

相対論的ジェット構造と 観測される電波像の関係

高橋 和也 (基研)

當真 賢二 (東北大)

紀 基樹 (工学院大、国立天文台)

中村 雅徳 (ASIAA)

秦 和弘 (国立天文台 水沢VLBI観測所)

目次

Introduction

ジェットモデルの説明

結果と考察

まとめ

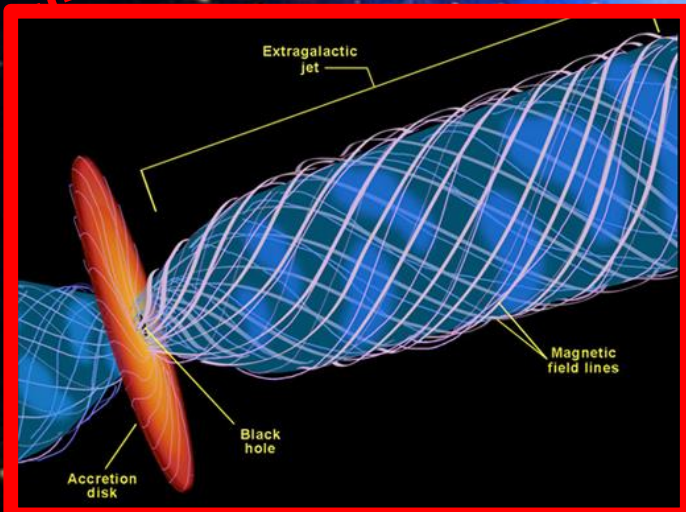
Active Galactic Nuclei (AGN) Jet

- highly collimated outflows
- accelerated to relativistic speeds ($\Gamma \sim$ several-10)
- stable

Cygnus A
(NASA)

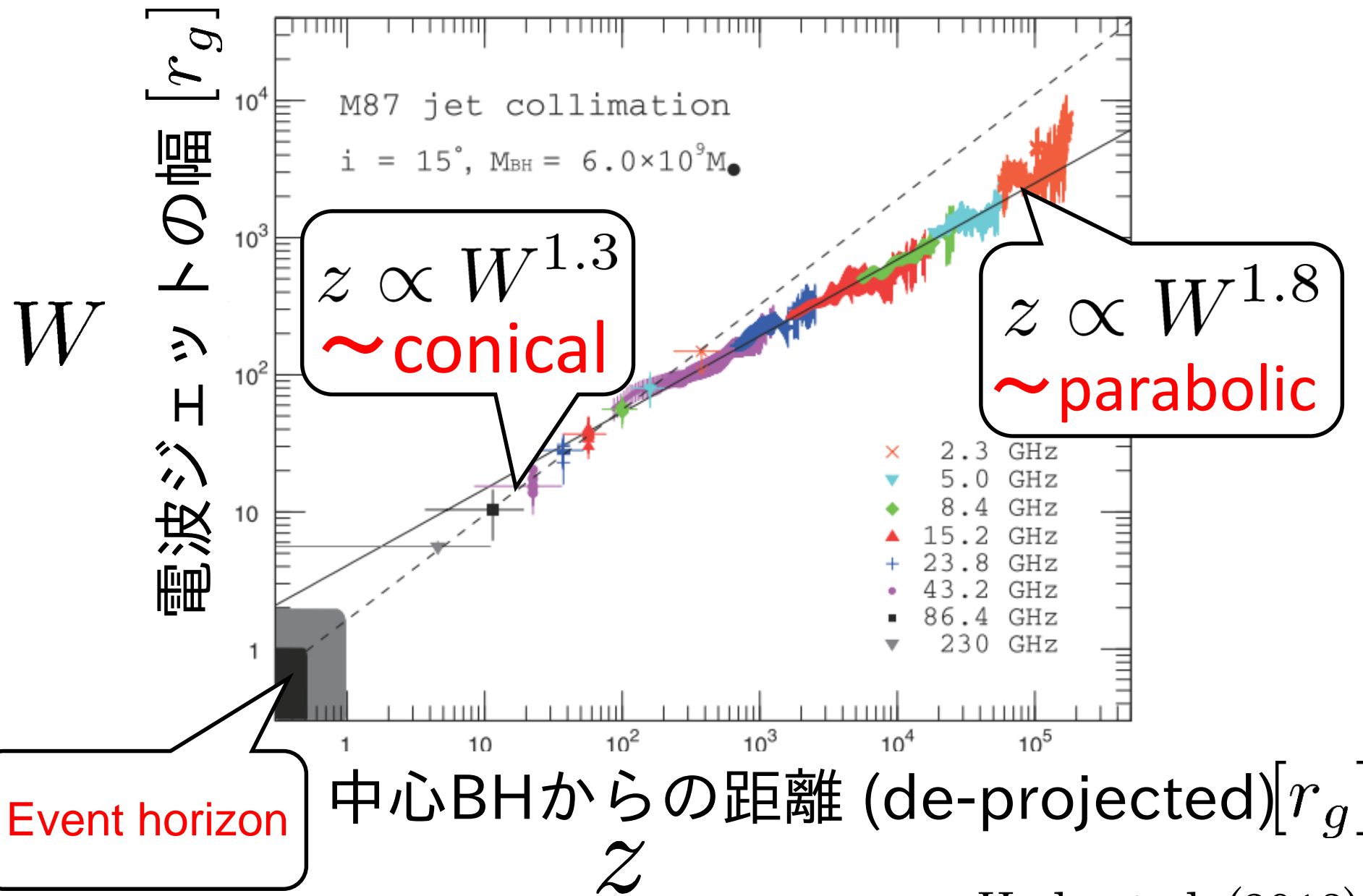
host galaxy
(optical)

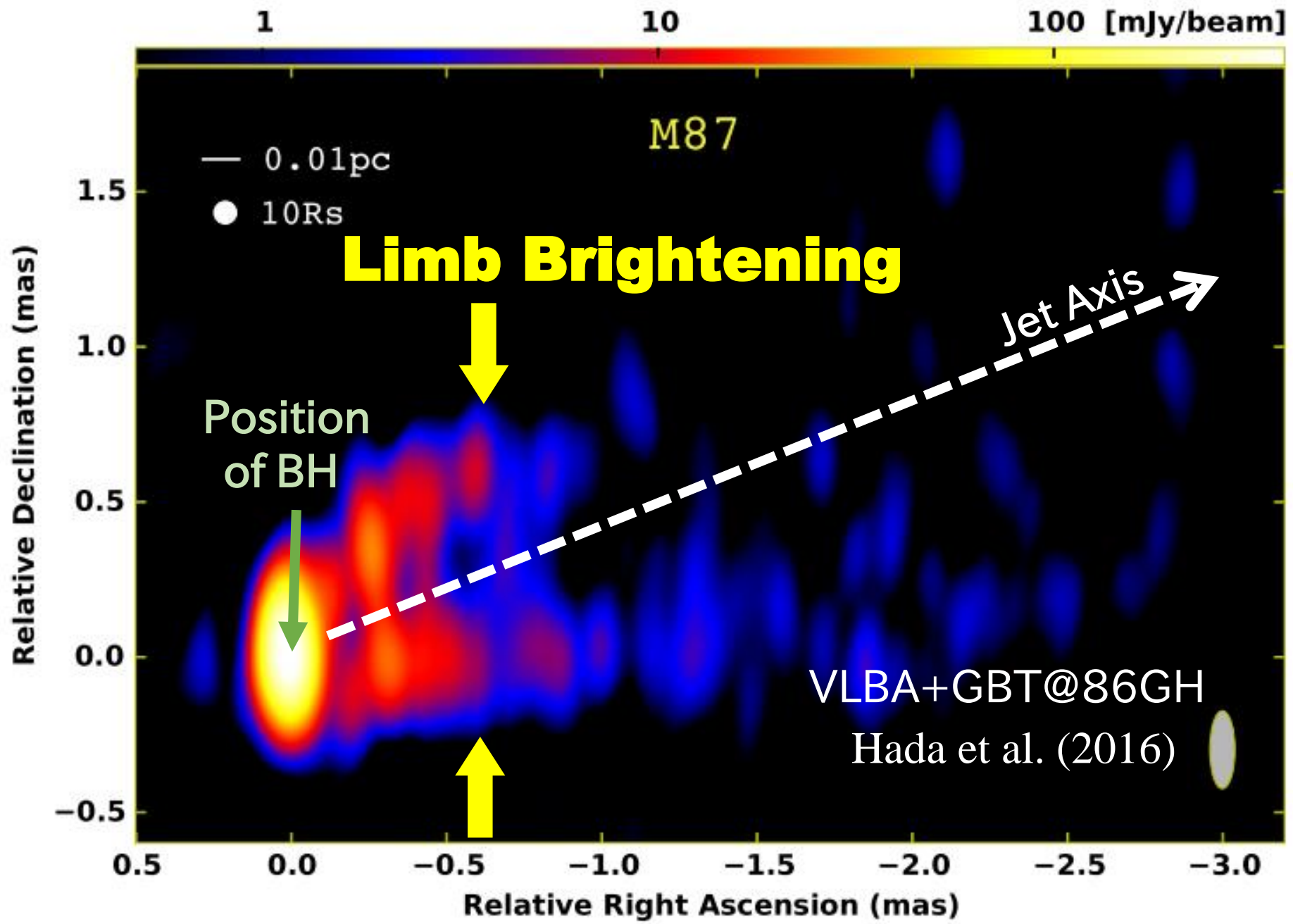
~ 100 kpc



Central SMBH + disk?
mass loading?
launching mechanism?

M87ジェットの形状





Motivation

★ **Limb-brightening** から **ジェット構造に制限** ができると期待

- ・ 速度場 → 相対論的ビーミング効果
- ・ 磁場 → シンクロトロン放射の異方性

} 電波像に影響

Method

Broderick & Loeb (2009)のジェットモデルを利用する

★ ジェットは **軸対称定常** であると仮定

★ 磁場は **force-free 場** で近似

★ 電波の放射機構は相対論的電子の **シンクロトロン放射** を仮定

→ **先行研究より広いパラメタ領域** を調べる

☆ 理論的に予想される電波イメージと VLBI 観測を比較し、
ジェットのモデルパラメタに制限をつける

Motivation

★ **Limb-brightening** から **ジェット構造に制限** ができる と期待

・ 速度場 → 相対論的ビーミング効果

・ 磁場、シンクロトロン放射の異方性

電波像に影響

M87 ジェットの launching point は.....

○ **中心BH**

× **降着円盤**

★ 電波の放射機構は相対論的電子の **シンクロトロン放射** を仮定

→ **先行研究より広いパラメタ領域** を調べる

☆ 理論的に予想される電波イメージと VLBI 観測を比較し、
ジェットのモデルパラメタに制限をつける

Model

Force-free jet

Synchrotron images

Parameter sets

Assumptions: Steady, Axi-symmetric

Maxwell eqs.

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = \mathbf{0}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi \rho_e$$

Force-Free condition

$$\rho_e \mathbf{E} + \frac{1}{c} \mathbf{j} \times \mathbf{B} = \mathbf{0}$$

定常軸対称 force-free ジェットモデル (Broderick & Loeb, 2009)

放物線形状の磁場を与える流れ関数：

$$\Psi = Ar(1 \mp \cos \theta) \quad (A: \text{定数})$$

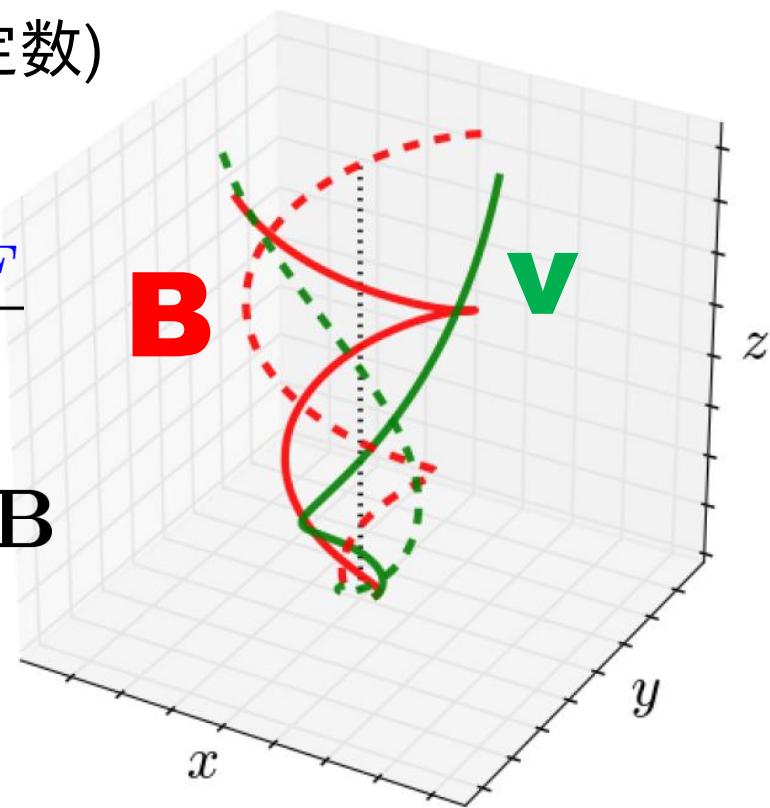
電磁場：

$$\mathbf{B}_p = \frac{1}{R} \nabla \Psi \times \hat{\phi}, \quad B_\phi = \mp \frac{2\Psi \Omega_F}{Rc}$$

$$\mathbf{E} = -\frac{1}{c} \Omega_F \nabla \Psi = -\frac{R\Omega_F}{c} \hat{\phi} \times \mathbf{B}$$

速度場：
$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2} c$$

密度場：連続の式 \Rightarrow 磁力線に沿って $\frac{n}{B^2} = \text{const.}$

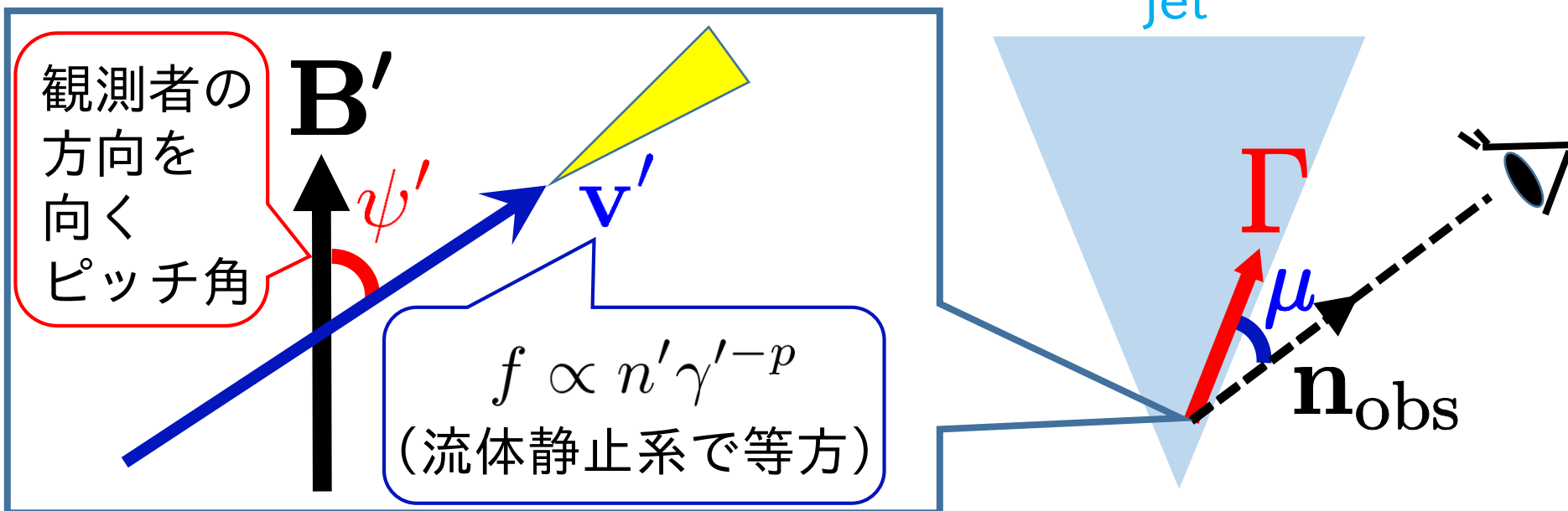


シンクロトロン放射率の計算

Shibata et al. (2003), Rybicki & Lightman (1985)

ジェットの中の各点でのシンクロトロン放射率：

磁場, 速度場, 密度場, 電子のエネルギー分布から計算できる



$$j_{\omega}(\mathbf{n}_{\text{obs}}) \propto n' |\mathbf{B}' \sin \psi'|^{(p+1)/2} \times \frac{1}{\Gamma^2 (1 - \beta \mu)^3}$$

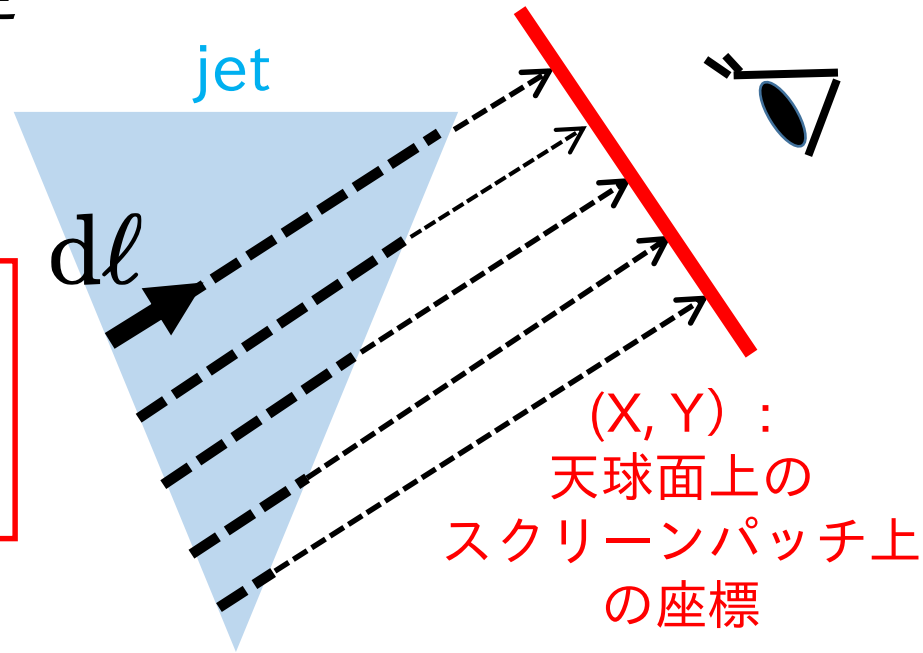
観測者系の放射率 流体静止系の放射率 × Bulkの運動による相対論的效果

VLBI観測される電波像の復元

★ **optically thin** のジェットを仮定

★ 視線方向に
シンクロトロン放射率を積分

$$I_{\omega}(X, Y) = \int j_{\omega} dl$$



★ VLBIのビームと畳み込み (有限解像度により像がぼやける効果)

$$I_{\omega}^{\text{VLBI}}(X, Y) = \iint dX' dY' I_{\omega}(X', Y') \underline{K(X - X', Y - Y')}$$

Gaussian beam kernel

(Walker et al., 2008 for VLBA beam)

Parameters

New!!

★ 磁場が刺さる場所（赤道面での境界条件）

$$\text{ブラックホール} \leftrightarrow \Omega_F = \Omega_{\text{BH}}/2 = \text{const.}$$

$$\text{降着円盤} \leftrightarrow \Omega_F = \Omega_{\text{Kep}} \propto R^{-3/2}$$

★ 非熱的電子の空間分布 → 以降のスライドで詳しく説明

その他：先行研究(**BL09**)と同じ

★ ブラックホール質量， Kerrパラメタ：

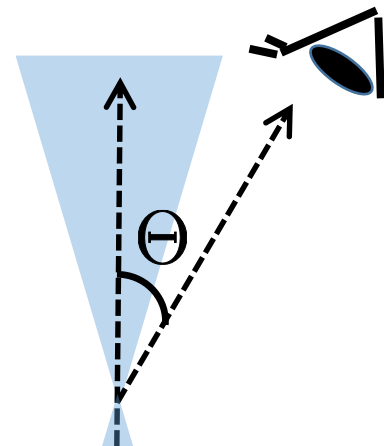
$$M_{\text{BH}} = 3.4 \times 10^9 M_{\odot} \quad a = 0.1 - 0.998$$

★ 電子のエネルギー分布：

$$f \propto n' \gamma^{-p} \quad p = 1.1$$

★ viewing angle:

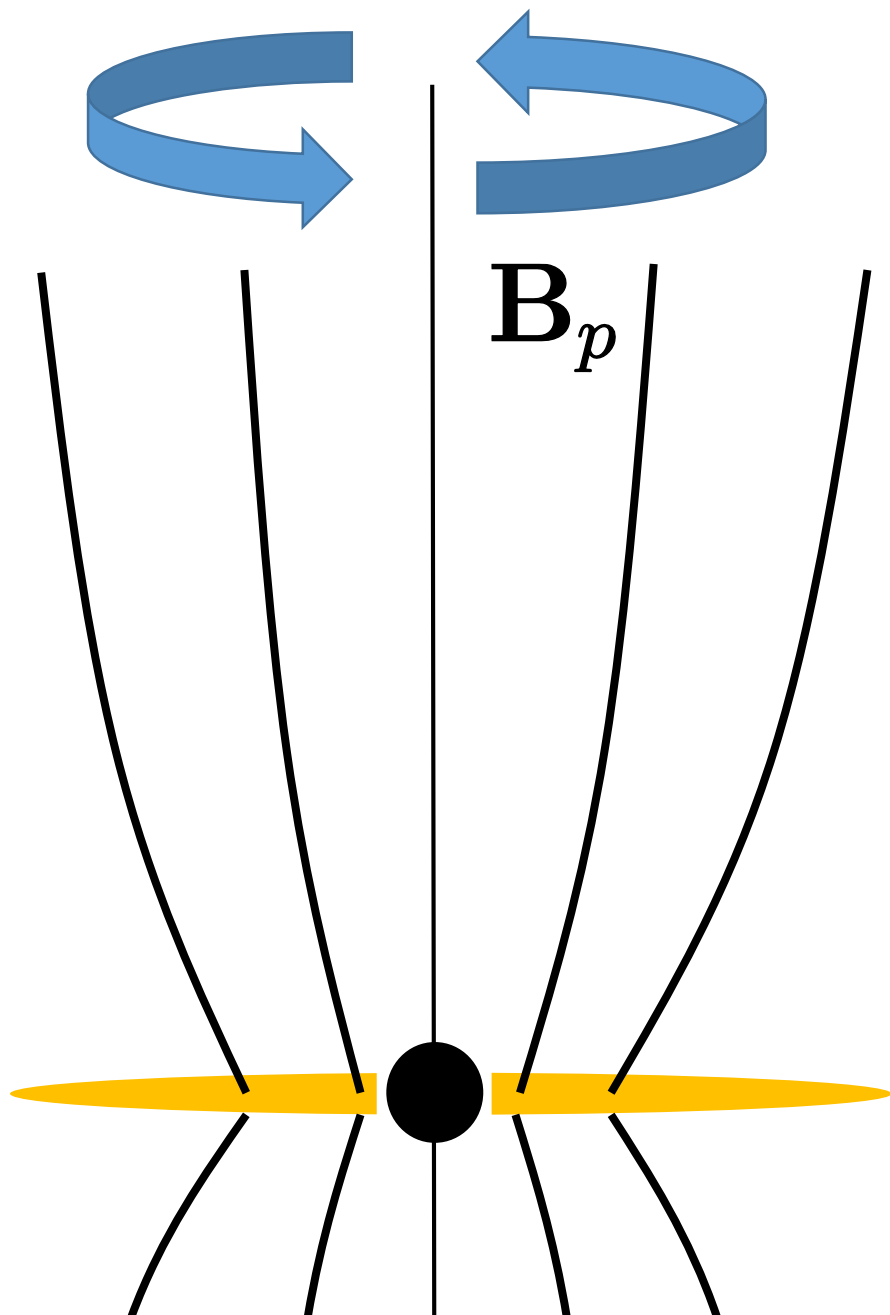
$$\Theta = 25^\circ$$



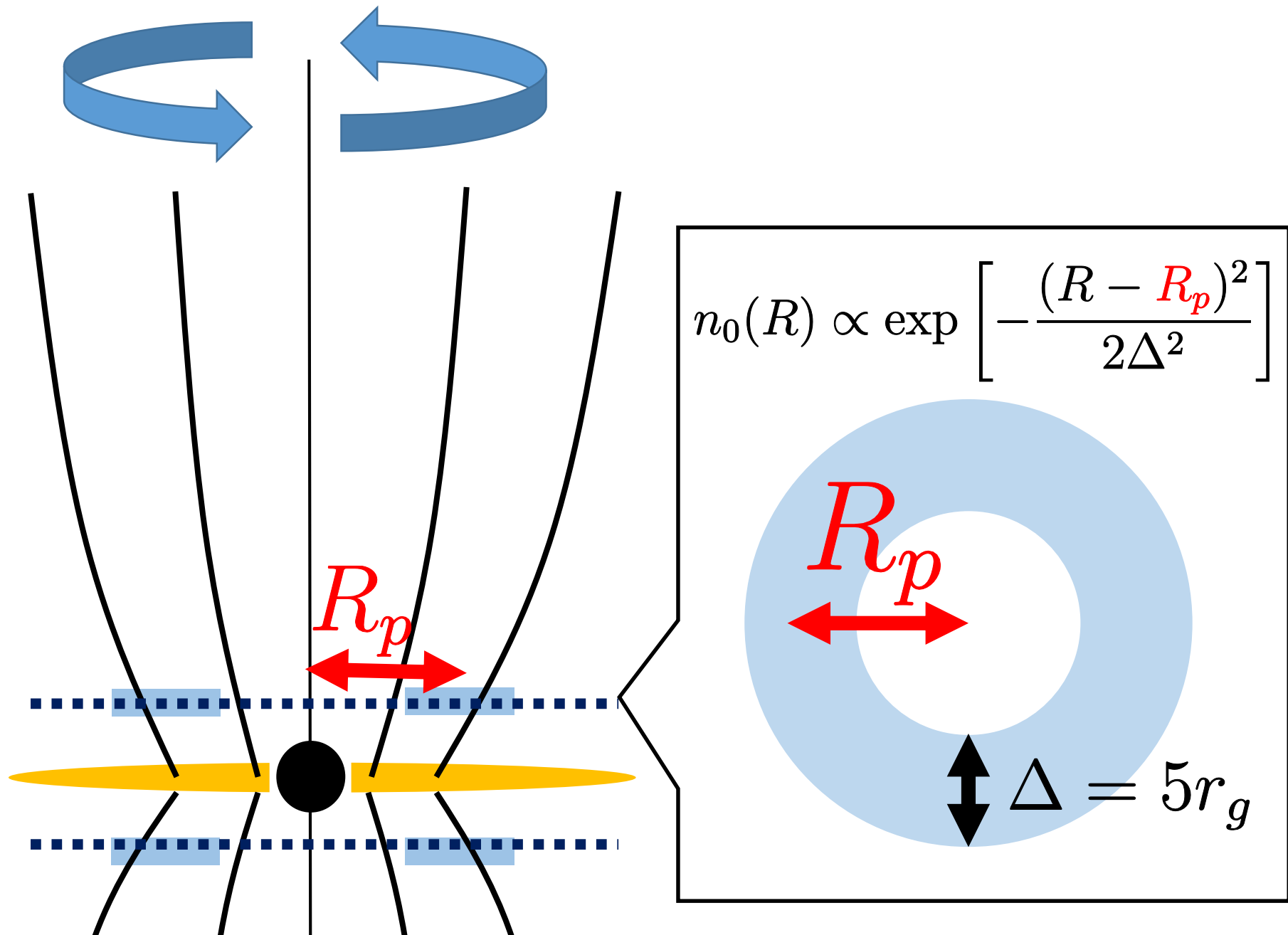
磁場が降着円盤を
つらぬく場合

$$\Omega_F = \Omega_{\text{Kep}} \propto R^{-3/2}$$

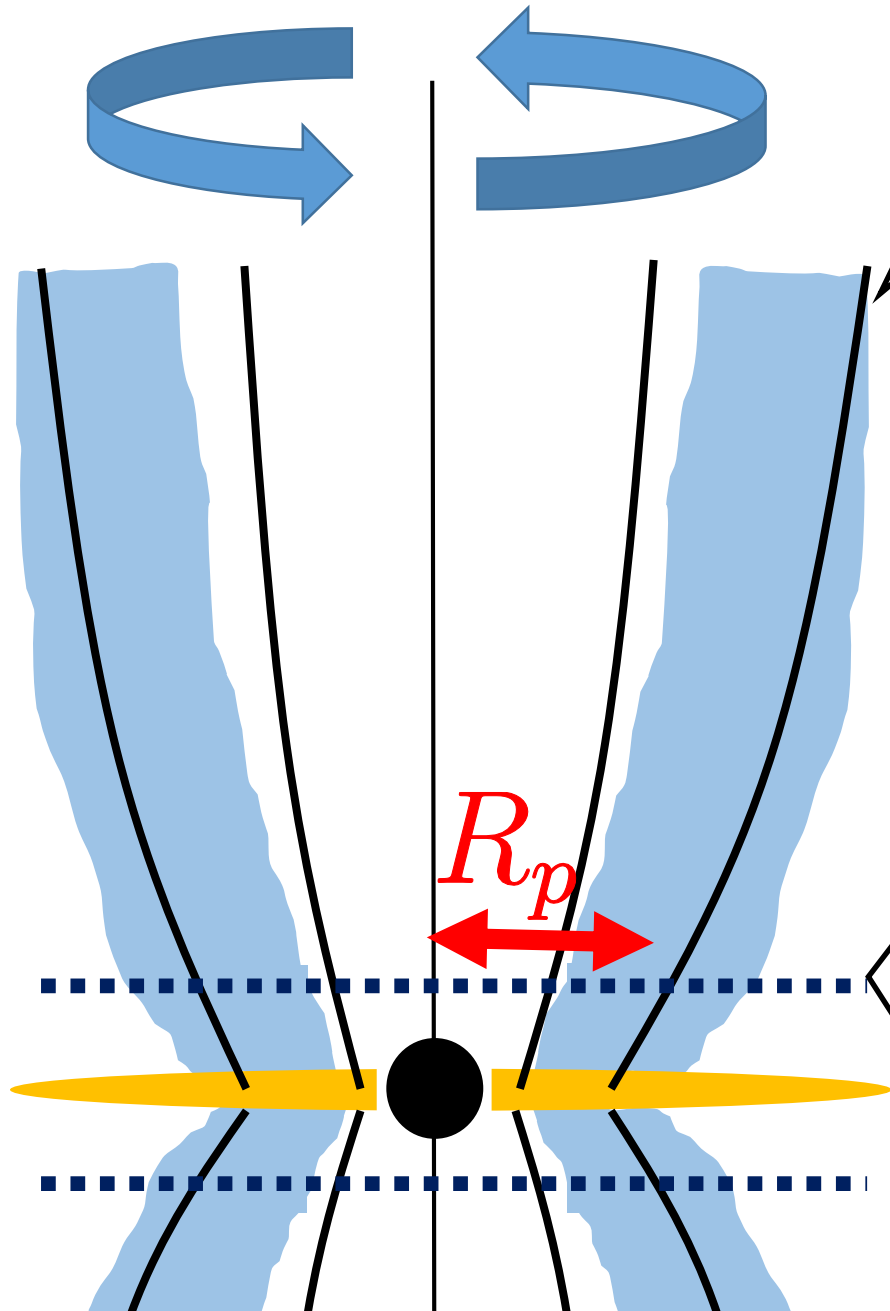
先行研究**BL09**と同じ Ω_F



New!!



New!!

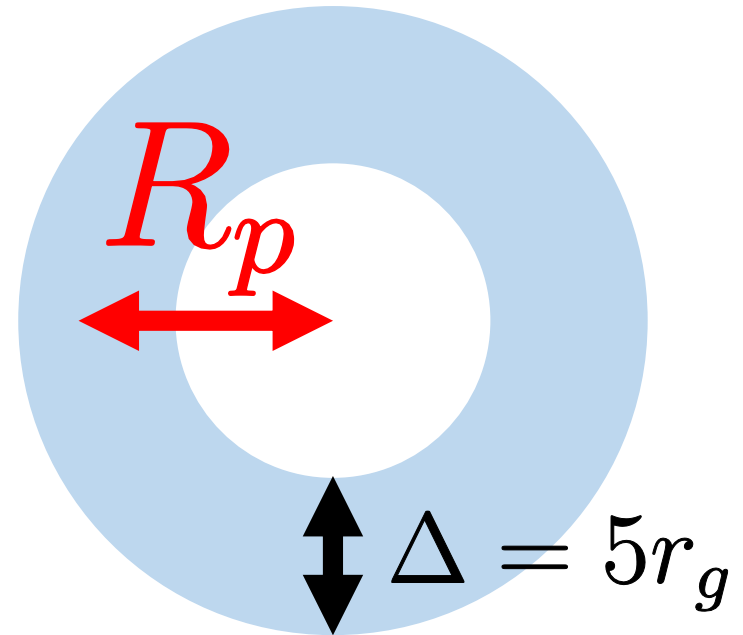


連続の式：

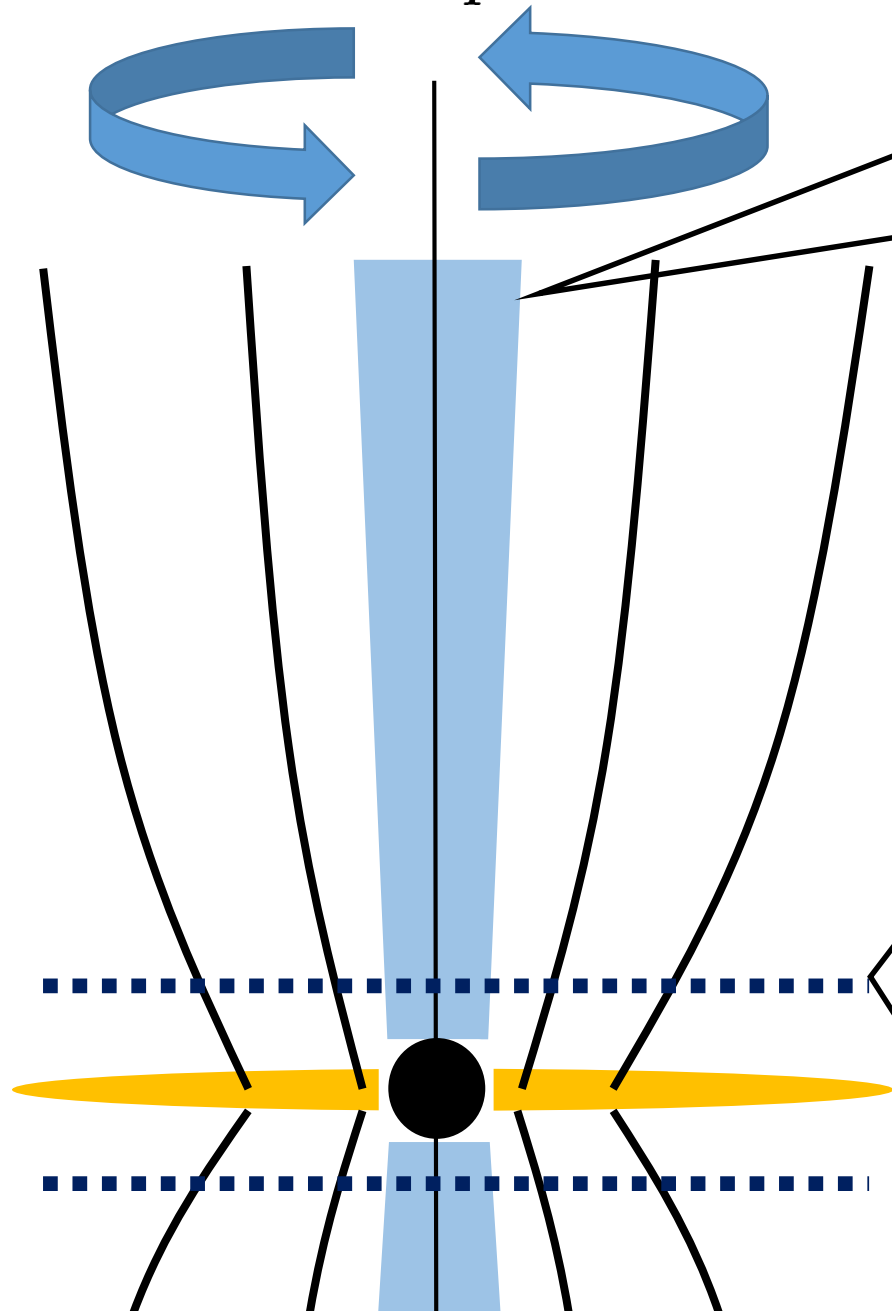
磁力線に沿って

$$\frac{n}{B^2} = \text{const.}$$

$$n_0(R) \propto \exp \left[-\frac{(R - R_p)^2}{2\Delta^2} \right]$$



✖ BL09: $R_p = 0$

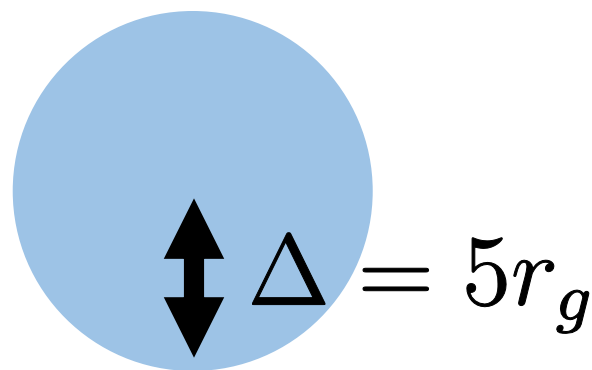


連続の式：

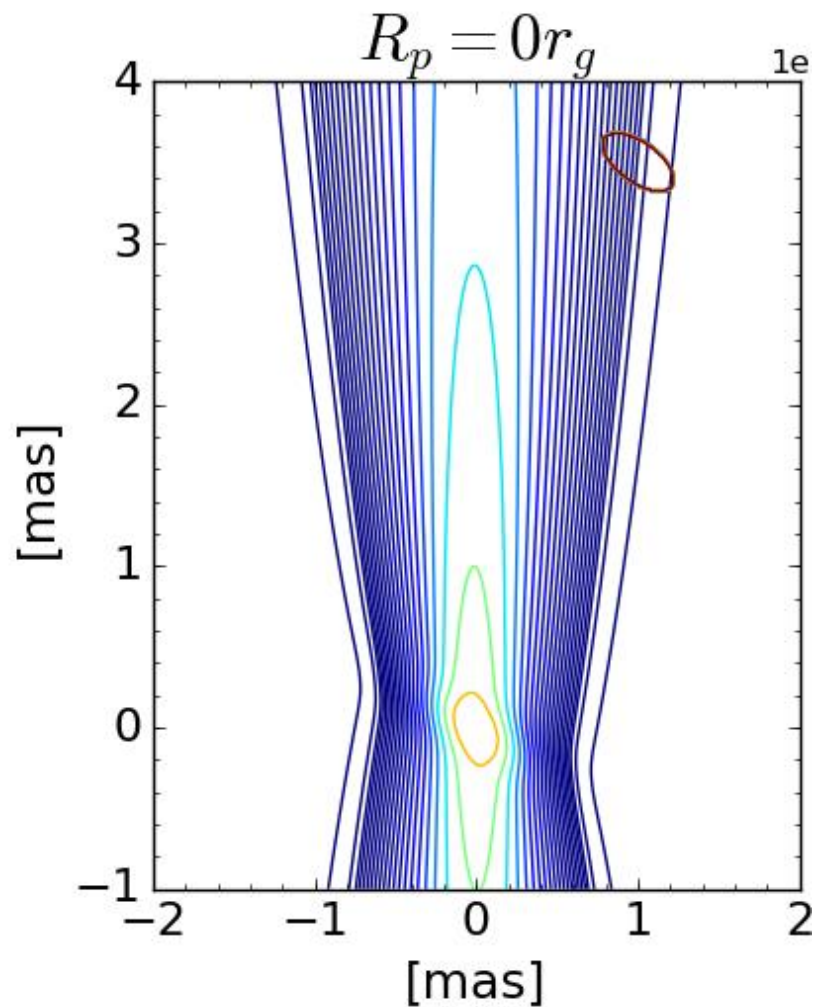
磁力線に沿って

$$\frac{n}{B^2} = \text{const.}$$

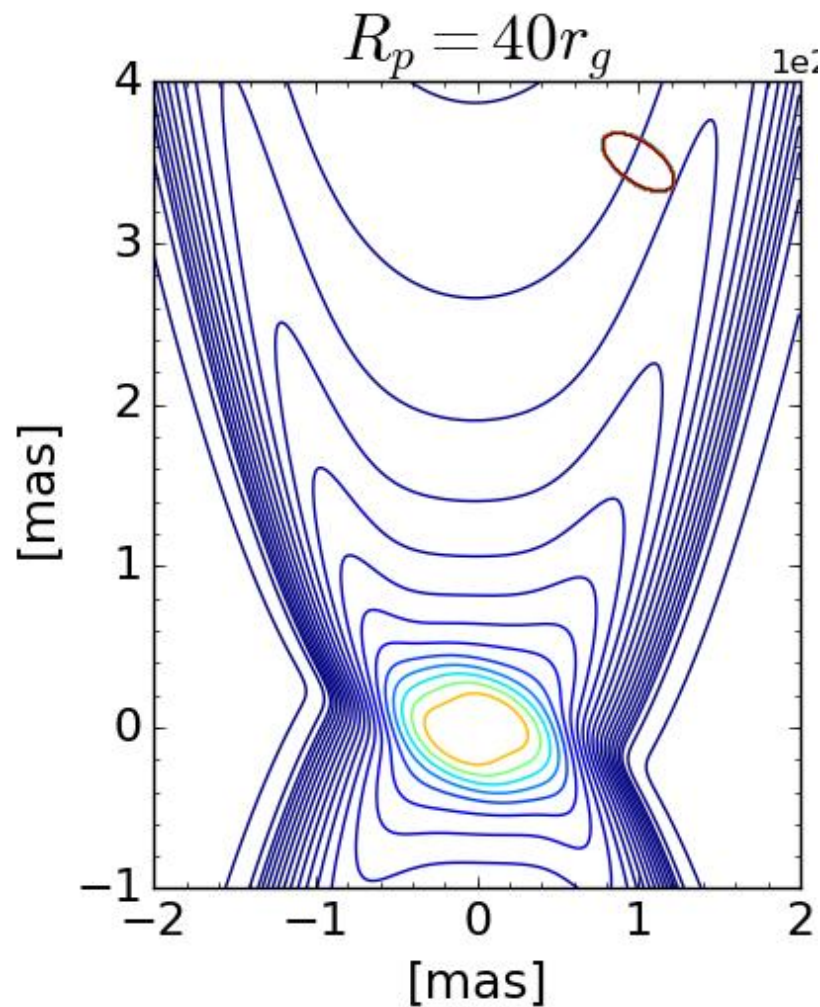
$$n_0(R) \propto \exp\left[-\frac{R^2}{2\Delta^2}\right]$$



仮に電波強度が単純に柱密度に比例する場合：

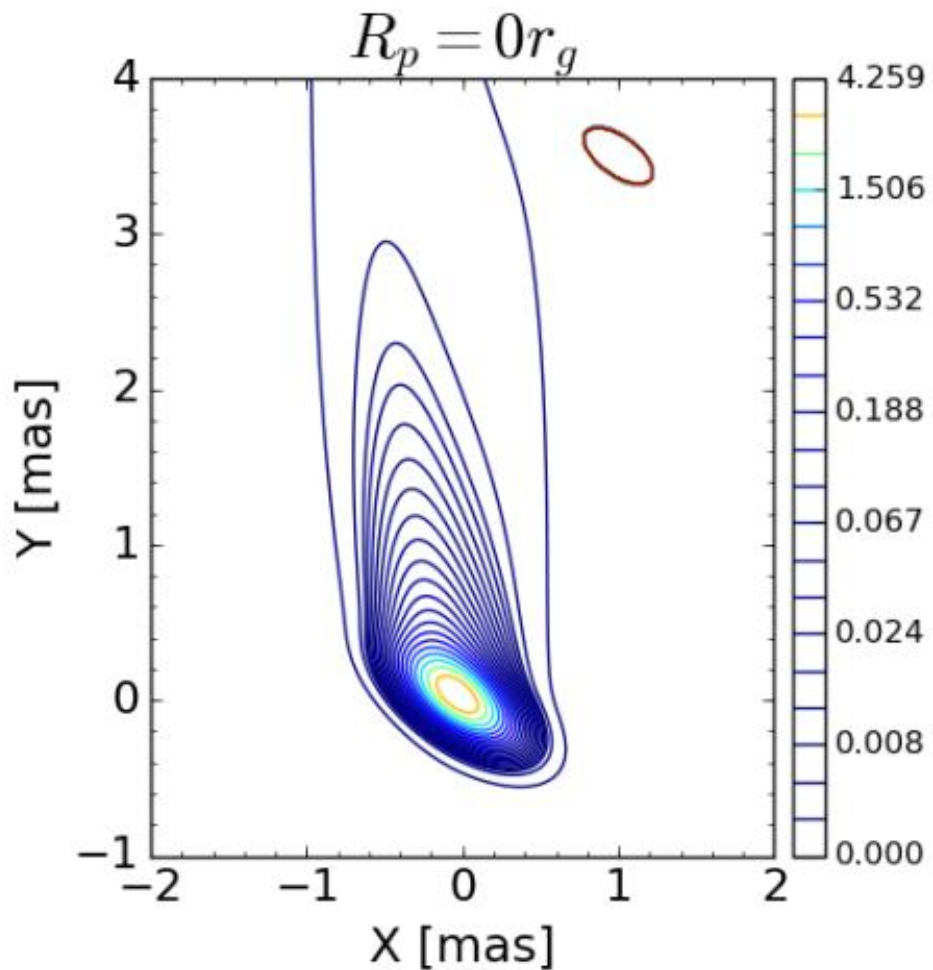


電子を軸付近に置いた
(BL09のモデルと同じパラメタ)

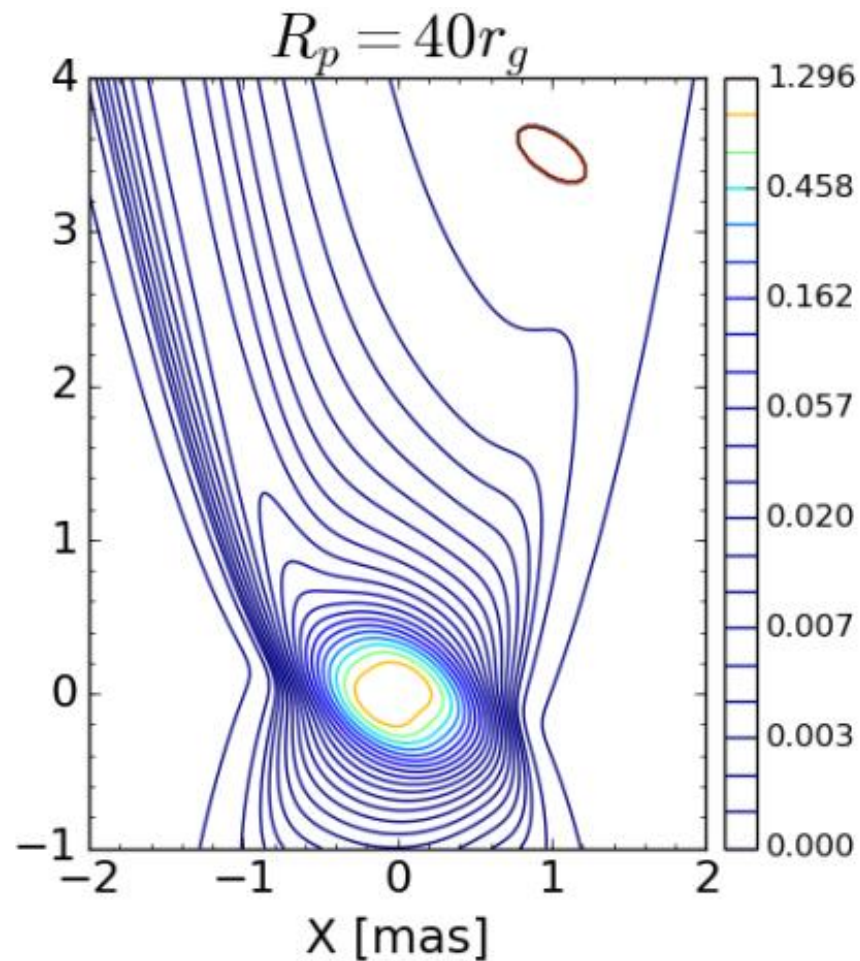


電子を軸から
離れた位置に置いた

復元された電波図：

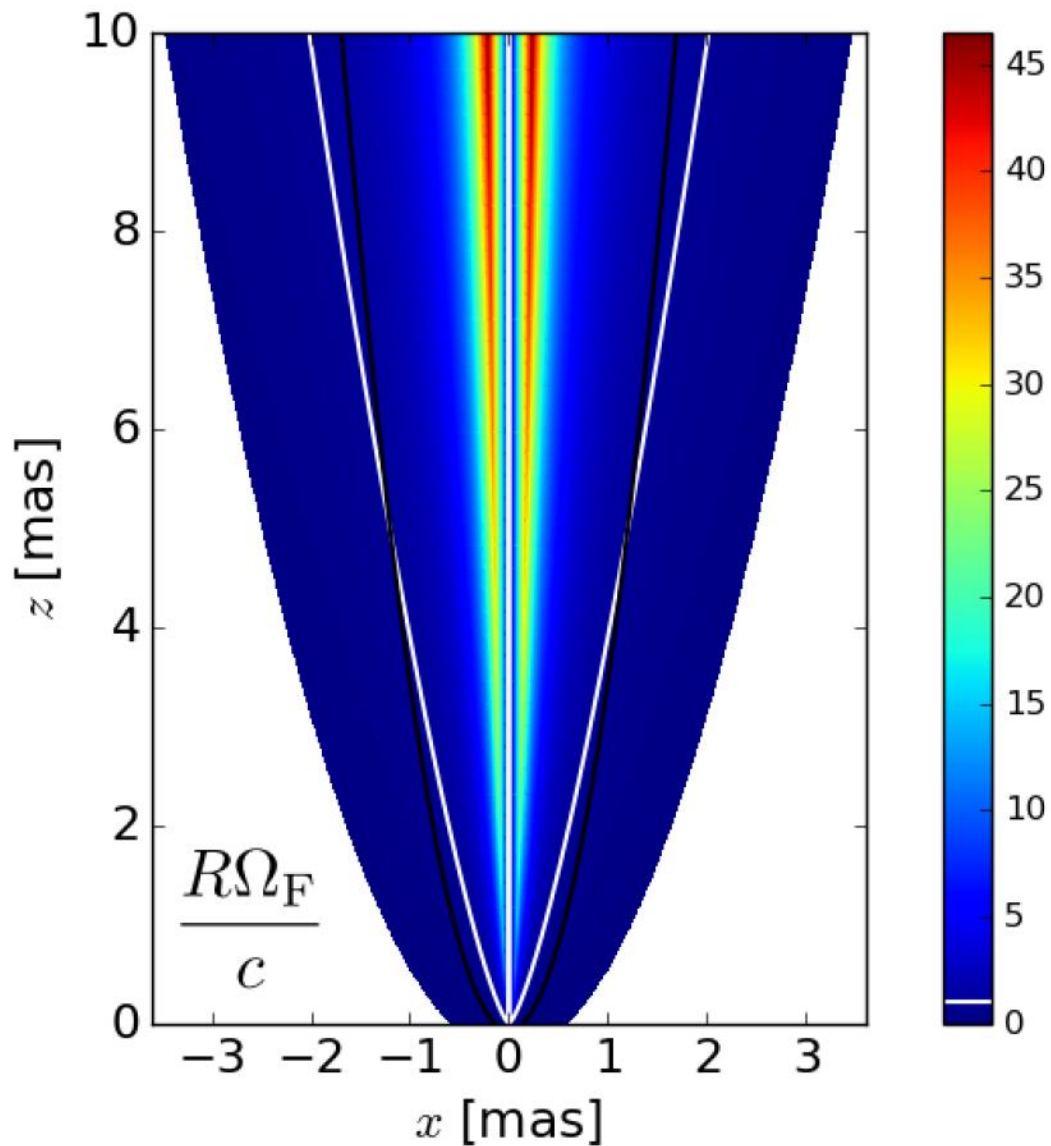


Limb-brightening なし
(BL09と同じ)

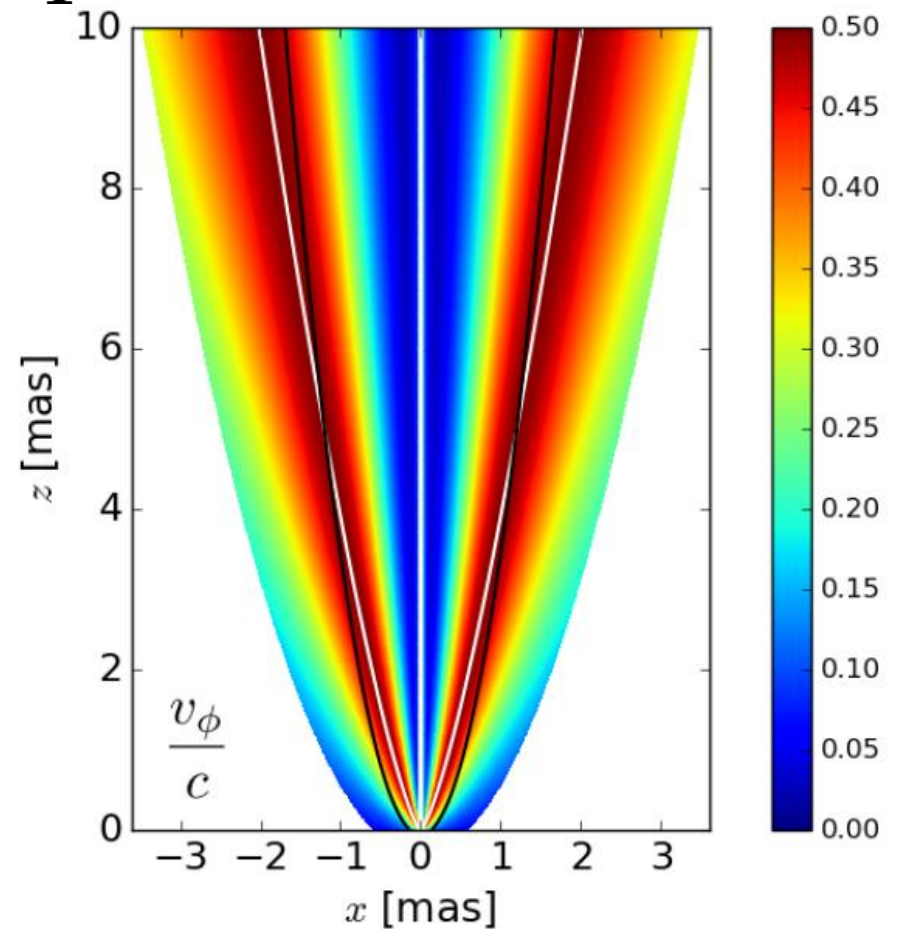
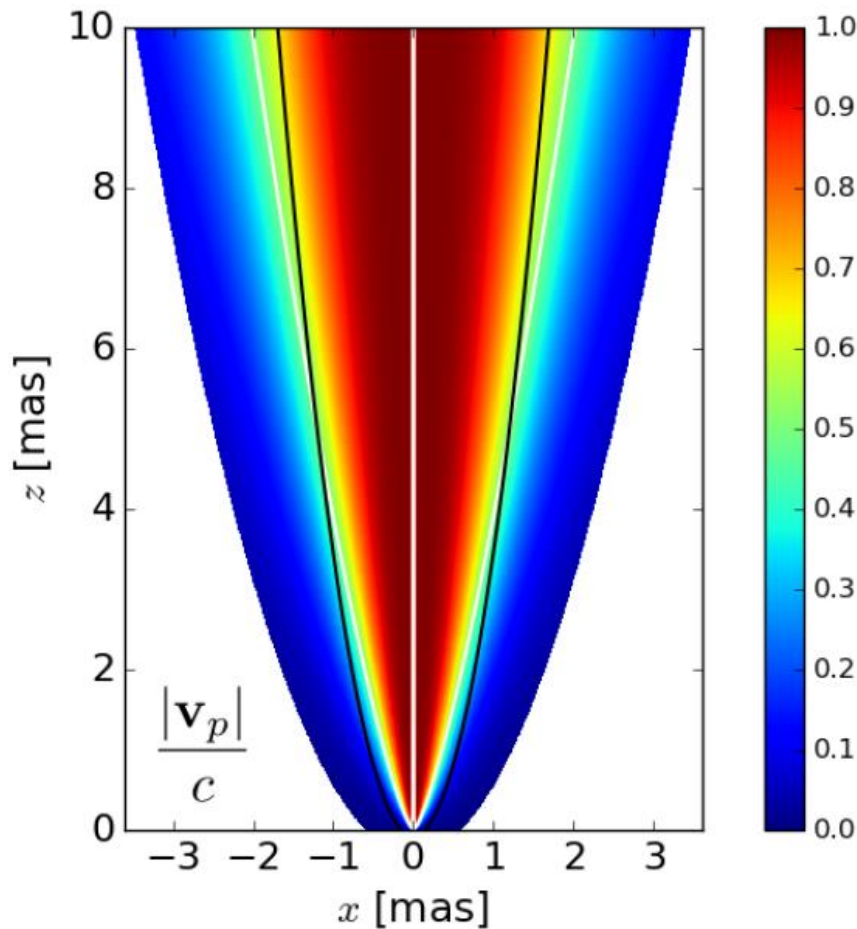


★Limb-brighteningするが、
左右非対称
★Counter jet が明るい

$$\Omega_F = \Omega_{\text{Kep}} \propto R^{-3/2}$$



$$\Omega_F = \Omega_{\text{Kep}} \propto R^{-3/2}$$



ジェット外側で $|\mathbf{v}_p|$ 小

ジェット外側で v_ϕ 大

→ 明るいCounter jet

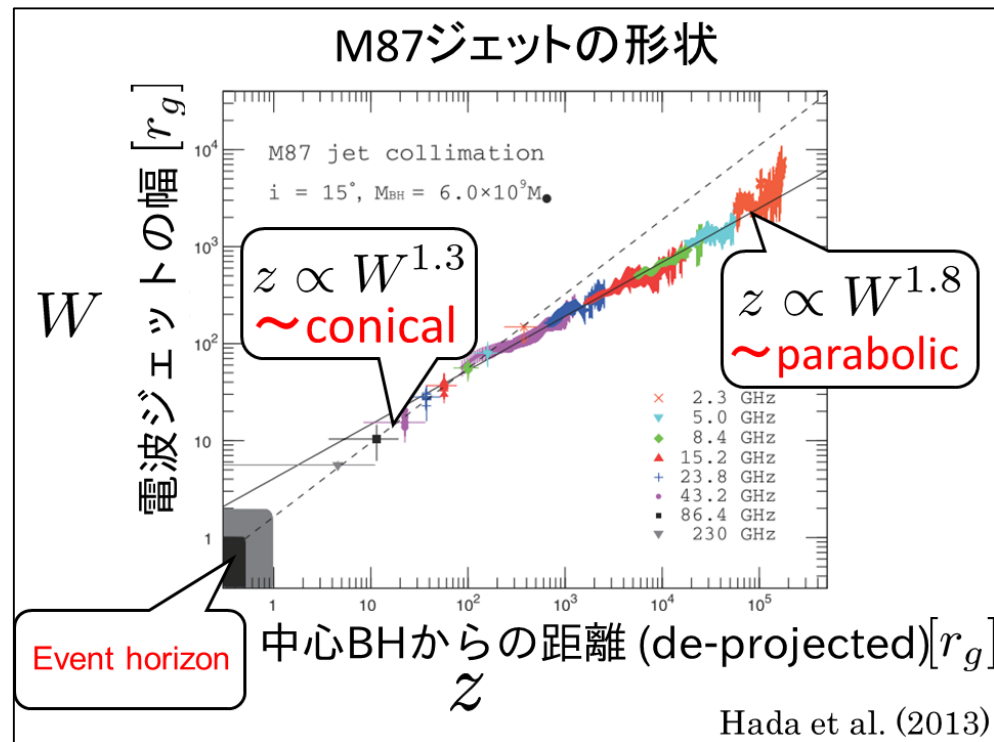
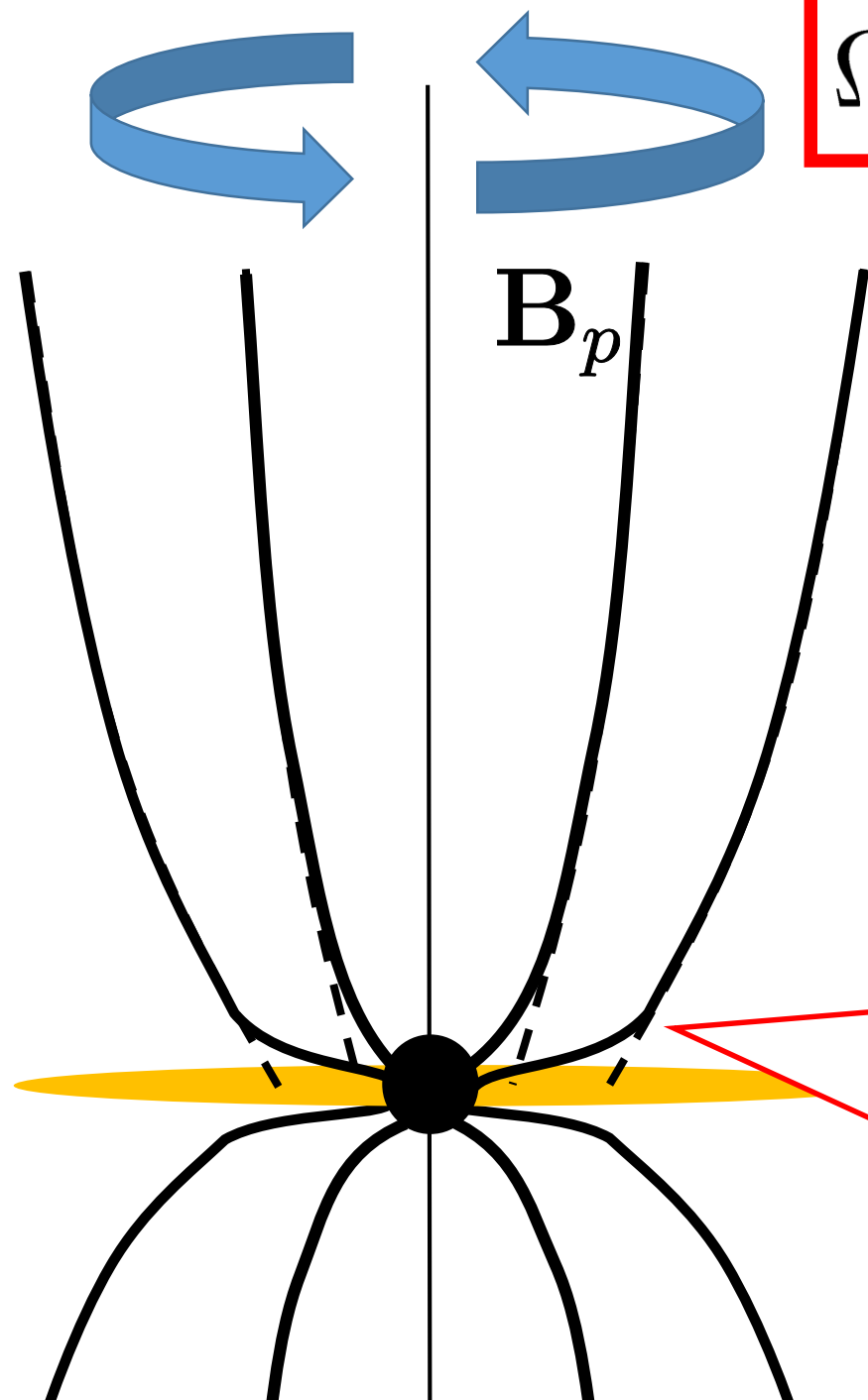
→ 左右の非対称性

New!

磁場が
BHをつらぬく場合

$$\Omega_F = \frac{\Omega_{\text{BH}}}{2} = \text{const.}$$

$$\Omega_F = \Omega_{\text{BH}}/2 = \text{const.}$$

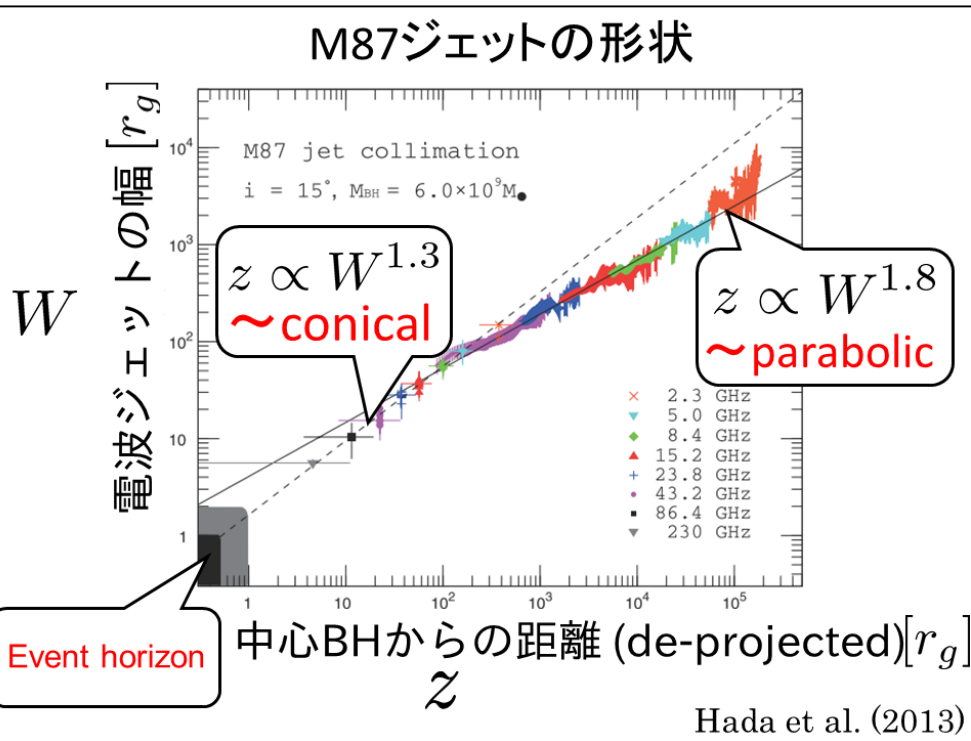


磁場がブラックホール
 近傍で曲がり
 ブラックホールに
 突き刺さると仮定

$$\Omega_F = \Omega_{\text{BH}}/2 = \text{const.}$$

電子分布

B_p

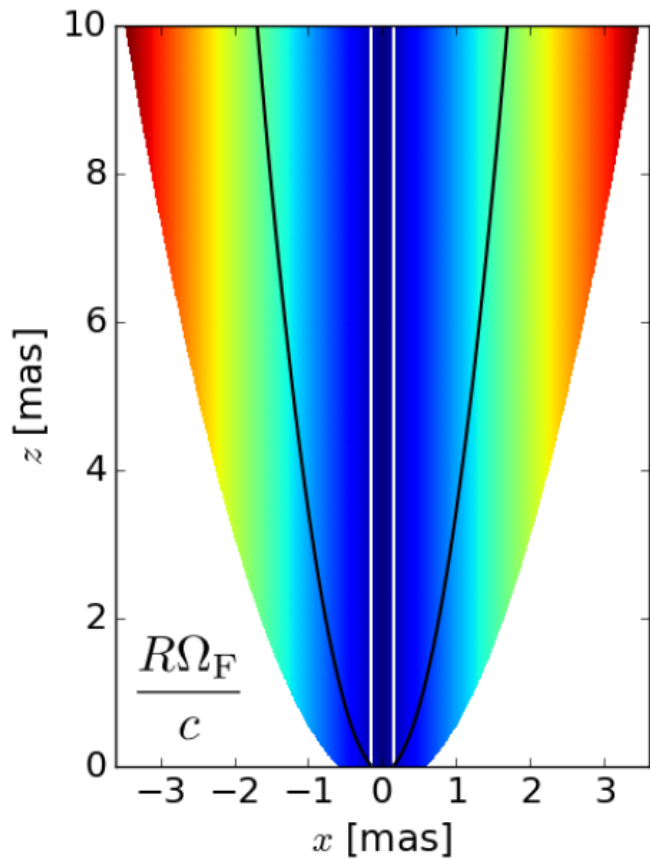


磁場がブラックホール
 近傍で曲がり
 ブラックホールに
 突き刺さると仮定

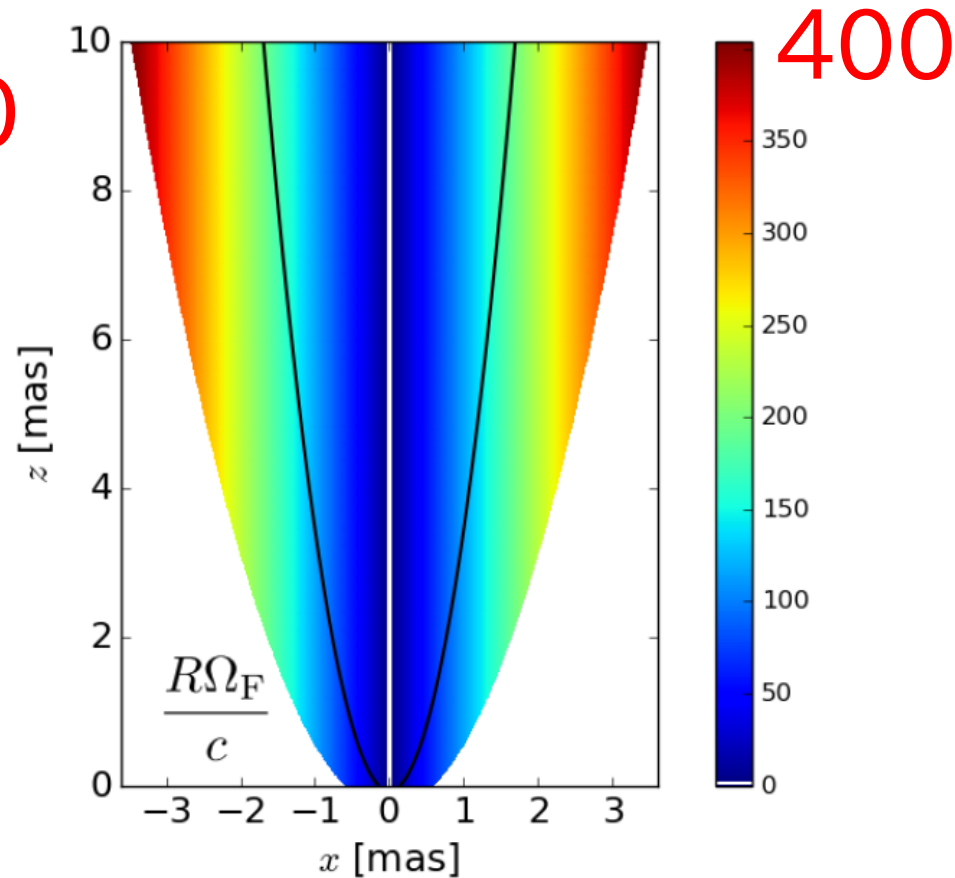
$$\Omega_F = \Omega_{\text{BH}}/2 = \text{const.}$$

$$a = 0.1$$

$$a = 0.998$$



20

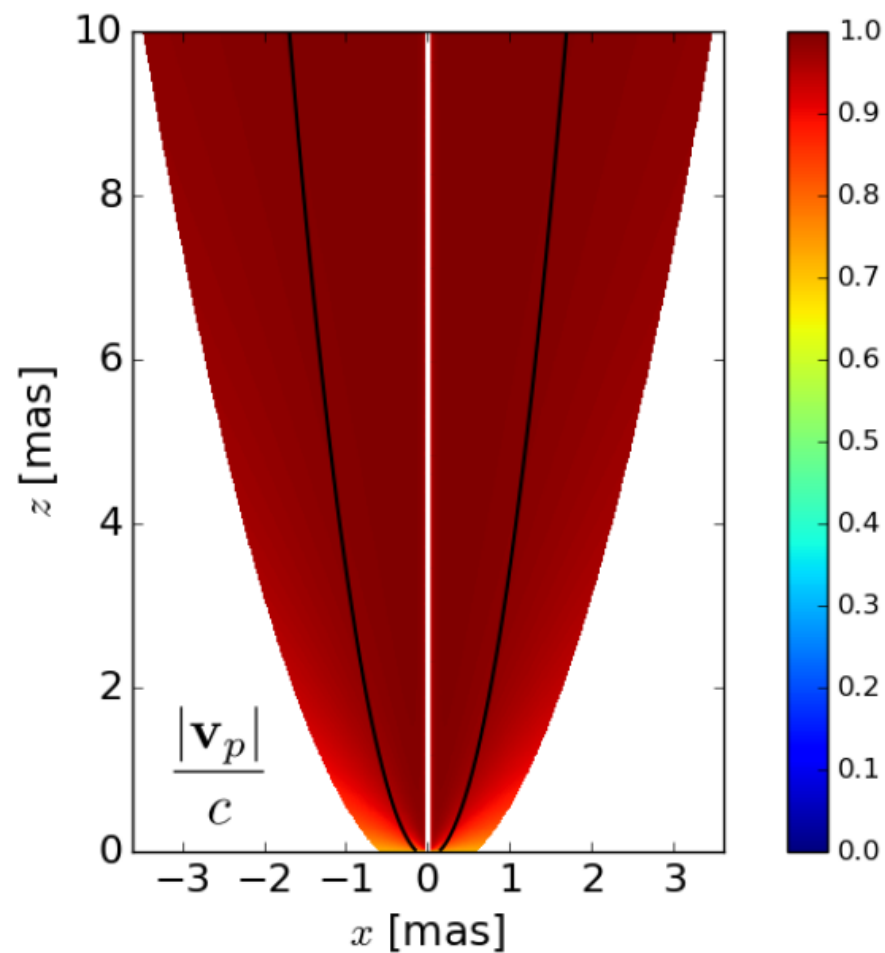
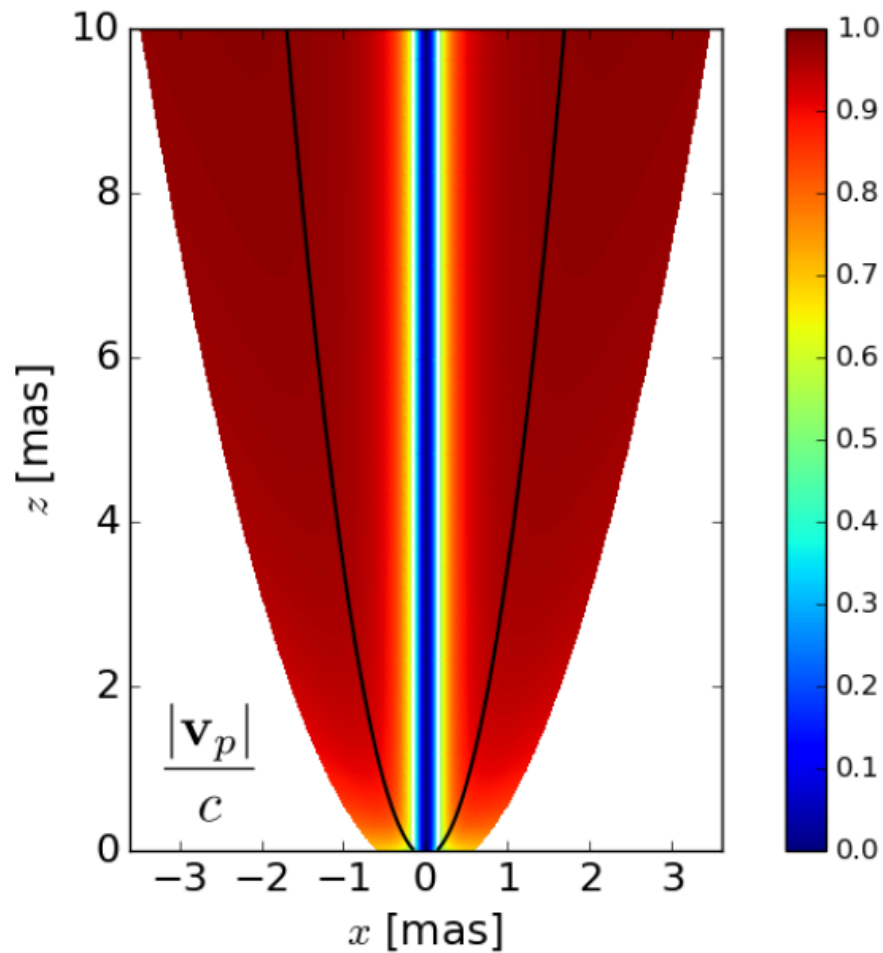


400

$$\Omega_F = \Omega_{\text{BH}}/2 = \text{const.}$$

$$a = 0.1$$

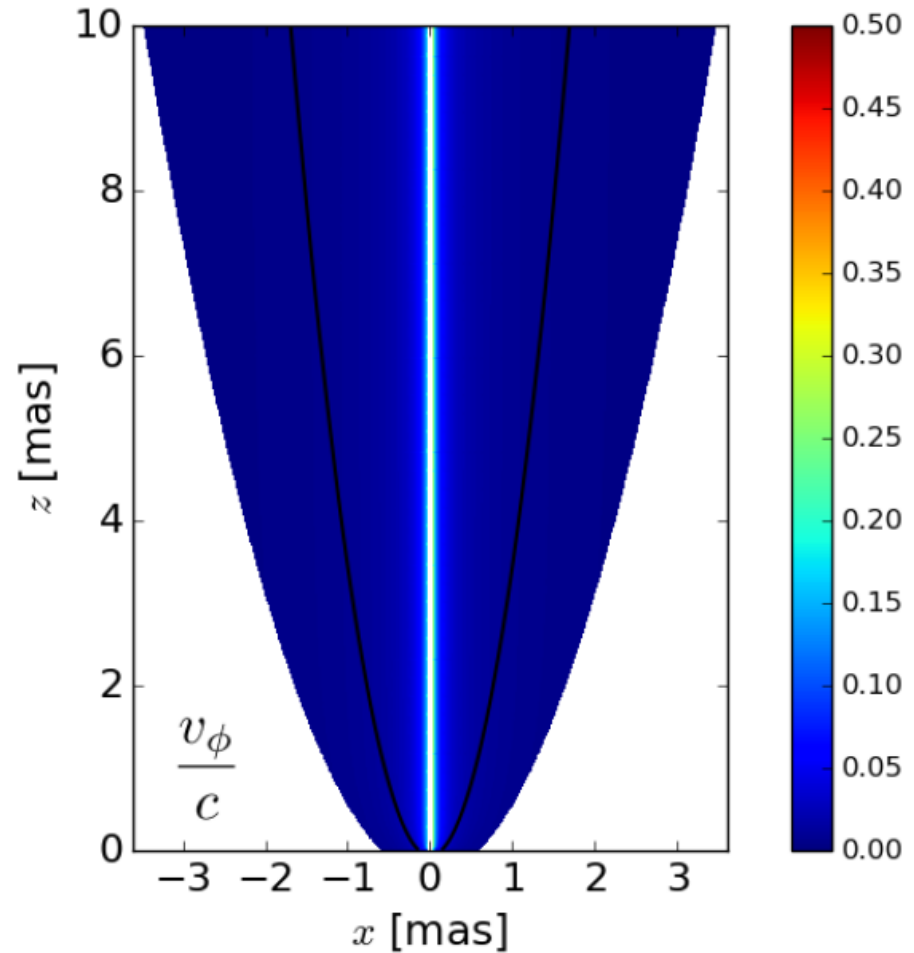
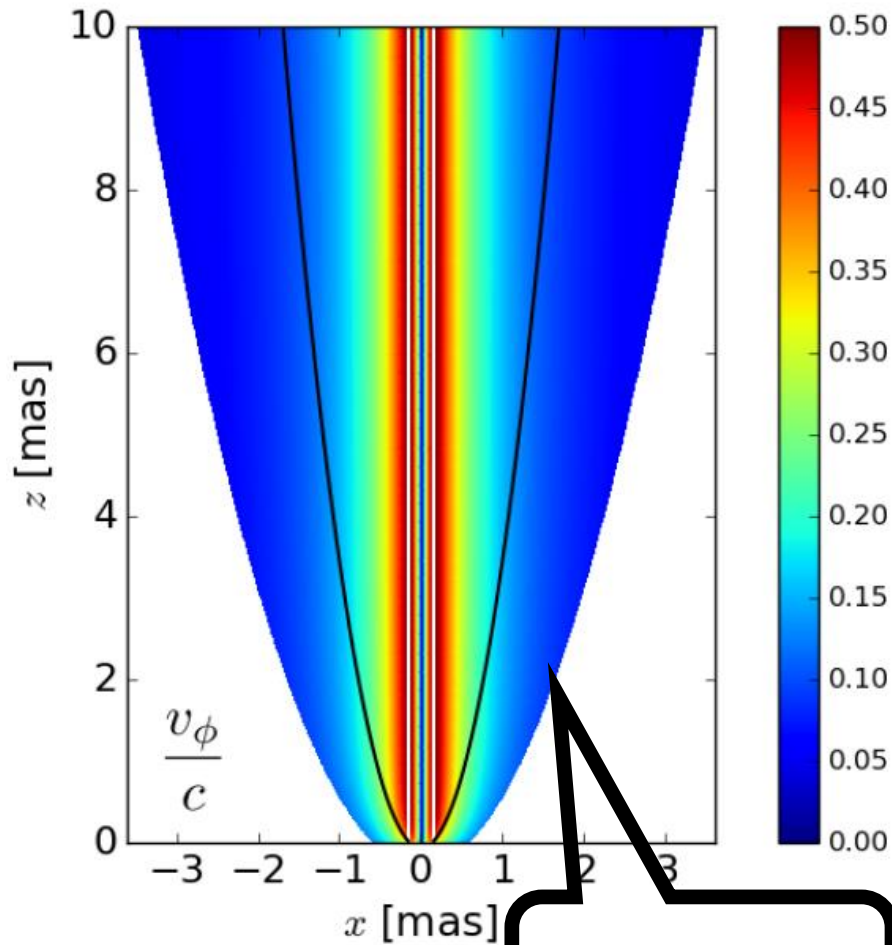
$$a = 0.998$$



$$\Omega_F = \Omega_{\text{BH}}/2 = \text{const.}$$

$$a = 0.1$$

$$a = 0.998$$

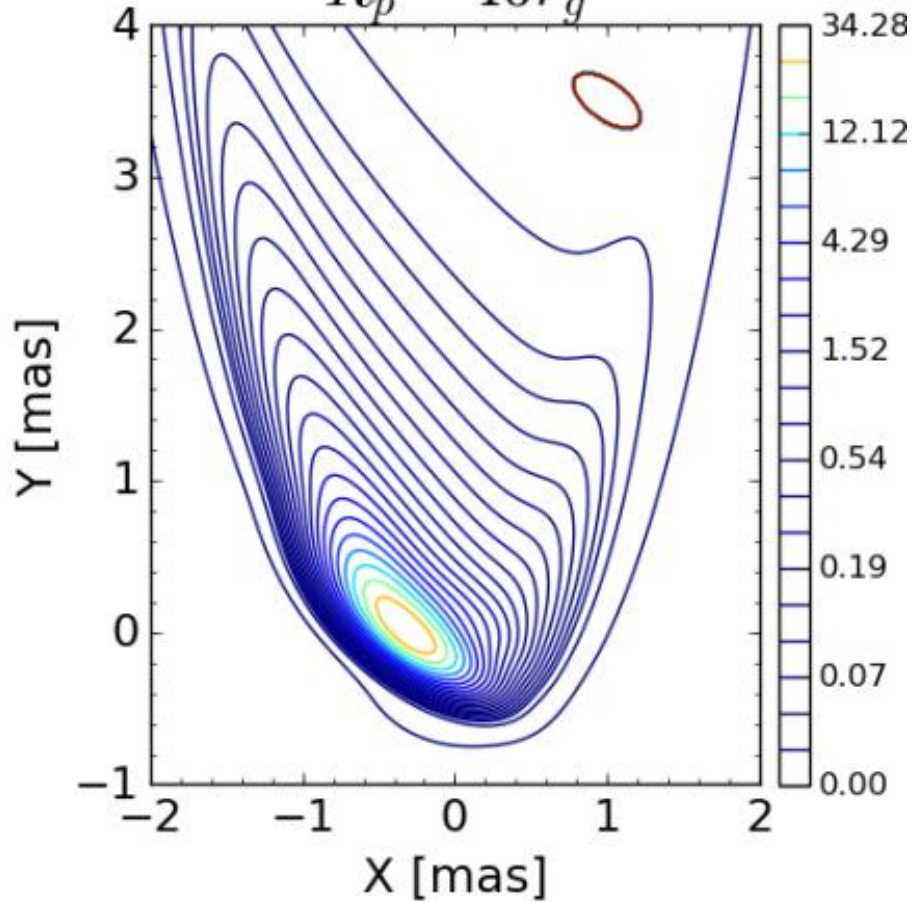


v_ϕ 大

復元された電波図：

$$a = 0.1$$

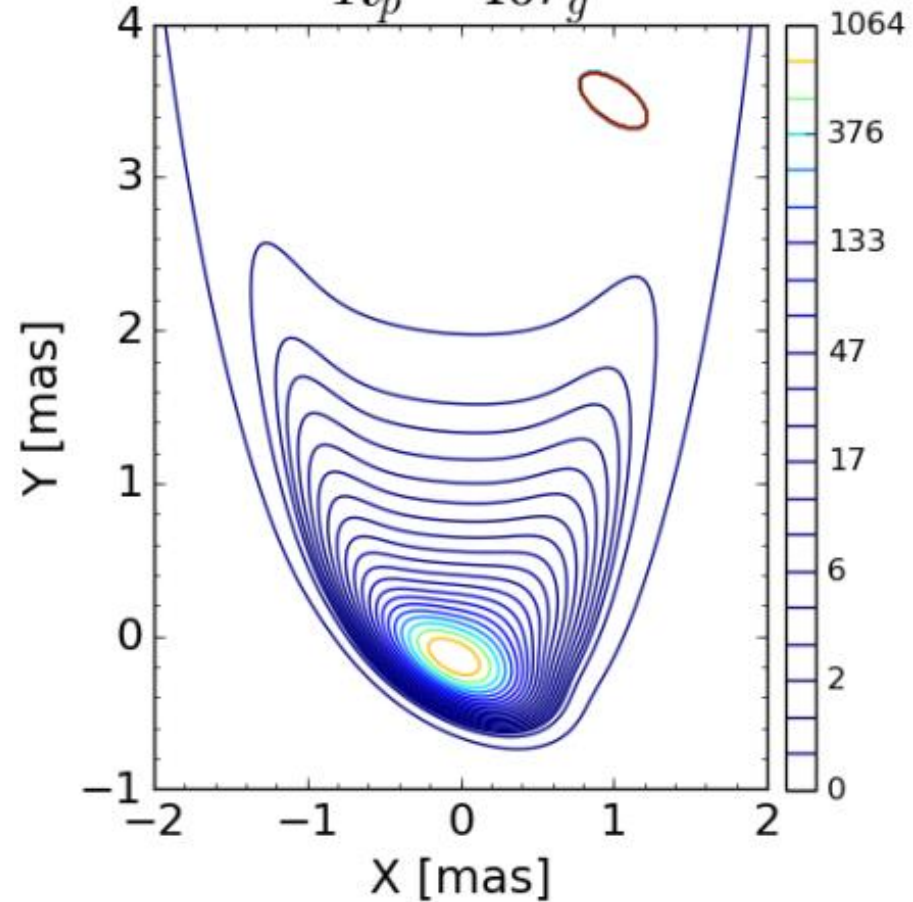
$$R_p = 40r_g$$



★ Limb-brighteningするが、
左右非対称

$$a = 0.998$$

$$R_p = 40r_g$$



★ 対称な Limb-brightening
★ 暗い counter jet

Summary

Force-freeジェットモデルを用いて、
ジェット構造と電波像の関係を調べた

結論

- ・ 磁場が降着円盤に突き刺さっている
→ 対称的なLimb-brightening を再現できない
 - ・ 電子がジェットの外側に分布
 - ・ 磁場がブラックホールを貫き、
ブラックホールの回転速度が速い
- } 対称な
Limb-brightening
+
暗い counter jet

遠方ジェットの観測から
中心部の情報を引き出せる可能性
→ Event Horizon Telescopeと相補的な研究

Related Issues

- ・ 非熱的電子の空間分布はどう決まるか（**加速機構**）
- ・ 各天体の limb brightening jet への詳細な fitting :
M87, Cyg A, Mrk 501, Mrk 421, ...
- ・ 最近判明した、M87ジェットの「**フォーク形構造**」は同様に説明できるか？
→ **荻原氏 (東北大) のポスター (P30)**

