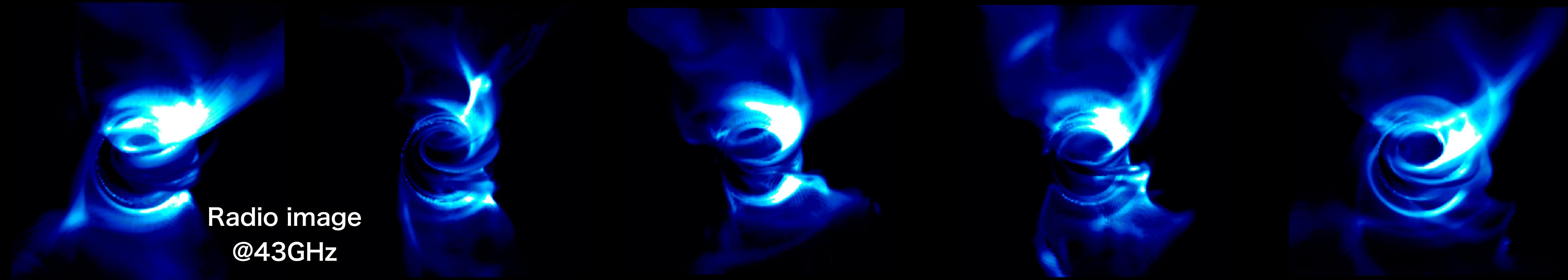


レンズ-シリング 嵩差運動を伴う ブラックホール降着流と相対論的ジェットの 多波長放射特性

Time evolution with period (~10,000rg/c)



GRMHD simulation (UWABAMI code) + GRRT calculation (RAIKOU code)

川島 朋尚 (東大宇宙線研)

大須賀 健 (筑波大), 高橋 博之 (駒澤大)

相対論的ジェット加速機構の謎

- 様々な説があるが、未解明

- ✓ ブラックホール(BH)スピン駆動, i.e., Blandford-Znajek (BZ)過程 (Blandford & Znajek 1977等)
 - ✓ 降着流回転駆動, i.e., 磁気遠心力加速 (Blandford & Payne 1982等)
 - ✓ 輻射駆動, i.e., ファイアボールモデル(Paczynski 1986等)

- 現時点での最有力モデル：BZ過程

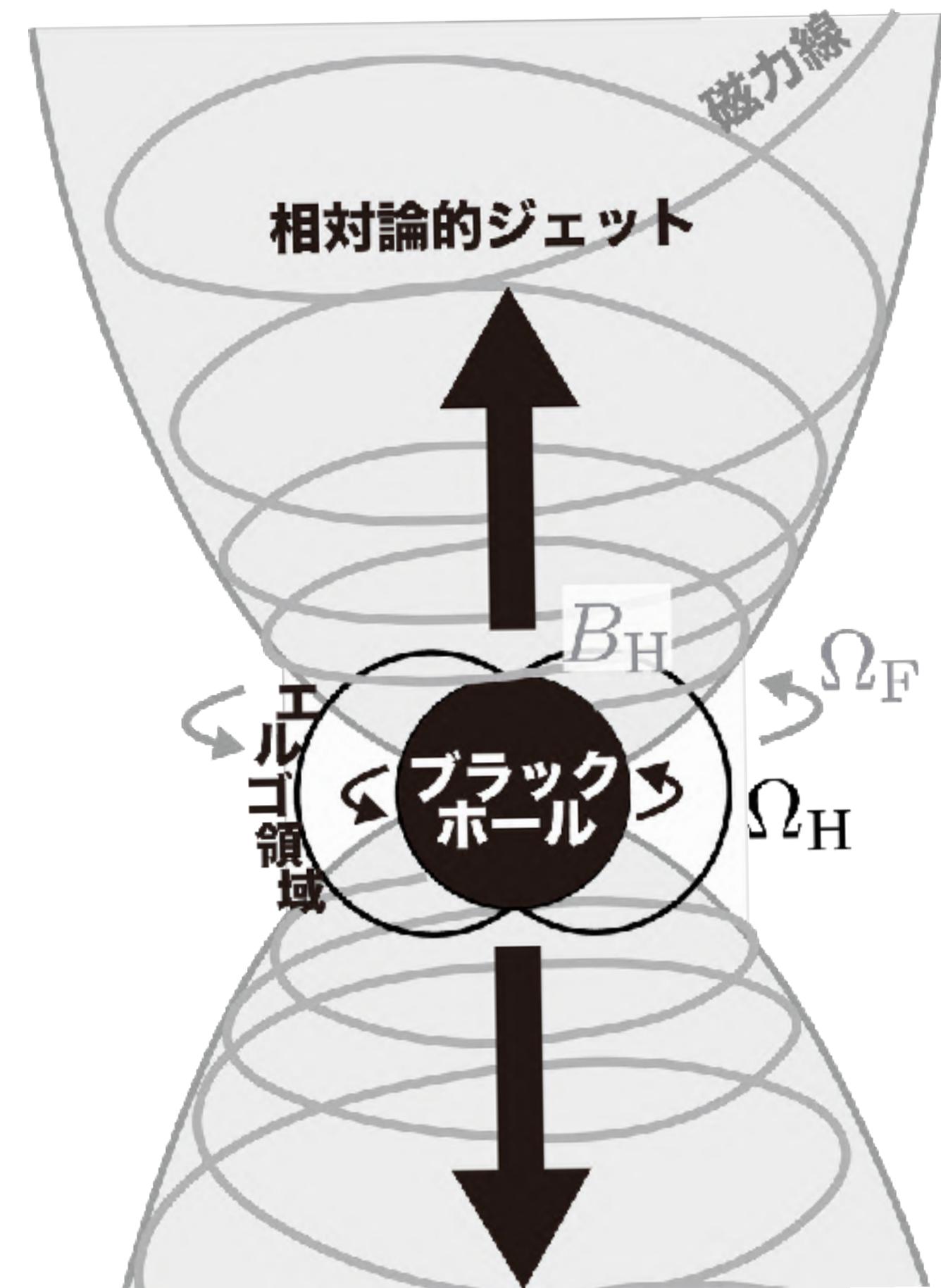
- 磁場を介したBHスピンエネルギーの引き抜き

$$L_{\text{BZ}} \propto \Omega_F (\Omega_H - \Omega_F) B_H^2$$

BZパワー BH自転 磁気圏回転
角速度 角速度 BHへささる磁場

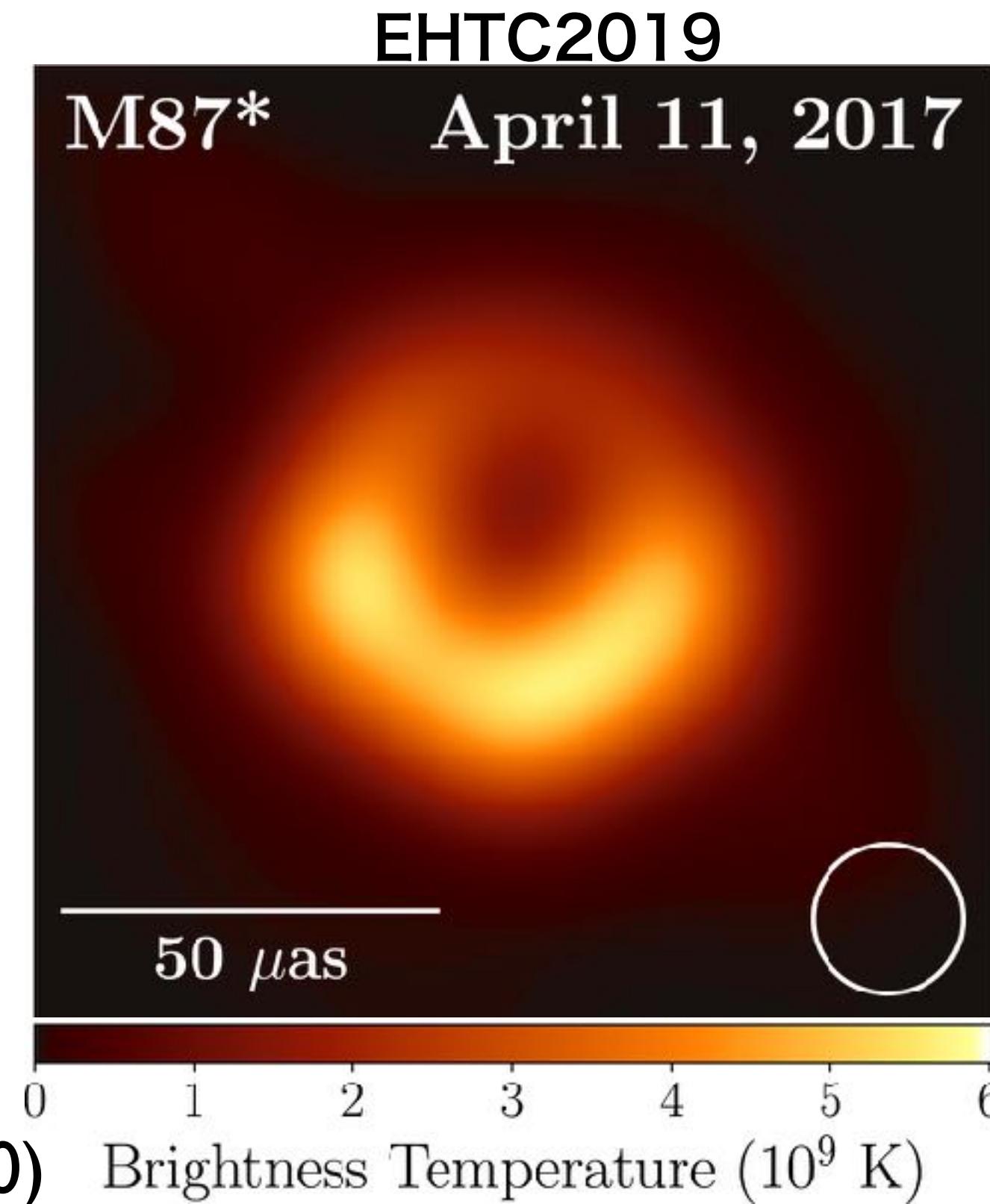
$\propto a^2$ (a : BHスピン)

- 検証にはBH スピンの制限が必要！



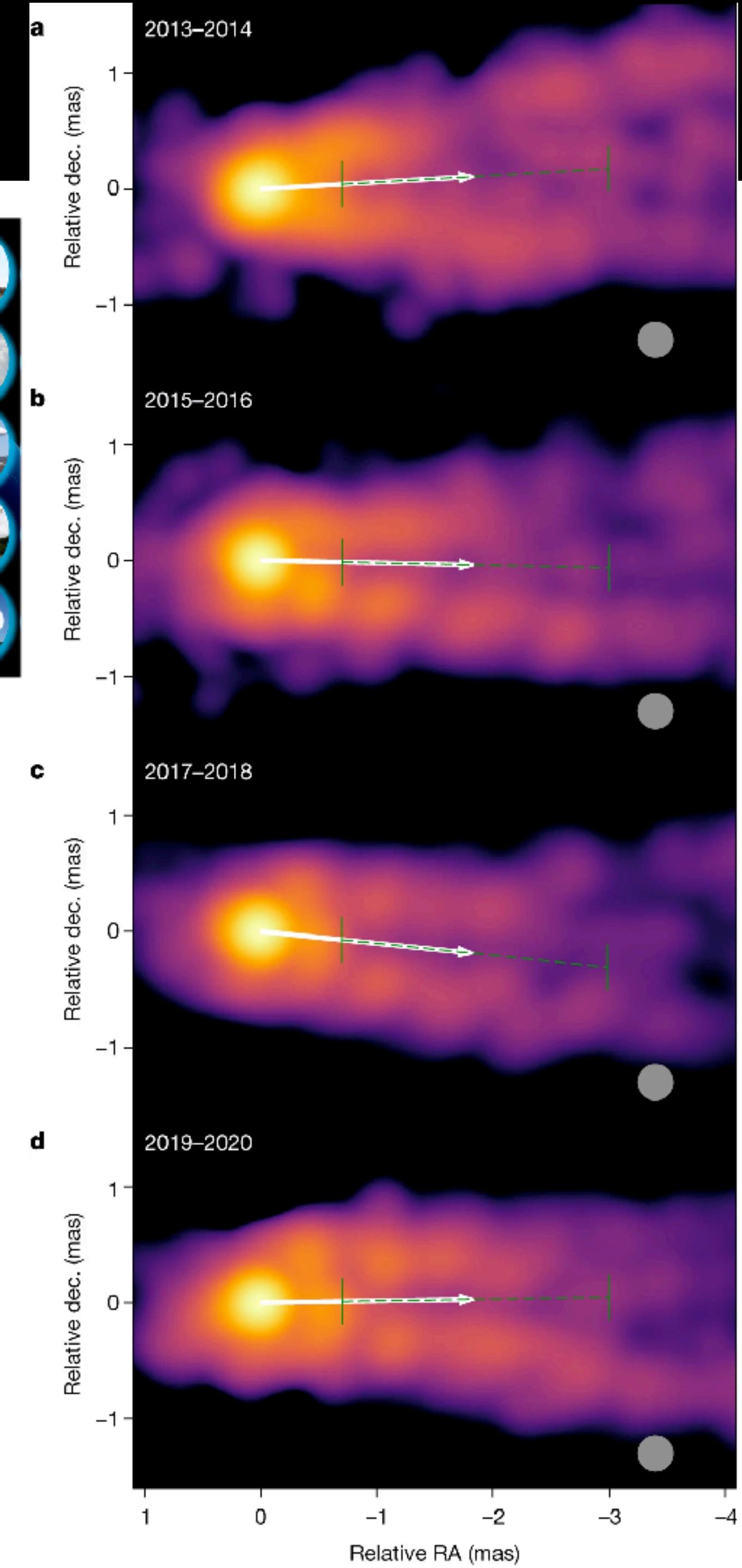
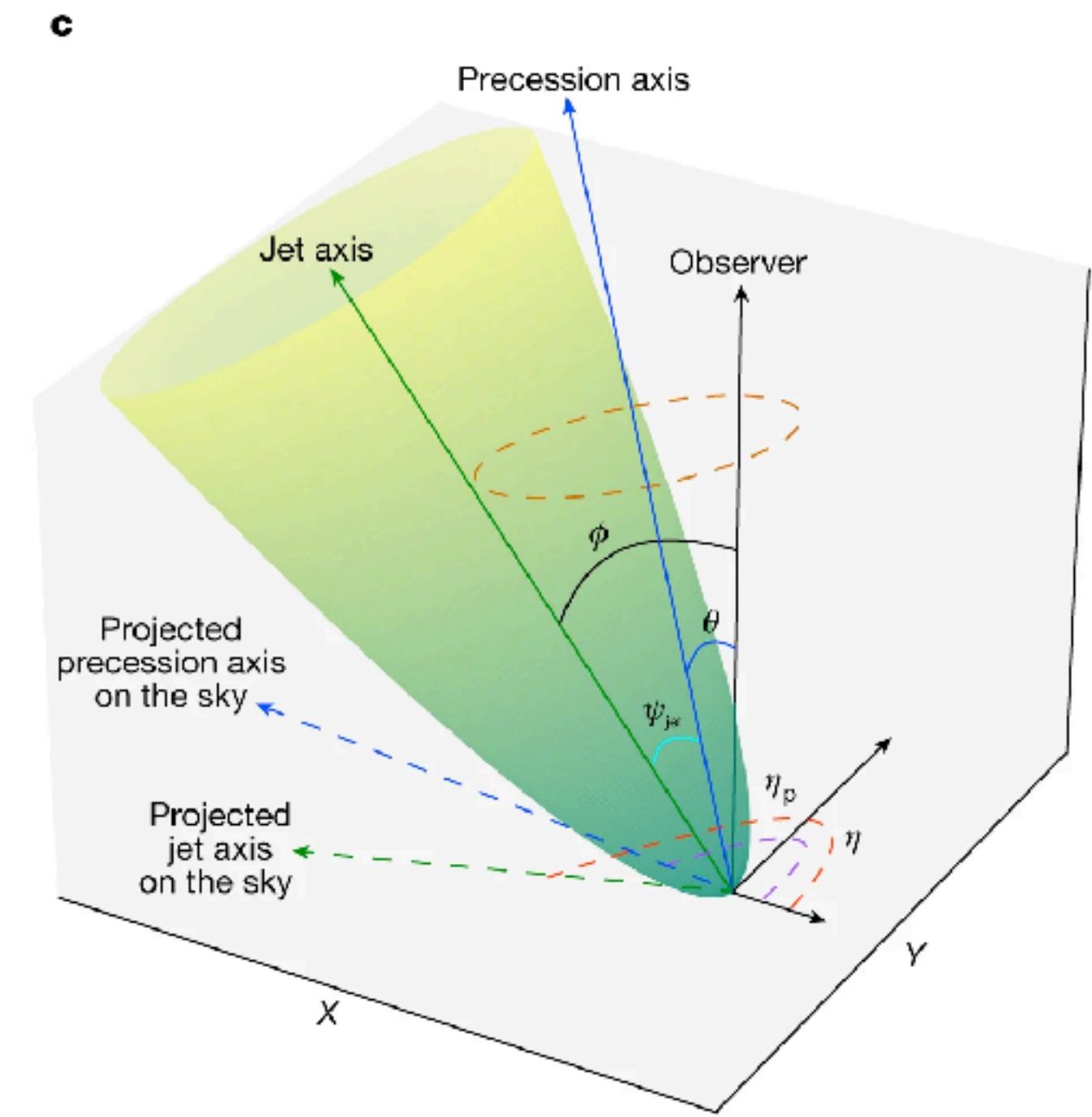
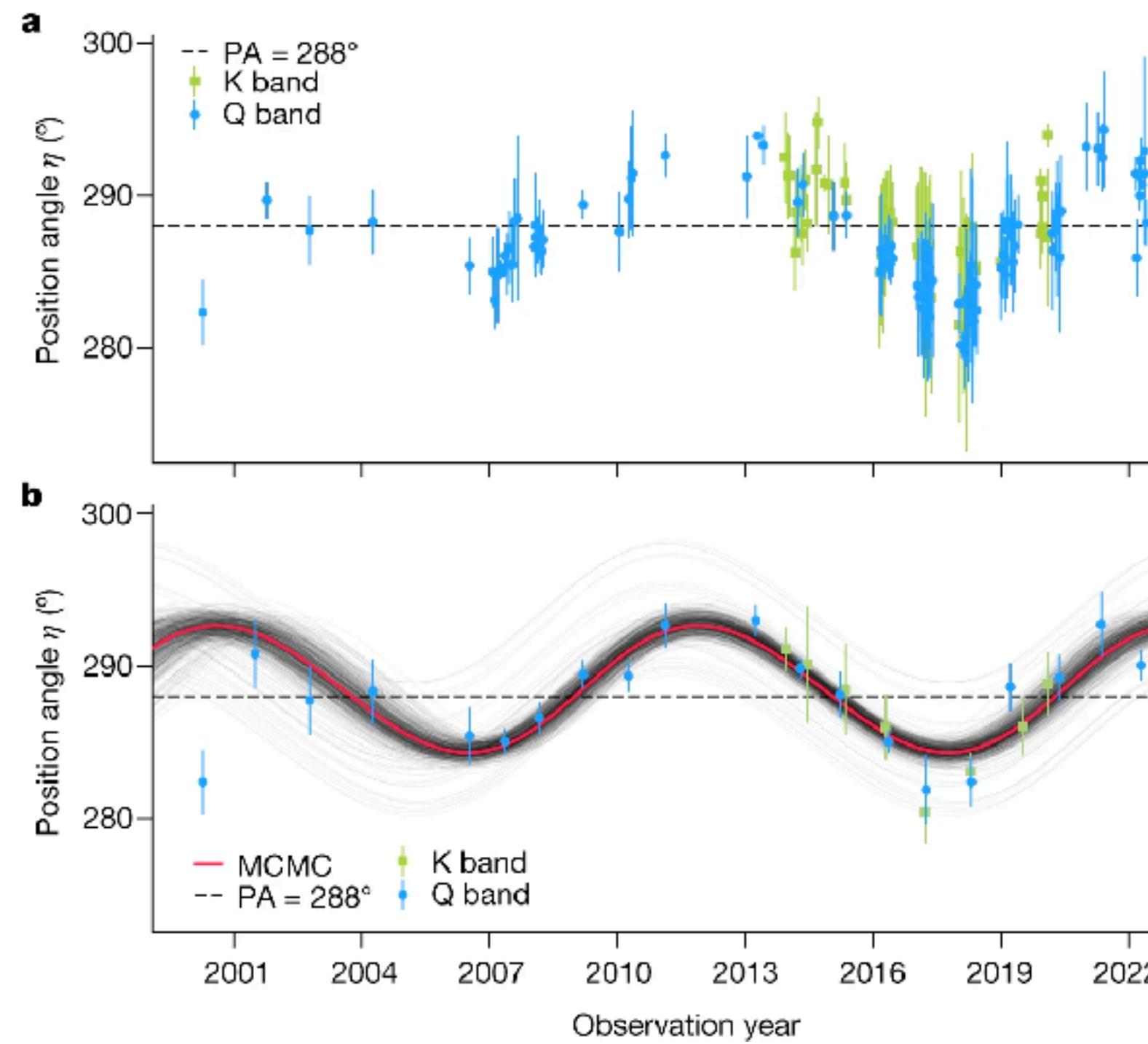
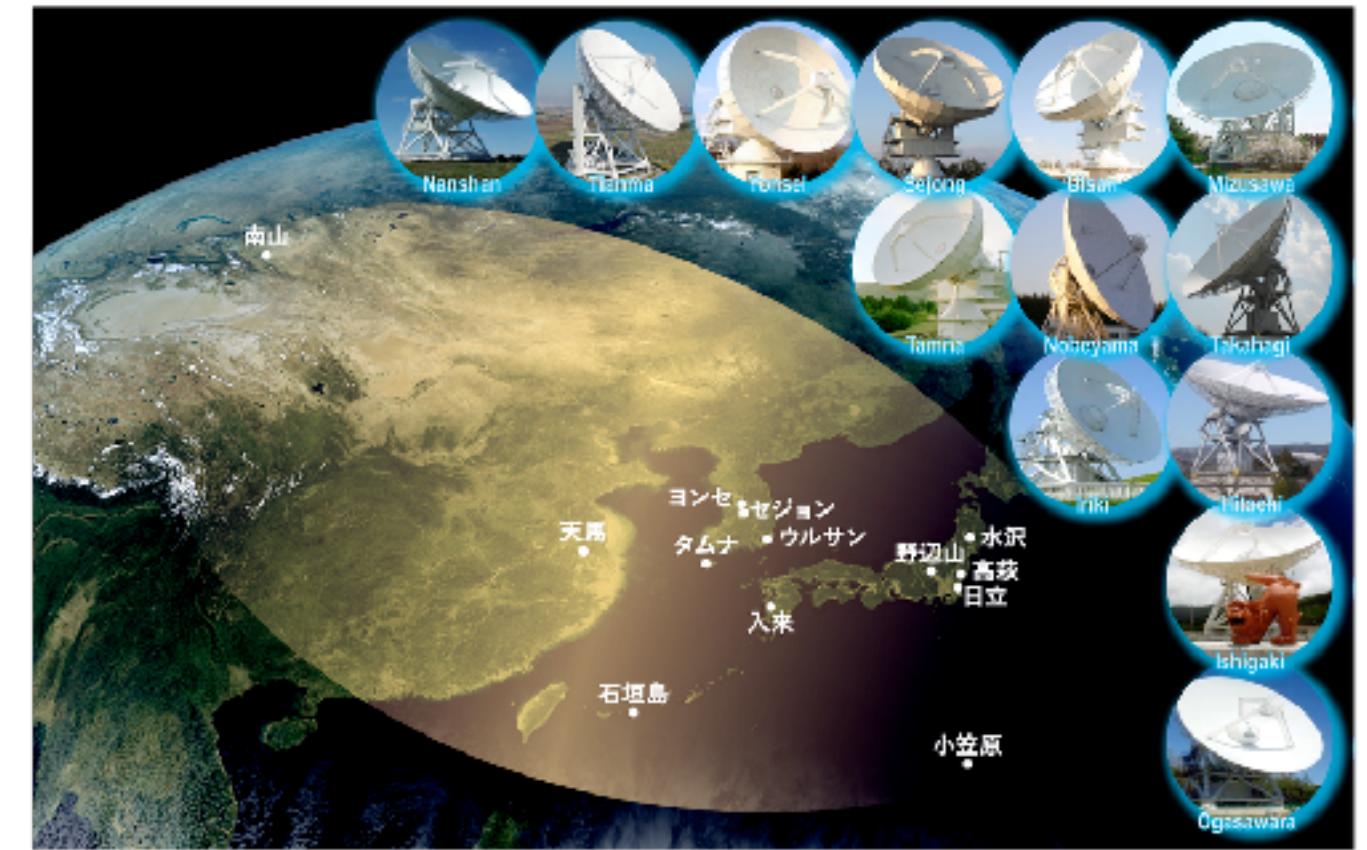
ではBHのスピン値は探れるのか？

- 近年の観測技術の進展(VLBI等) → BH天文学は急速に進展
例) Event Horizon Telescope の BHシャドウ観測 (EHTC2019, 2022等)
 - ✓ M87の光子リング直径(~40μas) → BH質量 ~65億倍太陽質量
- BHスピンは?
 - ✓ 光子リング直径はスピンに~±5%のみ依存 (e.g., Psaltis+2015)
 - ✓ blobの変動で検証 (e.g., Moriyama & Minieshige 2015, 2016)
 - ✓ スペースVLBIやngEHTで光子リング位置のズレから検証
(e.g., Kawashima + 2019、時間変動計算 Takahashi+ in prep., visibility Johnson+2020)
- 他にBHスピンの痕跡はあり得るか?
 - ✓ 偏光X線? (PoGO+, IXPE, XL-Calibur)
 - ✓ 鉄輝線? (XRISM)
 - ✓ レンズ-シリング歳差?



最近のM87ジェット観測 (Cui, Hada, TK+2023)

- 東アジアVLBI網による~20年観測
- 約11年周期のジェットの”振動”運動

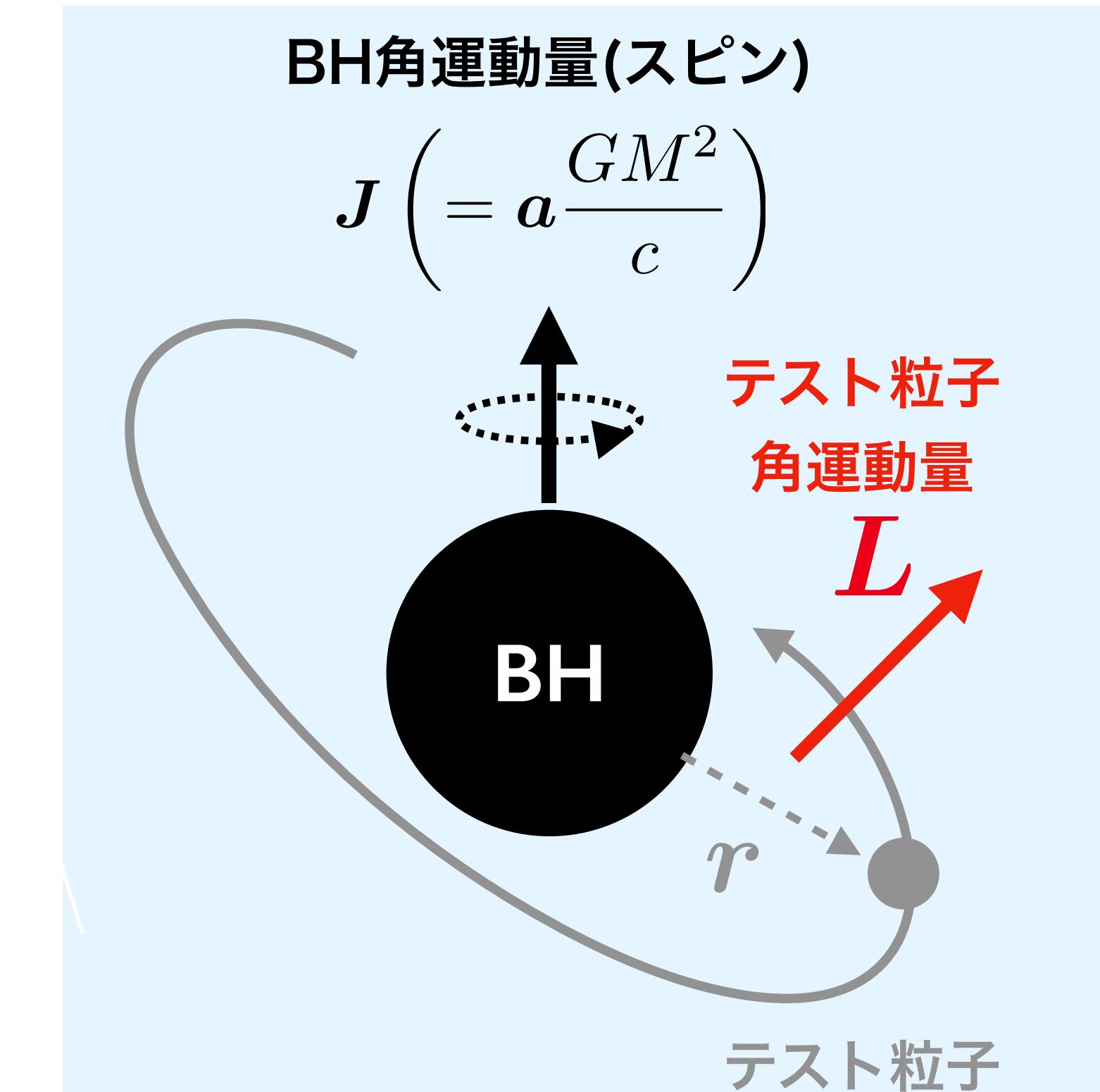
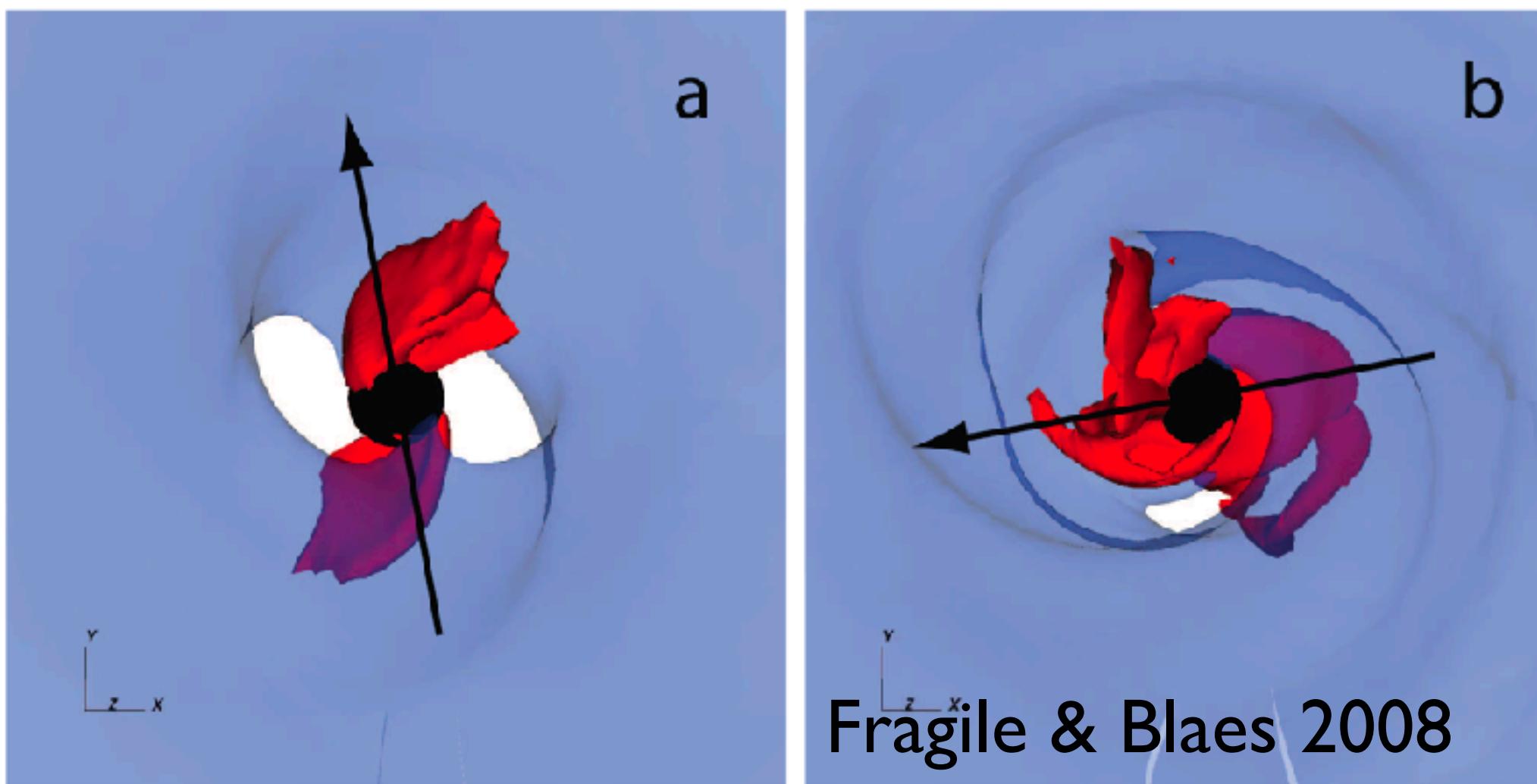


レンズ-シリング歳差 (Einstein-Thirring-Lense歳差?)

- BHスピン(時空の引き摺り)によるジャイロ効果による歳差 (Lense & Thirring 1918)

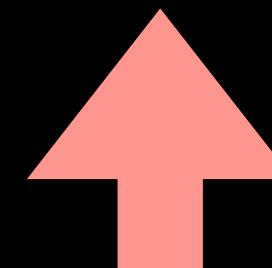
$$\Omega_{LT} = \frac{1}{r^3} \left[-\mathbf{J} + \frac{3(\mathbf{J} \cdot \mathbf{r})}{r^2} \mathbf{r} \right]$$

- テスト粒子の角運動量ベクトルが時間変化(歳差)
- もともとはテスト粒子近似、軌道半径に強く依存。
- 降着流では磁場(粘性)
→ 全体の構造は剛体的 (Fragile+2007, Liska+2018等)。



研究の目的

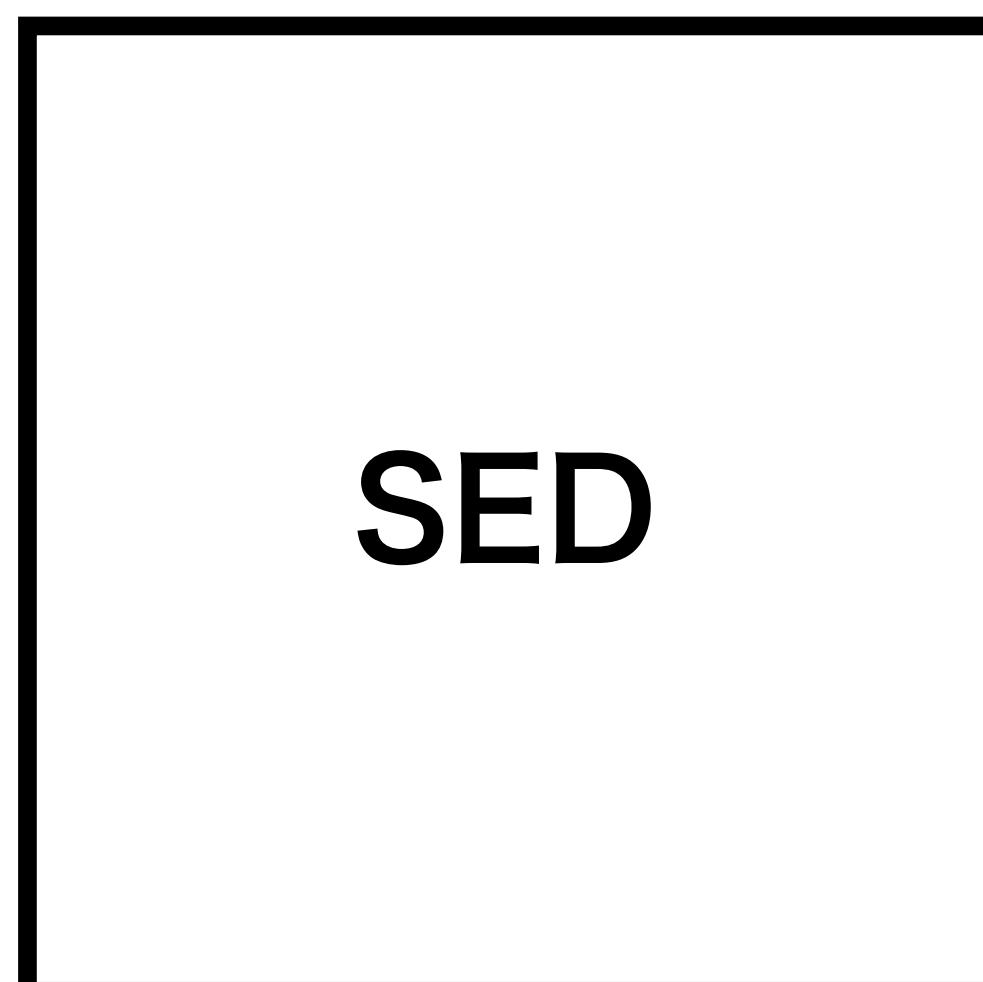
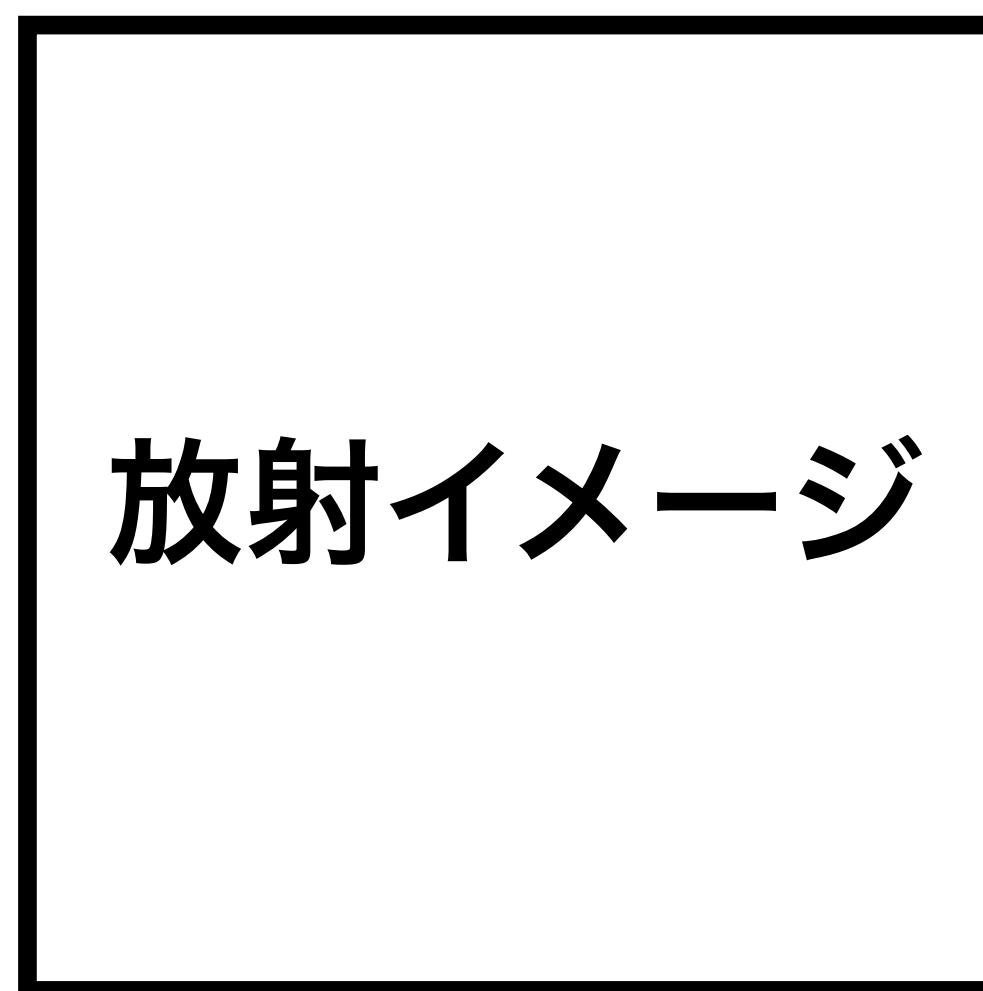
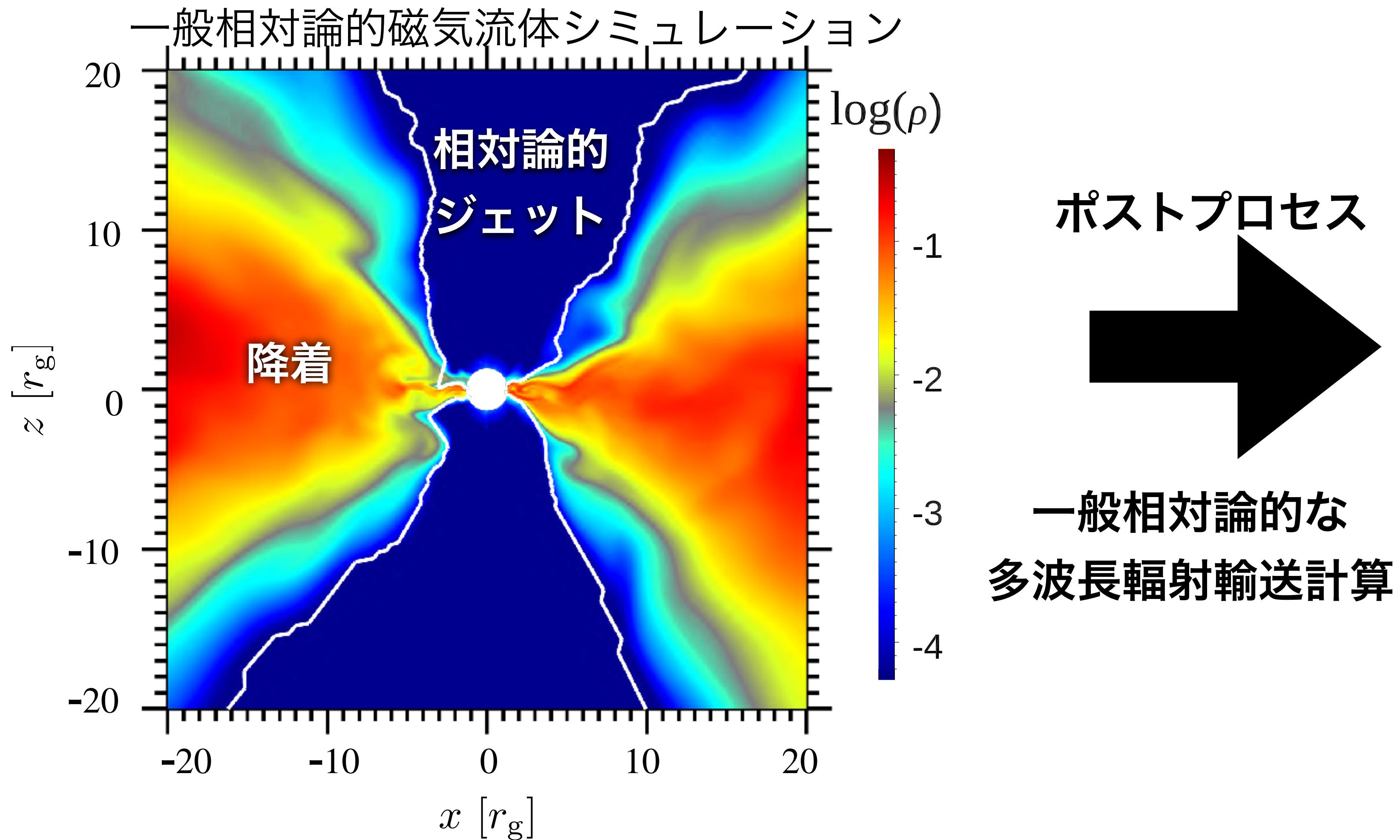
- レンズ-シリング歳差を伴う降着流・ジェットの観測的特徴はいくつかの先行研究(Dexter & Fragile 2013 and Catterjee+2020等)を除いて調べられていない。
- 特に以下の研究は実施されていない
 - 歳差周期を越える長い時間変動解析
 - 多波長の特徴 (電波からガンマ線)



本研究で初めてアプローチ！

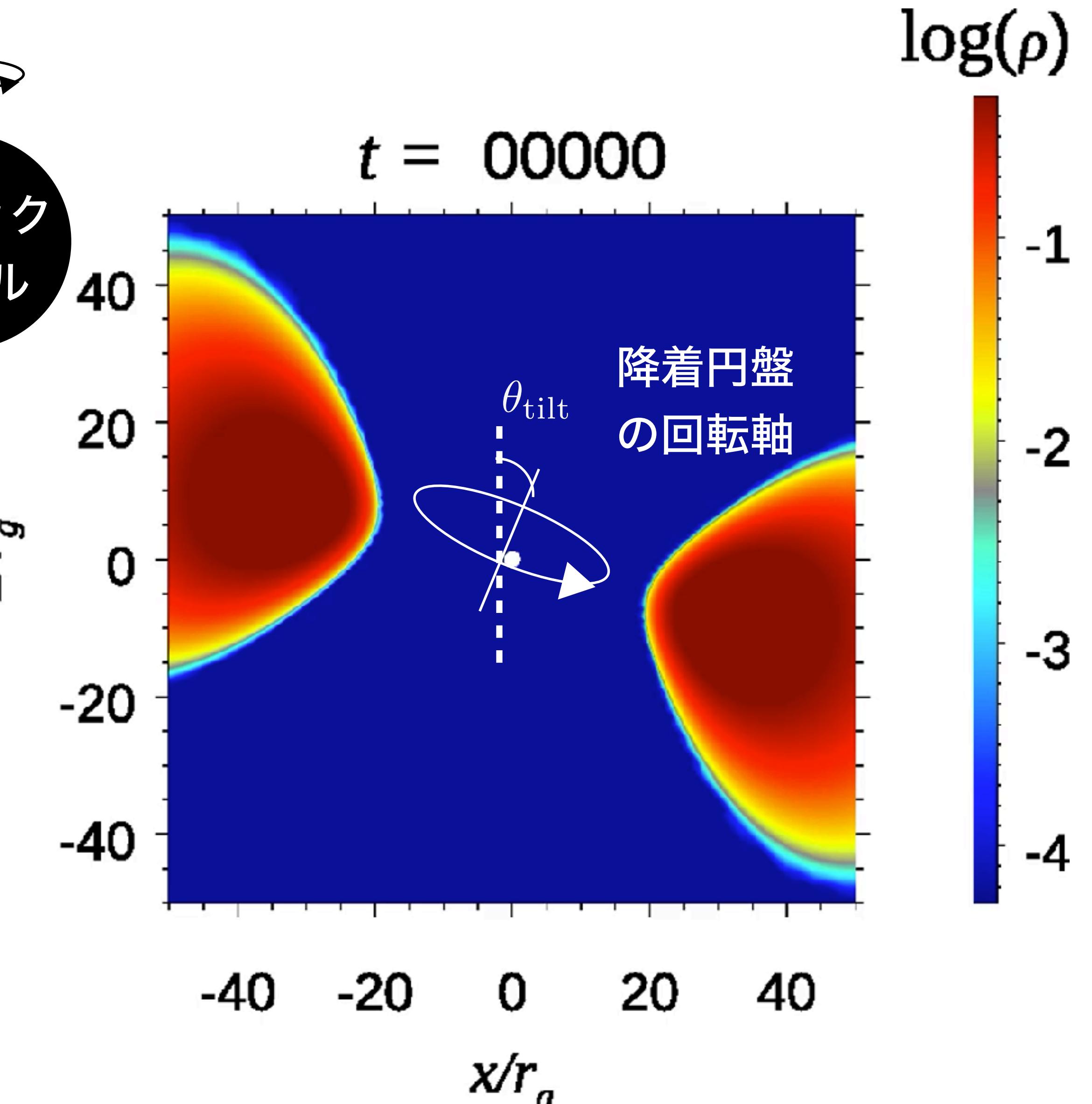
研究手法

- 3次元一般相対論的磁気流体シミュレーション(UWABAMIコード Takahashi+2016) +
多波長的一般相対論的輻射輸送計算 (RAIKOUコード Kawashima + 2023)

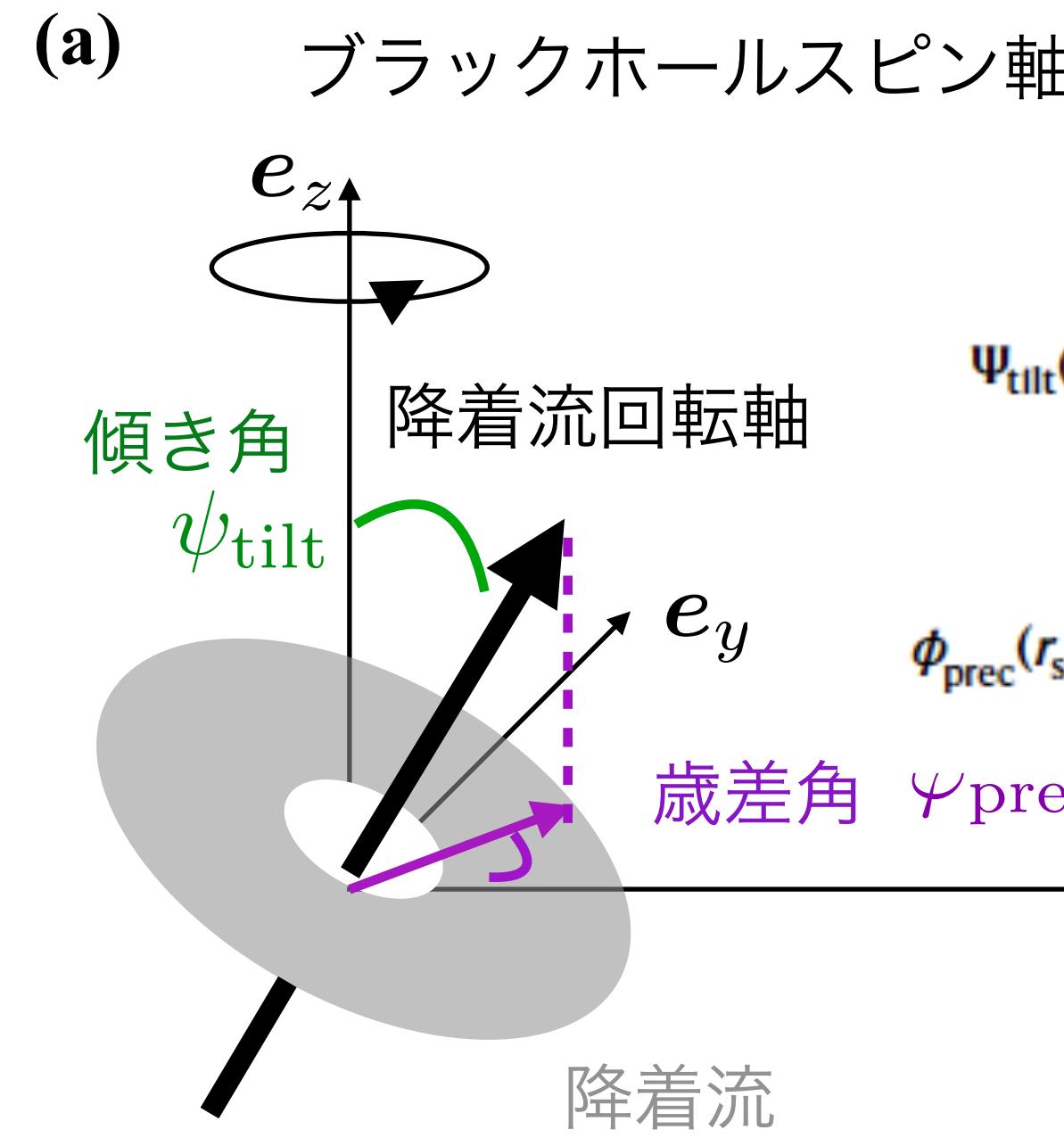


モデルセットアップ(I)：一般相対論的磁気流体シミュレーション

- UWABAMI code (Takahashi+2016)
- BHスピン $a = 0.9375$ (高速スピン)
- 傾斜角 $\theta_{\text{tilt}} = 15^\circ$
- Kerr-Schild 球座標
- シミュレーション領域
 $1.18r_g \leq r \leq 1000r_g \quad 0 \leq \theta \leq \pi \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi$
- メッシュ数 $(N_r, N_\theta, N_\varphi) = (200, 144, 96)$
- 初期平衡トーラス (Fishbone & Moncrief 1976)
- トーラス内に初期ポロイダル磁場



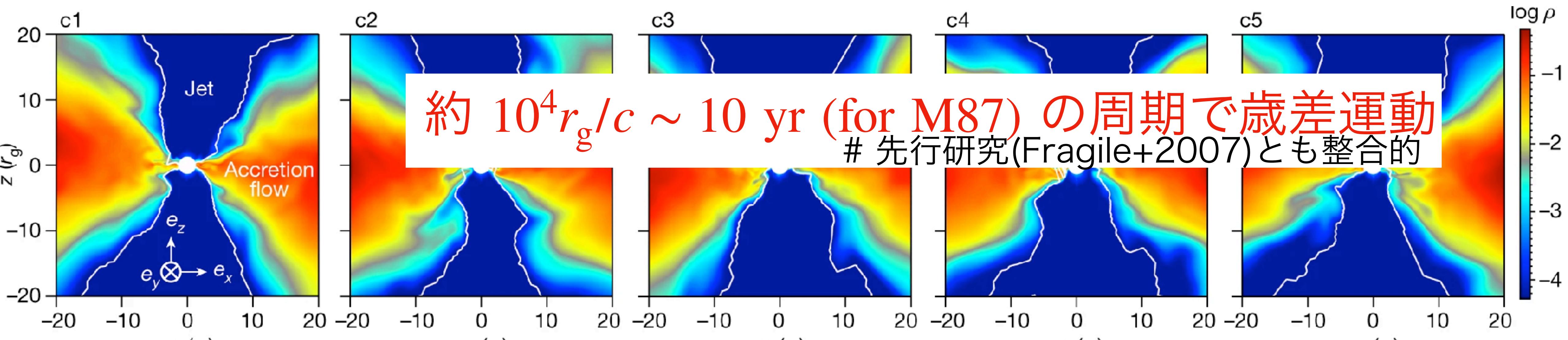
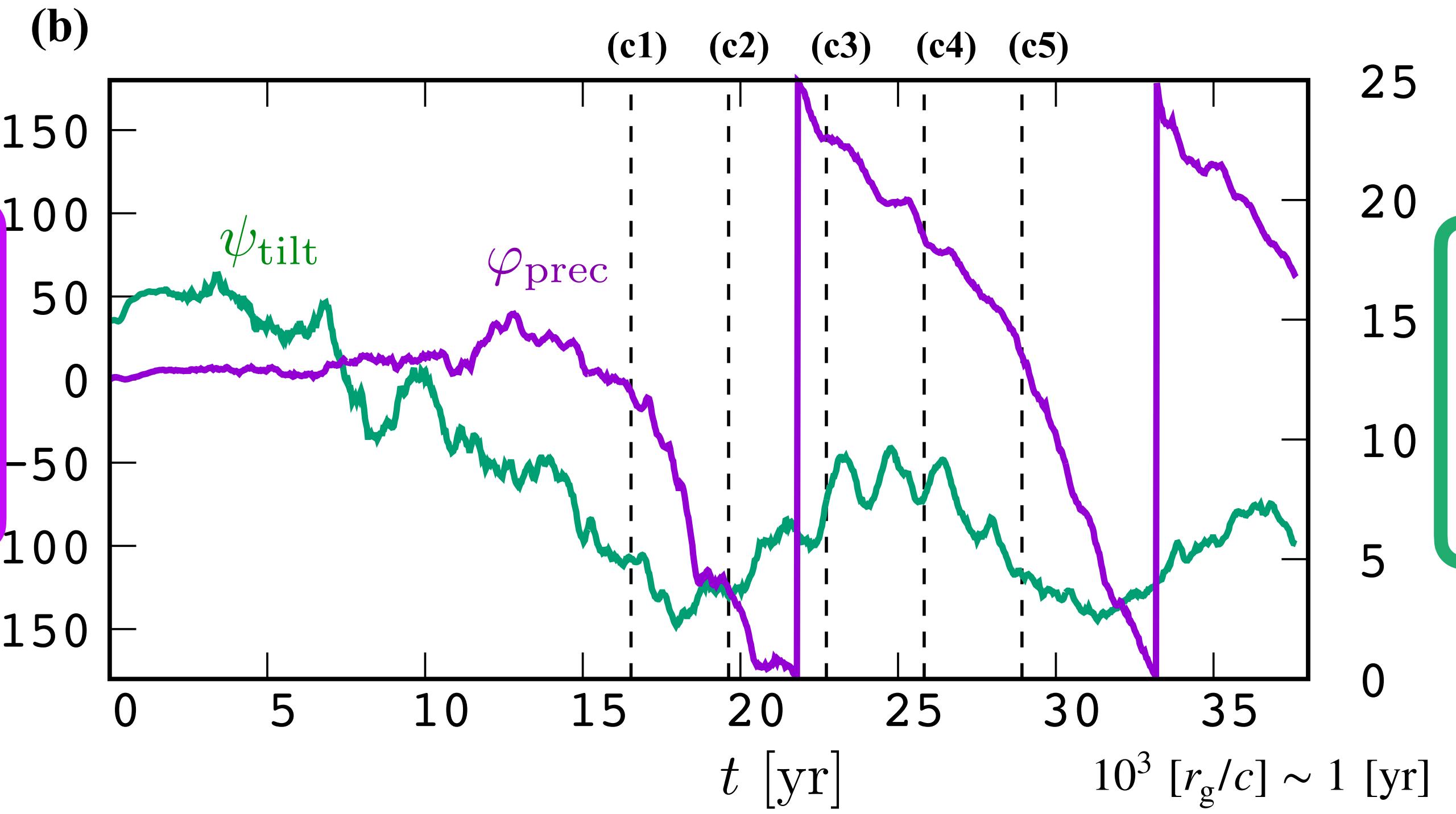
歳差運動の様子



$$\Psi_{\text{tilt}}(r_{\text{sim}}) = \arccos \left(\frac{\mathbf{J}_{\text{BH}} \cdot \mathbf{J}_{\text{MHD}}(r_{\text{sim}})}{|\mathbf{J}_{\text{BH}}| |\mathbf{J}_{\text{MHD}}(r_{\text{sim}})|} \right),$$

$$\phi_{\text{prec}}(r_{\text{sim}}) = \arccos \left(\frac{\mathbf{J}_{\text{BH}} \times \mathbf{J}_{\text{MHD}}(r_{\text{sim}})}{|\mathbf{J}_{\text{BH}} \times \mathbf{J}_{\text{MHD}}(r_{\text{sim}})|} \cdot \mathbf{e}_y \right),$$

φ_{prec} [deg]



RAIKOU (来光) :

一般相対論的多波長輻射輸送コード

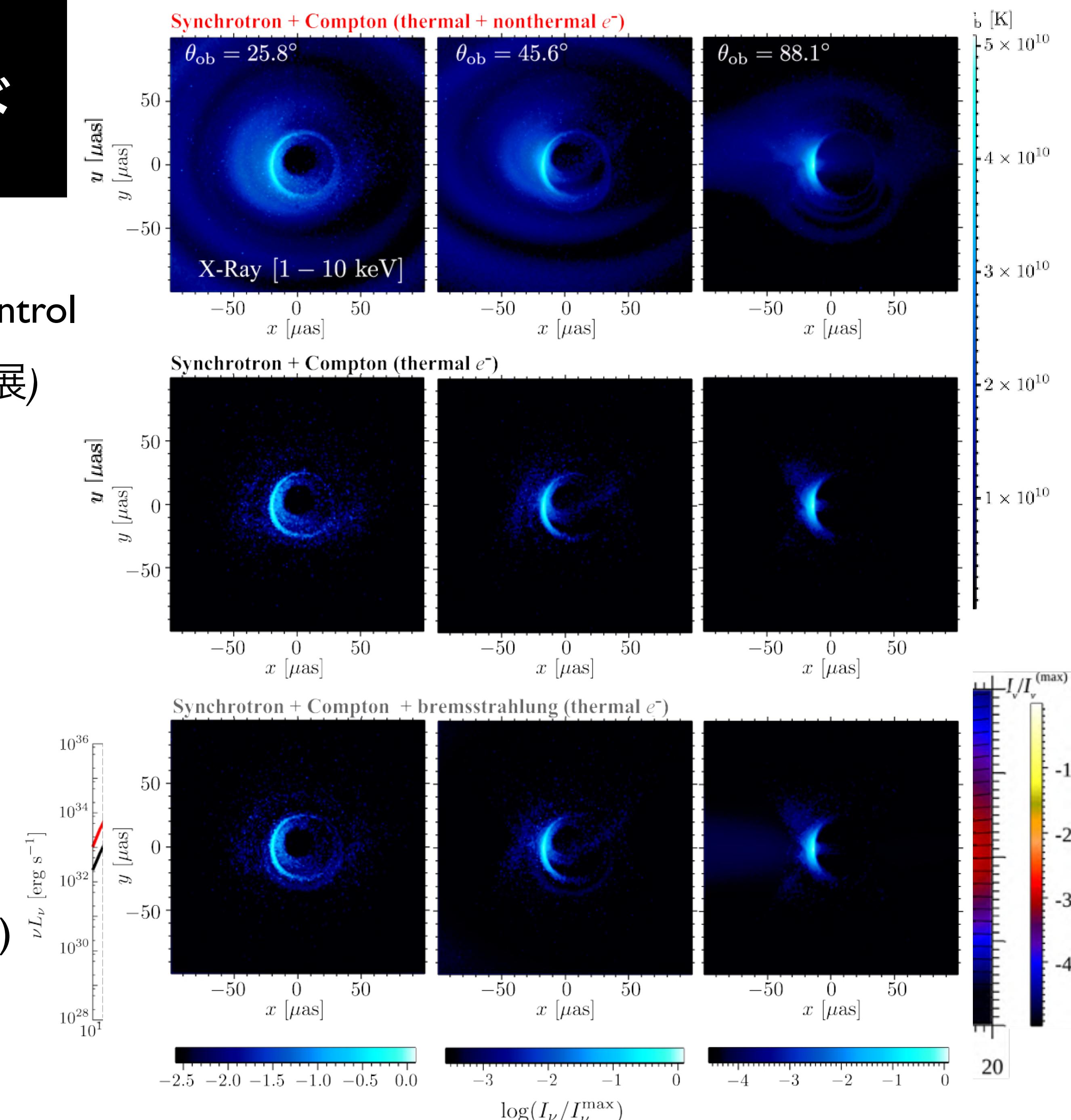
Kawashima + ApJ 2023

- Ray-tracing 法:

- ✓ 8次 embedded Runge-Kutta法 w/ adoptive stepsize control
- ✓ Fast-light近似(スナップショット固定のまま時間発展)と「厳密時間発展」の両方を実装

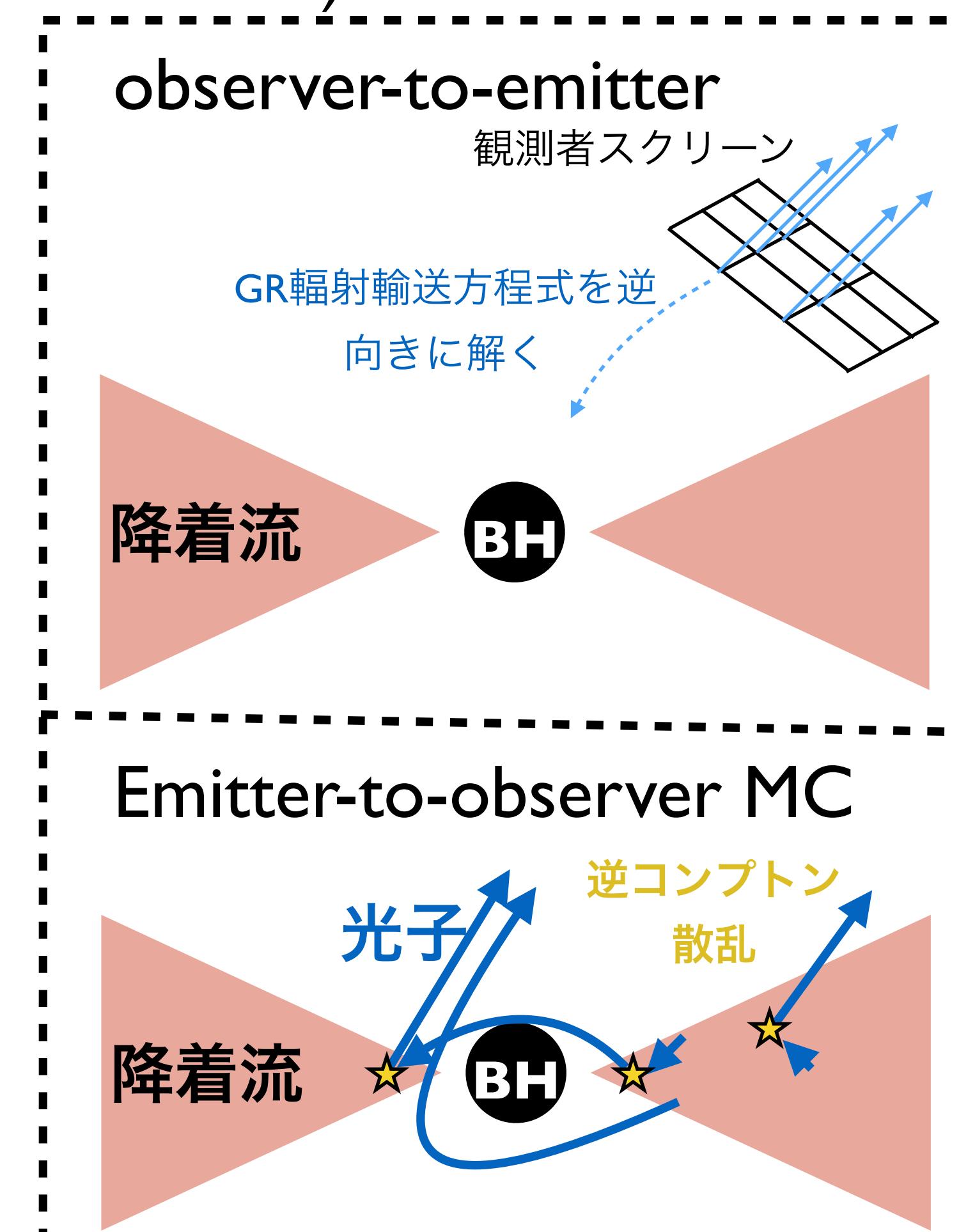
- 輻射過程:

- ✓ 放射・吸収
 - サイクロ-シンクロトロン放射・吸収 (熱的電子)
 - シンクロトロン放射・吸収 (熱的+非熱的電子)
 - 制動放射 (熱的電子)
- ✓ 散乱 (Monte Carlo法)
 - コンプトン・逆コンプトン散乱 (熱的+非熱的電子)
- ✓ 偏光 → p-RAIKOU w/ 竹林君(筑波大)
- ✓ 宇宙線・ニュートリノ → v-RAIKOU w/ 浅野さん

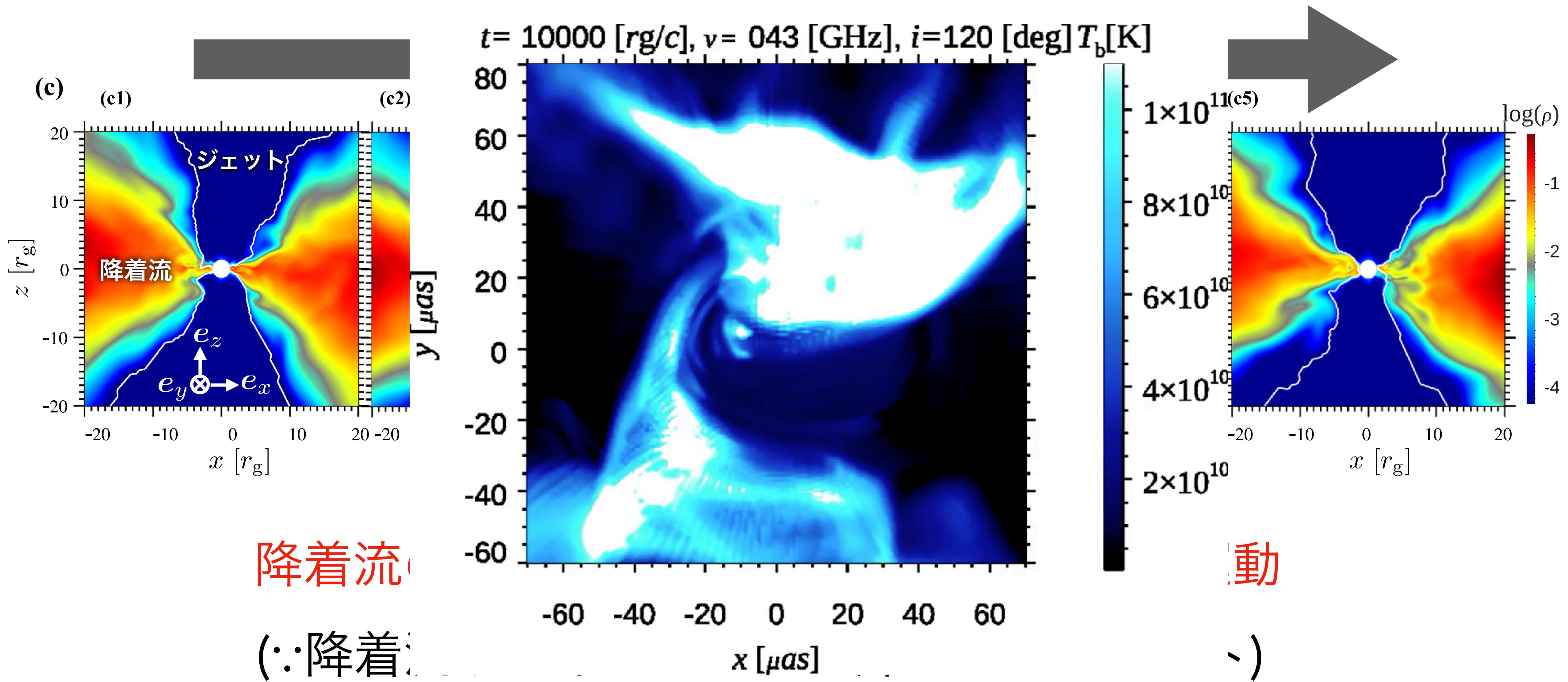


モデルセットアップ(2)：一般相対論的多波長輻射輸送計算

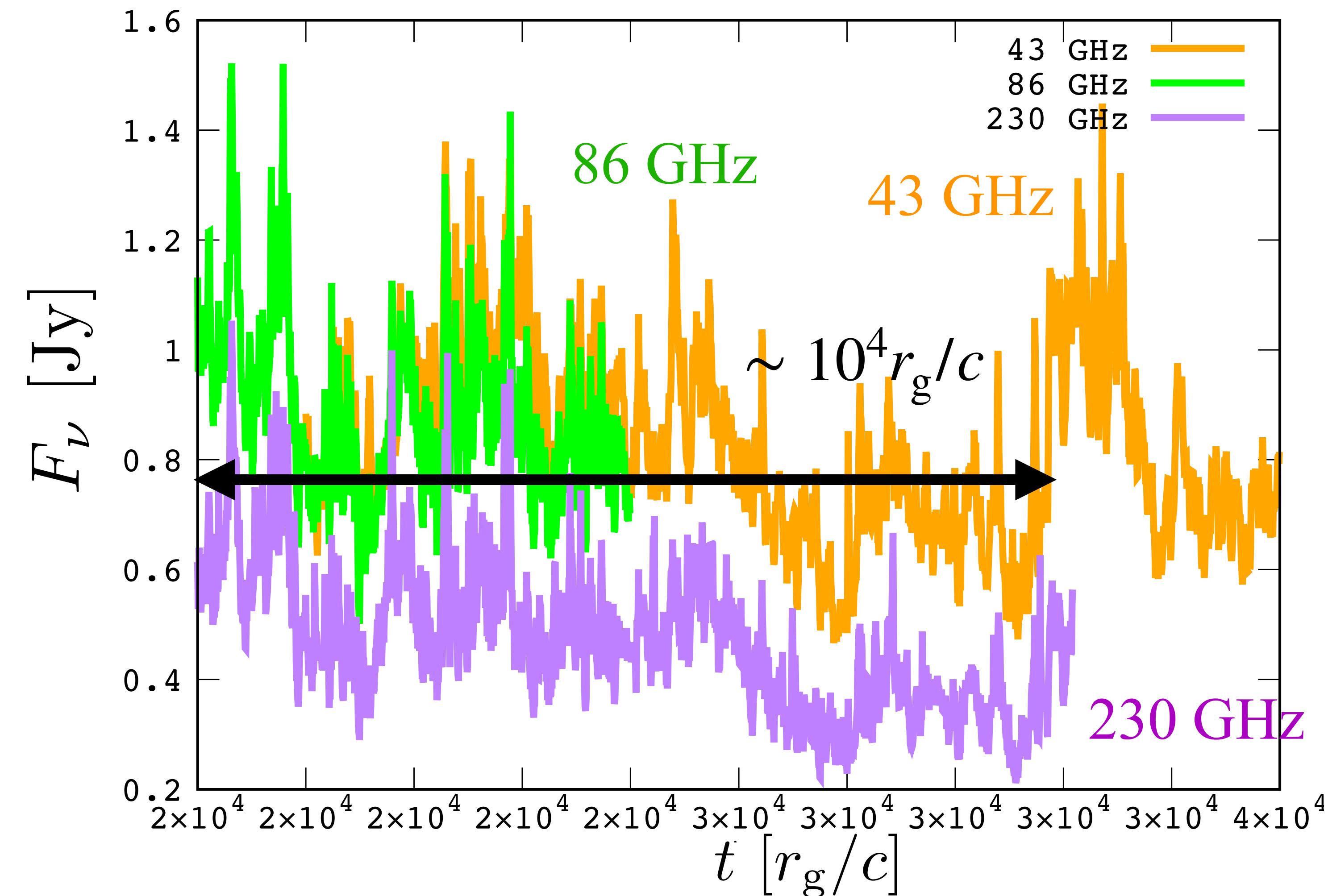
- ・ブラックホール質量 $M_{\text{BH}} = 6.5 \times 10^9 M_{\odot}$ (M87)
- ・質量降着率 $\sim 1.5 \times 10^{-5} L_{\text{Edd}} / c^2$
- ・電子温度 $R - \beta$ prescription (プラズマ β 関数仮定, Moschibrodzka+2016, EHTC2019等)
$$\frac{T_p}{T_e} = \frac{\beta^2}{1 + \beta^2} R_{\text{high}} + \frac{1}{1 + \beta^2} R_{\text{low}} \quad (R_{\text{high}} = 20, R_{\text{low}} = 1)$$
- ・輻射過程：
シンクロトロン放射・吸収 + コンプトン・逆コンプトン散乱
- ・非熱的電子 OFF
- ・Boyer-Lindquist座標
- ・アルゴリズム：
 - ✓ イメージ計算：observer-to-emitter
 - ✓ 多波長SED計算：emitter-to-observer Monte Carlo (MC)



デモンストレーション



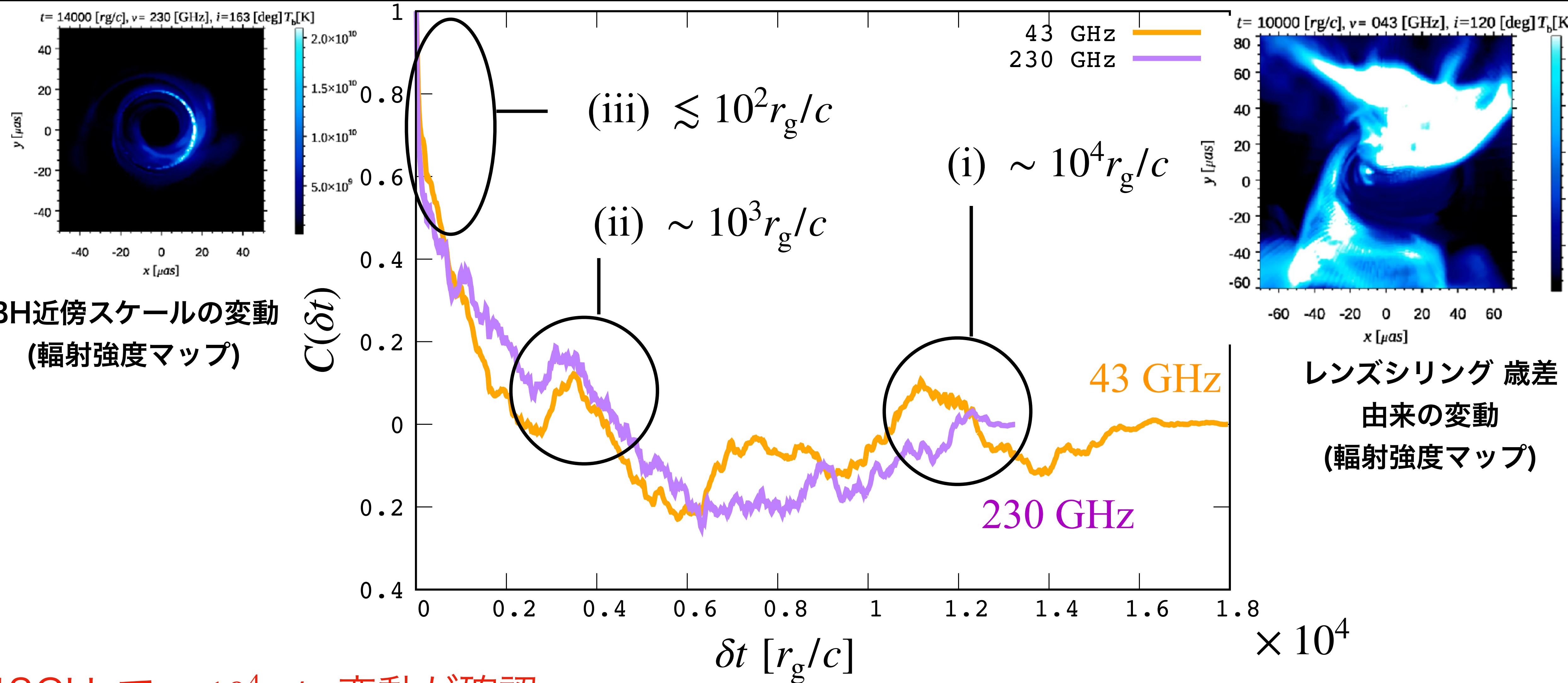
結果：低周波-高周波電波の光度曲線



(I) レンズシリング歳差に伴う $\sim 10^4 r_g/c$ の長期時間変動 + (ii) $\sim 10^3 r_g/c$ 中期時間変動 + (iii) $\lesssim 10^2 r_g/c$ の短期時間変動。

結果：自己相関関数

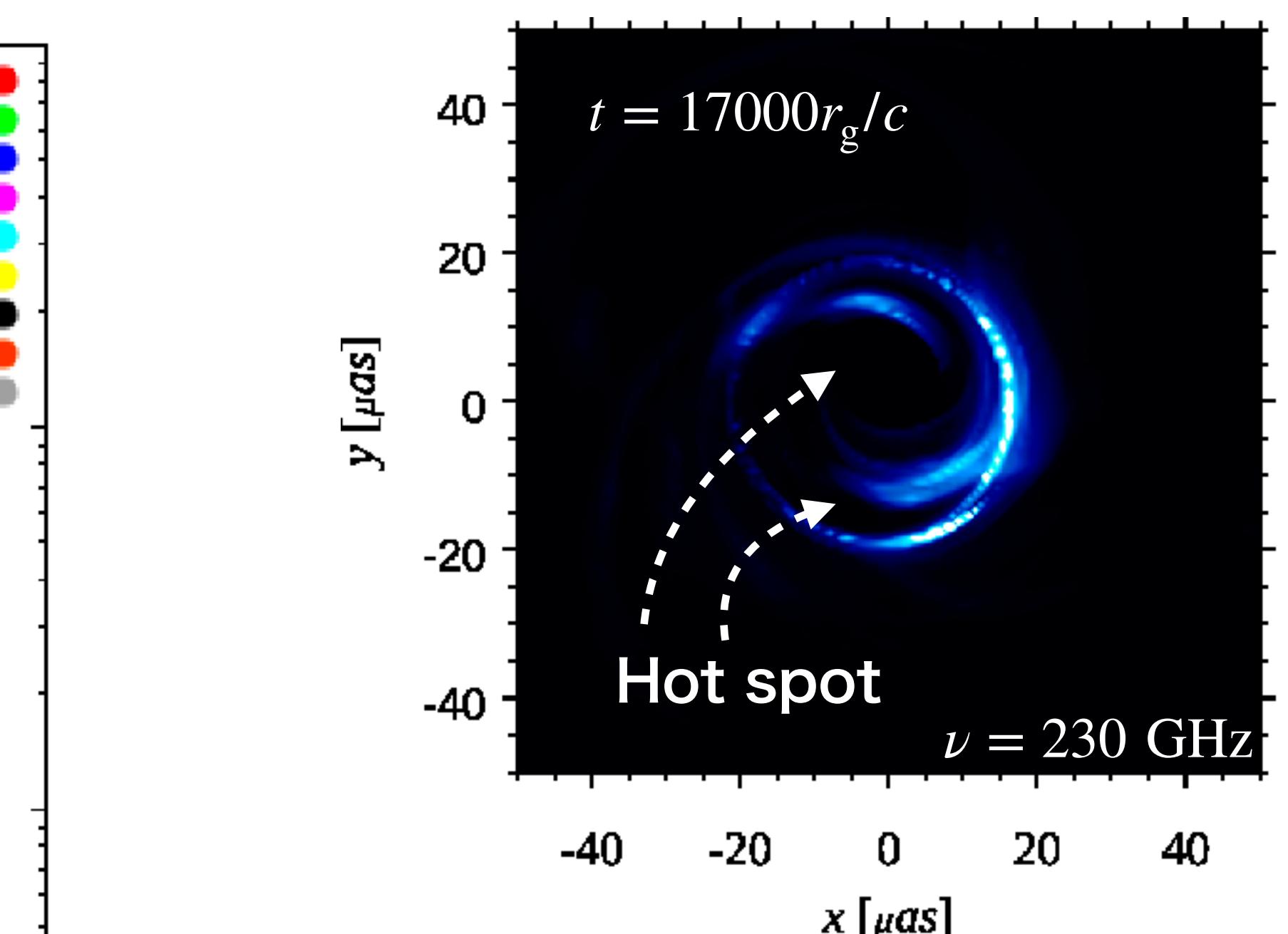
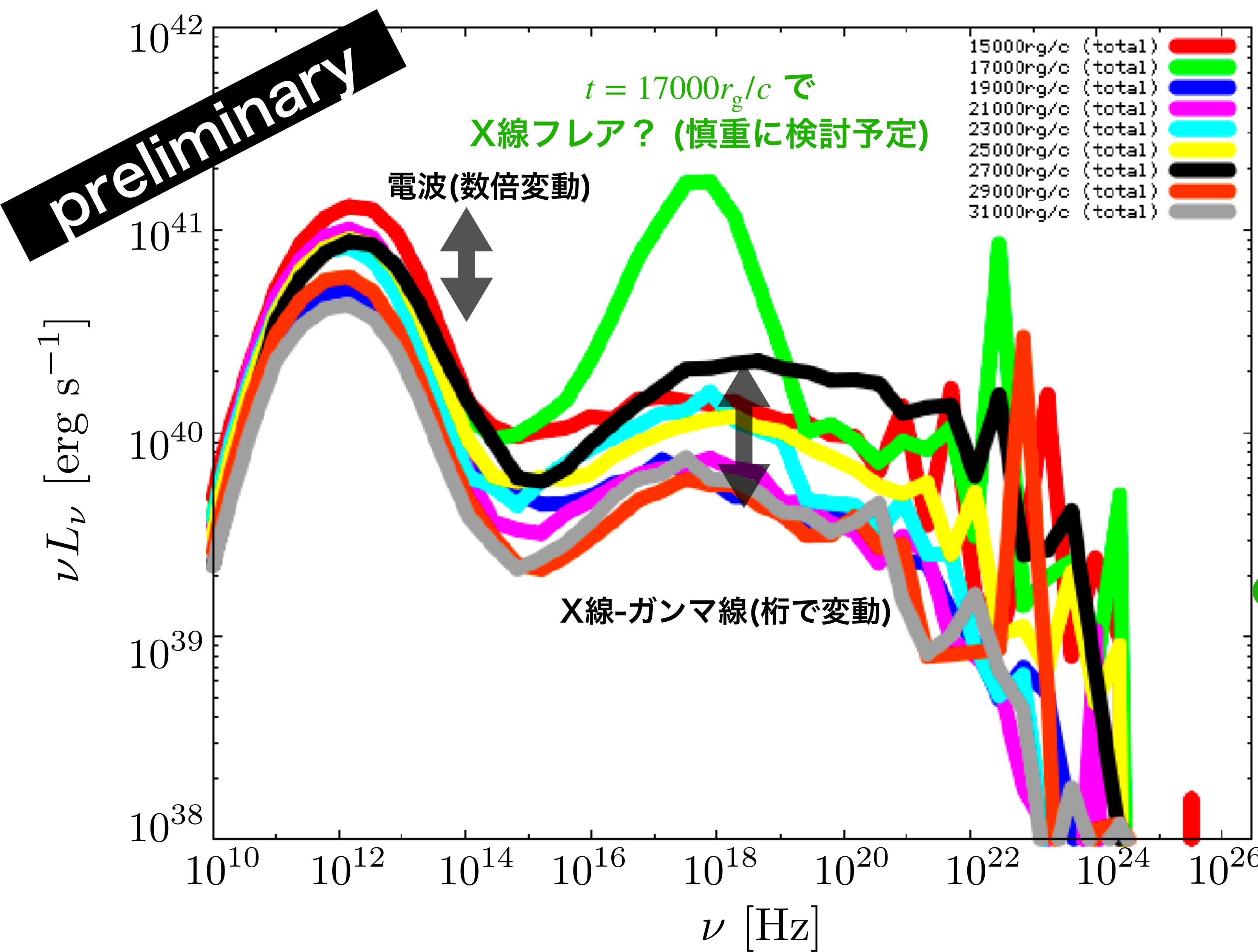
$$C(\delta t) = \frac{\sum_{k=1}^{N-L} (F_{\nu,(k+L)} - \bar{F}_{\nu})(F_{\nu,(k)} - \bar{F}_{\nu})}{\sum_{k=1}^N (F_{\nu,(k)} - \bar{F}_{\nu})^2}$$



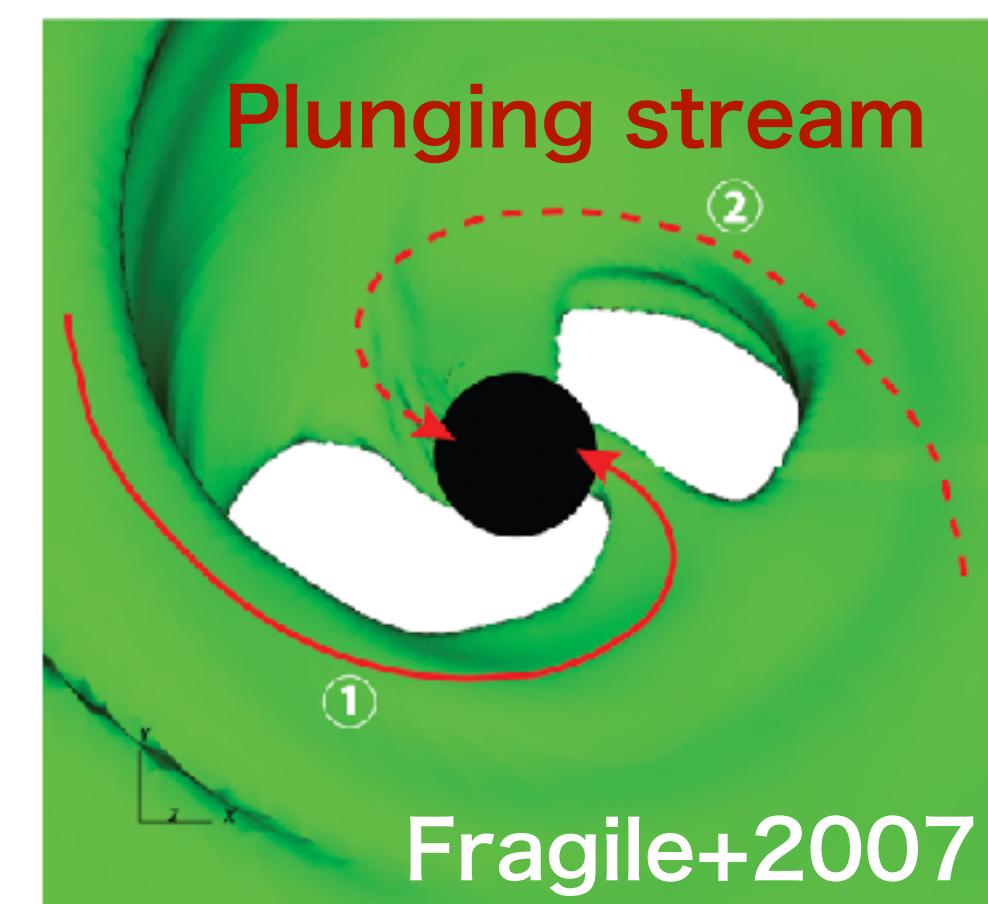
43GHzで $\sim 10^4 r_g/c$ 変動が確認

230GHzも(やや弱い)同じ時間変動→ngEHTやBHEXデータ10年蓄積で検証できる？

結果 (2-2) 多波長SEDの時間進化



X線フレアが **plunging stream** 起源 (LT歳差の特徴)だと面白い。慎重に解析予定。



まとめ

- BHスピンの測定はジェット形成機構の解明に必要不可欠。レンズ-シリング歳差 (BHスピン起源)に着目。
- $10^4 r_g/c$ 程度の時間スケールでレンズ-シリング歳差が現れた。
- (I) レンズ-シリング歳差に伴う $\sim 10^4 r_g/c$ の長期時間変動 (ii) $\sim 10^3 r_g/c$ 中期時間変動 (iii) $\lesssim 10^2 r_g/c$ の短期時間変動.が現れ、自己相関関数で確認。
- X線やガンマ線でより強い(ファクター倍)時間変動。フレアは要詳細解析。
- 今後の(ng)EHTやBHEX(スペースVLBI)を含む多波長長期モニタリングに向けてスピン依存性等を調べる予定。