

# ブラックホール時空とその周りの 磁気圏環境

---

宋 成登

東京大学総合文化研究科 M1

2012年度 第42回天文・天体物理若手 夏の学校  
@福井県東尋坊温泉三国観光ホテル

# 話の流れ

1. イントロダクション
2. 太陽磁気圏
3. ブラックホール磁気圏
4. ブラックホールの自転エネルギー抽出
5. まとめ

# イントロダクション

## ブラックホール磁気圏に関わる現象

- 宇宙ジェット
- ガンマ線バースト
- 高速の降着円盤風

ブラックホールのモデル構築

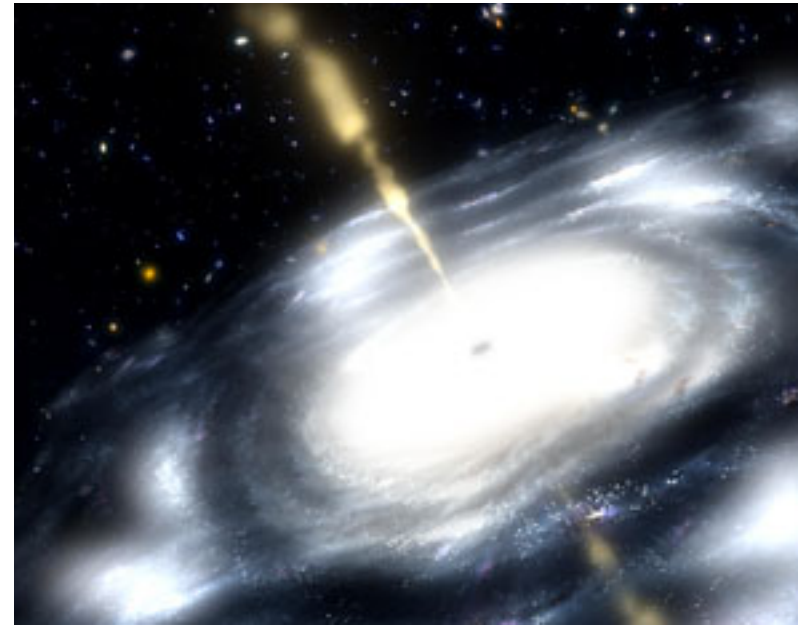
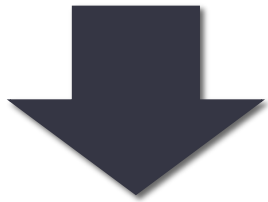


Image Credit: NASA/JPL-Caltech

**天文学、宇宙物理学の未解決の重要課題の一つ！**

# イントロダクション

## 1990年頃までの研究

- Weber & Davis (1967)  
→ 太陽磁気圏の太陽風(1次元)
- Okamoto (1975)  
→ パルサー磁気圏
- Camenzind+ (1986)  
→ AGNのMHD-winds
- Takahashi+ (1990)  
→ BH磁気圏でのMHD-winds(1次元)
- Nitta+ (1991)  
→ GR版のGrad-Shafranov方程式

## BH周りの磁気圏の理論モデル

→ 太陽磁気圏、パルサー磁気圏のアナロジー

# 太陽磁気圏 Weber & Davis (1967)

太陽周りのプラズマ流体の運動を解く  
→磁力線に沿って流れる

## ◎仮定

定常、軸対称、理想プラズマ流体(電気伝導度 $\infty$ )  
粘性なし、ショックなし、赤道面上

## ☆基礎方程式

- 理想MHD条件

$$E = -v \times B$$

- 連続の式

$$\rho u r^2 = \text{const}$$

E:電場

v:速度

B:磁場

$\rho$ :密度

u:速度r成分

# 太陽磁気圏

- 運動方程式

$$\rho u \frac{du}{dr} = -\frac{dp}{dr} - \rho \frac{GM}{r^2} + (J \times B)_r + \rho \frac{v_\phi}{r}$$

M : 太陽質量  
 $v_\phi$  : 速度のφ成分  
 J : 電流  
 p : 圧力  
 $\gamma$  : 断熱指数

- ポリトロピックな関係式

$$p = p_0 \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma$$

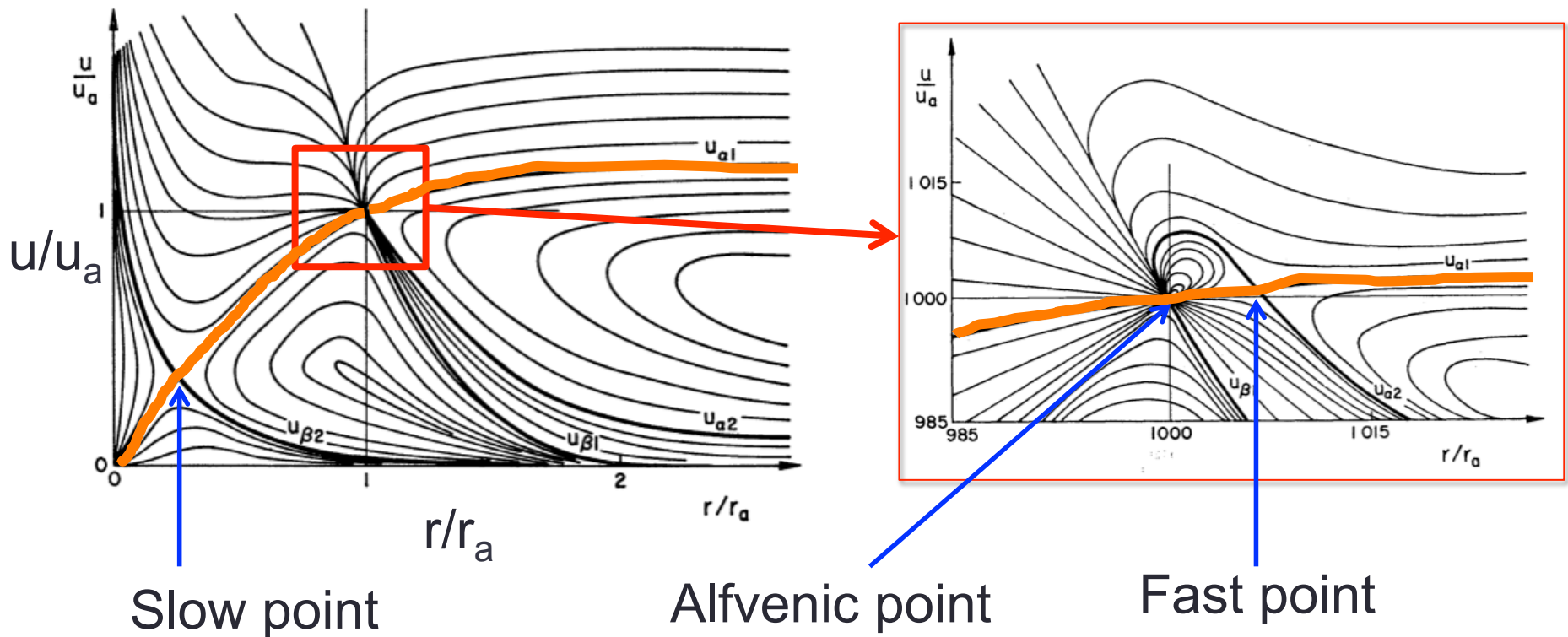
→ 流れに沿った5つの保存量

$$\left[ \begin{array}{l} v_\phi = \frac{r\Omega(u/u_A - 1)}{M_A^2 - 1} \quad M_A^2 = \frac{4\pi\rho u^2}{B_r^2} \text{ (Alfvénic Mach number)} \\ \rightarrow \frac{du}{dr} = \frac{\frac{u}{r} \left\{ \left( \frac{2\gamma p_a}{M_A^{2\gamma-2} \rho_a} - \frac{GM}{r} \right) (M_A^2 - 1)^3 + \Omega^2 r^2 \left( \frac{u}{u_a} - 1 \right) \left[ (M_A^2 + 1) \frac{u}{u_a} - 3M_A^2 + 1 \right] \right\}}{\left[ \left( u^2 - \frac{\gamma p_a}{M_A^{2\gamma-2} \rho_a} \right) (M_A^2 - 1)^3 - \Omega^2 r^2 M_A^2 \left( \frac{r_a^2}{r^2} - 1 \right)^2 \right]} \end{array} \right]$$

分母がゼロのとき、分子もゼロにならないといけない!

# 太陽磁気圏

Solar-Windsの解(3つの臨界点が存在)



物理的な解はこの3つの臨界点を通過する必要がある

# ブラックホール磁気圏 Takahashi+ (1990)

## ☆基礎方程式

- Backgroundのメトリック → Kerr メトリック (Kerr BH周りの運動)

- 運動方程式

$$T^{\alpha\beta}{}_{;\beta} = 0 \quad T^{\alpha\beta} = (\rho + P)u^\alpha u^\beta - P g^{\alpha\beta} + \frac{1}{4\pi} \left( F^{\alpha\delta} F_\delta^\beta + \frac{1}{4} g^{\alpha\beta} F^2 \right)$$

エネルギー運動量テンソル

- 磁場の定義

$$B_\alpha \equiv \frac{1}{2} \sqrt{-g} \varepsilon_{\alpha\beta\gamma\delta} k^\beta F^{\gamma\delta} \quad (k^\beta: \text{時間的なキリングベクトル})$$

- 理想MHD条件、連続の式、ポルトロピックな関係式

→ 流れに沿って5つの保存量の存在

- 角速度  $\Omega_F$
- エントロピー  $S$
- 粒子フラックス  $\eta$
- 全エネルギー  $E$
- 全角運動量  $L$



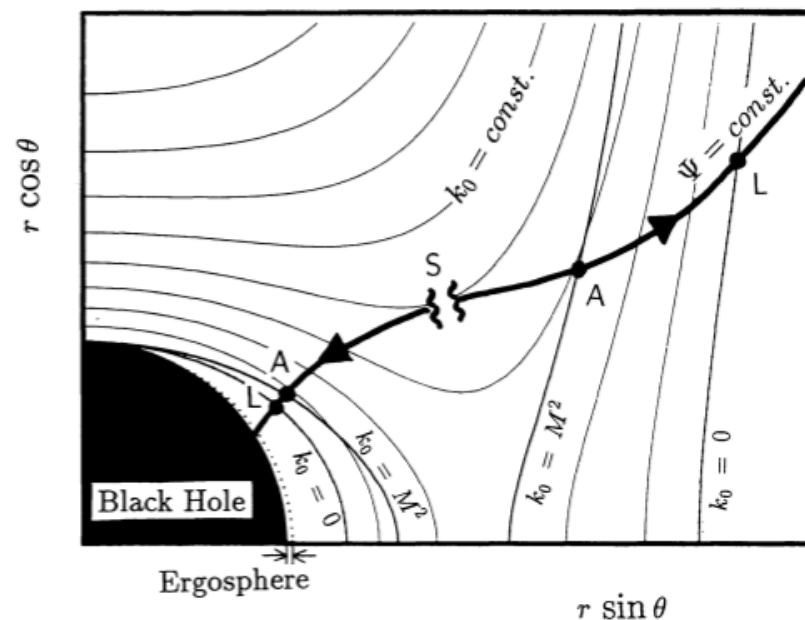
# ブラックホール磁気圏

- 運動方程式のΦ成分から  
Alfvénic pointの存在

$$M_A^2 \equiv \frac{4\pi\mu n u_p^2}{B_p^2}$$

(相対論的なAlfvénic Mach number)

概略図



※古典的な解と違う所

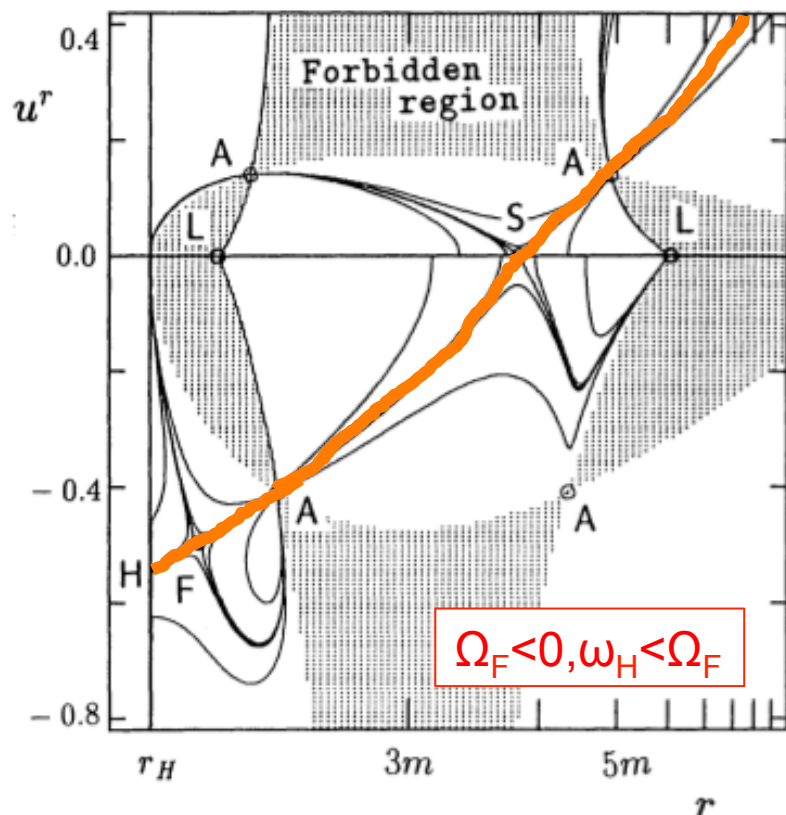
→  $\Omega_F < 0$  or  $\omega_H < \Omega_F$  の場合、2つのAlfvénic pointを持つ！

( $\omega_H$ :BHの角速度)

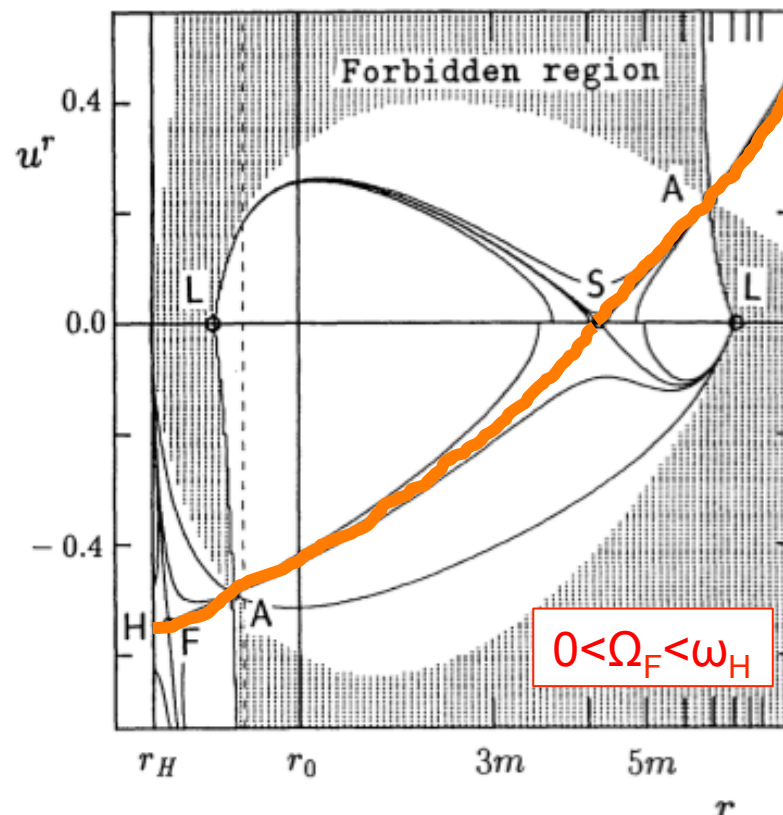
- 運動方程式のポロイダル成分から  
fast、slow point の存在

# ブラックホール磁気圏

## プラズマflowの解の例



$$a=0, \Omega_F=0.7\Omega_{\max}$$



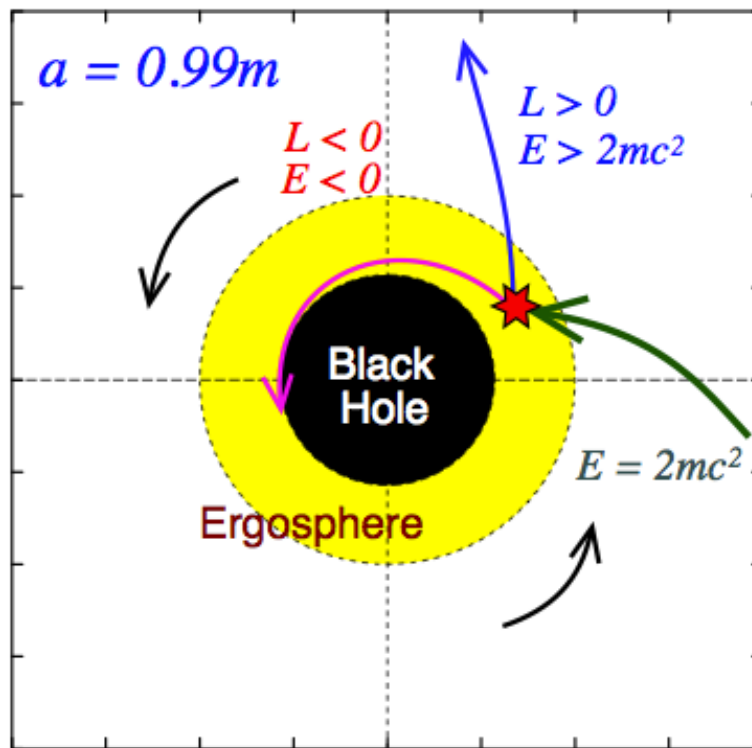
$$a=0.8m, \Omega_F=0.35\Omega_{\max}$$

※ $E^2 < 0$ の条件から禁制領域が存在する

$a$ :BHの角運動量

# ブラックホールの自転エネルギー抽出

## Penrose 機構 (Penrose 1969)



(Cristodoulou 1970)

エルゴ領域内における粒子の**負エネルギー**軌道を利用

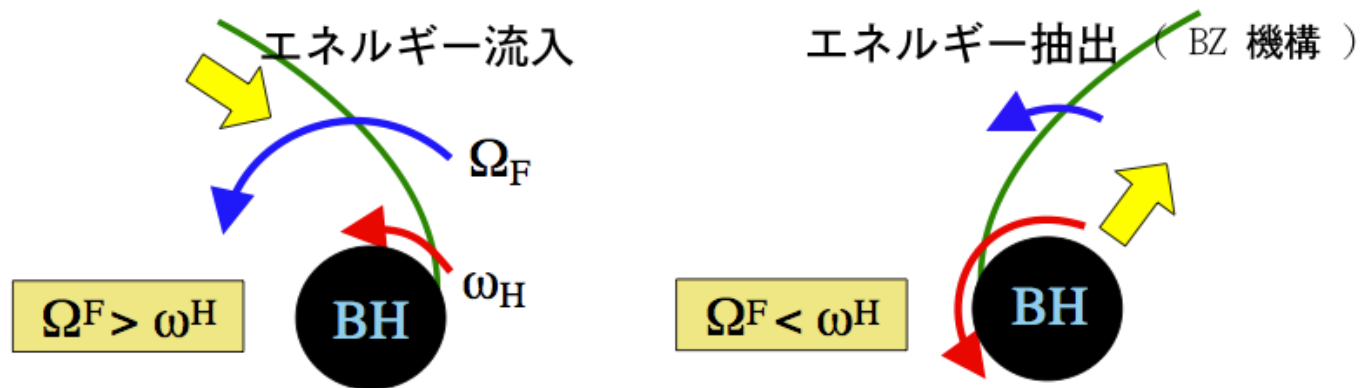


BHに落下

BHの自転エネルギーの抽出

# ブラックホールの自転エネルギー抽出

## Blandford-Znajek 機構 (Blandford & Znajek 1977)



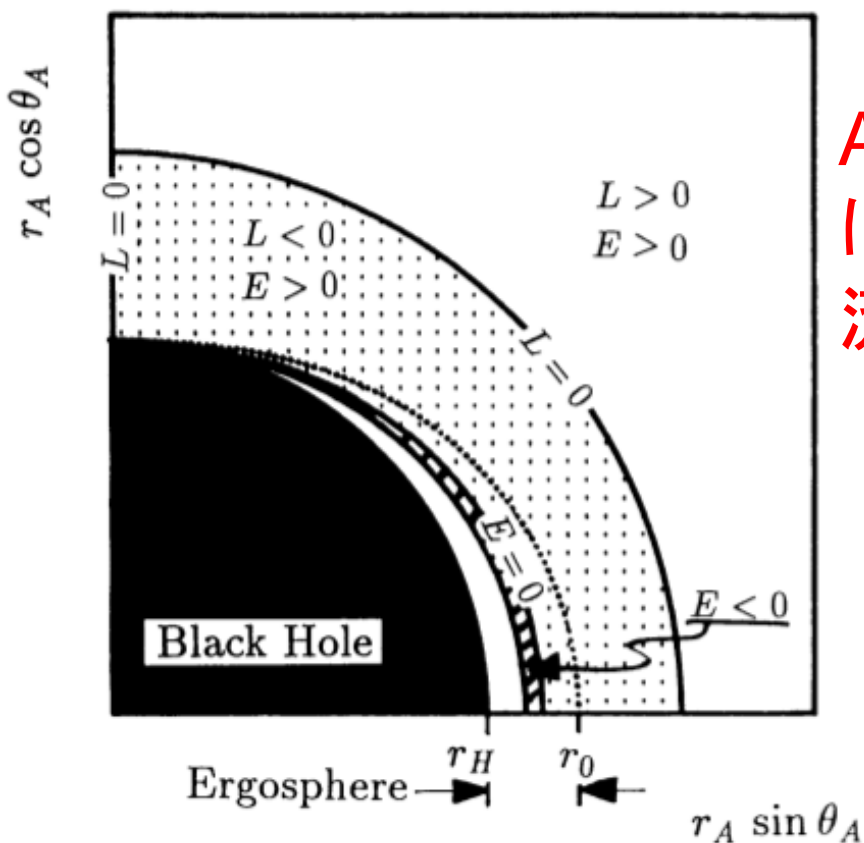
$\Omega_F < \omega_H$  の場合、磁場による磁気トルクにより  
BHの回転にブレーキをかける



BHの自転エネルギーの抽出

# ブラックホールの自転エネルギー抽出

負エネルギー磁気流体降着による機構 (Takahashi+ 1990)



Alfvenic point がエルゴ領域内にある時、負エネルギーの磁気流体降着流が可能

( $0 < \Omega_F < \omega_H$  の場合)

BHに落下

BHの自転エネルギーの抽出

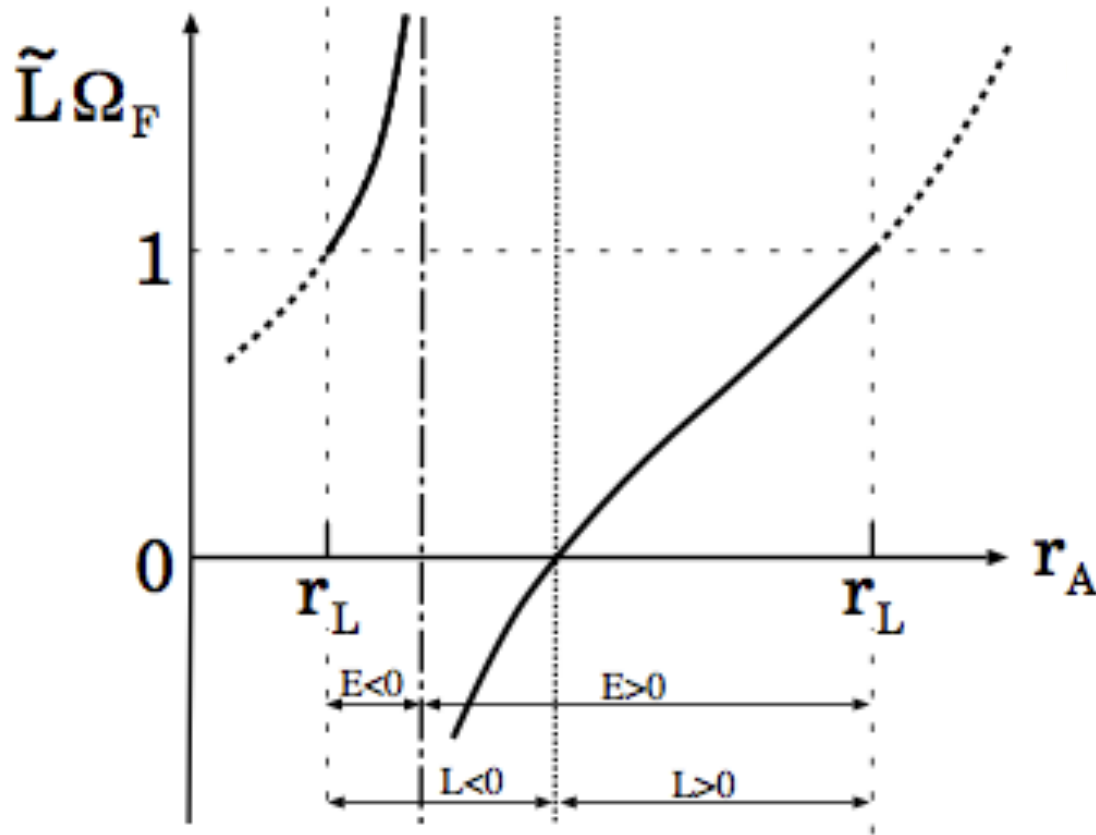
## まとめ

- ブラックホール周りの磁力線に沿ったプラズマ流体の運動を1次元的に解いた
- Alfvénic pointがエルゴ領域内にある時ブラックホールの自転エネルギーを抽出することが可能

## 十発展十

- 2次元に拡張して解く
- シミュレーション ←現在、盛んに研究されている！

# ブラックホールの自転エネルギー抽出(補足)



エネルギー

$$E = \frac{\mu_I \sqrt{k_{0I}} (g_{tt} + g_{t\phi} \Omega_F)_A}{k_{0A}}$$

角運動量

$$L = -\frac{\mu_I \sqrt{k_{0I}} g_{\phi\phi}^A (\Omega_F - \omega_A)}{k_{0A}}$$

$$\Omega_F \tilde{L} = -\frac{g_{\phi\phi}^A \Omega_F (\Omega_F - \omega_A)}{(g_{tt} + g_{t\phi} \Omega_F)_A}$$