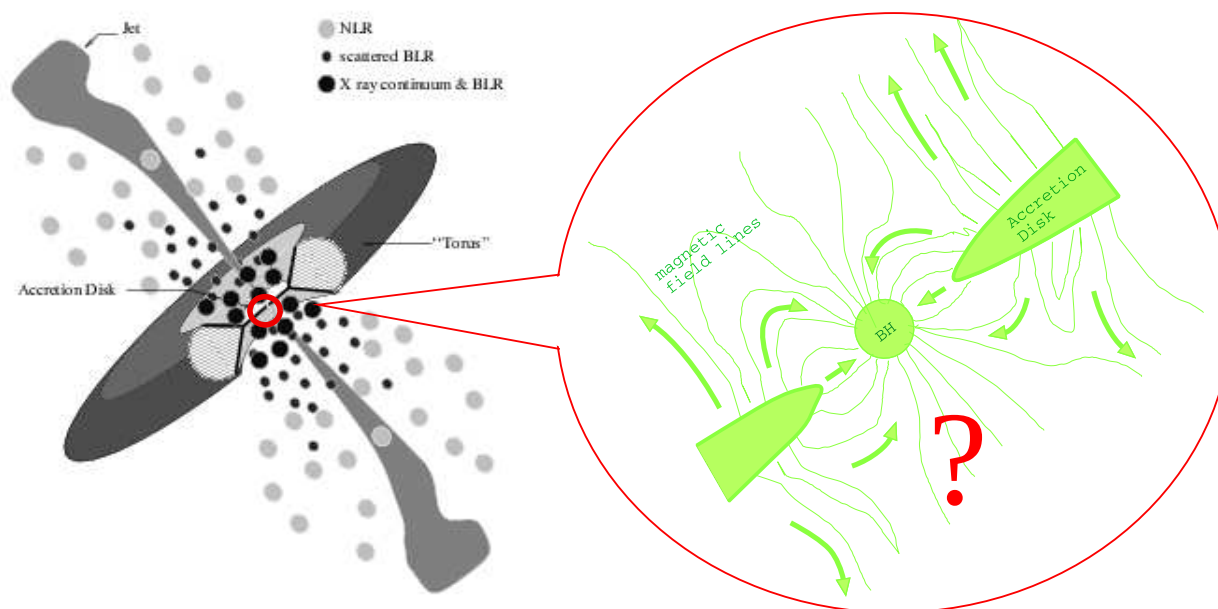


ブラックホール降着流における MHD Shock 形成

高橋 真聡 (愛知教育大学)



Black Hole — Accretion Disk — Jet Active Region System

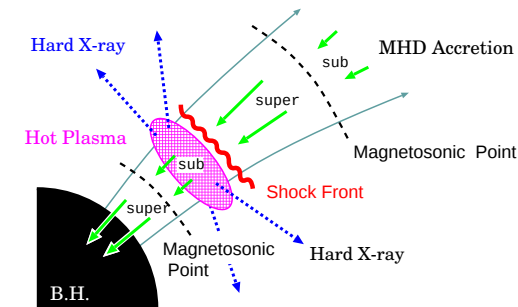
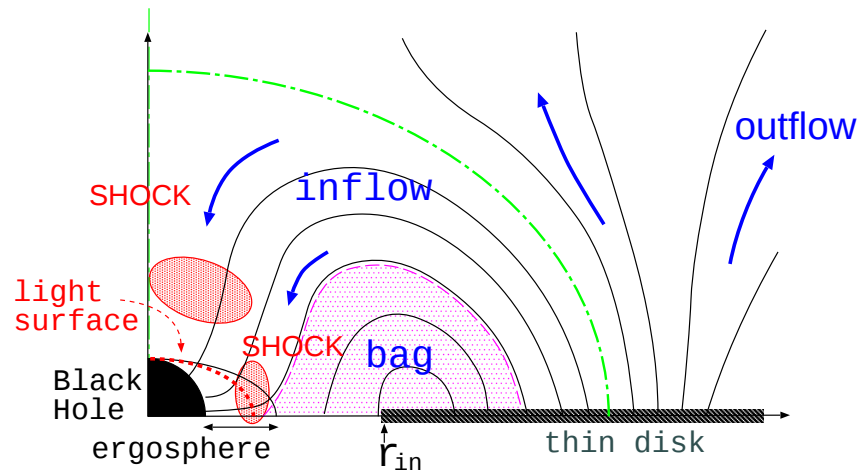
- AGN : 中心に「巨大ブラックホール」が存在 !?
- 膨大な重力エネルギー/回転エネルギーが解放される活動性
- ブラックホールの周りに、降着ガス円盤および磁気圏が形成
- 強重力場下におかれたプラズマ物理は ?
- 磁気圏の活動性を観測できるか (X-ray, γ -ray など) ?
- (そもそも) 強重力場時空そのものがどのような様になっているのか ?

<ショック形成を議論する>

高温プラズマ領域は、高エネルギー輻射の源になりえて、我々が観測できる物理量を提供してくれるか !?

“Black Hole Magnetosphere” =

Loop (bag) + Disk-BH (inflow) + BH - r_∞ (outflow)



- * Loop mag. field (**bag**) ... outside the inner-light surface $\Rightarrow$ **Flare-like mass-ejection ?**
- * For *high* accretion rate inflow (fluid-dominated case), **the bag** would reduce the size.
- * Fast/Slow **MHD shocks** are possible **near the event horizon**. $\Rightarrow$ **Hot plasma region !**
- * Outgoing magnetically-dominated wind $\Rightarrow$ (energy conversion from ME to KE)
 $\Rightarrow$ **Relativistic Jets !**

基礎方程式

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

where

$$\begin{aligned}
 T^{\alpha\beta} &= n\mu u^\alpha u^\beta - Pg^{\alpha\beta} + \frac{1}{4\pi} \left(F^\alpha{}_\lambda F^{\lambda\beta} + \frac{1}{4} g^{\alpha\beta} F^2 \right) & : \text{the energy-momentum tensor} \\
 \rho &= \rho_0 + \frac{1}{\Gamma-1} P & : \text{the total energy density} \\
 \rho_0 &= nm_p & : \text{the rest mass density} \\
 \mu &= \frac{\rho + P}{n} = m_p + \frac{\Gamma}{\Gamma-1} \frac{P}{n} & : \text{the relativistic entalpy}
 \end{aligned}$$

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_p : the particle's mass

流線に沿った「5つの保存量」 (Flow's parameters)

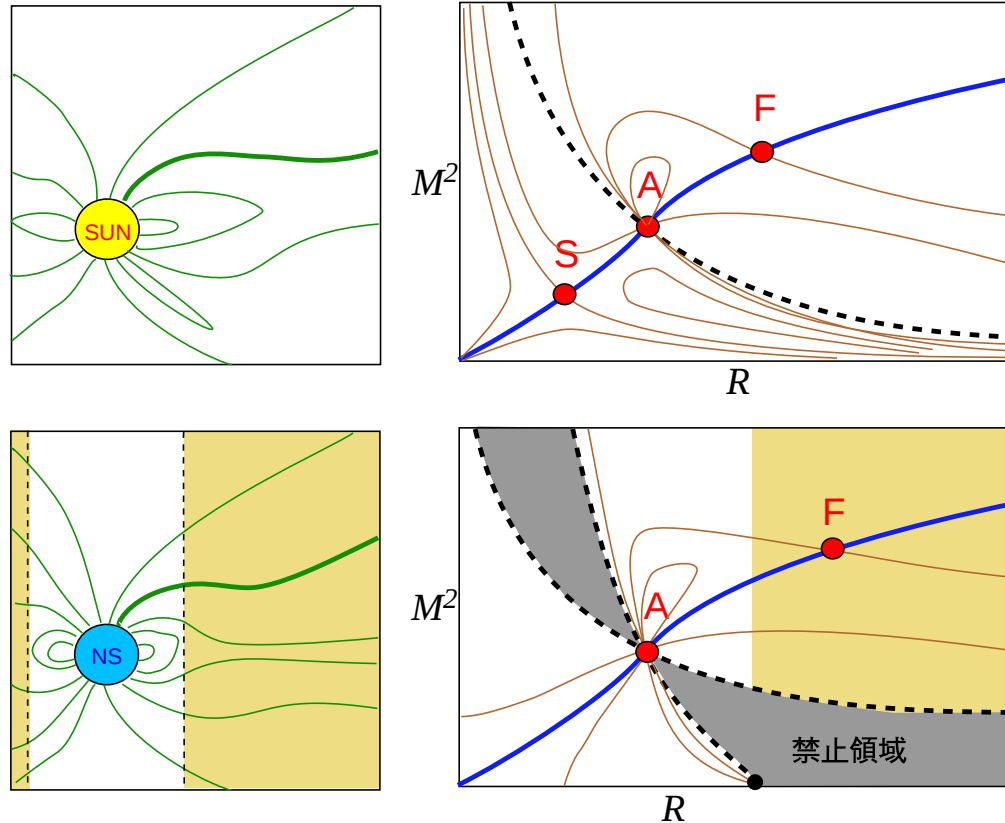
定常・軸対称を仮定

- * 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 $S(\Psi)$ (or 他の量と組み合わせて $\dot{\mathcal{M}}$ と表記)

■ 太陽風解 (上段) と パルサー風解 (下段) ■

5

定常解 : 遅い磁気音速点 (S) $\Rightarrow$ アルフェン点 (A) $\Rightarrow$ 速い磁気音速点 (F) $\Rightarrow$ 遠方へ

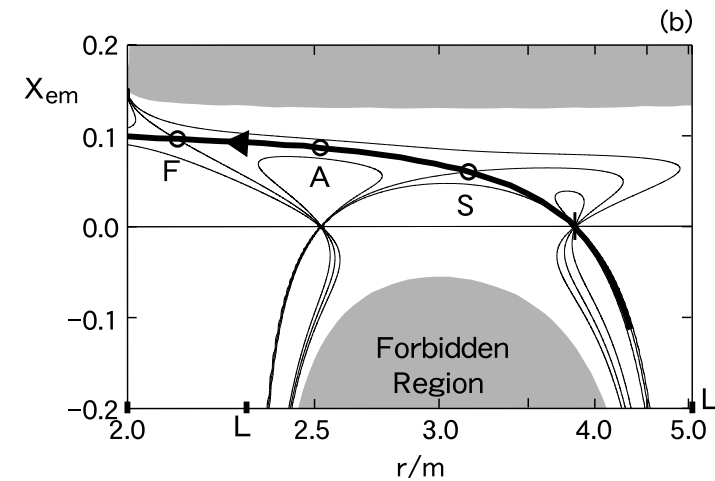
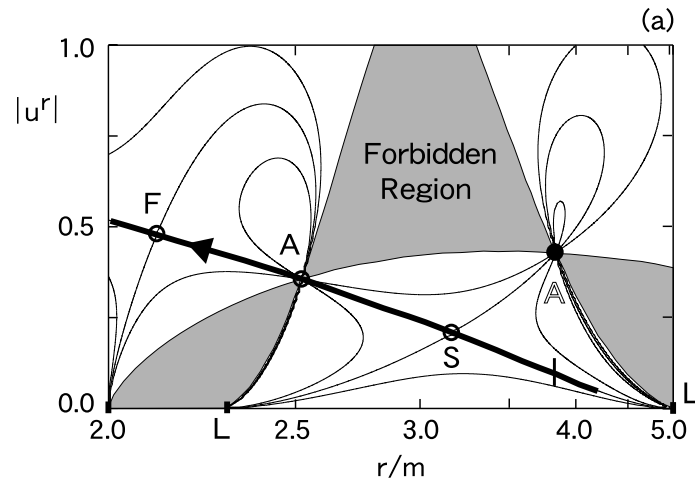


● パルサーの場合 : 特殊相対論の効果のため、「禁止領域」が発生 (光速度以上で運動する解に相当)。

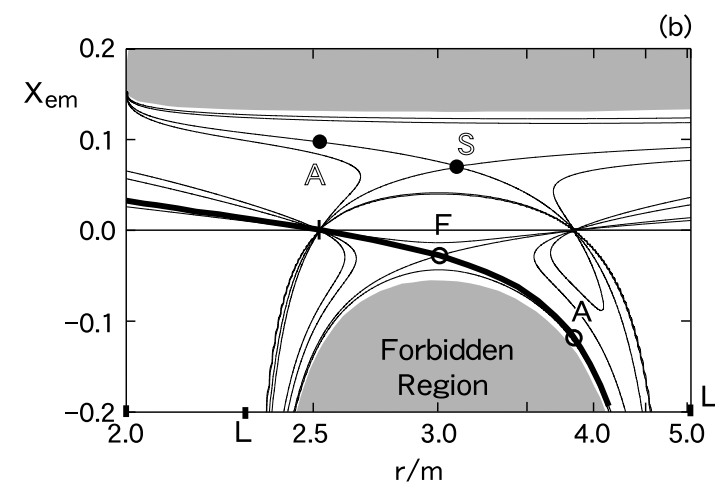
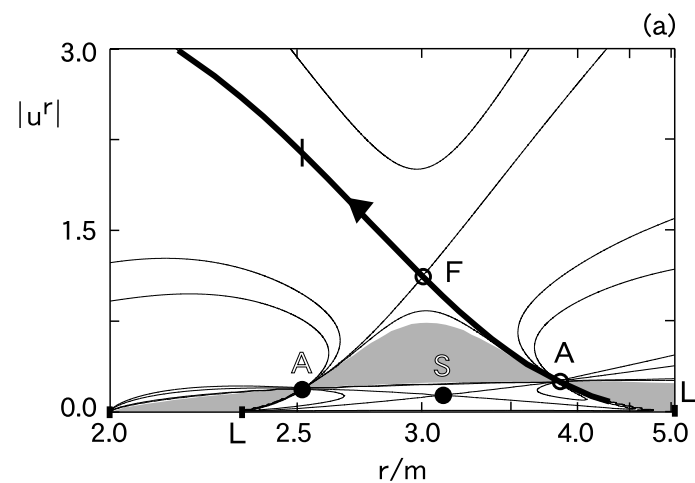
Black Hole 降着流の解

Takahashi (2002)

★ **Magneto-like flow** : 磁場が強い場合に残る解



★ **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

ショック条件

ランキン=ユゴニオ条件：

ショック面では S (or $\mathcal{M}$) のみ変化する。 E, L, Ω_F, η はショック面でも保存する。

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

磁場の条件についてのコメント

★ Plasma comoving frame : $b_\alpha \equiv {}^*F_{\alpha\beta}u^\alpha$, $e_\alpha \equiv F_{\alpha\beta}u^\alpha$

★ Lab-frame (BL-coordinate) : $B_\alpha \equiv {}^*F_{\alpha\beta}k^\alpha$, $E_\alpha \equiv F_{\alpha\beta}k^\alpha$

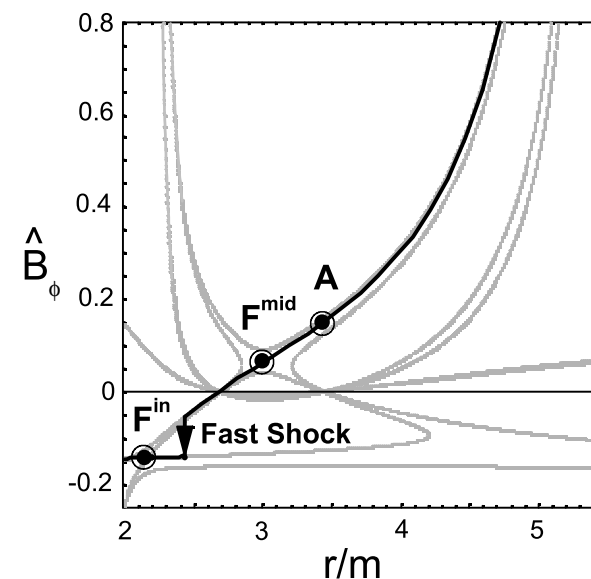
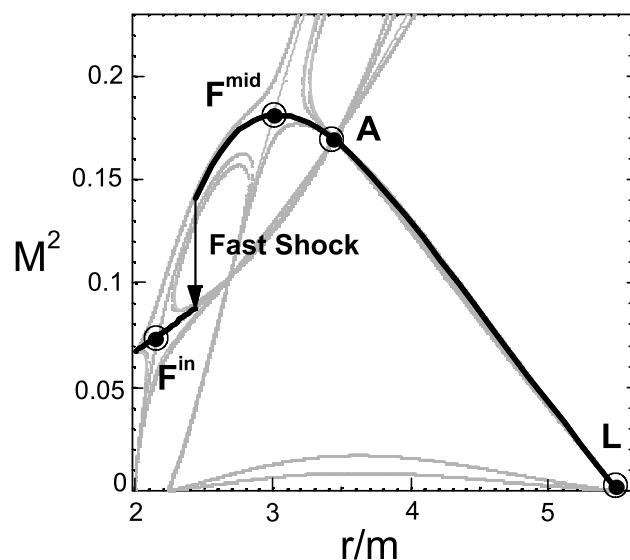
ショック面では

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

● $[\mu b_\perp] = 0$ ($b_\perp \equiv b^\alpha \ell_\alpha$)

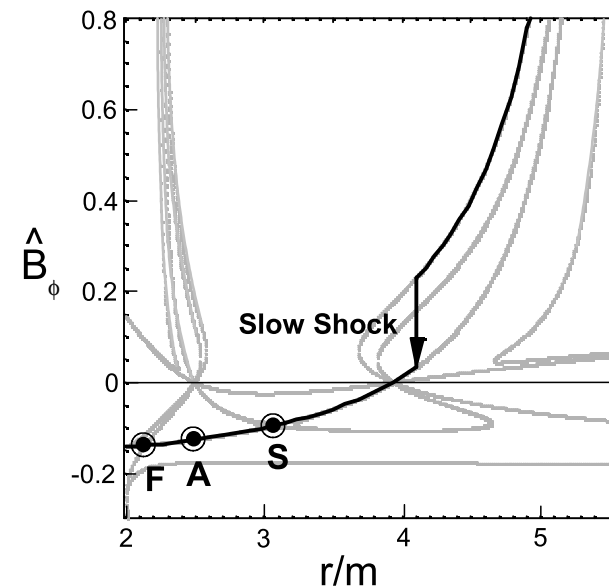
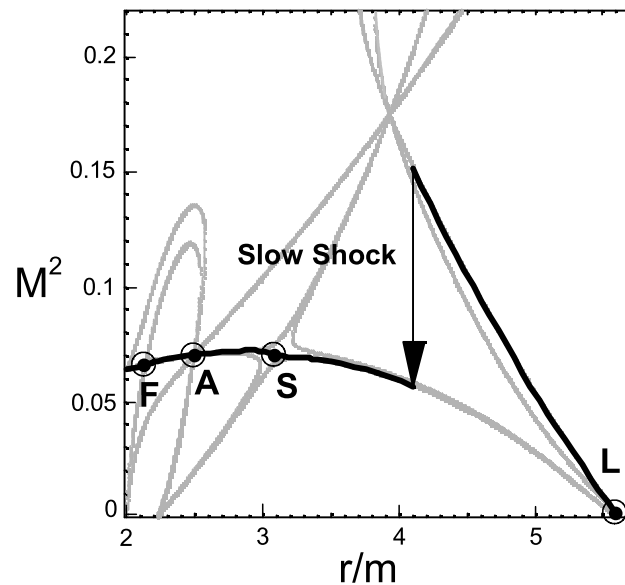
non-relativistic limit $\rightarrow \mu = m_p c^2$ (定数) なので $[b_\perp] = 0$

定常解 : 遅い磁気音速点 (S) $\Rightarrow$ アルフェン点 (A) $\Rightarrow$ 速い磁気音速点 (F^{out}) $\Rightarrow$
 $\Rightarrow$ **Fast Magnetosonic Shock** 速い磁気音速点 (F^{in}) $\Rightarrow$ ブラックホール

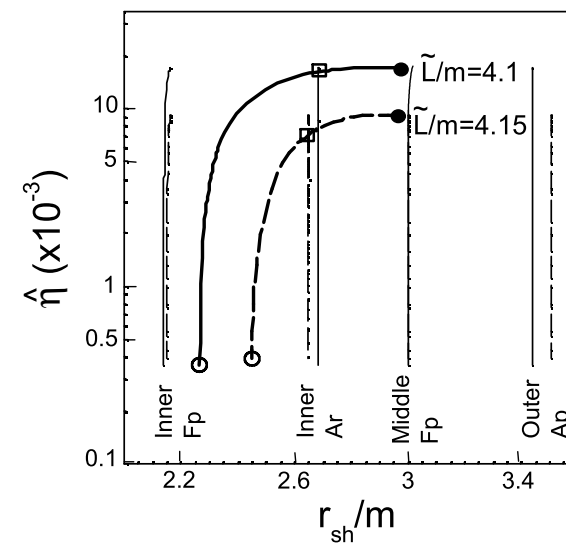
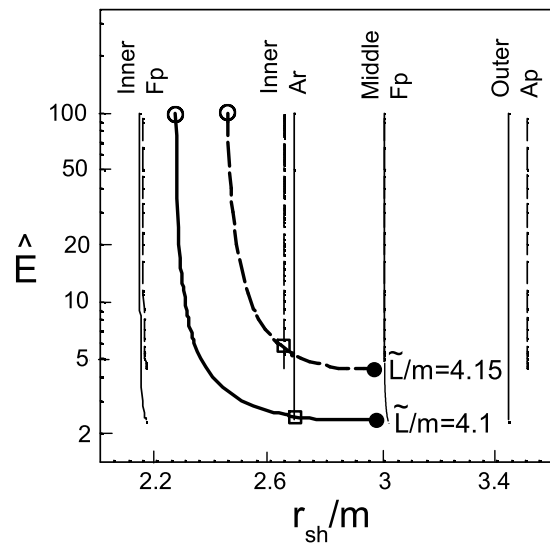


- M^2 : Alfvén Mach number
- m : black hole mass ($c = G = 1$ の単位系採用 : $r = 2m$ は BH 半径を表す)
- B_ϕ : toroidal magnetic field (BH の境界条件より、 B_ϕ^H は磁気圏の回転角速度に応じて決まってしまう)
- 運動エネルギーは、磁場エネルギーと熱エネルギーに分配 (後述)

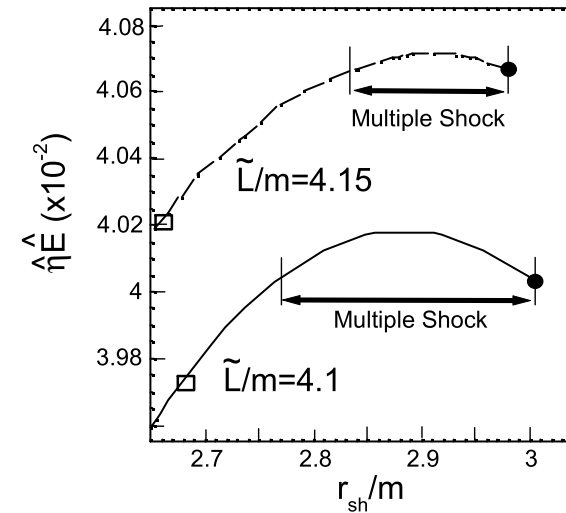
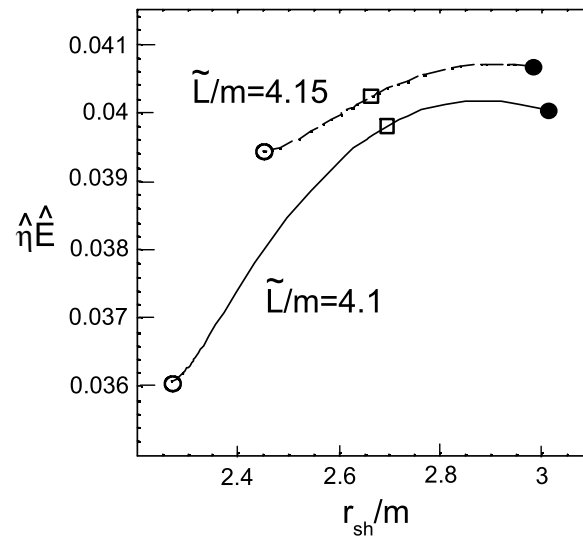
定常解 : 遅い磁気音速点 (S) => **Slow Magnetosonic Shock** => 遅い磁気音速点 (S) =>
=> アルフェン点 (A) => 速い磁気音速点 (F^{in}) => ブラックホール



- M^2 : Alfvén Mach number
- m : black hole mass ($c = G = 1$ の単位系採用 : $r = 2m$ は BH 半径を表す)
- B_ϕ : toroidal magnetic field
- 運動エネルギーと 磁場エネルギーは、熱エネルギーに分配
(B_ϕ が減る。磁場のエネルギーは熱化する。)



- 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。

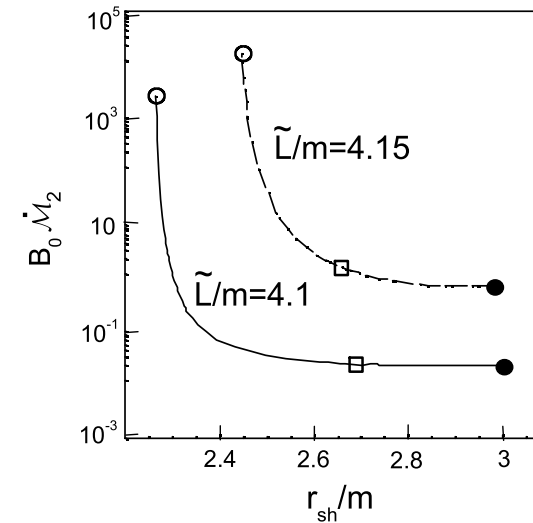
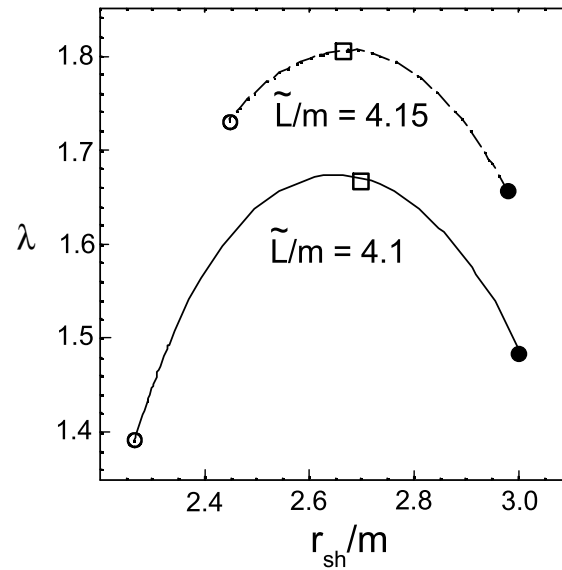


- 「アルフェン半径」の外側に、Intermediate Shock が可能。
- ここに、多重ショック解が存在！

=>

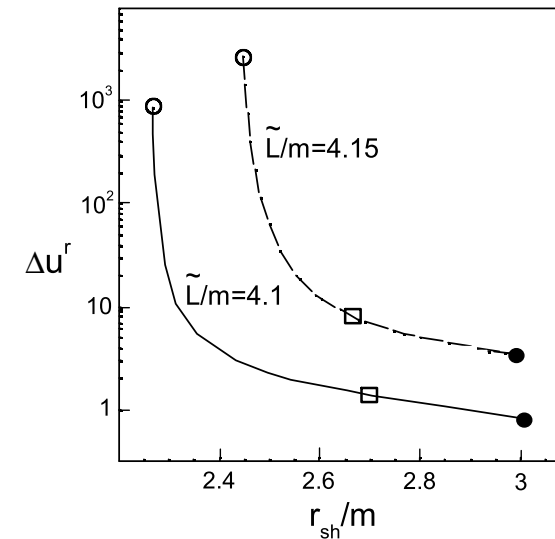
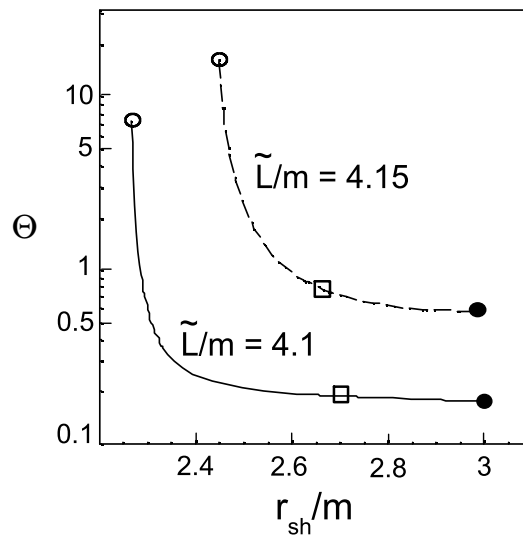
どちらの解が選択されるのか？

■ 5-C ■ MHD Shock の性質： 圧縮比 / エントロピー生成

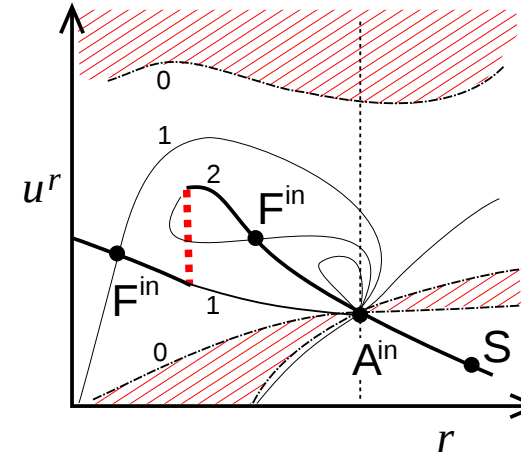
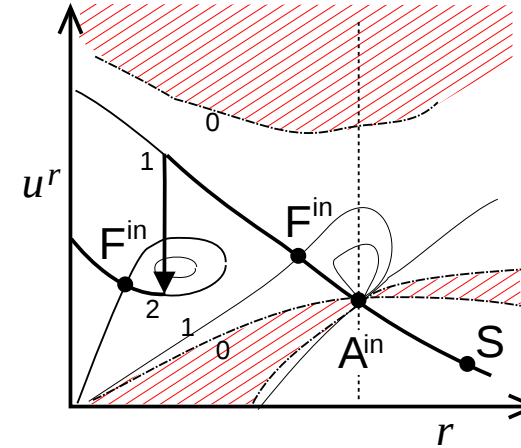


- 圧縮比 (上流と下流の粒子数の比): $\lambda \equiv \frac{n_2}{n_1}$
- Entropy related accretion ratio : $\dot{\mathcal{M}} \equiv K^{1/(\Gamma-1)} m_p \eta$
- 圧縮比が大きいのは「アルフェン半径」 (アルフェン点ではない) の近傍。
- この辺りのショックが、より Hot な plasma 領域 を形成されるのか？

No.



- 温度パラメータ : $\Theta \equiv \frac{k_B T}{m_p c^2}$
- 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。 $\Leftarrow$ 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。



- ## 安定性解析、ダイナミカルに解く

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が、最大値を知るためにはより広いパラメータサーチが必要である (今後の課題)。

■ 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 $\dot{M}$ 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。

END