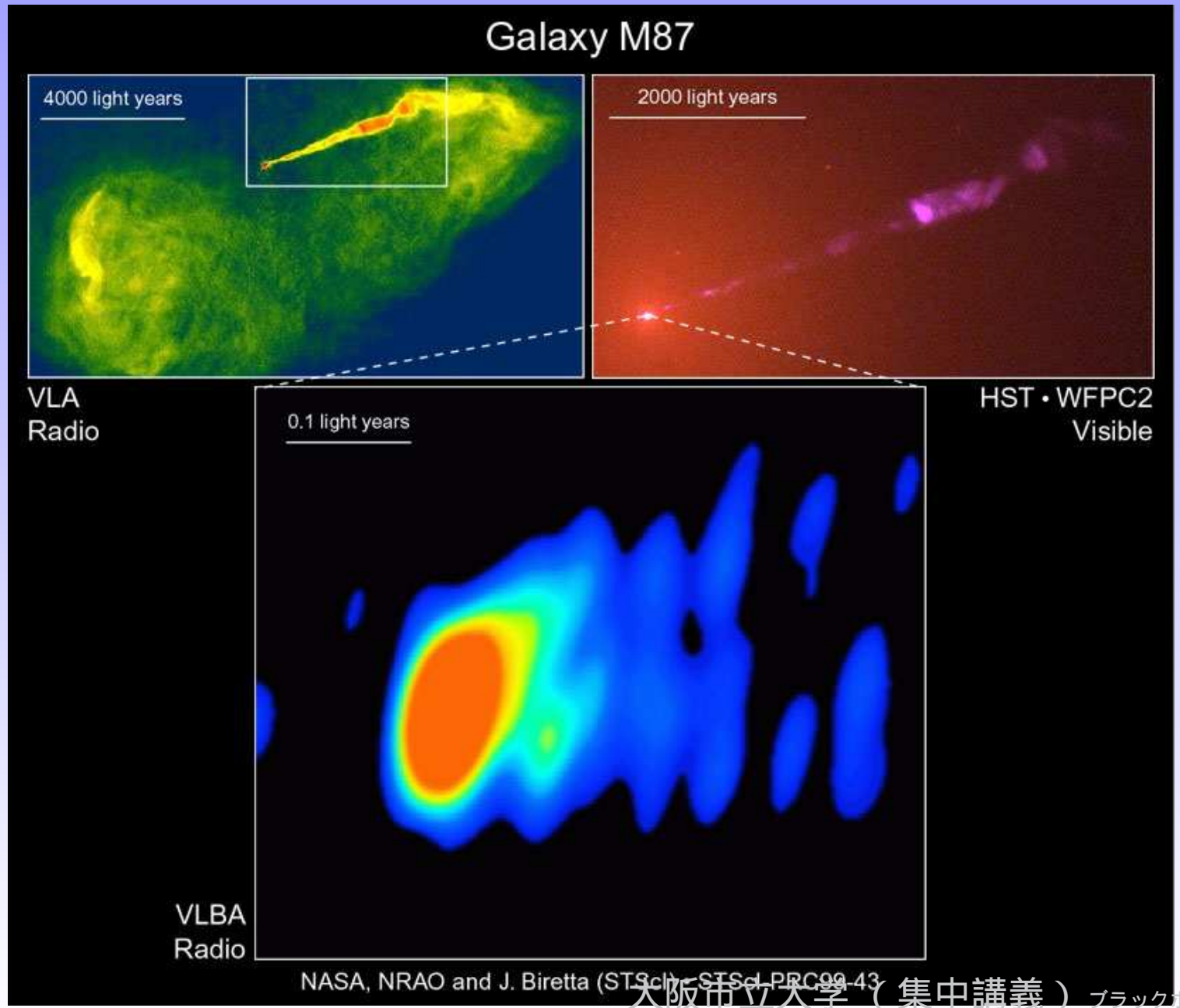
大阪市立大学（集中講義）

ブラックホールの不思議？

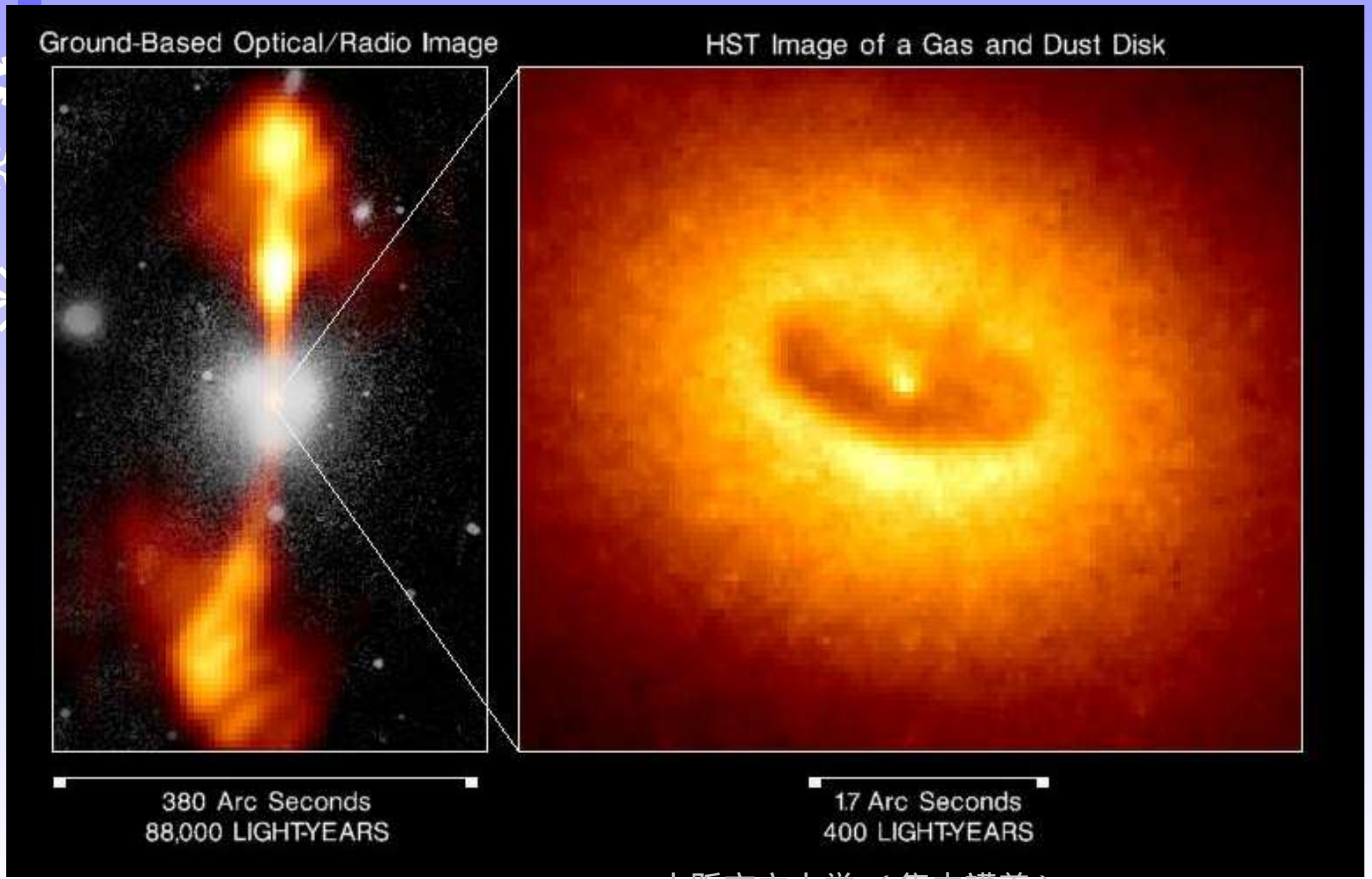
高橋真聡

愛知教育大学

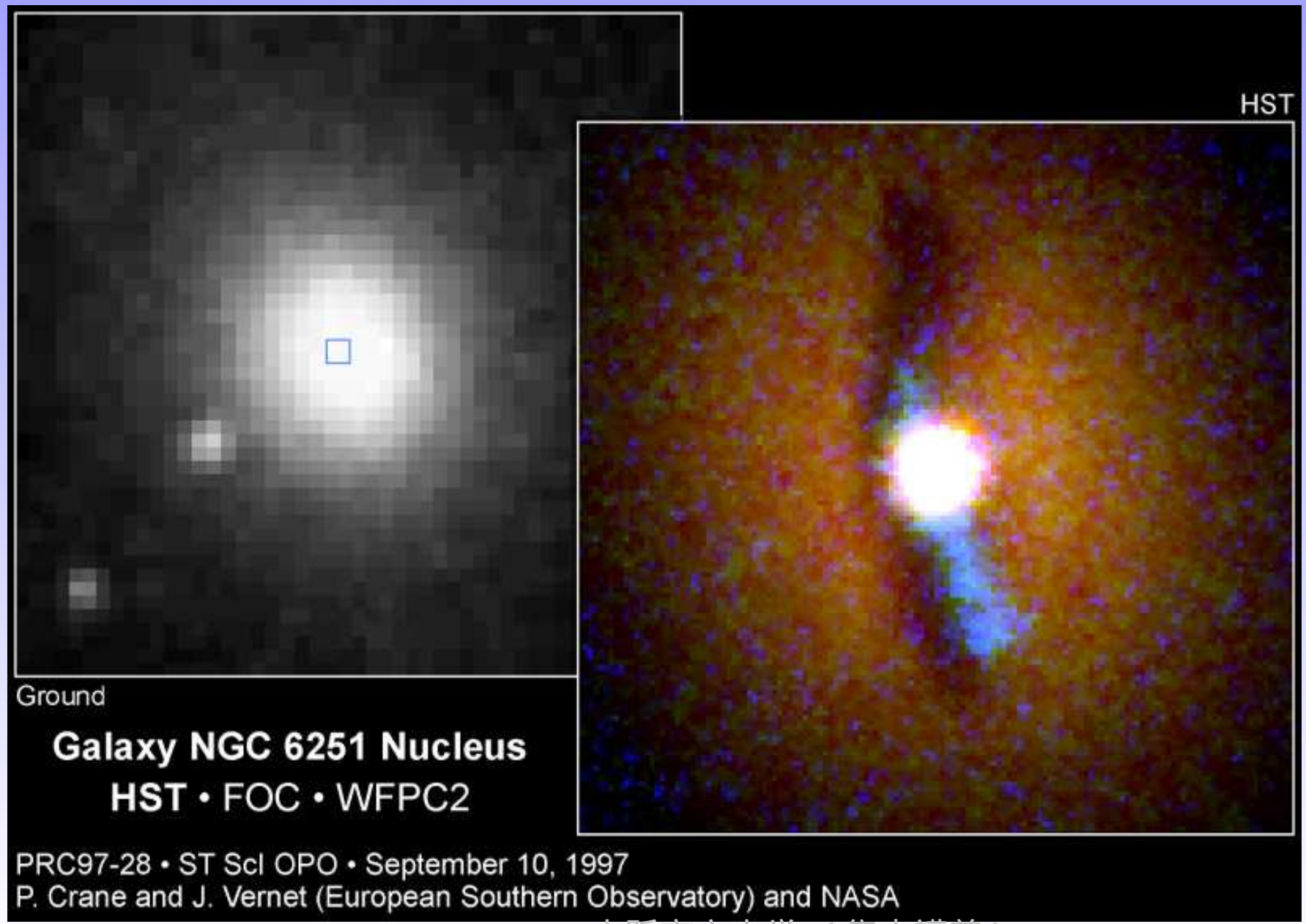
Jet Near a Black Hole (M87)



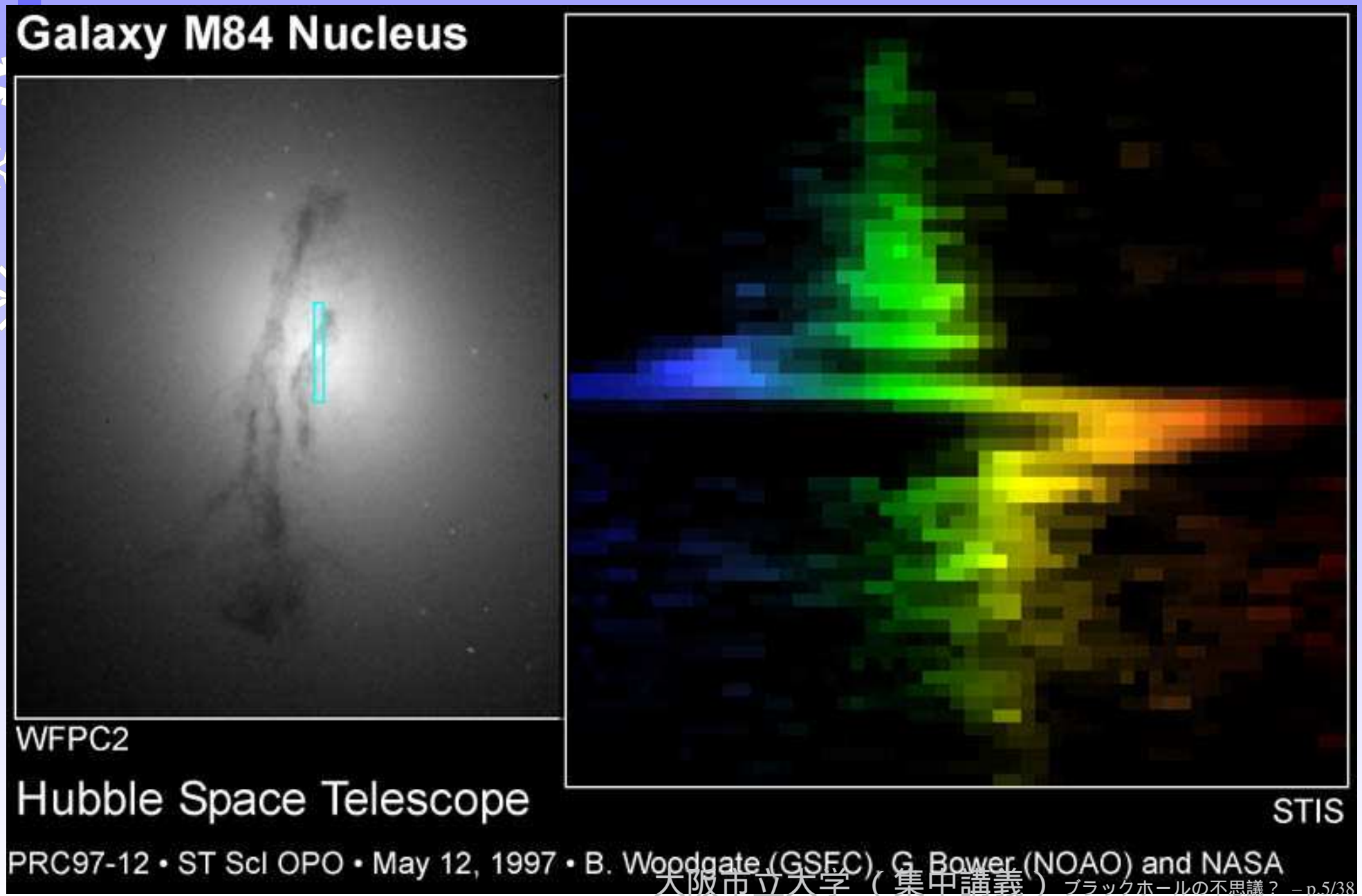
Jet & Dust Disk (NGC4261)



Dust Disk [Opt.+UV] (NGC6251)



Massive Black Hole ？ (M84)



ブラックホール !?

- 膨大なエネルギー放出
  (高エネルギー輻射、ジェット、など)
- コンパクト領域に大質量集中の証拠

ブラックホール !?

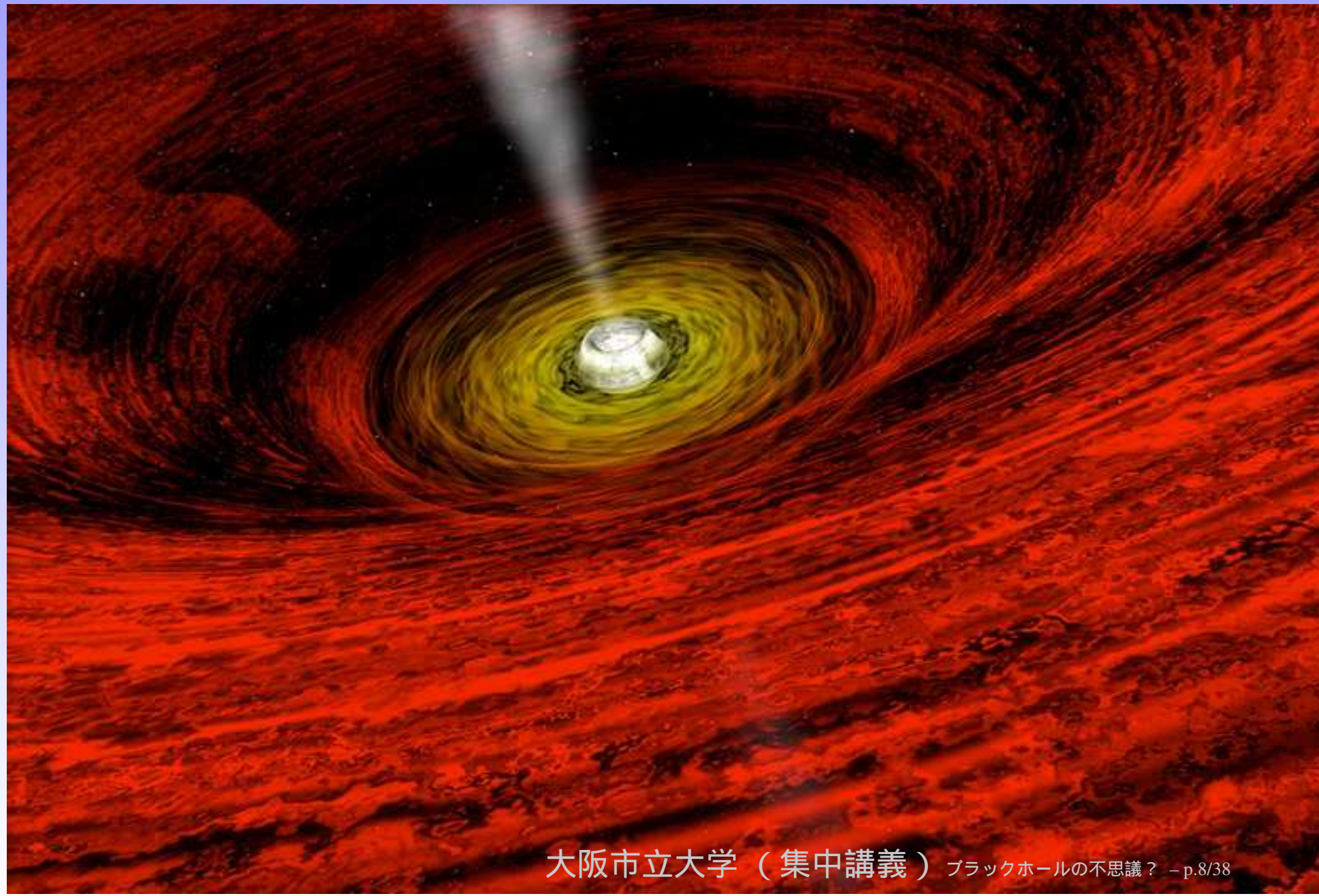
- 膨大なエネルギー放出
  (高エネルギー輻射、ジェット、など)
- コンパクト領域に大質量集中の証拠

どのような描像なのか？

⇓

Jet (artist's view)

Accretion Disk (artist's view)



Black Hole (artist's view)

ブラックホールは本当に存在するか？

- 膨大なエネルギー放出
  (高エネルギー輻射、ジェット、など)
- コンパクト領域に大質量集中の証拠

ブラックホールは本当に存在するか？

- ⊙ 膨大なエネルギー放出
  (高エネルギー輻射、ジェット、など)
- ⊙ コンパクト領域に大質量集中の証拠

しかしながら、
現時点では "直接的証拠" とは言えない .....

ブラックホールは本当に存在するか？

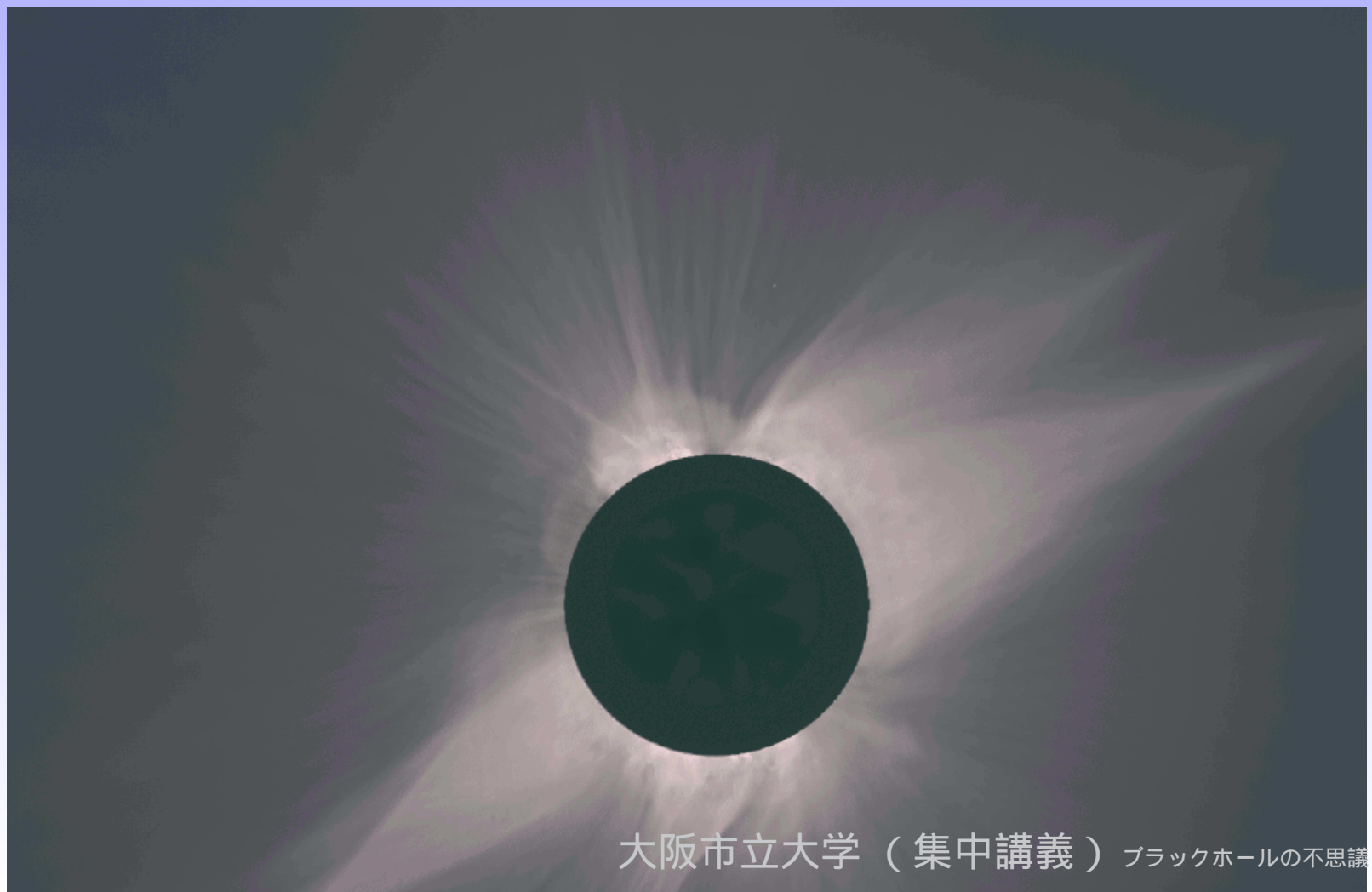
- 膨大なエネルギー放出
  (高エネルギー輻射、ジェット、など)
- コンパクト領域に大質量集中の証拠

しかしながら、
現時点では "直接的証拠" とは言えない .....

- 「ブラックホール」の時空構造を知りたい ！
- 何を観測すれば良いのだろう？
- 激しい活動性 → 「磁気圏」は期待できるか？

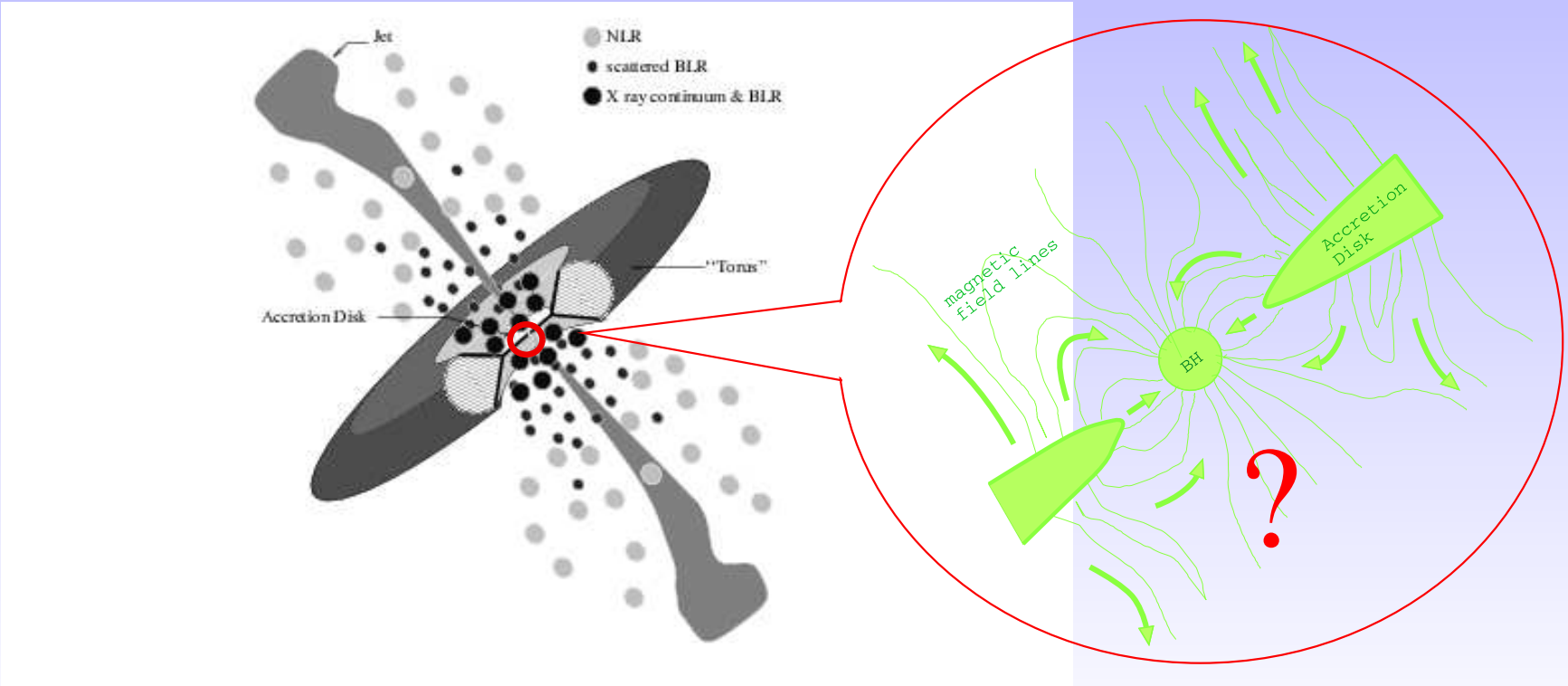
(Solar Magnetosphere) との類似？

- 太陽表面 (プラズマ源)
- コロナ (磁場 + プラズマ)



ブラックホール磁気圏

- ブラックホール
- 降着円盤（プラズマ源）
- コロナ（磁場＋プラズマ）



本日のトピックス

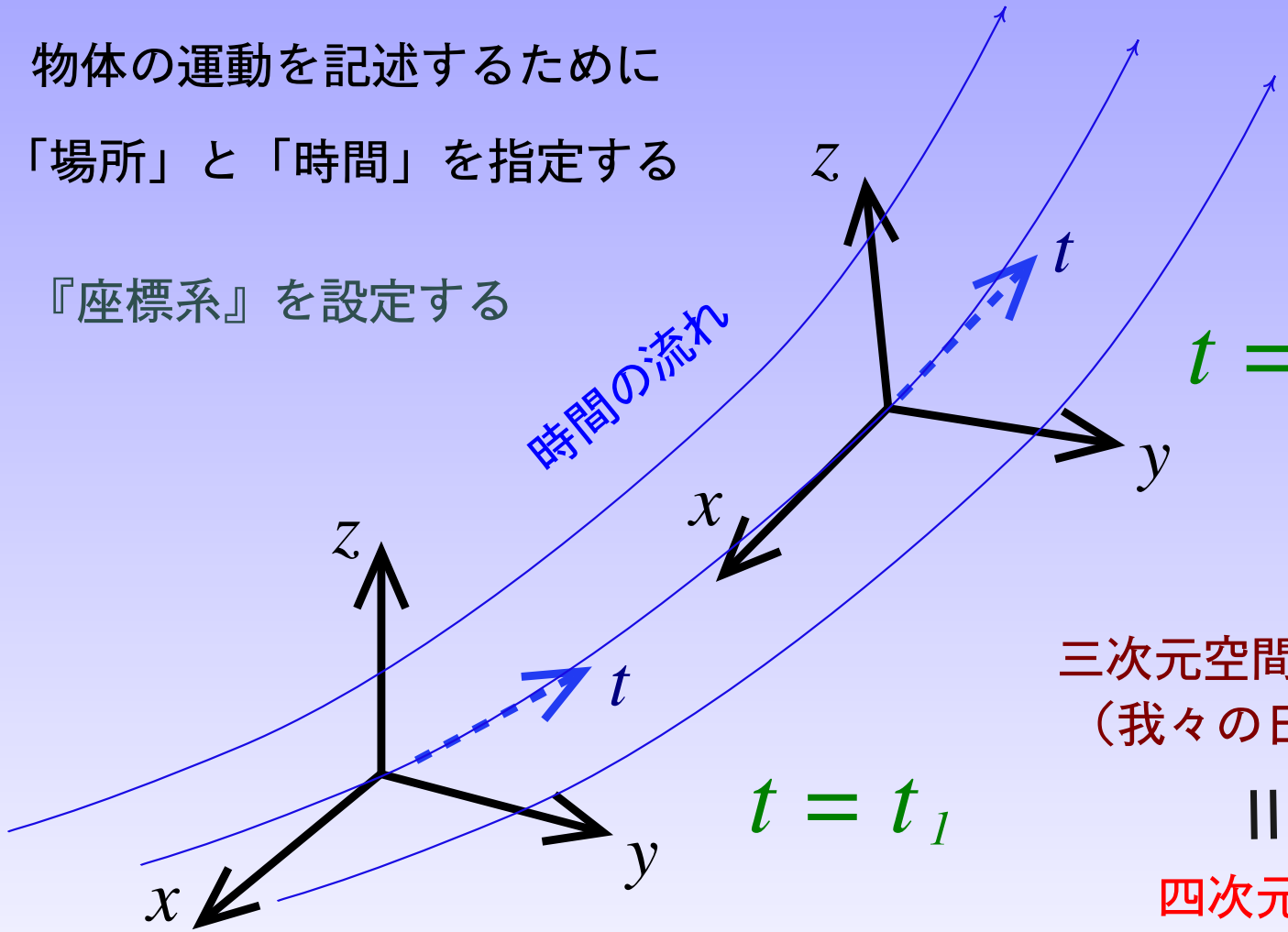
1. ブラックホール時空の不思議
2. エルゴ領域とは？
3. ブラックホール周りの磁場構造は？
4. ブラックホールからのエネルギー放出
5. 一般相対論的な磁気流体定常流
6. ブラックホール磁気圏

四次元時空 (1)

物体の運動を記述するために

「場所」と「時間」を指定する

『座標系』を設定する



三次元空間 ＋ 時間

（我々の日常生活）

||

四次元時空

四次元時空 (2)

空間を二次元面で表現。

三次元空間での距離：

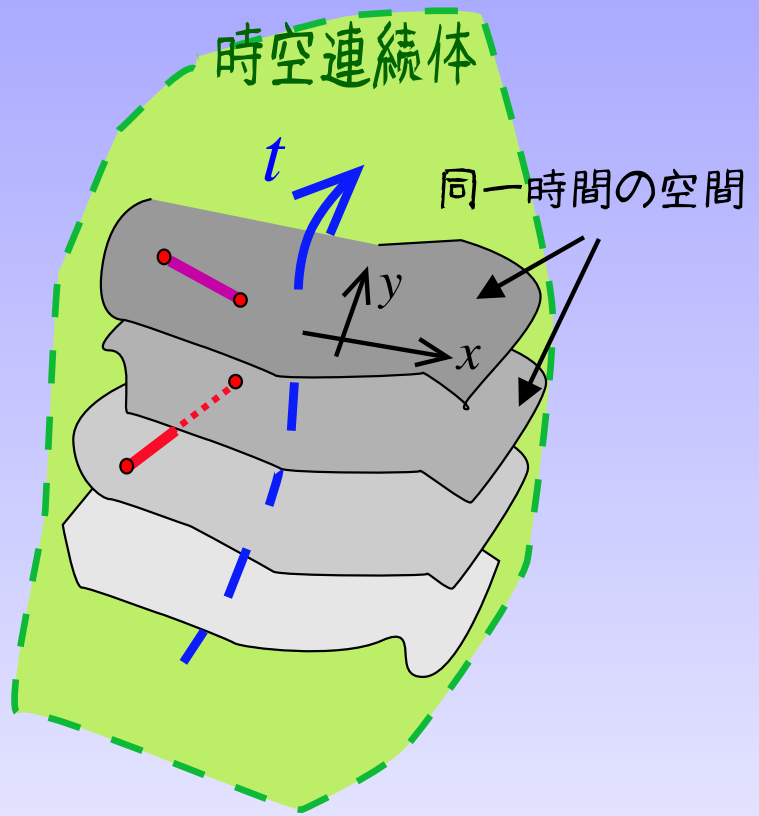
$$\Delta s^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$$

四次元時空の場合には、

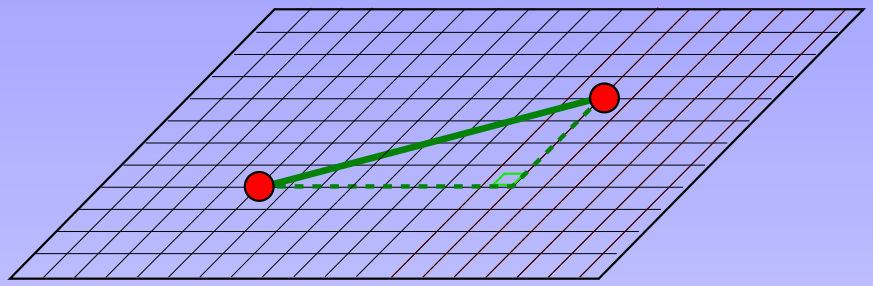
$$\Delta s^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 - c^2 \Delta t^2$$

時間と空間では「性質」が異なる。時間の項は“−”とする。

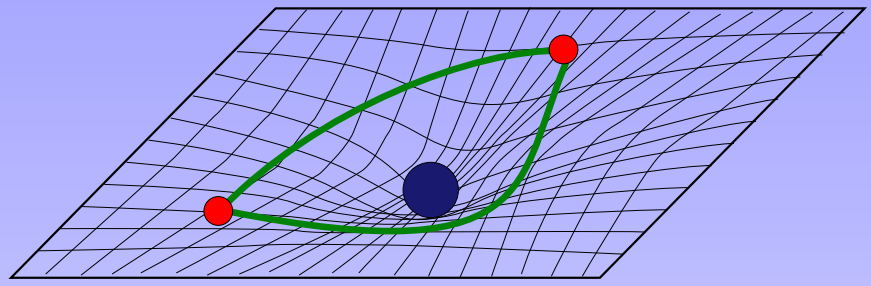
座標変換に対してうまくいく



曲がった時空 (1)　二点間の距離



平坦な時空



曲がった時空

デカルト座標：

$$\Delta s^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 - c^2 \Delta t^2$$

球座標：

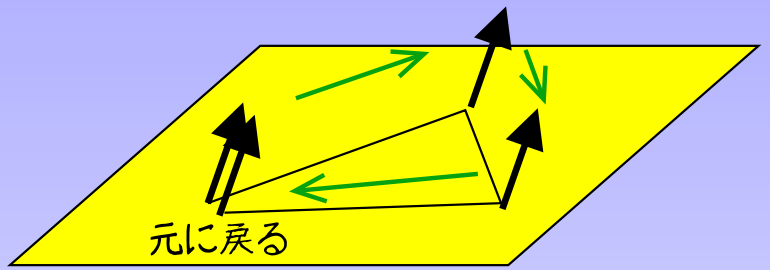
$$\Delta s^2 = \Delta r^2 + r^2 \Delta\theta^2 + r^2 \sin^2\theta \Delta\phi^2 - c^2 \Delta t^2$$

$\Longrightarrow$　曲がった時空の場合は？

曲がった時空 (2)　　空間の曲がり具合（曲率）

時空が2次元平面であるとして

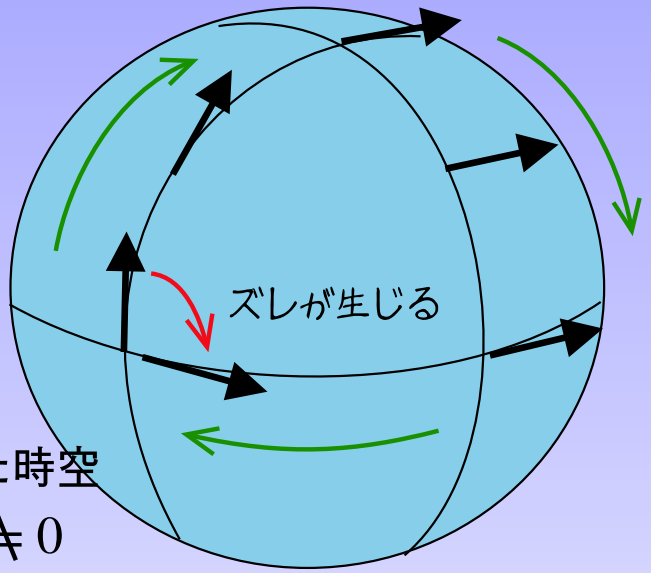
ベクトルを平行移動させると・・



平坦な時空

曲率 $=0$

時空が2次元の球面であるとして ・・・



曲がった時空

曲率 $\neq 0$

一般的な表式 …… 計量（メトリック）g_{ab} の導入：

$$\Delta s^2 = g_{rr}\Delta r^2 + g_{\theta\theta}\Delta\theta^2 + g_{\phi\phi}\Delta\phi^2 + g_{tt}\Delta t^2$$

$\Longrightarrow$　メトリックはどうやって求める？

重力場のメトリック

アインシュタインの『重力場の方程式』

$$R_{ab} - \frac{1}{2} g_{ab} R = \kappa T_{ab}$$

(R_{ab}, R: メトリックの関数、 T_{ab}: 物質などの分布)

- 一般に、この方程式を解くのは超難しい。ただし、特別な場合の解は知られている。
- 中心天体の周りが「真空」でり、中心天体が「球対称」である場合：(M は天体の質量)

$$\Delta s^2 = -\left(1 - \frac{2M}{r}\right)\Delta t^2 + \frac{1}{\left(1 - \frac{2M}{r}\right)}\Delta r^2 + r^2 \Delta\theta^2 + r^2 \sin^2\theta \Delta\phi^2$$

強重力の効果 (1)

曲がった (4 次元) 時空の幾何学 ：

⊙ 物差しが (距離スケール) が縮んで見える

$$\Delta r(\text{地球}) = \left(1 - \frac{2M}{r}\right)^{1/2} \Delta \ell(\text{BH})$$

⊙ 時計の進み方が遅く見える

$$\Delta t(\text{地球}) = \frac{1}{\left(1 - \frac{2M}{r}\right)^{1/2}} \Delta \tau(\text{BH})$$

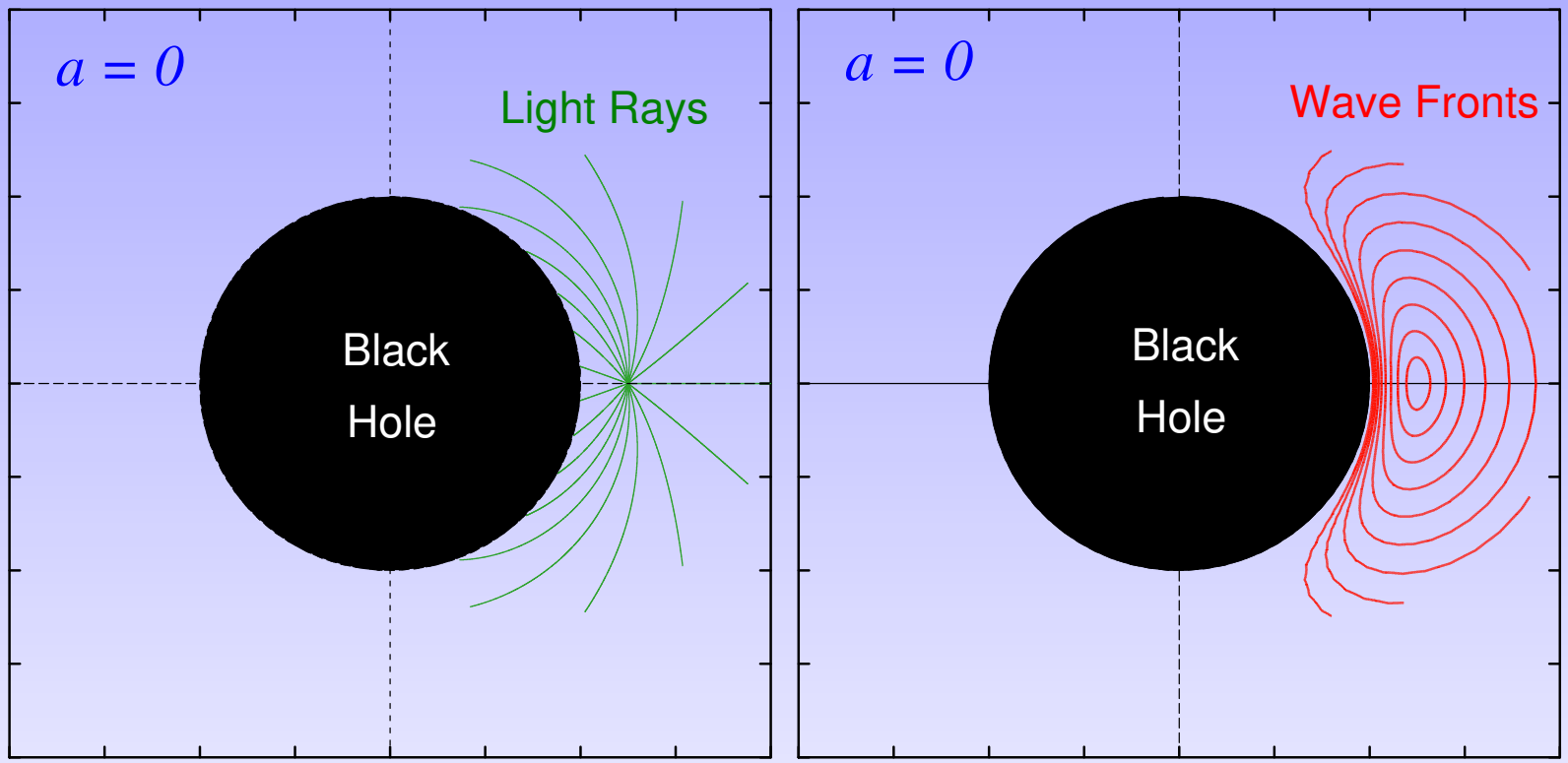
★ BH 近くからの光の波長が伸びる (重力赤方偏移)

★ BH 近くほど光の速度が遅くなるように “見える”

→ 光線が曲がる！ (重力レンズ効果)

強重力の効果 (2)

光波面 ($t =$ const. 面) の伝播 ：



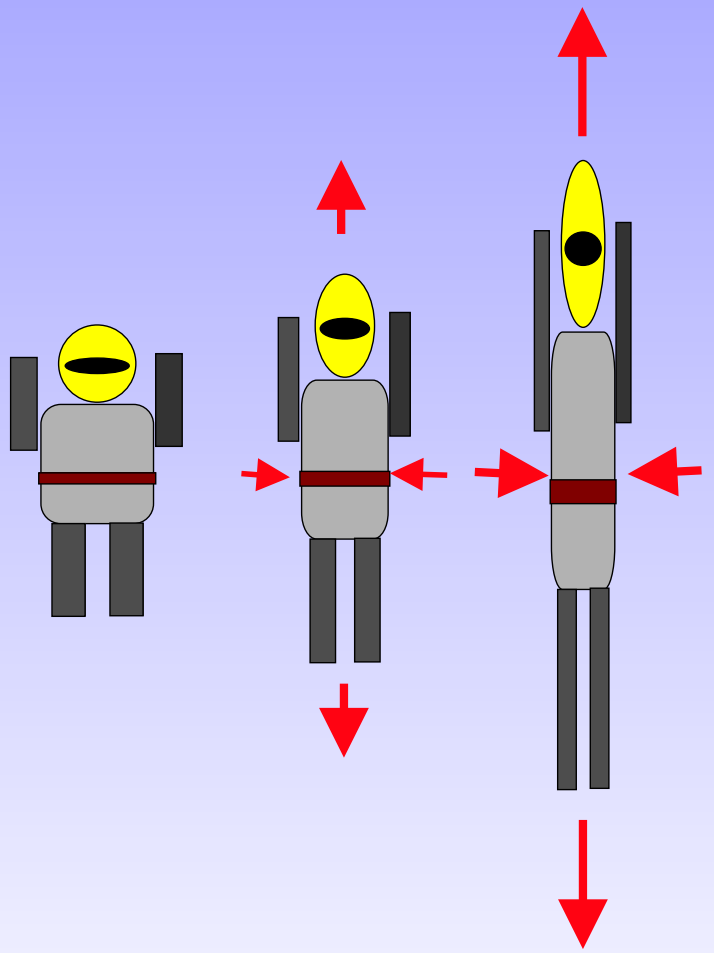
光線は有限の固有時間 τ でブラックホールに落ちる 。
光線に沿っての 座標時間 t は “凍結” する。

強重力の効果 (3)

潮汐破壊

(重力の差 $\Delta g \sim 2GMx/r^3$)

BH に近づく恒星はガス状に破壊され、BH を取り囲む



ブラックホールに落ちるとき？

- 恒星 **BH**： $\Delta g \sim 10^9 g$
  体がちぎれてしまう
- 銀河 **BH** $M = 10^6 M_\odot$：
  $\Delta g \sim 10^{-3} g$
  問題なく通過

強重力の効果 (4)

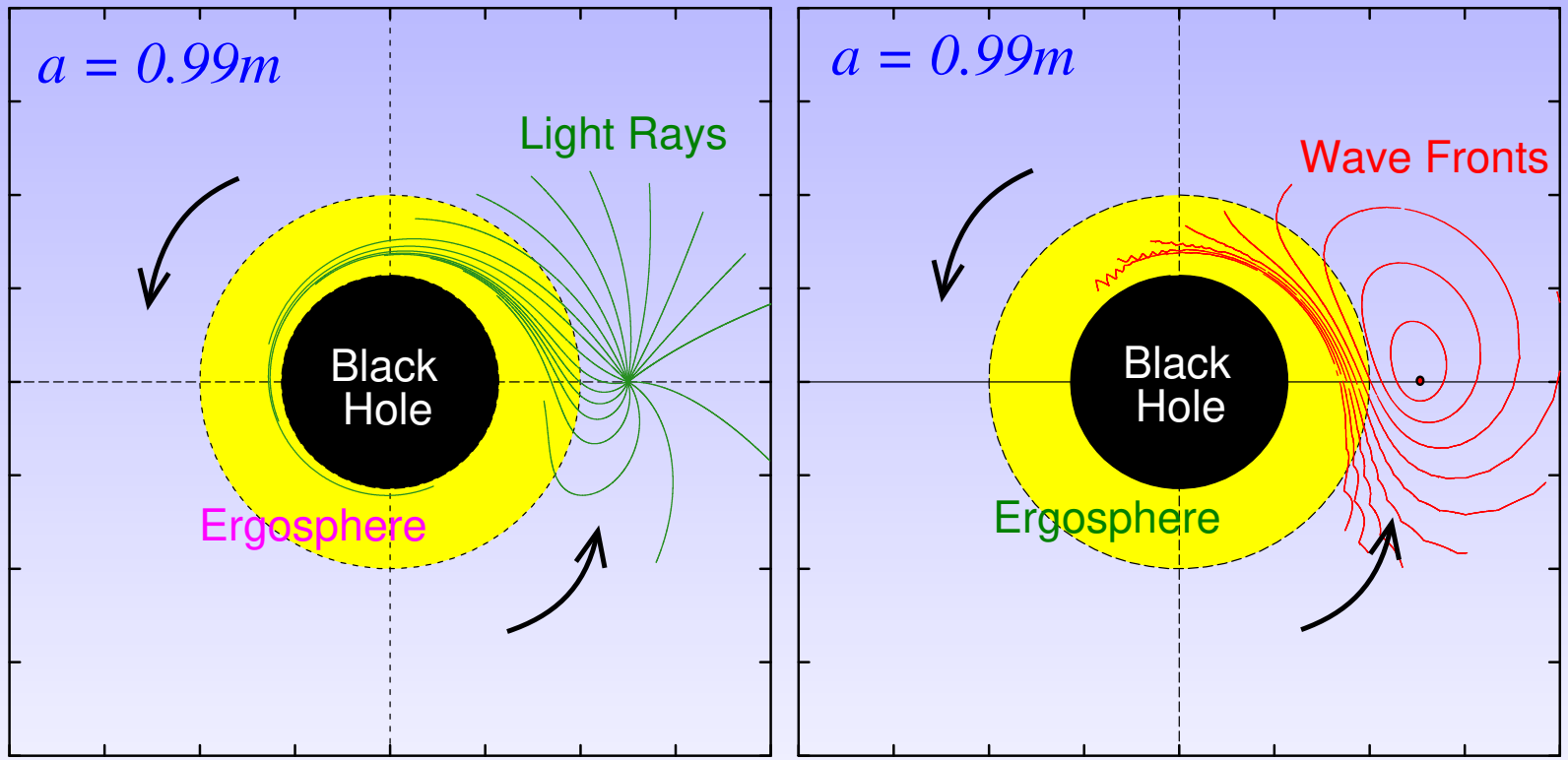
- “深い” 重力ポテンシャル
  重力エネルギーの解放効率が高い
  (静止エネルギーの　数％ ~ 数十％)

- 「エルゴ領域」の存在
  BH が回転している場合に生じる　BH 固有の現象が期待される

エルゴ領域とは？　(1)

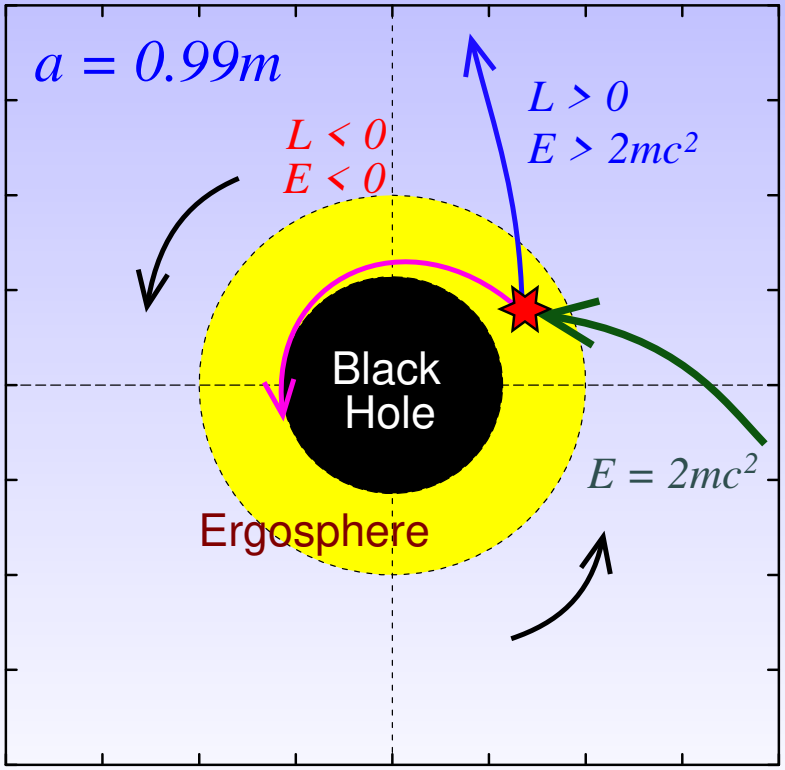
- 時空（慣性系）が「光速以上」で
  BH の自転方向に引きずられる：

光でさえ逆回転できない



エルゴ領域とは？　(2)

- 有効ポテンシャルが「負」の領域になってる：
  負エネルギー粒子は BH に落ちる
- BH からのエネルギーの抽出が可能
  天体現象のエネルギー源（ Penrose 過程 ）



ここまでの　まとめ

『一般相対論』　・　・　・

- ⊙ 時間と空間の概念を変えた
- ⊙ ブラックホールを予言

★ 宇宙論、高エネルギー天体物理学への適用

★ 素粒子物理学と融合した理論への拡張？
（統一理論への挑戦）

本日のトピックス

1. ブラックホール時空の不思議
2. エルゴ領域とは？
3. ブラックホール周りの磁場構造は？
4. ブラックホールからのエネルギー放出
5. 一般相対論的な磁気流体定常流
6. ブラックホール磁気圏

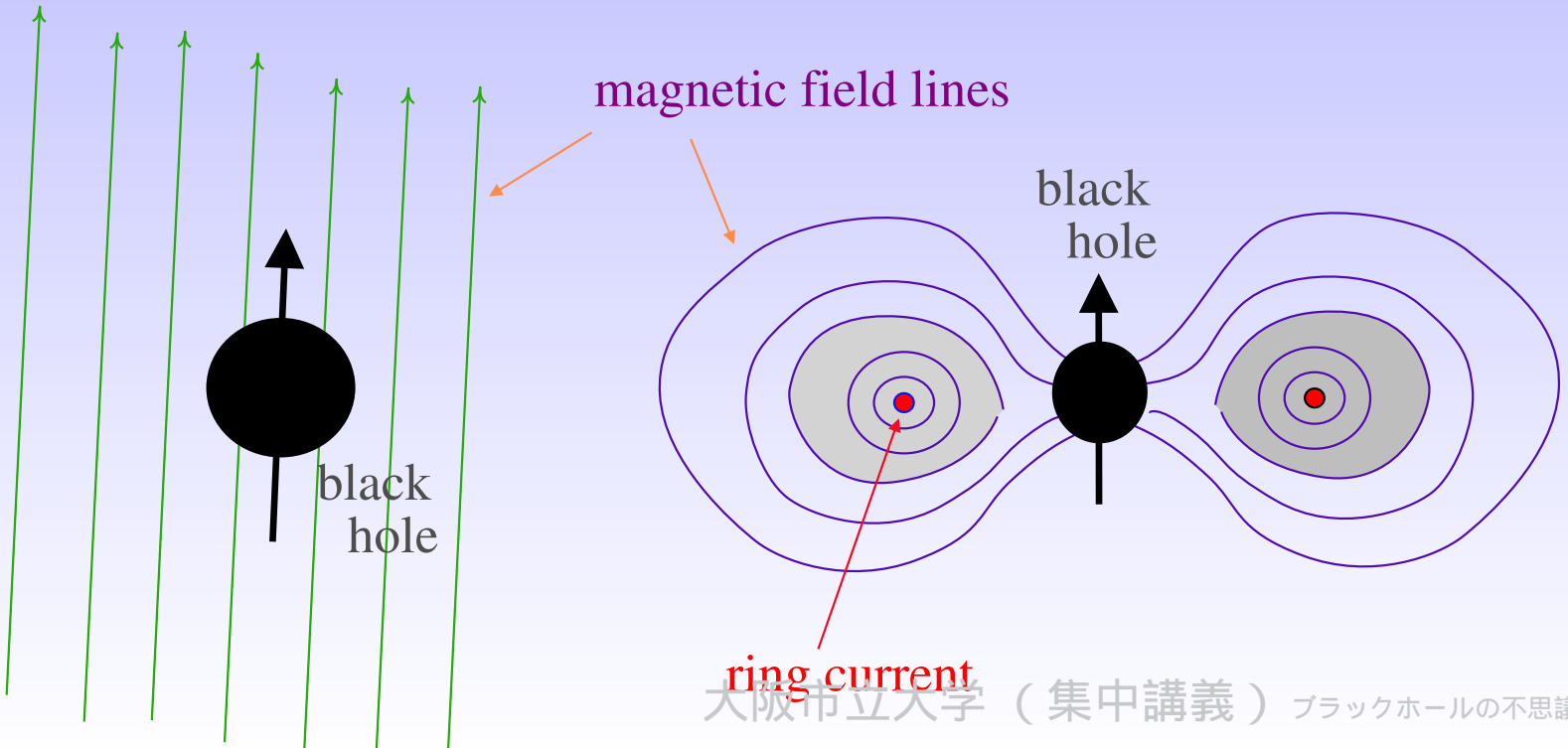
境界条件 @ ブラックホール(BH)表面

- BH は “毛が三本”
  (質量 M, 角運動量 J, 電荷 Q)。
- 磁場は BH 外部環境 (降着円盤など) で用意。
- 磁力線は BH を貫く。
- Mag. Flux function $\Psi(r_{\rm H}, \theta)$ は有限値。
- 高速自転 BH は、磁力線を締め出す。

ブラックホール磁場 (真空解)

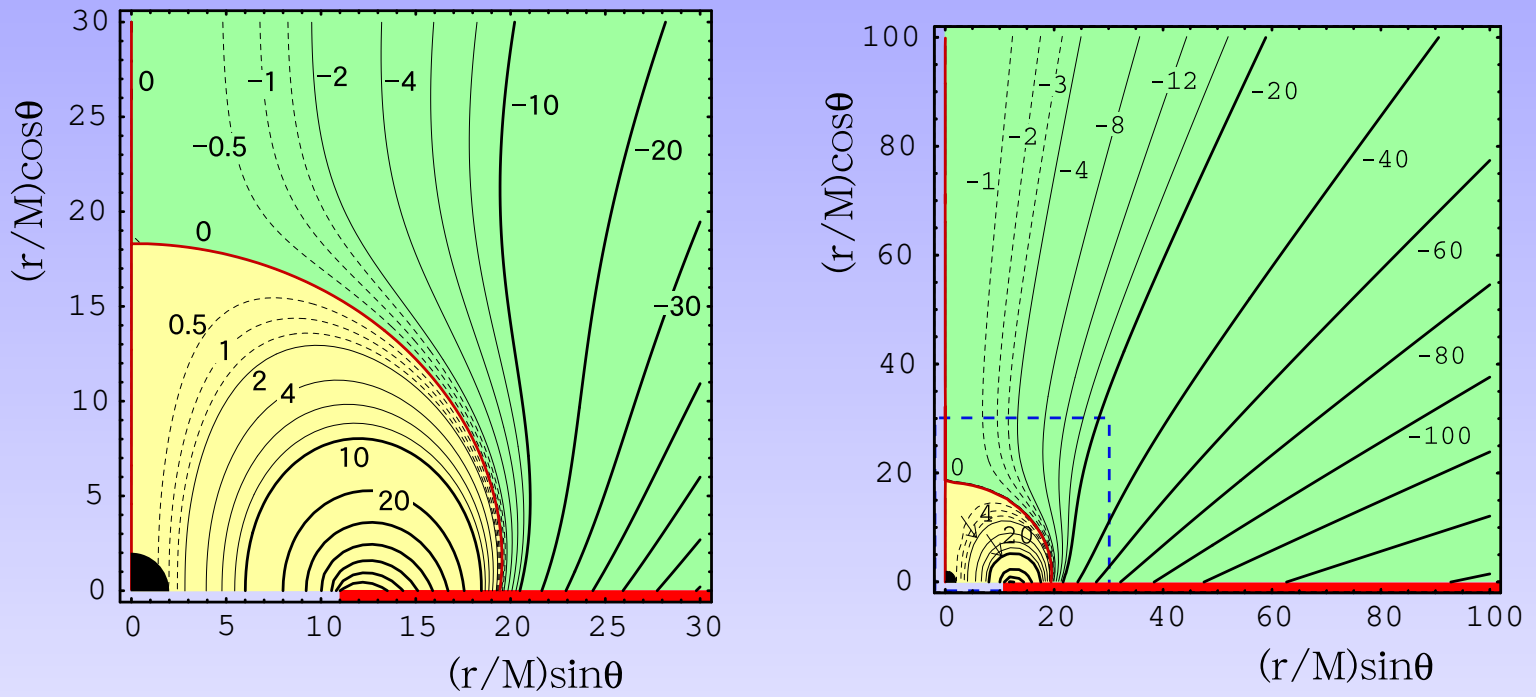
古くから研究されている：

- 帯電した回転ブラックホールが作る磁場
- 一様磁場
- リング電流による磁場



BH 真空磁気圏 (解析解)

薄い円盤に電流分布を仮定した磁場形状：

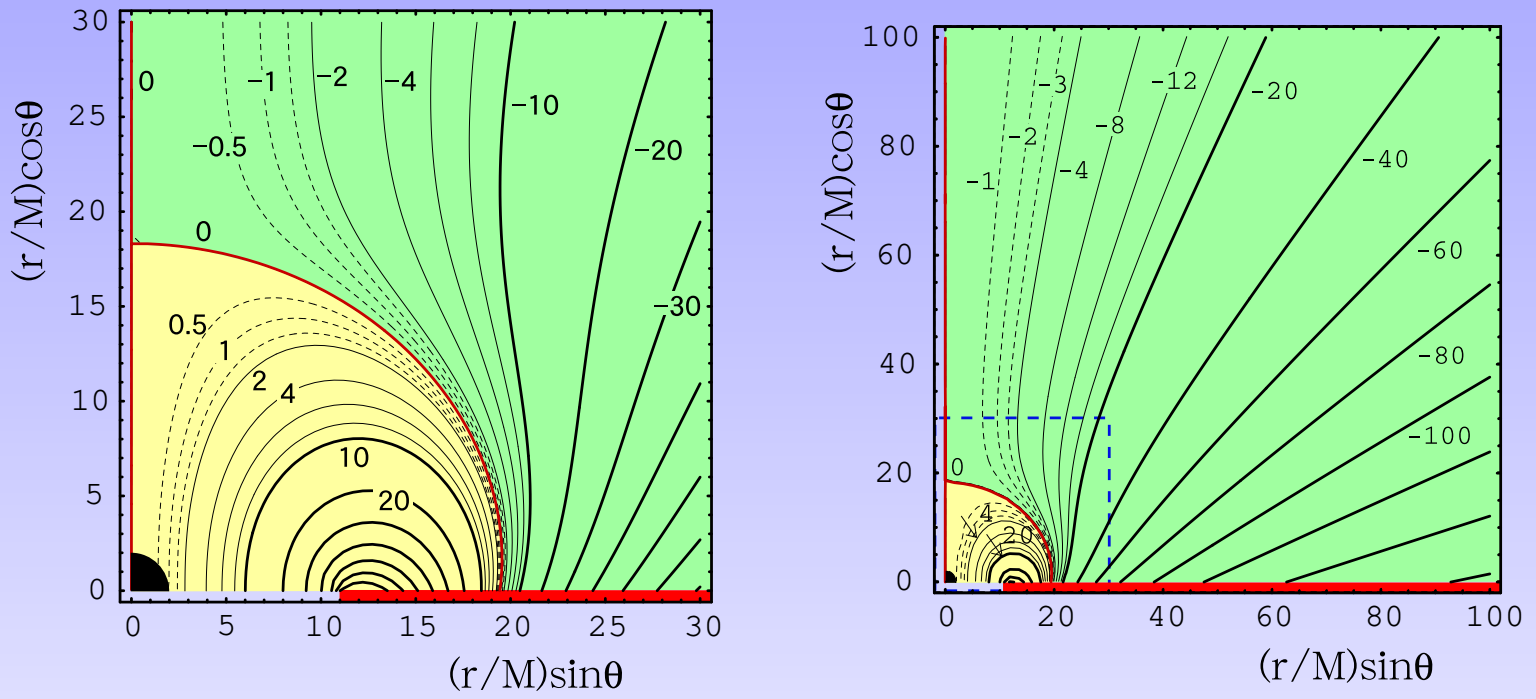


ディスクの内端を考慮した境界条件のもとで多重極展開したベクトルポテンシャルを重ね合わせて得た解

(Tomimatsu & Takahashi 2001)

BH 真空磁気圏 (解析解)

薄い円盤に電流分布を仮定した磁場形状：



- Loop field : 円盤内端
- Disk-BH field : BH 近傍は円柱形状
- Open field : 遠方で Radial 形状

本日のトピックス

1. ブラックホール時空の不思議
2. エルゴ領域とは？
3. ブラックホール周りの磁場構造は？
4. ブラックホールからのエネルギー放出
5. 一般相対論的な磁気流体定常流
6. ブラックホール磁気圏

エネルギー引き抜き機構

磁気トルクによる、時空の回転に対するブレーキ作用
(Blandford-Znajek 過程)

⊙ ブラックホール境界条件： トロイダル磁場

$$B_\phi^H = \sqrt{(-g_{\phi\phi}/\Sigma)_H}(\omega_H - \Omega_F)(\partial_\theta \Psi)_H$$

⊙ Event horizon からの外向きの 電磁場フラックス 発生

$$F^r_{\rm H} = (E_p)_{\rm H} \times (B_\phi)_{\rm H} \propto \Omega_F(\omega_{\rm H} - \Omega_F)B^2_{\rm H}$$

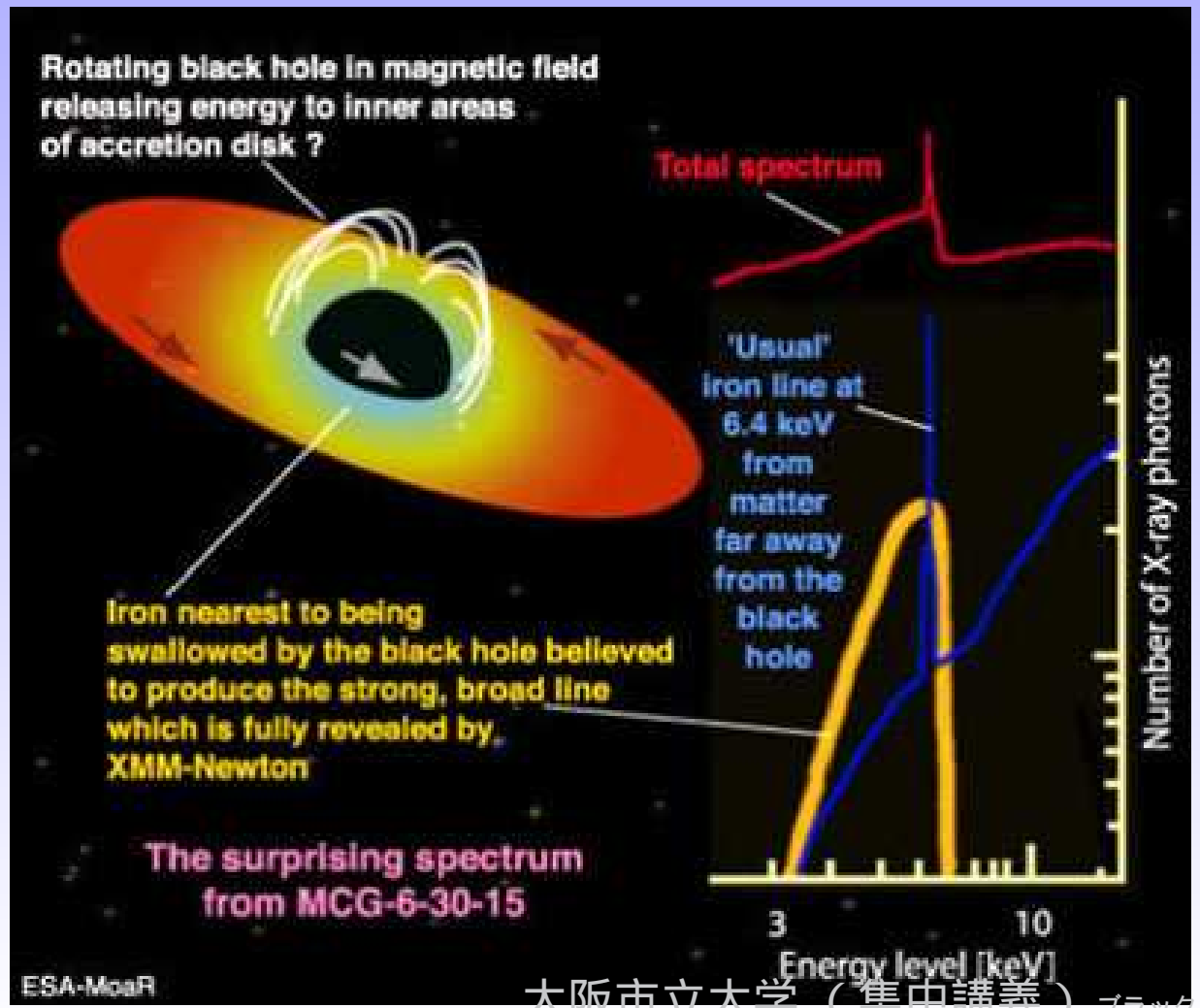
⊙ ブラックホール $\omega_{\rm H}$ が磁気圏 Ω_F より速く回転する場合

$0 < \Omega_F < \omega_{\rm H}$

電磁場フラックスは外向き (= エネルギーの流出！)

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？　（定量的説明がつく）



本日のトピックス

1. ブラックホール時空の不思議
2. エルゴ領域とは？
3. ブラックホール周りの磁場構造は？
4. ブラックホールからのエネルギー放出
5. 一般相対論的な磁気流体定常流
6. ブラックホール磁気圏

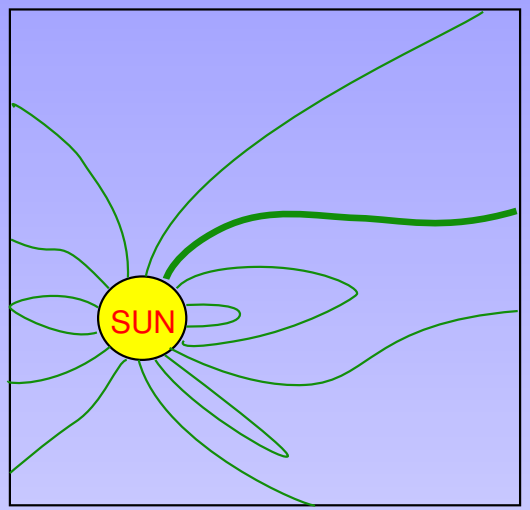
BH Winds/Jets

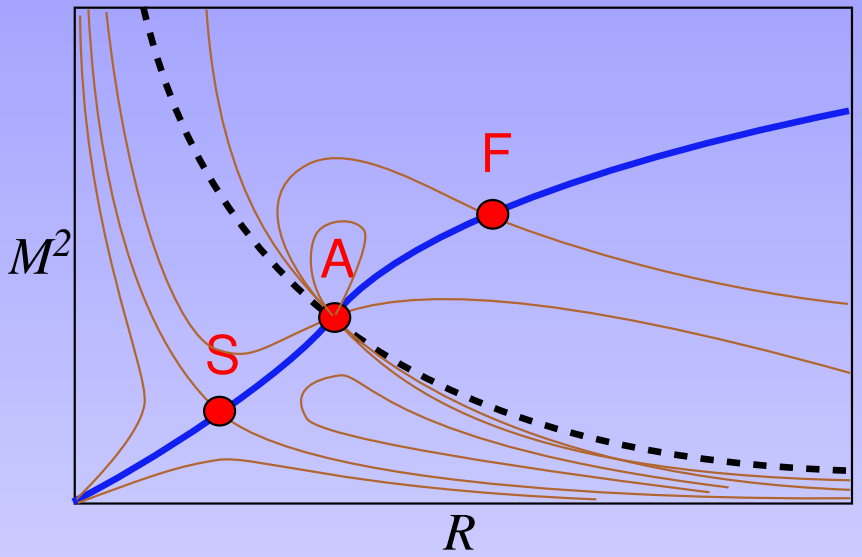
プラズマ源からの、内向き / 外向き の流れが共存する系

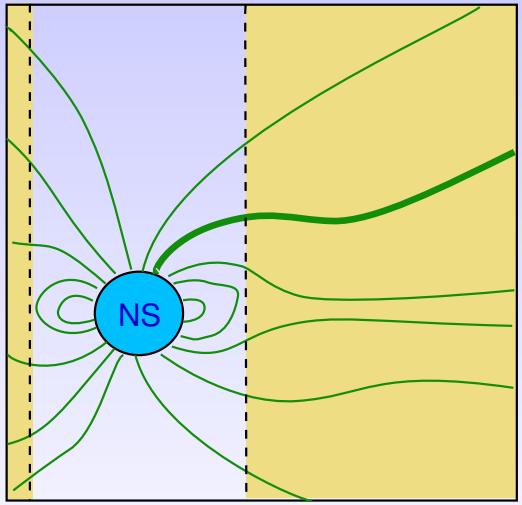
- ブラックホールへの流れは、「 遷-磁気音速流 」でなければならない。
- 遷-磁気音速流
  臨界条件が課せられる　(Weber-Davis 解と同様)
  - ★ Slow magnetosonic point
  - ★ Alfvén point(s)
  - ★ Fast magnetosonic point(s)

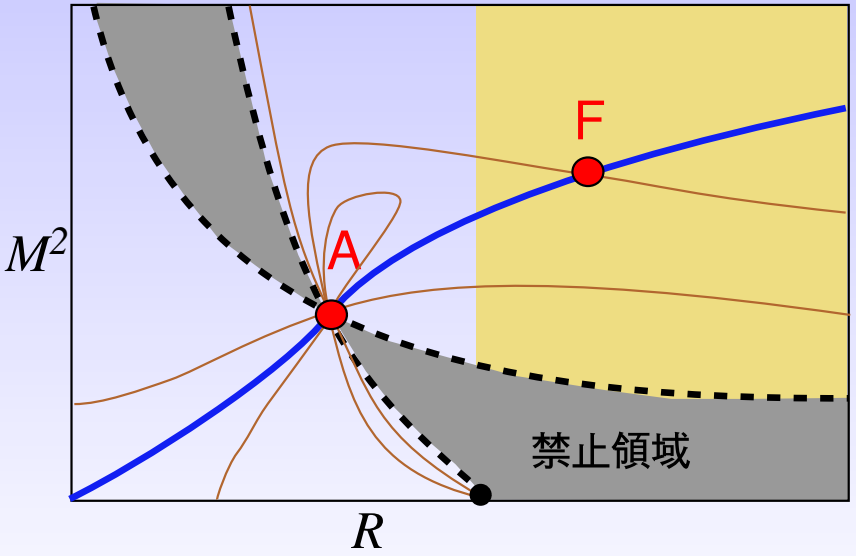
- Inner/Outer Light Surfaces　(相対論効果)
  BH 近傍で光速が遅くなることにより発生。
  Inflow / Outflow が必然的に要請される。

(Solar Wind / Pulsar Wind)

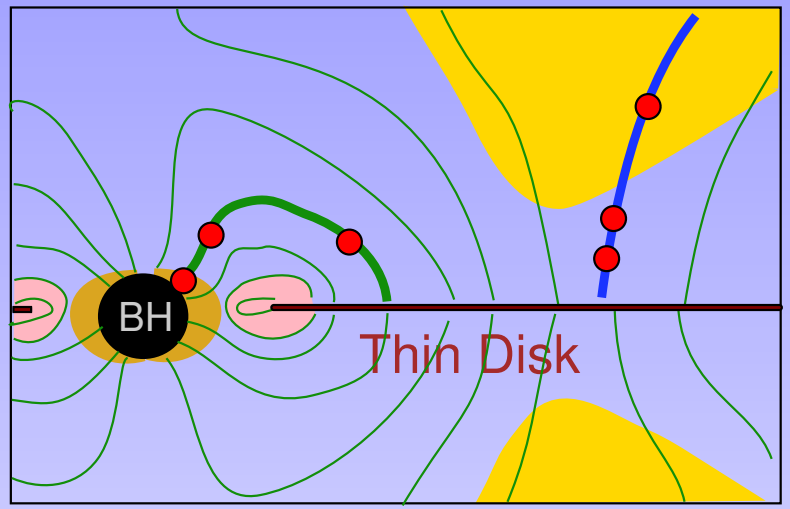


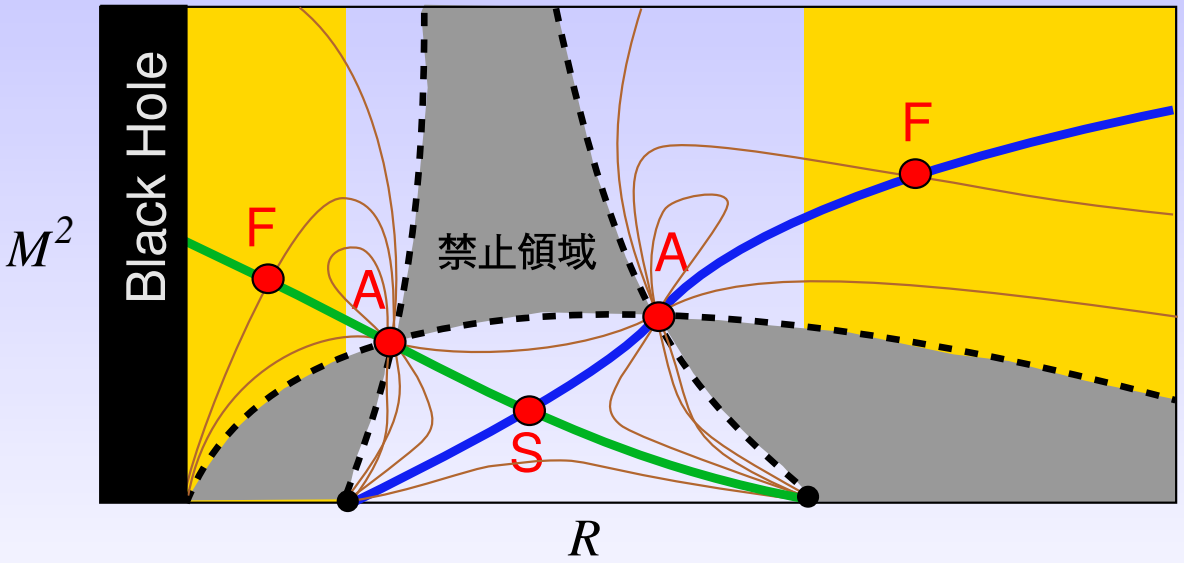






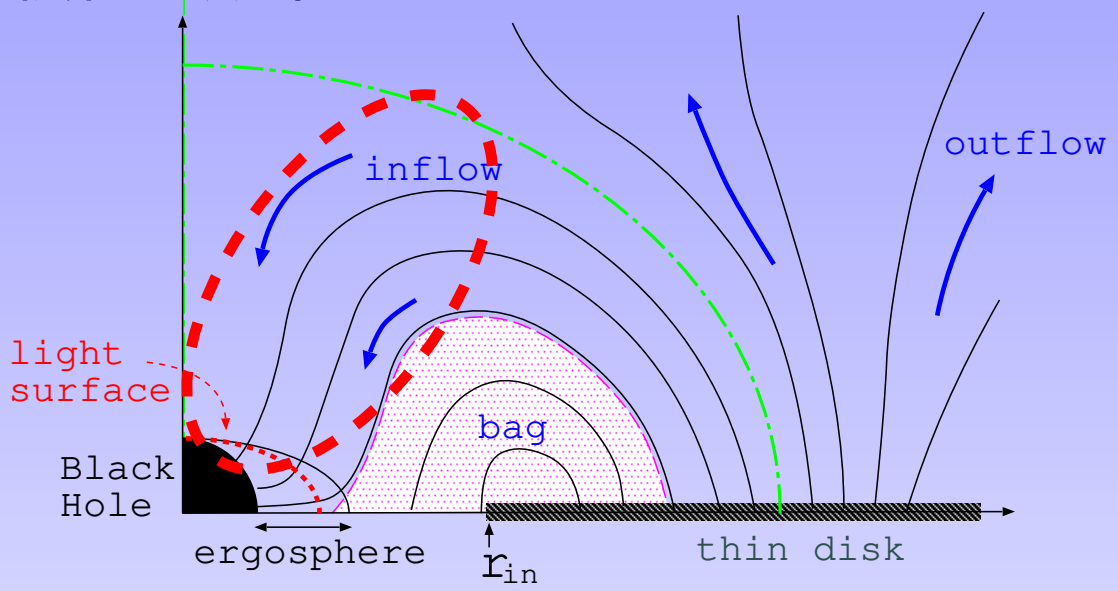
Ingoing/Outgoing BH Winds





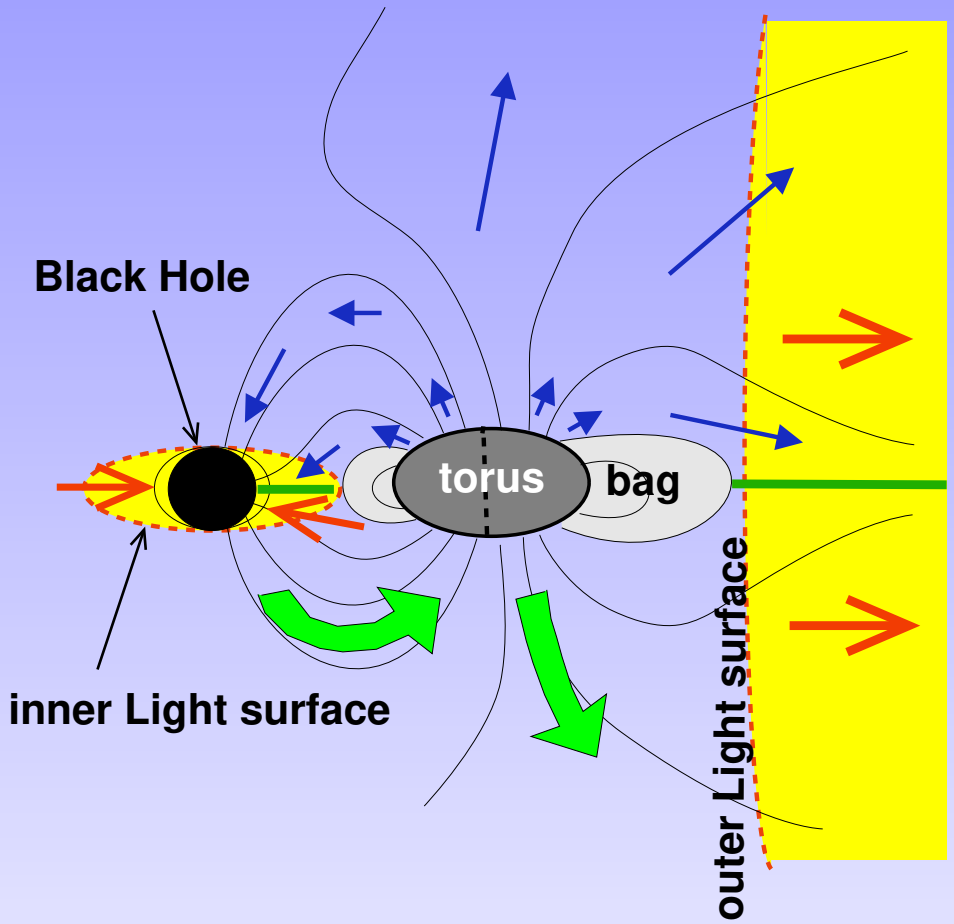
MHD磁気圏

プラズマの慣性の効果：



- Light Surface 内側の磁場は、BH と接続する。ループ磁場は不可。
- BH のエネルギーは、ディスク内端半径の数倍のところに運ばれる。
- BH 近傍の擾乱は、大局構造に影響しない。

GRB のエンジン （= BH 磁気圏 ？）



BH 回転エネルギー抽出 (負エネルギー磁気降着流)

$\Longrightarrow$ 磁気エネルギー から 流体のエネルギー への転化 (ジェット)

$\Longrightarrow$ ショック形成 (fireball)