

相対論的ジェット構造と 観測される電波像の関係

Relations between relativistic jet structures
and observed radio images

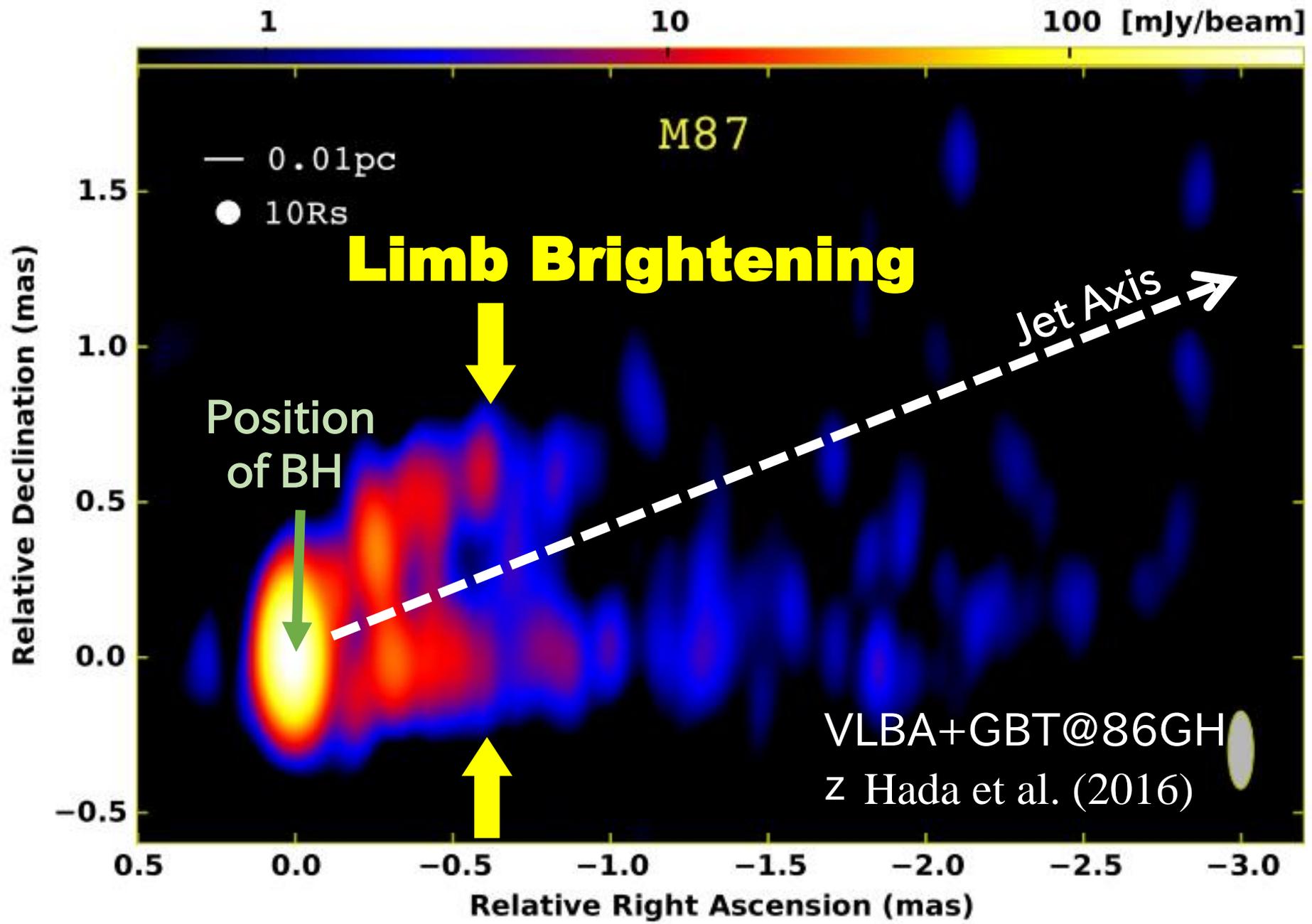
Kazuya Takahashi (Tohoku U)

Kenji Toma (Tohoku U)

Motoki Kino (Kogakuin U, NAOJ)

Masanori Nakamura (ASIAA)

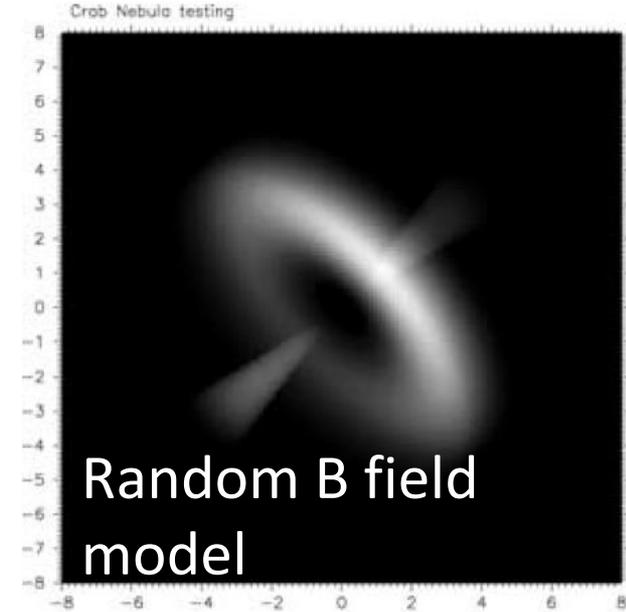
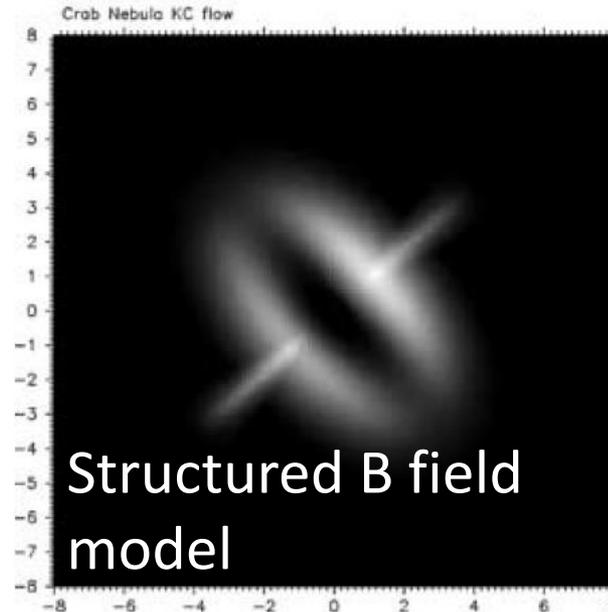
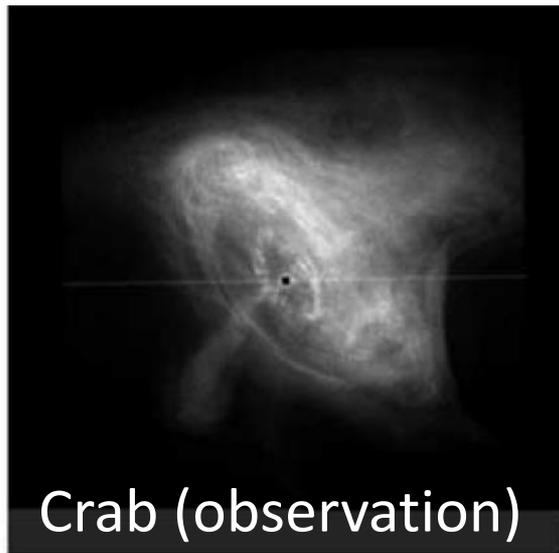
Kazuhiro Hada (NAOJ)



相対論的ジェットからのSynchrotron放射

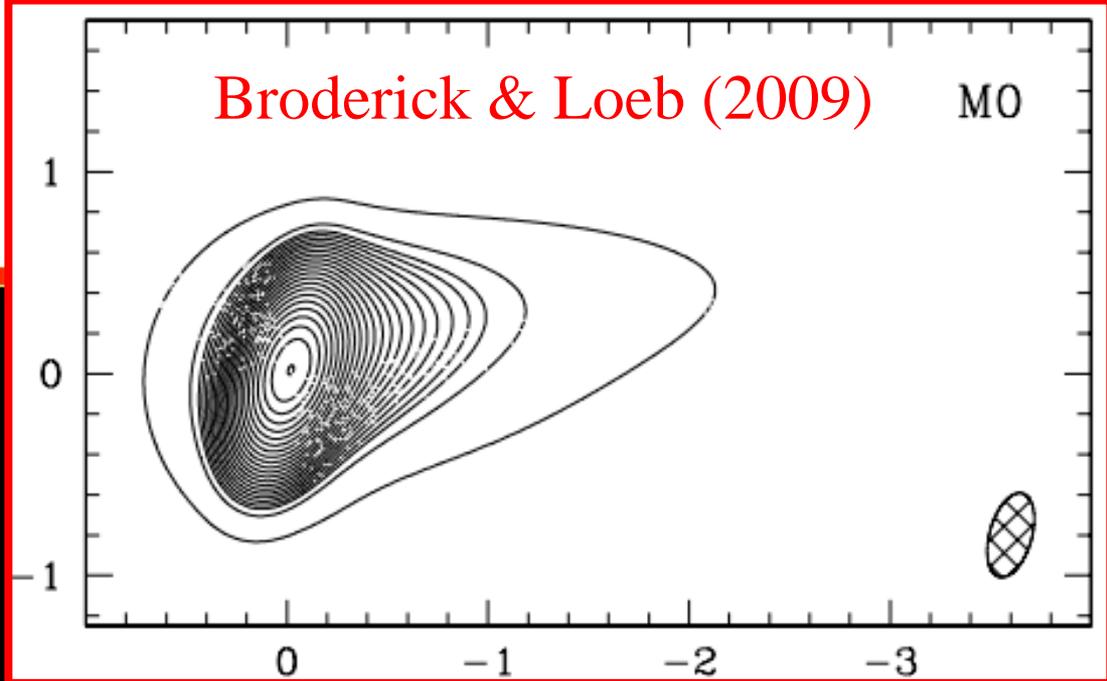
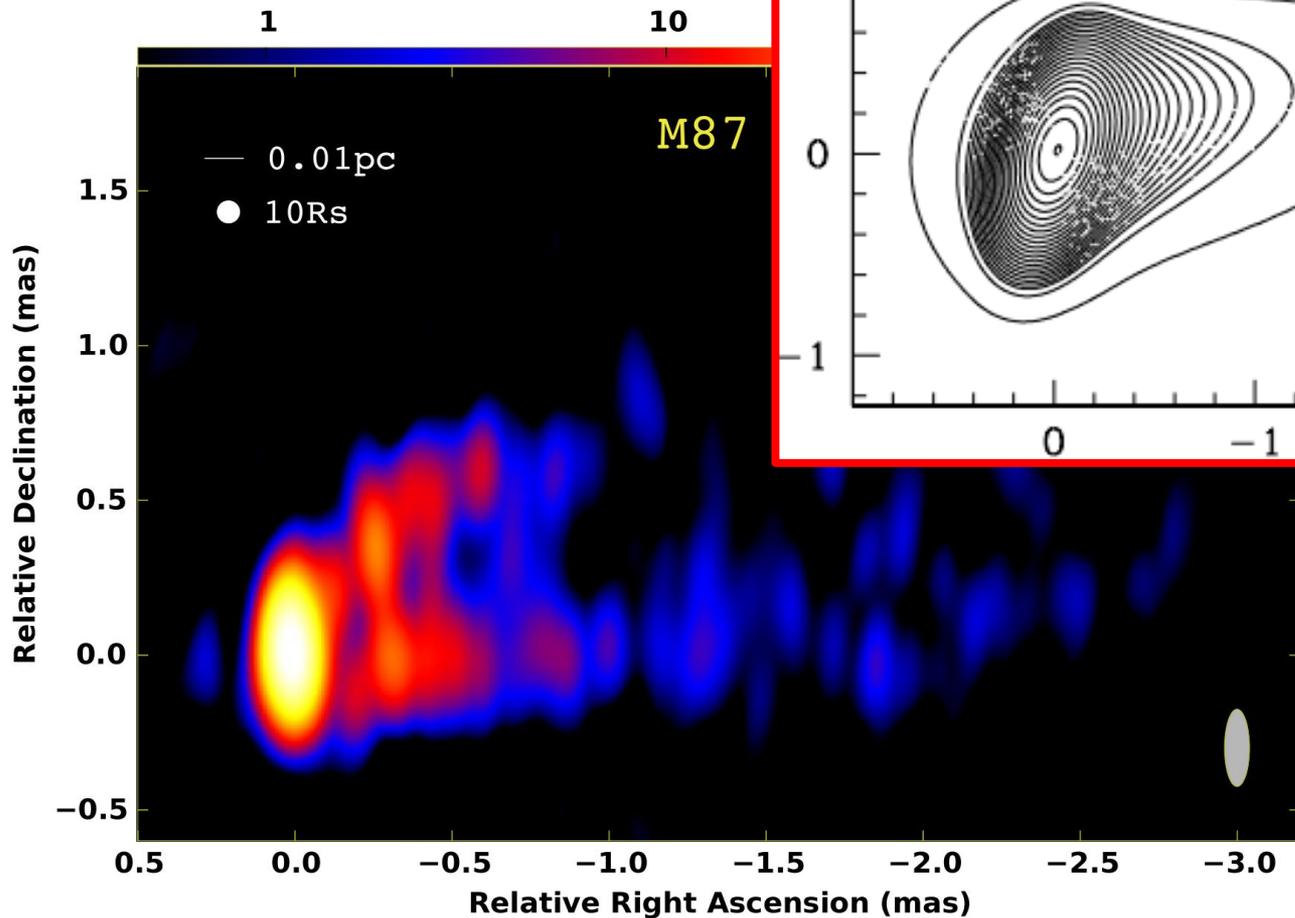
⇒ 速度場, 磁場の構造を反映

- ・ 相対論的ビーミング効果
- ・ 磁場の向きに対するSynchrotron放射の異方性



(Shibata+ 2003)

⇒ 観測される電波像からジェット構造に制限



従来のForce-Free モデルに基づいた場合、
Limb brightening は再現できないのか

Motivation

Limb brightening はM87の際立った特徴の1つ。

★ Limb-brightening からジェット構造に制限ができないか

Method

BL09モデルを利用する

★ M87 の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

→ BLog のForce-Free モデルに基づくが、
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 はM87の際立った特徴の1つ.

★ Limb-brightening からジェット構造に制限ができないか

Jet magnetic field goes through.....

○ the central black hole

× the accretion disk

★ 電波の放射機構は相対論的電子のシラフシラフシラフ放射を仮定

→ BLog のForce-Free モデルに基づくが、
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

定常軸対称 force-free モデル (BL09)

流れ関数：磁場の形状を与える

$$\Psi = Ar^\nu (1 \mp \cos \theta)$$

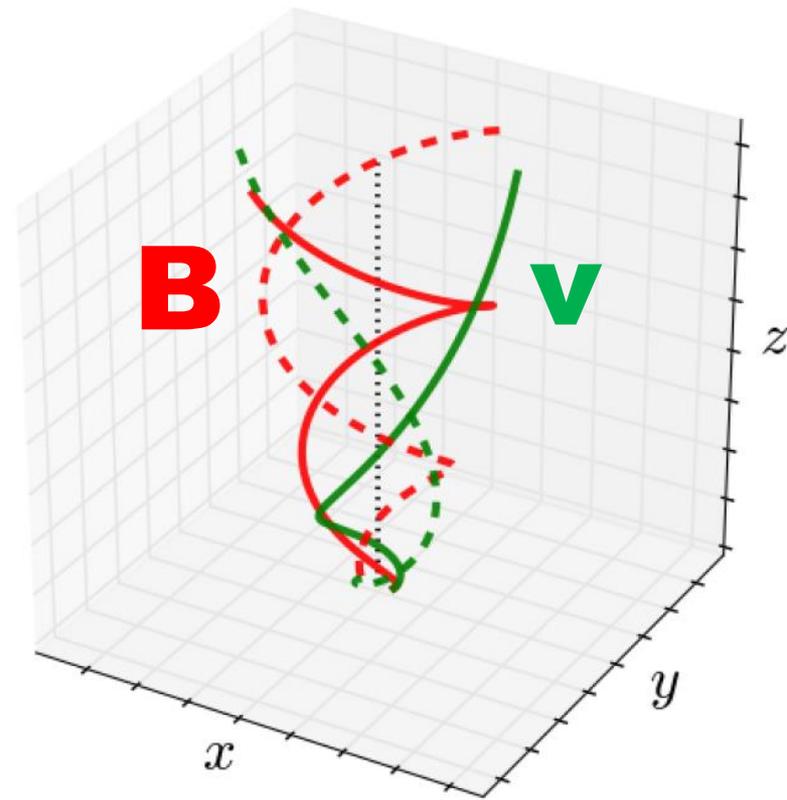
電磁場：

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

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

速度場：

$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2} c, \quad (\text{ドリフト速度})$$



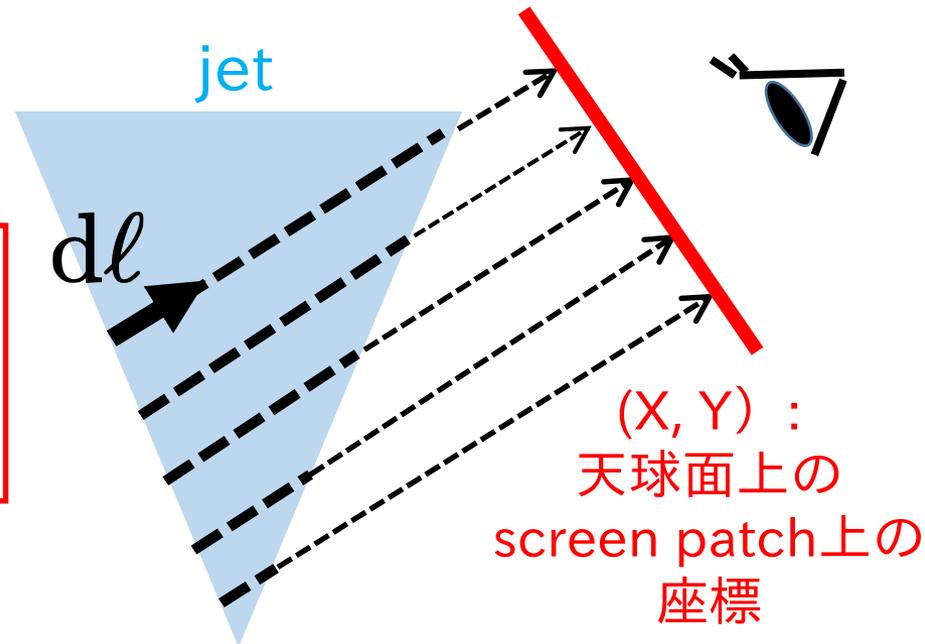
Paraboloidal jet with helical fields

放射計算

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

非熱的相対論的電子の速度分布を仮定（詳細後述）し、
各点でのシンクロトロン放射率を計算する

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



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

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

Parameters

New!!

→ 以降のスライドでより詳しく説明

★ 非熱的電子の空間分布

★ 磁場が刺さる場所 (赤道面での境界条件)

$$\text{ブラックホール} \leftrightarrow \Omega \propto \Omega_{\text{BH}} = \text{const.}$$

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

★ ブラックホール質量, Kerrパラメタ:

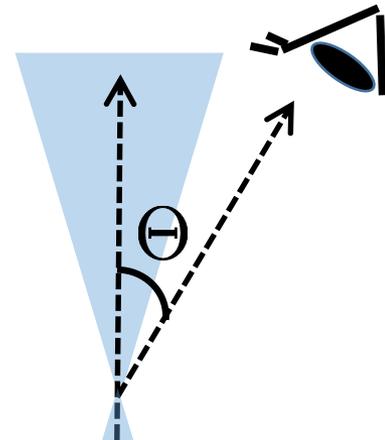
$$M_{\text{BH}} = 3.4 \times 10^9 M_{\odot} \quad a = 0.1 - 0.998$$

★ 電子のエネルギー分布:

$$f \propto n' \gamma^{-p} \quad p = 1.1 \quad \gamma_{\text{min}} = 100 \quad \gamma_{\text{max}} = \infty$$

★ viewing angle:

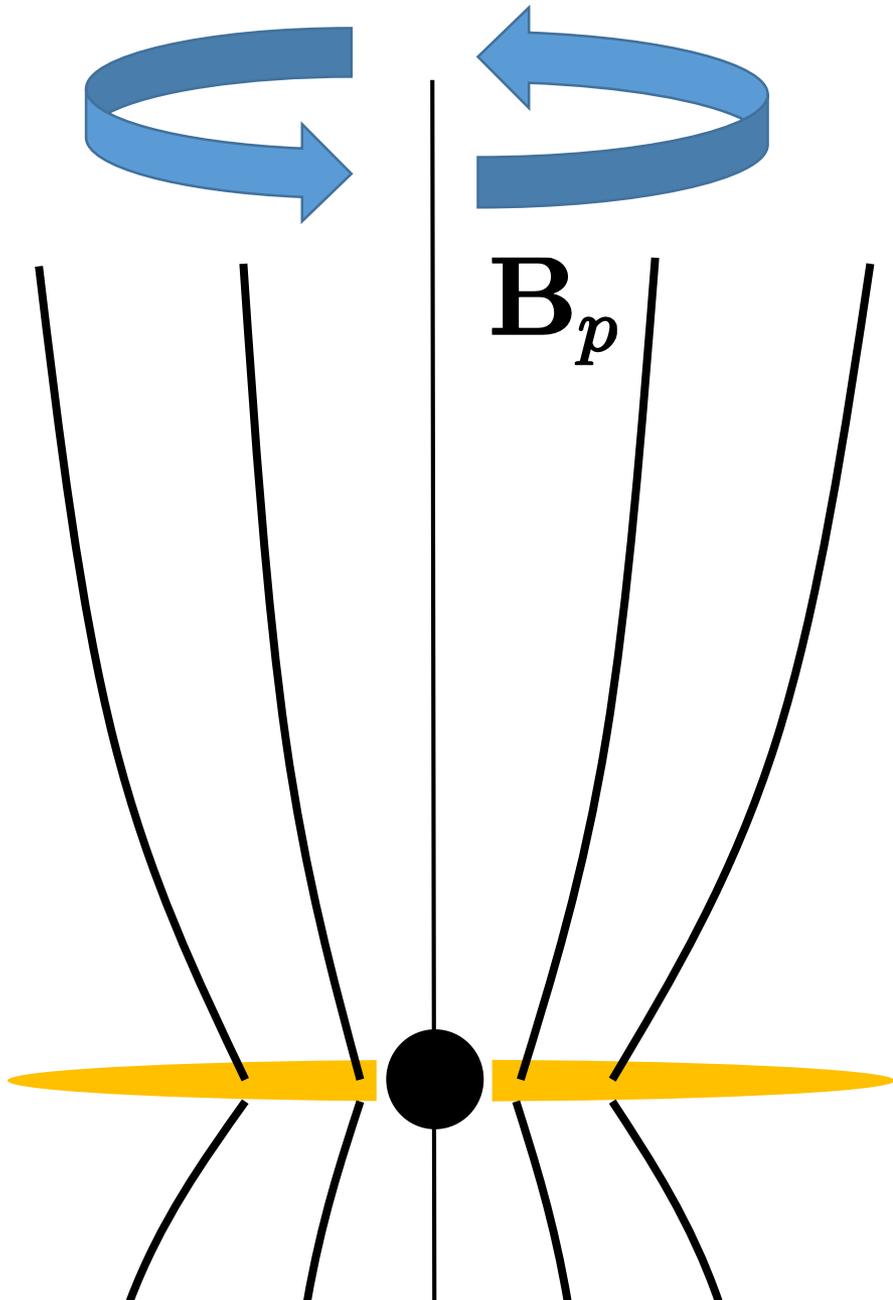
$$\Theta = 25^{\circ}$$



磁場が
accretion disk
をつらぬく場合

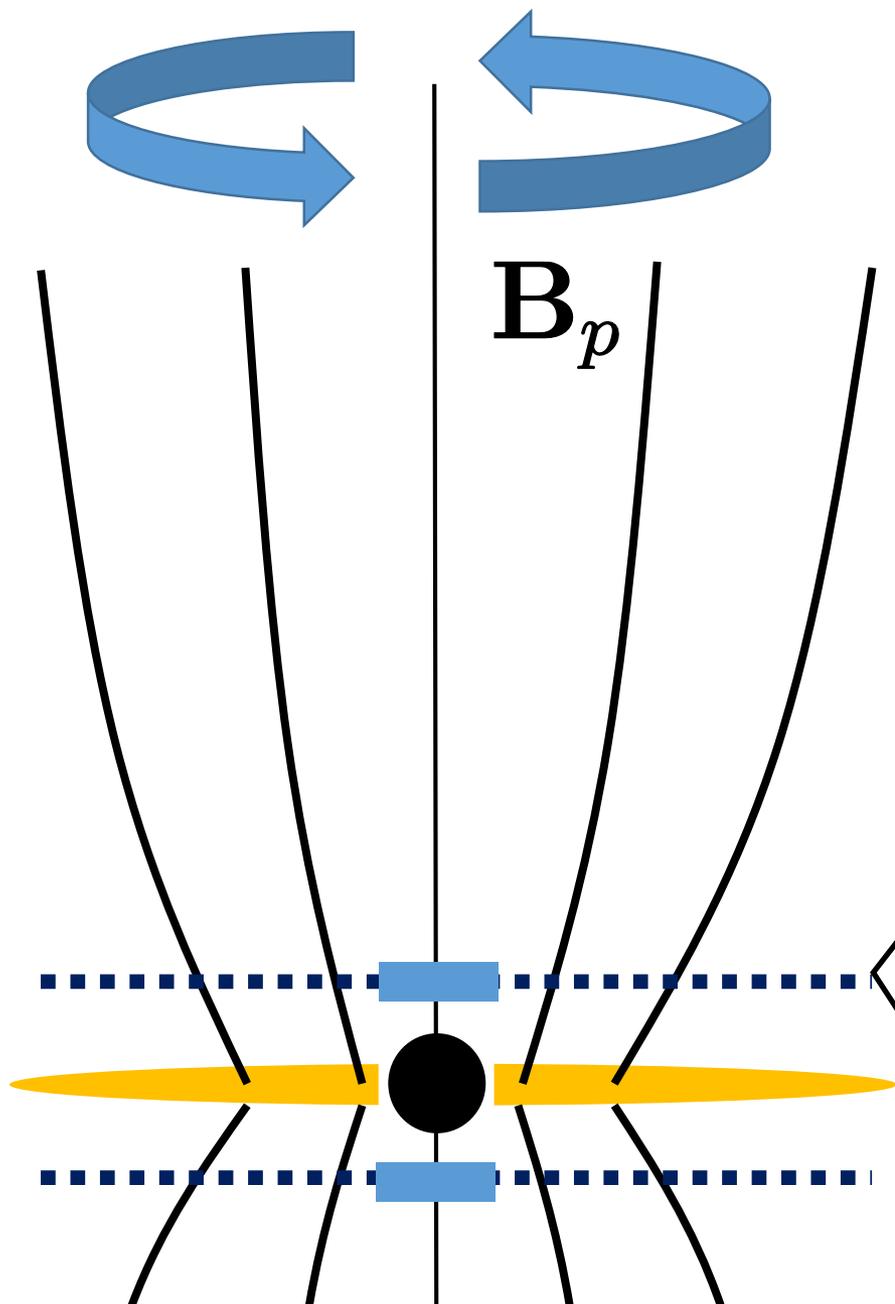
$$\Omega = \Omega_{\text{Kep}} \propto R^{-3/2}$$

(includes BL09)



$$\Omega = \Omega_{\text{Kep}} = \sqrt{\frac{GM}{R^3}}$$

BL09 の電子分布



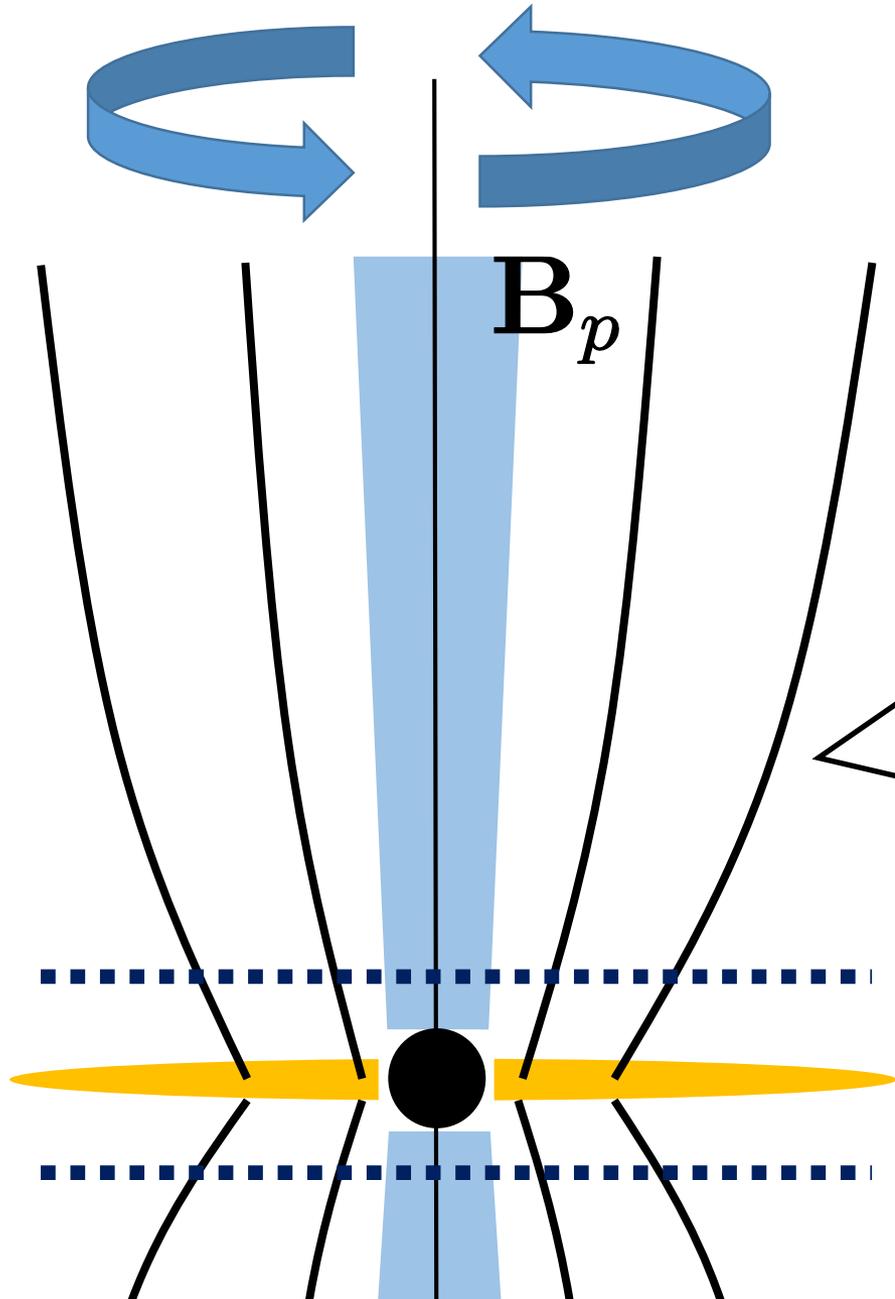
\mathbf{B}_p

$$\Omega = \Omega_{\text{Kep}} = \sqrt{\frac{GM}{R^3}}$$

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

$\Delta = 5r_g$

BL09 の電子分布



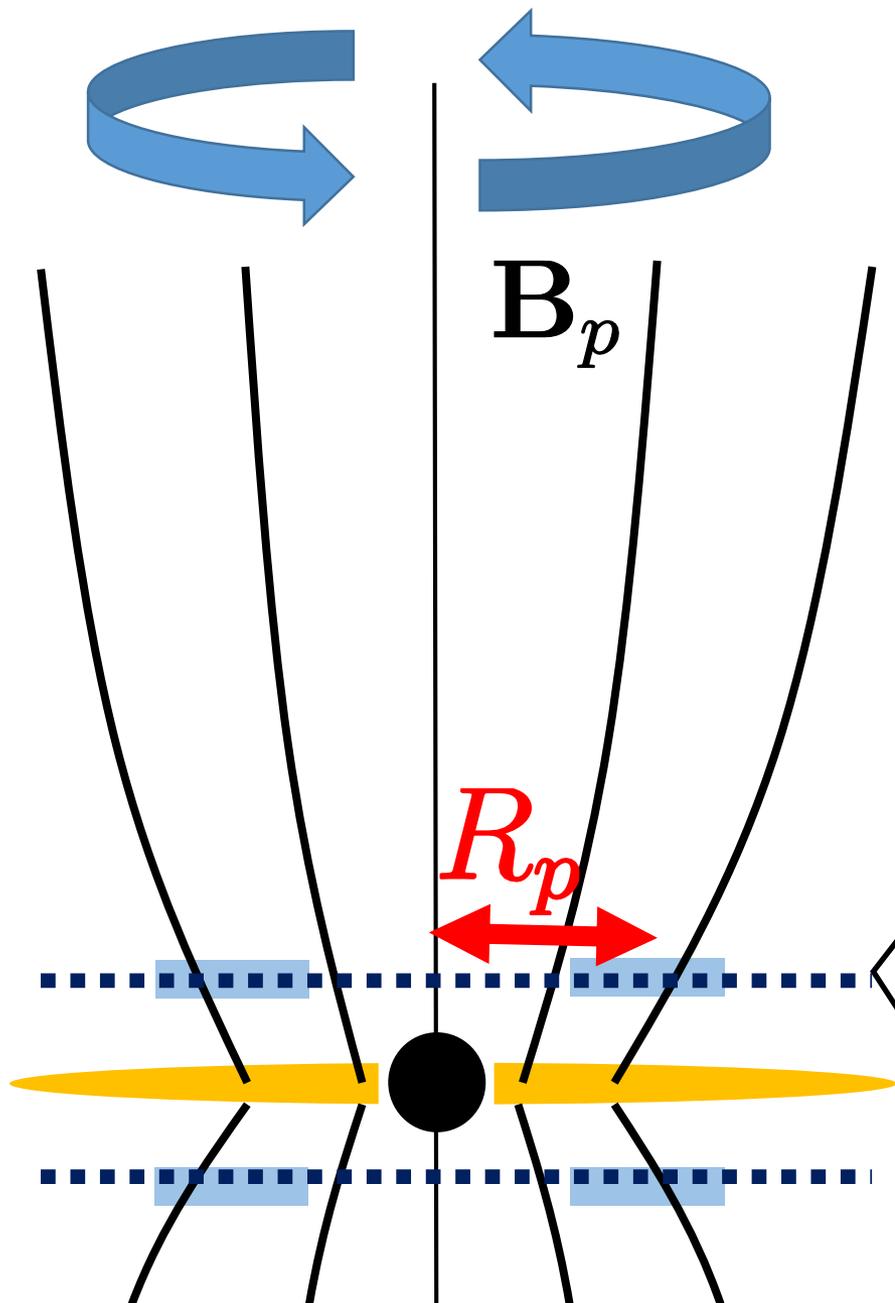
$$\Omega = \Omega_{\text{Kep}} = \sqrt{\frac{GM}{R^3}}$$

連続の式：

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

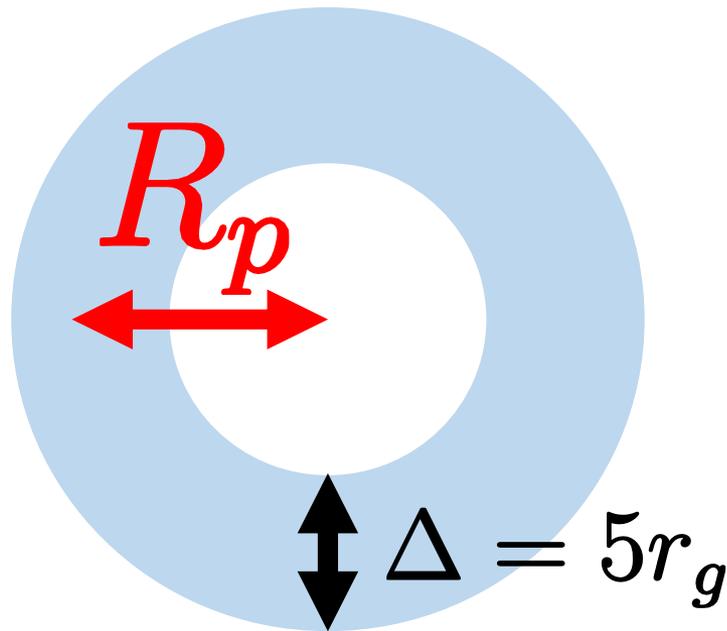
along a field line

New!!

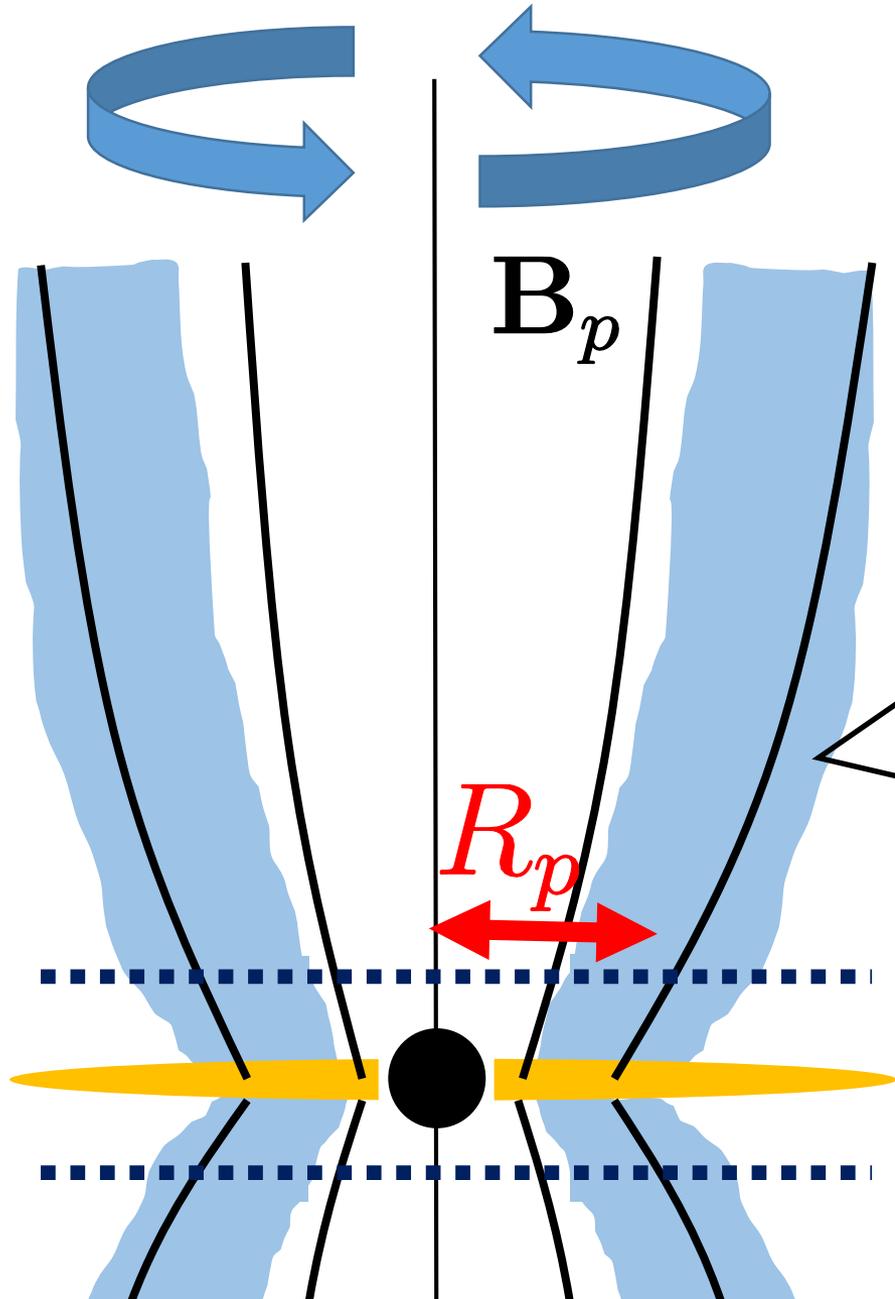


$$\Omega = \Omega_{\text{Kep}} = \sqrt{\frac{GM}{R^3}}$$

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



New!!

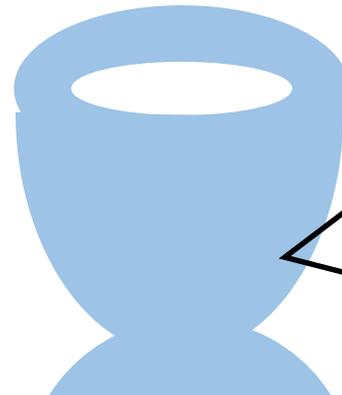


$$\Omega = \Omega_{\text{Kep}} = \sqrt{\frac{GM}{R^3}}$$

連続の式：

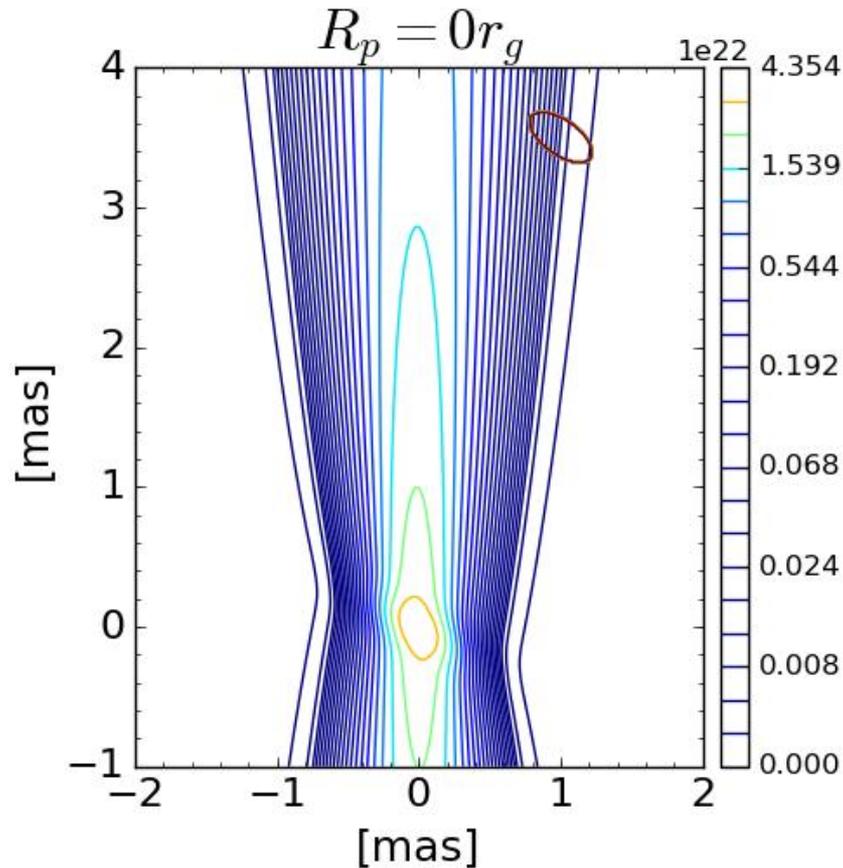
$$\frac{n}{B^2} = \text{const.}$$

along a field line

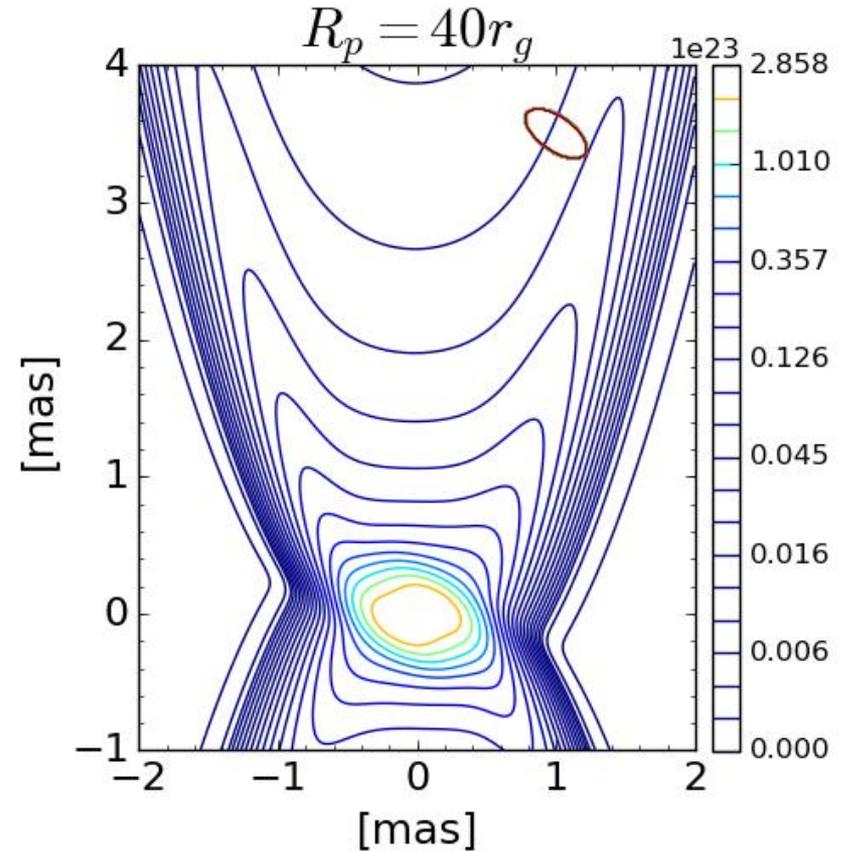


電子は中空の筒状に分布

Convolved column density images for Kepler

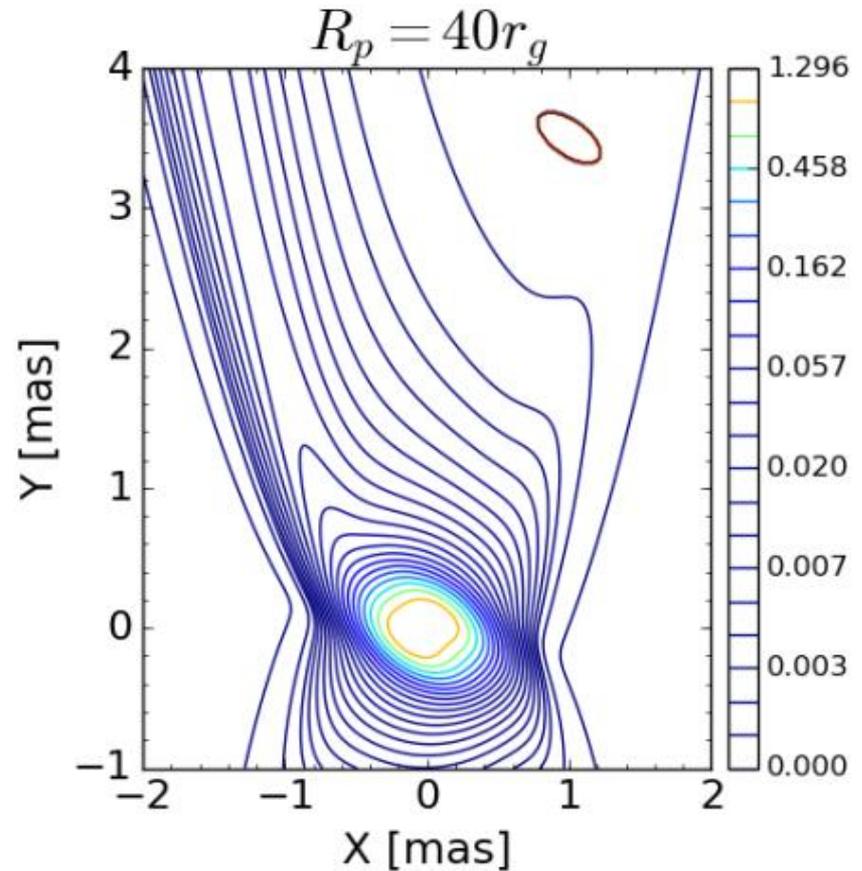
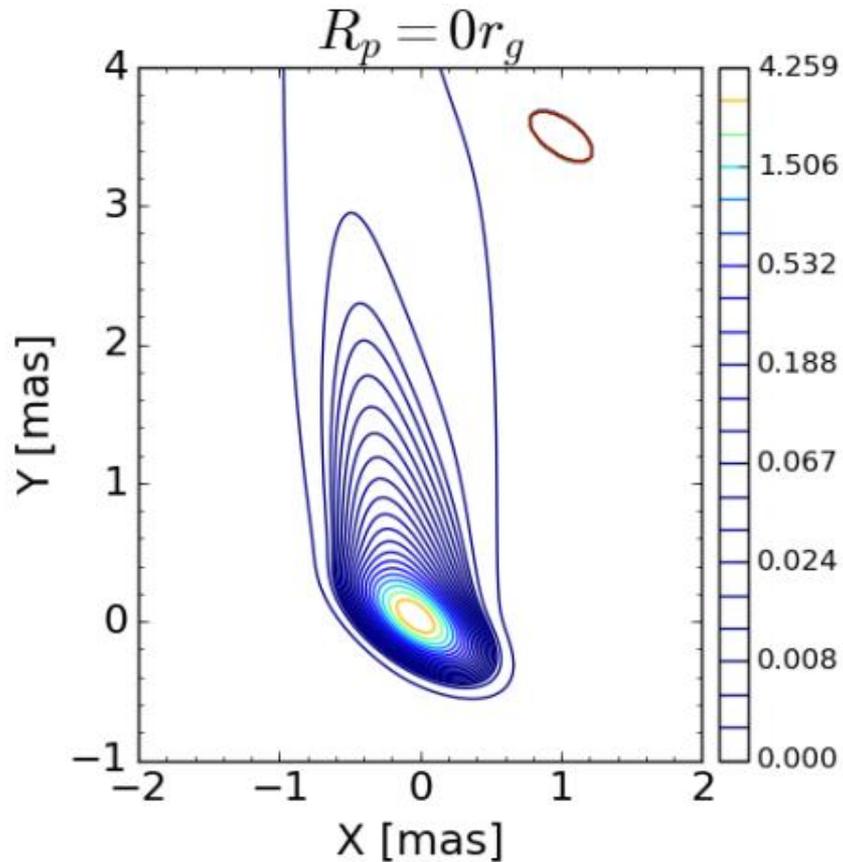


$R_p = 0$:
BL09 のモデルと同じパラメタ
→ 電子は軸付近に存在



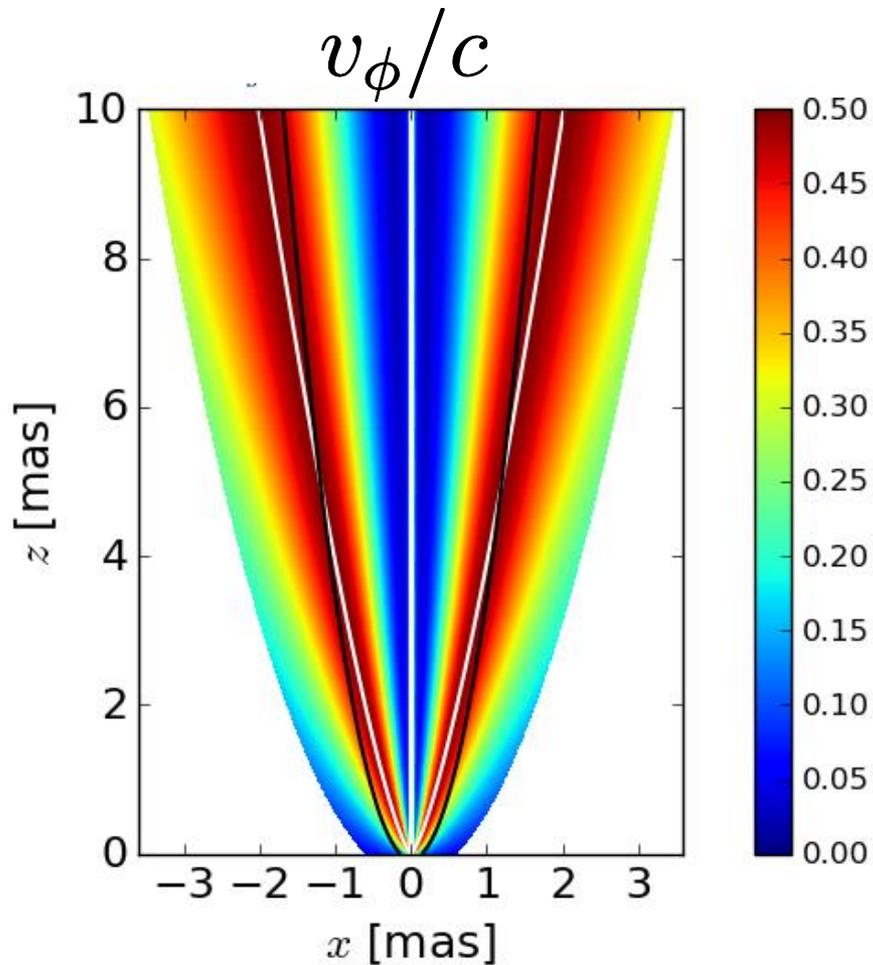
$R_p = 40 r_g > 0$
→ 電子は軸から
離れた位置に存在

Case 1: Magnetic Field Threaded through the Disk

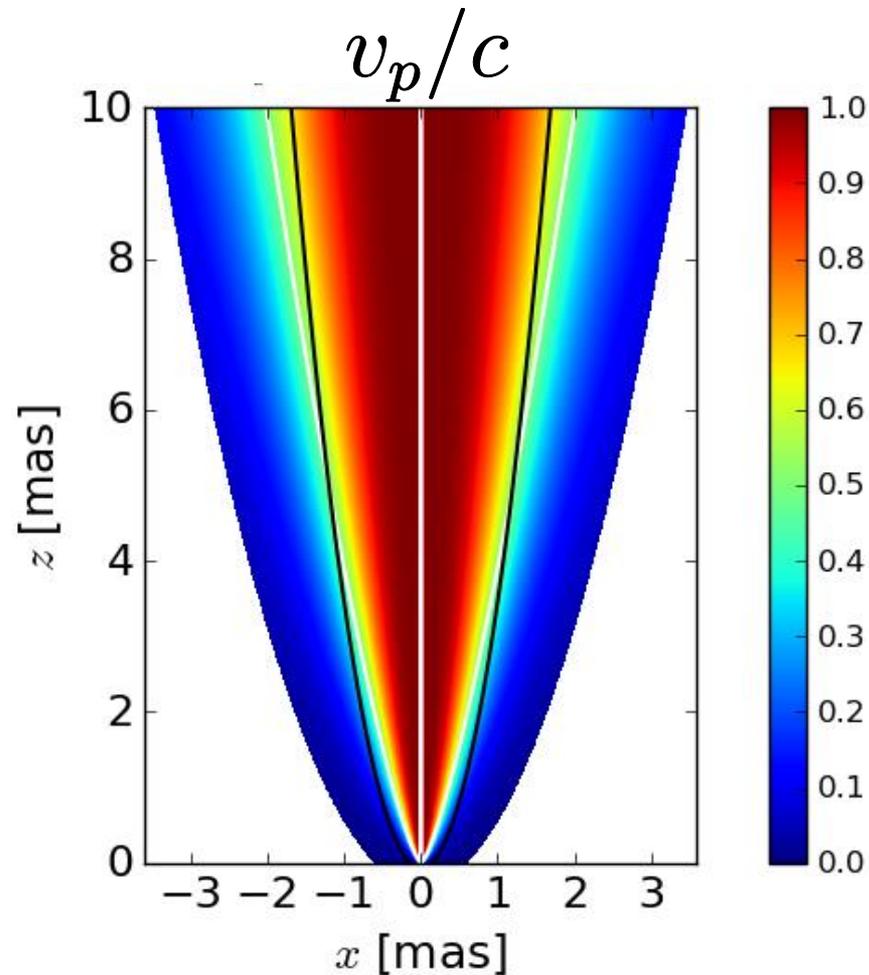


$R_p = 0$:
BL09 のモデルと同じパラメタ
→ limb-brightening しないこと
を再確認

$R_p = 40 r_g > 0$
→ 1. 像が非対称
2. counter jet が明るい



v_ϕ が大きいから
非対称性が生まれる



v_p が小さいから
ビーミングが弱く、
Counter jet が明るい

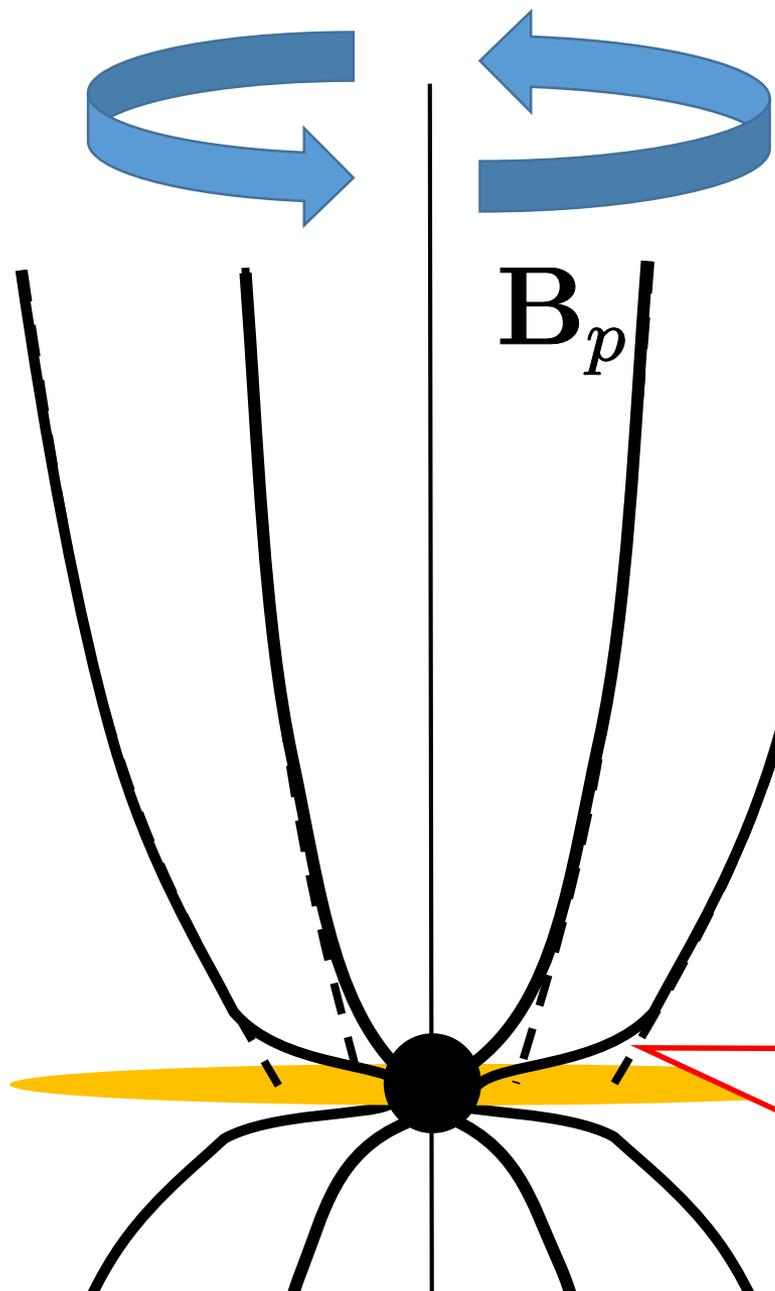
$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2} c = -R\Omega_F \frac{B_\phi}{B^2} \mathbf{B}_p + R\Omega_F \frac{B_p^2}{B^2} \hat{\phi}$$

Ω : BH mass で決まる
→ 速度場の不定性は小

磁場がBHを
つらぬく場合

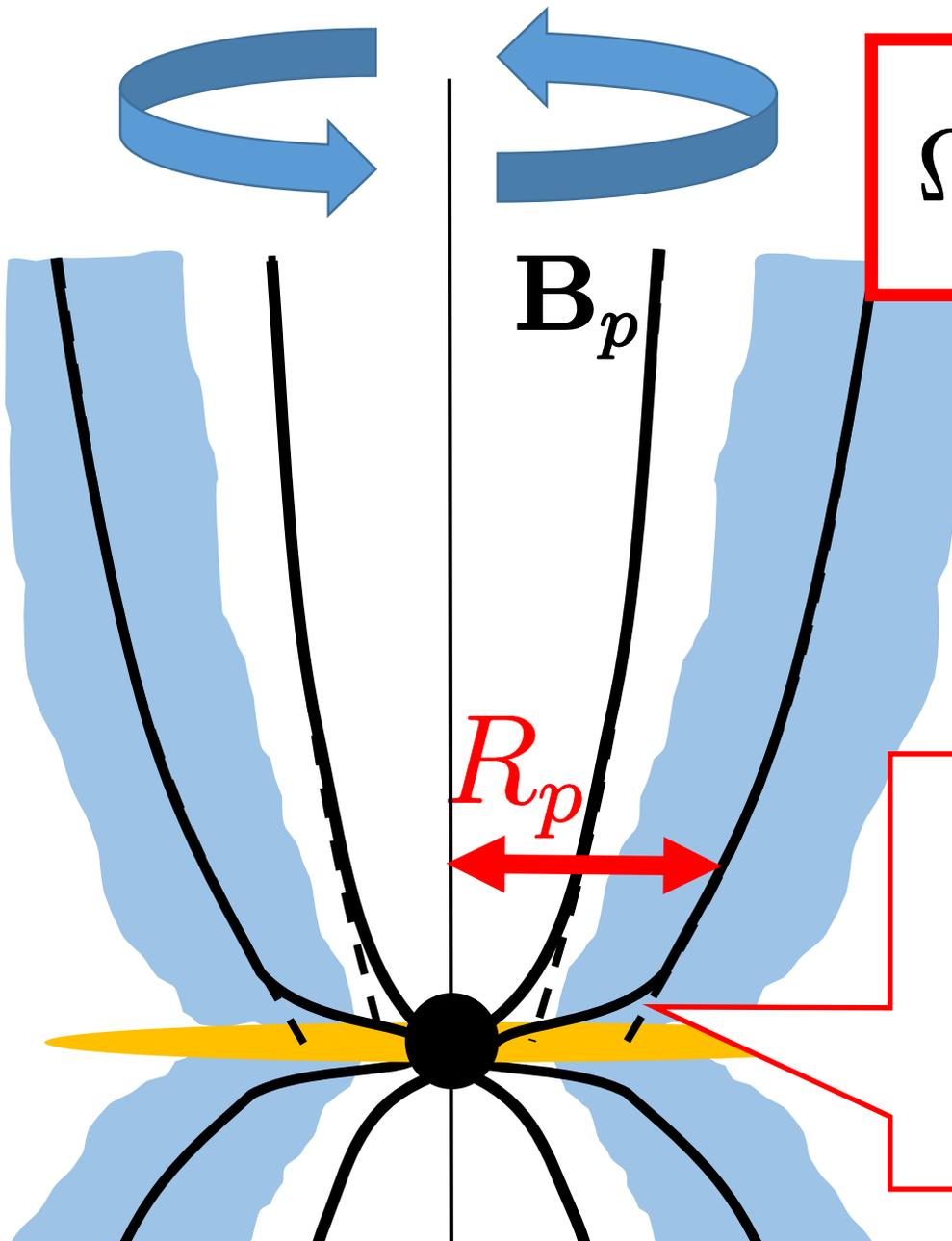
$$\Omega = \frac{1}{2}\Omega_{\text{BH}} = \text{const.}$$

(New!)



$$\Omega = \frac{1}{2} \Omega_{\text{BH}} = \text{const.}$$

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

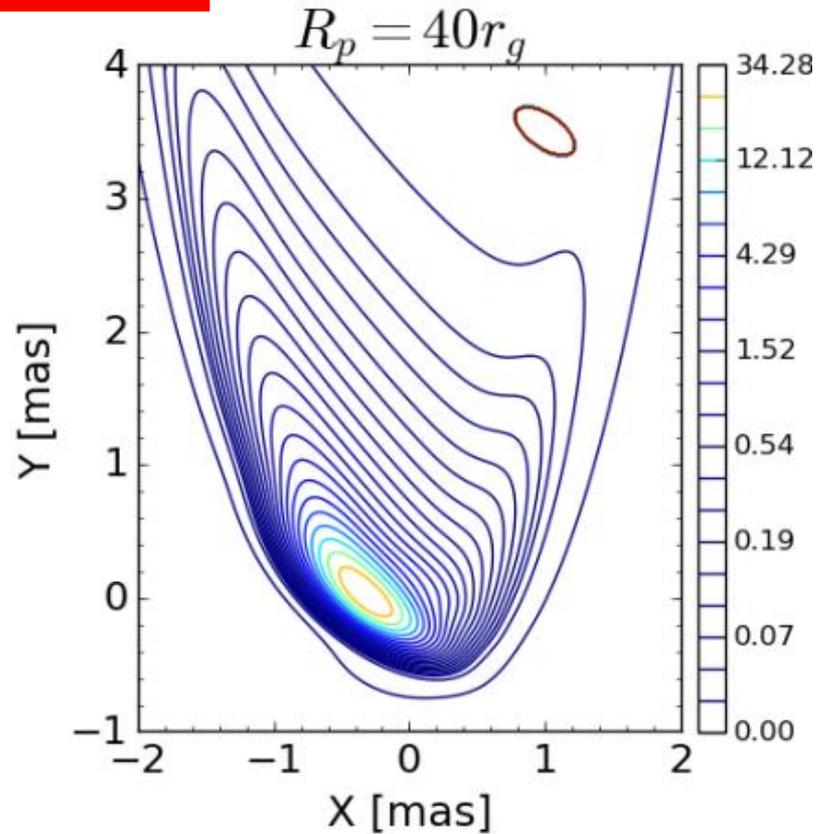
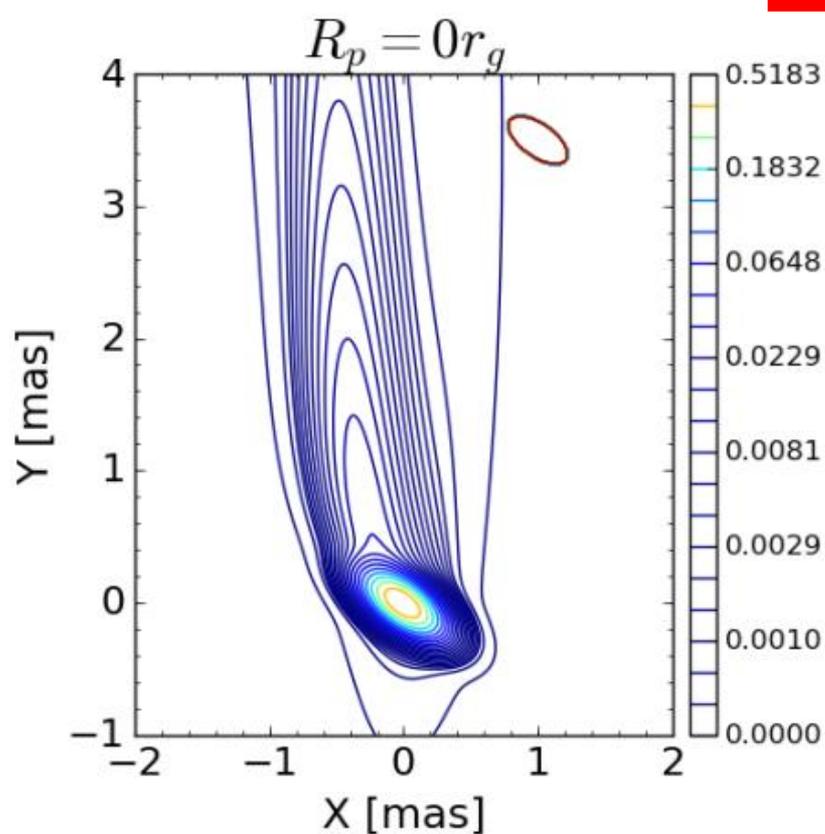


$$\Omega = \frac{1}{2} \Omega_{\text{BH}} = \text{const.}$$

電子分布

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

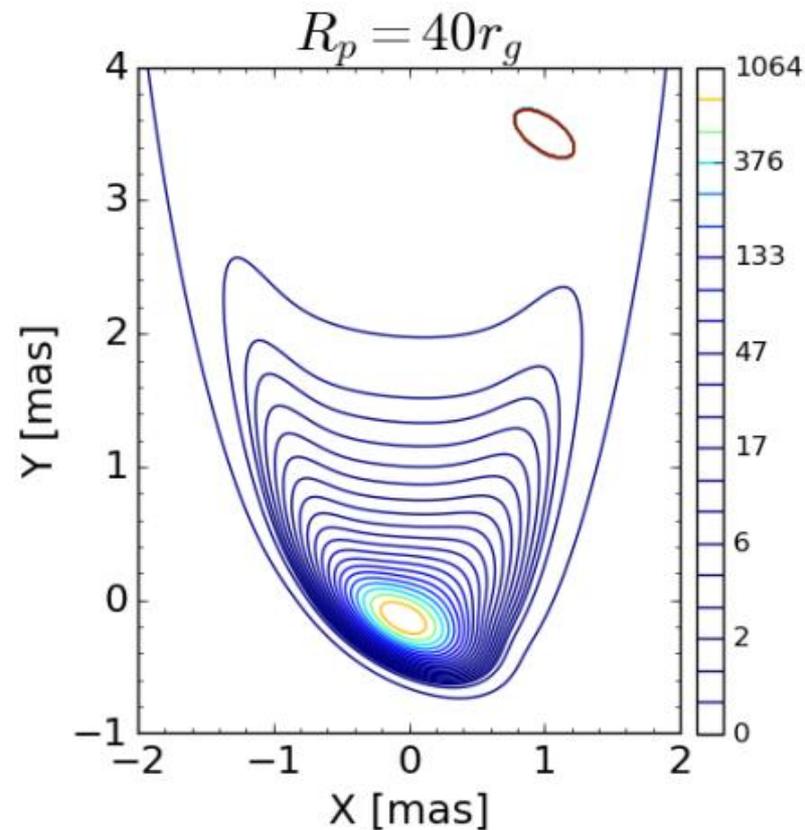
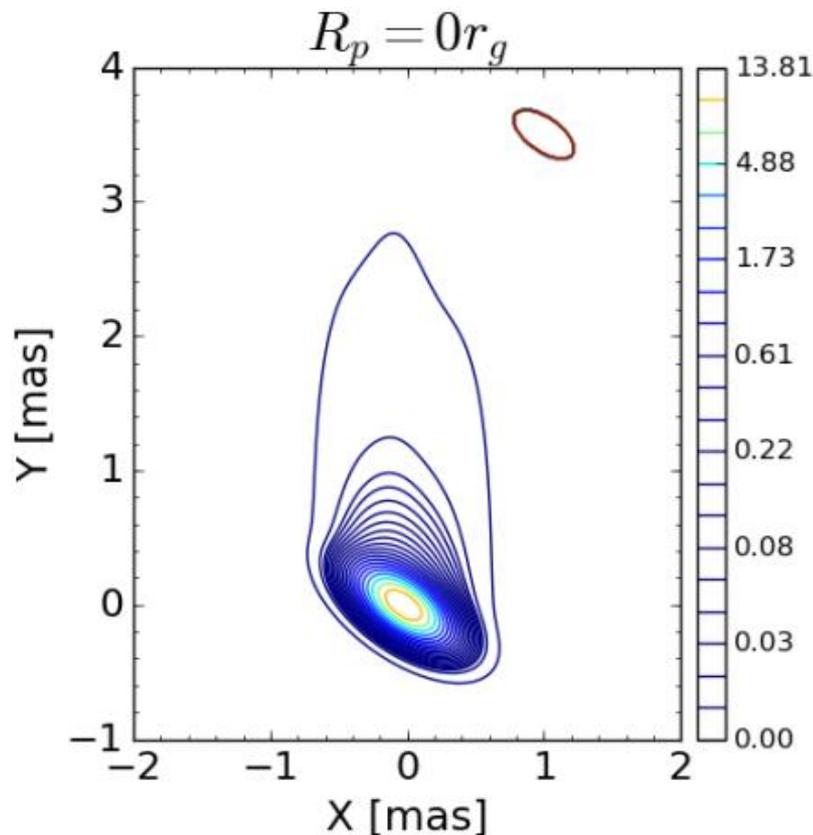
Slowly spinning BH $a = 0.1$



$R_p = 0$:
→ limb-brightening しない
かつ非対称性が大きい

$R_p = 40 r_g > 0$
→ 1. 像が非対称
2. counter jet は暗い

Fast-spinning BH $a = 0.998$



$R_p = 0$:

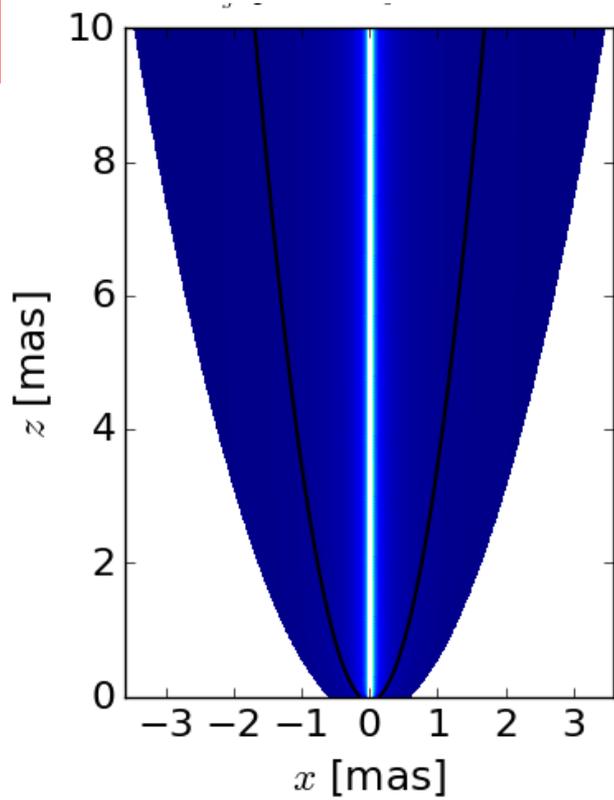
→ limb-brightening しない
(やや非対称性が小さいが、
大雑把にはKeplerと同じ)

$R_p = 40 r_g > 0$

→ 1. 像が対称
2. counter jet が暗い

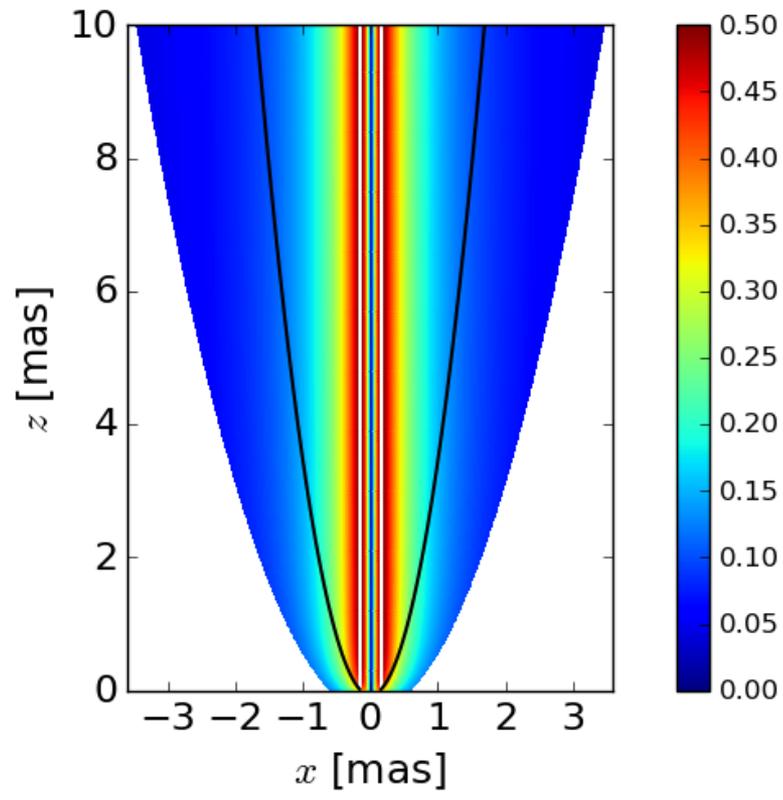
$$v_\phi/c$$

Fast $a = 0.998$



$$R_{\text{LC}} \sim 2r_g$$

Slow $a = 0.1$



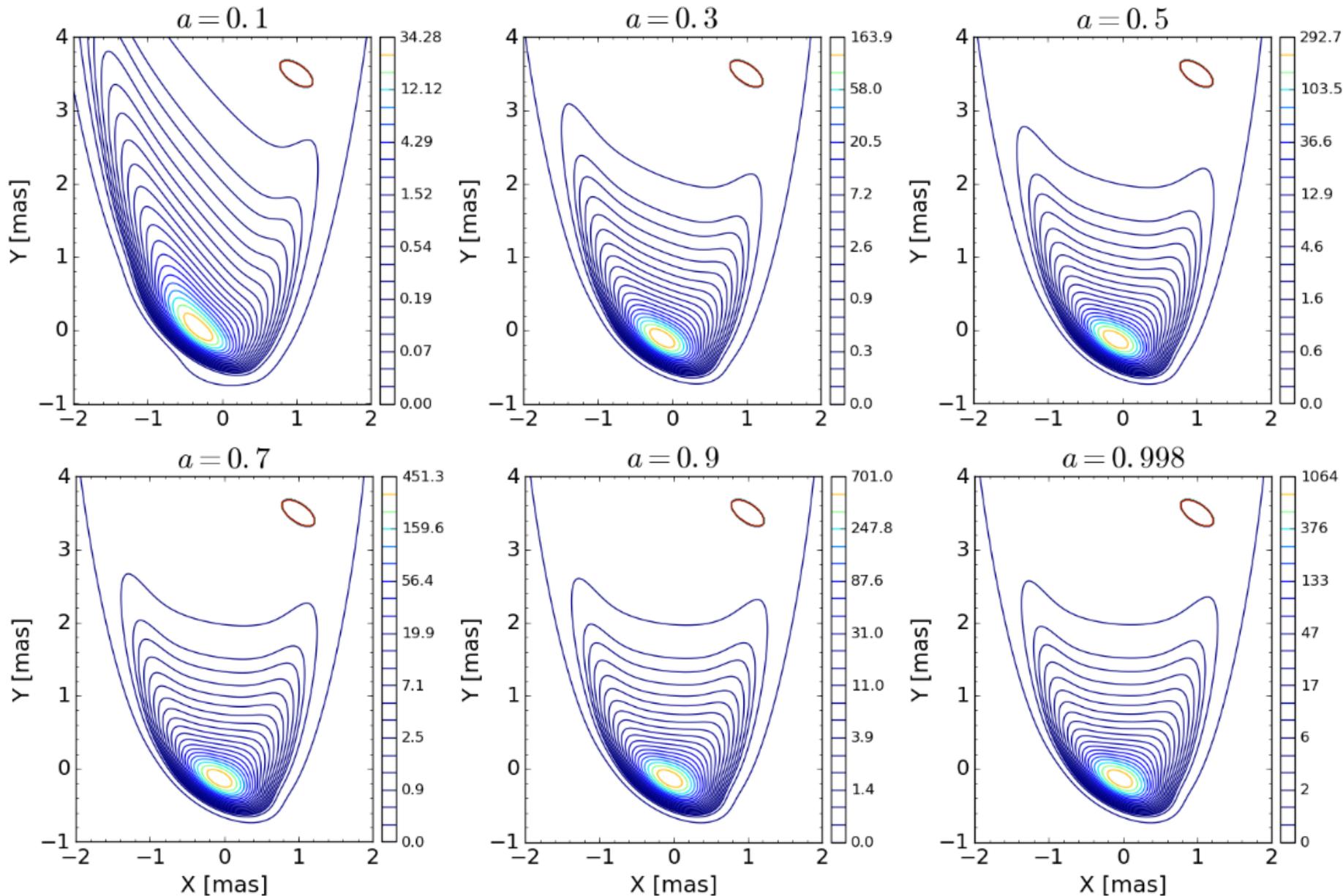
$$R_{\text{LC}} \sim 40r_g$$

$$R|\Omega_F|/c \gg 1$$

$$\beta_\phi := \frac{|v_\phi|}{c} \sim \frac{R|\Omega_F|}{c} \frac{B_p^2}{B_\phi^2} = \left(\frac{R|\Omega_F|}{c} \right)^{-1} [f(\theta, \nu)]^2 \ll 1$$

→ a を小さくする $\Rightarrow \Omega$ が小さくなる $\Rightarrow v_\phi$ が大きくなる
 \Rightarrow 非対称性が大きくなる

Kerr parameter 依存性



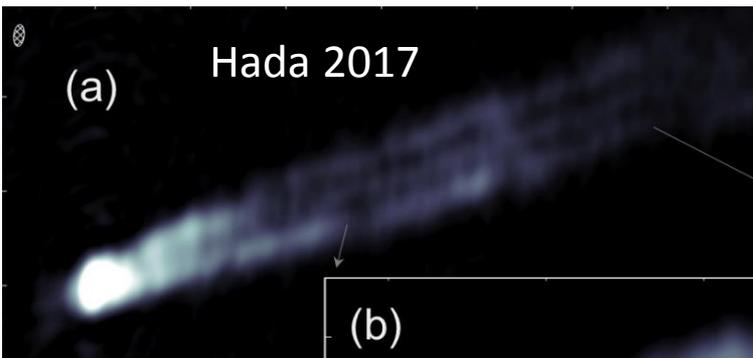
Kerr parameter 大 \rightarrow 電波像は対称

Summary

Force-free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場合は、M87の 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
+
Hidden counter jet



How about
the fork-like structure?
→ T. Ogiwara's poster