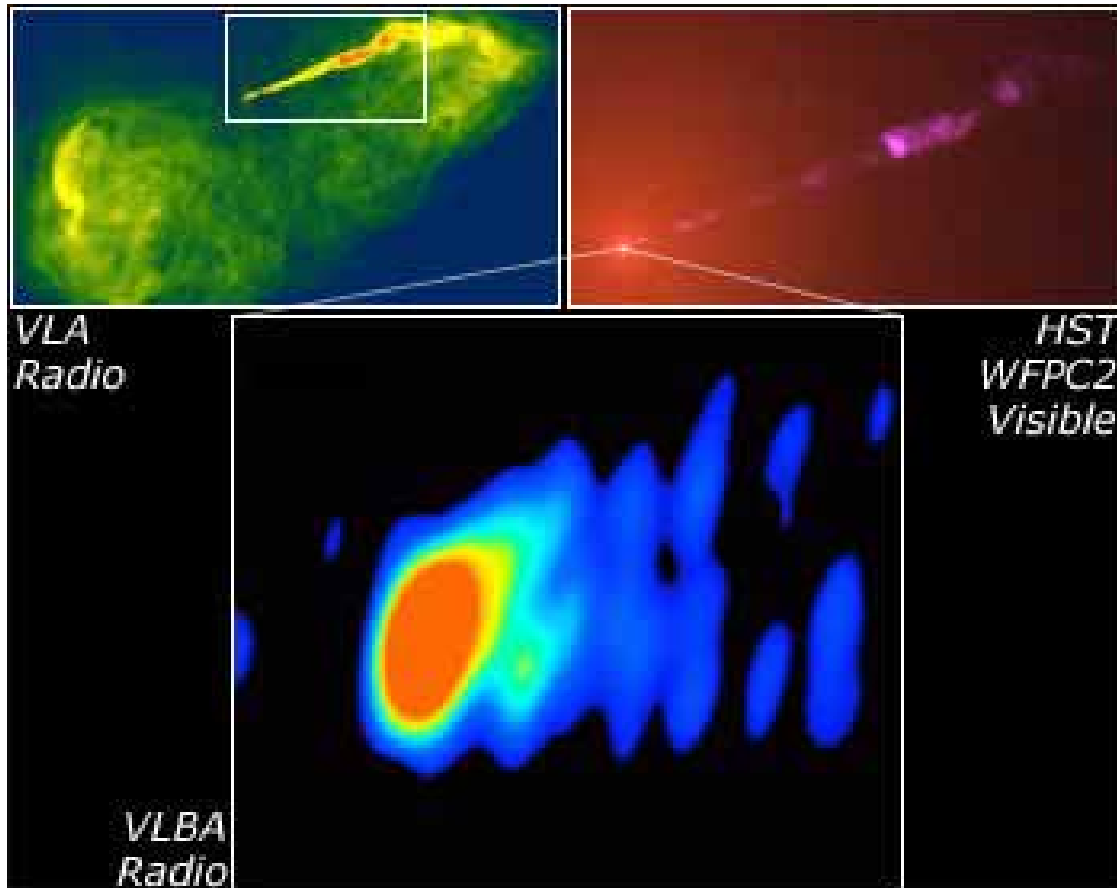


磁気流体数値シミュレーションに よるカー・ブラックホールからの アウトフロー

京都大学大学院宇宙物理学教室M1
馬見塚 裕

活動銀河核ジェット (電波銀河: M 87)



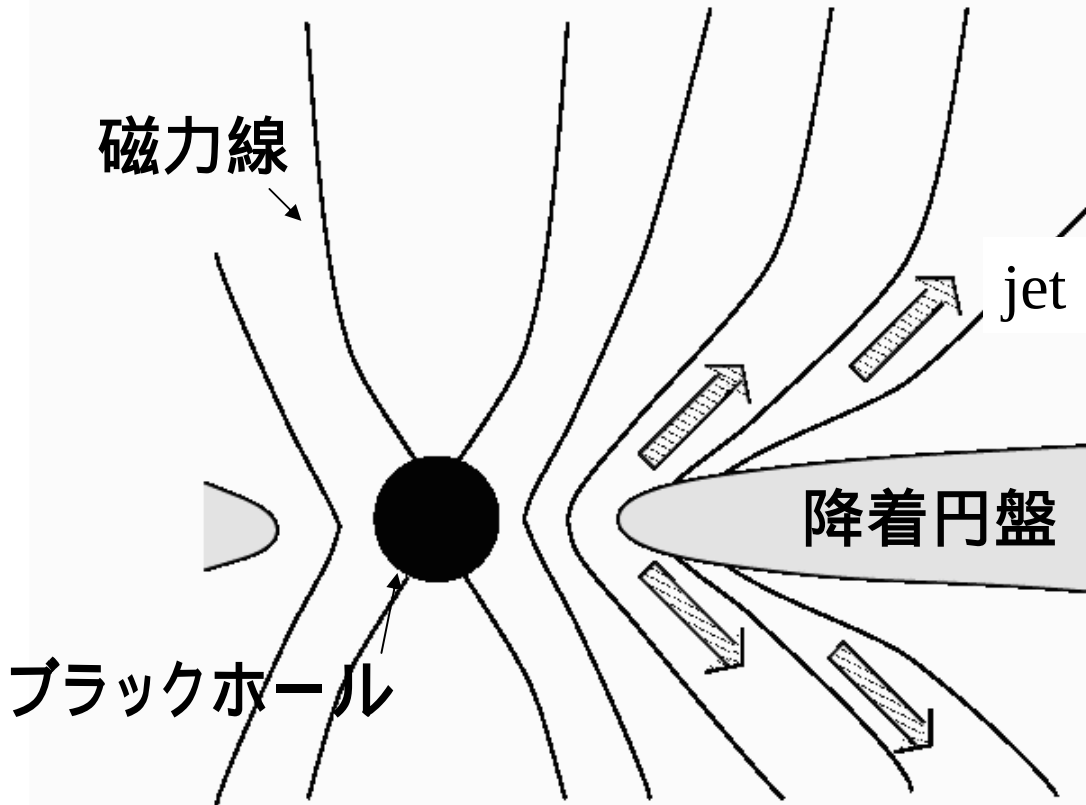
- 最初に発見された宇宙ジェット
(1917)
- 楕円銀河M 87
(電波銀河)の中心核から噴出
- 活動銀河核ジェット
の一種

AGNジェット之谜

- どのようにしてジェットのガスを非常に高速にまで加速・駆動するのか
- 噴出しているジェットの方向を長年にわたって維持するにはどうすればいいのか
- そのようなジェットを細く収束するにはどうすればできるのか

MHD model of astrophysical jets

Accelerate jets by magnetic field and rotation



- 降着円盤と磁力線の相互作用により
ヘリカル磁場生成
- 磁気力(磁気圧、遠心力)で加速
- 磁気張力でジェットを細く絞る(ピンチ)

Blandford-Payne 1982, Lovelace et al 1986,
Pudritz-Norman 1986, Uchida-Shibata 1985, Shu et al. 1994, ...

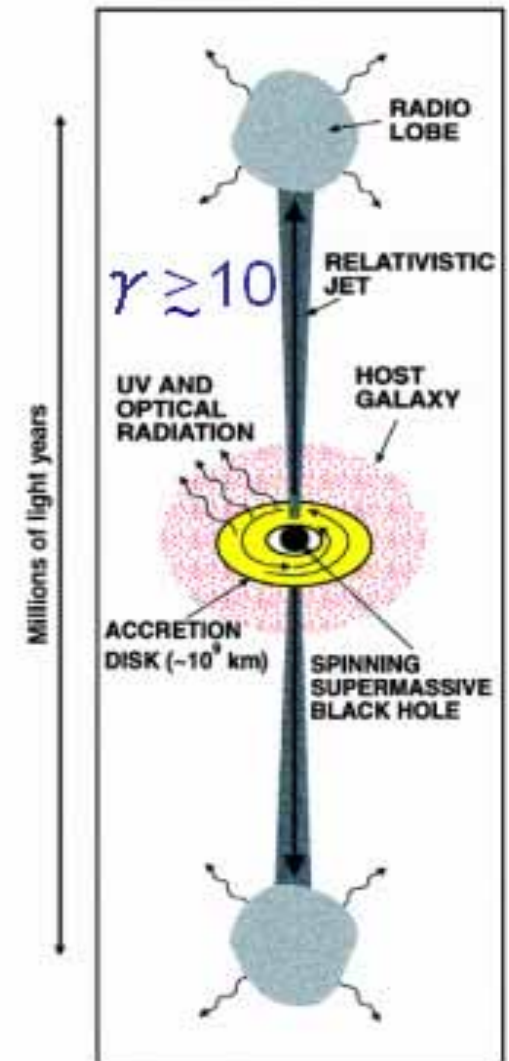
AGNジェットのエネルギー供給源

- 降着円盤の重力エネルギー

(降着ガス全体の) 重力エネルギー

➡ (一部のガスの) 運動エネルギー

➡ ジェット



AGNジェットのエネルギー供給源 (M87銀河核の場合)

高性能赤外スペクトルカメラOSCIR(Observatory Spectrometer and Camera for Infrared)合計7時間にわたりM87の観測。
(波長10.8マイクロメートル) Perlman et al, 2001

(結果) → ブラックホールを取り巻くダストの円盤は見れず、円盤が存在するにしても非常にかすかなもの「ケンタウルスA」や「はくちょうA」などの活動銀河核に比べて、1000分の1程度にすぎない

ダストの円盤が存在しない銀河の中心核でのエネルギー源は？

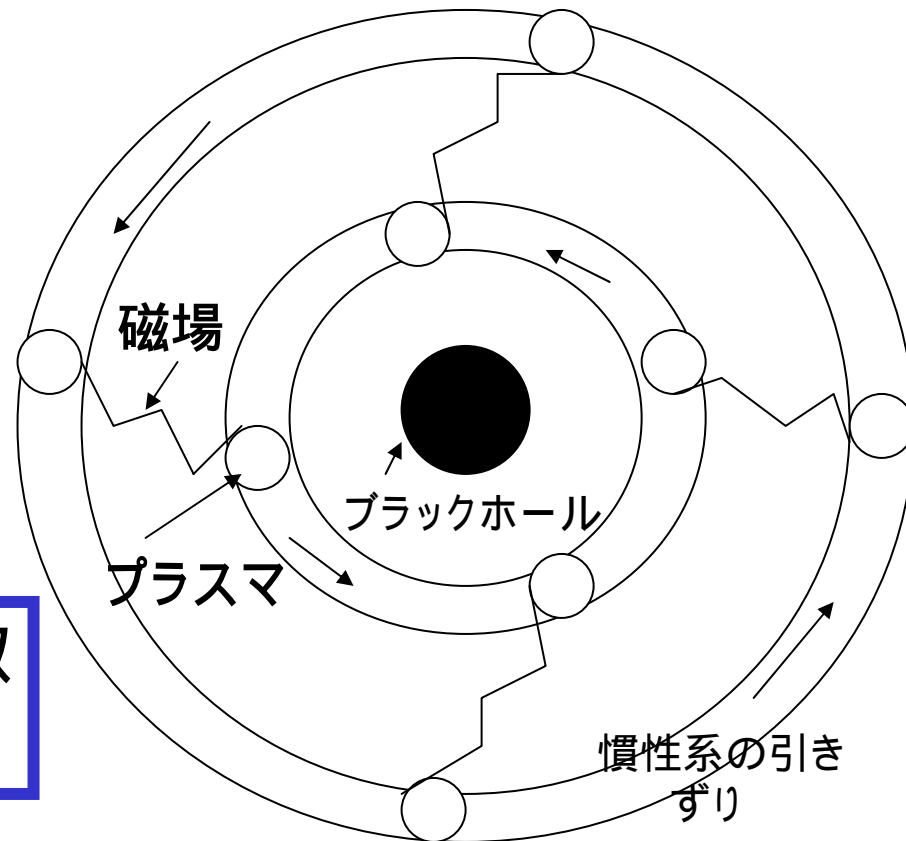


ブラックホールの回転エネルギー

磁場によるブラックホールからのエネルギー引き抜き

回転ブラックホールによる慣性系の引きずりで、速くまわる内側からより遅くまわっている外側へトルクが働き、回転エネルギーが外側に運ばれる

→ 時空の回転エネルギーを取り出す現実的過程の1つ



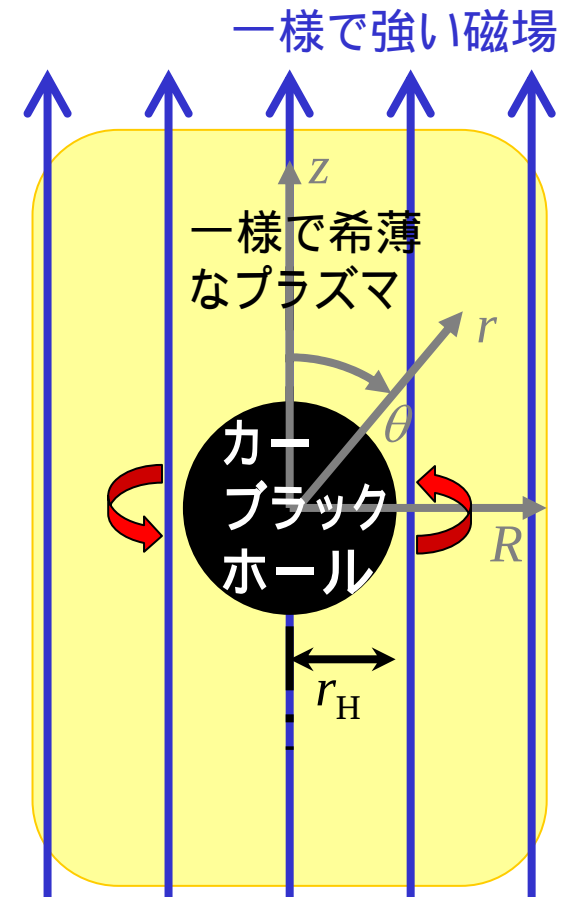
回転軸方向からの図

カーブラックホール, 一様磁場, 降着円盤なし

初期条件:

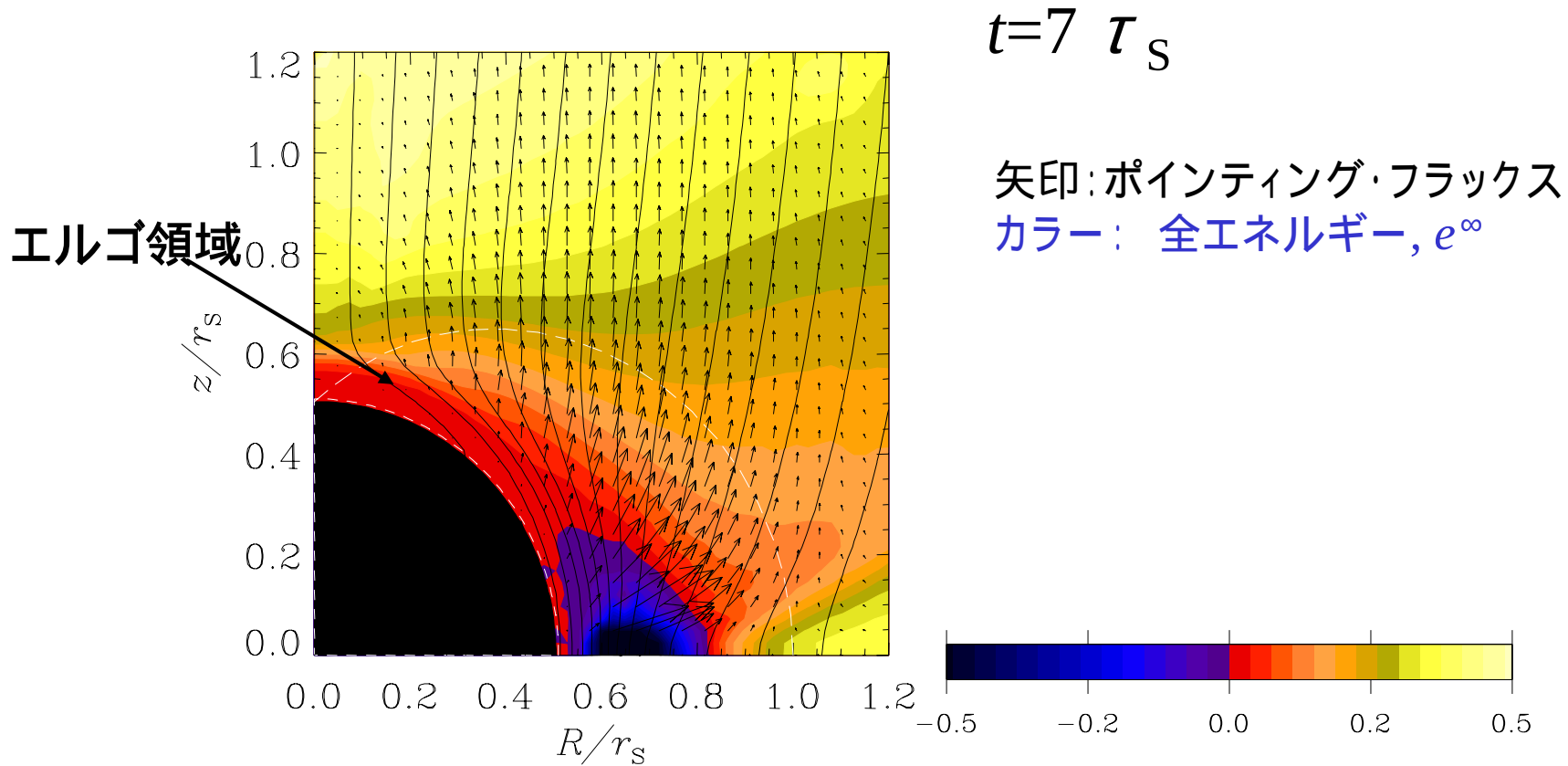
(Koide, Shibata, Kudoh 2002)

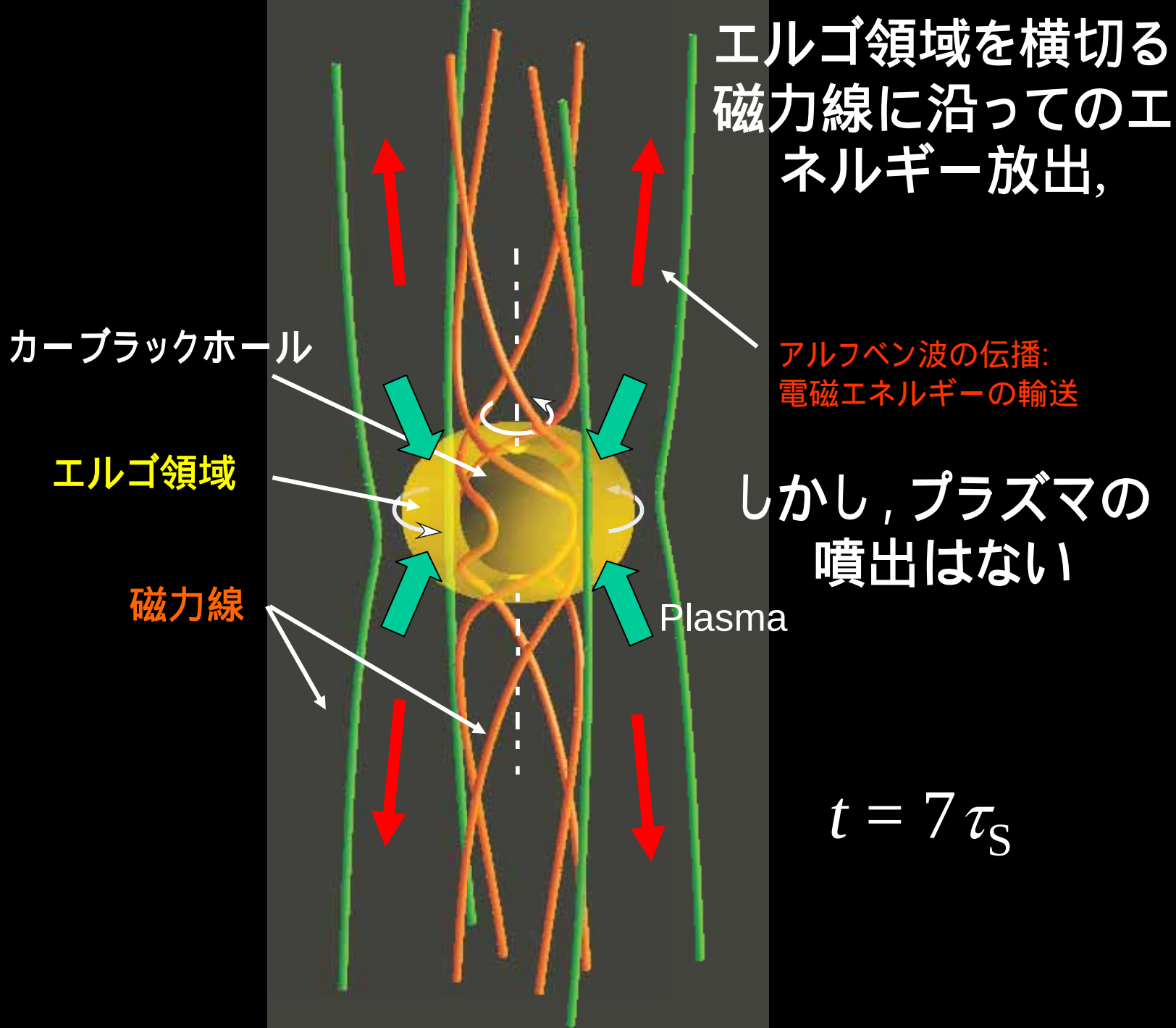
- (1) カーブラックホール:
最大回転パラメータ,
 $a=J/J_{\max}=0.9999$
 - (2) 磁場: カーブラックホールのまわりでの
一様磁場 (Wald 解)
 - (3) プラズマ: ゼロ運動量,
一様, 低密度, 低圧
 $\rho_0=0.1B_0^2/c^2, p_0=0.06\rho_0c^2$
 - (4) 計算領域:
 $1.05 r_H$ r $40 r_H$,
 0.01 θ $\pi/2$
- ・ 軸対象, 赤道面に対して面对称



エネルギーの輸送と 負のエネルギー領域の形成

(Koide, Shibata, Kudoh 2002)





カー・ブラックホール + 一様磁場 (円盤なし)

- ブラックホールの回転による空間の引きずり効果により磁場がねじられそのねじれが磁力線に沿って外側に伝わる(磁気エネルギーのブラックホールからの放射)
- エルゴ領域内に負のエネルギー領域が形成される。
- いずれは負のエネルギーがブラックホールに落下しブラックホールの回転エネルギーが減る。
- しかし、エネルギーは放射されているがプラズマはブラックホールに向かって落下しているのみである。

カーブラックホール, 放射型磁場, 降着円盤なし 初期条件:

(Koide 2004)

- ブラックホール: $a \equiv \frac{J}{J_{\max}} = 0.99995$ (ほとんど最速回転)

- 磁場: 放射型磁場

$$B_r = B_0 \frac{[r^2 + (ar_g)^2][r^2 - (ar_g)^2 \cos^2 \theta]}{\Sigma^2 \sqrt{A}}, \quad B_\theta = B_0 \frac{2r(ar_g)^2 \sin \theta \cos \theta \sqrt{\Delta}}{\Sigma^2 \sqrt{A}}$$

$$B_0 = B(R=r_s, z=0)$$

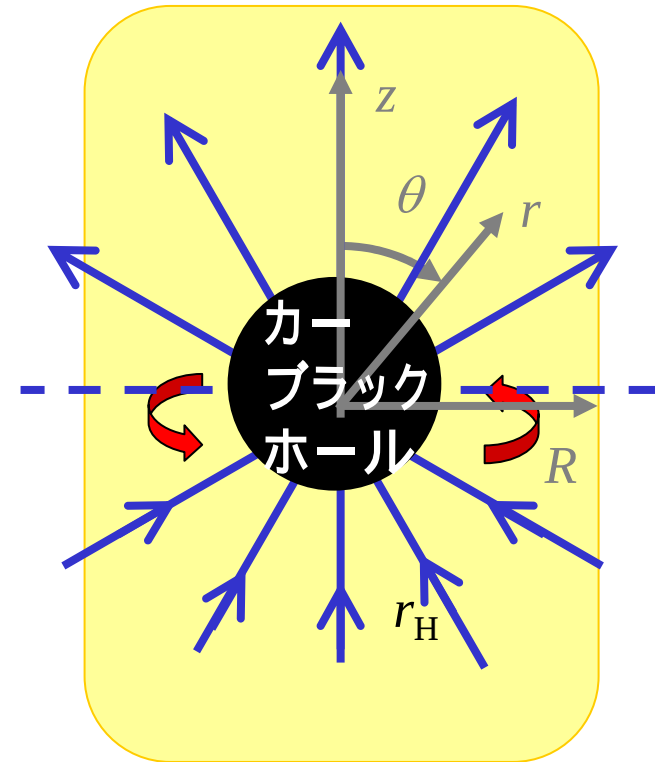
- プラズマ: $\rho = \rho_0 (-3 \log \alpha)^{-5}$, $p = \rho_0 c^2 \frac{(-3 \log \alpha)^{-6}}{18}$, $\hat{\mathbf{v}} = 0$
 $\rho_0 = 0.018 B_0^2 / c^2$,

(地平面付近ではプラズマ落下条件,
ブラックホール遠方では流体力学的な平衡条件)

カーブラックホール, 放射型磁場, 降着円盤なし 初期条件:

(Koide 2004)

- 計算領域:
 $1.01 r_H \leq r \leq 40 r_H,$
 $0.01 \leq \theta \leq \pi/2$
 $r_H = 0.505 r_s$ (the radius of the
black hole boundary)



$$t = 10.7 \tau_S$$

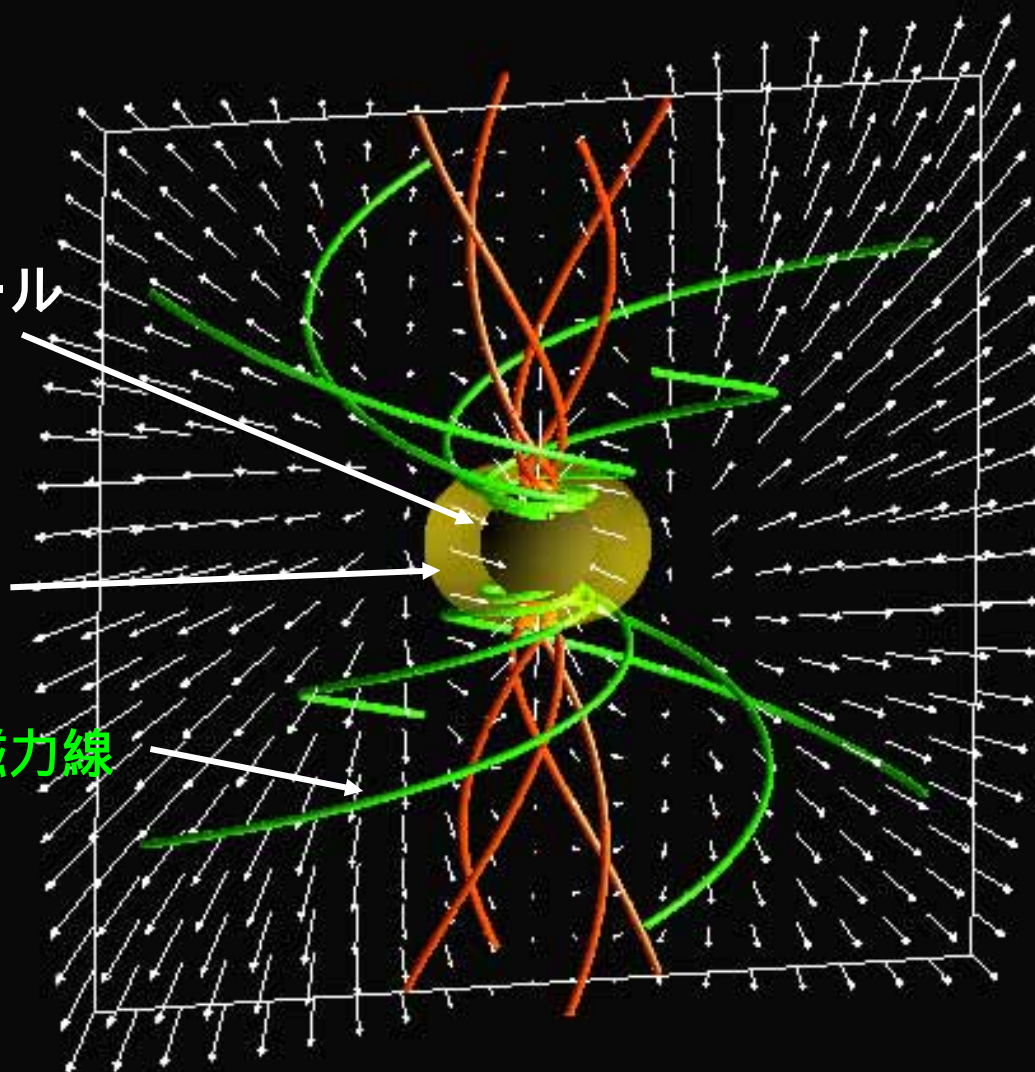
カーブラックホール

エルゴ領域

磁力線

プラズマ

Arrows: Velocity
of plasma

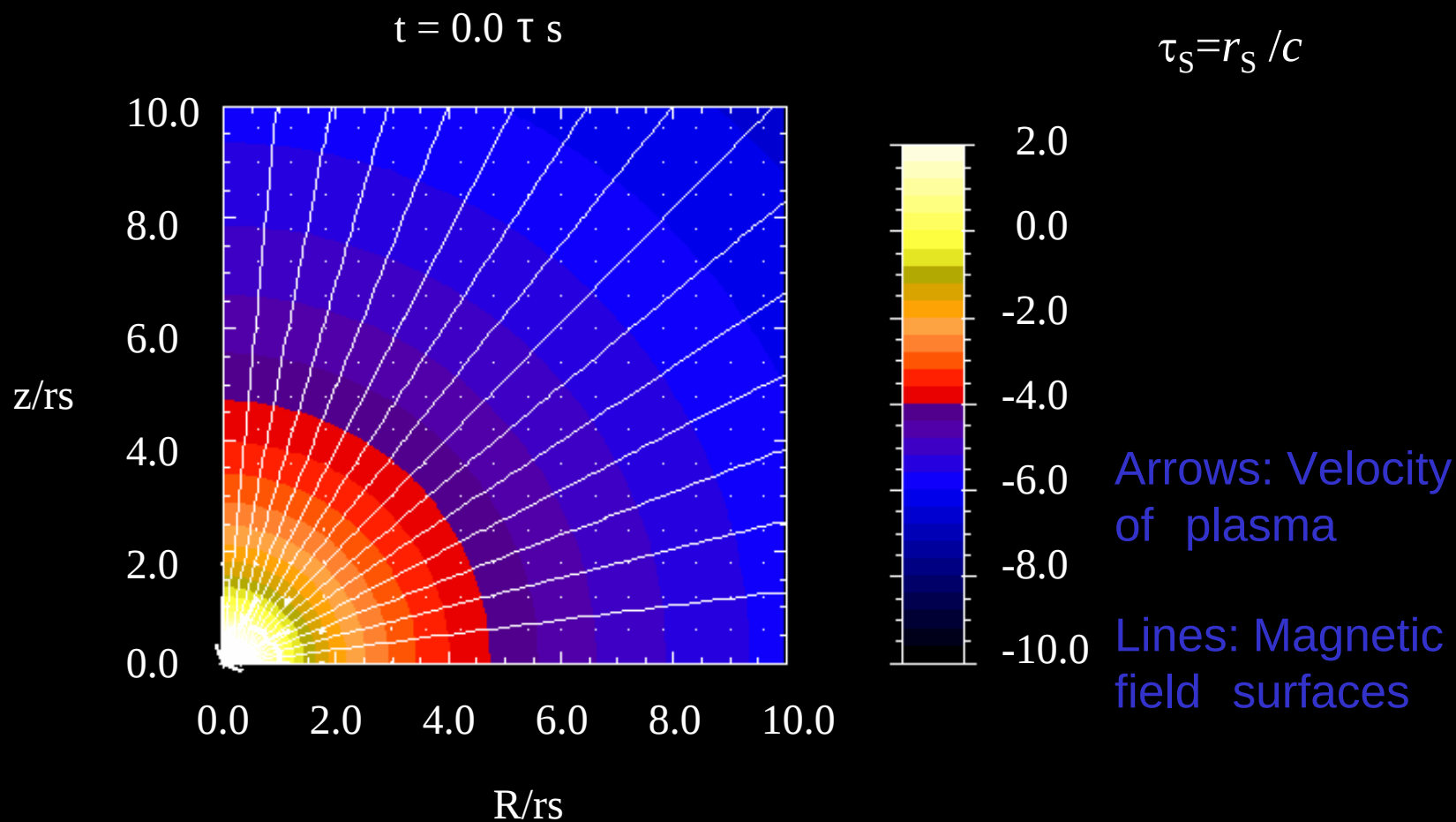


カー・ブラックホール + 放射型磁場 (円盤なし)

- ブラックホールの回転による空間の引きずり効果により磁場がねじられその磁気圧や磁気張力によりアウトフローが形成される。
- その最高速度は光速の85% (ローレンツ因子2以上) を越え相対論的流れとなっている。
- しかし、そのアウトフローは放射状に開いていて、ジェットとはなっていない。

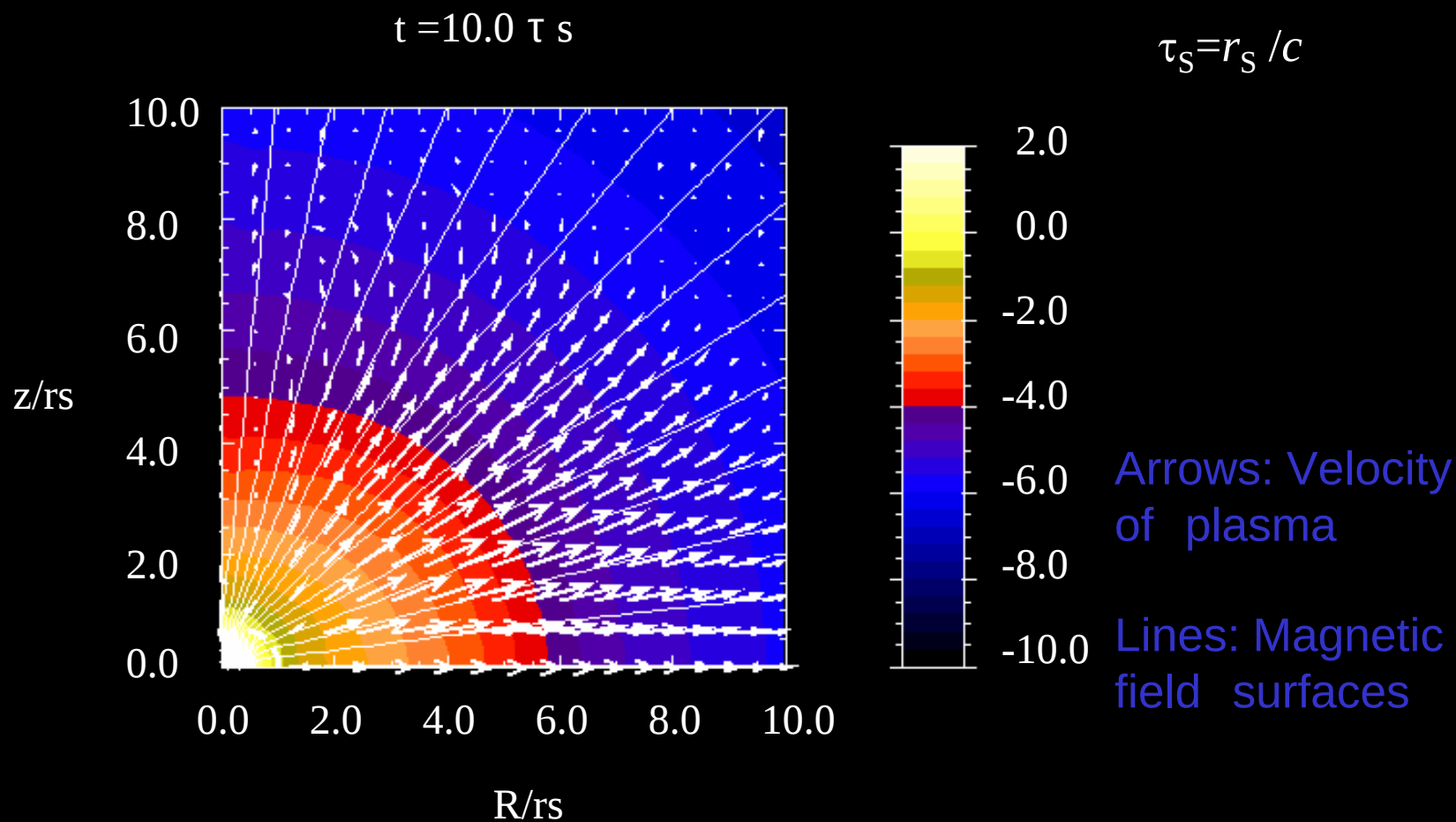
密度

$\log_{10}(\rho)$

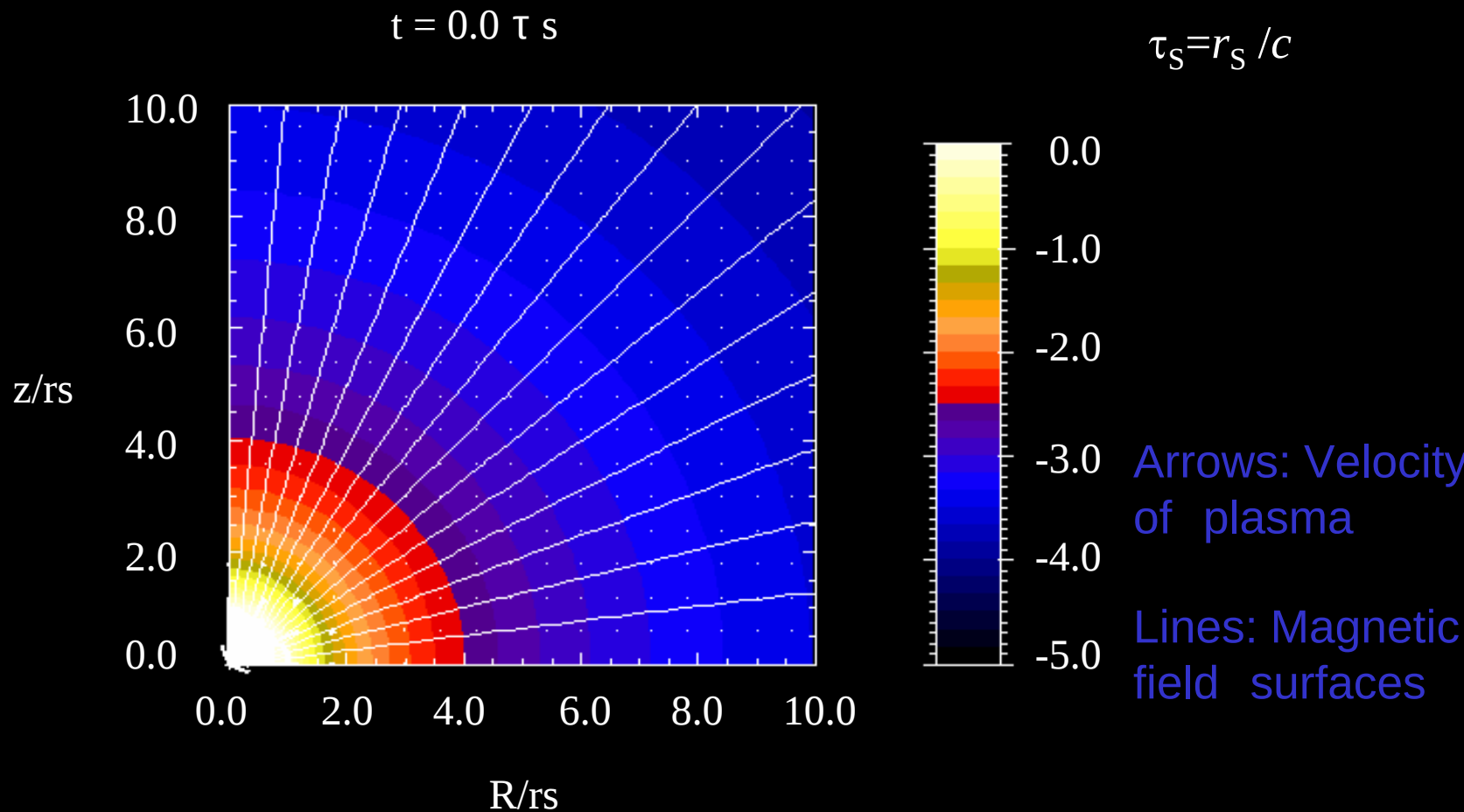


密度

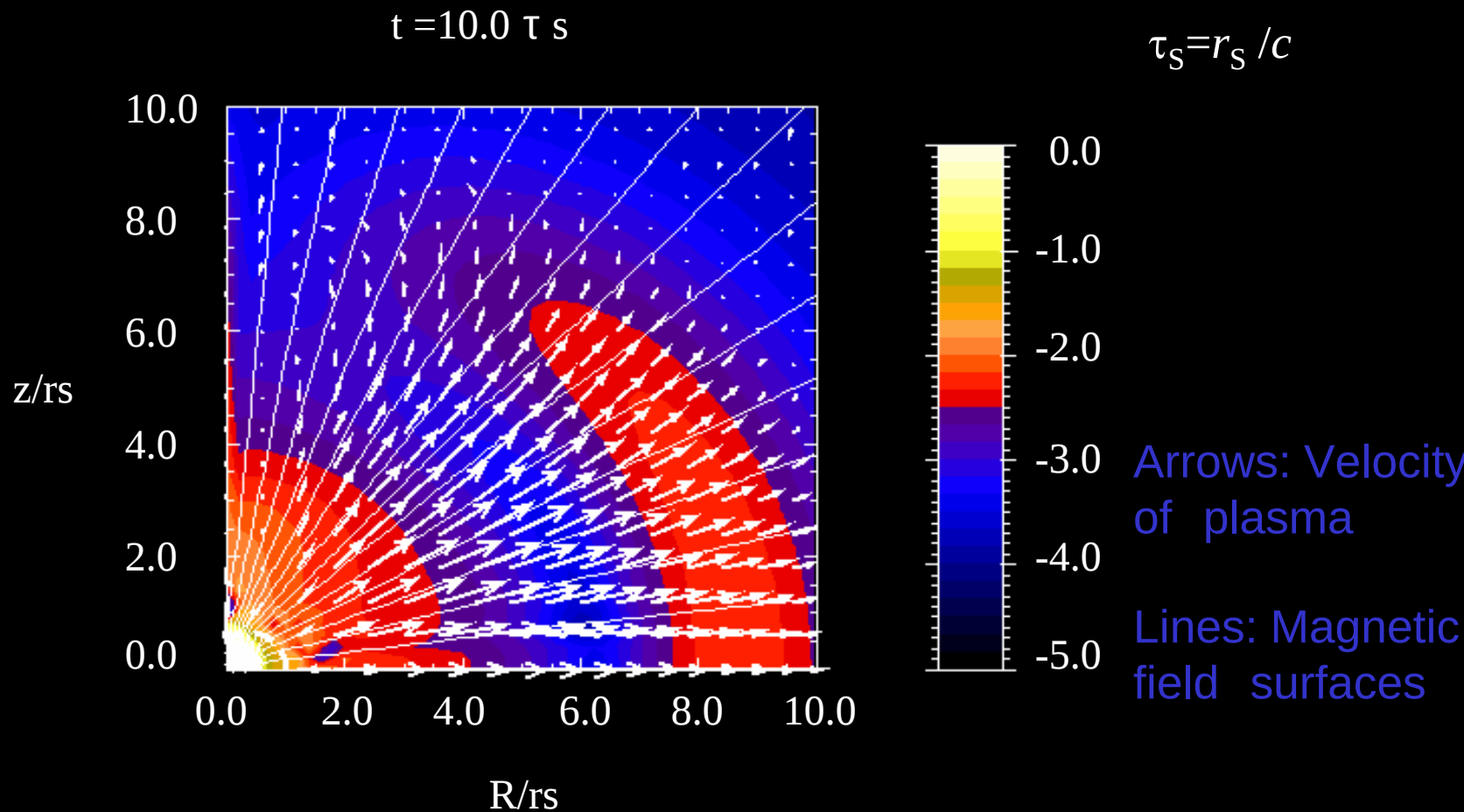
$\log_{10} (\rho)$



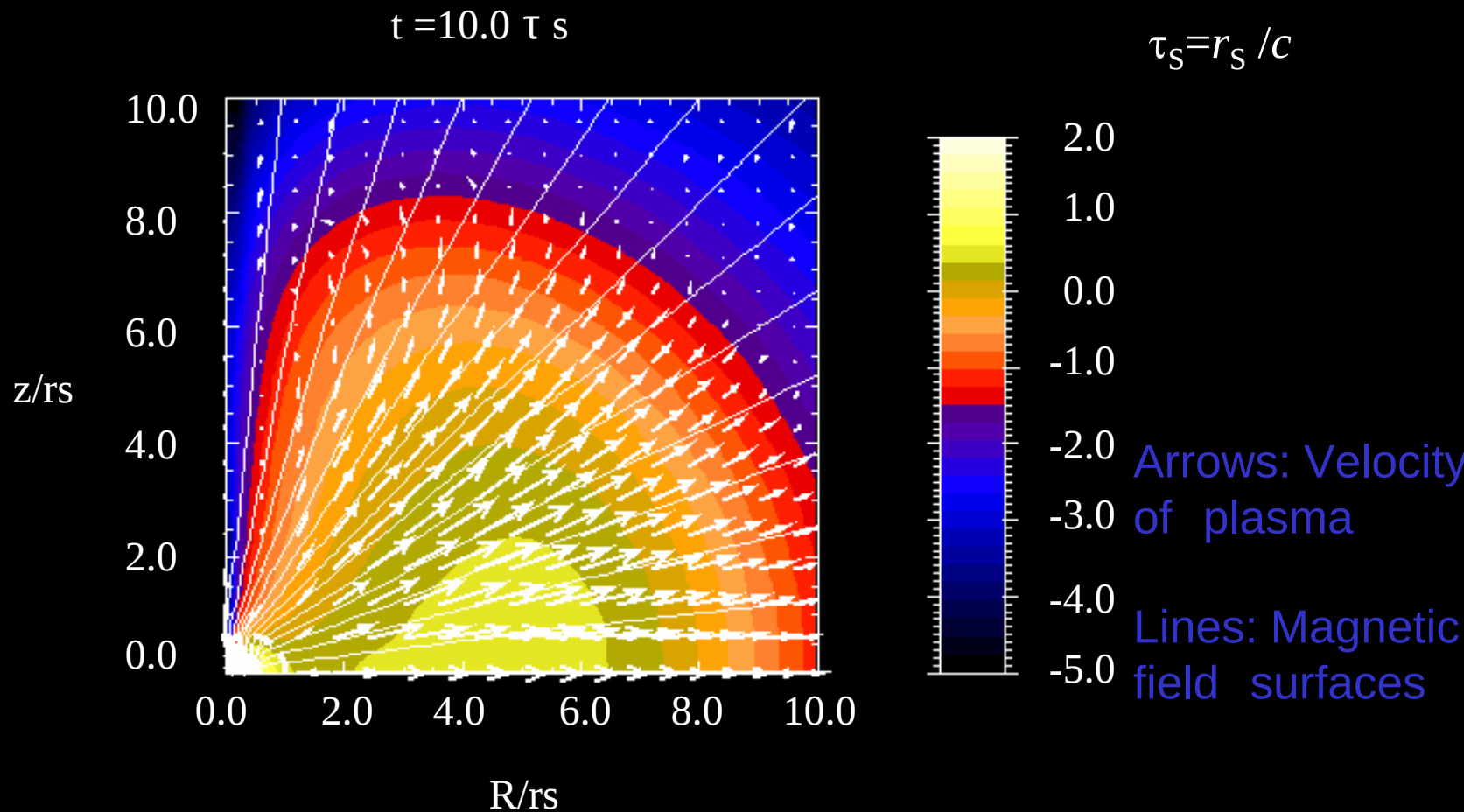
プラズマ β $\log_{10}(P_{\text{gas}} / P_{\text{mag}})$



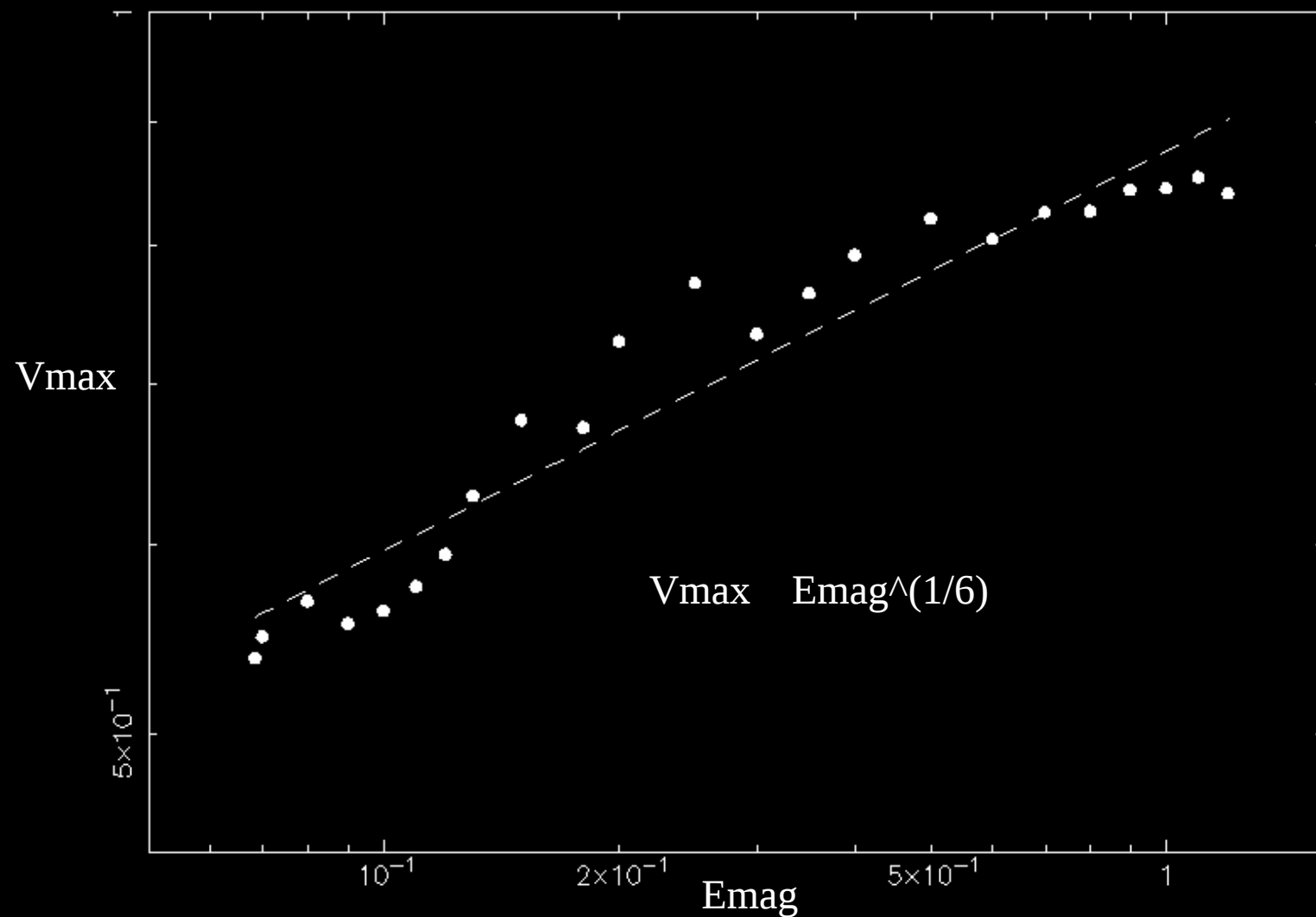
プラズマ β $\log_{10}(P_{\text{gas}}/P_{\text{mag}})$



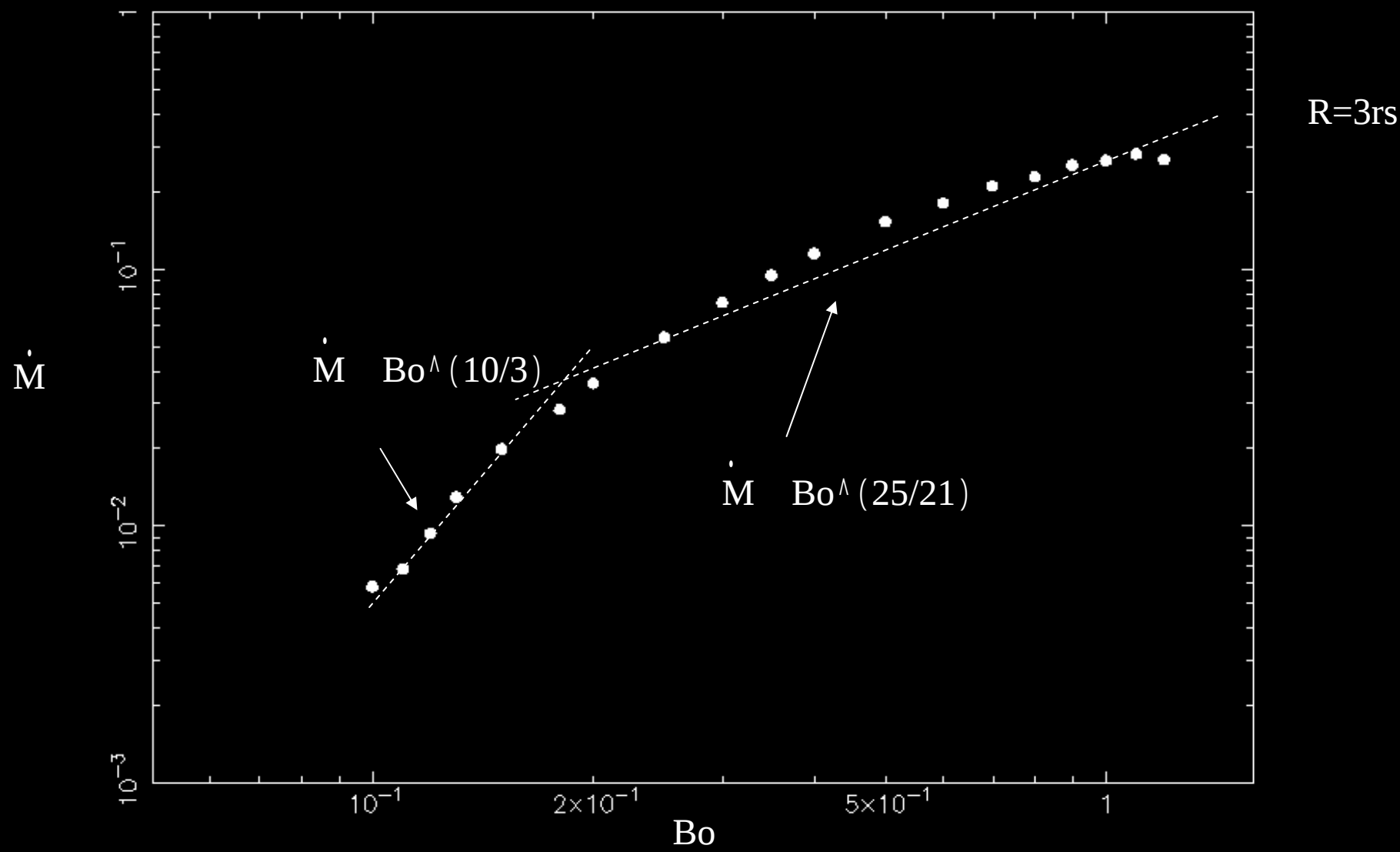
$$\log_{10}(B_t / B_p)^2$$



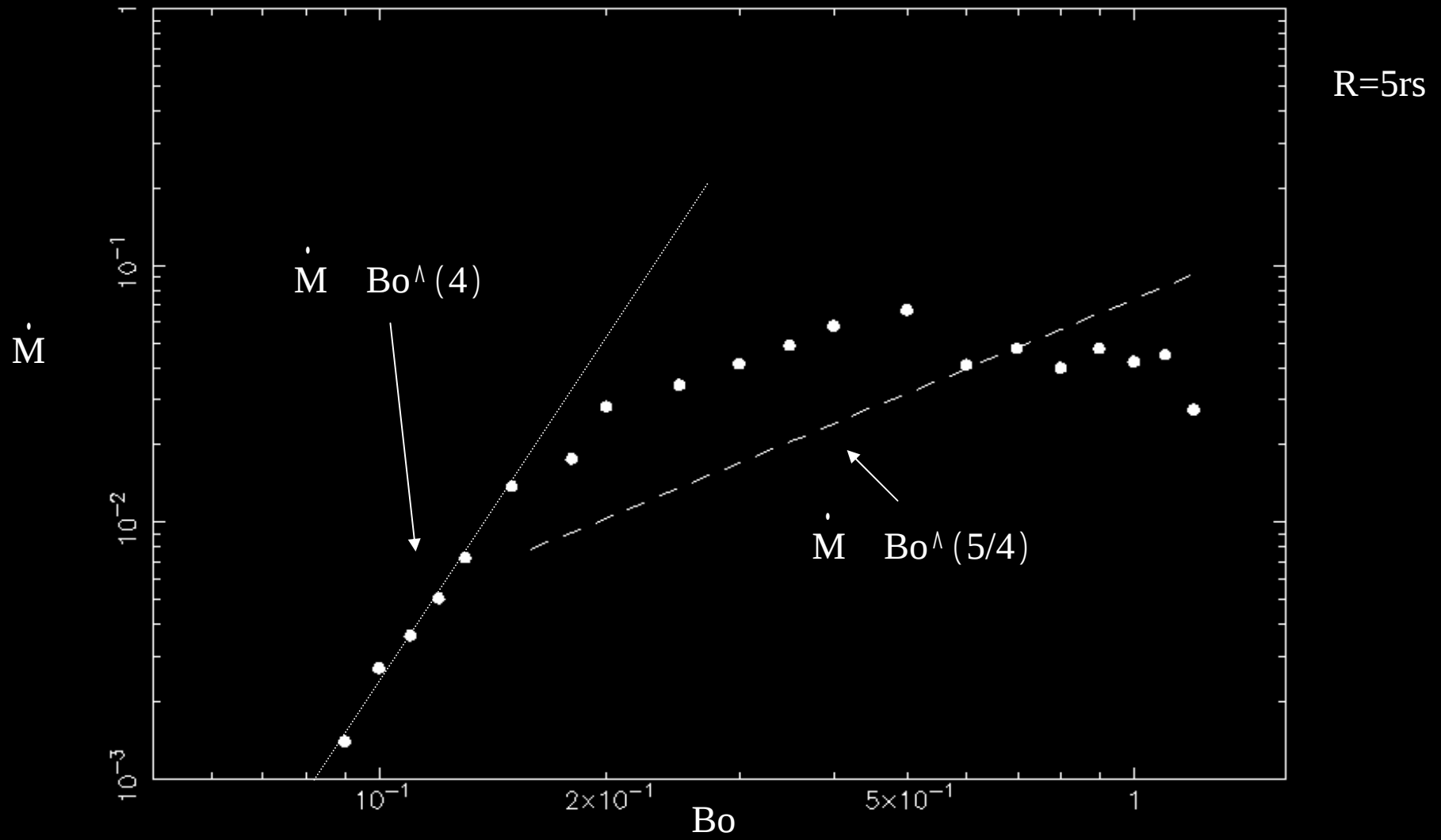
アウトフローの最大速度と磁場強度



質量放出率と磁場



質量放出率と磁場



まとめと今後の展望

- 放射型磁場の場合、負のエネルギー領域がエルゴ領域内に形成され、またコリメーションされアウトフローからジェットになるかどうか調べる
- 質量放出率の時間発展を調べる
- ブラックホールから遠方の様子を見る