Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences
Tohoku University

Theoretical Astrophysics
Tohoku University

ブラックホールと中性子星の周辺におけるプラズマ物理

當真賢二
(TOMA Kenji)

東北大学学際科学フロンティア研究所

第27回理論懇シンポジウム 「理論天文学・宇宙物理学と境界領域」 2014年12月26日

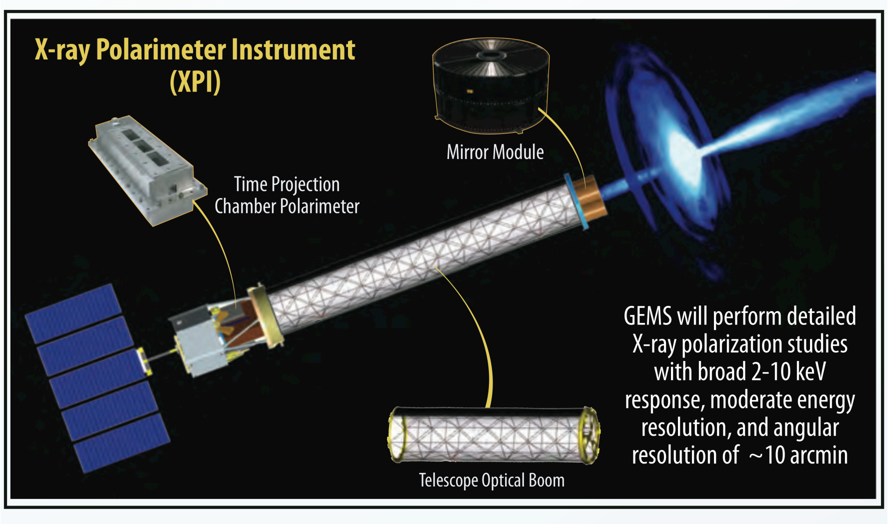
Outline

1. 偏光：X線・γ線観測のフロンティア
   – BH時空の検証、強磁場中のQEDの検証
   – γ線バーストの放射メカニズム

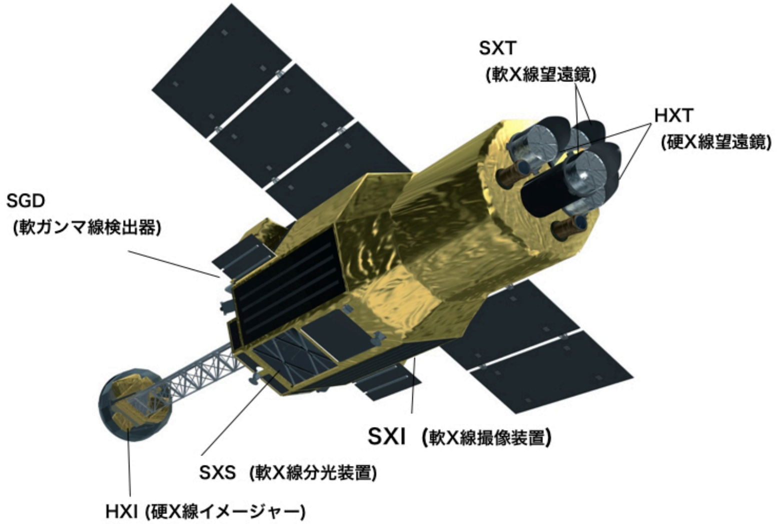
2. BHジェットの駆動メカニズム：一般相対論とプラズマ物理の境界にある問題
   – パルサー風
   – Blandford-Znajek process

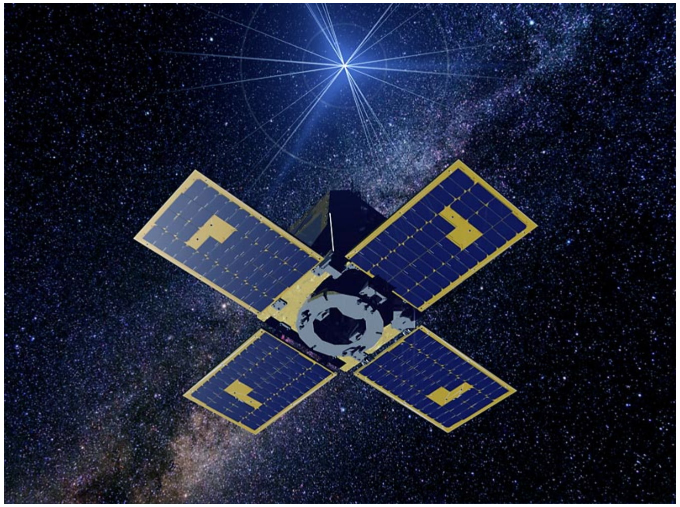
1. 偏光：X線・γ線観測のフロンティア

多くの衛星計画



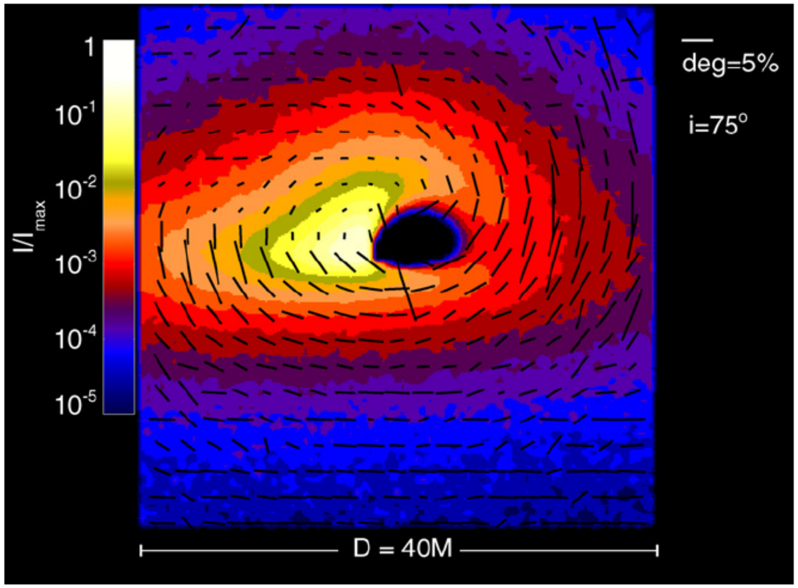
- GEMS, IXPE, PolariS, PolSTAR
- POET, POLAR, SPHiNX, GAP2
- Astro-H/SGD





- GAP, PoGOLite, Tsubame

BH時空の観測的検証



(Schnittman & Krolik 2009)

- X線連星の明るい状態
- 標準円盤、散乱>>吸収→直線偏光 (Chandrasekhar 1960)
- 一般相対論的効果 (Stark & Connors 1977; Li+2009; Schnittman & Krolik 2009)

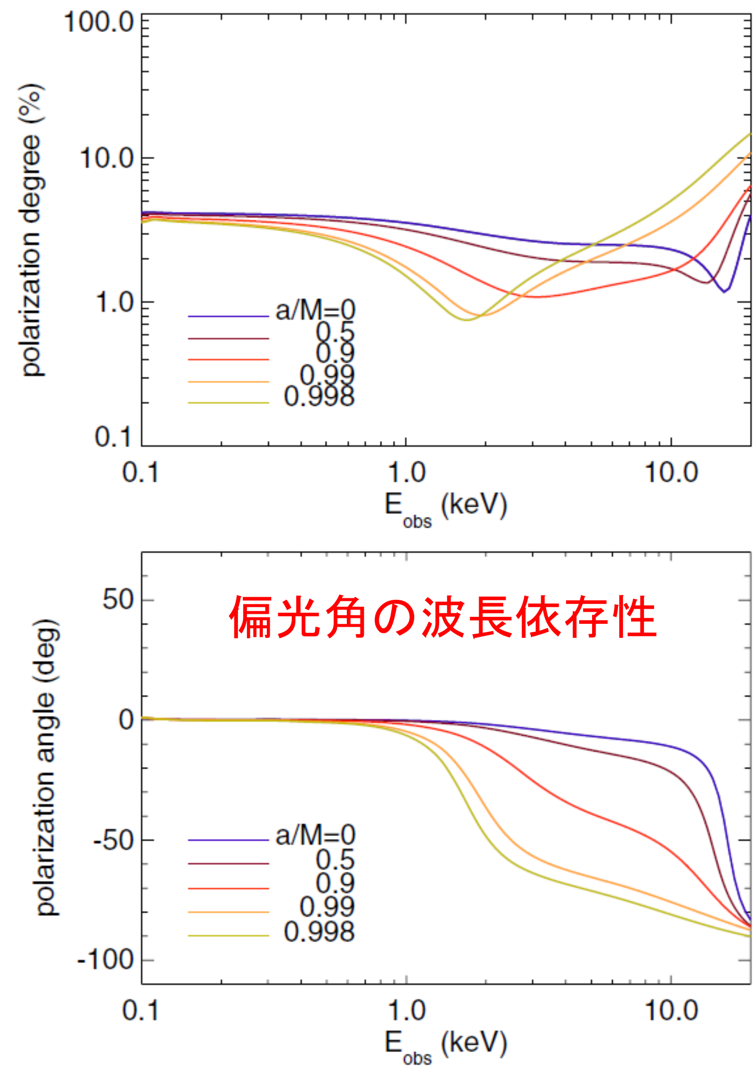


Figure 7. Polarization degree and angle for a range of BH spin parameters. All systems have inclination $i = 75°$, BH mass 10 $M_\odot$, luminosity $L/L_{Edd} = 0.1$, and Novikov–Thorne radial emission profiles.

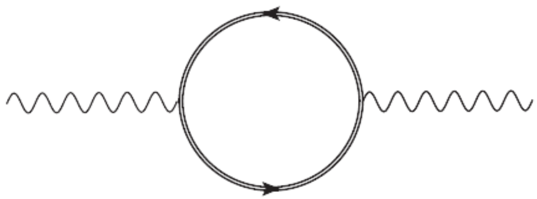
強磁場中のQEDの検証

- 強磁場中性子星の熱放射

$$E < \hbar \frac{eB}{m_e c} = 11.6 B_{12}\ \mathrm{keV}$$

- ⇒ 基本モードは直線偏光
- 磁場に垂直なモードは散乱されにくい

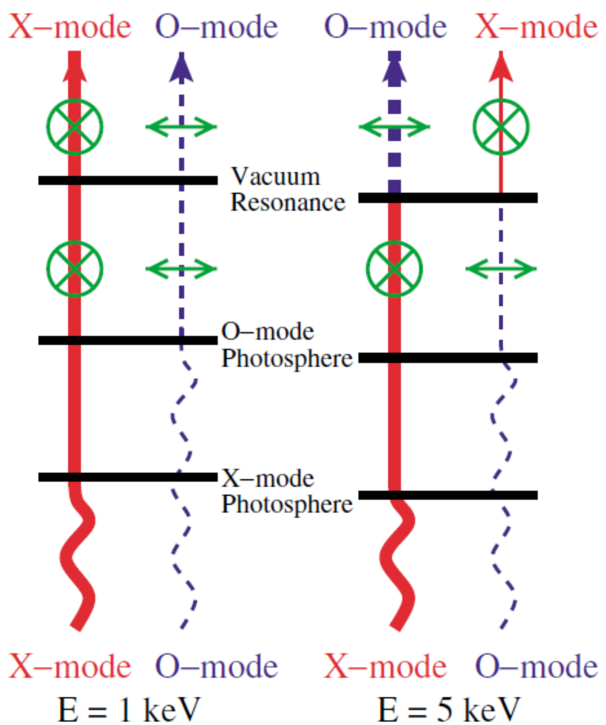
真空偏極



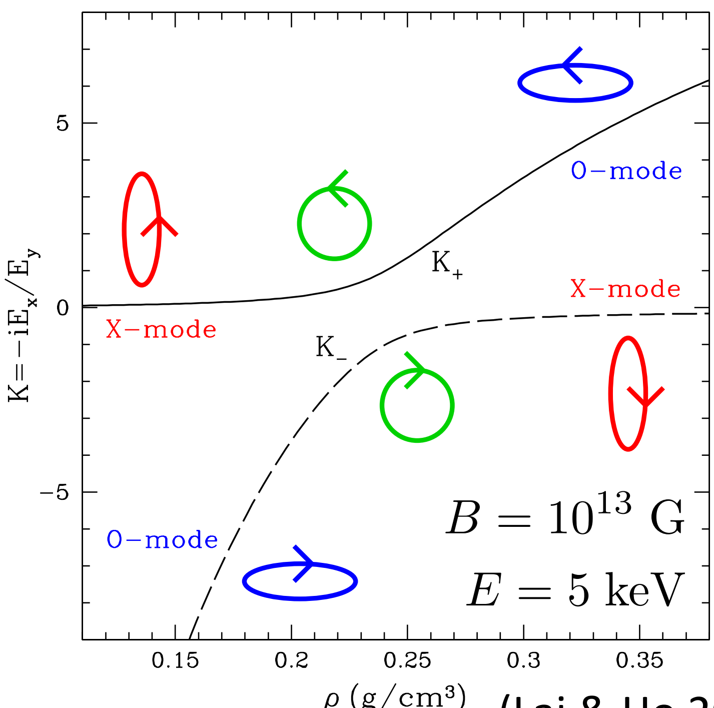
強磁場の影響

モード変換による偏光角のエネルギー依存

中性子星
大気

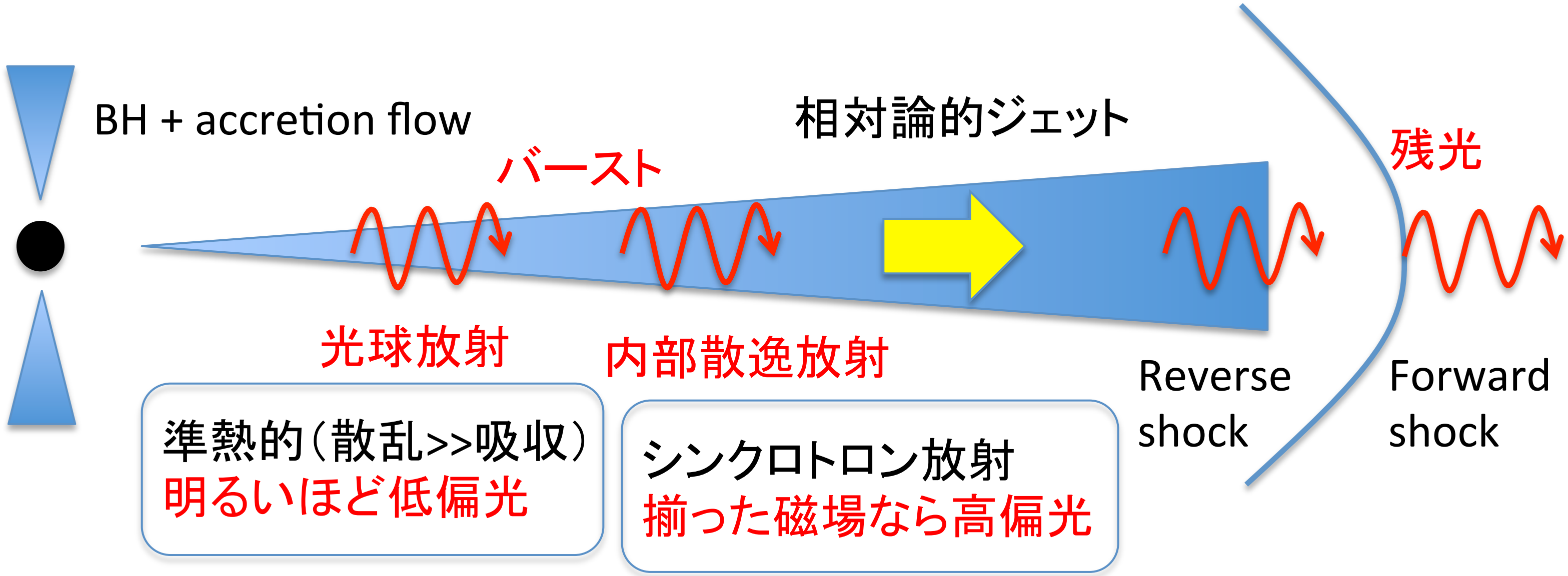


プラズマ偏極優勢　真空偏極優勢



(Lai & Ho 2003)

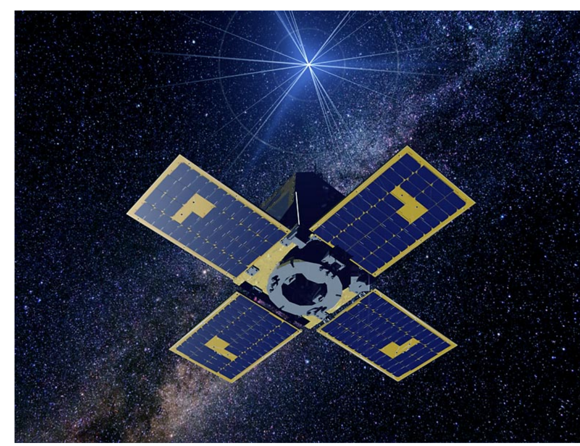
ガンマ線バーストの放射機構



- GAPのγ線偏光観測 (Yonetoku+2011;2012)
- 明るい3例から高偏光(P>30%; 2σ)を検出
- シンクロトロン放射、磁場駆動ジェットを示唆 (KT 2013)

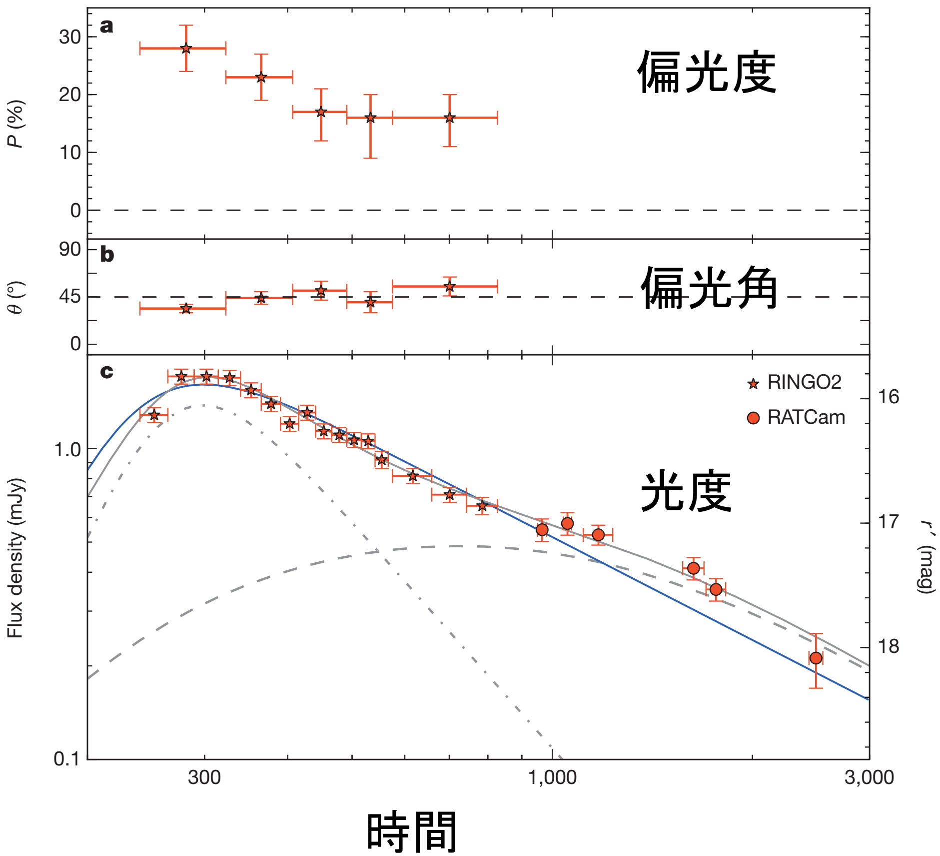
- Tsubame(東工大)に期待

- バーストの可視偏光は未だ観測できていない

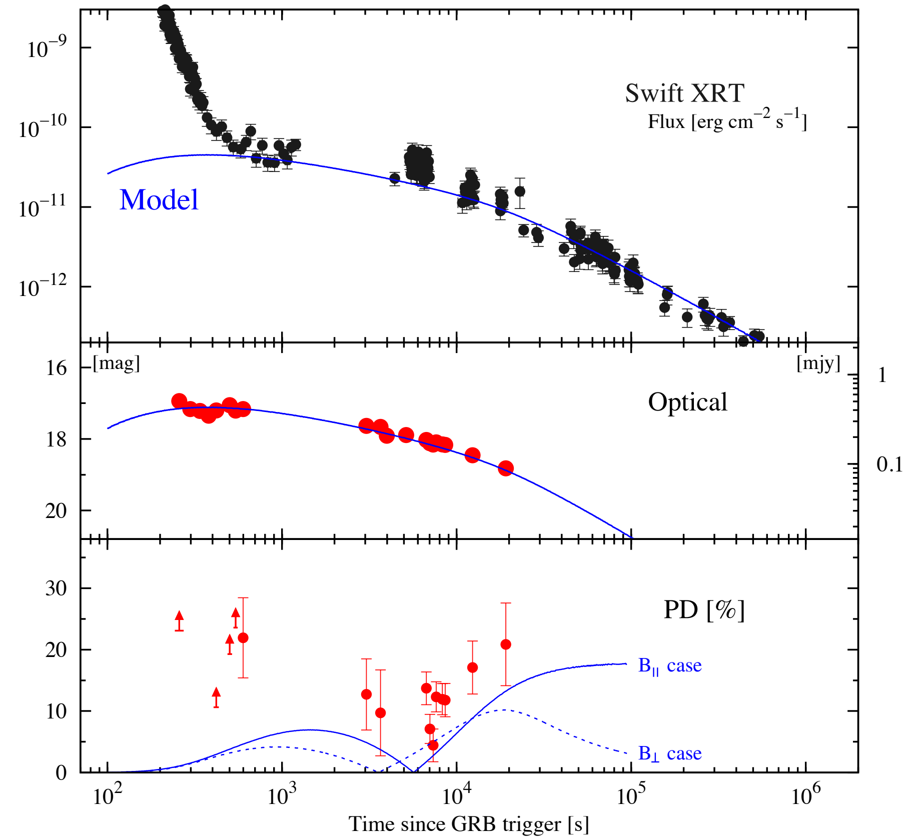


残光の可視偏光

(Mundell+2013 Nature)



(Takaki, KT, Kawabata+ in prep.)

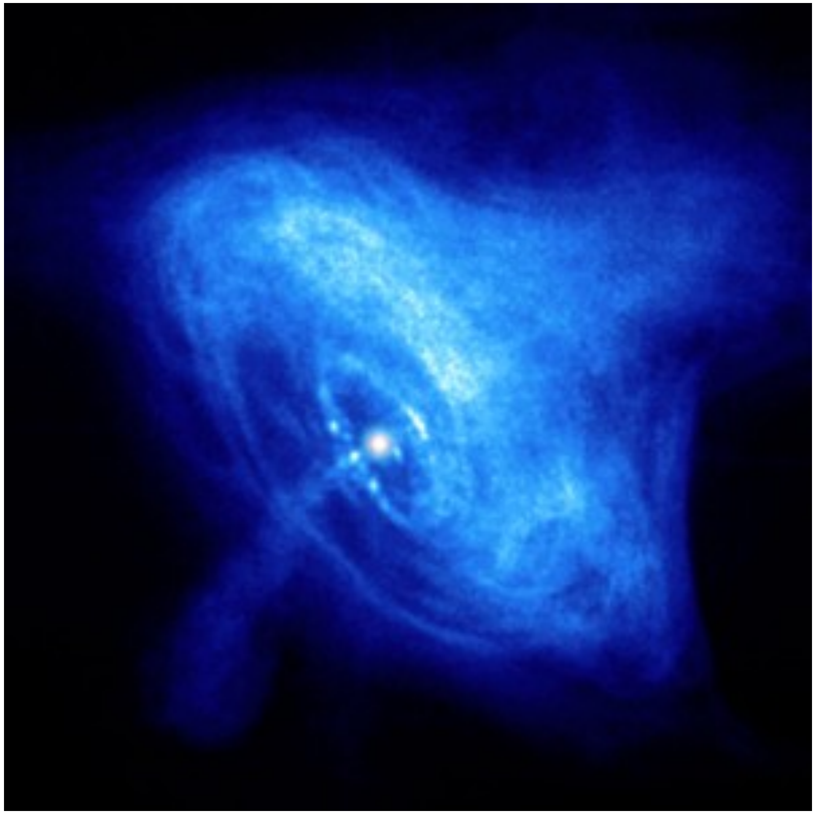


広島大かなた望遠鏡による結果

- 早期の可視残光がP>20% ⇔　１日後ではP~1-3% (Covino+ 2004)
- 後期可視残光から円偏光 P_c/P_l ≅ 0.15 (Wiersema, Covino, KT+2013 Nature)

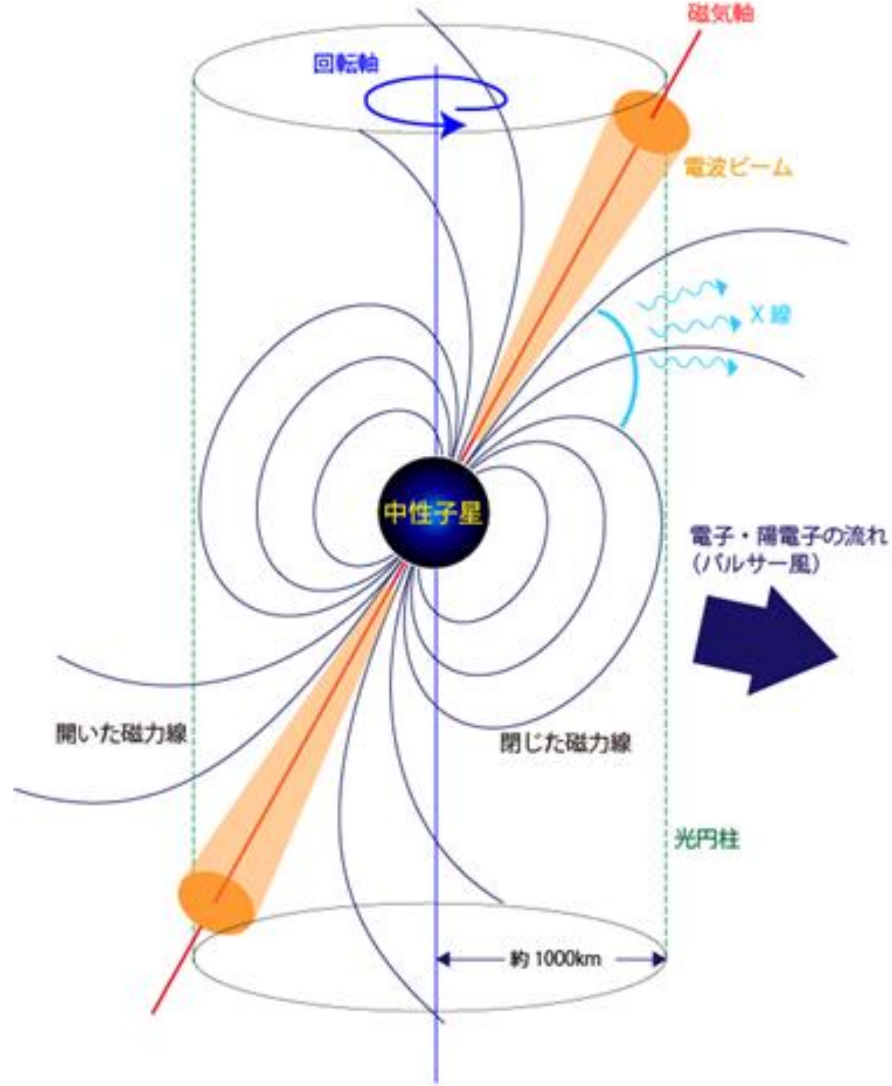
2. BHジェットの駆動機構：一般相対論とプラズマ物理の境界にある問題

パルサー風

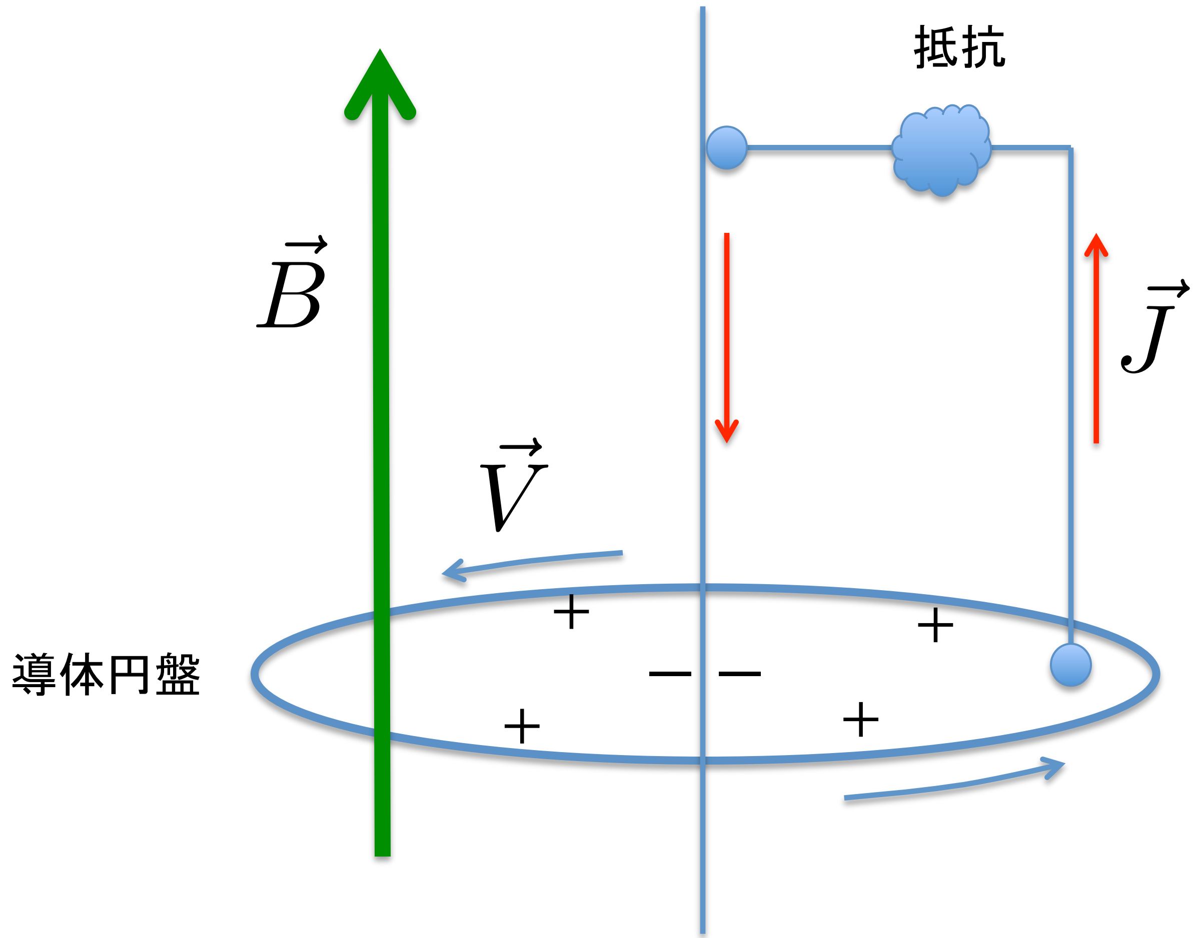


$$\gamma \sim 10^6 \ ?$$

(Kennel & Coroniti 1984;
S.J. Tanaka & Takahara 2010; 2013)



単極誘導



$$\vec{E} = -\vec{V} \times \vec{B}$$

電位差 $\Psi = \int V B dl$

(Faraday 1832)

Goldreich & Julian (1969) model

- 定常軸対称
- 星は伝導体で物質エネルギー優勢
- 星外は磁場優勢だが粒子で満たされ

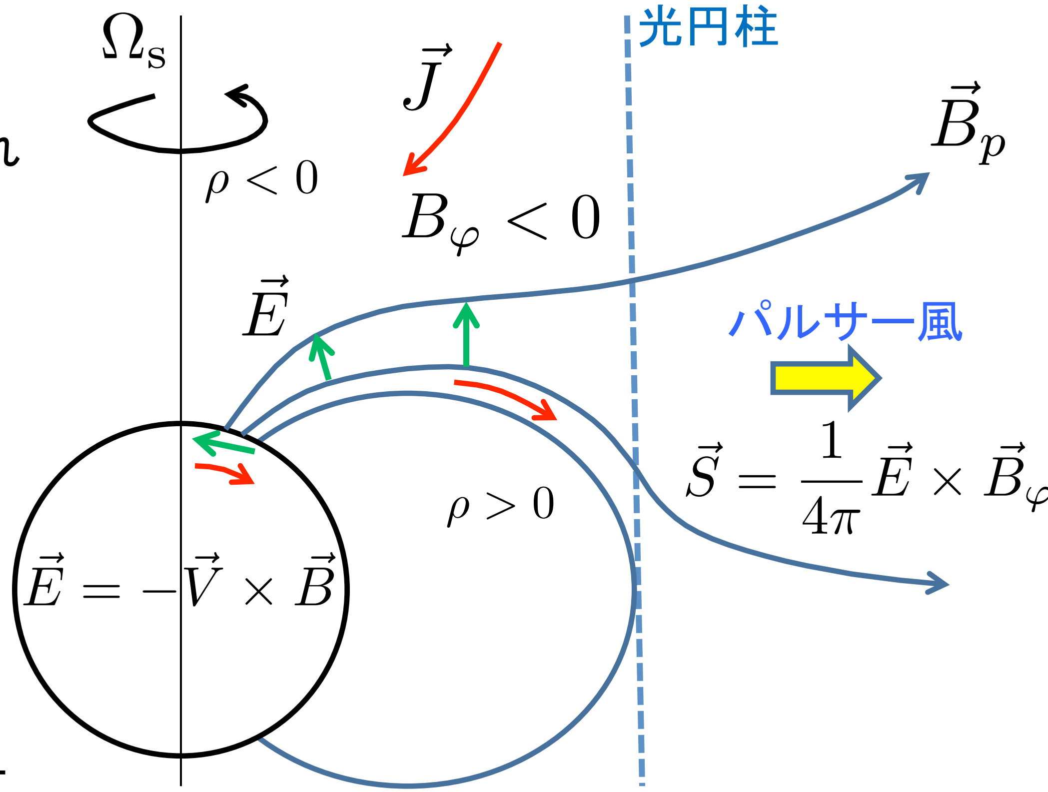
$$\vec{E}\cdot\vec{B}=0$$

$$\vec{E}=-\varpi\Omega_{\rm F}\vec{e}_\varphi\times\vec{B}$$

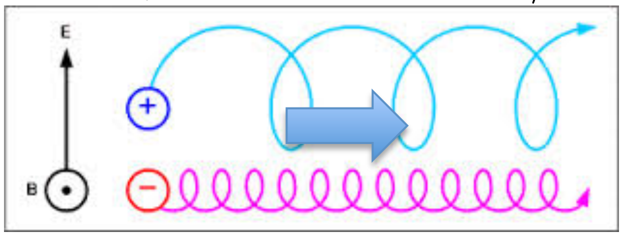
$$\boxed{\Omega_{\rm F}=\Omega_{\rm s}}$$

- 星の回転が磁気圏に電位差を作る
- 粒子はE×Bドリフトで共回転か磁場に沿って運動
- 光円柱の存在 ⇒ B_ϕ ≠ 0
- 星の回転が電流を駆動

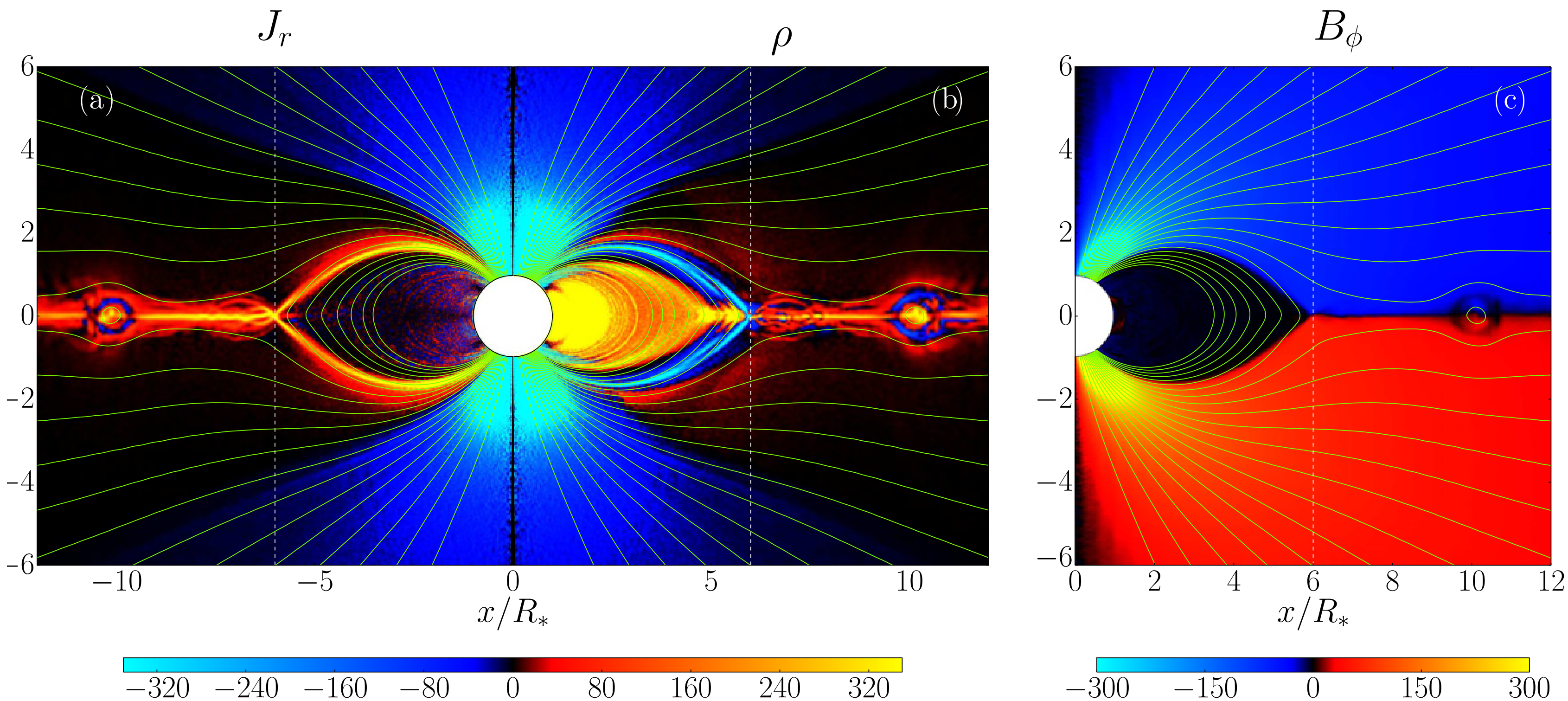
$$\vec{\nabla}\cdot\vec{S}=-\vec{E}\cdot\vec{J}=-(\vec{J}\times\vec{B}_p)\cdot\vec{V}_\varphi$$



E×Bドリフト $\vec{v}_d=\vec{E}\times\vec{B}/B^2$



Particle In Cell Simulation

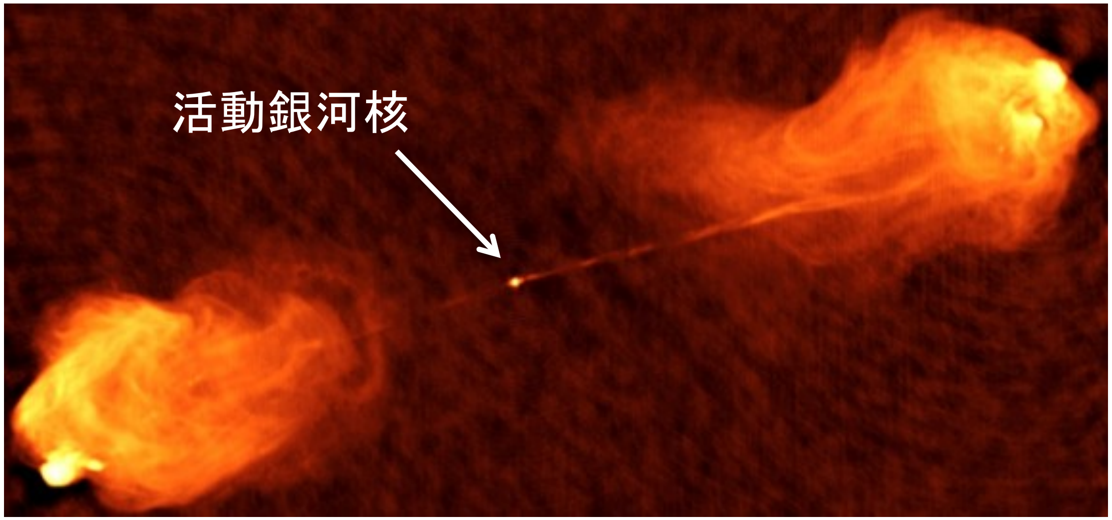


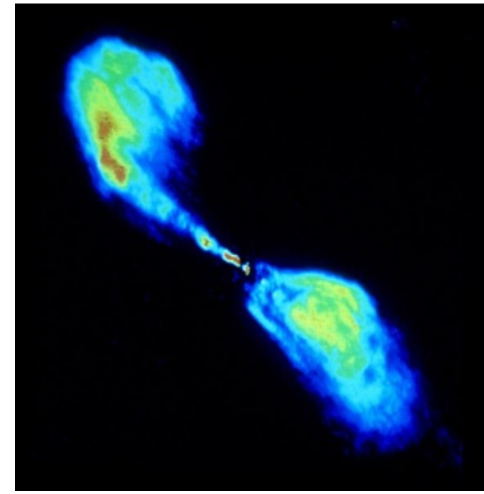
(Chen & Beloborodov 2014)

- PIC計算　＋　電子の曲率放射と γ→e⁺ + e⁻
- 広い領域でe+e-生成が可能とした場合、準定常的な電流回路が形成される
- 電流シートに沿った電場がe+e-生成　$\vec{E}\cdot\vec{B}\neq 0$　but　$|\rho| \gg |\rho_{\rm GJ}|$
- 高エネルギー粒子が磁力線を横切る

(see also Yuki & Shibata 2012; Philippov & Spitkovsky 2014)

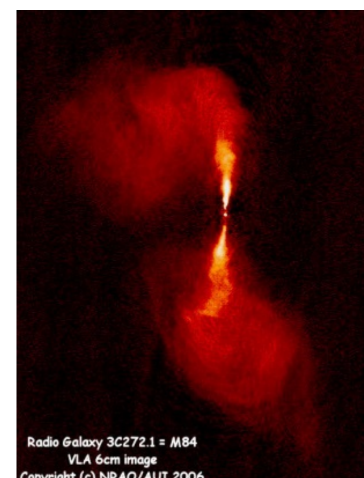
BH jets





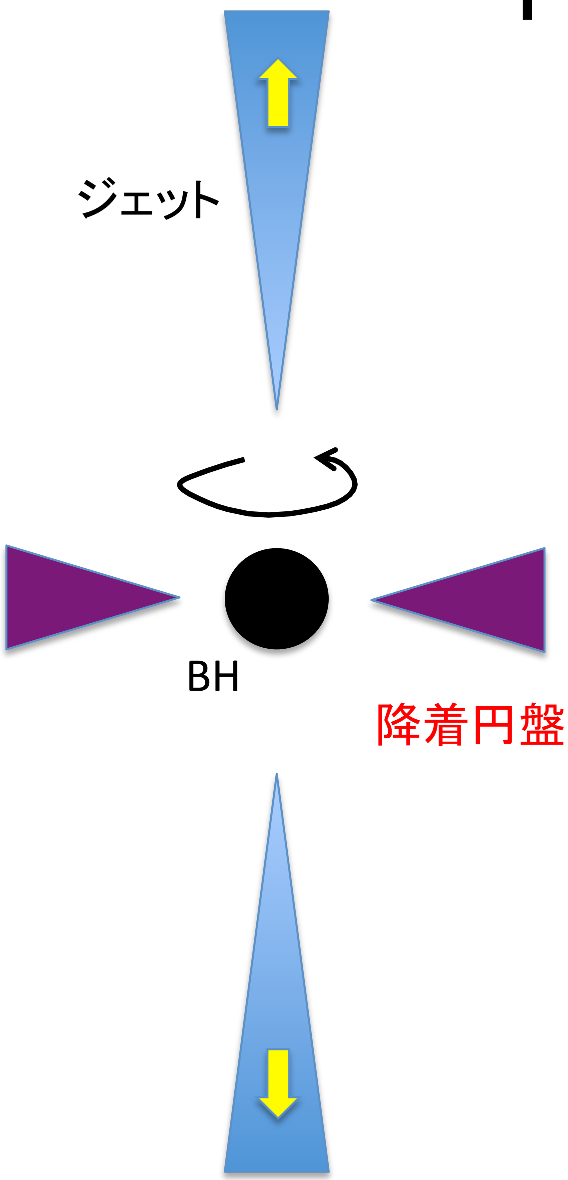
$$L_j \lesssim L_{\mathrm{Edd}} \simeq 10^{46} M_8 \ \mathrm{ergs}^{-1}$$

$$\gamma = 10 - 100$$



ガンマ線バーストでは $L_j \gg L_{\mathrm{Edd}}$ $\gamma > 100$

中心エンジン



- パルサーと異なり、BHには降着流が付随するが・・・
- ジェットへの質量流入は適度に調節されているようだ

$$L_j \sim \gamma \dot{M}_j c^2$$

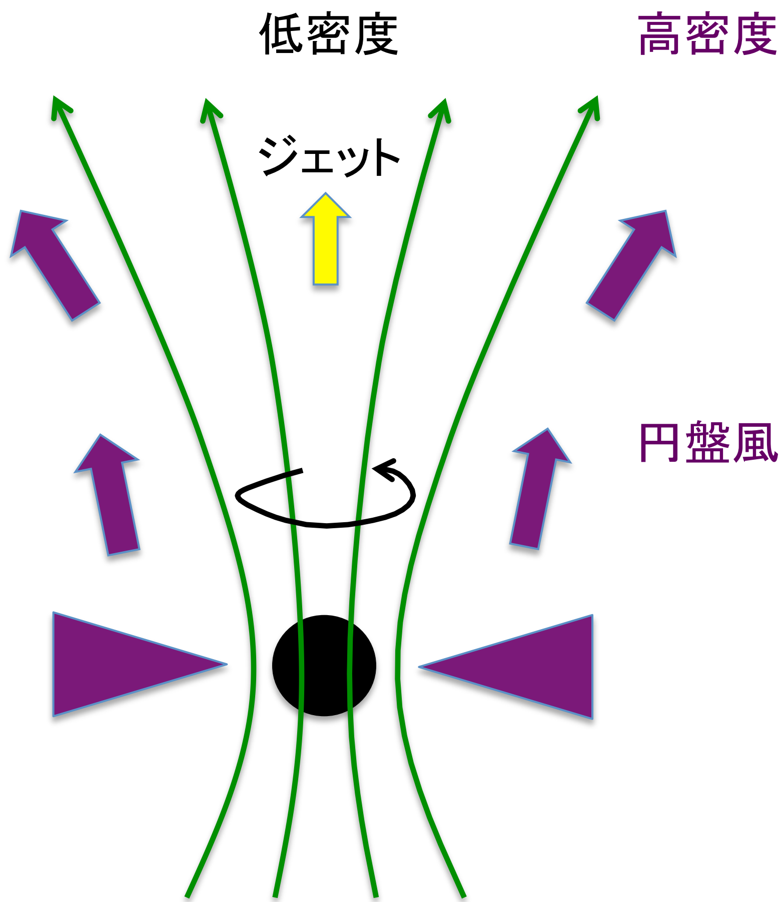
$$n_{\rm GJ} \sim 10^{-2} B_3 M_8 \ {\rm cm}^{-3}$$

$$\Rightarrow \quad \gamma_{\rm max} \sim 10^{10}$$

$$\Leftrightarrow \quad \gamma = 10 - 100$$

- エネルギー源は何か？
- 質量源は何か？
- 加速機構は何か？
- 収束機構は何か？

有力視されているシナリオ



- BH上空の低密度領域にエネルギーを注入
- ブラックホール回転エネルギーの定常的注入 (Blandford & Znajek 1977)
  → 電磁場優勢ジェット
- 物質源は不明。非定常過程？中性子注入？(KT & Takahara 2012)
- ローレンツ力（磁気圧勾配、磁気遠心力）による物質加速 (cf. KT & Takahara 2013 PTEP)
- 外側のガス圧で絞る

Blandford & Znajek (1977)

- Kerr時空、定常軸対称場
- 無限小回転BH

$$\Omega_{\rm H} \ll 1$$

- スプリットモノポール場

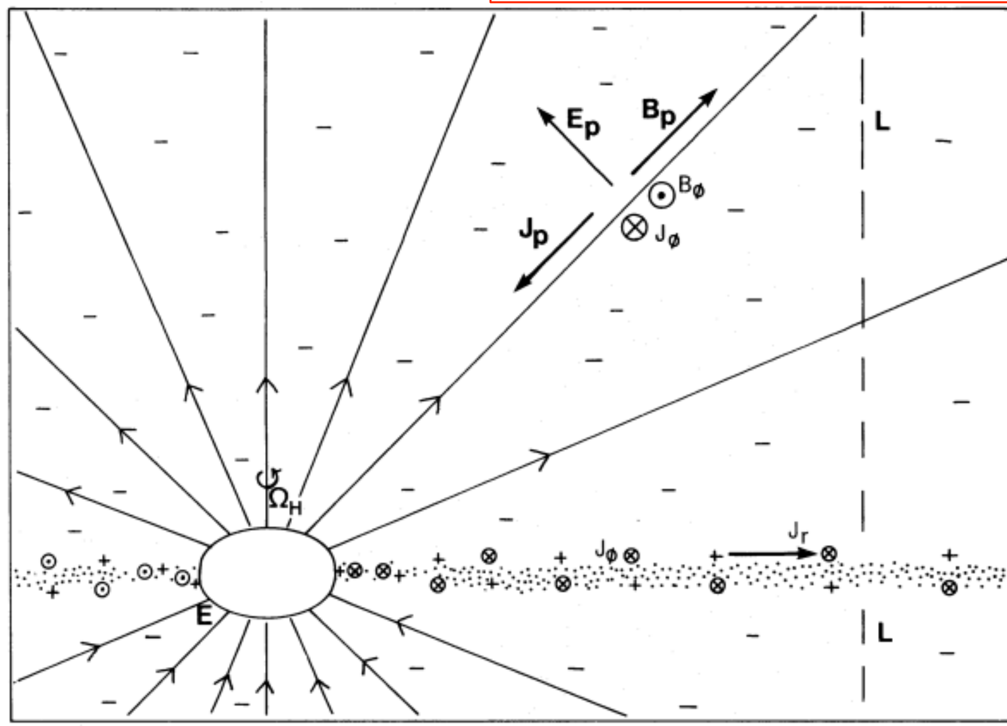
$$B^r\sqrt{\gamma} = {\rm const.}$$

- Force-free近似（電磁場優勢）

$$H_\varphi = {\rm const.}$$

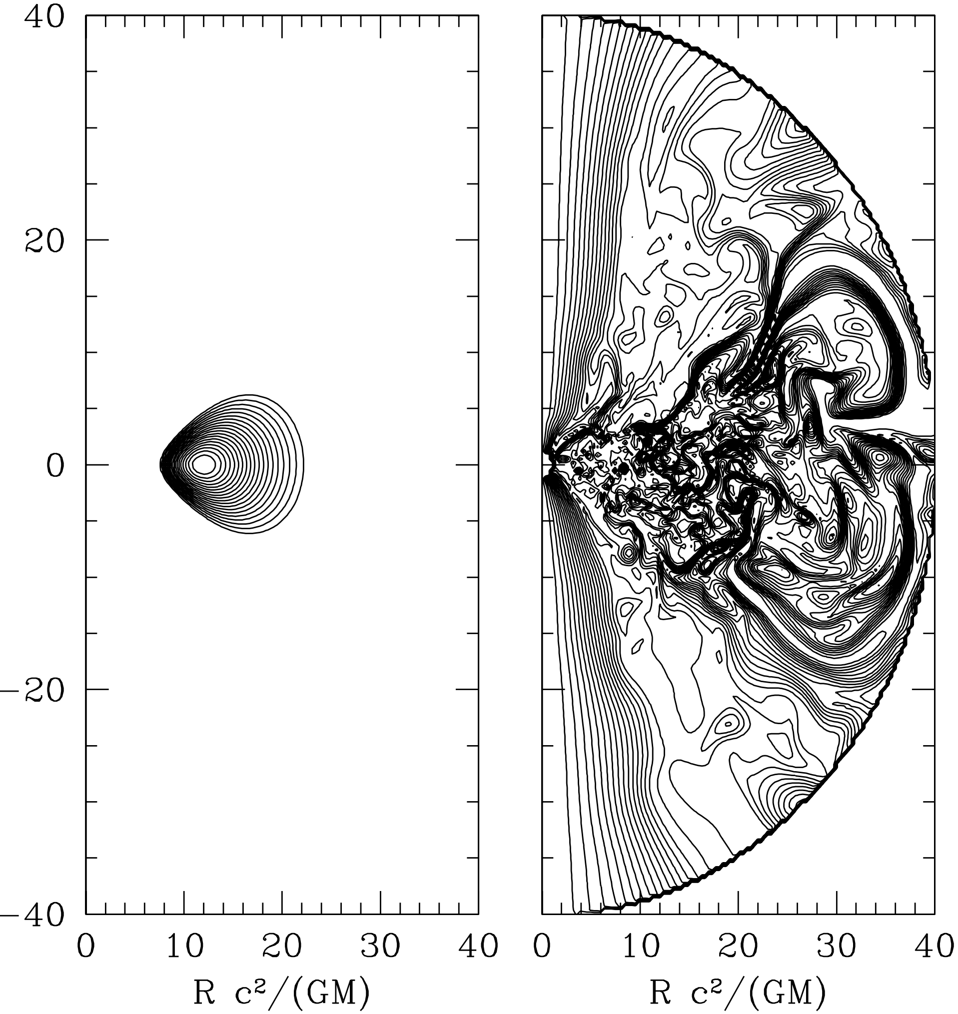
$$\boxed{\Omega_{\rm F} = \Omega_{\rm H}/2 + O(a^3)}$$

無限遠での解 $\boxed{H_\varphi = -2\pi\Omega_{\rm F} B^r\sqrt{\gamma}\sin\theta}$



$\boxed{H_\varphi = 2\pi(\Omega_{\rm F} - \Omega_{\rm H})B^r\sqrt{\gamma}\sin\theta}$ 地平面での条件

Force-free / MHD simulations



(McKinney & Gammie 2004)

- Koide, Shibata, Kudoh (1999-)
- Komissarov, Barkov (1999-)
- Gammie, McKinney, Tchekhovskoy (2003-)
- De Villiers, Hawley, Krolik (2003-)
- See 水田さん、高橋博之さんポスター

- Kerr時空は固定
- 初期条件にB_pを設定
- 準定常的なポインティング流速生成

  $L_j > \dot{M}_{\rm acc} c^2$ も可能

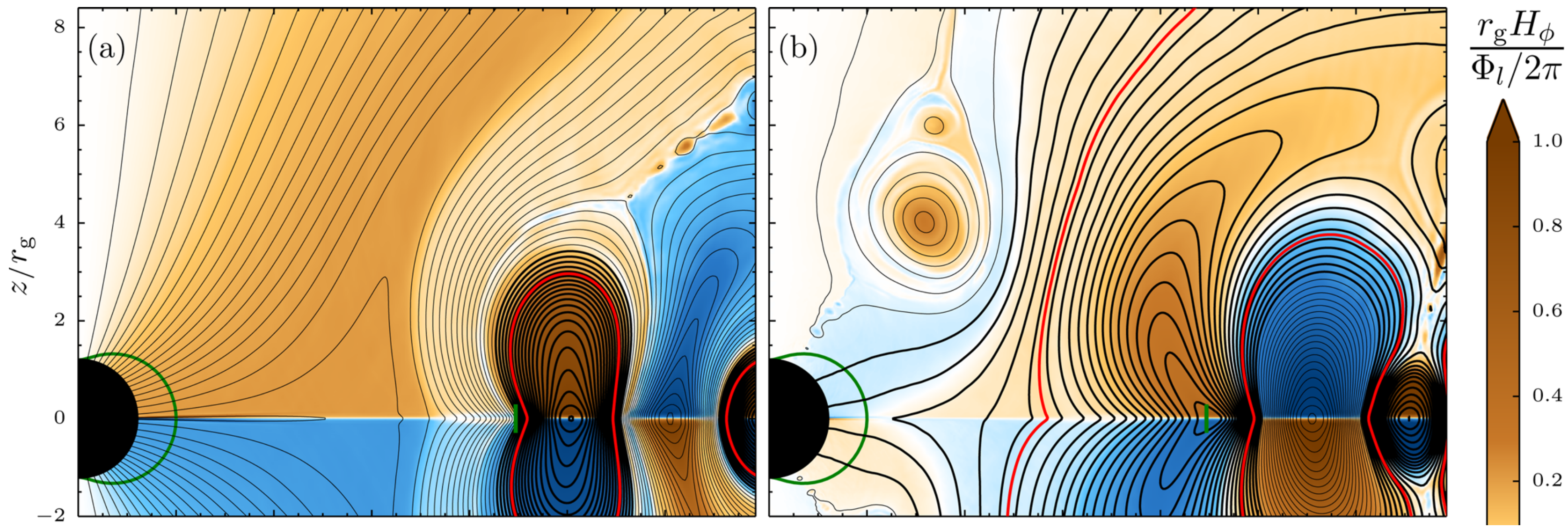
- MHD計算では、粒子を注入し続けなければならない

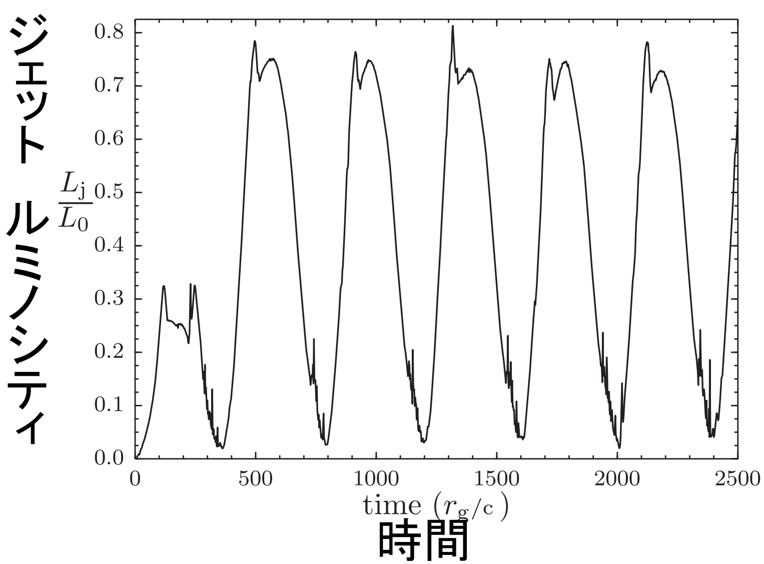
- 負のエネルギー粒子なし(Komissarov 2005)

- 最近では輻射輸送計算が盛ん

非定常シナリオ

(Perfrey, Giannios & Beloborodov 2015)





- 反対巻きのB_pループを順に降着させる
- BHとdiskが逆回転の場合に活動的

- 回転エネルギー　→　Poynting flux　→ 軸付近での大規模磁気リコネクションで熱化

Blandford-Znajek過程についての論点

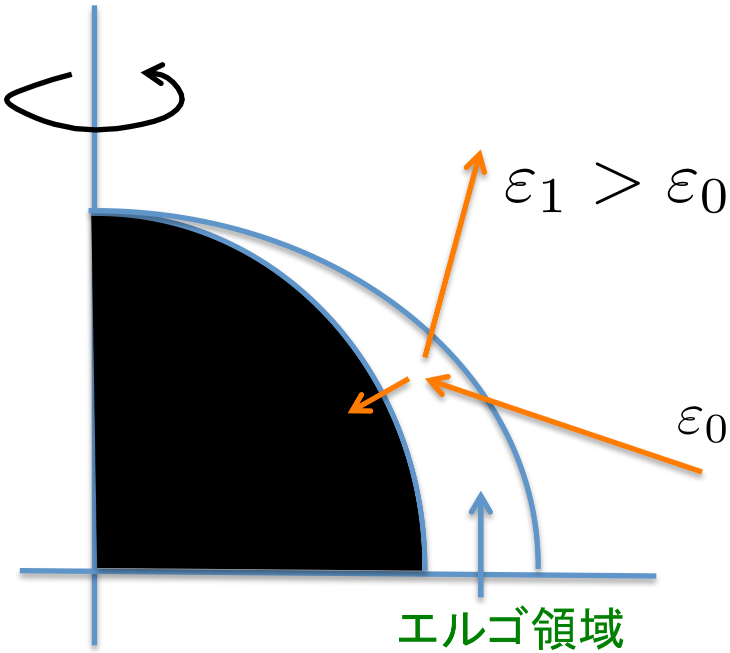
- パルサーでは

$$\vec{E} = -\vec{V} \times \vec{B} \qquad \Omega_{\rm F} = \Omega_{\rm s} \qquad \vec{\nabla} \cdot \vec{S} = -\vec{E} \cdot \vec{J}$$

1. 至る所で電磁場優勢の状況において、電位差はどのように生じ、維持されるのか？
2. 電流はどこで駆動され、どう閉じるのか？
3. BH回転エネルギーはどうPoynting流速に転換するのか？Penrose過程との関係は？

Kerr space-time

$$\boxed{ds^2 = g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu = -\alpha^2 dt^2 + \gamma_{ij}(\beta^i dt + dx^i)(\beta^j dt + dx^j),}$$



- Boyer-Lindquist 座標
  - 地平面で特異
  - 空間座標は直交
  - これまでほとんどの解析的研究はこれを使っている
- Kerr-Schild 座標
  - 地平面で正則
  - 空間座標は直交していない
  - MHD計算に用いられている

$$\xi_t^2 = g_{tt} = -\alpha^2 + \beta^2 > 0$$

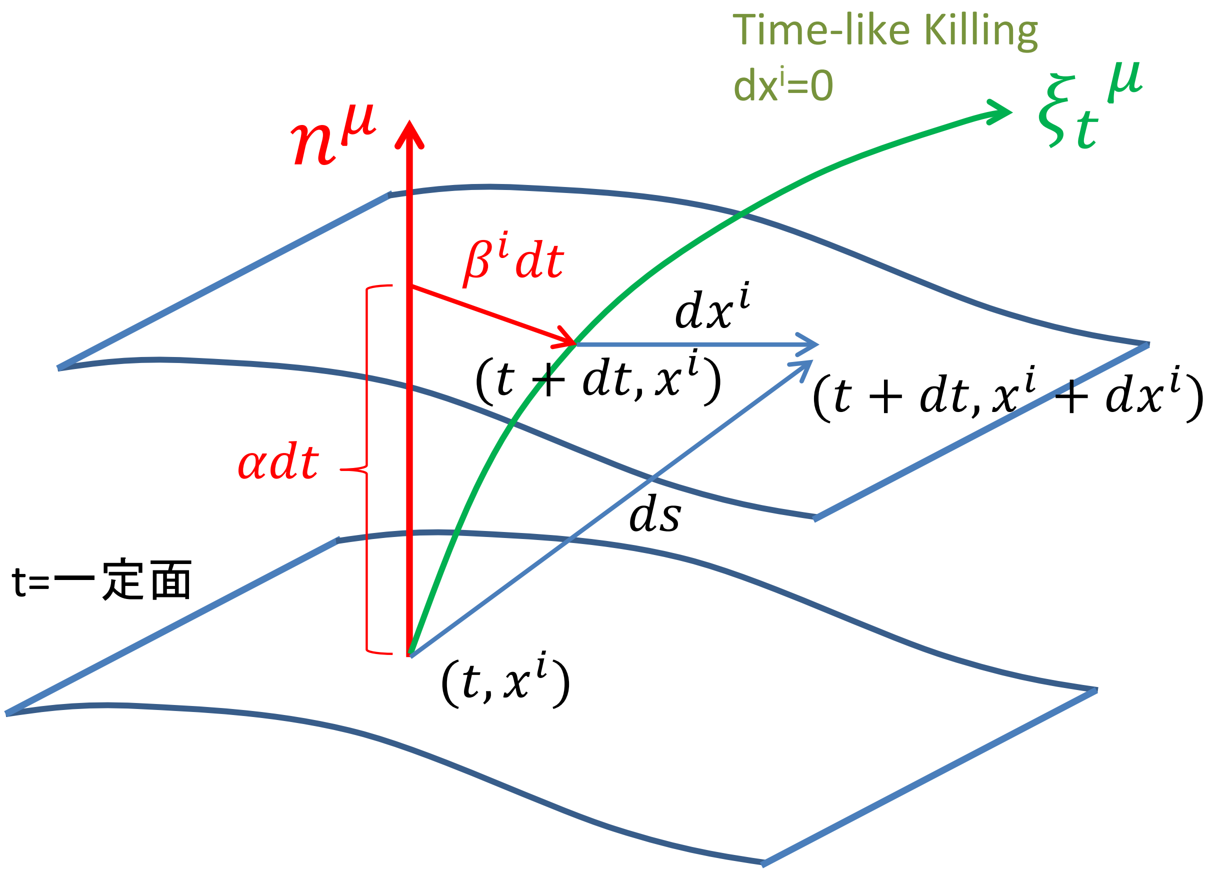
粒子は必ず $d\varphi_{\mathrm{BL}} > 0$

$\varepsilon = -u \cdot \xi_t < 0$ がありえる

ε<0粒子を落としてエネルギーを取り出すことが可能（Penrose過程）

時空の3+1分解

$$\boxed{ds^2 = g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu = -\alpha^2 dt^2 + \gamma_{ij}(\beta^i dt + dx^i)(\beta^j dt + dx^j),}$$



- t=一定面の法線：fiducial observer (FIDO)

$$n^\mu = \left(\frac{1}{\alpha}, \frac{-\beta^i}{\alpha}\right)$$

$$n_\mu = (-\alpha, \vec{0})$$

- FIDOは自然な正規直交基底を張る
- FIDOは角運動量ゼロ (ZAMOともいう)

$$n \cdot \xi_\varphi = 0$$

3+1 Electrodynamics

(場の古典論; Komissarov 2004)

$$E^\mu = F^{\mu\nu}\xi_{t,\nu}, H^\mu = -{}^*F^{\mu\nu}\xi_{t,\nu},$$
$$D^\mu = F^{\mu\nu}n_\nu, B^\mu = -{}^*F^{\mu\nu}n_\nu$$

座標基底に関する電磁場

$n_\mu = (-\alpha, \vec{0})$ FIDO or ZAMO

$$\boxed{\begin{aligned} &\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0, \quad \partial_t \boldsymbol{B} + \nabla \times \boldsymbol{E} = 0, \\ &\nabla \cdot \boldsymbol{D} = 4\pi\rho, \quad -\partial_t \boldsymbol{D} + \nabla \times \boldsymbol{H} = 4\pi \boldsymbol{J}, \end{aligned}}$$

$$\boxed{\begin{aligned} &\boldsymbol{E} = \alpha \boldsymbol{D} + \boldsymbol{\beta} \times \boldsymbol{B}, \\ &\boldsymbol{H} = \alpha \boldsymbol{B} - \boldsymbol{\beta} \times \boldsymbol{D}, \end{aligned}}$$

Poynting flux

$$\partial_t \left[\frac{1}{8\pi}(\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{D} + \boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{H})\right] + \nabla\cdot\left(\frac{1}{4\pi}\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{H}\right) = -\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{J},$$

真空解(Wald 1974)では、
H_ϕ=0. No Poynting flux.

$$\partial_t \left[\frac{1}{4\pi}(\boldsymbol{D}\times\boldsymbol{B})\cdot\boldsymbol{m}\right] + \nabla\cdot\frac{1}{4\pi}\left[-(\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{m})\boldsymbol{D} - (\boldsymbol{H}\cdot\boldsymbol{m})\boldsymbol{B} + \frac{1}{2}(\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{D} + \boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{H})\boldsymbol{m}\right] = -(\rho\boldsymbol{E} + \boldsymbol{J}\times\boldsymbol{B})\cdot\boldsymbol{m},$$

$$\boldsymbol{m} = \partial_\varphi.$$

角運動量flux

Kerr BH 磁気圏

- 外部電流で作られたB_pがエルゴ領域を貫いている
- 磁気圏プラズマは低密度でcollisionlessであるが、次式を満たしてはいる

$$\vec{D} \cdot \vec{B} = 0$$

- 重力はローレンツ力に比べて無視できる（地平面ごく近傍を除いて）

$$\boldsymbol{E} = \alpha \boldsymbol{D} + \boldsymbol{\beta} \times \boldsymbol{B}, \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{E} = -\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{B}, \quad \boldsymbol{\omega} = \underline{\Omega_{\mathrm{F}}} \boldsymbol{m}.$$

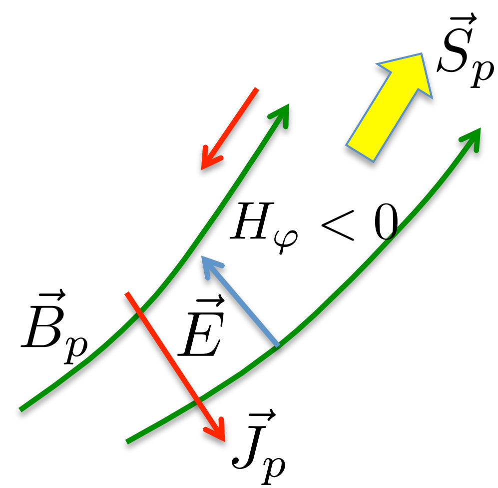
電位差パラメータはパルサーの場合と同様に定義される

定常軸対称として

Poynting flux

$$\nabla \cdot \left(-\Omega_F \frac{H_\varphi}{4\pi} \boldsymbol{B}_{\mathrm{p}} \right) = B^i \partial_i \left(-\Omega_F \frac{H_\varphi}{4\pi} \right) = -\boldsymbol{E} \cdot \boldsymbol{J}_{\mathrm{p}},$$

$$\nabla \cdot \left(-\frac{H_\varphi}{4\pi} \boldsymbol{B}_{\mathrm{p}} \right) = B^i \partial_i \left(-\frac{H_\varphi}{4\pi} \right) = -(\boldsymbol{J}_{\mathrm{p}} \times \boldsymbol{B}_{\mathrm{p}}) \cdot \boldsymbol{m}.$$



起電力の起源

$$\boxed{\boldsymbol{E} = \alpha\boldsymbol{D} + \boldsymbol{\beta}\times\boldsymbol{B},}$$

$$\boxed{\boldsymbol{E} = -\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{B}, \quad \boldsymbol{\omega} = \Omega_{\mathrm{F}}\boldsymbol{m}.}$$

【命題】 $\Omega_{\mathrm{F}} = 0, H_{\varphi} = 0$ の定常状態は維持できない。

(KT & Takahara 2014)

BL座標で考えると $B_{\varphi} = 0$

$$\vec{E} = 0,\ \vec{D} = \frac{-1}{\alpha}\vec{\beta}\times\vec{B} \quad \Rightarrow \quad D^2 = \frac{\beta^2}{\alpha^2}B^2$$

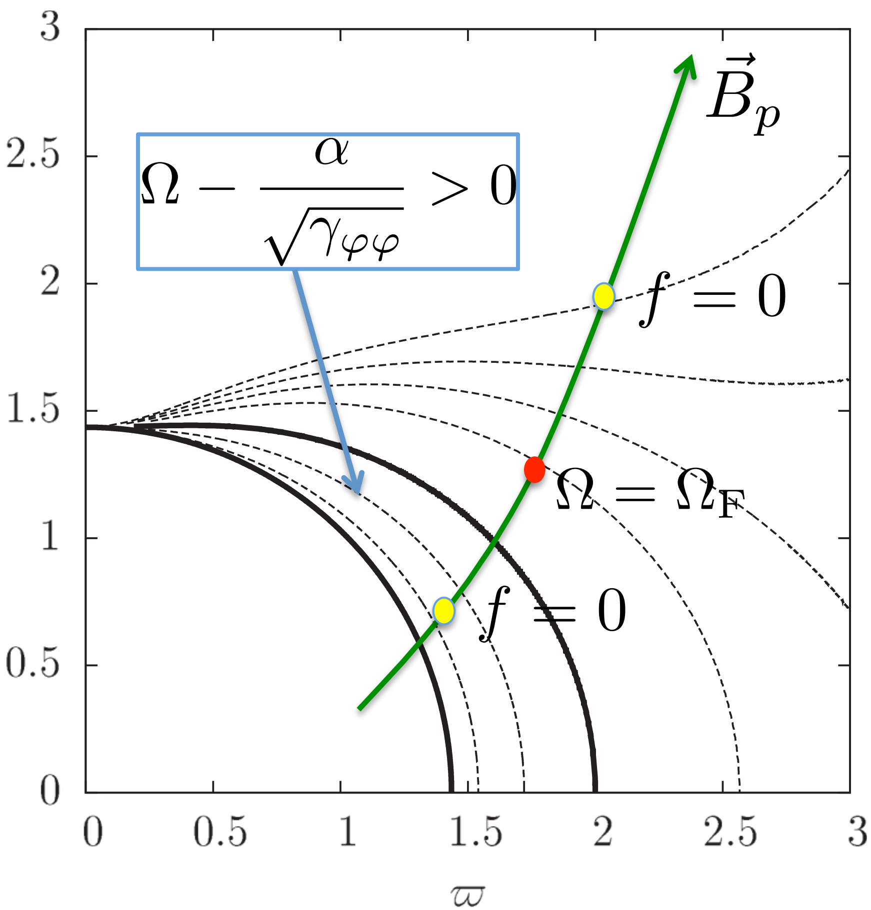
エルゴ領域において $\alpha^2 < \beta^2 \to D^2 > B^2$ （KS座標でも同じ結論）

B_pを横切って電流が駆動され、 $H_{\varphi} \neq 0$

荷電粒子の流れは電場を弱くする $\Omega_{\mathrm{F}} > 0,\ \vec{E} \neq 0$

起電力の起源はエルゴ領域である。地平面は本質的でない。

光円柱



- 光円柱の位置

$$f(\Omega_F, r, \theta) \equiv (\xi_t + \Omega_F \xi_\varphi)^2$$
$$= -\alpha^2 + \gamma_{\varphi\varphi}(\Omega_F - \Omega)^2 = 0$$

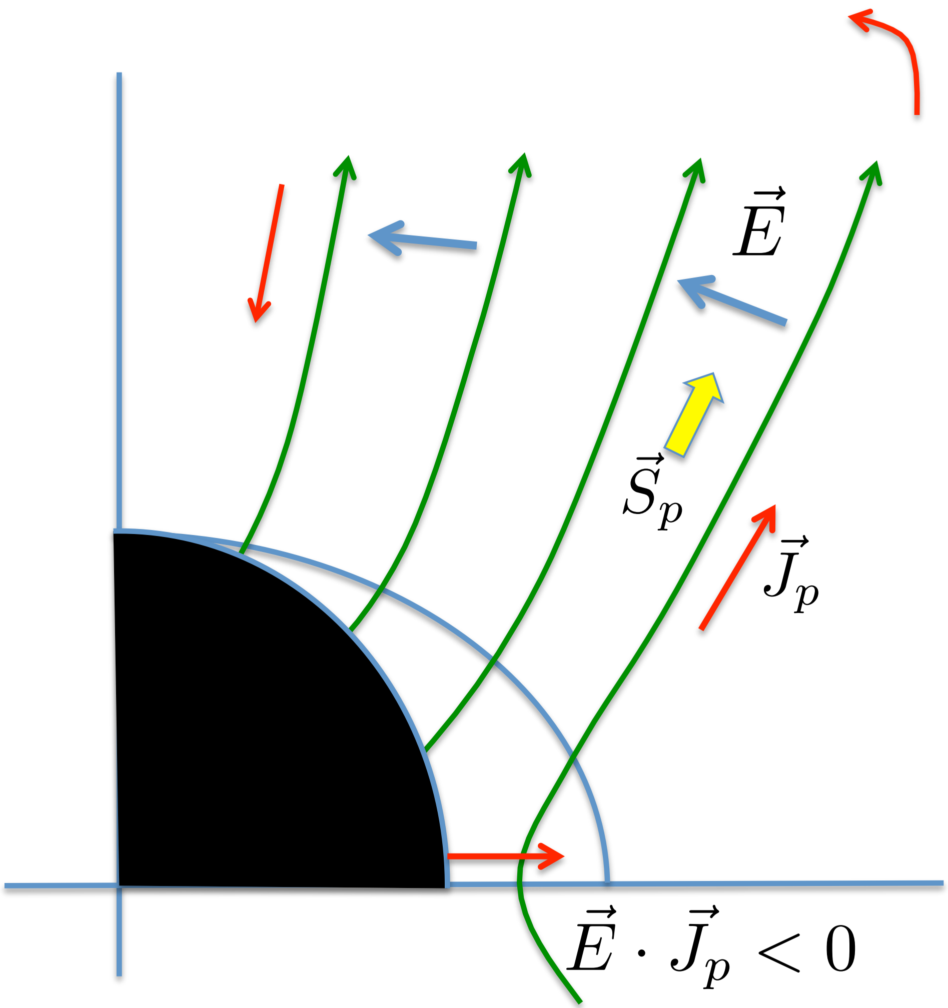
（BL座標）

- 2つの光円柱が存在
- 外側 $\Omega_F - \Omega = \frac{\alpha}{\sqrt{\gamma_{\varphi\varphi}}}$
- 内側 $\Omega_F - \Omega = -\frac{\alpha}{\sqrt{\gamma_{\varphi\varphi}}}$

内側の光円柱は必ずエルゴ領域内にある

粒子はΩ〜Ω_Fの領域(f<0)から両側に流れる
⇒　Ω〜Ω_Fの領域に粒子注入が必要

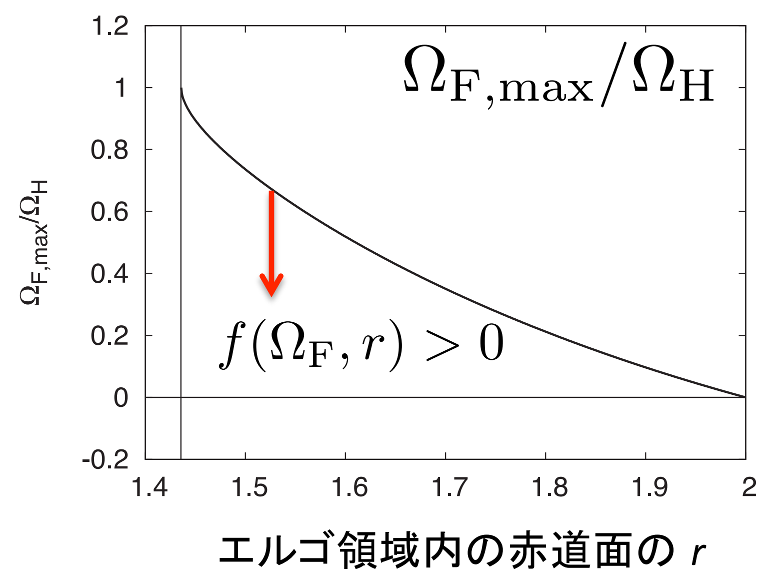
赤道面を貫く磁力線



- エルゴ領域と外側の光円柱を貫く磁力線: $\Omega_{\rm F} > 0, H_\varphi \neq 0$
- 電流を駆動するには、どこかで $D^2 > B^2$ が維持され force-free/MHD が破れている必要がある
- 赤道面近傍で

$$(B^2 - D^2)\alpha^2 = -B^\theta B_\theta f$$

- $f > 0$ が必要
- B ≈ DとしてΩ_Fの値が決まるだろう



(KT & Takahara 2014)

まとめ

- 偏光：X線・γ線観測のフロンティア
  - BH時空の検証、強磁場中のQEDの検証
  - ガンマ線バーストの放射機構
- BHジェットの駆動機構
  - Kerr時空による単極誘導
  - 起電力の起源はエルゴ領域
  - 電流は赤道面で駆動されうる
  - 地平面を貫く磁力線についてはforce-free/MHDが成立し、Poynting fluxは粒子を介さず地平面から直接放射される