

# MHD wave propagation in a black hole magnetosphere

愛知教育大学 修士2年

伊豆丸 翔

# Introduction

## <<宇宙ジェット>>

中心核(ブラックホールなど)から  
細く絞られたビーム流が  
極方向に放出されている

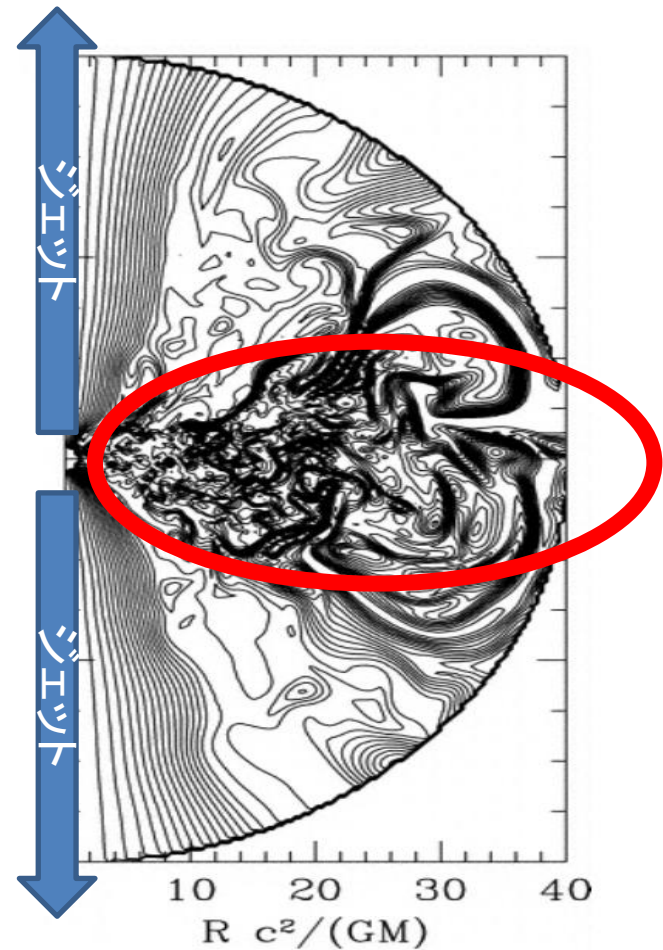


BH磁気圏における  
エネルギー伝播方向を議論

➡ ジェット形成へ

先行研究として

## <<Kerr BH磁気圏>>



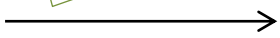
C. McKinney and F. Gammie 2004

# <<波(エネルギー)の伝播を求める手順>>

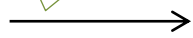
幾何光学近似  
(波長が系の物理量の特徴的長さよりも十分に小さいとみなす近似)

フェルマーの原理より

波動方程式



Eikonal 方程式



正準形式に書き直す

Eikonal 方程式

$$H(x^\mu, \psi, \nu) \equiv A^{\alpha\beta} \psi_{,\alpha} \psi_{,\beta} = 0$$

$H$  : ハミルトニアン  $\psi_{,\alpha} = p_\alpha$   
 $A^{\alpha\beta}$  : メトリック

正準形式

$$\dot{x}^\alpha(\lambda) = \frac{\partial H(x^\alpha, \psi, \alpha)}{\partial p_\alpha}$$

$$\dot{p}_\alpha(\lambda) = \frac{\partial H(x^\alpha, \psi, \alpha)}{\partial x^\alpha}$$

メトリック

真空中(光の伝播)

$$g^{\alpha\beta} \quad (\text{Kerr BH メトリック})$$

相対論的磁気流体中(磁気流体波の伝播)

$$M^{\alpha\beta} = g^{\alpha\beta} - \left(1 - \frac{1}{V_{FW}^2}\right) u^\alpha u^\beta$$

相対論的流体中(音波の伝播)

$$s^{\alpha\beta} = g^{\alpha\beta} - \left(1 - \frac{1}{V^2}\right) u^\alpha u^\beta$$

$M^{\alpha\beta}$  magnetosonic metric

$s^{\alpha\beta}$  sound metric

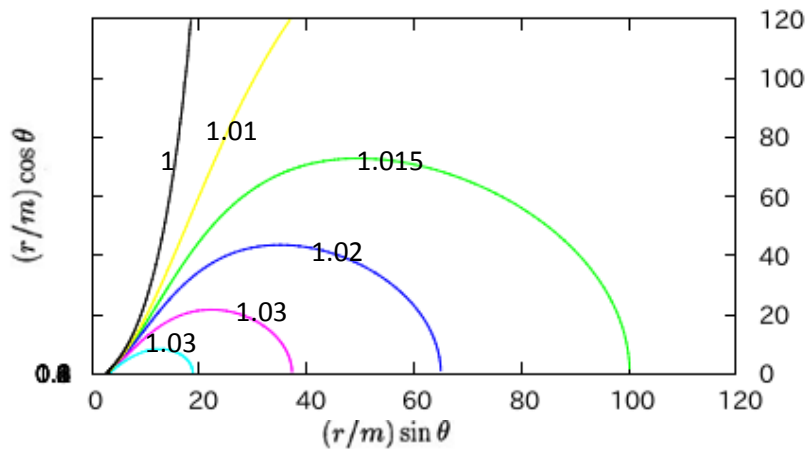
$V_{FM}$  流体分布、磁場分布を与えることで求まる

# model

## Fishbone's fluid

(Fishbone.1977)

### Enthalpy distribution



$$\frac{h}{mc^2} = \frac{[(\omega - \omega_0)^2 e^{2\nu} - e^{-2\phi}]^{1/2}}{[(\omega - \omega_0)^2 e^{2\nu} - e^{-2\phi}]_{r_{in}, \pi/2}^{1/2}}$$

$$e^{2\nu} = \Sigma \Delta / A \quad e^{2\psi} = \sin^2 \theta A / \Sigma$$

$$A \equiv (r^2 + a^2)^2 - a^2 \Delta \sin^2 \theta$$

$$\omega = 2Mar/A$$

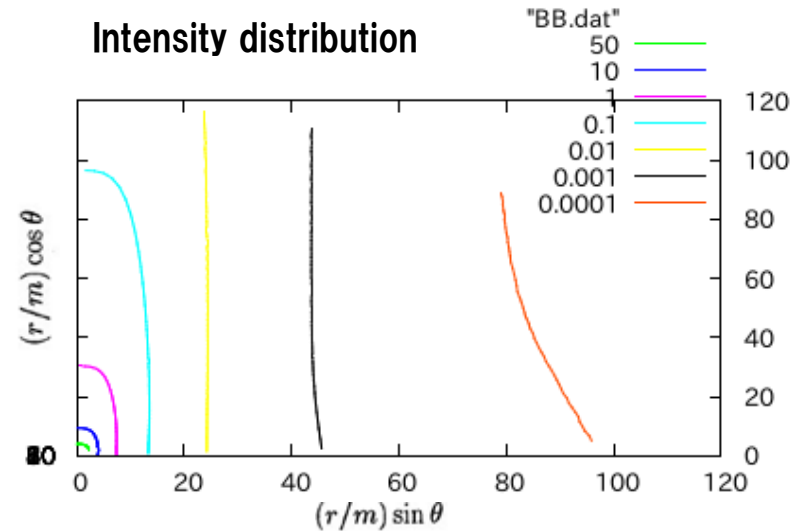
$$\Sigma \equiv r^2 + a^2 \cos^2 \theta$$

$$\Delta \equiv r^2 - 2Mr + a^2$$

## Paraboloidal magnetic field

(Blandford.1976)

### Intensity distribution



$$|B|^2 = -g^{\alpha\beta} B_\alpha B_\beta$$

$$B_r = \frac{C(1 - \cos \theta)^{1/2}}{2r \sin \theta (1 + \alpha^2 r^2 (1 - \cos \theta)^2)^{1/2}}$$

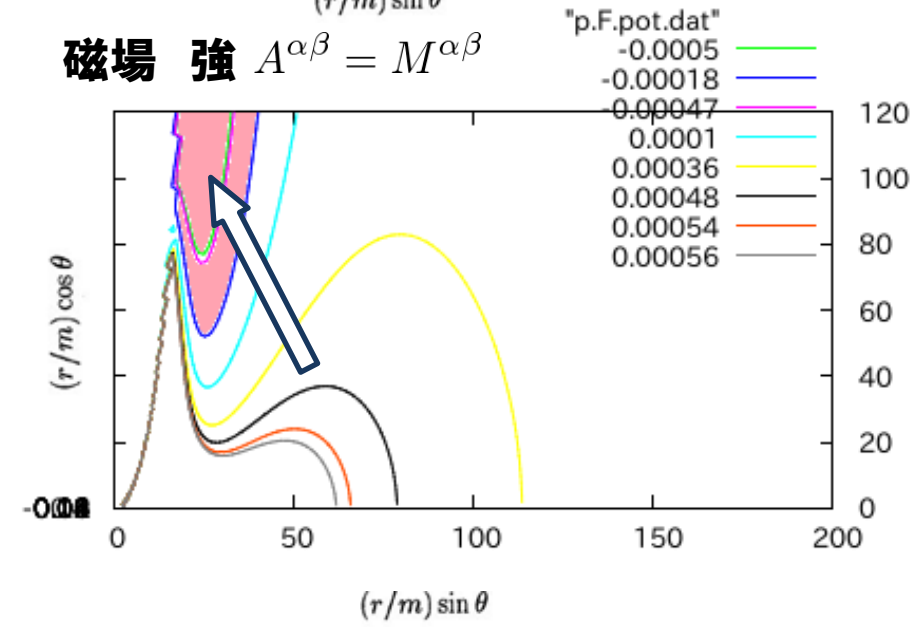
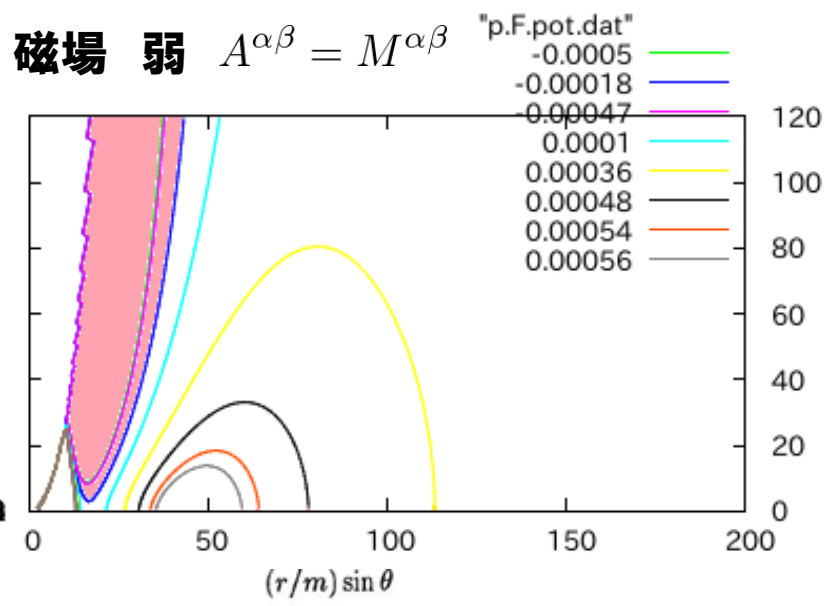
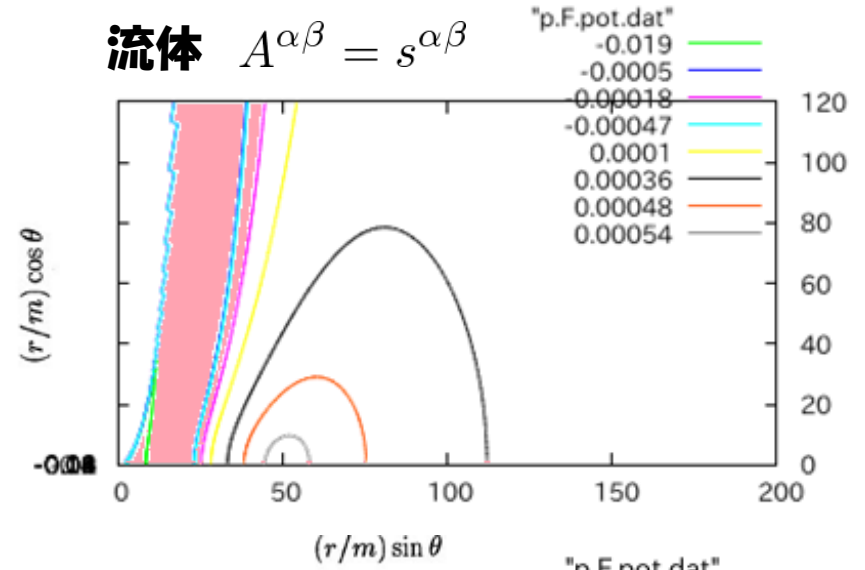
$$B_\theta = \tan^{-1} \left( \frac{1 - \cos \theta}{\sin \theta} \right)$$

$$B_\phi = \frac{-\alpha C}{(1 + \alpha^2 r^2 (1 - \cos \theta)^2)^{1/2}} \frac{1 - \cos \theta}{\sin \theta}$$

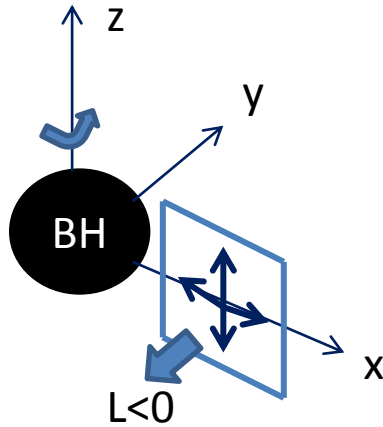
# Potential ( $L < 0$ ) $r_{in}=2.85m$ $l=3.06m$

$$V_{\pm}^{1/2} \equiv \frac{\pm A^{t\phi} + \sqrt{(A^{t\phi})^2 - A^{tt}A_{\phi\phi}}}{A^{tt}}$$

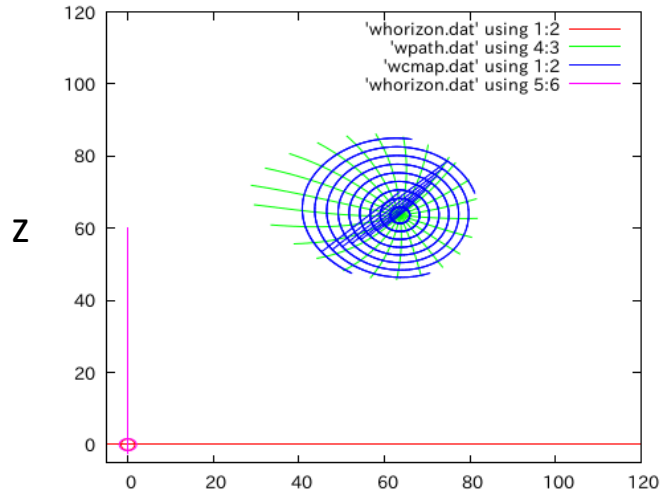
- L : 波の角運動量
- $r_{in}$  : 流体の最内半径
- l : 流体の角運動量



# Wave propagation ( $L < 0$ ) $r_{in}=2.85m$ $l=3.06m$

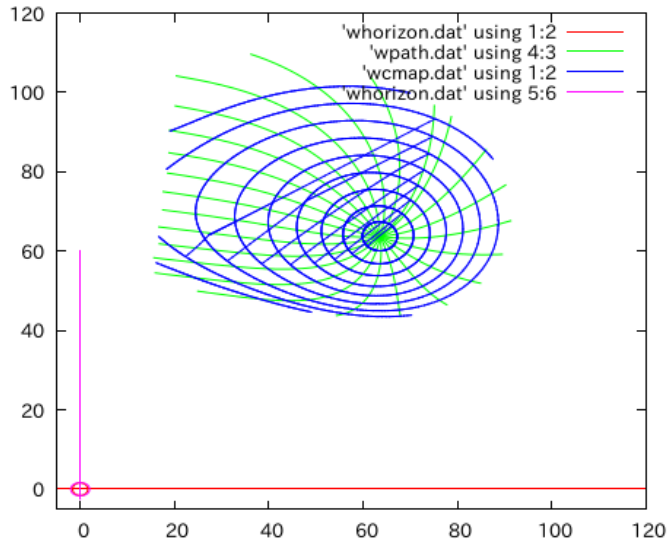


流体

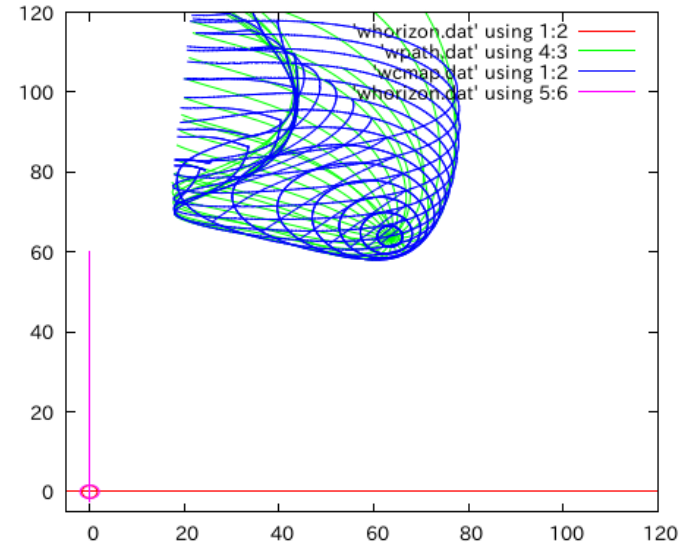


$L$  : 波の角運動量  
 $r_{in}$  : 流体の最内半径  
 $l$  : 流体の角運動量

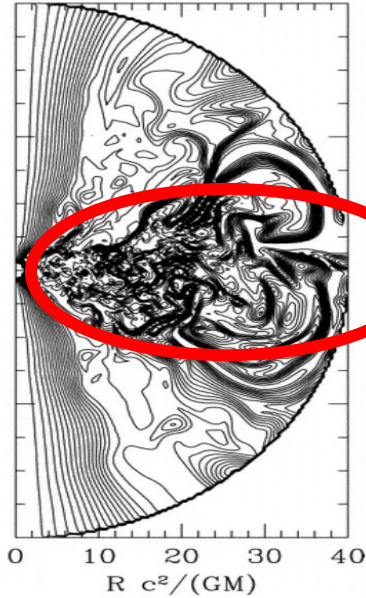
磁場 弱



磁場 強



# 今後の課題



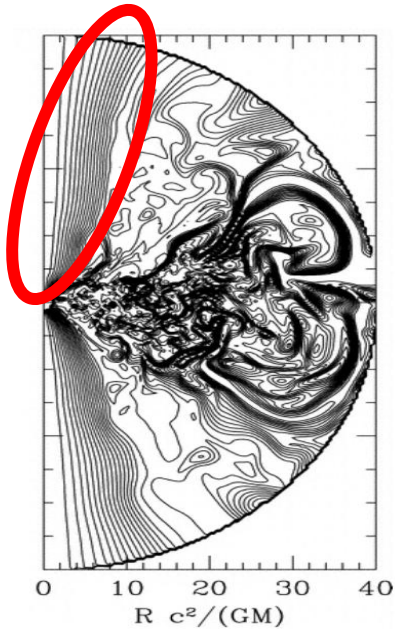
Matter dominant

Fishbone's fluid

+

monopole magnetic field

Blandford-Znajek (1977)



electrically dominant

free-fall fluid

+

monopole magnetic field

Blandford-Znajek (1977)