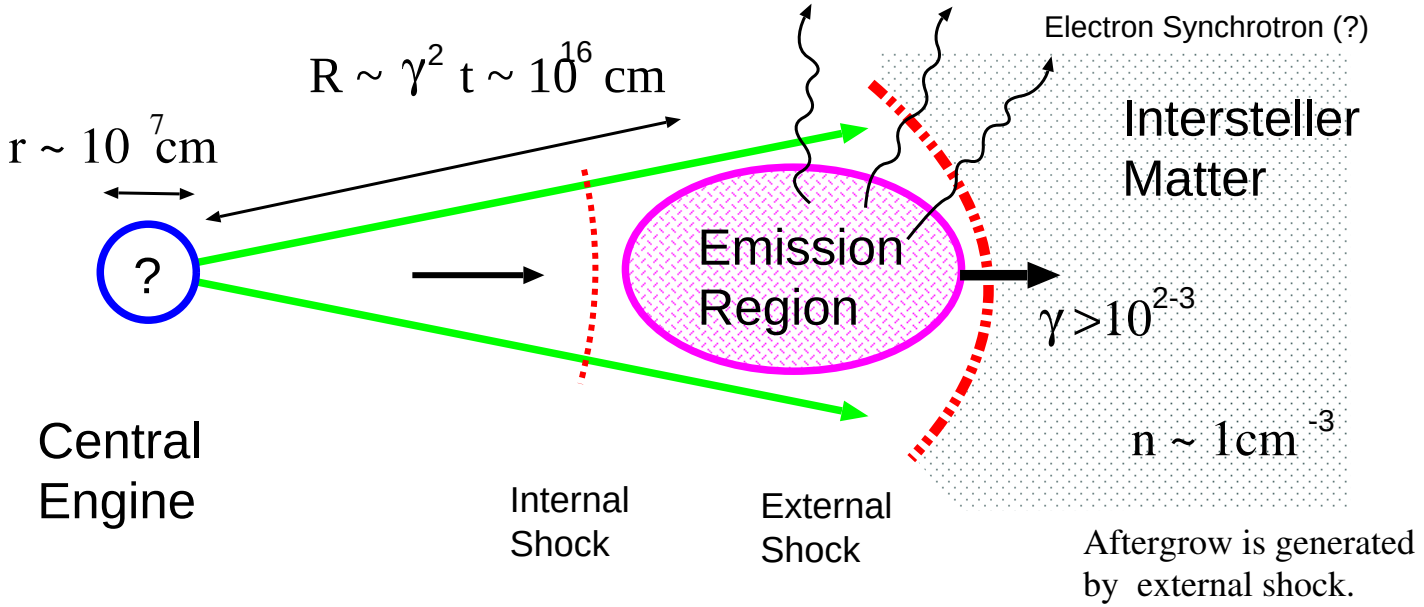
ブラックホールを観る

高橋 真聡 (愛教大)

トピックス

- 1 GRB の Central Engine
- 2 MHD Shock の発生 (磁気圏とショック面の分布) (Fukumura et al.)
- 3 MHD Shock の性質 (高温プラズマ領域の条件) (astro-ph/0511217)
- 4 MHD Shock からの輻射 (Takahashi [2])

- L GRB : Long γ-ray burst (Hyper-nova ? / = 突き抜け SN ジェット ?)
- S GRB : Short γ-ray burst (NS-NS marger ?)
- Magnetor : Magnetor からの Giant Flare (星震による ? / = SGRB ?)



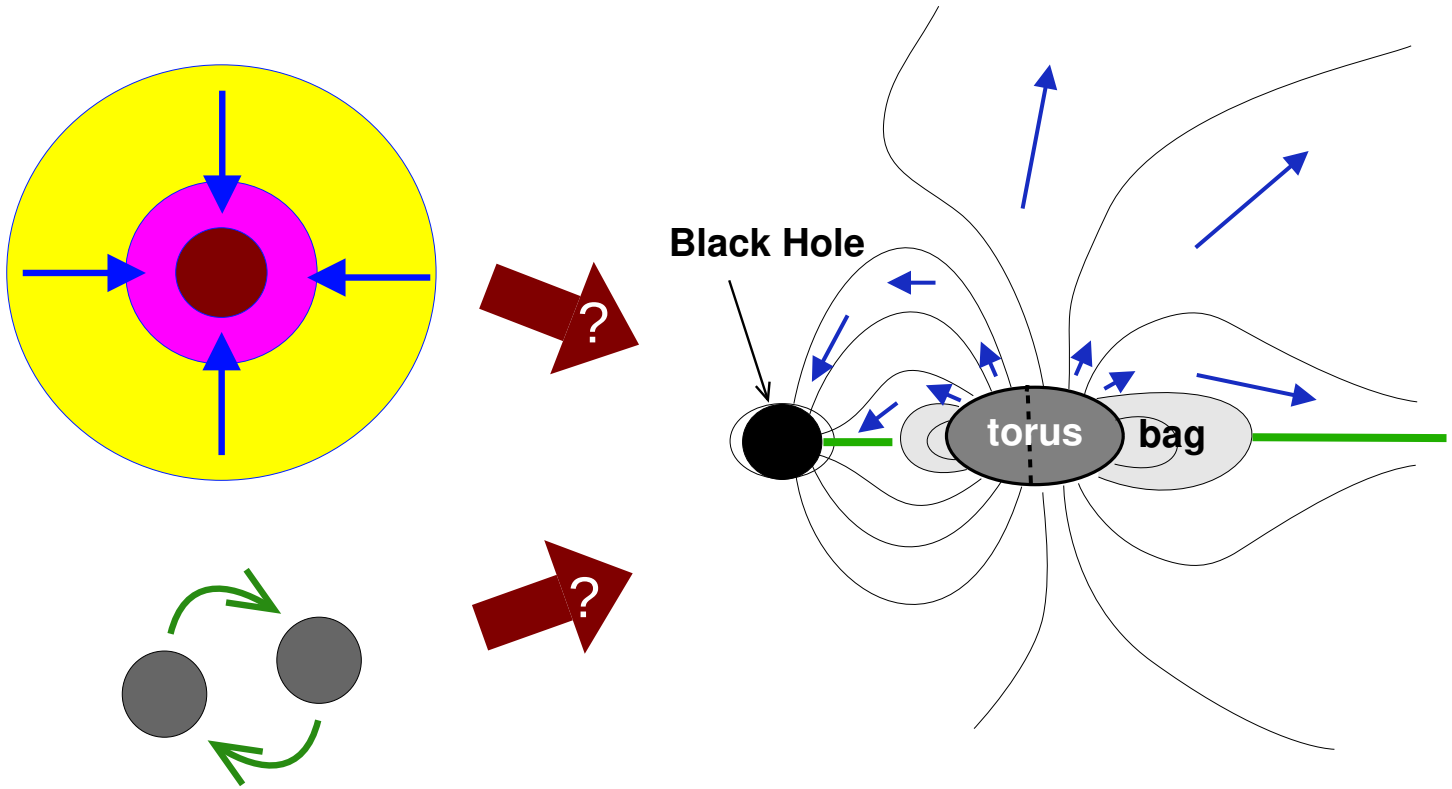
Fire Ball Model

- 複数内部衝撃波発生モデル
- 多重ショックモデル、 など 観測 (burst, afterglow, X-ray flare) を説明するためのモデル多数。

Central Engine のモデルは ? (観測からの制限は ?)

■ GRBs — central engine

- エネルギー発生の起源 / 量
- 継続時間 (意外と長いかも知れない!?)
- ジェットの形成 ($\Gamma \sim 100$ 加速とコリメーション)

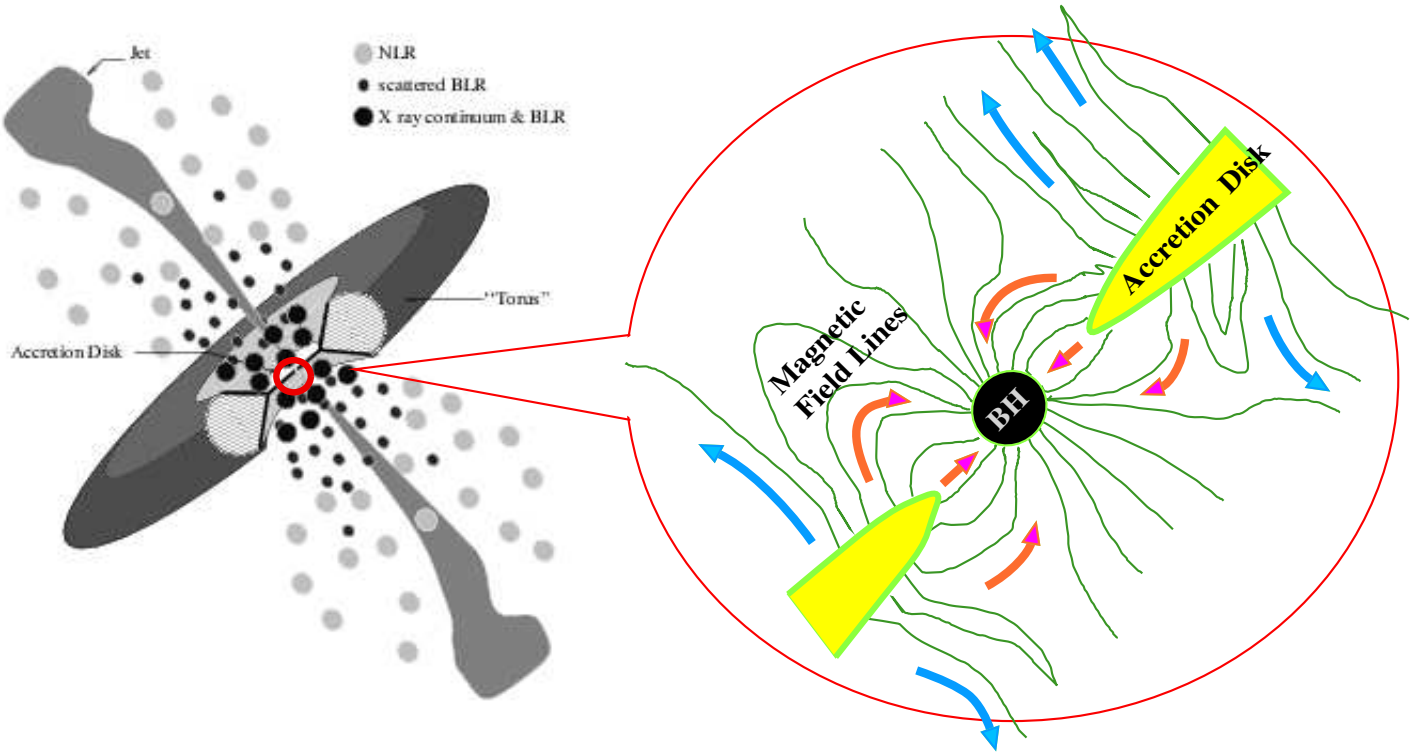


Black Hole — Accretion Disk — Jet Active Region

M GRB (Magnetic GRB) ?

■ AGNs — central engine

- Black Hole (mass, spin ?)
- Accretion Disk (Standard Disk, ADAF, Slim Disk, CDAF, MDAF, ...)
- Relativistic Jet (Magnecic ? or Thermal driven ?)



Black Hole — Accretion Disk — Jet Active Region

■ 1 ■ 動機 / 目的

- ガンマ線バースト (GRB), 活動銀河中心核 (AGN) :

  ブラックホール (BH) + 降着円盤 のシステム !?

- 膨大な『エネルギー解放』 : 重力エネルギー / BH 回転エネルギー
- BH 磁気圏 : BH + 磁化した降着ガス
- BH 時空における 『プラズマ物理学』
- 『高エネルギ輻射』の発生 (X-ray, γ-ray, etc) ?
- BH 重力場の情報は ?

< Kerr 時空における MHD ショック形成 >

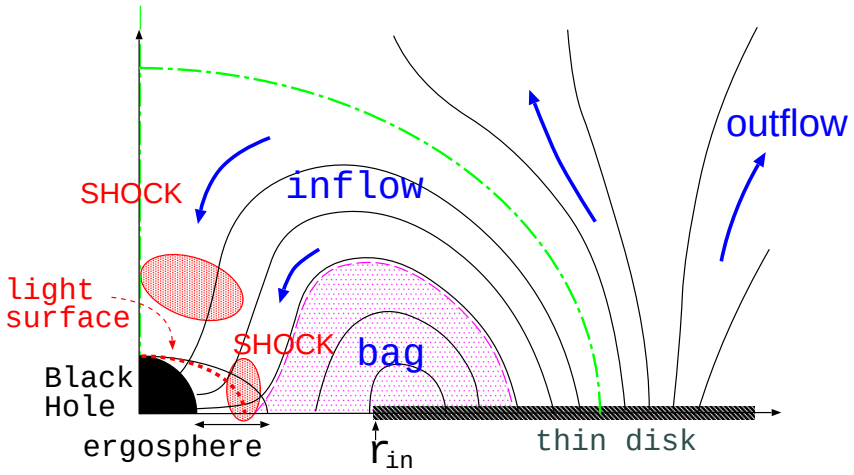
高温プラズマ領域 = 高エネルギー輻射の発生源　　観測できるか？

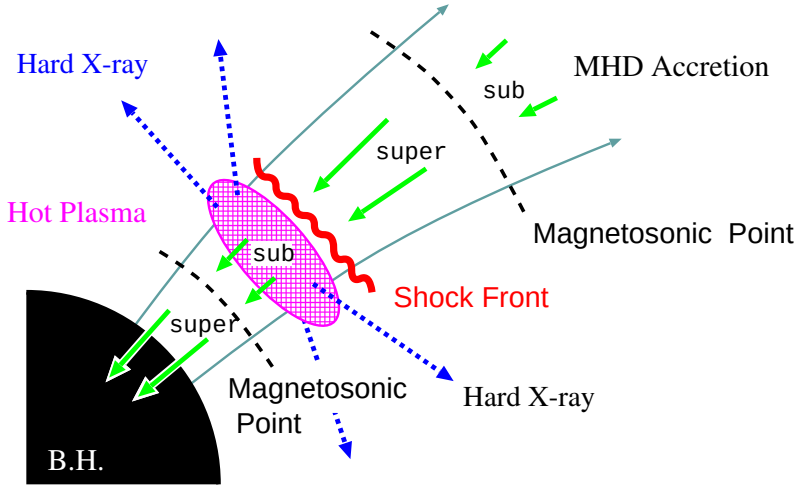
■ 2 ■ Black Hole 磁気圏

Tomimatsu & Takahashi et al.(2001), Uzdensky(2004,2005)

“ブラックホール磁気圏” ＝

Loop (bag) ＋ Disk–BH (inflow) ＋ BH − r_∞ (outflow)





* Disk-BH 磁力線に沿って、降着流が発生。

* Fast/Slow MHD Shocks が可能（ホライズン近傍）. ⇒ 高温プラズマ領域！

* 遠方への磁場の卓越した wind が発生 ⇒ (磁場エネルギー から 運動エネルギーへの変換が可能)

⇒ Relativistic Jets ⇒ Shock ! at distant regions

■ 3-A ■ GR-MHD（磁気流体力学）

Basic Equations

* **The ideal MHD condition** $u^\beta F_{\alpha\beta} = 0$
* **The particle conservation law** $(nu^\alpha)_{;\alpha} = 0$
* **Maxwell equations** $F^{\mu\nu}_{\ \ ;\nu} = -4\pi j^\mu \ , \quad F_{[\mu\nu;\sigma]} = 0$
* **Polytropic relation** (*Tooper 1965*) $P = K\rho_0^\Gamma$
* **The equation of motion** $T^{\alpha\beta}_{\ \ ;\beta} = 0$

where

$$T^{\alpha\beta} = n\mu u^\alpha u^\beta - Pg^{\alpha\beta} + \frac{1}{4\pi}\left(F^\alpha_{\ \lambda}F^{\lambda\beta} + \frac{1}{4}g^{\alpha\beta}F^2\right) \quad : \text{the energy-momentum tensor}$$

$$\rho = \rho_0 + \frac{1}{\Gamma - 1}P \quad : \text{the total energy density}$$

$$\rho_0 = nm_{\rm p} \quad : \text{the rest mass density}$$

$$\mu = \frac{\rho + P}{n} = m_{\rm p} + \frac{\Gamma}{\Gamma - 1}\frac{P}{n} \quad : \text{the relativistic entalpy}$$

u^α : the fluid 4-velocity,
Γ : the adiabatic index,
n : the number density,
P : the gas pressure,
$F^2 \equiv F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$,
$m_{\rm p}$: the particle's mass

field-aligned "five conserved quantities" Stationary & Axisymmetric flows

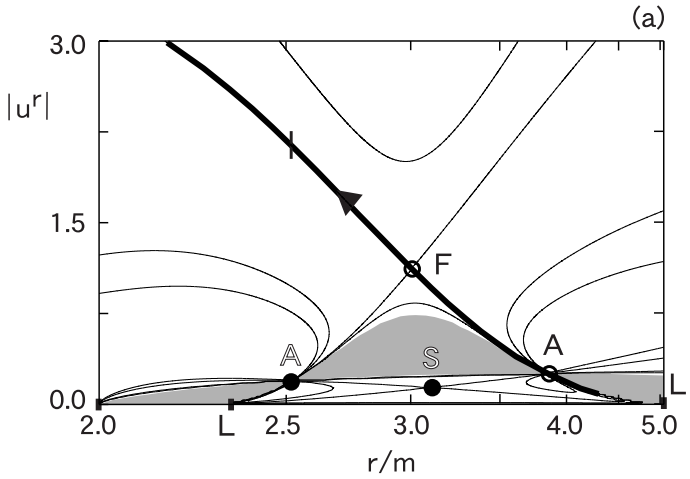
* **Number flux per unit magnetic flux** $\eta(\Psi) = \frac{nu^p}{B^p}$
* **Angular velocity of the field lines** $\Omega_F(\Psi) = -F_{tr}/F_{\phi r} = -F_{t\theta}/F_{\phi\theta}$
* **Total energy of the magnetized flow** $E(\Psi) = \mu u_t - \frac{\Omega_F}{4\pi\eta}B_\phi$
* **Total angular momentum** $L(\Psi) = -\mu u_\phi - \frac{1}{4\pi\eta}B_\phi$
* **Entropy** $S(\Psi)$ ($\Rightarrow$ entropy related accretion rate $\dot{\mathcal{M}}$)

■ 3-B ■ 一般相対論的磁気流体力学とプラズマ流

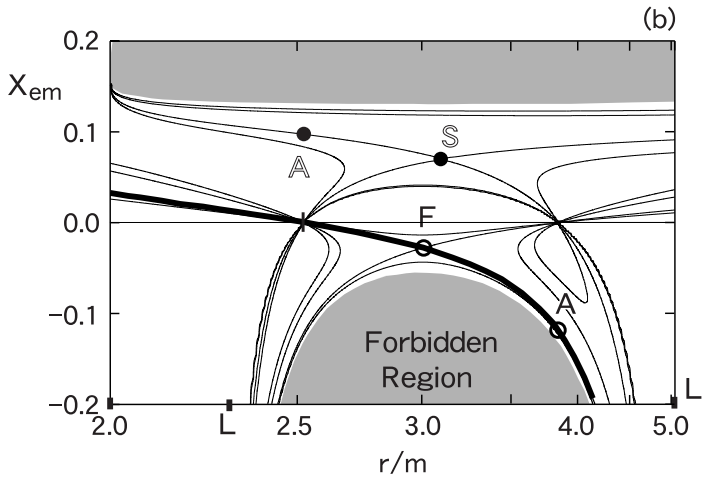
Black Hole 降着流の解

Takahashi (2002)

★ **Hydro-like flow** ： 流体が強い場合に残る解

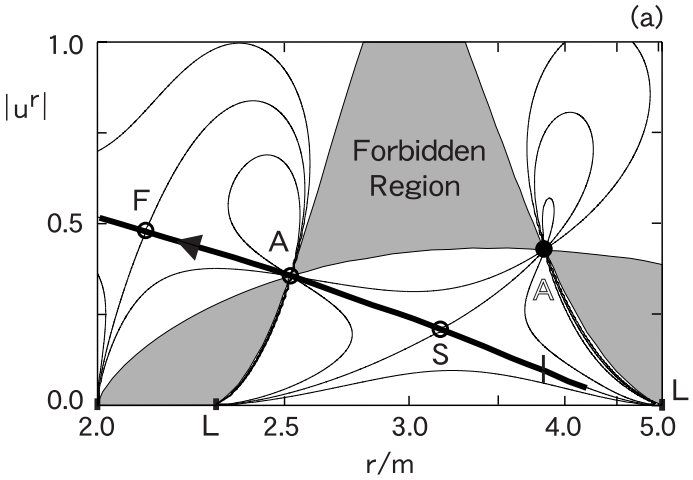


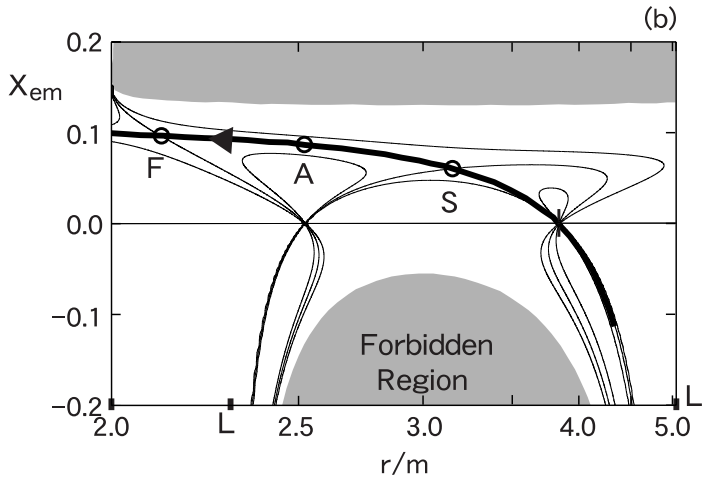
流 速 (4-velocity)



トロイダル磁場

★ **Magneto-like flow** ： 磁場が強い場合に残る解





■ 3-C ■ 一般相対論的 MHD Shock

Shock conditions

ランキン＝ユゴニオ条件 (*Lichnerowicz 1967*)

* **The particle number conservation** $[nu^\alpha]\ell_\alpha = 0$
* **The energy momentum conservation** $[T^{\alpha\beta}]\ell_\alpha = 0$
* **The magnetic flux conservation** $[{}^*F^{\alpha\beta}]\ell_\alpha = 0$

★ **The Entropy** S **(or** $\dot{\mathcal{M}}$**) increase across the shock front.**

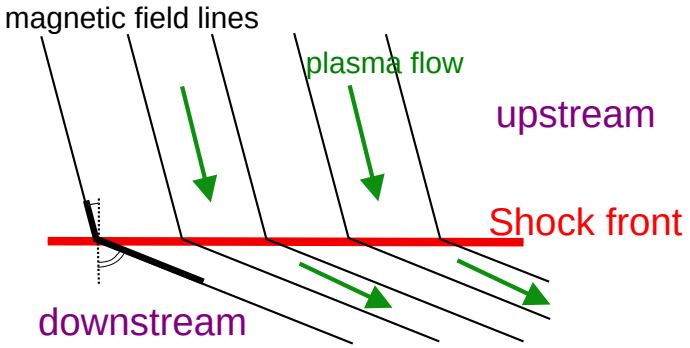
★ **The parameters** E, L, Ω_F, η **are conserved across the shock front.**

★ **Lab-frame (BL-coordinate) :**

$B_\alpha \equiv {}^*F_{\alpha\beta}k^\alpha$, $E_\alpha \equiv F_{\alpha\beta}k^\alpha$

at the Shock front

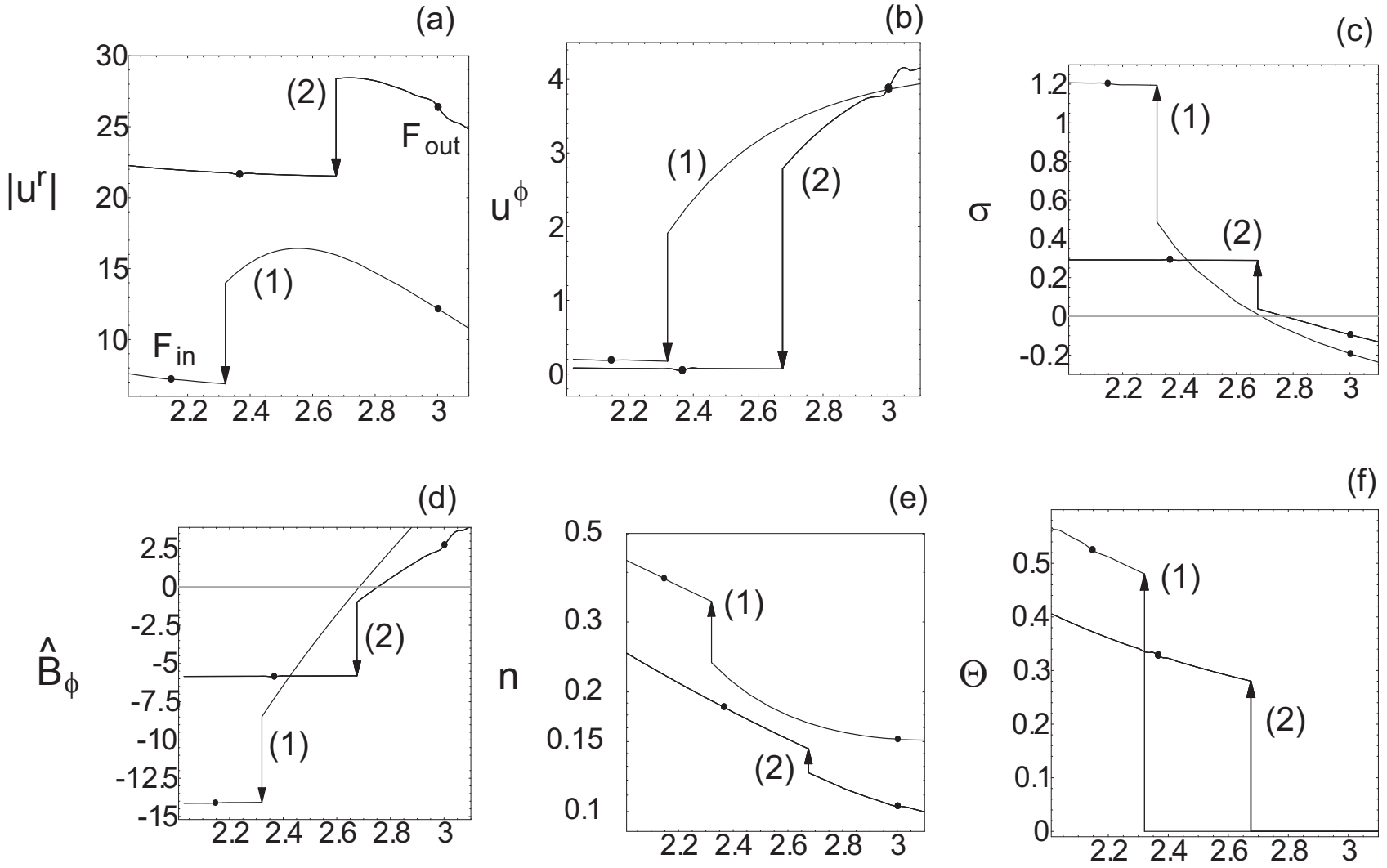
$[B_\perp] = 0$ $(B_\perp \equiv B^\alpha \ell_\alpha)$



Fast MHD Shock

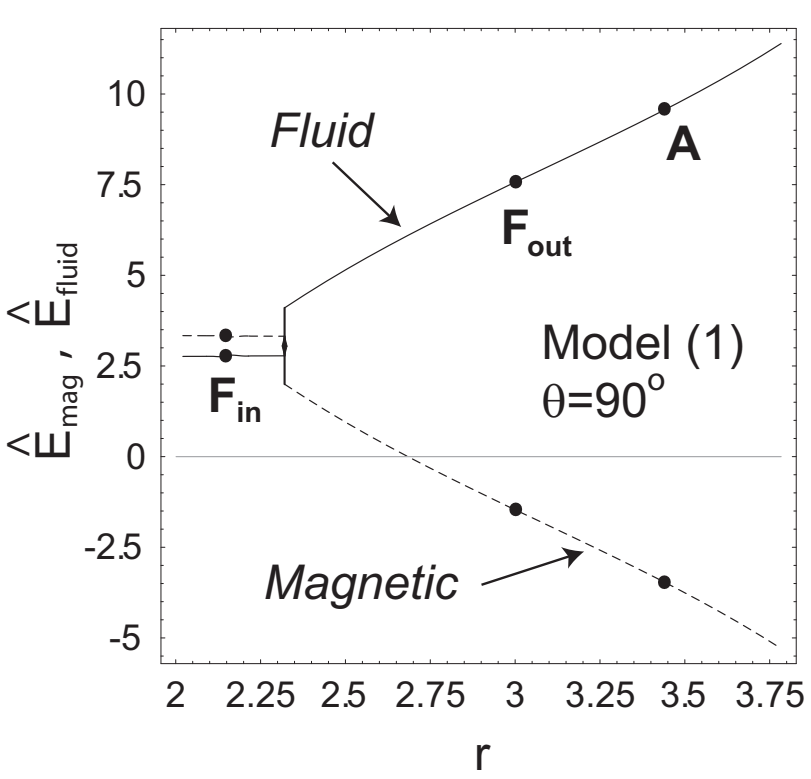
■ 6-C ■ ショックを伴う磁気降着流解について

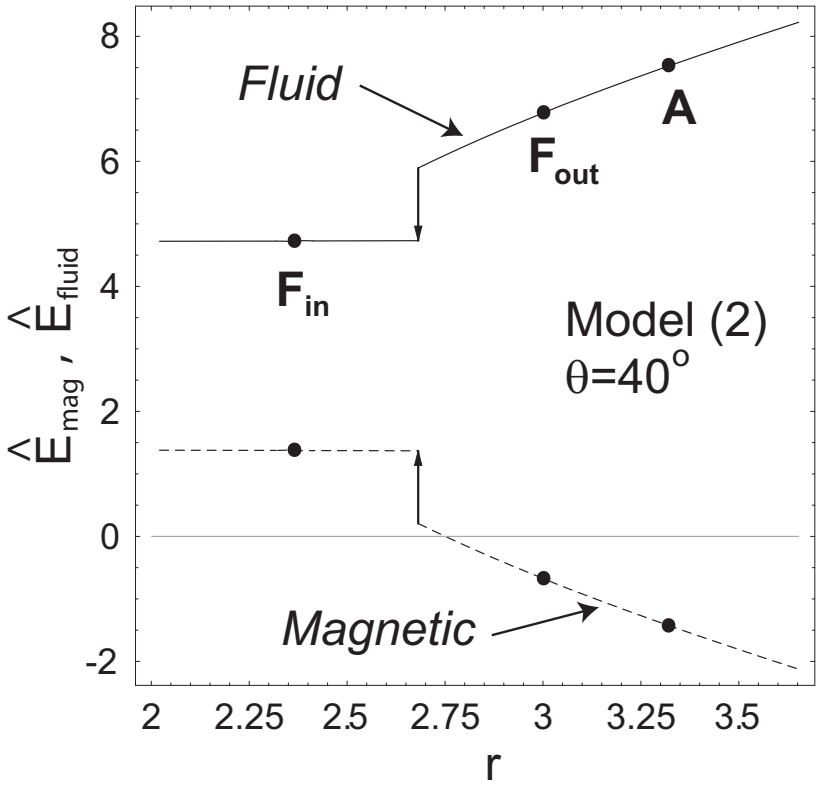
- （１）９０°、 角運動量 大、 $\tilde{L}\Omega_F = 0.57$
- （２）４０°、 角運動量 小、 $\tilde{L}\Omega_F = 0.23$



■ 6-D ■ ショックでのエネルギー変換

磁場と流体の間のエネルギー変換 *(Hirotani et al. 1992)* ＋ ショック



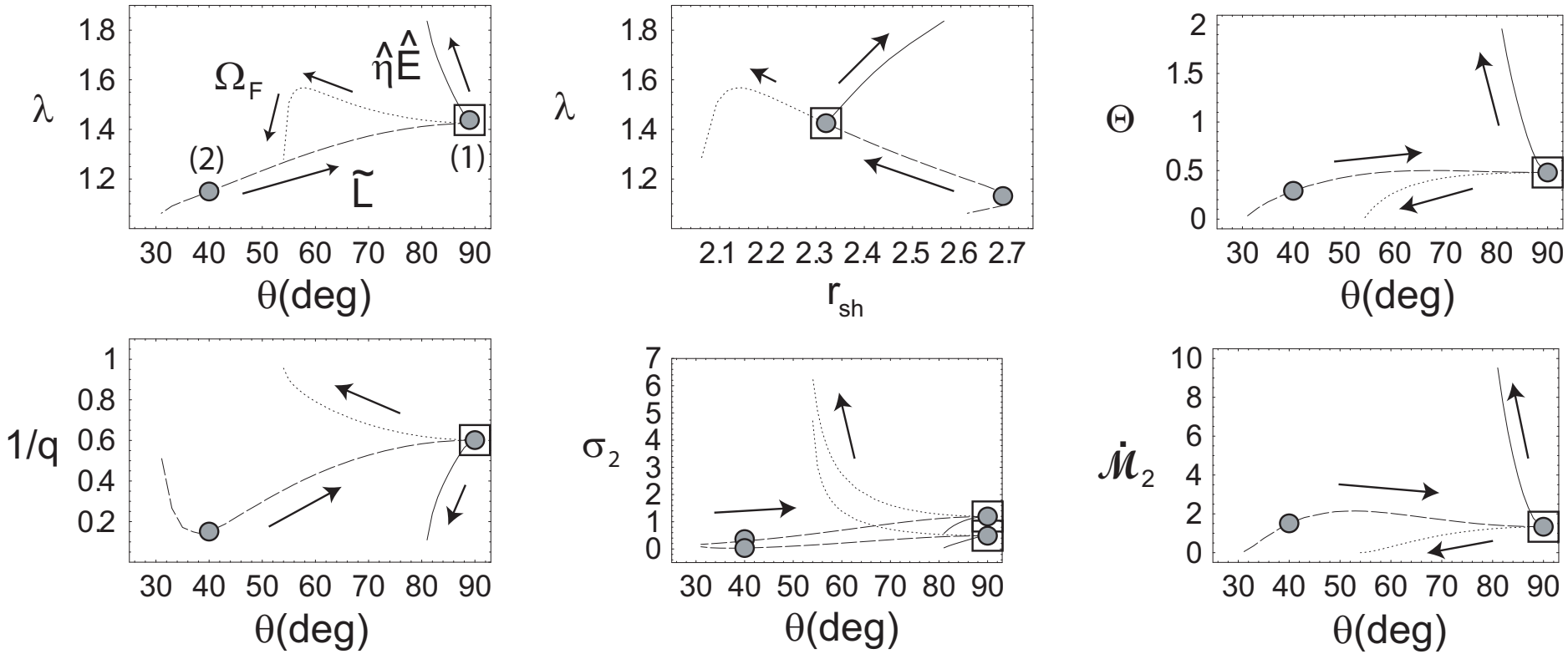


Magneto-Dominated Flow　　Hydro-Dominated Flow

ショックを起こして、最終状態 (Horizon での値) に至ってしまう。

■ 6-B ■ 角度によるショックの変化

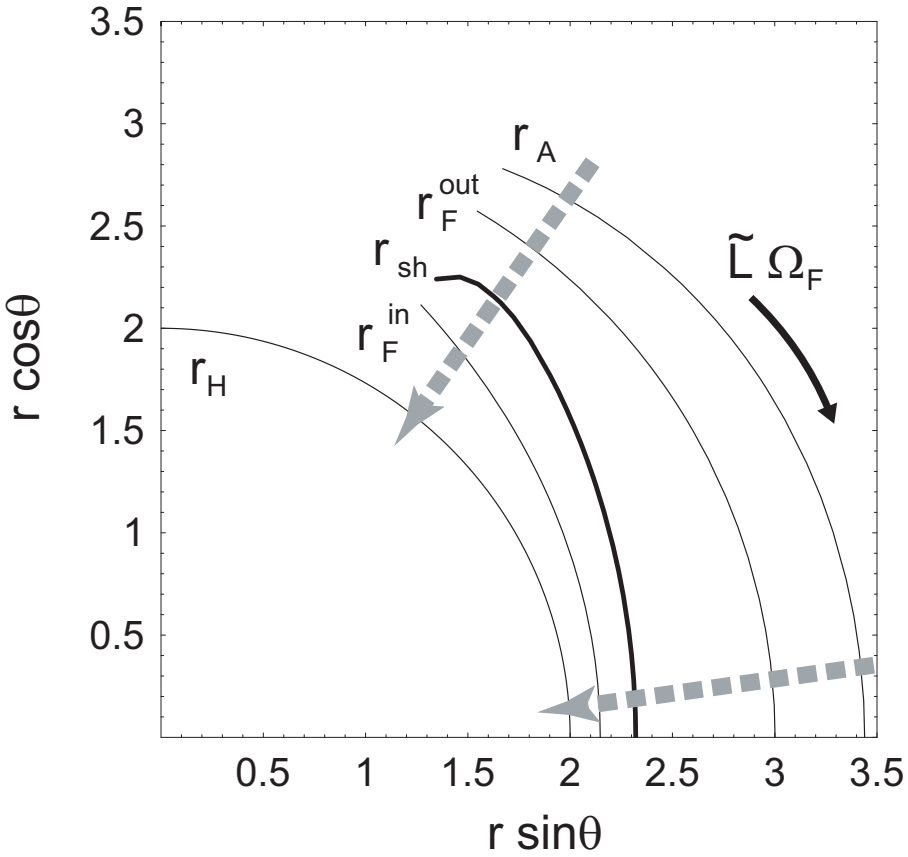
regime 1 : $\tilde{L}$ を変化させる　　**regime 2 :** Ω_F　　**regime 3 :** ηE (E **or** η)

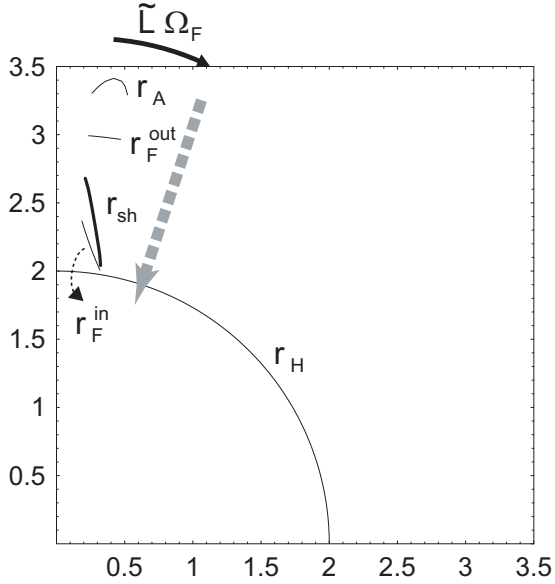


- $\tilde{L}\Omega_F$ — ショック位置（角度）が移動、ショックの強さは変わらない。
- ηE — ショック位置（角度）は変わらない、ショックの強さが変化

■ 6-A ■ ショック面について *Fukumura et al. (2005)*

$\tilde{L}\ (= L/E)$ だけ変化させてみて、ショック位置をプロットしてみた。





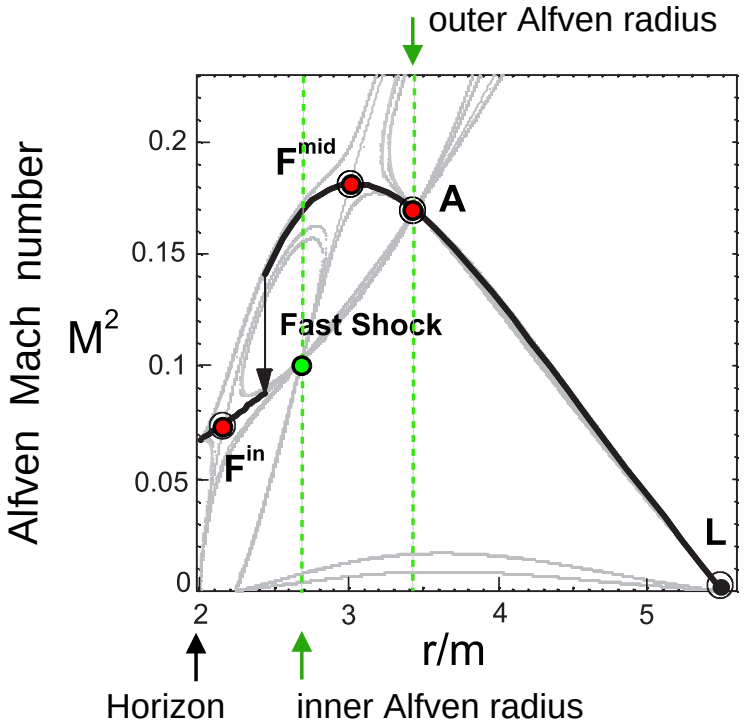
１つのパラメータを変えることで全領域を覆えるショック面は見つけていない。

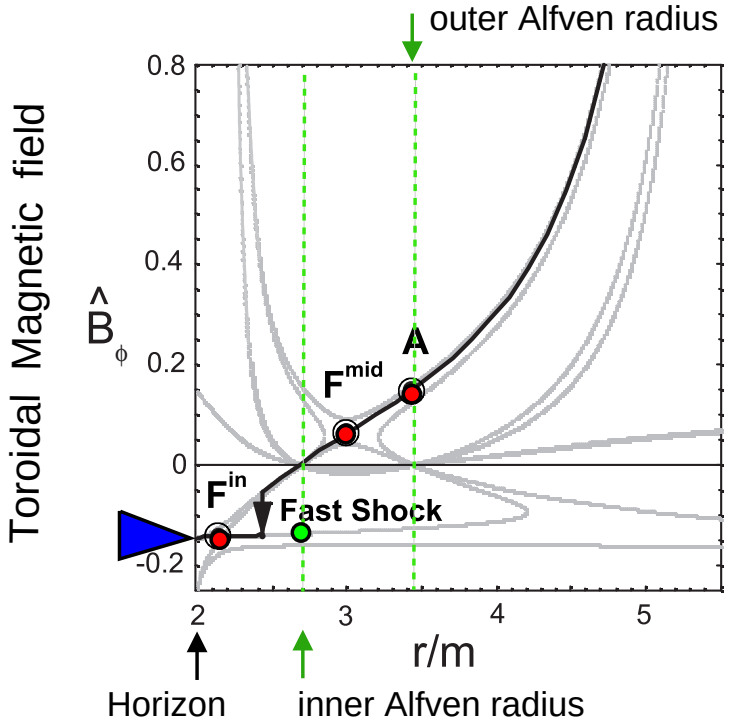
ショック面は局部領域に発生するのでは？ — 高緯度 or 低緯度

■ 4 ■ Shocked MHD BH-Accretion *Takahashi et al.* (2005)

定常解 ： 遅い磁気音速点 (S) = > アルフェン点 (A) = > 速い磁気音速点 ($\mathbf{F}^{\rm out}$) = >

= > **Fast Magnetosonic Shock** = > 速い磁気音速点 ($\mathbf{F}^{\rm in}$) = > ブラックホール



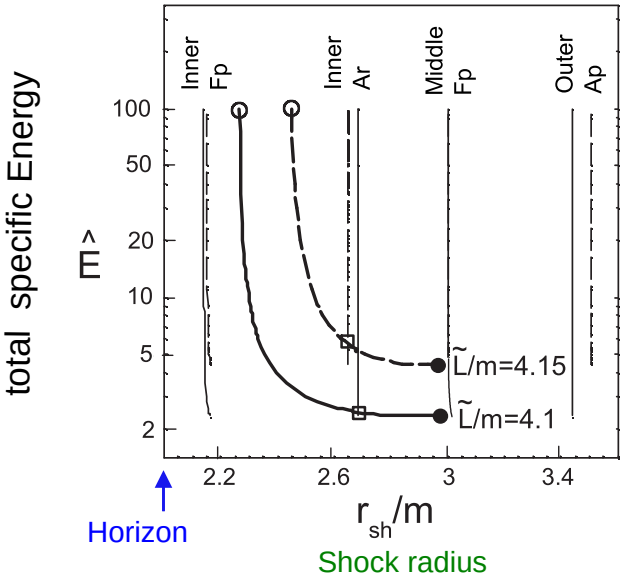


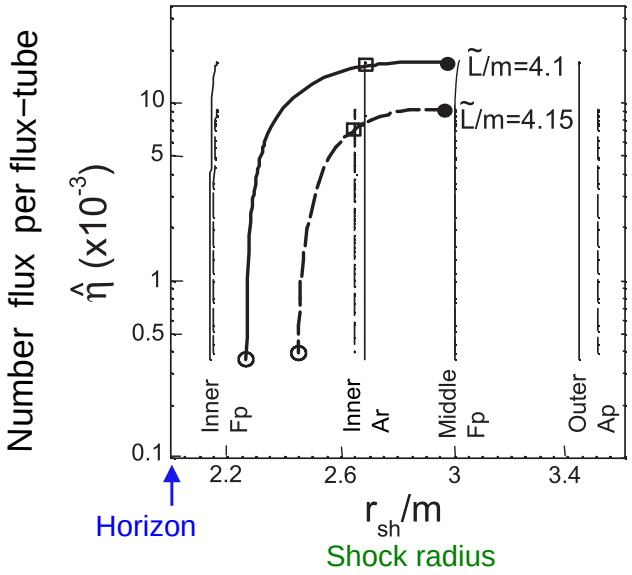
- M: **Alfvén Mach number** ($\equiv u_p/u_{\rm AW}$)
- m: **BH mass** ($r_{\rm H}=2m$: **BH radius**)
- B_ϕ: **toroidal magnetic field**

(**BH**の境界条件より、B_ϕ^H は磁気圏の回転角速度に応じて決まってしまう)

- 運動エネルギーは、磁場エネルギーと熱エネルギーに分配 (後述)

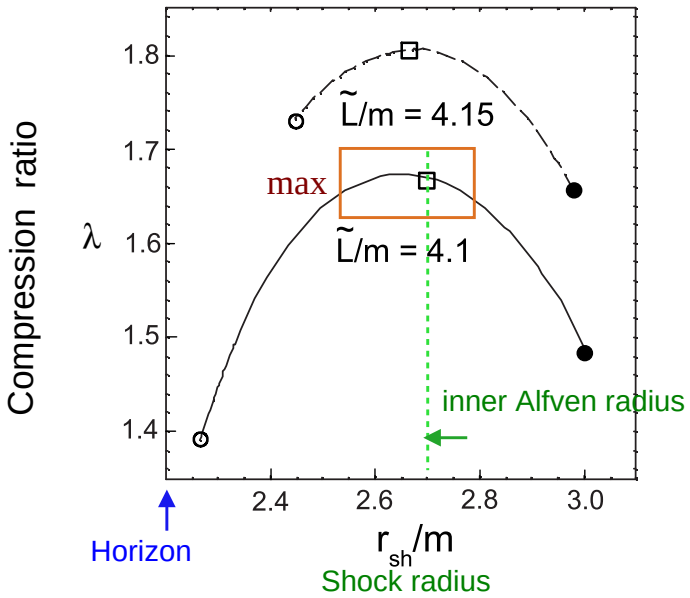
■ 5-A ■ GR-MHD Shocks : Energy of inflows

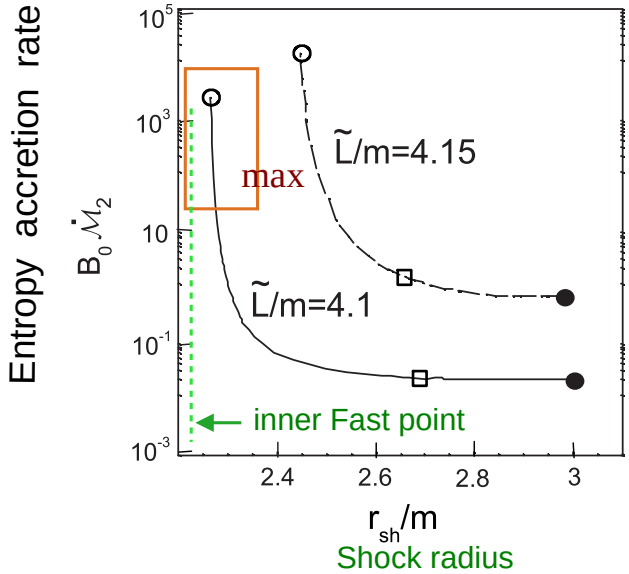




- 上流と下流で、それぞれ『遷磁気音速流の解』を選んでいる。
- エネルギーの値を変えて、＜ショック位置＞を計算した。
- このとき粒子数フラックスは、臨界条件より決定されている。

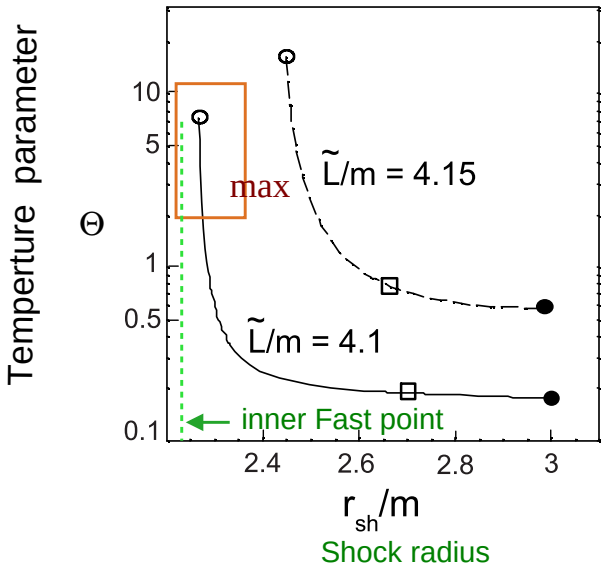
■ 5-B ■ GR-MHD Shocks : Compression ratio

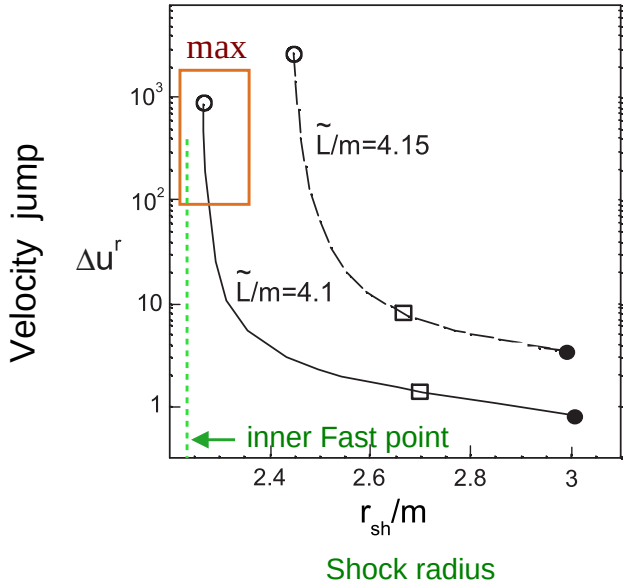




- 圧縮比 (上流と下流の粒子数の比): $\lambda \equiv \dfrac{n_2}{n_1}$
- **Entropy related accretion ratio :** $\dot{\mathcal{M}} \equiv K^{1/(\Gamma-1)} m_p \eta$
- 圧縮比が大きいのは「アルフェン半径」(アルフェン点ではない) の近傍。
- この辺りのショックが、**より Hot な plasma 領域 を形成されるのか？**

■ 5-C ■ GR-MHD Shocks : Hot Plasma Region





- 温度パラメータ： $\Theta \equiv \dfrac{k_B T}{m_p c^2}$
- 速度の差： $\Delta u^r \equiv (u^r)_1 - (u^r)_2$

- ホライズン近傍のショック程、**Hot な plasma 領域** となる。

  このショックは、大きな E、小さな η の下で実現していた。圧縮比は小さい。

- 磁場エネルギーへのエネルギー転換には制限がある。 ⇐ **GR-effect**

  BH の境界条件より、B_ϕ の値は E 値に依らず決まっているため。

■ 7 ■ Radiative MHD Shocks

Takahashi & Takahashi (準備中)

(1) $[T^{rt}] = 0$ **and** $[T^{r\phi}] = 0$ のショック条件：

$$T^{rt} = T^{rt}_{\rm fluid} + T^{rt}_{\rm EM} + T^{rt}_{\rm rad} = \left(\frac{nu^r}{\rho_w^2}\right)\left[g_{\phi\phi}(E_{\rm fluid}+E_{\rm EM}+E_{\rm rad}) + g_{t\phi}(L_{\rm fluid}+L_{\rm EM}+L_{\rm rad})\right]$$

$$T^{r\phi} = T^{r\phi}_{\rm fluid} + T^{r\phi}_{\rm EM} + T^{r\phi}_{\rm rad} = \left(\frac{nu^r}{\rho_w^2}\right)\left[-g_{t\phi}(E_{\rm fluid}+E_{\rm EM}+E_{\rm rad}) - g_{tt}(L_{\rm fluid}+L_{\rm EM}+L_{\rm rad})\right]$$

$$T^{\mu\nu}_{\rm rad} = u^\mu q^\nu + u^\nu q^\mu \ , \quad q^\mu : \ \text{flux four vector}$$

$$E_{\rm rad} = \frac{1}{nu^r}\left(u_r q_t + q_r u_t\right) \ , \quad L_{\rm rad} = -\frac{1}{nu^r}\left(u_r q_\phi + q_r u_\phi\right)$$

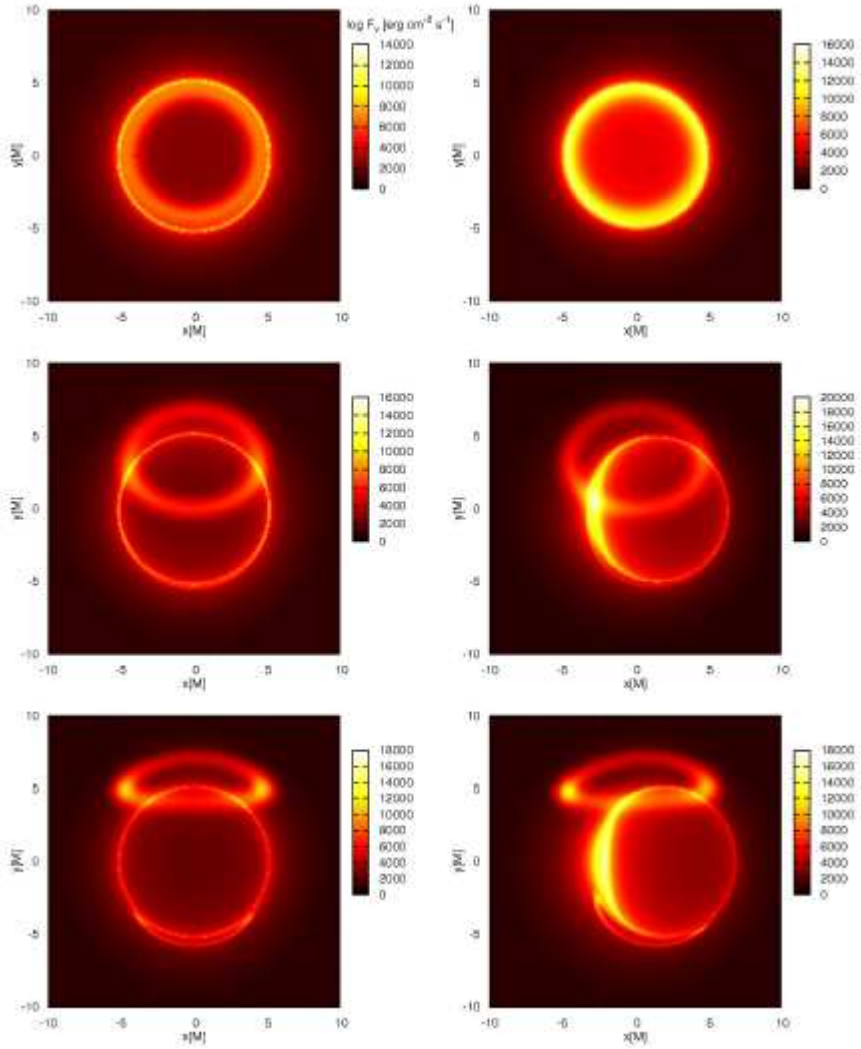
(2) $[T^{rr}] = 0$ **and** $[T^{r\theta}] = 0$ のショック条件：

(3) 上流の保存量、輻射機構 ($q^\mu \Leftarrow$ シンクロトロン輻射など) を与えると
(local) スペクトルが計算できる。(q^μ の計算には λ, Θ 値が必要となる)

(4) q^μ : 流体静止系 $\Rightarrow$ **ZAMO** $\Rightarrow$ **Boyer-Lidquist Frame**

(5) スペクトル＆ショックイメージ . . . 重力レンズ効果の計算

ブラックホール・オーロラ



■ 8 ■ Discussions & Summary

◎ MHD Shock ⇒ Hot Plasma in Polar region (thin plasma region)

- Hot Plasma ⇒ Direct γ-rays / X -rays ?

  (局所的な輻射発生過程 →

  → 重力レンズ効果、スペクトル予測)

- Hot Plasma ⇒ Thermally driven outflows (jets) ?

  (降着ガスの一部がジェットを形成？ →

  → MHD シミュレーション)

■ 9 ■ まとめ

一般相対論的磁気流体力学を『ブラックホール磁気圏』に適用した。

■ 強重力場のため、内向きの流れに対してアルフェン点や速い磁気音速点が発生する

（しかも、これらを通過しないとブラックホールに降着する解にならない）。

- **Trans-magnetosonic flow のための条件** *(Takahashi 2002, Takahashi and Tomimatsu 2005)*
- **MHD shock 発生の条件** *(Takahashi et al. 2005)*

■ 強いショック（圧縮比λが大きい）が発生するのは、“アルフェン半径”近傍にショックが発生した時である。磁場の形状を変化させて計算する事で $\lambda \sim 3$ 程度の解を得ている。

■ ショック後のプラズマが高温 ($\Theta \gg 1$) になるのは、より BH 近くにショックが発生する場合である。ただし、圧縮比は小さい。このようなショックが形成される時の流れのパラメータを見ると、エネルギーフラックス ηE とエントロピー発生 $\dot{\mathcal{M}}$ が大きくなっている (磁気音速点の条件を加味している)。

■ 高温プラズマ領域が形成されるのは流入したエネルギーフラックスが大きい場合だが、このときの (上流のプラズマ運動エネルギーからの) 磁場へのエネルギー転化には頭打ちがある。BH の境界条件 (一般相対論効果) のためである。ショックで解放される膨大なエネルギーは加熱 (温度上昇) に使われる。

■ 9 ■ 今後の展開

★ ξ-method *(Takahashi & Tomimatsu)* による "Hot" Trans-magnetosonic Flow 解法ツール の開発 . . . . X-type analysis は職人的！

- Shock 解探しに有効 $\Longrightarrow$ 観測データ (Sgr A*, AGN) との照合
- 磁場形状解法へ $\Longrightarrow$ Energy 引き抜きの評価。ジェットの起源。

★ Resistive MHD Flows と Radiative MHD

Magnetized ADAF のモデル。 $\Longrightarrow$ Disk からのスペクトル。角運動量輸送の問題。

磁気圏の境界条件としての位置付け。

★ GR-MHD Shock のダイナミックス (1 次元数値シミュレーションで OK)

安定性の議論 (解析的手法： HD $\rightarrow$ MHD への拡張)。 $\Longrightarrow$ スペクトルの時間変動。