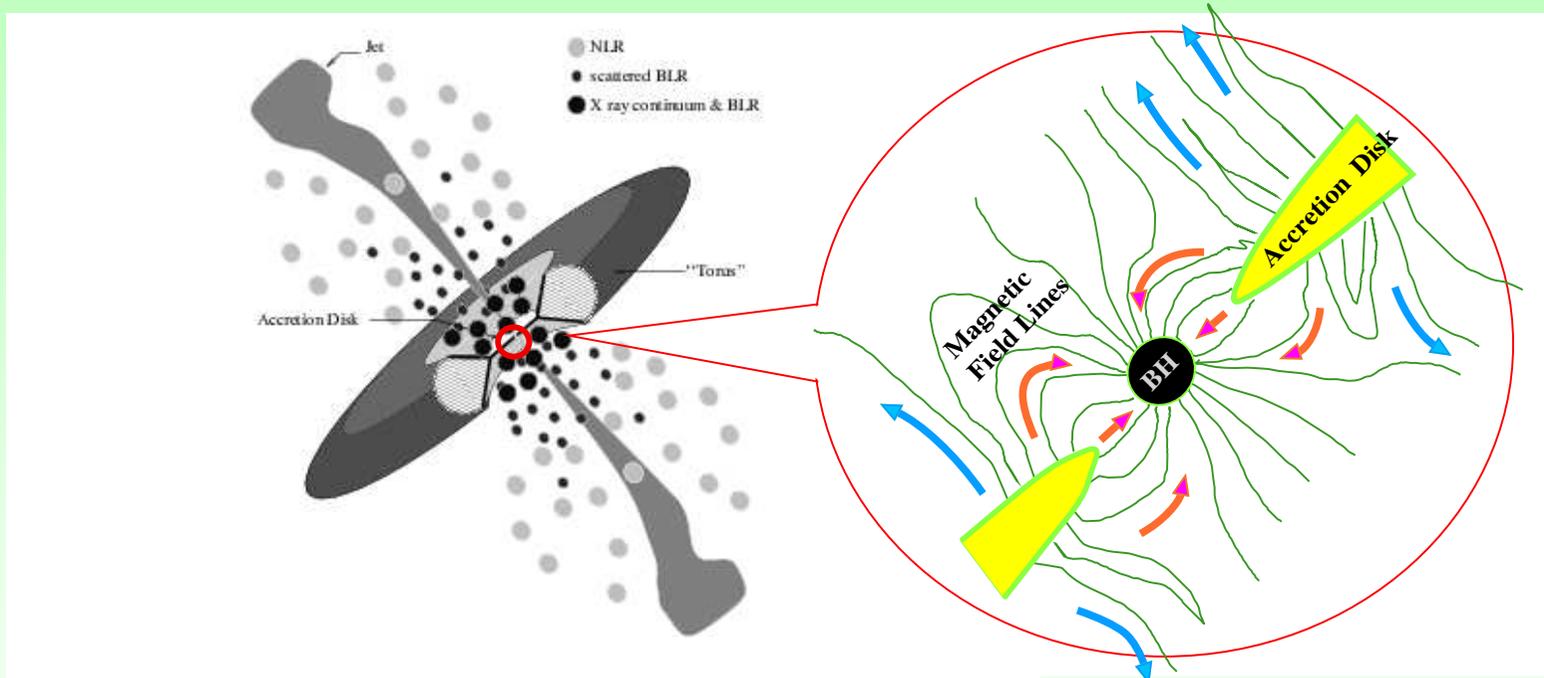
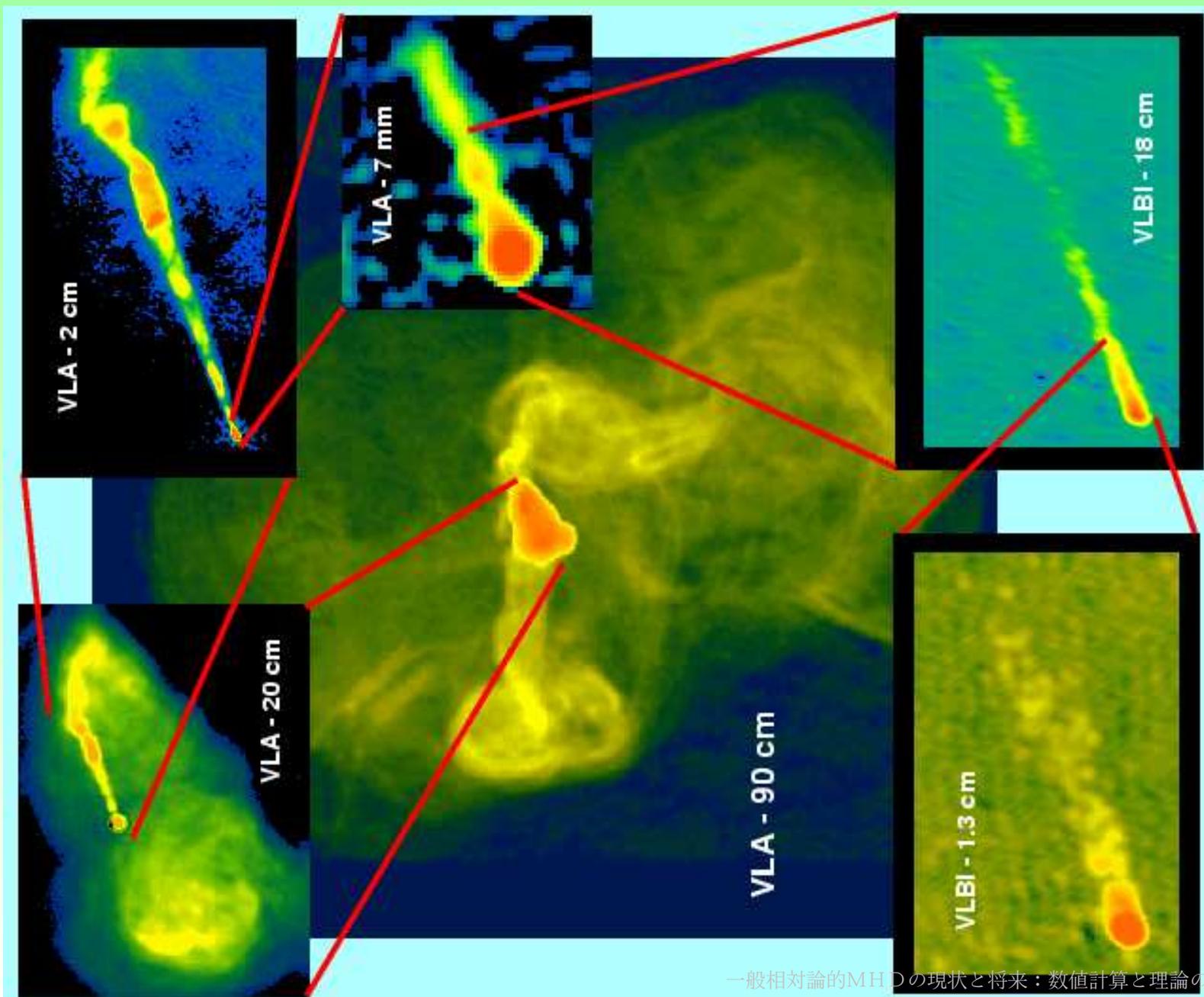


一般相対論的MHDの現状と将来： 数値計算と理論の融合

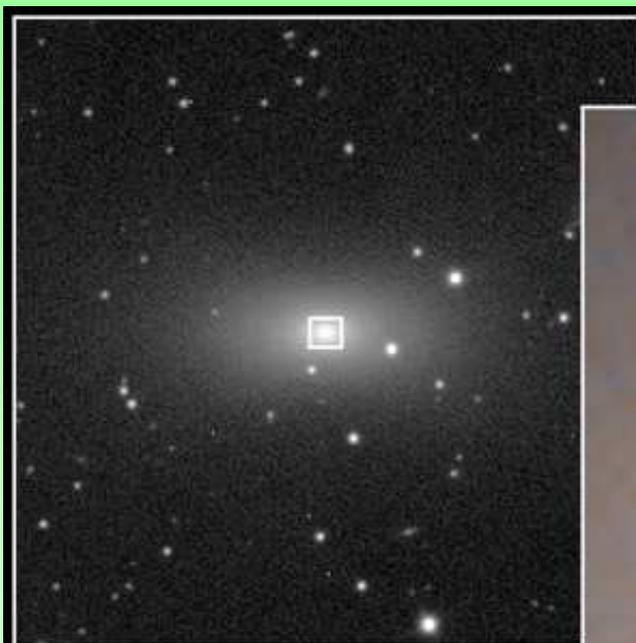
高橋真聡 (愛知教育大学)



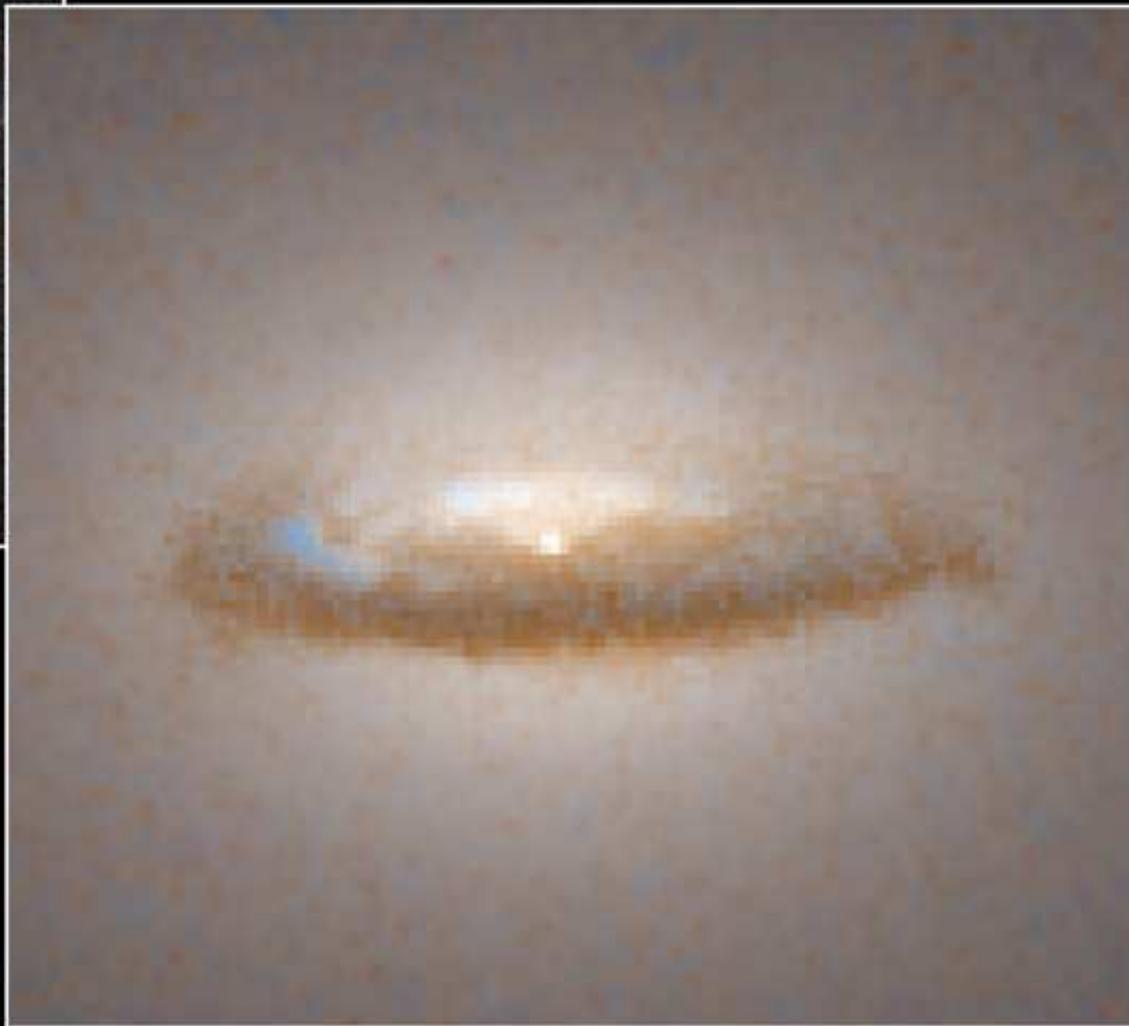
Jet & Disk (1)



Jet & Disk (2)



Ground



HST • WFPC2

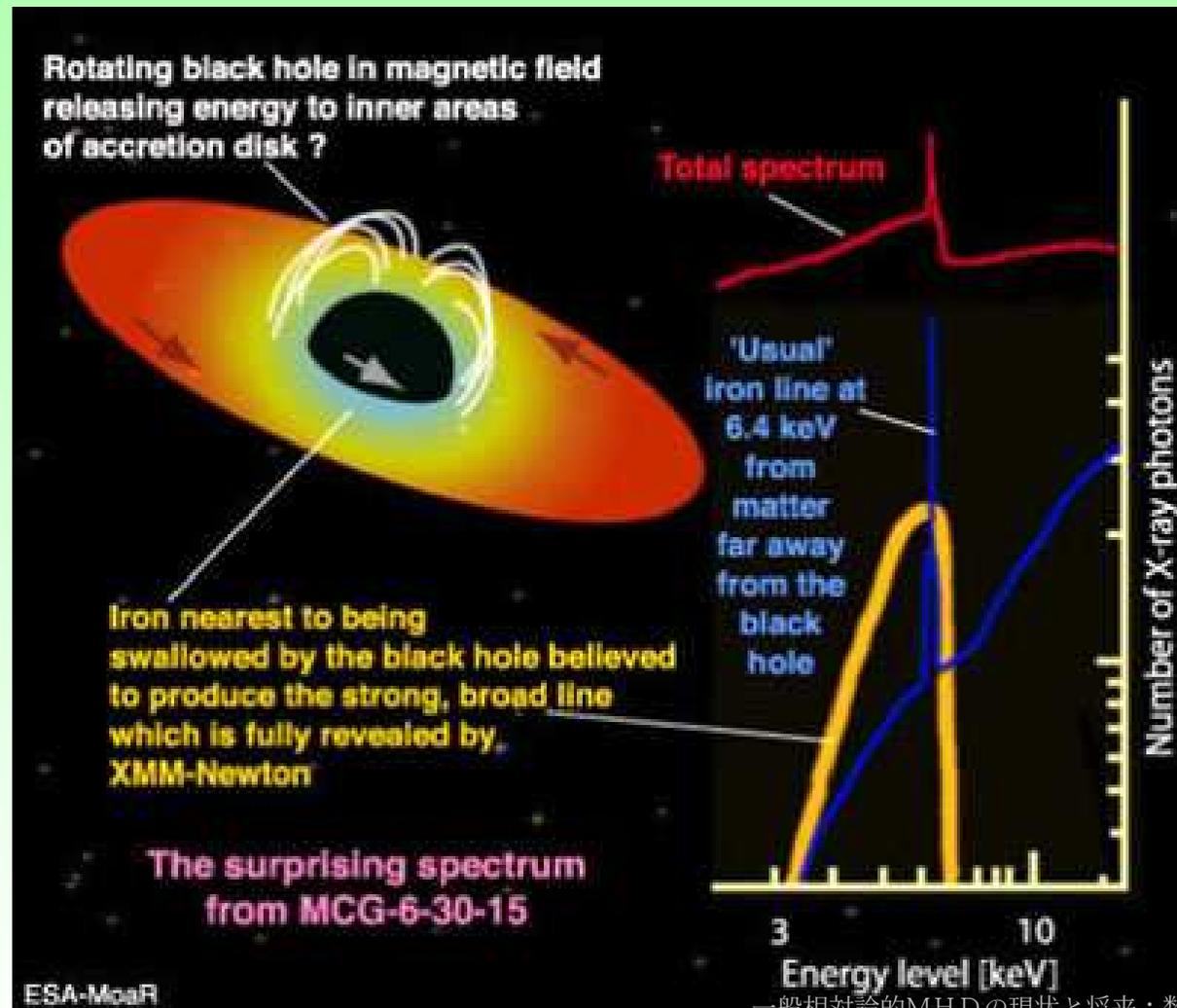
Disk in Galaxy NGC 7052

PRC98-22 • June 18, 1998 • ST ScI OPO

R. P. van der Marel (ST ScI), F. C. van den Bosch (University of Washington) and NASA

XMM-Newton による観測

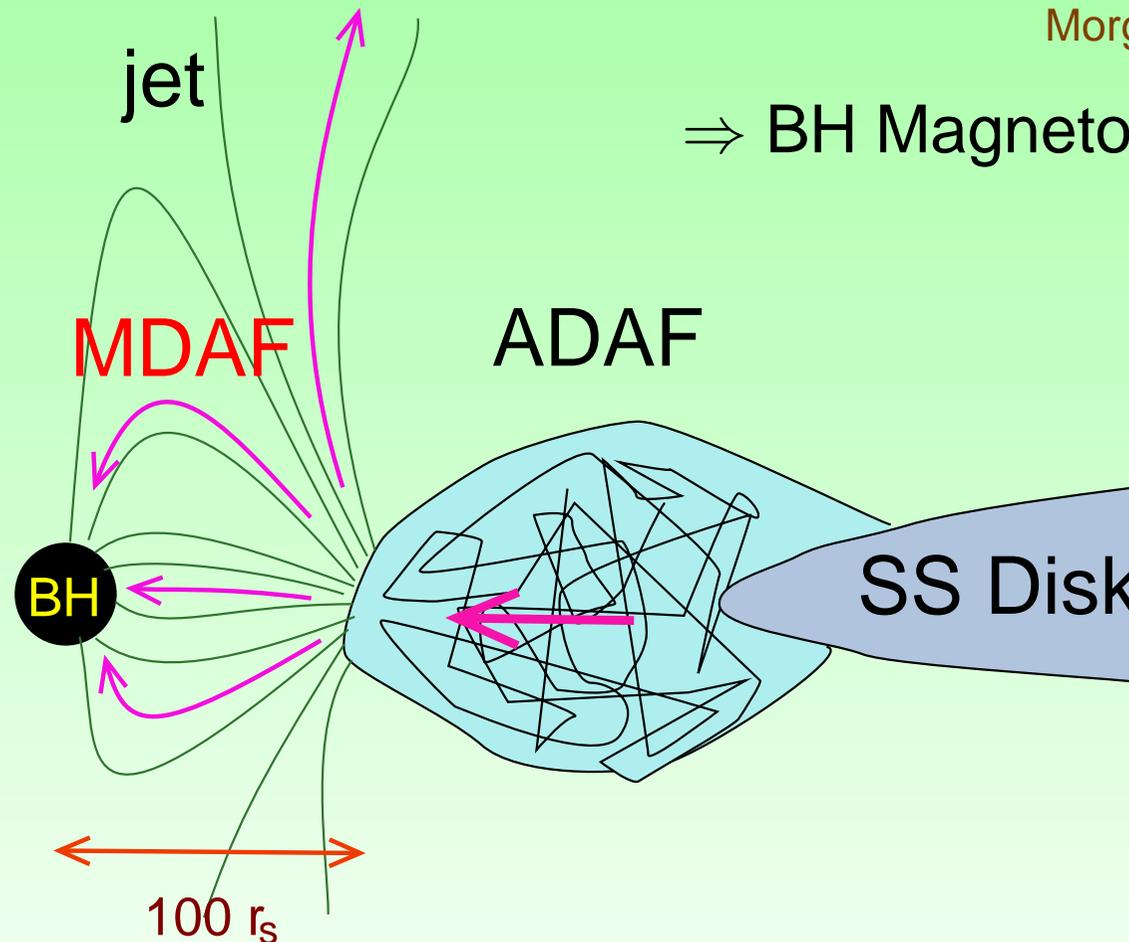
降着円盤モデルから予想されるエネルギーをはるかに越えていた！ BH の自転エネルギー起源か？ (Wilms et al. 2001)



Accretion Disk model

GRS 1915+105 : Evidence of inner strong Magnetic Field

Morgan et al. (1997)



Magnetically Dominated Accretion Flow (**MDAF**) by Meier (2005)

一般相対論的 MHD

ブラックホール (BH) 天体物理学の時代の始まり

- ◎ 活動性の中心にブラックホールあり！
- ◎ 『曲がった時空とは？』 ▼ . . .
いままで (Newtonian) と何が違うの？
- ◎ 磁場は重要か？ 強磁場天体の発見

BH 磁気圏/降着円盤 (GRMHD) の研究 のほんの一部

- ◎ 理論モデル (定常解) : Blandford(1977), Camenzind, Tomimatsu, Hirovani, Nitta, MT, Gammie, Uchida, Okamoto, Punysly, Li, Lee, Ghosh, Beskin, Phinney, , ,
- ◎ 数値シミュレーション : Wilson(1975), Yokosawa, Koide, Aoki, Hawley, Hirose, McKinney, Komissarov, Villier, Shapiro, Baumgarte, Khanna, Brandenburg, , ,

本日のメニュー

- ◎ ブラックホール (BH) の基礎知識
 - ★ 曲がった時空
 - ★ ブラックホールと磁場の関係
 - ★ Blandford-Znajek (BZ) 機構とは
- ◎ MHD シミュレーション McKinney (2005) の紹介
- ◎ 理論 (定常解) モデル
- ◎ ブラックホール磁気圏の姿は? (AGN, GRB, , ,)
- ◎ 今後の GRMHD 研究のねらい目

ブラックホールと磁場の関係

- ◎ BH は毛が三本（質量、角運動量、電荷）。磁場は自ら作らない。

ブラックホールと磁場の関係

- ◎ BH は毛が三本（質量、角運動量、電荷）。磁場は自ら作らない。
- ◎ BH を貫く磁場は OK：外部環境で用意する
(BH 内部で、ideal MHD は破綻する)

ブラックホールと磁場の関係

- ◎ BH は毛が三本（質量、角運動量、電荷）。磁場は自ら作らない。
- ◎ BH を貫く磁場は OK：外部環境で用意する
(BH 内部で、ideal MHD は破綻する)
- ◎ **境界条件**： $A_\phi^H = A_\phi^H(\theta)$, $B_\phi^H = B_\phi^H(\theta)$ は有限値。

ブラックホールと磁場の関係

- ◎ BH は毛が三本（質量、角運動量、電荷）。磁場は自ら作らない。
- ◎ BH を貫く磁場は OK：外部環境で用意する
(BH 内部で、ideal MHD は破綻する)
- ◎ **境界条件**： $A_\phi^H = A_\phi^H(\theta)$, $B_\phi^H = B_\phi^H(\theta)$ は有限値。
- ◎ 高速回転する BH は磁力線を締め出してしまう。

ブラックホールと磁場の関係

- ◎ BH は毛が三本（質量、角運動量、電荷）。磁場は自ら作らない。
- ◎ BH を貫く磁場は OK：外部環境で用意する
(BH 内部で、ideal MHD は破綻する)
- ◎ **境界条件**： $A_\phi^H = A_\phi^H(\theta)$, $B_\phi^H = B_\phi^H(\theta)$ は有限値。
- ◎ 高速回転する BH は磁力線を締め出してしまう。
- ◎ BH 近傍の局所的磁場はいずれ消滅。大局的磁場のみが残る。(BH 周辺磁場はクリーニングされる)

ブラックホールと磁場の関係

- ◎ BH は毛が三本（質量、角運動量、電荷）。磁場は自ら作らない。
- ◎ BH を貫く磁場は OK：外部環境で用意する
(BH 内部で、ideal MHD は破綻する)
- ◎ **境界条件**： $A_\phi^H = A_\phi^H(\theta)$, $B_\phi^H = B_\phi^H(\theta)$ は有限値。
- ◎ 高速回転する BH は磁力線を締め出してしまう。
- ◎ BH 近傍の局所的磁場はいずれ消滅。大局的磁場のみが残る。(BH 周辺磁場はクリーニングされる)
- ◎ BH の極く近傍の磁場の擾乱は、“上流の”磁気圏には伝播しない。

ブラックホールと磁場の関係

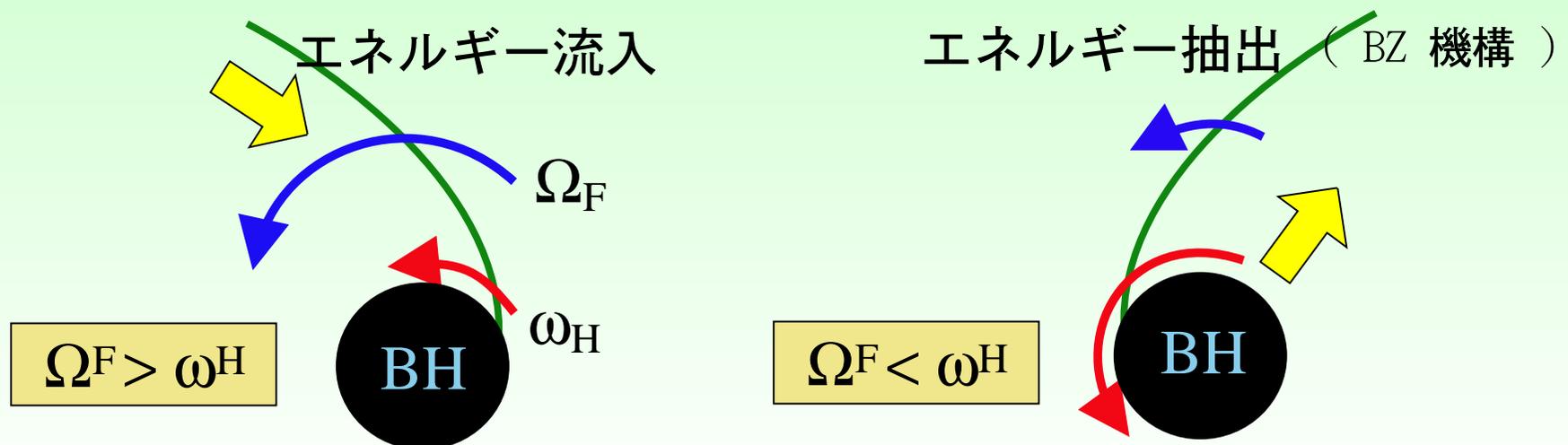
- ◎ BH は毛が三本（質量、角運動量、電荷）。磁場は自ら作らない。
- ◎ BH を貫く磁場は OK：外部環境で用意する
(BH 内部で、ideal MHD は破綻する)
- ◎ **境界条件**： $A_\phi^H = A_\phi^H(\theta)$, $B_\phi^H = B_\phi^H(\theta)$ は有限値。
- ◎ 高速回転する BH は磁力線を締め出してしまう。
- ◎ BH 近傍の局所的磁場はいずれ消滅。大局的磁場のみが残る。(BH 周辺磁場はクリーニングされる)
- ◎ BH の極く近傍の磁場の擾乱は、“上流の”磁気圏には伝播しない。
- ◎ 磁気トルクにより、BH の回転エネルギーを磁気圏／プラズマ源に伝播“可能”。**負エネルギーの降着流**が可能。

Blandford-Znajek (BZ) 機構とは

- ◎ 『時空の引きずり』 ▼ . . . 磁場も引きずられる
- ◎ 磁場による「回転エネルギー」の引き抜き機構 BZ(1977)
- ◎ 事象の地平面を出入りする Poynting Flux

$$\mathcal{E}_{\text{em}}^r \equiv T_t^r \propto E_p B_\phi \propto \Omega_F (\omega_H - \Omega_F) (B_H^r)^2$$

- ◎ エネルギー引き抜き ($\mathcal{E}_{\text{em}}^r > 0$) の条件 $0 < \Omega_F < \omega_H$



General Relativistic MHD Equations

Particle number conservation:

$$\partial_t(\sqrt{-g}\rho_o u^t) = -\partial_i(\sqrt{-g}\rho_o u^i) \quad \partial_t \rho = -\nabla \cdot (\rho \mathbf{v})$$

Ideal MHD:

$$u_\mu F^{\mu\nu} = 0 \quad \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}/c = 0$$

Momentum and energy conservation:

$$\partial_t(\sqrt{-g}T^t_\nu) = -\partial_i(\sqrt{-g}T^i_\nu) + \sqrt{-g}T^\kappa_\lambda \Gamma^\lambda_{\nu\kappa}$$

$$\partial_t(\rho \mathbf{v}) = -\nabla \cdot \mathbf{T} - \rho \nabla \phi$$

$$T_{\mu\nu} = (\rho_o + u + p + \frac{b^2}{4\pi})u_\mu u_\nu + (p + \frac{b^2}{8\pi})g_{\mu\nu} - \frac{b_\mu b_\nu}{4\pi}$$

$$T_{ij} = \rho v_i v_j + (p + \frac{B^2}{8\pi})\delta_{ij} - \frac{B_i B_j}{4\pi}$$

Induction equation:

$$\begin{aligned} \partial_t(\sqrt{-g}B^i) &= -\partial_j(\sqrt{-g}(u^j b^i - b^j u^i)) \quad \partial_t \mathbf{B} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \\ &= -\nabla(\mathbf{v} \mathbf{B} - \mathbf{B} \mathbf{v}) \end{aligned}$$

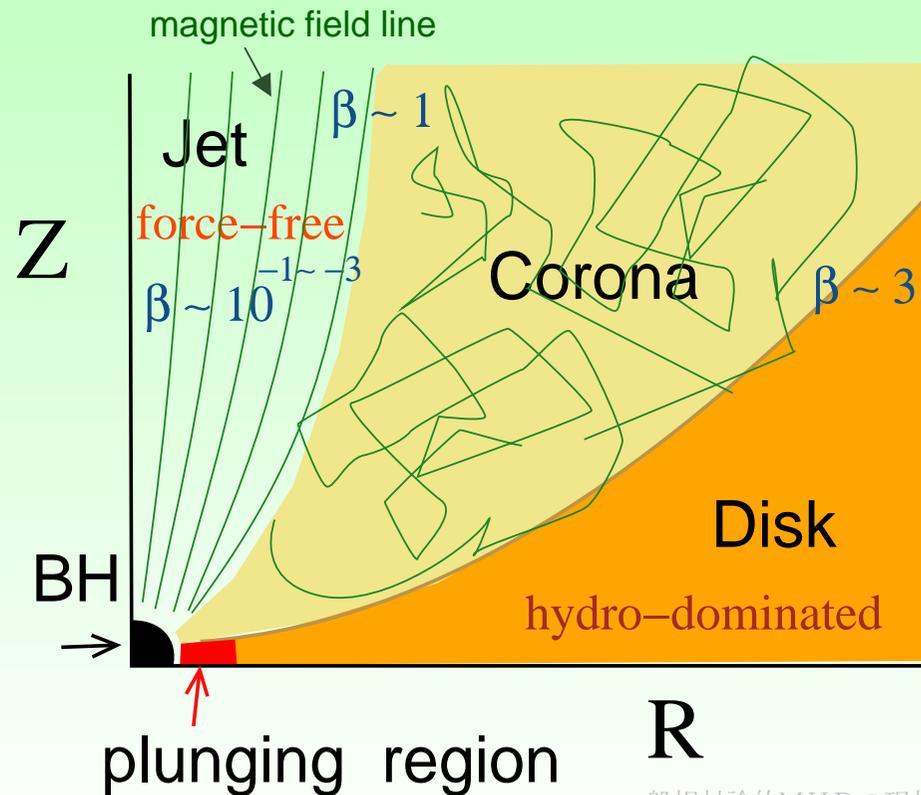
No monopoles constraint:

$$\partial_i(\sqrt{-g}B^i) = 0 \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

MHD シミュレーション (1)

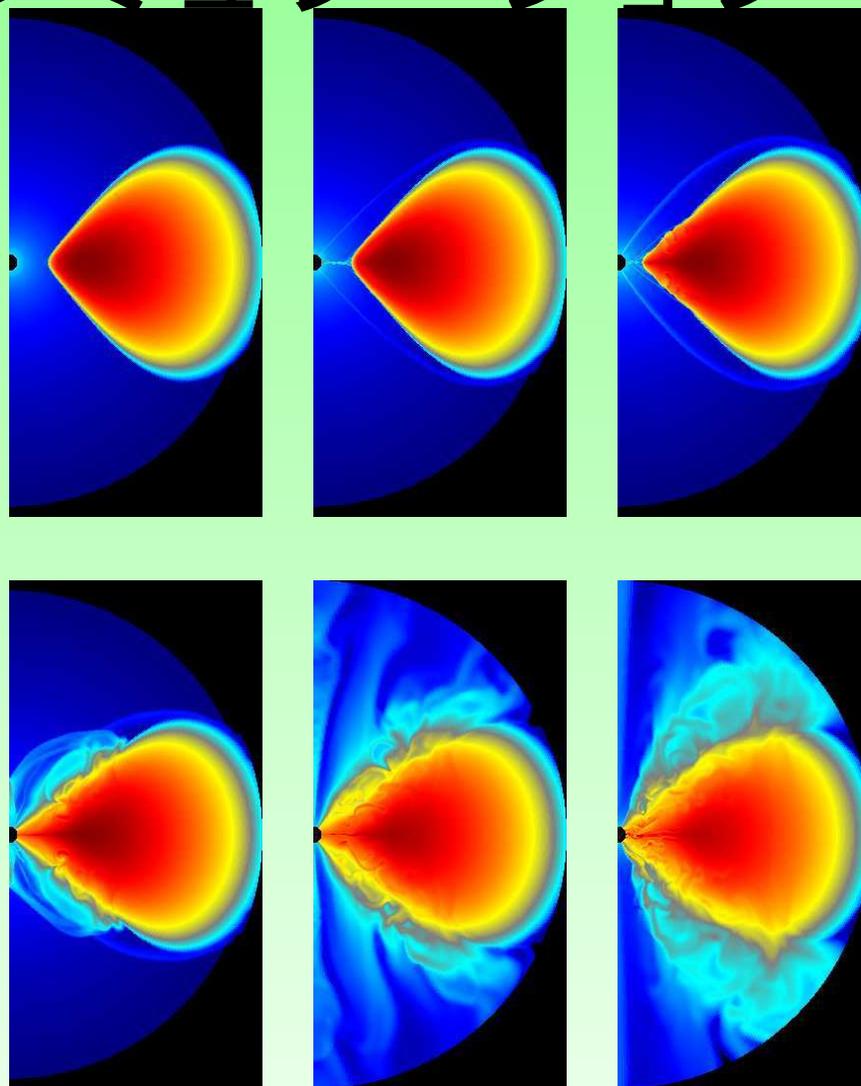
McKinney (2005)

- Initial poloidal field loop $\beta = 100$ (GR HD-disk model)
- 長時間計算を実現。準定常状態 \Rightarrow 定常解との比較！
- Funnel 内に揃った磁場形成 \Rightarrow Poynting Jet の発生！



MHD シミュレーション (2)

McKinney (2005)



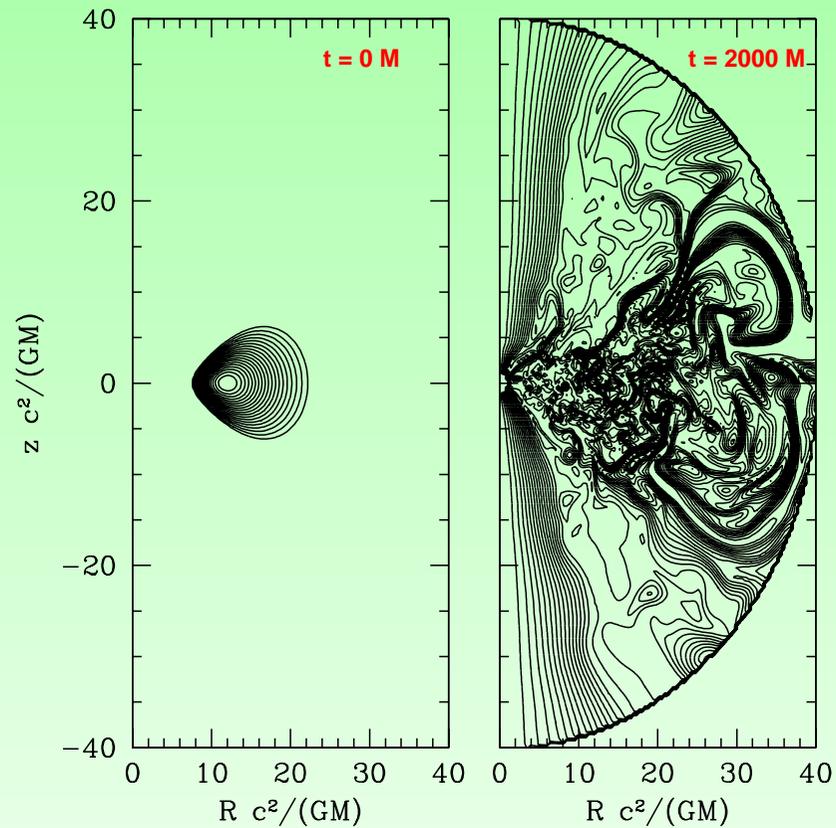
color shows $\log(\text{density})$

movie (thick, thin)

MHD シミュレーション (3)

McKinney (2005)

Magnetic Field Lines

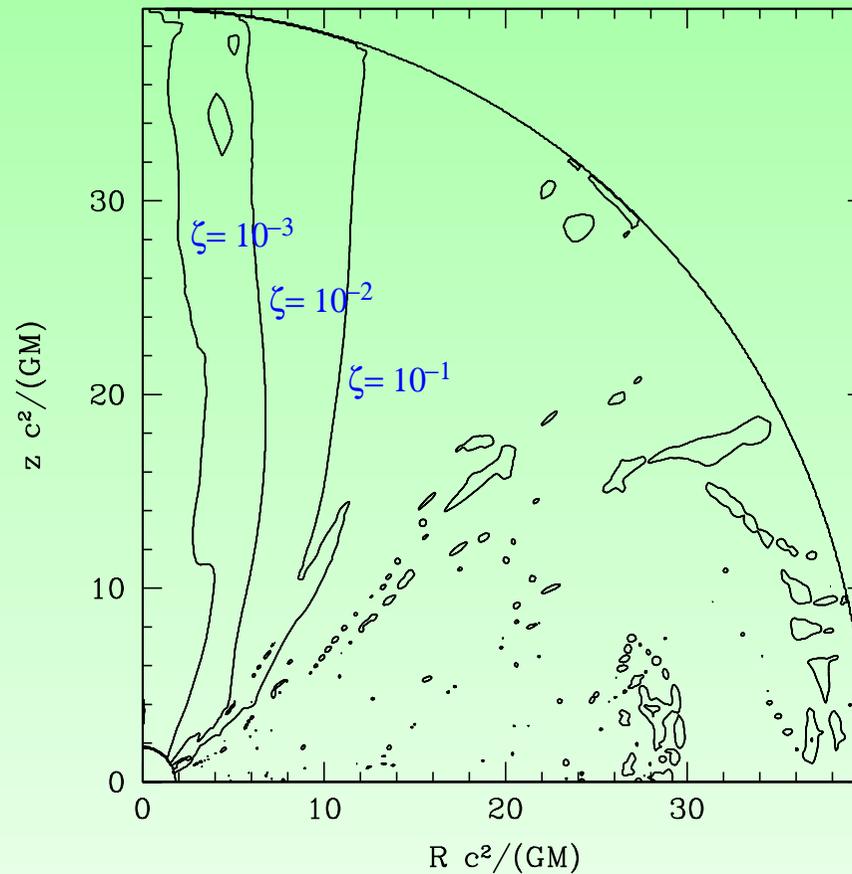


McKinney & Gammie 2004

MHD シミュレーション (4)

McKinney (2005)

A Force-Free Funnel?



McKinney & Gammie 2004

MHD シミュレーション (5)

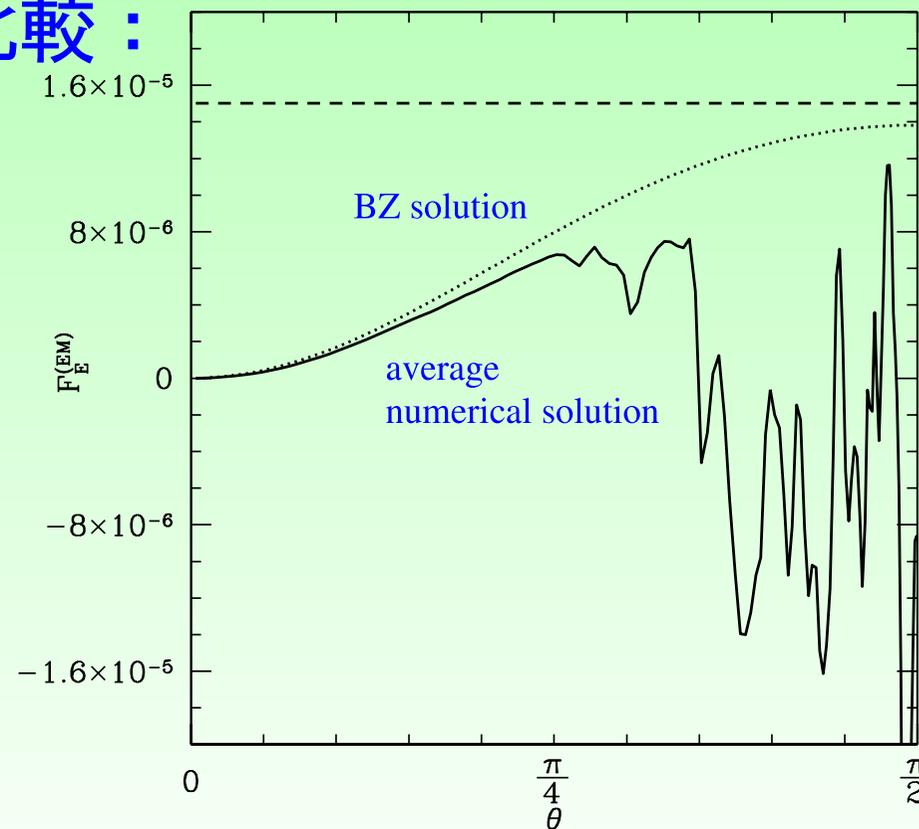
McKinney (2005)

Comparison with Blandford-Znajek

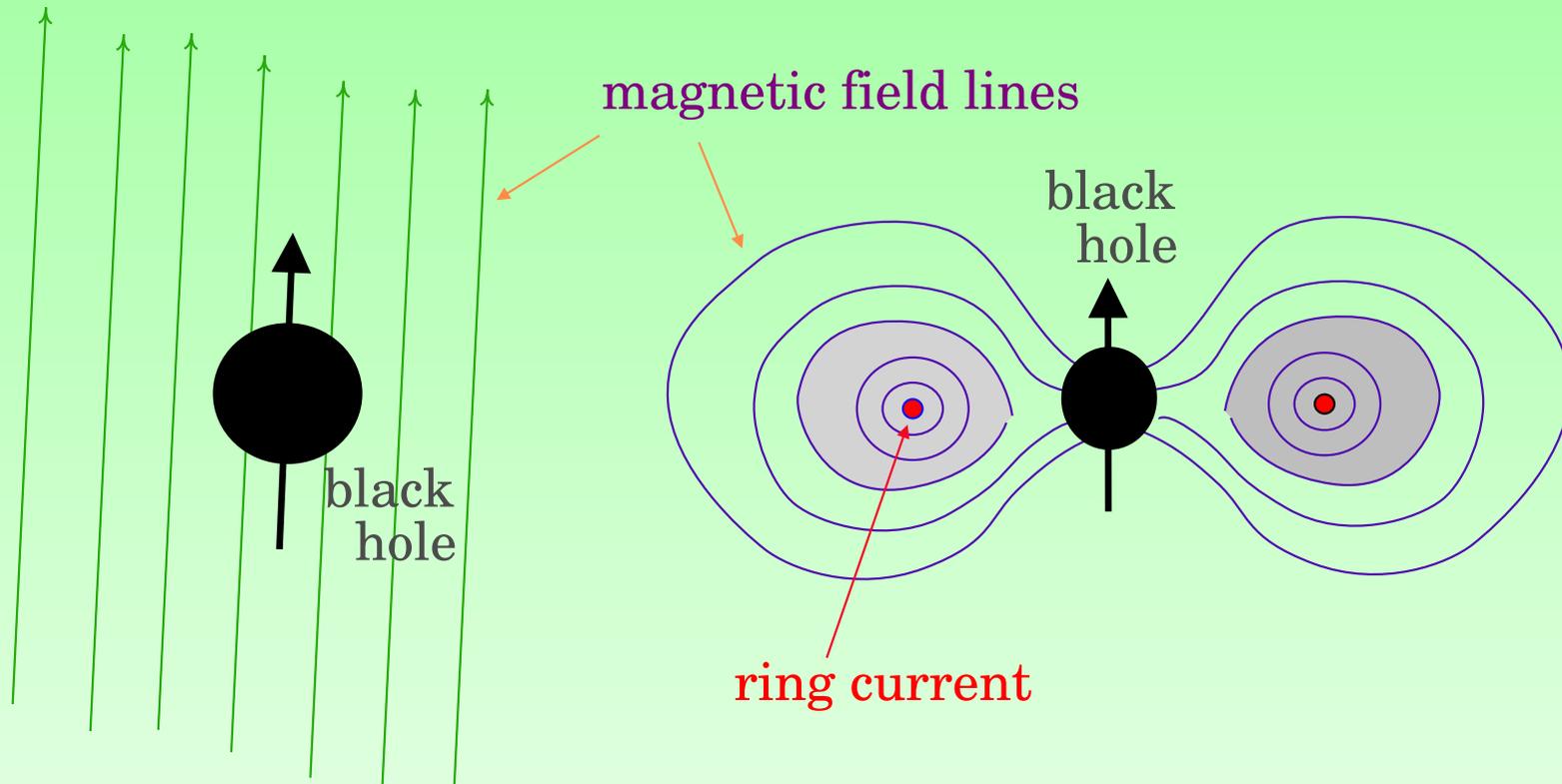
$$\langle \omega \rangle \approx 0.45 \Omega_H$$

定常解との比較：

$$\Omega_F, \eta E, \eta L$$



ブラックホール磁気圏とは (1)



一様磁場 (Wald 1974)

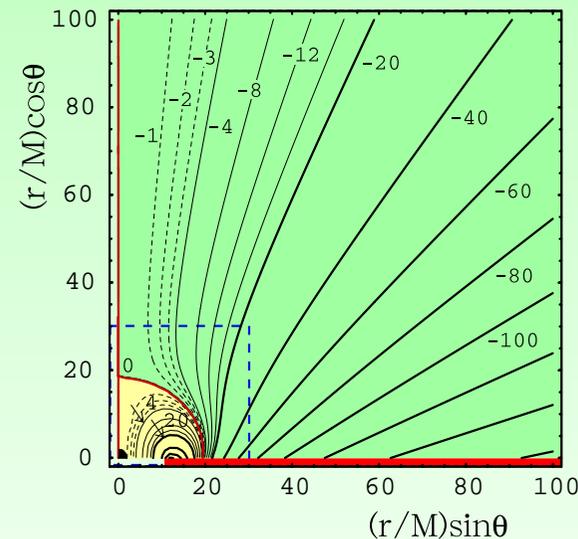
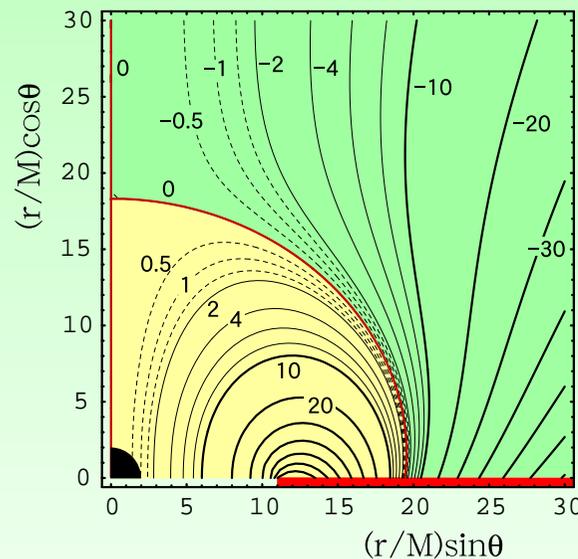
リング電流が作る磁場 (Linet 1979)

ブラックホール磁気圏とは (2)

「ブラックホール」 + 「降着円盤」 + 「コロナ」 のシステム

- ★ 降着円盤からの **Inflow** と **Outflow plasma** が共存。
- ★ 磁場分布は disk / corona current によって決まる。

★ BH – Disk 磁気圏 (GR 真空解 Tomimatsu & Takahashi)。



★ BH – Disk 磁気圏 \implies FF 解 (Uzdensky) \implies MHD 解は？

BH Winds/Jets

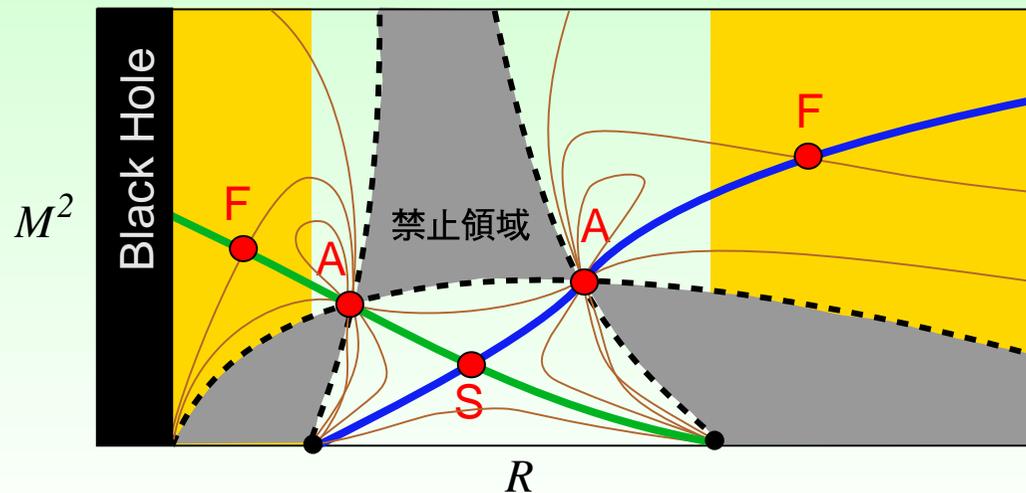
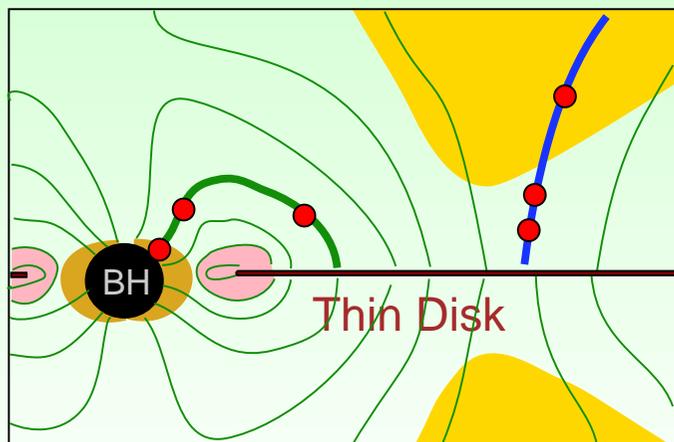
プラズマ源からの Inflow / Outflow が共存する系

- ◎ ブラックホールへの流れは、「遷-磁気音速流」でなければならない。
- ◎ 遷-磁気音速流
臨界条件が課せられる (『Weber-Davis 解』 ▼ と同様)
 - ★ Slow magnetosonic point
 - ★ Alfvén point(s)
 - ★ Fast magnetosonic point(s)
- ◎ Inner/Outer Light Surfaces (相対論効果)
BH 近傍で光速が遅くなることにより発生。
Inflow / Outflow が必然的に要請される。

磁気流体 (GR-MHD) 降着流

- Bondi-flow 解の MHD + GR 版
- 5つの保存量 (E, L, η, Ω_F, S)
- プラズマ源 \rightarrow Slow P. \rightarrow Alfvén P. \rightarrow Fast P. \rightarrow BH
- 臨界条件の解析が必要 ... だった。

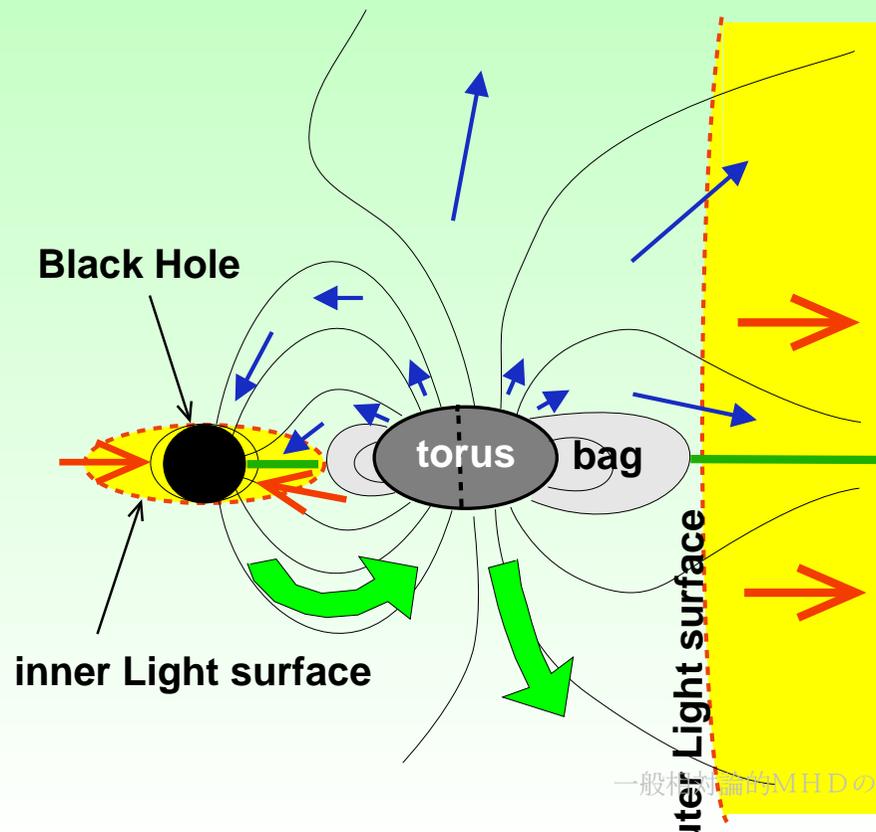
$$(\ln u_p)' = \frac{f_1 B_p' + f_2 K' + f_3 \Gamma_g'}{(u_p^2 - u_{AW}^2)^2 (u_p^2 - u_{FM}^2) (u_p^2 - u_{SM}^2)} \rightarrow \frac{0}{0} = \text{finite}.$$



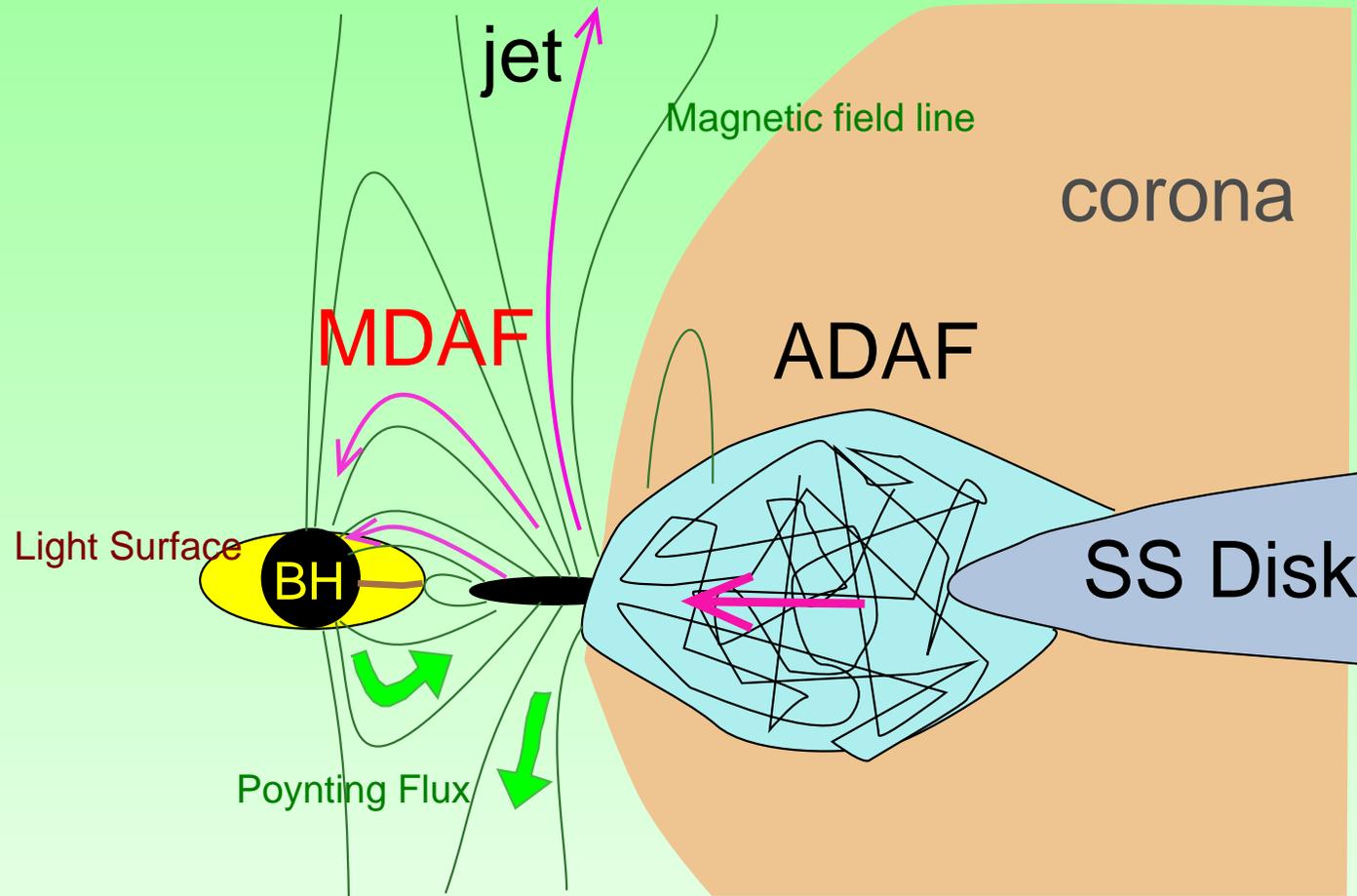
GRB エンジン

von Putten (2003)

- ◎ GRB (Gamma-ray Bursts) のセントラル・エンジン
- ◎ 赤道面上の二つのリング電流の作る磁場（真空解）の重ね合わせ (Jacson 1975) を基本に考察している
- ◎ トーラスの回転、トロイダル磁場は考えていない



Accretion Disk model (summary)



Magnetically Dominated Accretion Flow (MDAF)

ねらい目

BH 磁気圏における今後のテーマ：

BH と降着円盤の連結が注目されている！

- ◎ 1.5D MHD fbw
 - ★ Inner Light surface 内側でのニュートラルシート（重力 + リコネクション）
 - ★ MHD Shock 形成（Aoki et al. の MHD バージョン）
 - ★ BH 近傍プラズマからの輻射発生と輻射輸送（強重力場の影響は？ 期待されるスペクトルは？）
- ◎ 2.5D 磁場構造の解析：
 - ★ 定常解との比較。流れの保存量 E, L, Ω_F, η の空間分布。
 - ★ 定常モデルからスタート。安定／不安定？
 - ★ 磁気圏モデルに依存した、BH 回転エネルギー放出の見積り
 - ★ BH ダイナモ機構
- ◎ プラズマ降着による BH の進化：mass, spin（AGN の進化）
- ◎ 重力崩壊：BH と磁気圏の形成（AGN の起源）
- ◎ その他、…

BH 研究の注意点

① 内側の境界条件は BH の存在を反映しているか？

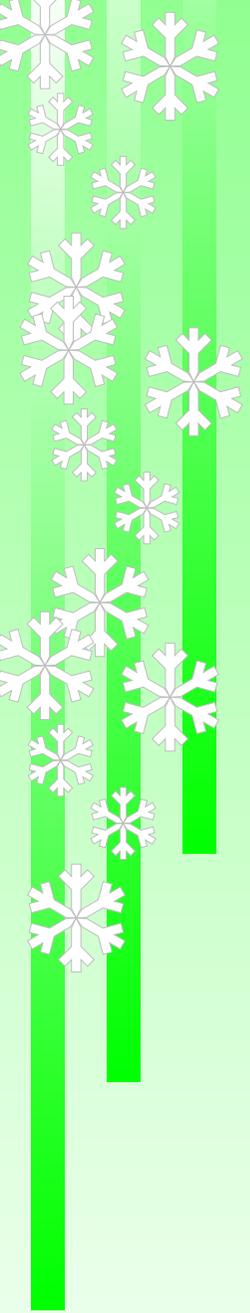
- ★ ある半径下を切り取る境界条件で、議論できる天体物理か、できない天体物理かを認識する。
- ★ super-sonic (super-magnetosonic) となっているか？
- ★ B_ϕ^H と B_p^H の比は満たされるか？

② どの座標系で計算して、表示して、議論しているのか？

- ★ 因果関係に矛盾は無いか？
- ★ 座標の特異点の取扱い
- ★ 座標時間と固有時間
- ★ 観測できた場合、どう見えるか？

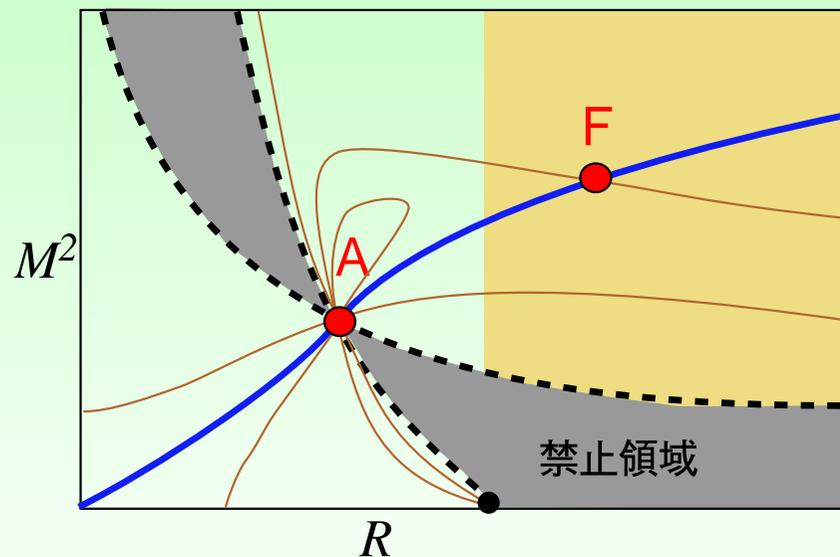
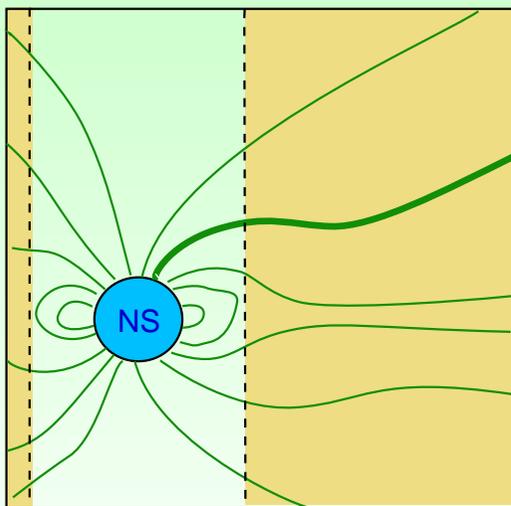
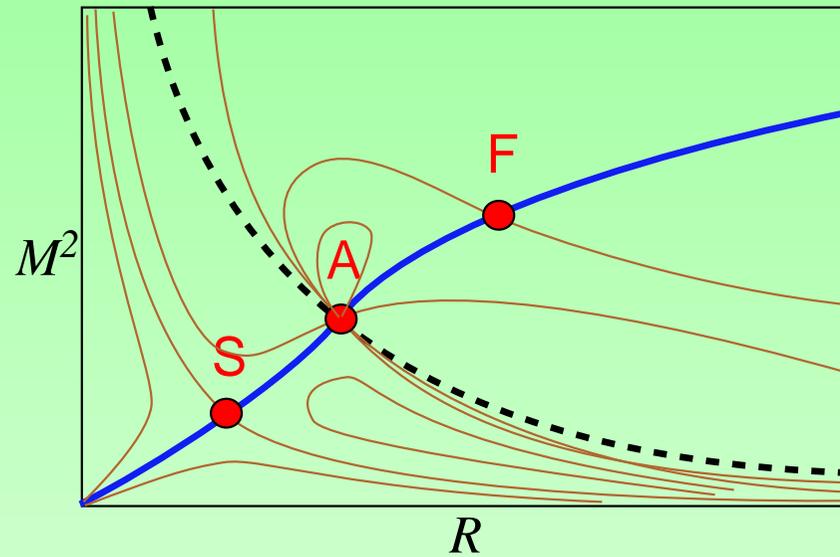
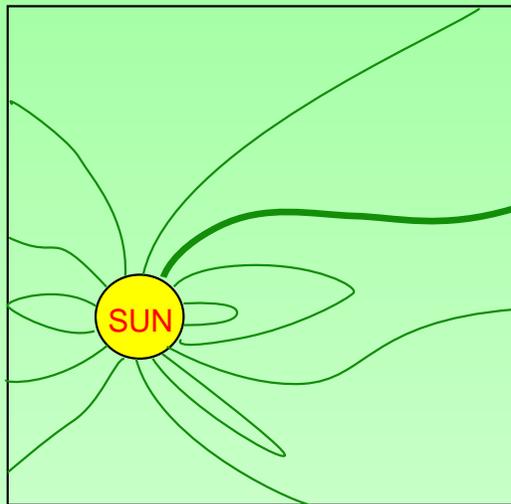
③ BH の質量やスピンへの制限は？

値を予言できるか？ 観測量との絡みは？



END

(Solar Wind / Pulsar Wind)

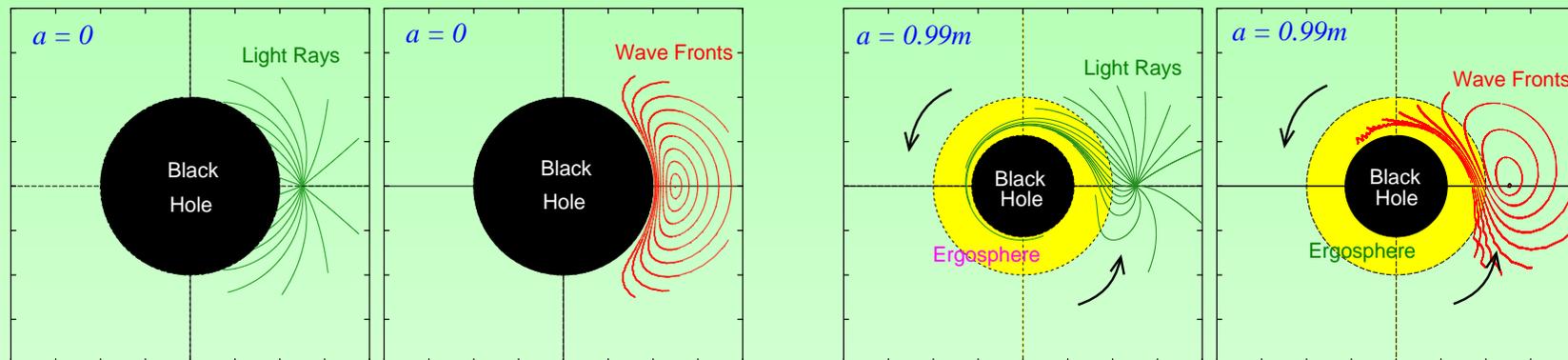


RETURN ▲

(曲がった時空とは)

■ 光の伝播 (時空の引きずり) について

光線の軌跡 + 光波面



● 遠方の観測者の座標時間が凍結する (波面間隔が詰まる)! ブラックホールに落ちるところは観測できない。

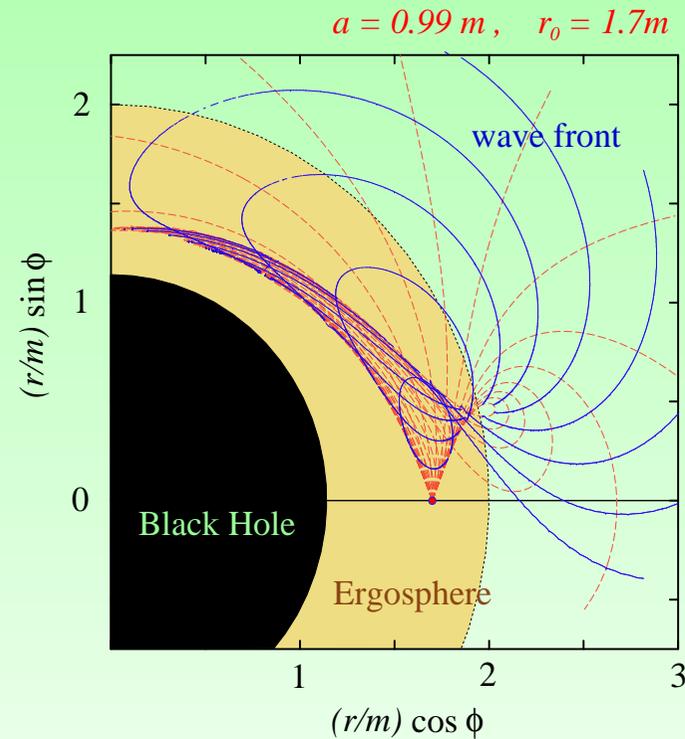
ただし、光そのものは、有限時間 (固有時間) で“特異点”まで到達する。

● 慣性系が BH の自転方向に引きずられる (右図)。エルゴ領域の発生 (慣性系が光速以上で引きずられる領域)

RETURN ▲

(光の波面の伝播)

- ◎ 回転ブラックホール — 時空の引きずり ω
- ◎ エルゴ領域 — 慣性系が光速以上で引きずられる領域



- ◎ 磁場も引きずられる！

RETURN ▲