GRMHDジェットの物質密度分布

荻原大樹(東北大学D3)

小川拓未(筑波大学)

當真賢二(東北大学)

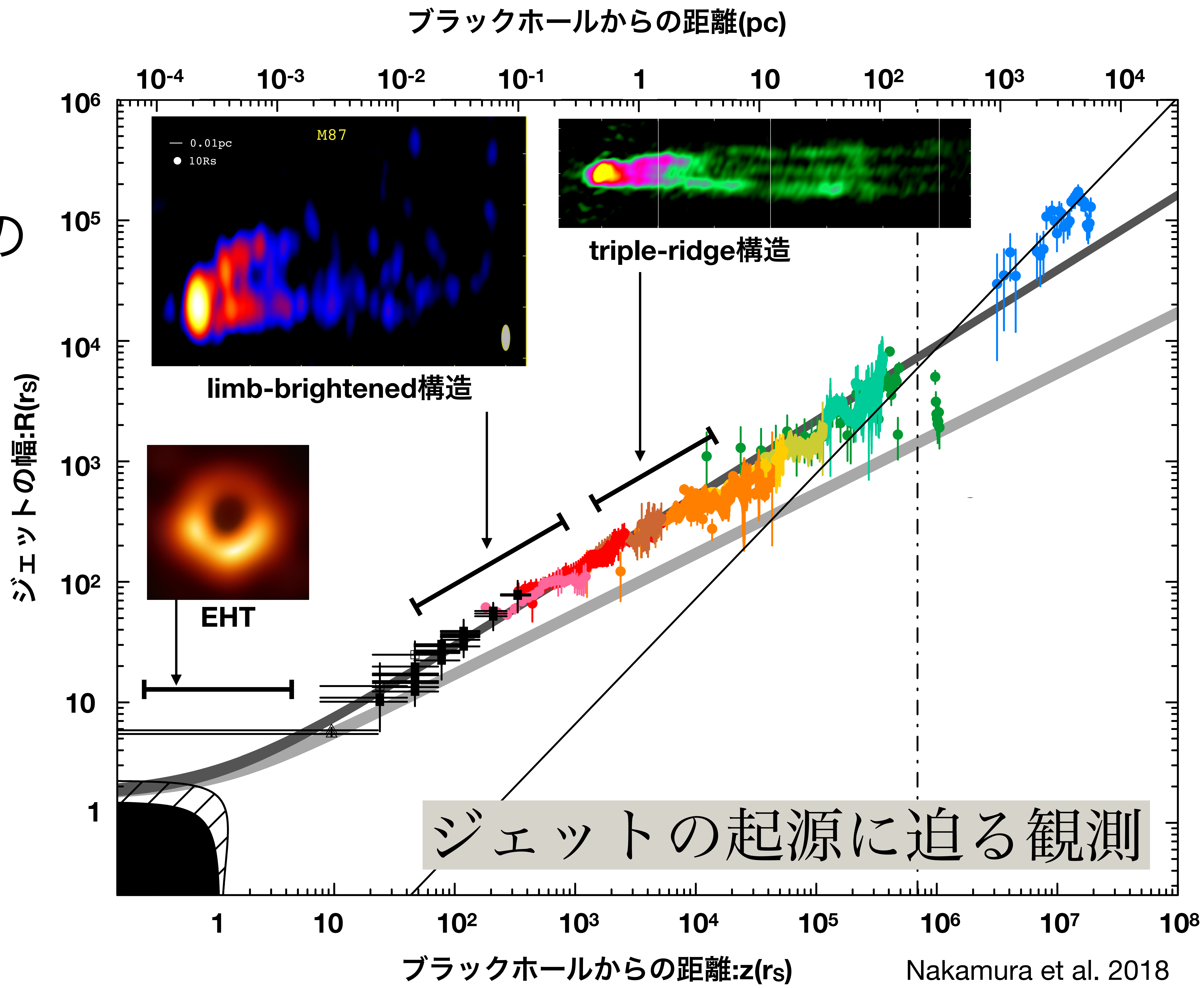
高エネルギー宇宙物理学研究会2020 2020年12月14日 online

contents

- モチベーション: BH近傍の放射イメージを理論的に予測したい。
- 一般相対論的理想MHD定常軸対称モデル
- Results
- Model Limitations
- Summary

Radio observations of AGN jets

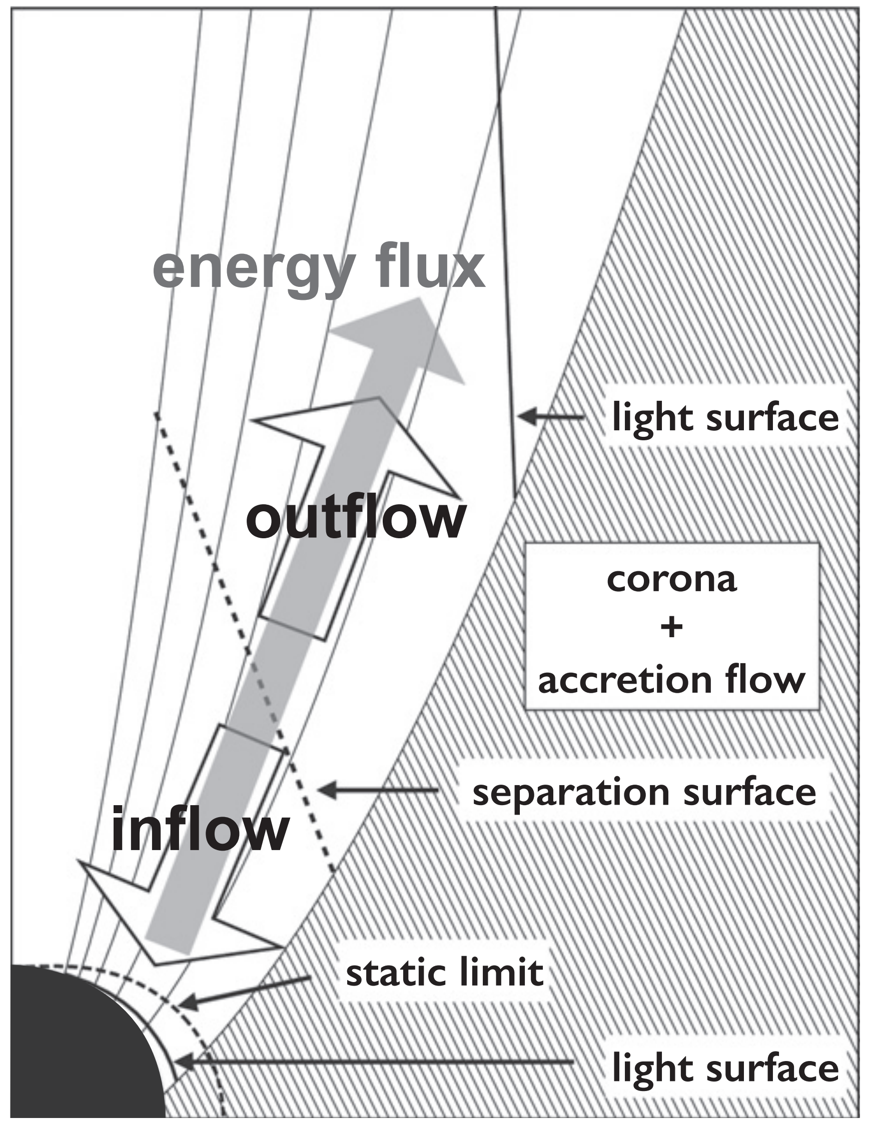
- 高解像VLBI観測によりAGNジェットの放射構造が明らかに
- limb-brightened: M87, Mrk 501, Mrk 421, Cyg A, 3C84
- triple-ridge: only in high-sensitivity observation of M87



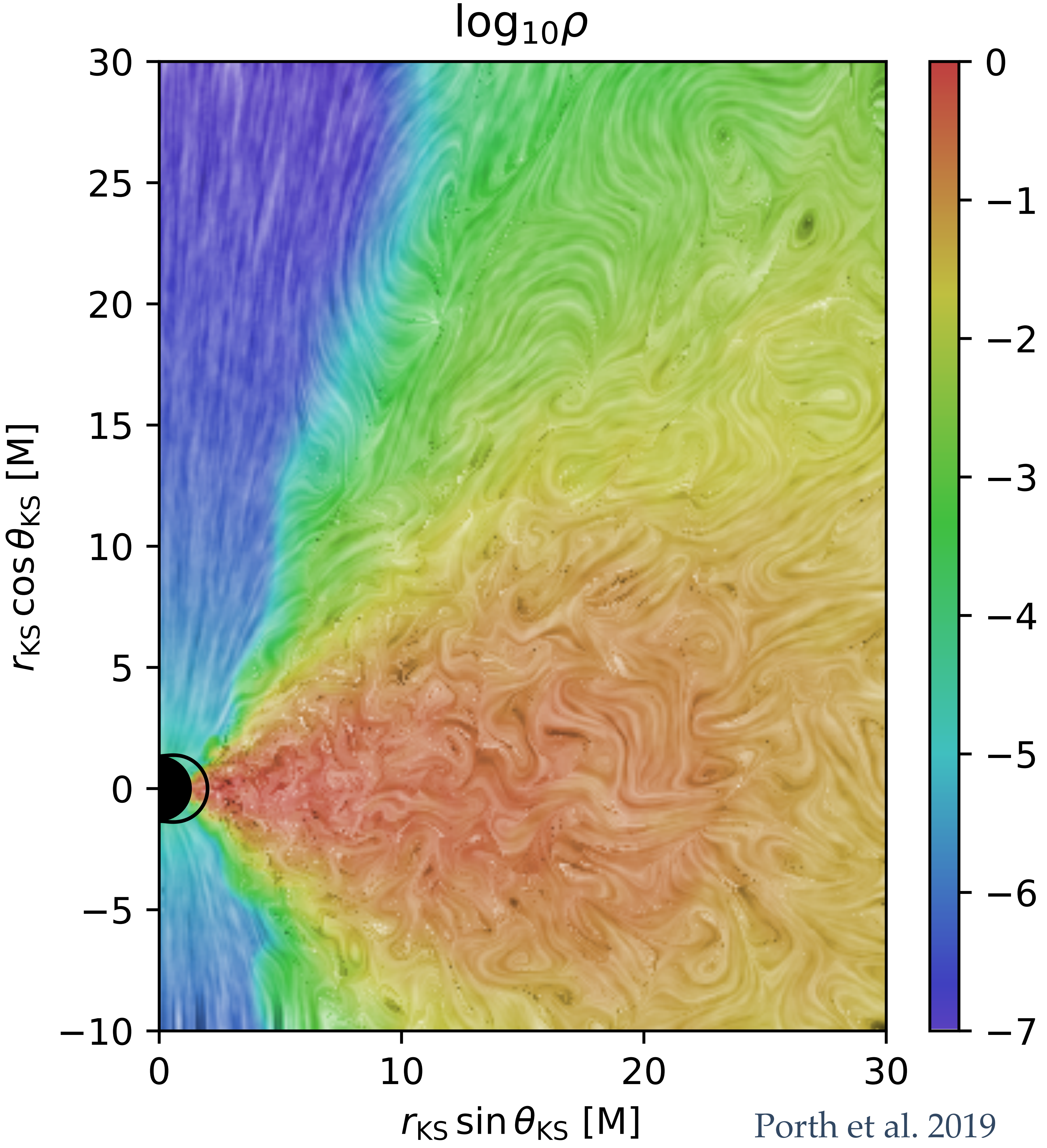
Nakamura et al. 2018

density-floor of GRMHD simulations

- プラズマ粒子は強くそろった磁場によりジェット内部に拡散できない
- GRMHDシミュレーションでは重力と遠心力の釣り合いで淀み点が自然に発生 (separation surface)
- ジェット領域=超低密度
  → floor valueの導入
  例: $\rho_{0;min} = 10^{-4} r^{-3/2}$, $u_{\min} = 10^{-6} r^{-5/2}$
  (McKinney & Gammie 2004)



Pu et al. 2015



Porth et al. 2019

mass-loading problem

- 何らかの物質注入機構が必要

  = “mass-loading problem”

  - pair-creation in jet?
    (Levinson & Rieger 2011, Kimura & Toma 2020)

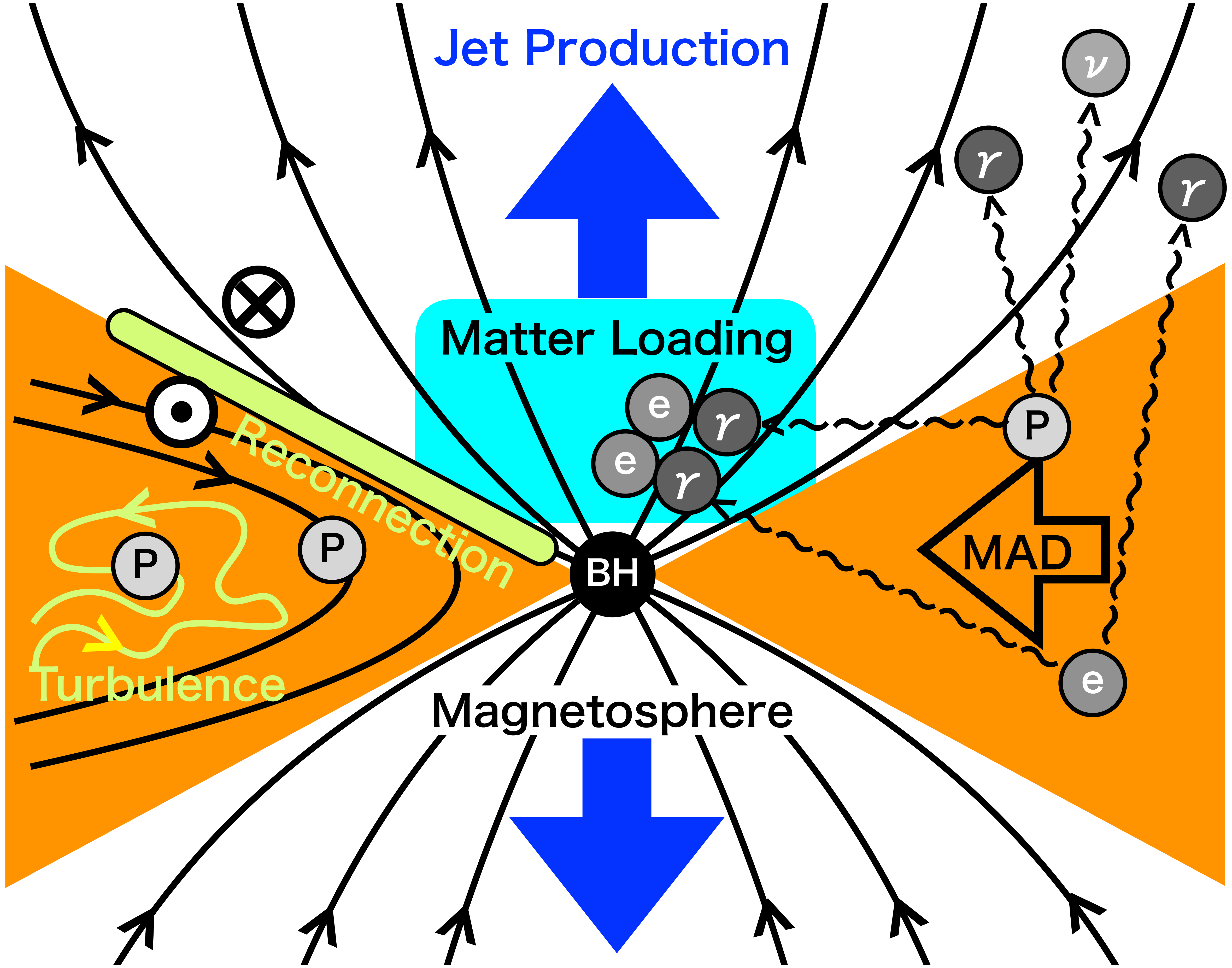
  - pair cascade?
    (Broderick & Tchekhovskoy 2015,
    Kisaka+2020)

  - reconnection at jet edge?
    (Parfrey+15, Nathanail+20)

  - decay of relativistic non-charged particles?
    (Toma & Takahara 2012)

- ジェット内部の密度分布が正確でない

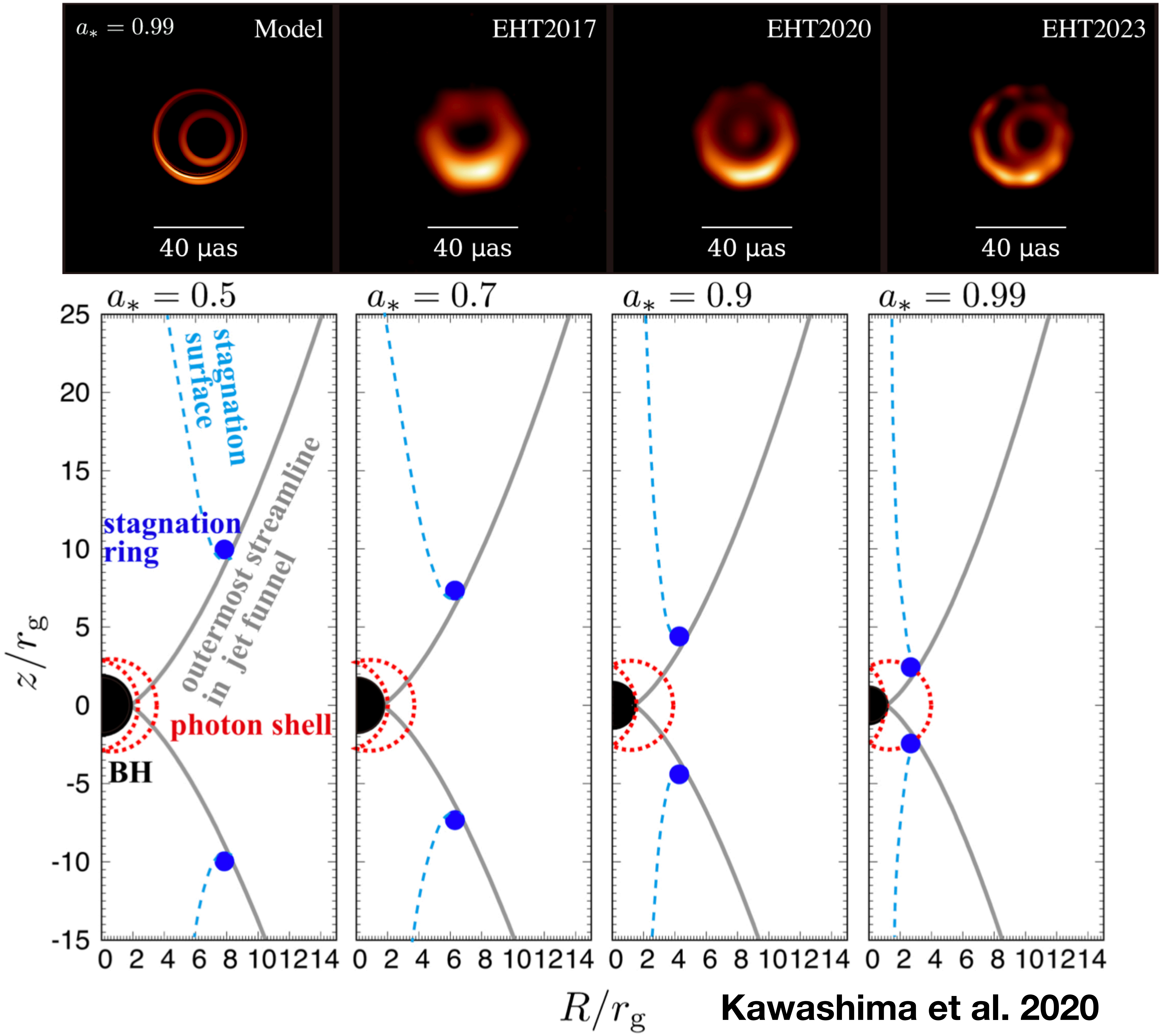
  → 放射計算に直接影響



Kimura & Toma 2020

emission from jet origin

- Kawashima et al. 2020
  - separation surface上の物質からの放射を輻射輸送計算
  - 2017年観測のリング構造を再現可能
  - photon ring に加えて特徴的なリング構造ができることを示した
- ジェットからの放射が将来のEHT観測で検出される可能性



Kawashima et al. 2020

電波ジェットの起源に迫る観測。

BH近傍の放射イメージを理論的に予測したい。

2. GRMHD定常軸対称モデル

density-floor問題と無縁の解析的モデルを構築

基礎方程式

- 基礎方程式

Maxwell 方程式: $\nabla_\nu F^{\mu\nu} = J^\mu, \ \ \nabla_\nu * F^{\mu\nu} = 0$

エネルギー・運動量の式: $\nabla_\nu T^{\mu\nu} = 0,$

$$T^{\mu\nu} = \rho u^\mu u^\nu + \frac{1}{4\pi}\left(F^{\mu\lambda}F^\nu_\lambda - \frac{1}{4}g^{\mu\nu}F^{\lambda\sigma}F_{\lambda\sigma}\right)$$

連続の式: $(nu^\mu)_{;\mu} = 0$

理想MHD条件: $u^\nu F_{\mu\nu} = 0$

- 座標系: Boyer-Lindquist (Kerr時空)
- 定常軸対称
- 運動方程式を Bernoulli 方程式 (磁力線に沿った方向)と GS 方程式 (磁力線に垂直方向)に分解

磁力線に沿った保存量

Bernoulli parameters

- 単位質量あたりエネルギー流束: $\hat{E} = -u_0 + \dfrac{\Omega_F B_3}{4\pi\mu\eta}$

- 単位質量あたり角運動量流束: $\hat{L} = u_3 + \dfrac{B_3}{4\pi\mu\eta}$

- 単位磁束あたり質量流束: $\eta = -\dfrac{nu_1}{B_1}G_t = -\dfrac{nu_2}{B_2}G_t$

- 磁力線の"角速度": $\Omega_\mathrm{F} = \dfrac{F_{01}}{F_{13}} = \dfrac{F_{02}}{F_{23}}$

μ: **質量** $G_t = g_{00} + \Omega_F g_{03}$

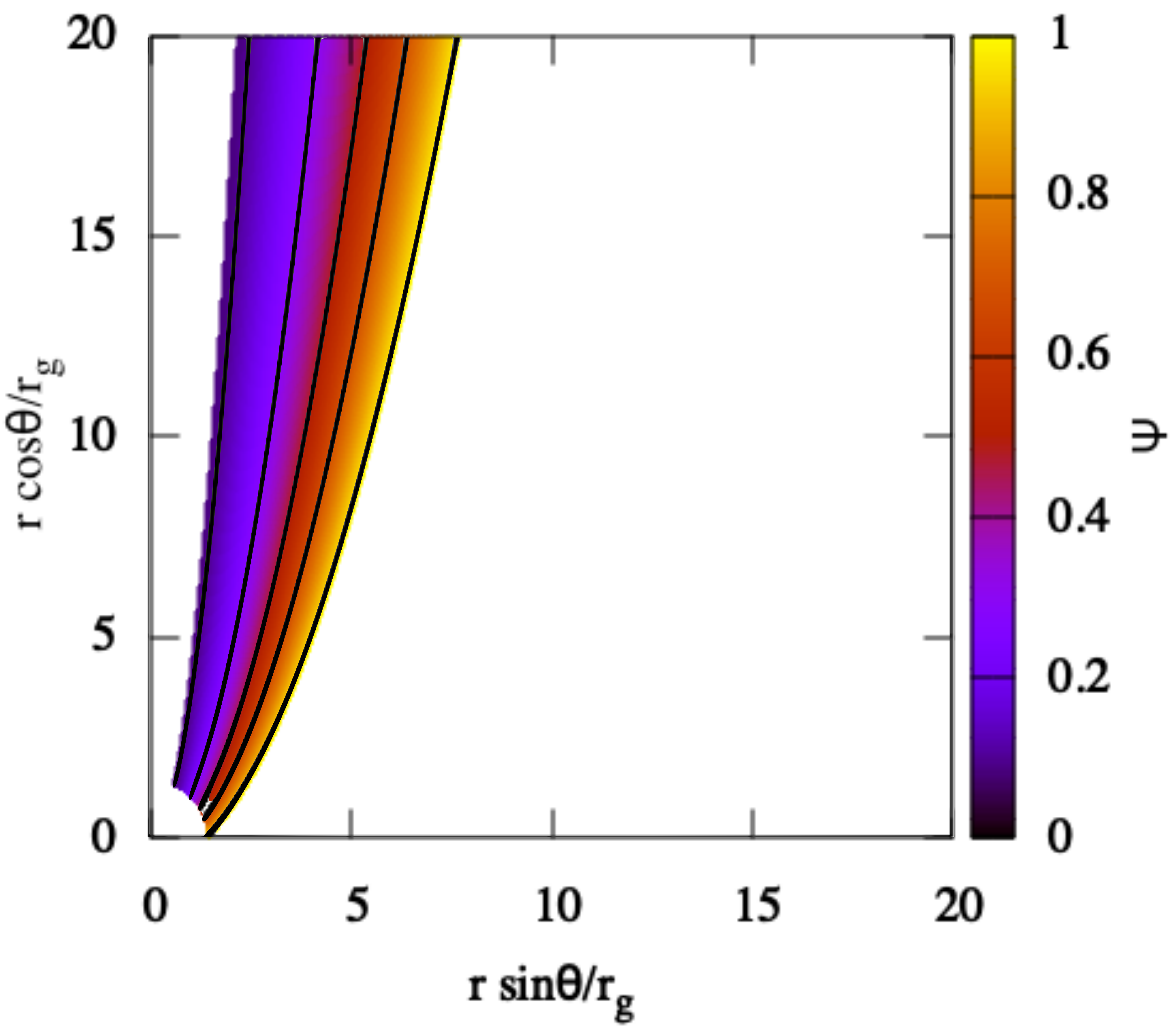
磁力線形状

- GRMHDシミュレーション結果と整合的な磁束関数

$$\Psi(r,\theta) = C[(r/r_H)^{\nu}(1-\cos\theta) + (1/4)\epsilon r \sin\theta]$$

Lee & Park 2004, Beskin & Nokhrina 2006,
Tchekhovskoy+2008, Pu+2015

- $\nu = 1$: parabolic field shape
  force-free solution
- $\epsilon = 10^{-4}$: MHD deviation
- C: constant. $\Psi(r_{\rm H}, \pi/2) = 1$



磁力線形状

- GRMHDシミュレーション結果と整合的な磁束関数

$$\Psi(r,\theta) = C[(r/r_H)^\nu(1-\cos\theta) + (1/4)\epsilon r\sin\theta]$$

Lee & Park 2004, Beskin & Nokhrina 2006, Tchekhovskoy+2008, Pu+2015

  - $\nu = 1$: parabolic field shape force-free solution
  - $\epsilon = 10^{-4}$: MHD deviation
  - C: constant. $\Psi(r_{\rm H}, \pi/2) = 1$

- 磁場:

$$B^1 = \frac{B_1}{g_{11}} = -\frac{G_t}{\sqrt{-g}}F_{23} = -\frac{G_t}{\sqrt{-g}}\partial_2\Psi$$

$$B^2 = \frac{B_2}{g_{22}} = -\frac{G_t}{\sqrt{-g}}F_{13} = -\frac{G_t}{\sqrt{-g}}\partial_1\Psi$$

$$B_p^2 = B^1B_1 + B^2B_2$$

$G_t = g_{00} + \Omega_F g_{03}$

- 電場:

$$E_1 = F_{01} = \Omega_F F_{13} = \Omega_F\partial_1\Psi$$
$$E_2 = F_{02} = \Omega_F F_{23} = \Omega_F\partial_2\Psi$$
$$E_3 = 0$$

磁力線に沿った方向の解析解

- Bernoulli 方程式からpoloidal velocityの4次式を導出

$$\sum_{i=1}^{4} A_i u_p^i = 0,$$

- 密度： $n = -\frac{\eta B_p}{u_p G_t}$

- トロイダル磁場: $B_3 = -4\pi\mu\eta \frac{G_\phi \hat{E} + G_t \hat{L}}{M^2 - k_0}$

$$M^2 = 4\pi\mu n \frac{u_p^2}{B_p^2} G_t^2$$

磁力線に垂直方向の力の釣り合い

- 運動方程式の磁力線に垂直な成分。理想MHDで電場は磁場に垂直

$$e_{(\mathrm{n})\mathrm{A}}\left[\rho u^{\nu} u^{A}_{;\nu} - F^{A\nu} I_{\nu}\right] = 0 \quad (A = 1,2)$$

$$e_{(\mathrm{n})1} = \frac{E_1}{\sqrt{E^A E_\mathrm{A}}} = -\frac{g_{22} G_\mathrm{t}}{\sqrt{-g} B_\mathrm{p}} F_{13}$$

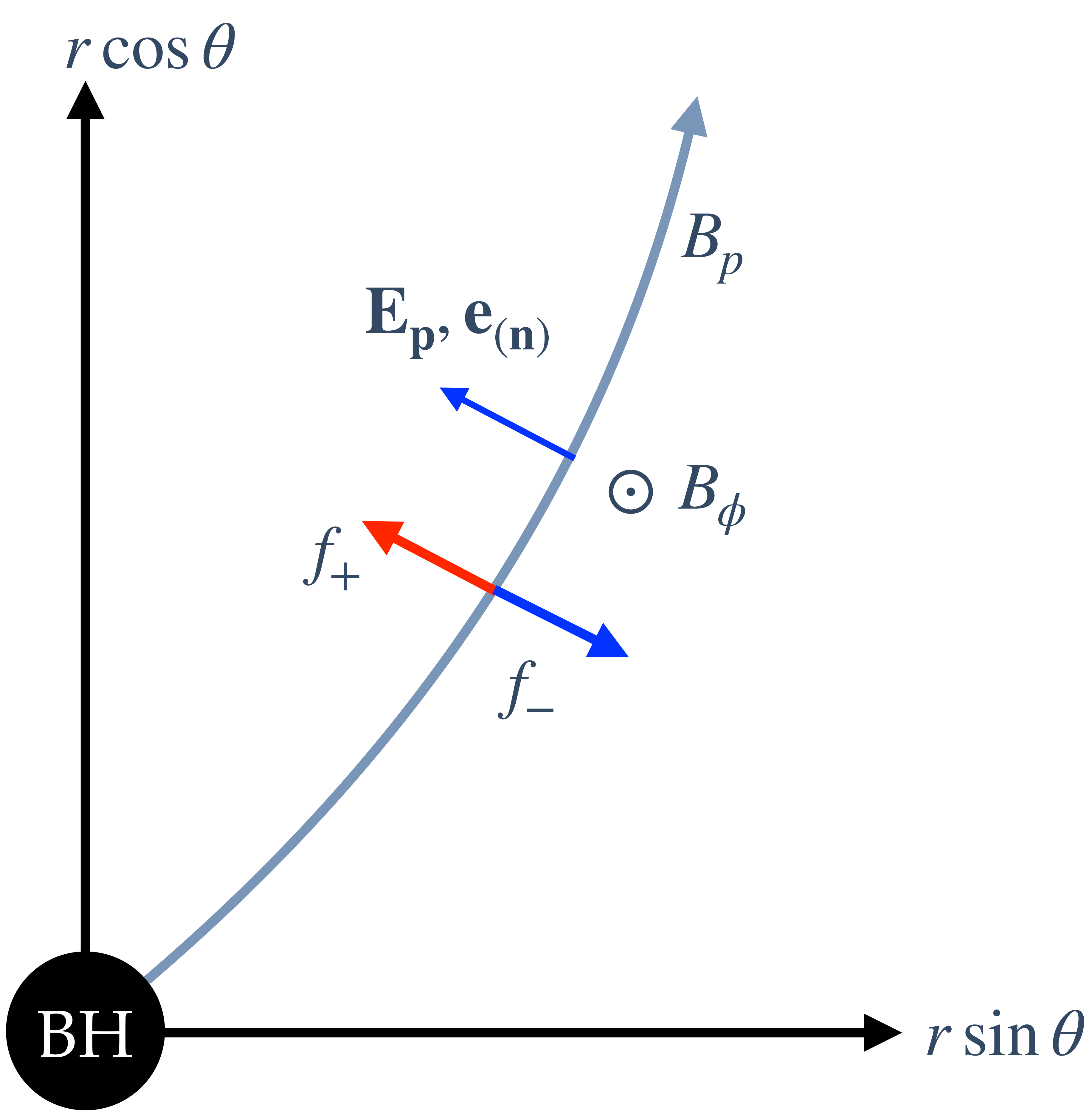
$$e_{(\mathrm{n})2} = \frac{E_2}{\sqrt{E^A E_\mathrm{A}}} = -\frac{g_{11} G_\mathrm{t}}{\sqrt{-g} B_\mathrm{p}} F_{23}$$

- 磁場構造 Ψ を固定してパラメーター Ω_F を求めるために使う
- 正の項を f_+, 負の項を f_- に選り分け、釣り合い度合いを示す指標

$$\chi = \left| \frac{f_+ - |f_-|}{f_+ + |f_-|} \right|$$

を導入　　**解の精度の定量評価=オリジナル**

- 完璧な釣り合いが取れた場合 $\chi = 0$
- 釣り合いが取れず力の向きがどちらかに偏った場合 $\chi = 1$ が最大値
- χ が閾値(10^{-6})以下になるような値を探す



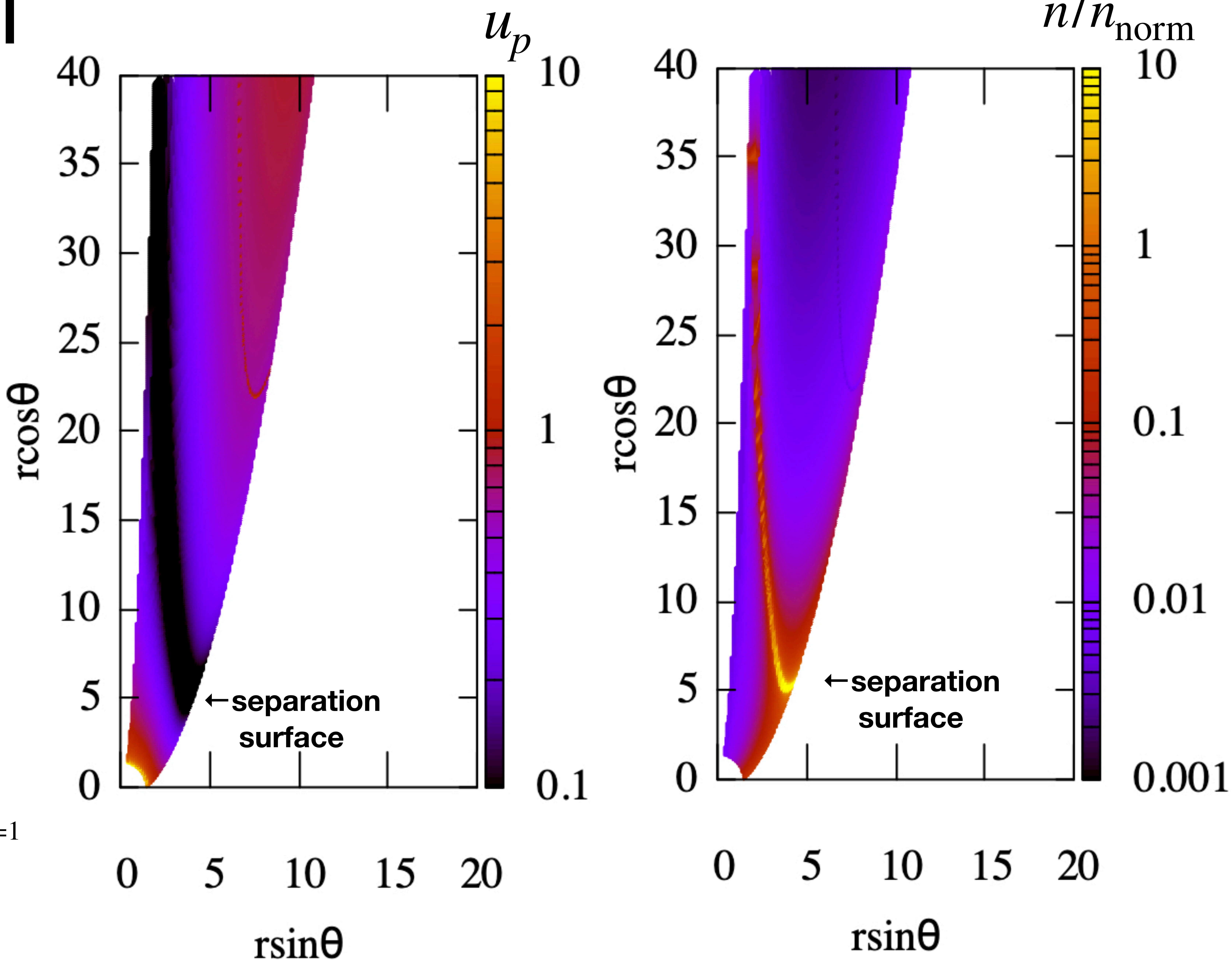
separation surfaceでの釣り合いを取る。
厳密解が得られれば全域で釣り合い。

3. Results

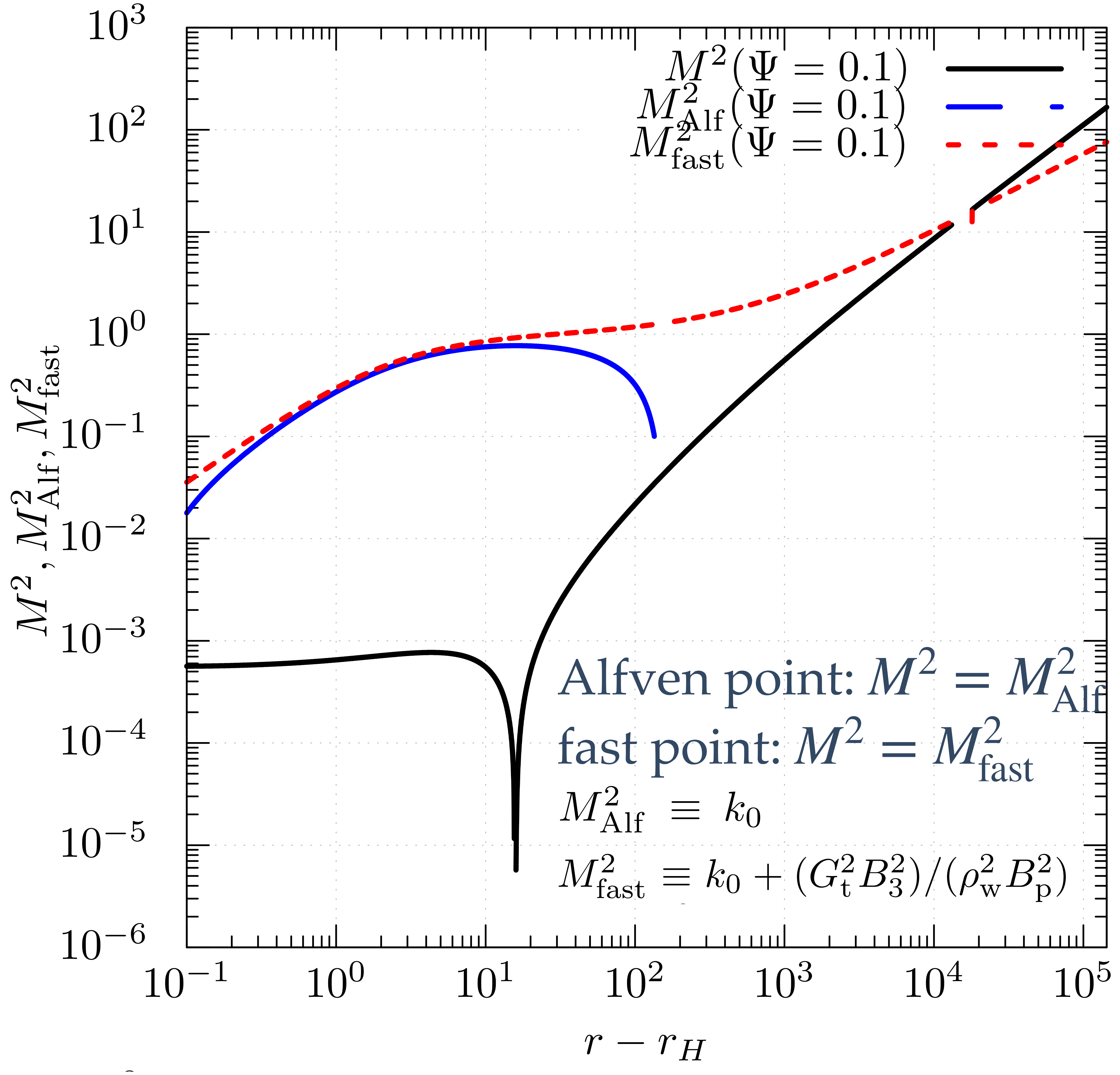
parabolic jet model

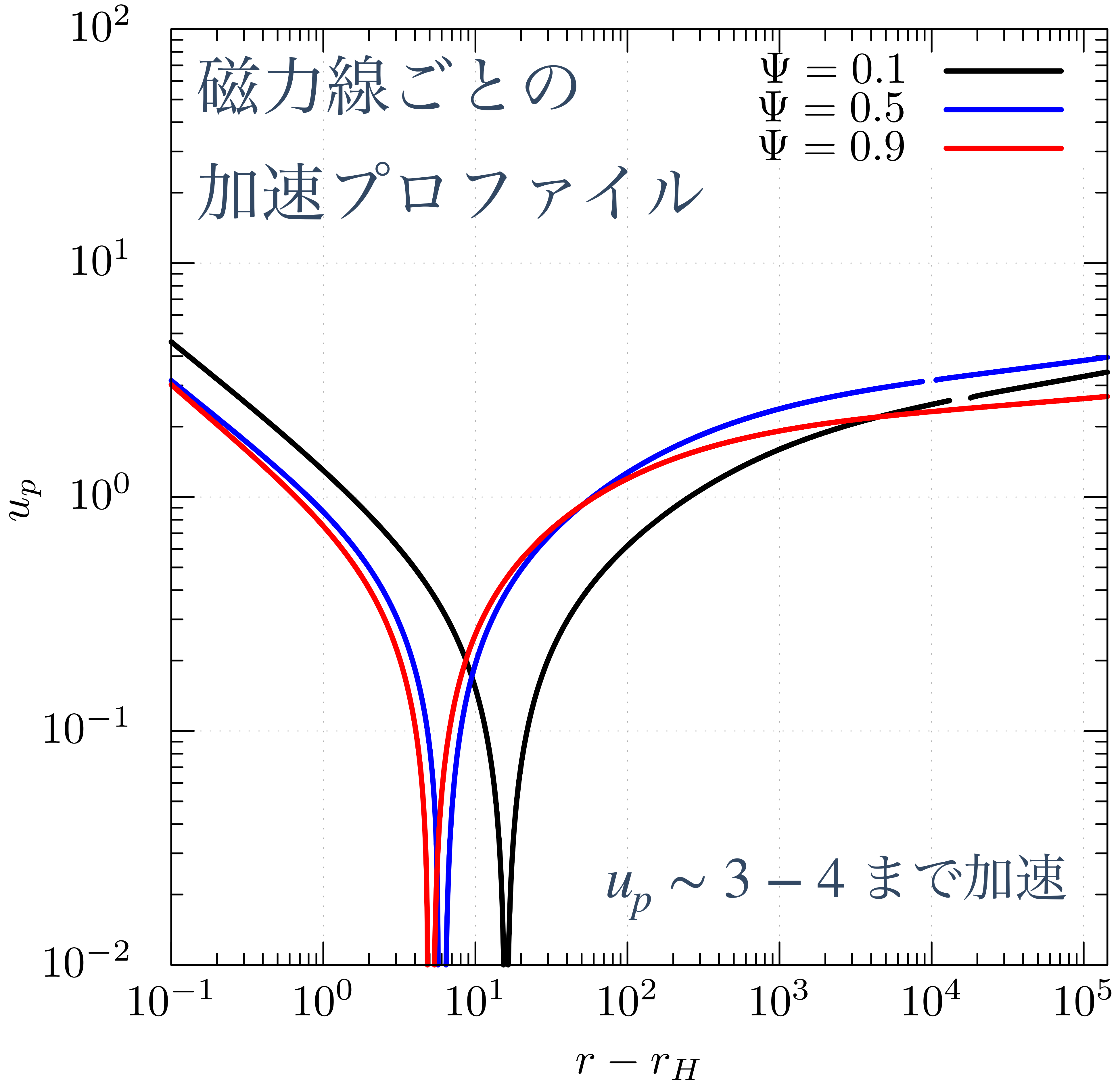
- poloidal velocity: $u_p^2 = u_1 u^1 + u_2 u^2$
- separation surfaceから相対論的速度に加速
- 加速に伴い密度減少
- ジェット縁と軸付近が高密度の中空構造
- 密度の規格化:

$$n_{\rm norm} = \left[\frac{B_1B^1 + B_2B^2 + B_3B^3}{8\pi\mu}\right]_{r=r_{\rm ss},\Psi=1}$$

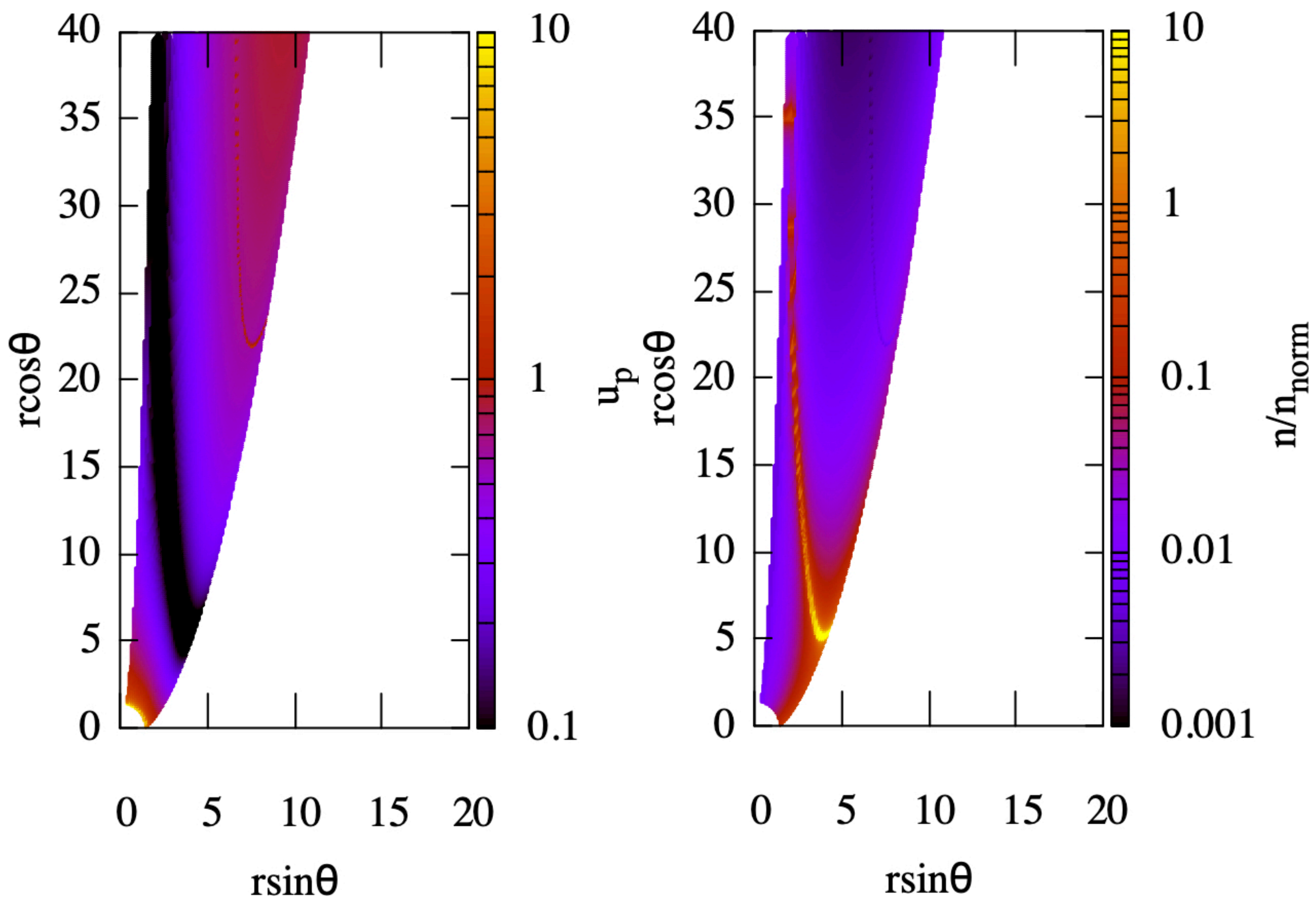


磁力線に沿った分布

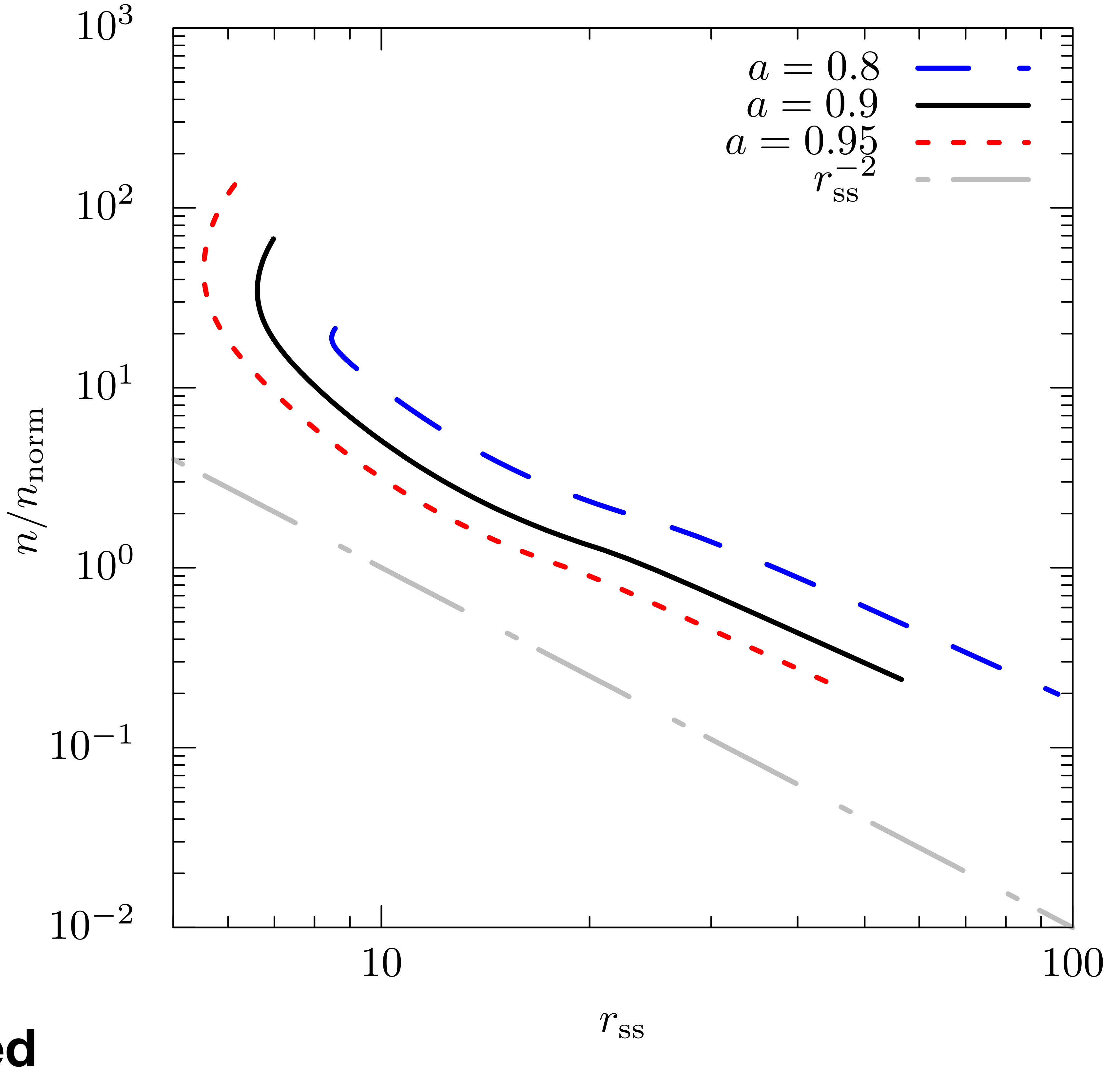

$M^2(\Psi = 0.1)$
$M^2_{\rm Alf}(\Psi = 0.1)$
$M^2_{\rm fast}(\Psi = 0.1)$
Alfven point: $M^2 = M^2_{\rm Alf}$
fast point: $M^2 = M^2_{\rm fast}$
$M^2_{\rm Alf} \equiv k_0$
$M^2_{\rm fast} \equiv k_0 + (G_{\rm t}^2 B_3^2)/(\rho_{\rm w}^2 B_{\rm p}^2)$
$M^2, M^2_{\rm Alf}, M^2_{\rm fast}$
$r - r_H$


磁力線ごとの
加速プロファイル
$\Psi = 0.1$
$\Psi = 0.5$
$\Psi = 0.9$
$u_p \sim 3-4$ まで加速
u_p
$r - r_H$

Summary



- EHTなどの高解像電波観測によってAGNジェットの駆動領域が分解観測されてきている
- ジェット内部の密度分布を放射構造から制限
- 定常軸対称一般相対論的理想MHD方程式を磁力線に並行/垂直方向に分解。垂直方向を準解析的に解いてseparation surface 上での力の釣り合いを満たす Bernoulli parameterを求め、並行方向のBernoulli式を解析的に解くことでジェット内部の電磁場、速度場、密度場を求めた。
- 今回構築したジェットモデルはホライズン近傍のジェット放射を再現することで、ジェット内部への質量注入機構に対する制限として利用できる



Ogihara, Ogawa, Toma submitted