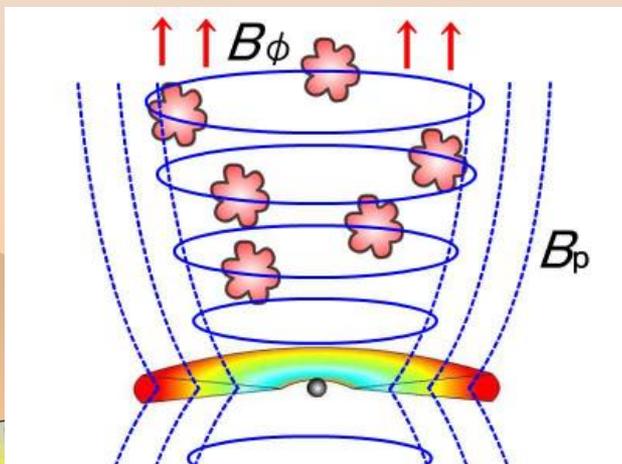
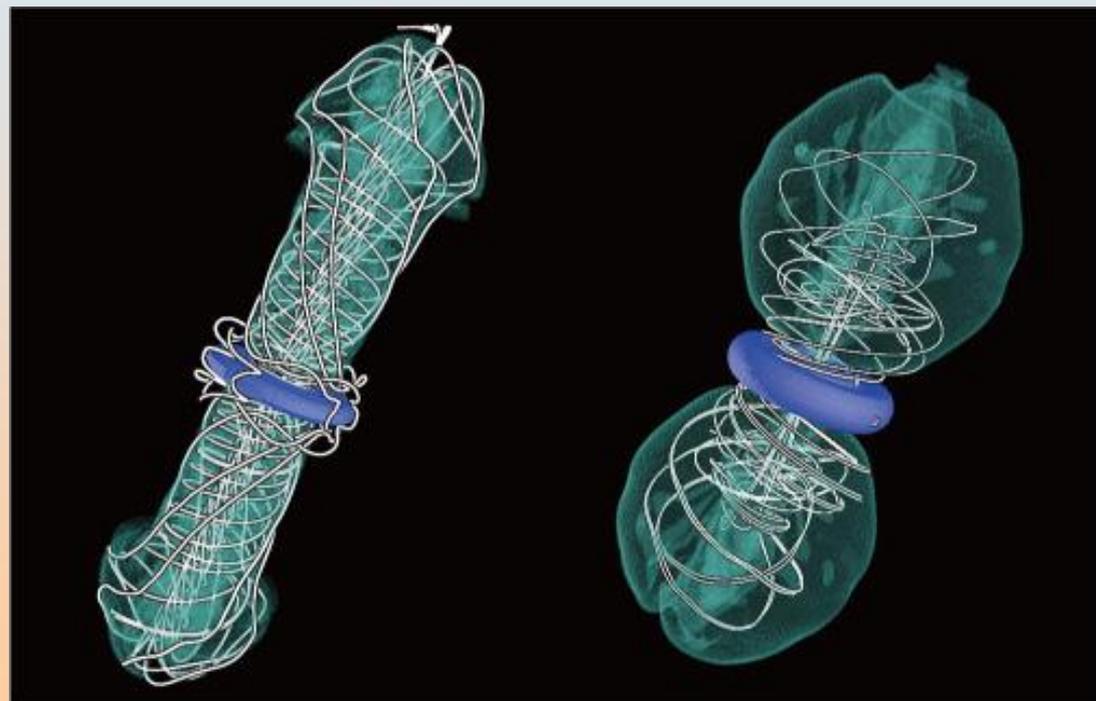
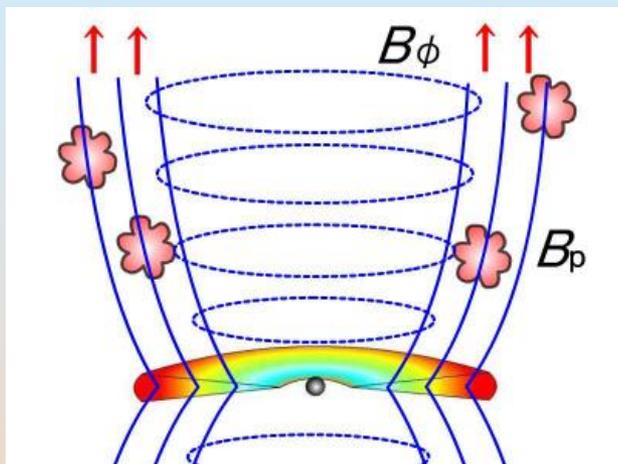




ジェットの作り方は いろいろ提案されてきたが



❁ 磁場の力で駆動する

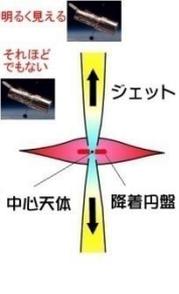


Y. Kato

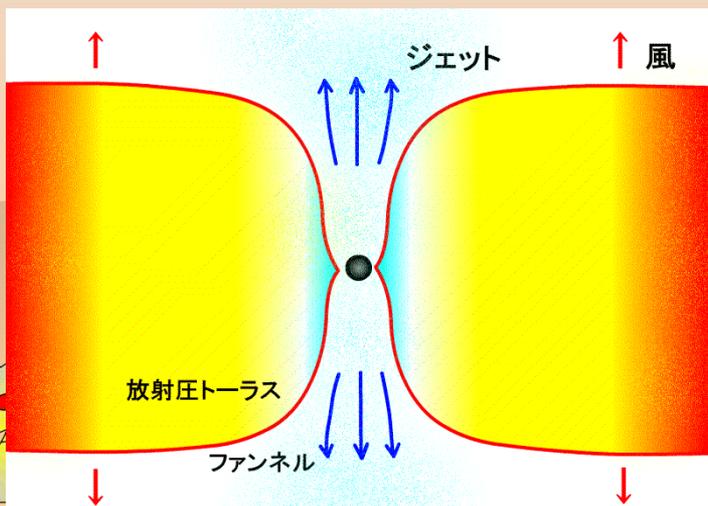
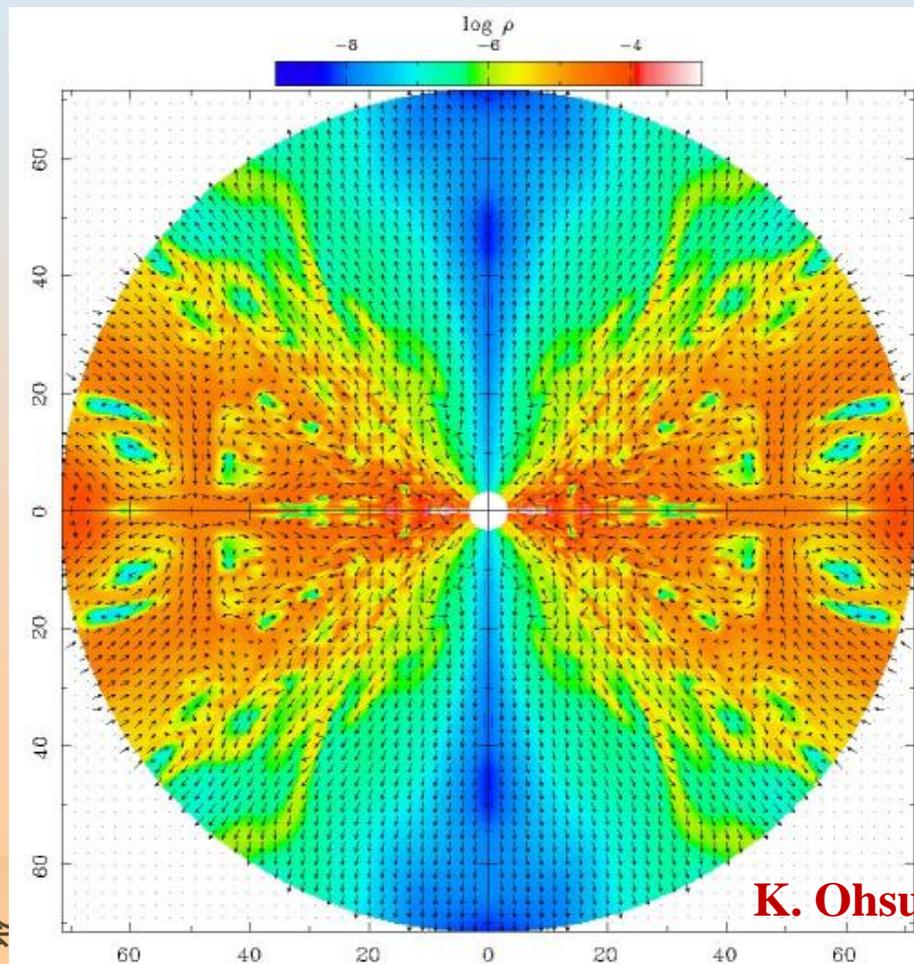
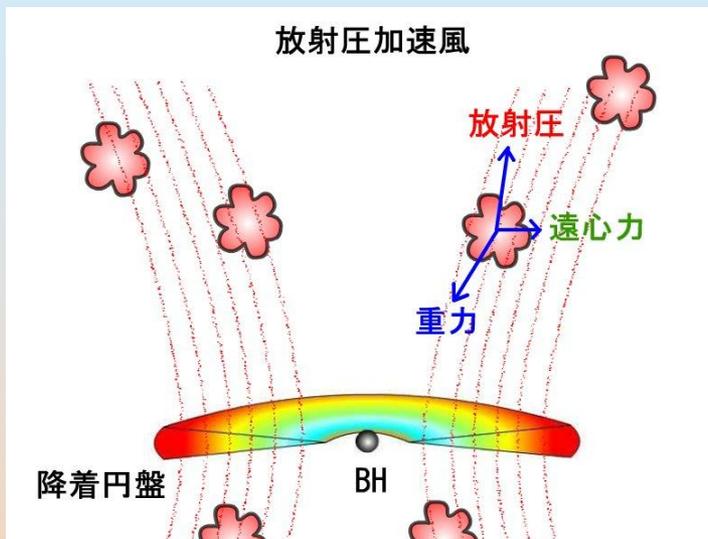




ジェットの作り方は いろいろ提案されてきたが



光の圧力で駆動する



K. Ohsuga



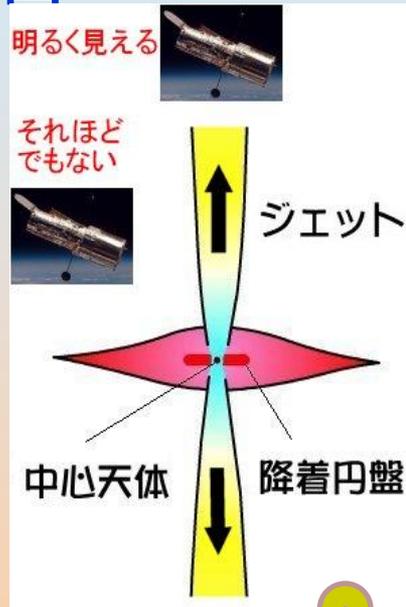


人は見た目が9割 天体は“**見た目**”が10割

ブラックホール風・ジェットの見たい目

- ❁ 見かけ上の“**光球 (photosphere)**”
 - 周縁減光効果
- ❁ 光の伝播への相対論的効果
 - **光行差 & ドップラー効果**
 - 重力赤方偏移 & 光線の彎曲

ドップラーブースト。亜光速で吹き出すプラズマジェットを正面から観測すると、非常に明るく観測される。



**ブラックホール風の“見た目”は
誰も考えなかった！**

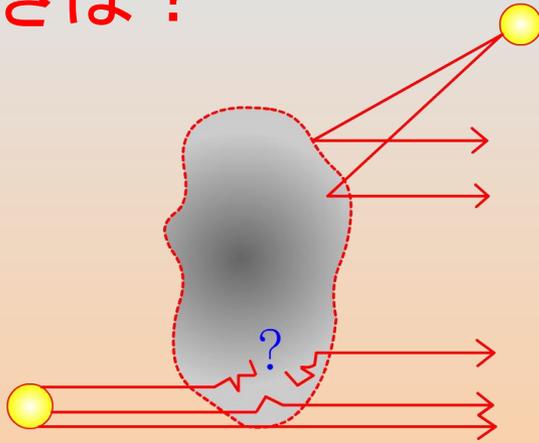
except for
Sumitomo et al. 2008





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

2008/9/4

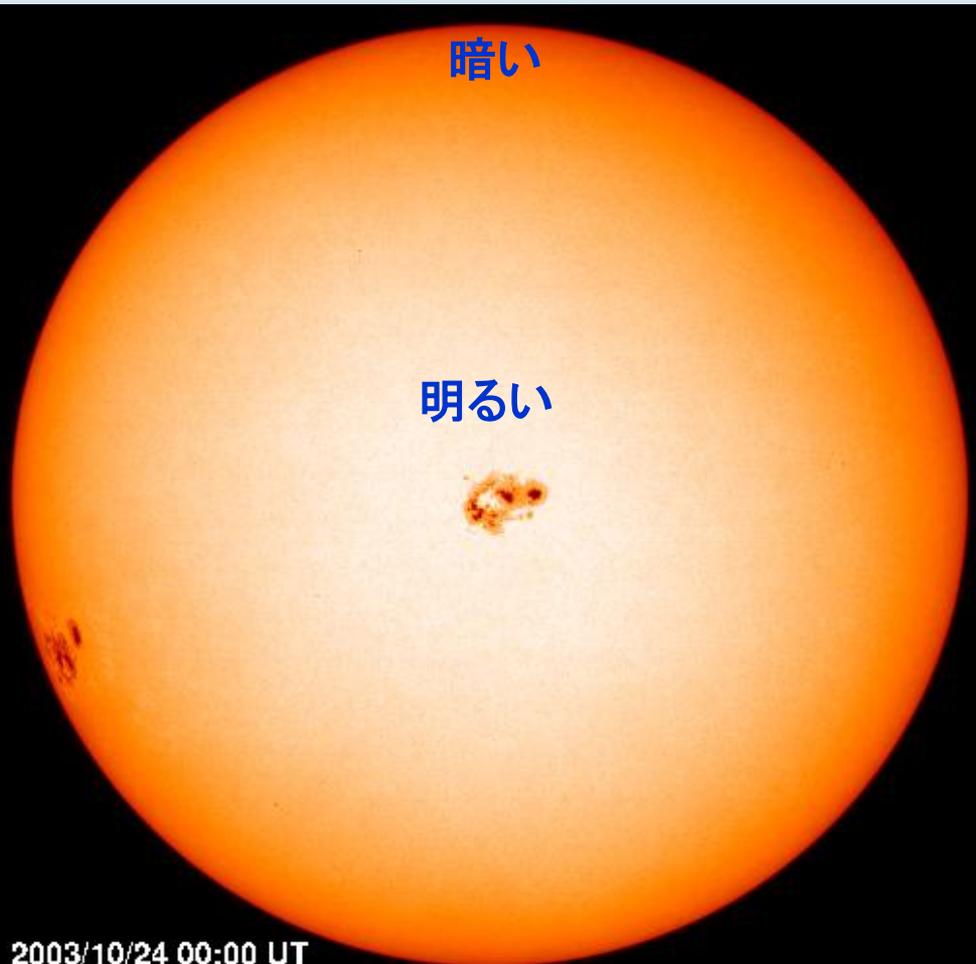
日本天文学会2008



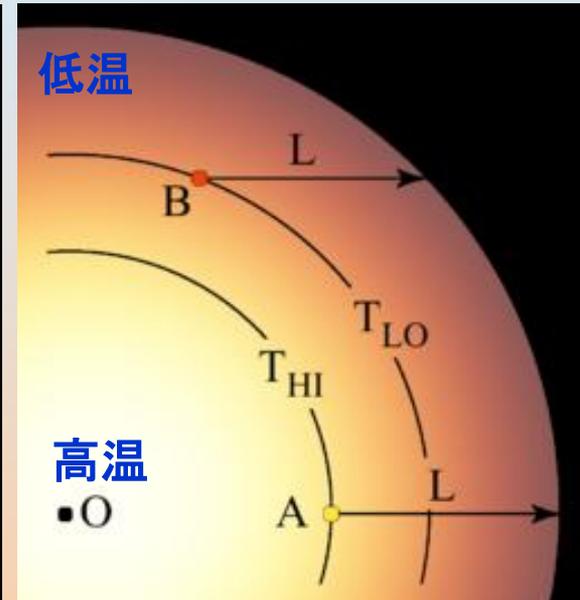


太陽の周縁減光効果

❁ 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

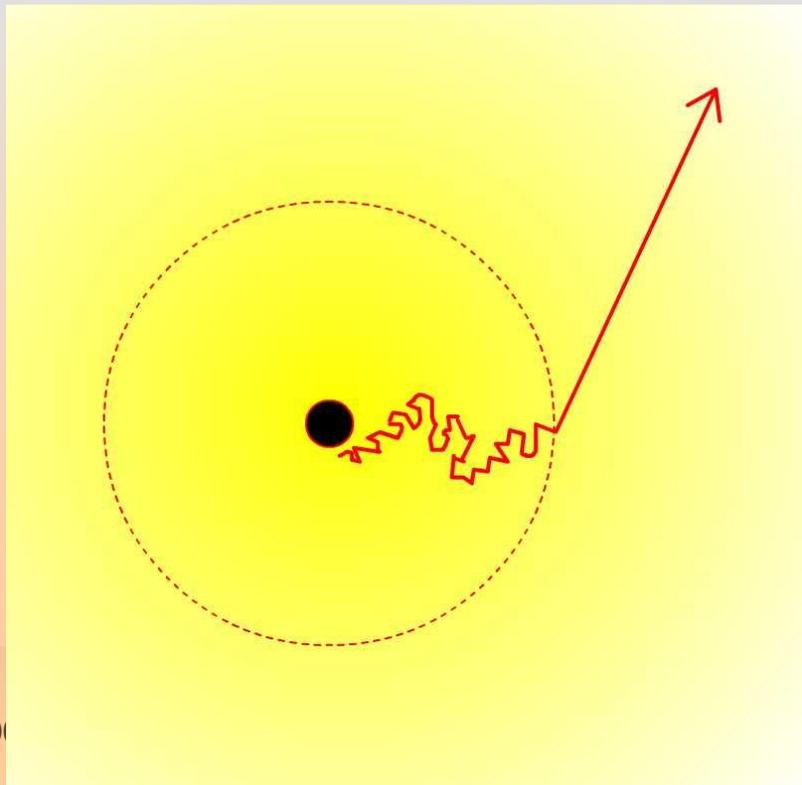
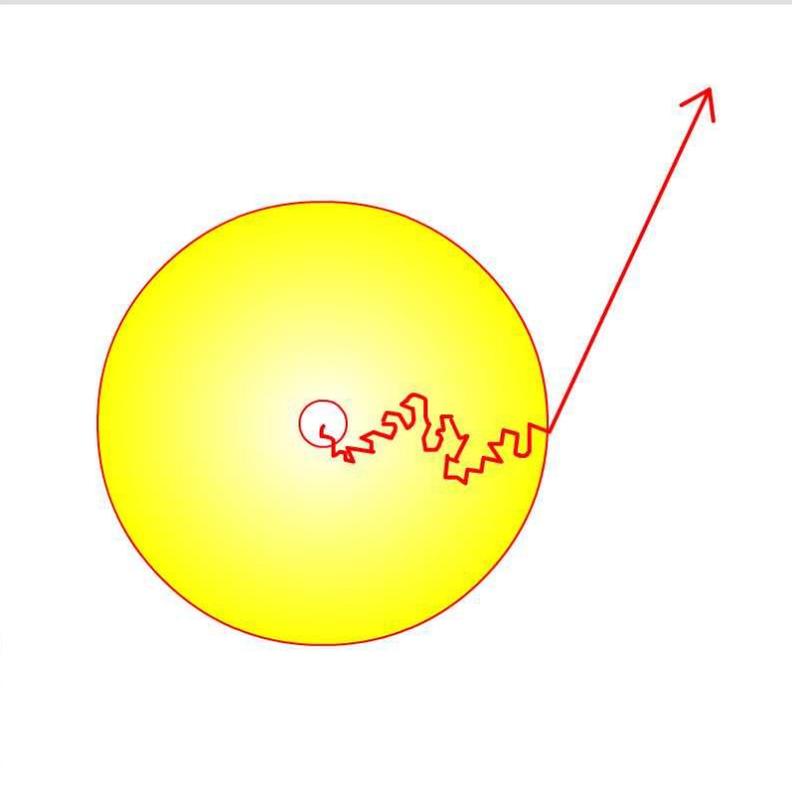
❁ どこを視ているのか





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

- ❁ 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。
– Abramowicz et al. 1991

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

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

$$\gamma = \text{ローレンツ因子}$$

$$\cos\theta = \text{方向余弦}$$

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

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

$$\kappa_0 = \text{不透明度}$$

$$\rho_0 = \text{共動系でのガス密度}$$

$$ds_0 = \text{共動系での光路長}$$

$$ds = \text{静止系での光路長}$$





ブラックホール風のモデル

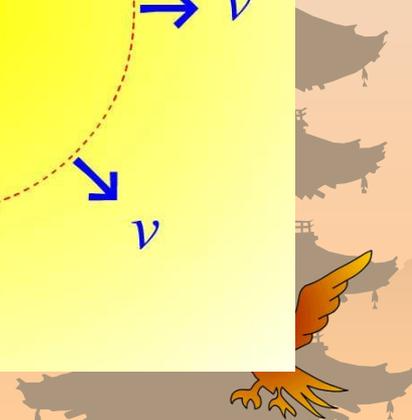
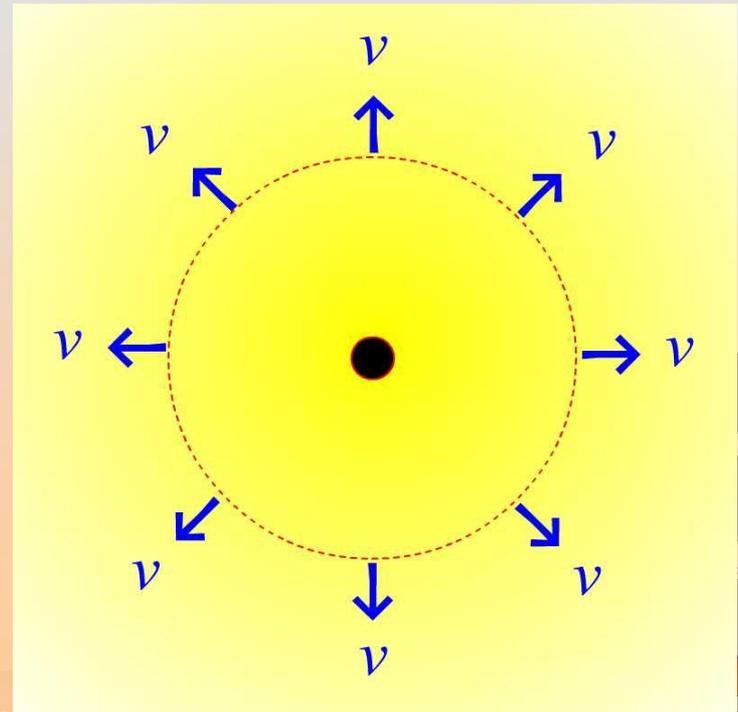
❁ 仮定

- 定常
- 球対称 (R)
- 重力なし
- 速度一定 ($v = c\beta = \text{const}$)
- 光度一定 ($L = 4\pi R^2 \sigma T_0^4$)
- (Sumitomo et al. 2008では断熱膨張)

❁ 密度分布と温度分布

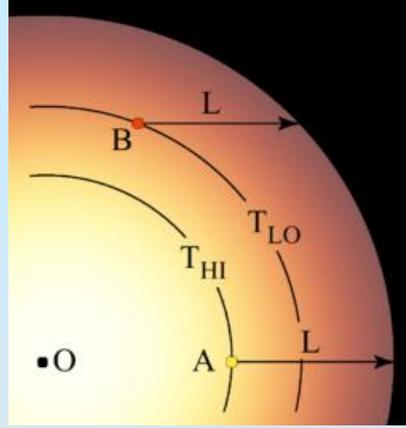
$$\rho_0 = \frac{\dot{M}_0}{4\pi\gamma R^2} \quad T_0 = \left(\frac{L}{4\pi\sigma R^2} \right)^{1/4}$$

- ❁ 中心(ブラックホール)から周囲の四方八方へ球状に風が吹いている

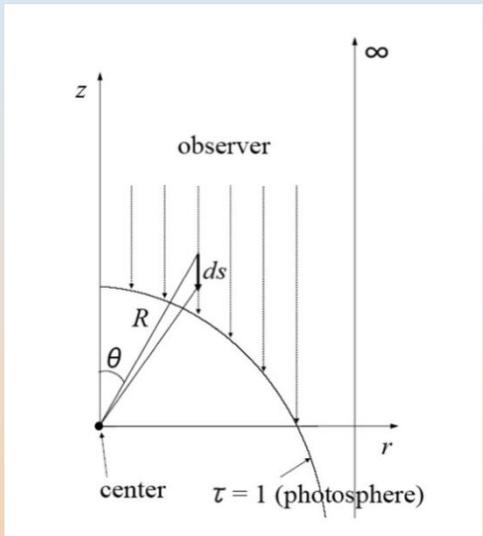




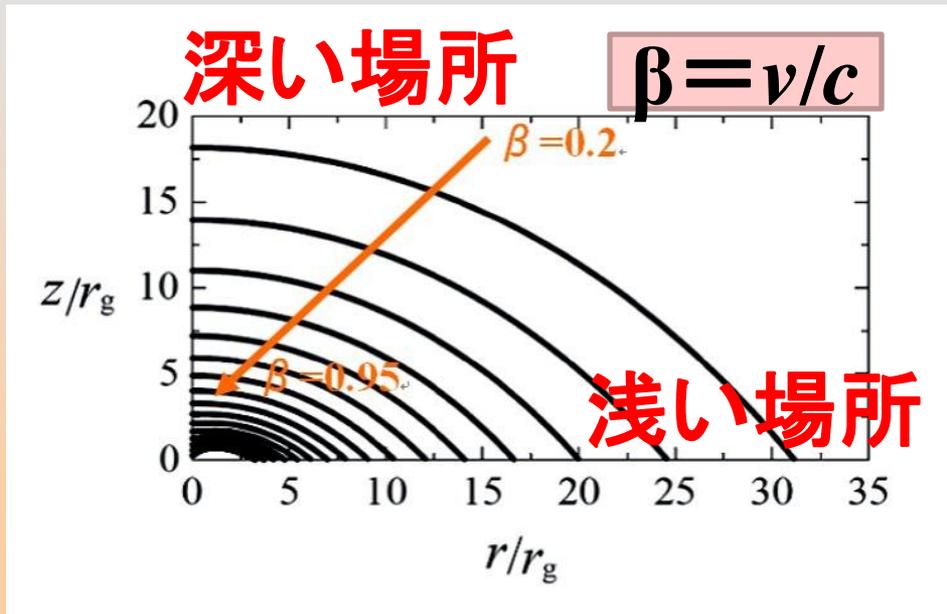
見かけの光球面



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

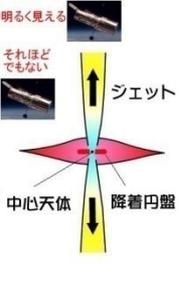
β 大: 光球面収縮

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。





見かけの温度分布

❁ 仮定

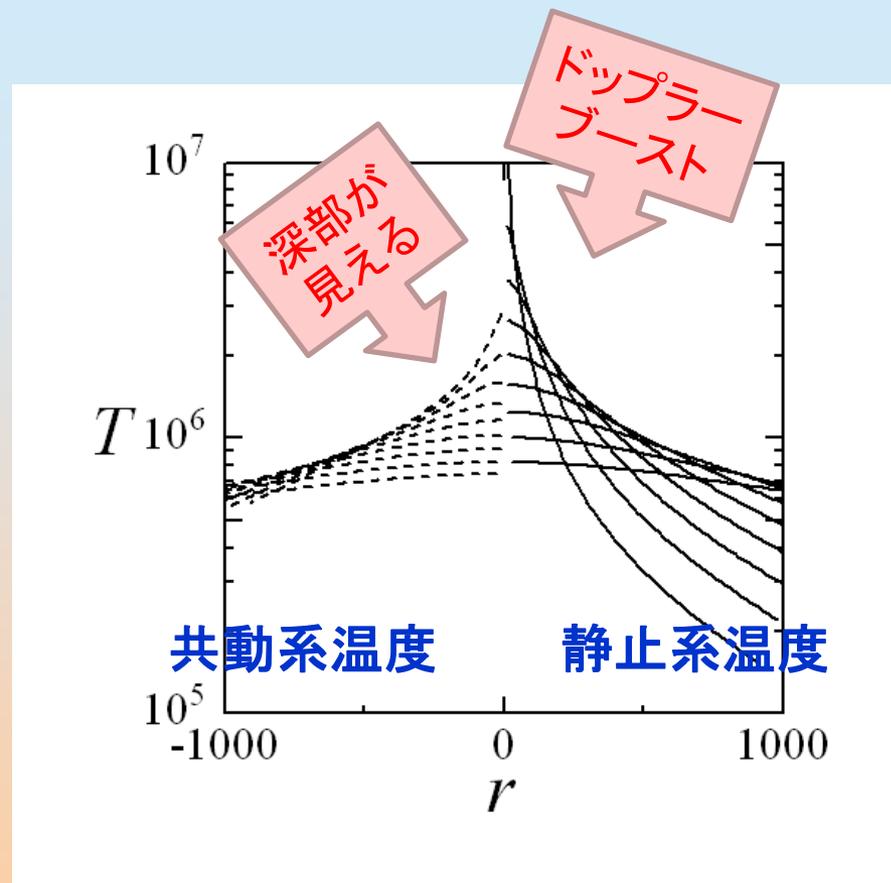
- 共動系で黒体放射

❁ 観測される温度

$$T_{\text{obs}} = \frac{1}{1+z} T_0 = \frac{1}{\gamma(1-\beta \cos\theta)} T_0$$

❁ パラメータ

- 10太陽質量
- 1エディントン光度
- 1000臨界質量放出率



無限遠の観測者から見た光球の温度分布。左側は共動系での、右側は静止系での温度分布。風の色速度 β は平らなものから0.1, 0.2, ... 0.9である。

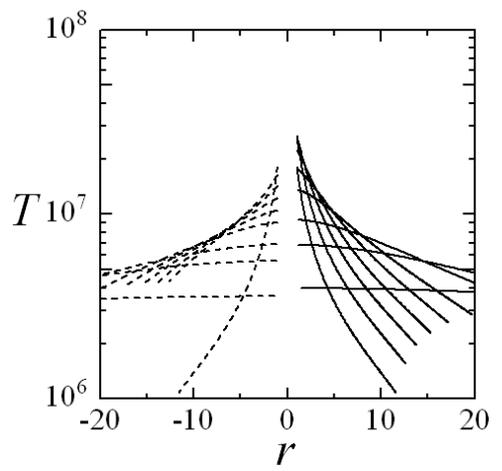




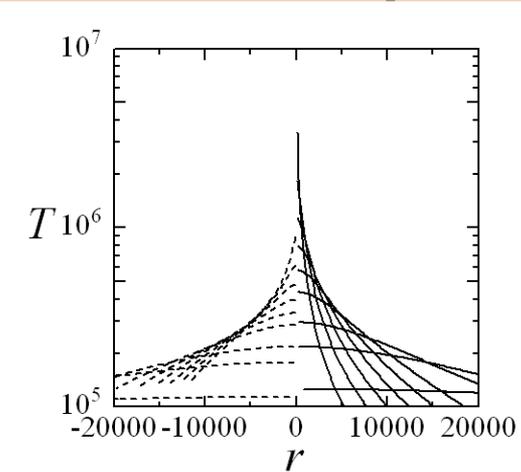
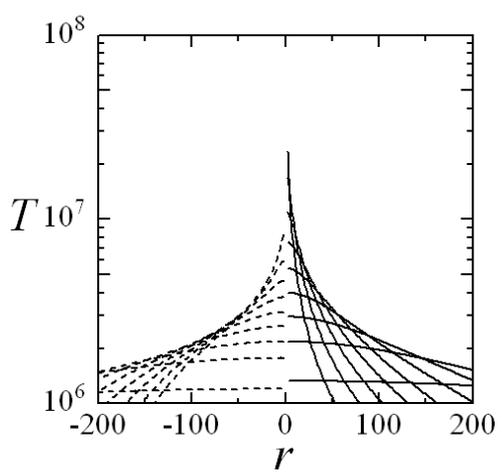
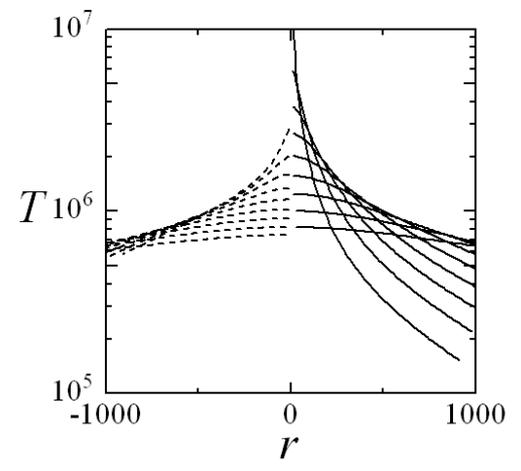
見かけの温度分布



- 10
- 100



- 1000
- 10000

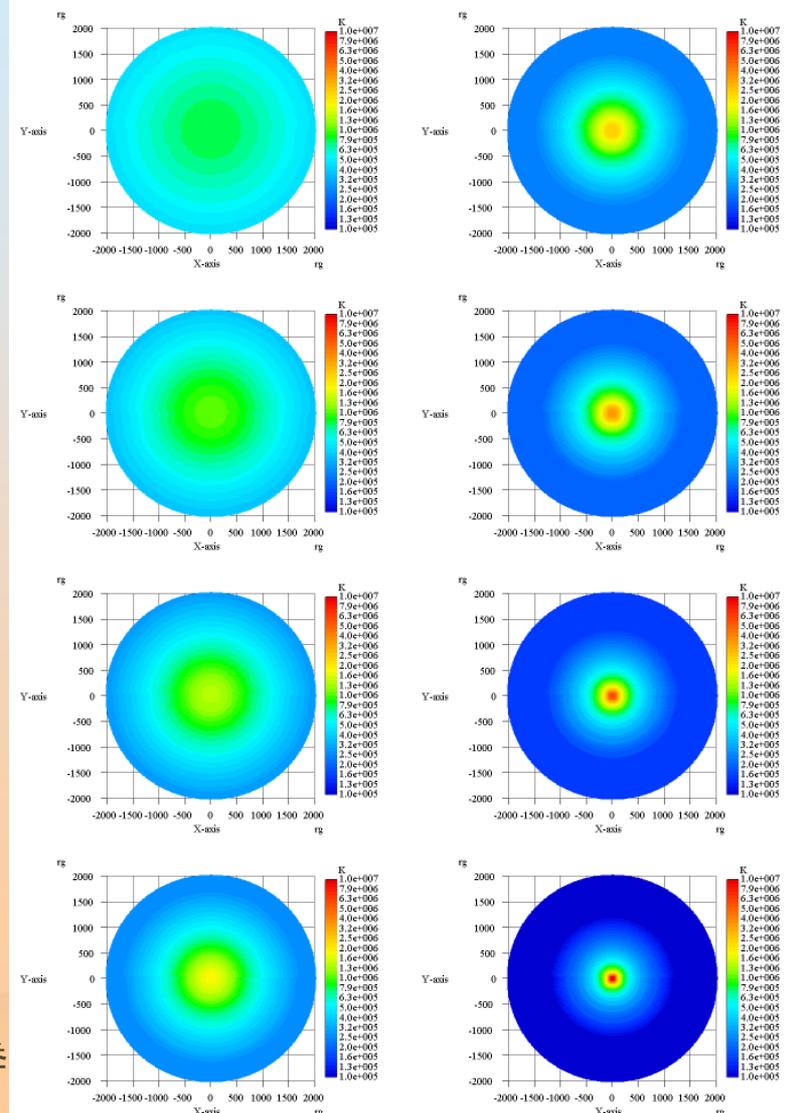
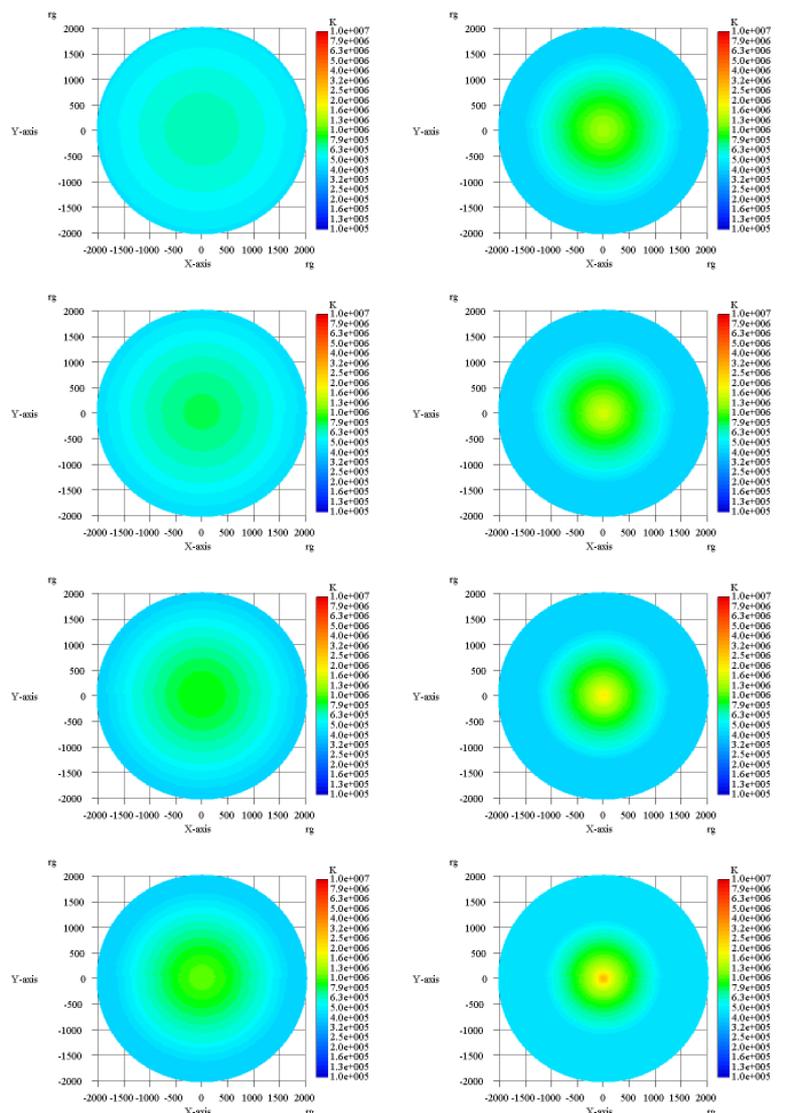




見かけの温度分布

共動系温度

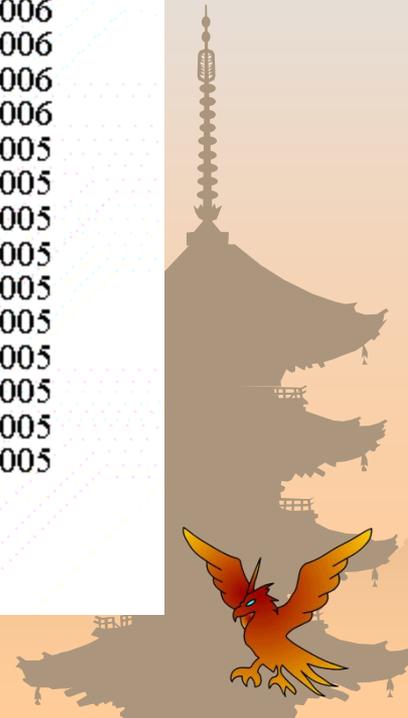
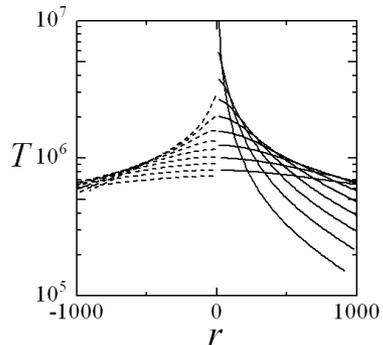
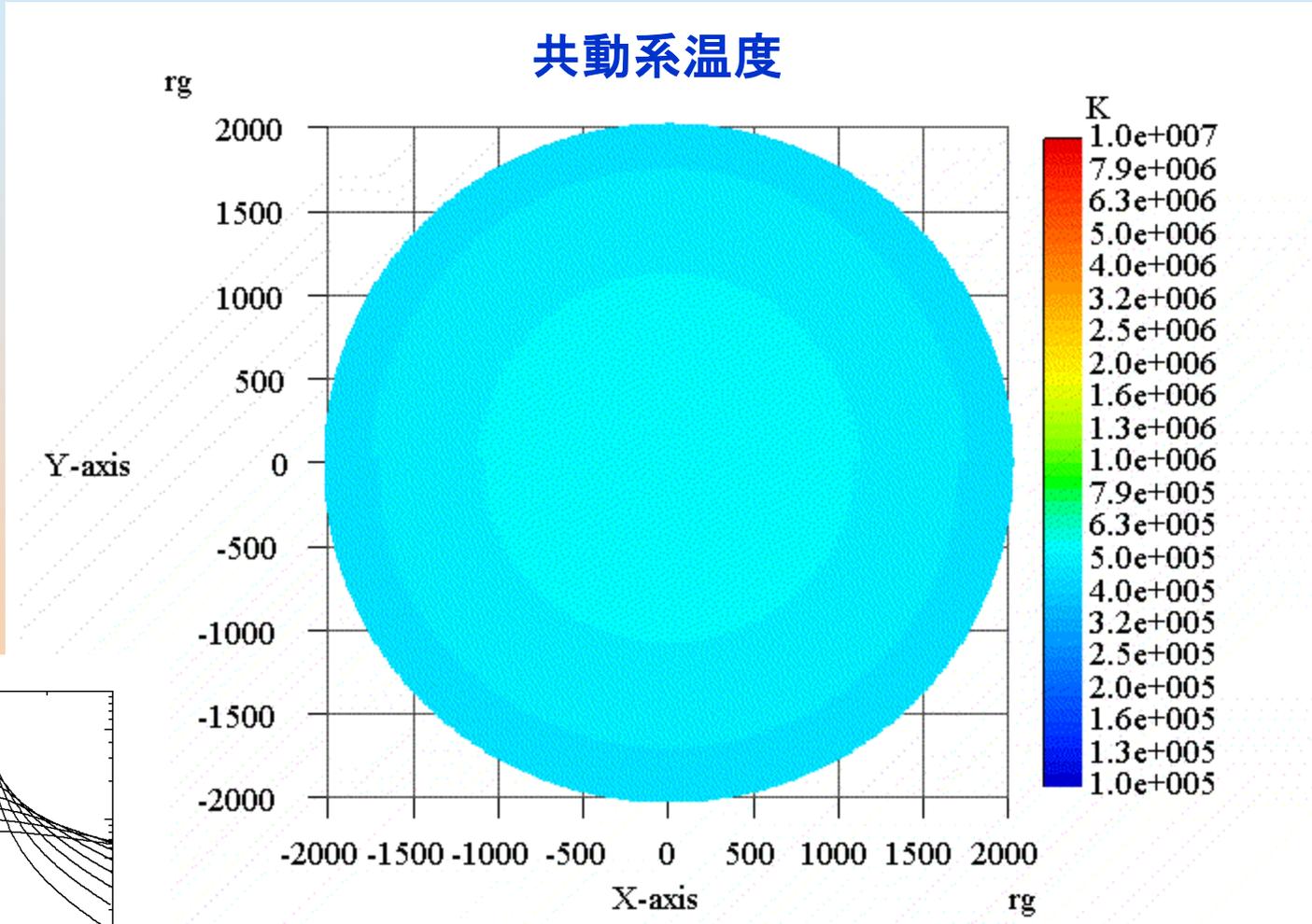
静止系温度



無限遠の観測者から見た光球の温度分布。左側は共動系での、右側は静止系での温度分布。風
 の速度 β は左上から右下へ0.2, 0.3, ... 0.9である。

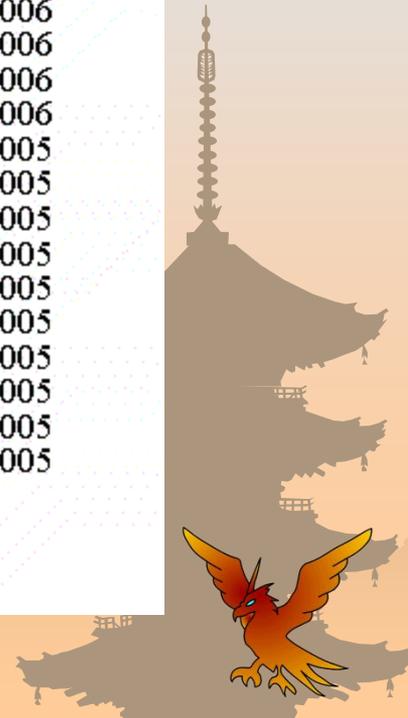
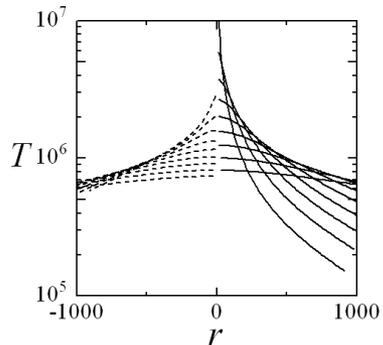
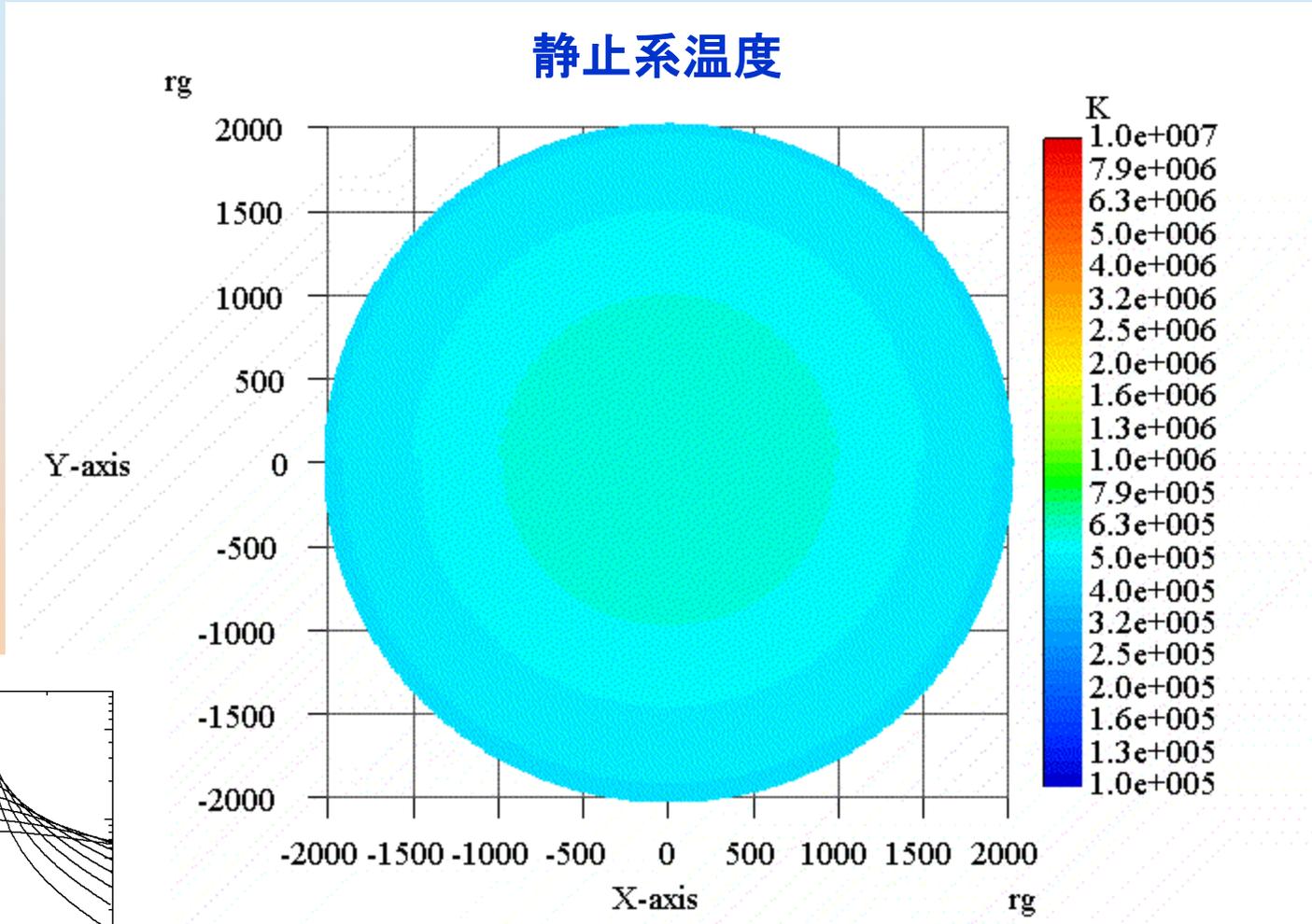


ジェットが加速すると！ ジェット共動系での見え方





ジェットが加速すると！ 観測者静止系での見え方





見かけの光度

❁ 質量放出率
(臨界値で規格化)

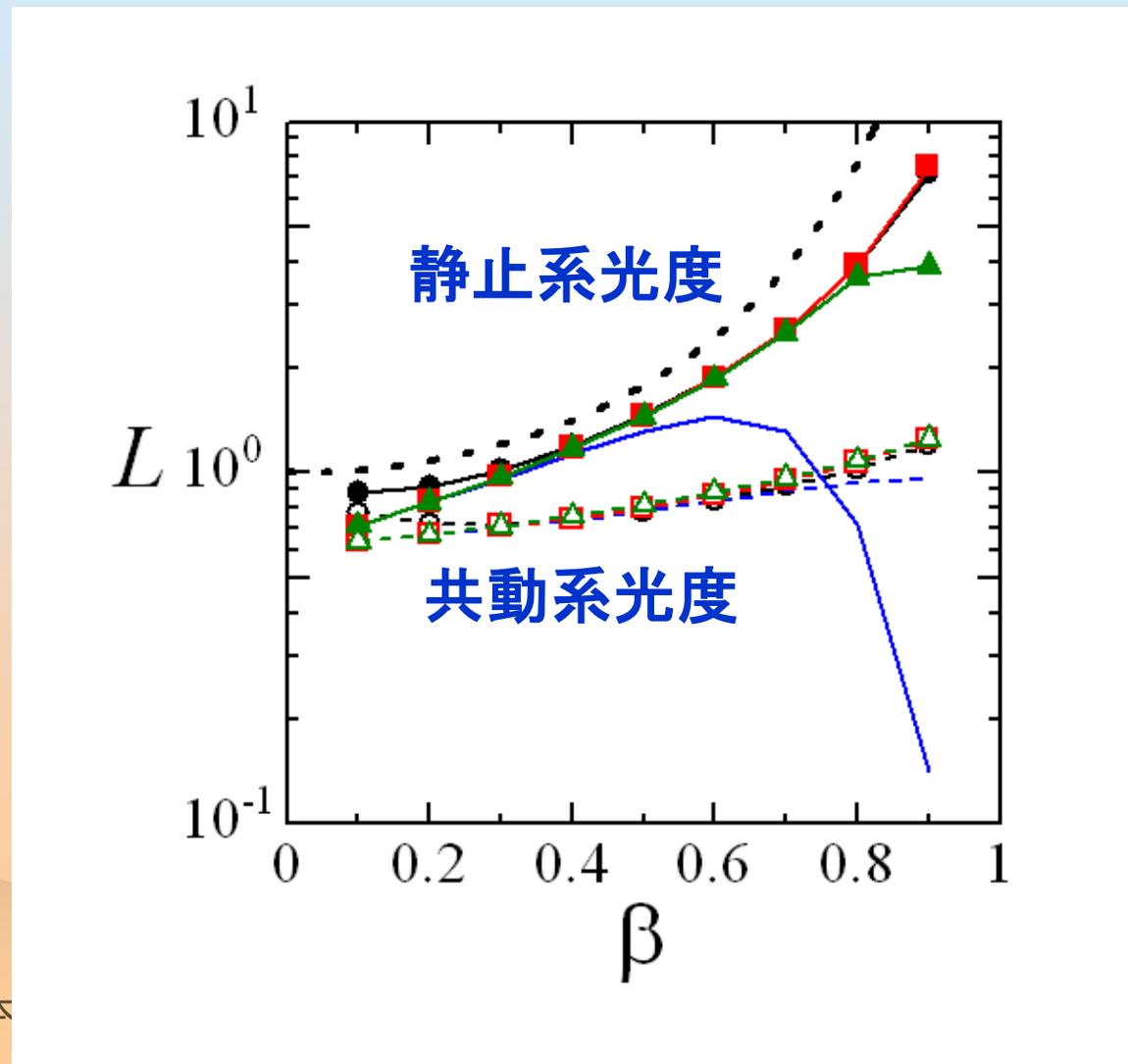
無印: 10

△ ▲ : 100

□ ■ : 1000

○ ● : 10000

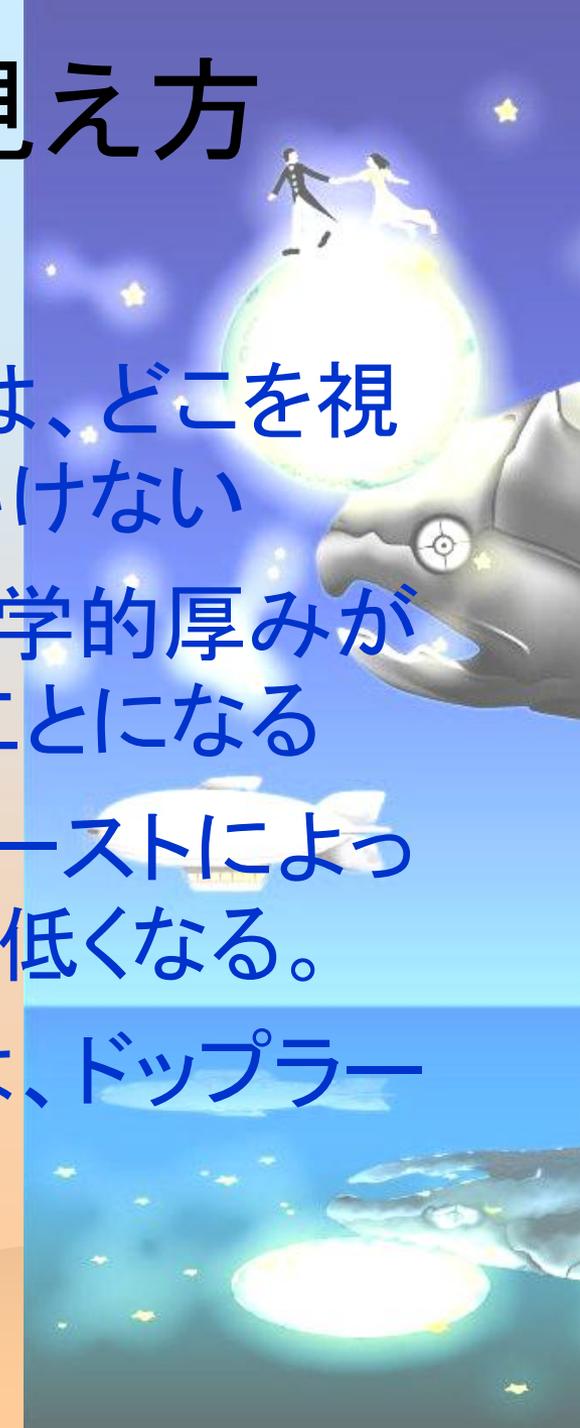
点線: γ^4 のプロット





ブラックホール風の見え方 まとめ

- ❁ 光学的に厚いブラックホール風は、どこを視ているかを注意深く考えないといけない
- ❁ 相対論的な風では、見かけの光学的厚みが小さくなるので、より深部を視ることになる
- ❁ 観測される温度は、ドップラーブーストによって、中央部は高くなり、周辺部は低くなる。
- ❁ 観測される光度は、全体としては、ドップラーブーストで高くなる





ブラックホール風の見え方 今後の課題

- スペクトルは？
- 黒体輻射でないときは？
- 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？

