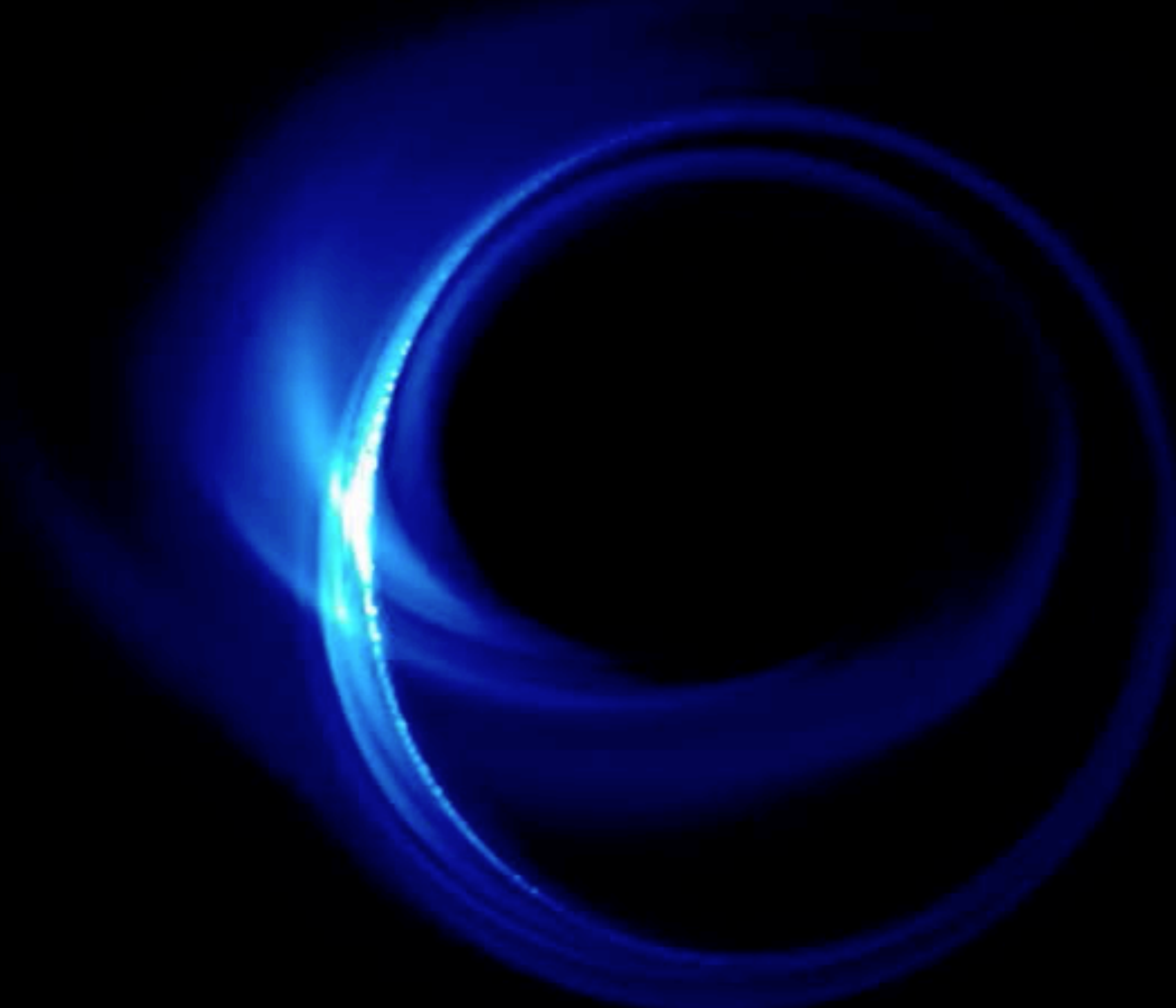


多波長の一般相対論的輻射輸送計算で探る ブラックホール時空構造と降着流・噴出流ダイナミクス



一般相対論的磁気流体計算
(UWABAMI code)

+

一般相対論的輻射輸送計算
(RAIKOU code)

川島 朋尚 (ICRRフェロー)

ブラックホール(BH)研究の大目標

(1) BH時空構造の決定

(2) 降着流の物理の解明

(3) 相対論的ジェット形成・加速機構の解明

さらには

- ✓ フィードバック効果 → 宇宙論的なBHと銀河の共進化
- ✓ 非熱的電子および高エネルギー宇宙線スペクトル形成
- ✓ 重力波との対応

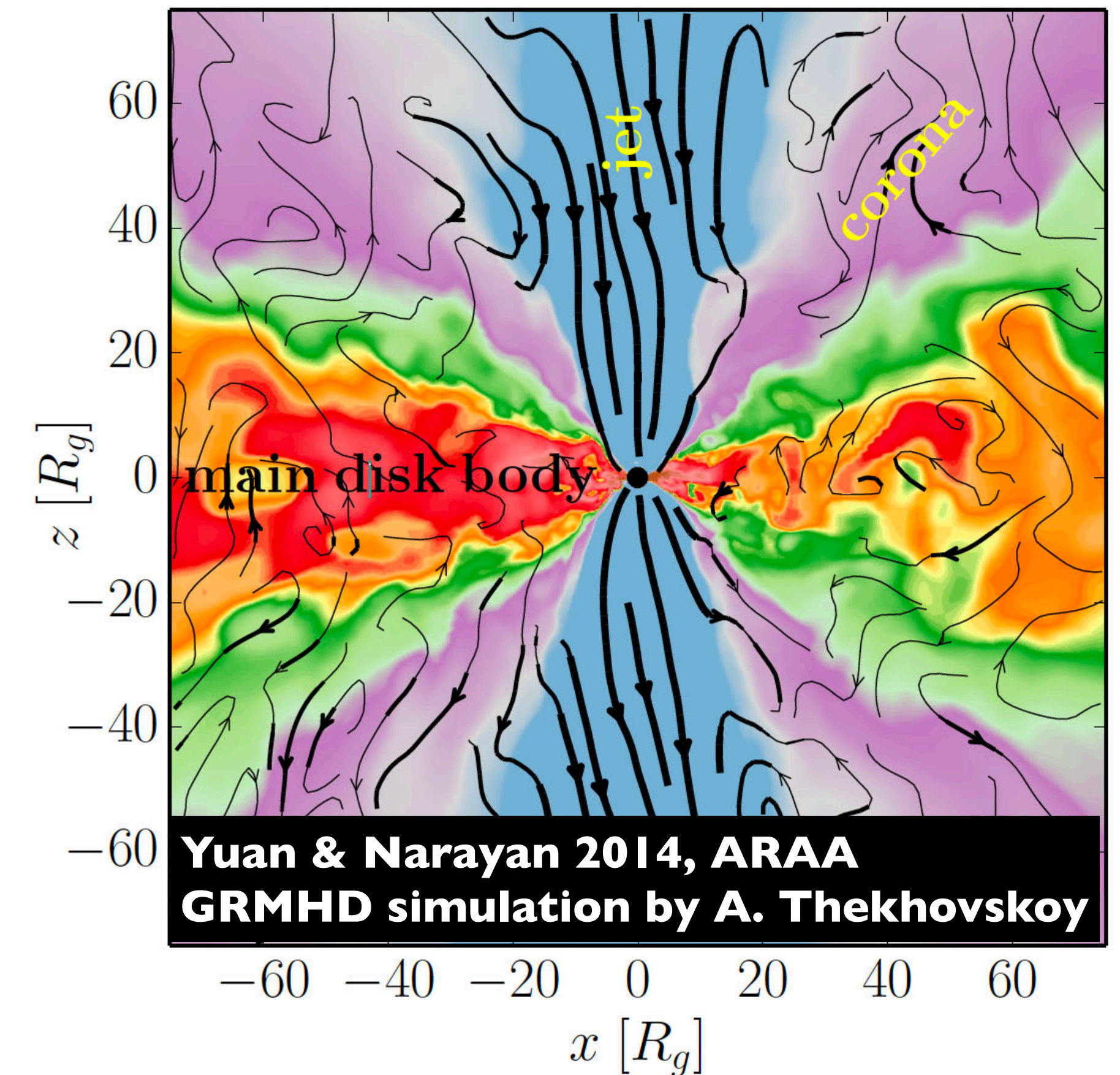
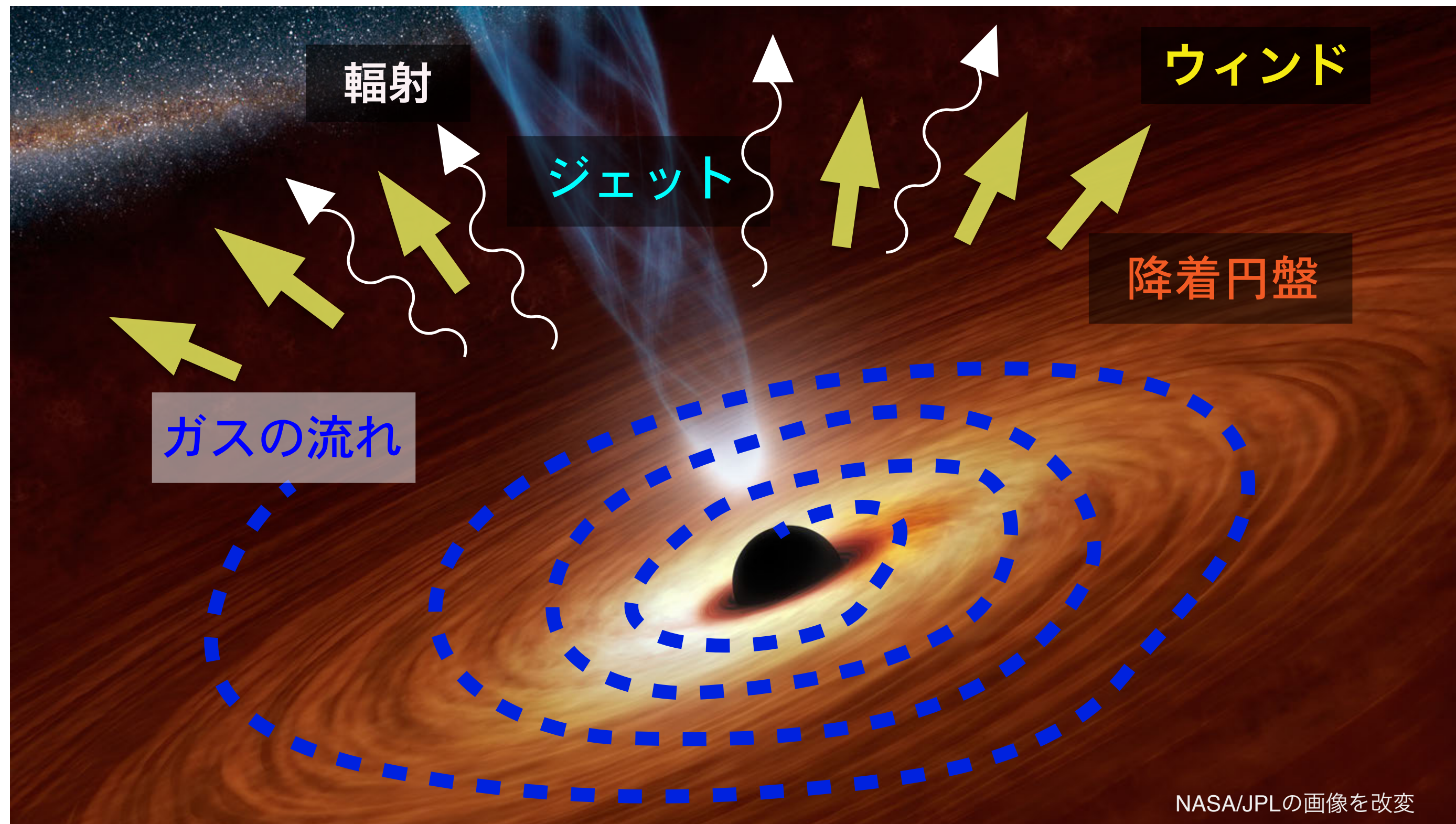
(1) - (3) はそれぞれが密接に関係する。

→ 一般相対論、流体(プラズマ)、輻射輸送に関する包括的な理解が必要不可欠。

BH降着流・噴出流の全体像

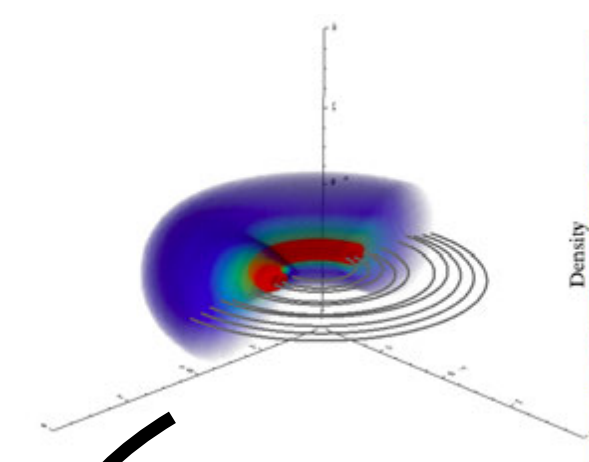
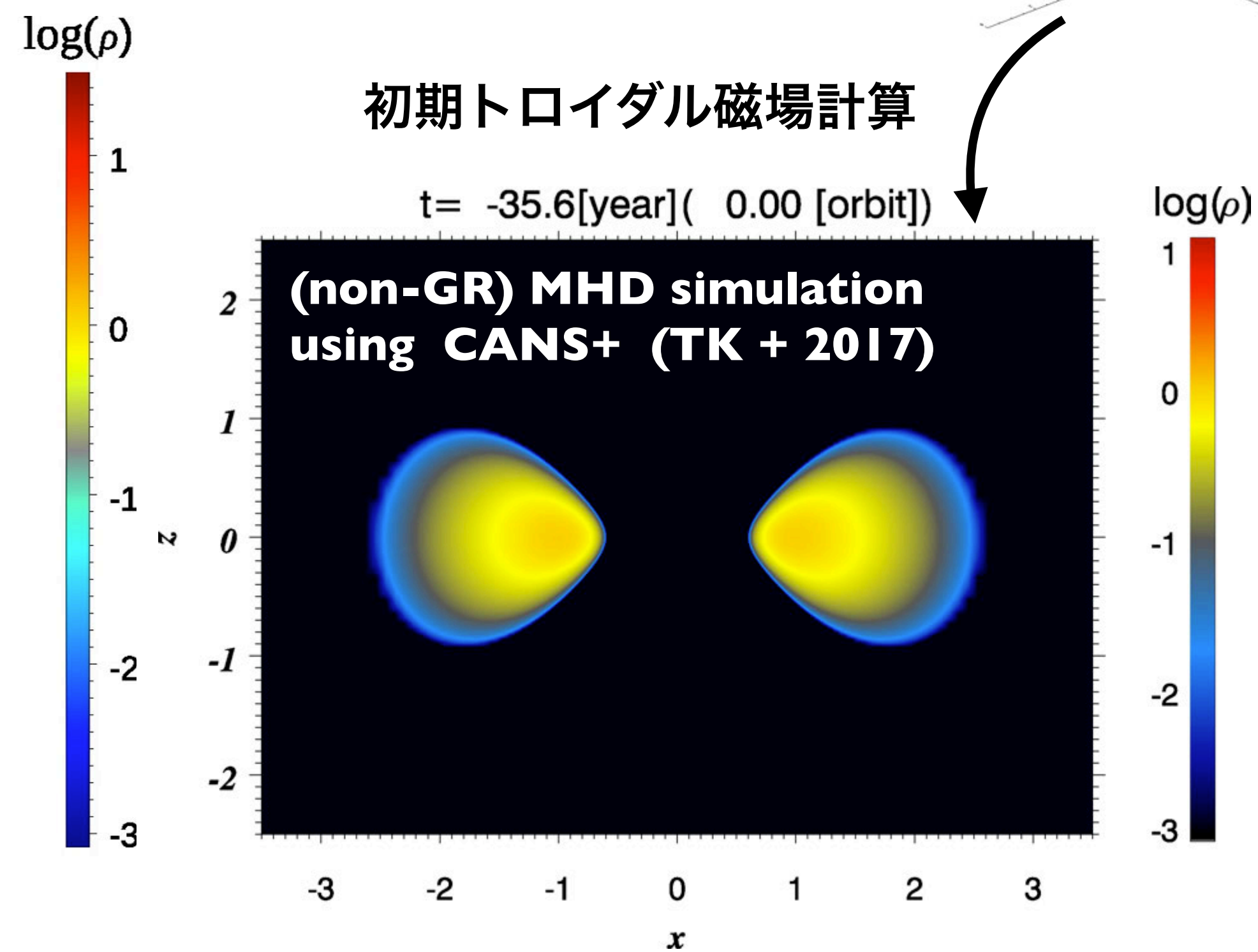
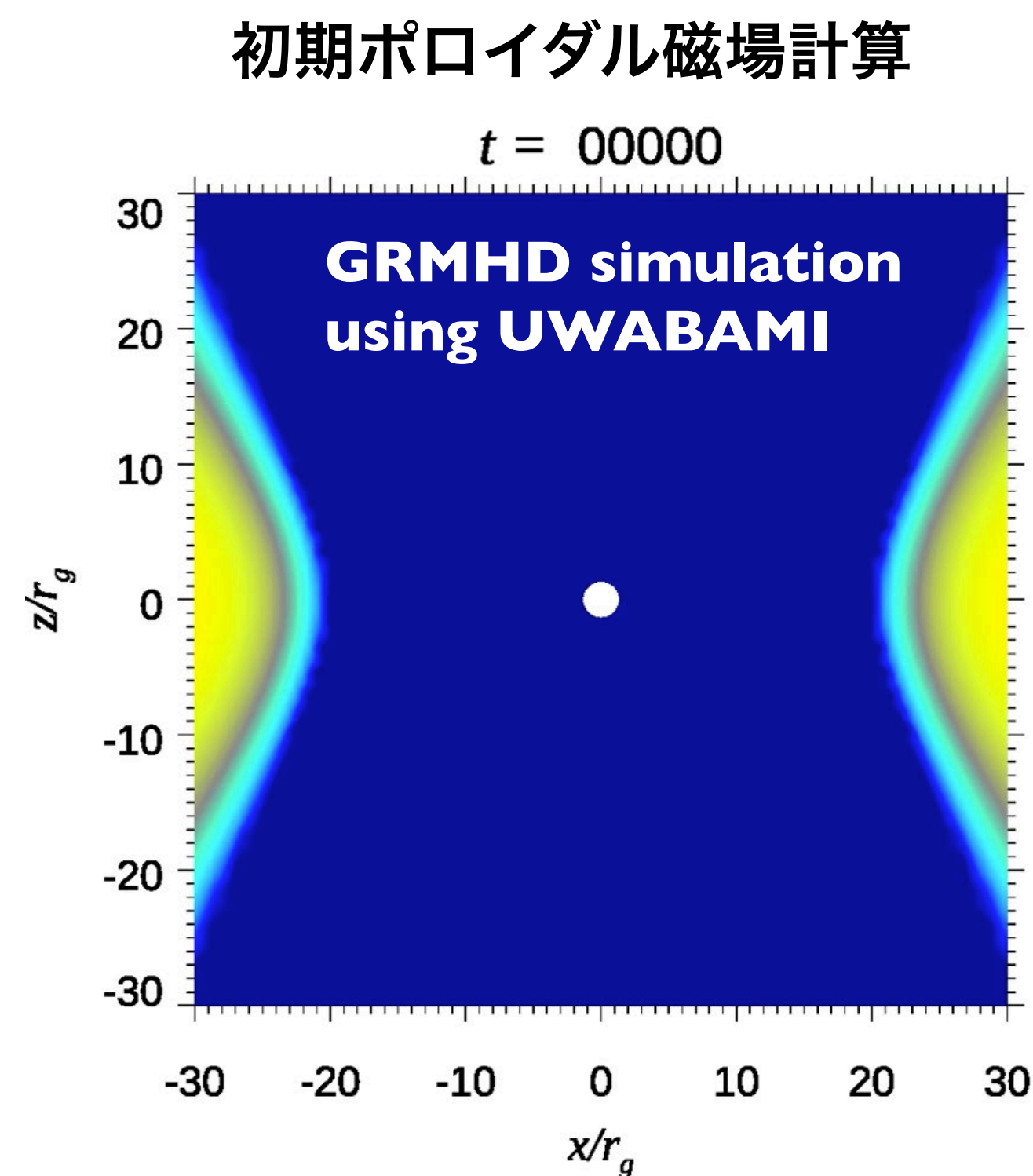
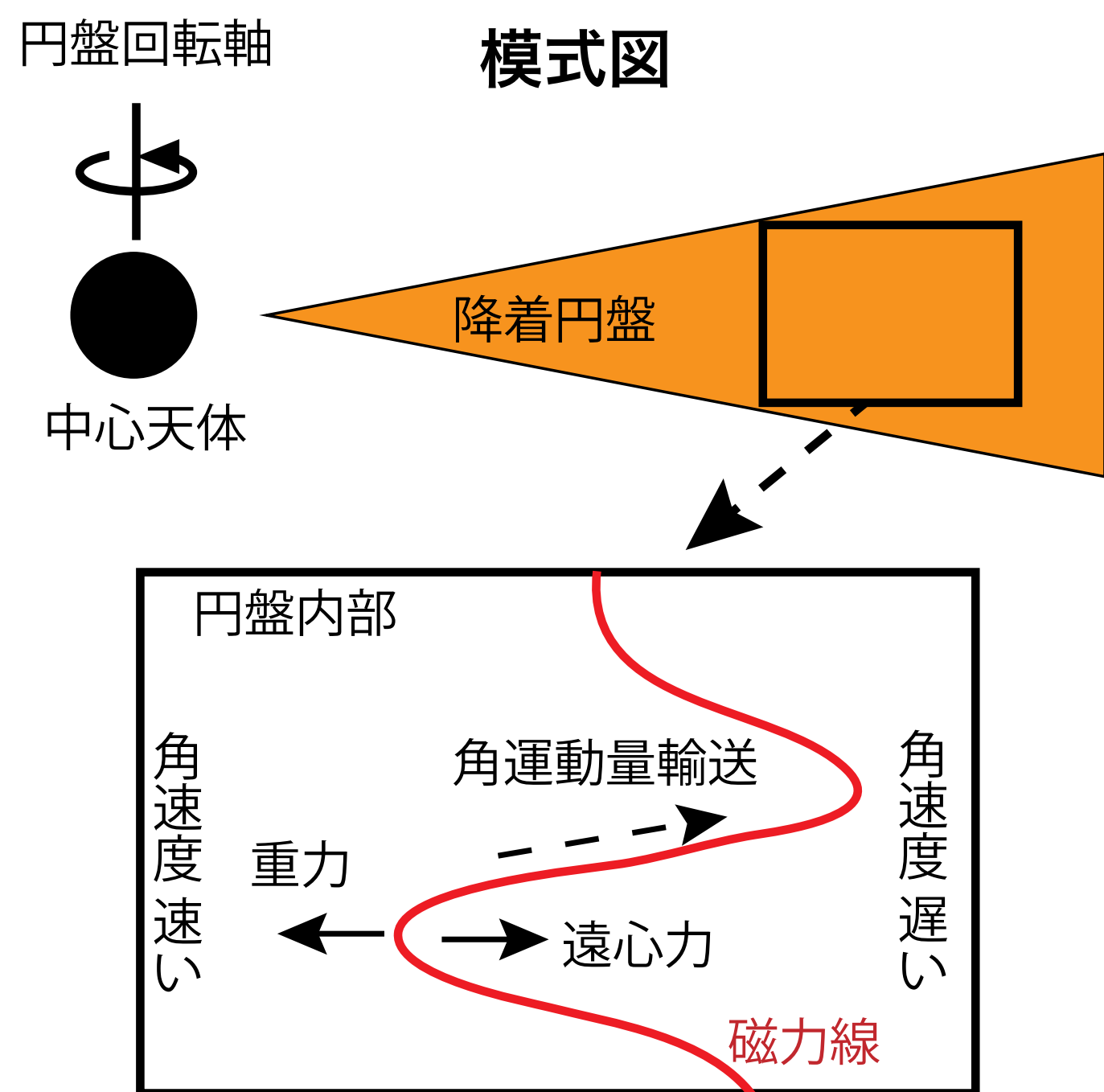
BHへのガス供給(星間ガスや恒星から)

- 降着流を形成 → 降着流で重力エネルギーを解放 (静止質量エネルギーの約10%のオーダー)
- 莫大な量の輻射を放出、さらに噴出流(ジェットやウィンド)を形成



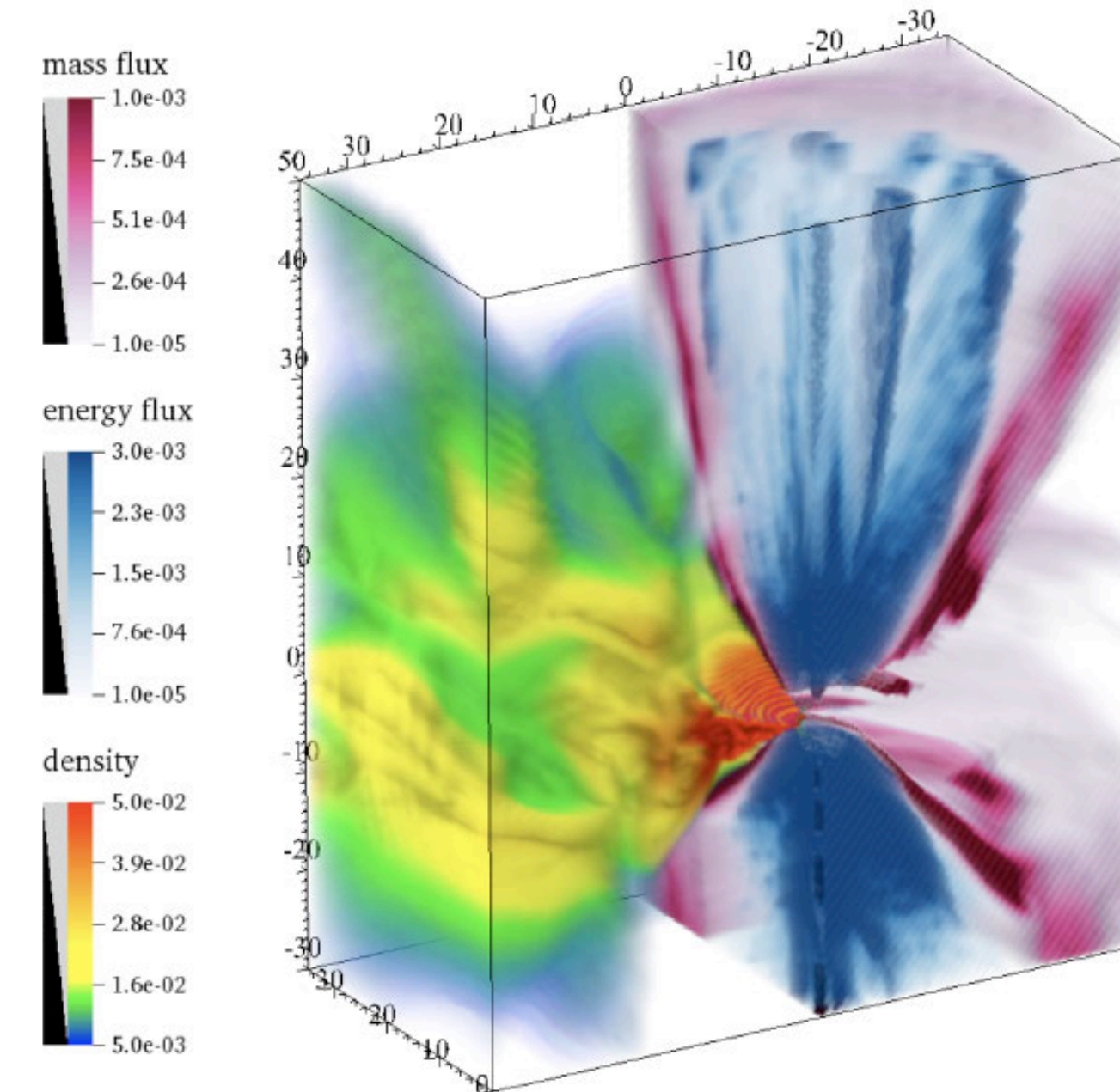
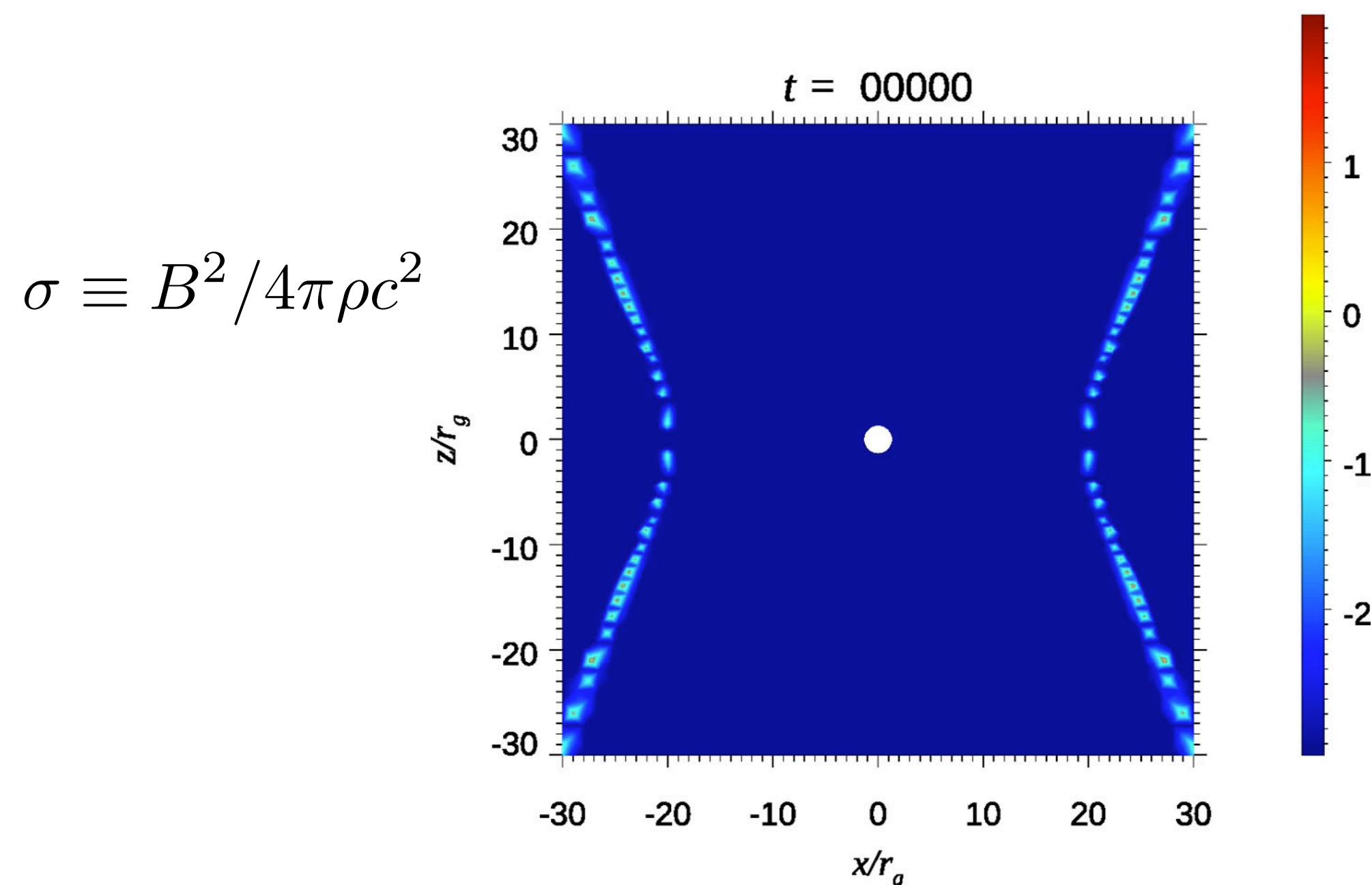
降着流について

- ガスがBH降着するのには角運動量輸送が必要 (\because 重力 $\propto r^{-2}$ に対し、角運動量保存の場合の遠心力 $v_\phi^2/r \propto r^{-3}$)
- 古典的には α 粘性モデルが考えられてきた(Shakura & Sunyaev 1973) : 応力 $T_{r\phi} = -\alpha P$ (P はガス圧+輻射圧)
- 磁気回転不安定性(MRI)の再発見(Balbus & Hawley 1991)後、MRIにより駆動される磁気乱流のマクスウェル応力が角運動量輸送の起源と考えるのが主流に。(ただし未決着。)
- 軸対称MRIの最大成長率 : $\omega^2 = \Omega^2 - k^2 v_A^2 \rightarrow$ 弱磁場の場合、1回転の成長時間スケール
(ただし非軸対称MRIは10回転)



噴出流(ジェット, ウィンド)について

- 降着流で増幅した磁場が原因となってジェット噴出 (ただし低光度降着流の場合)
 - ✓ 相対論的ジェット: BZ機構(BH自転エネルギーの引き抜き)起源 (Blandford & Znajek 1977)?
 - ✓ ウィンド: 磁気遠心力加速起源 (Blandford & Payne 1982)?
- 特にジェットに関しては観測による発見から100年以上経った現在も、その形成・加速・収束機構が大きな謎として残っている。
- 一般相対論的磁気流体(GRMHD)シミュレーションはBZ機構を示唆する(Theckhovskoy et al. 2011等)。(ただしfloor等の問題もあり。) 無衝突プラズマなので微視的過程の扱いも重要 (Paffrey et al. 2019等)



[再掲]ブラックホール(BH)研究の大目標

(1) BH時空構造の決定

(2) 降着流の物理の解明

(3) 相対論的ジェット形成・加速機構の解明

さらには

- ✓ フィードバック効果 → 宇宙論的なBHと銀河の共進化
- ✓ 非熱的電子および高エネルギー宇宙線スペクトル形成
- ✓ 重力波との対応

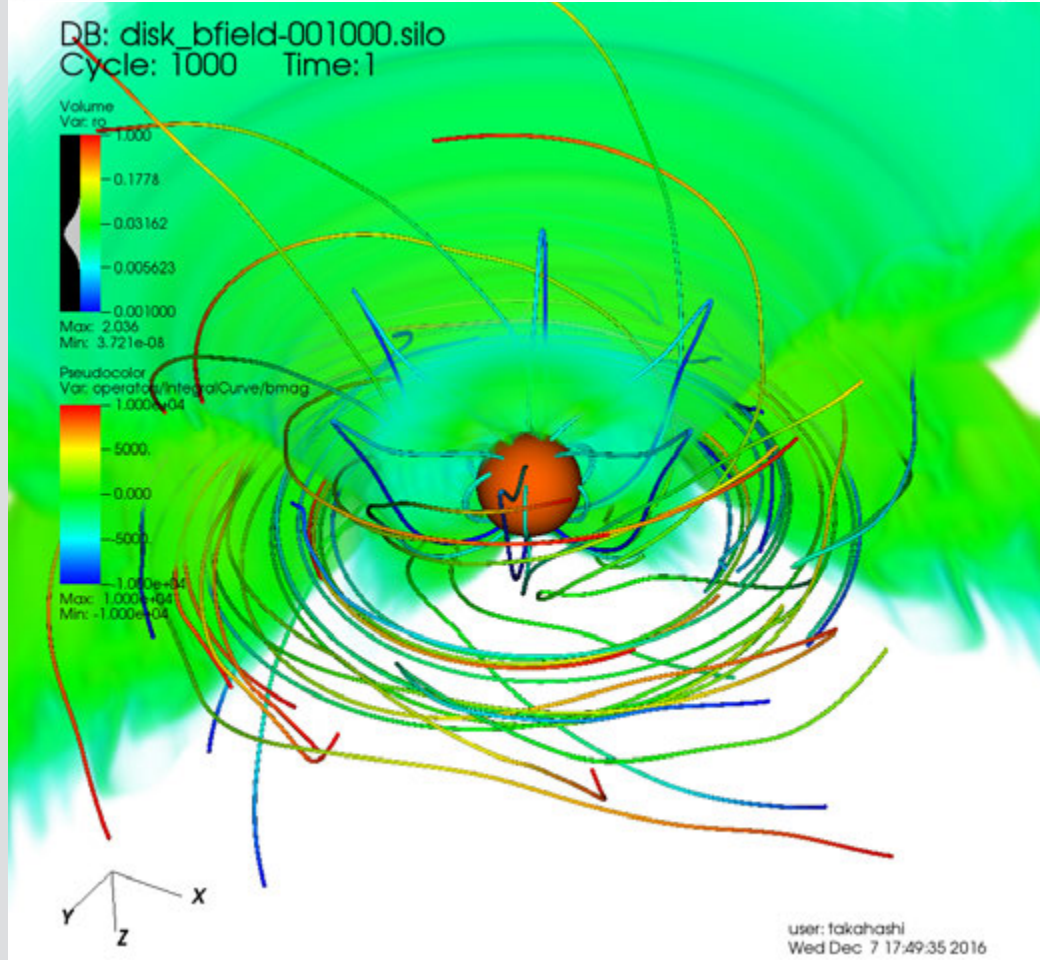
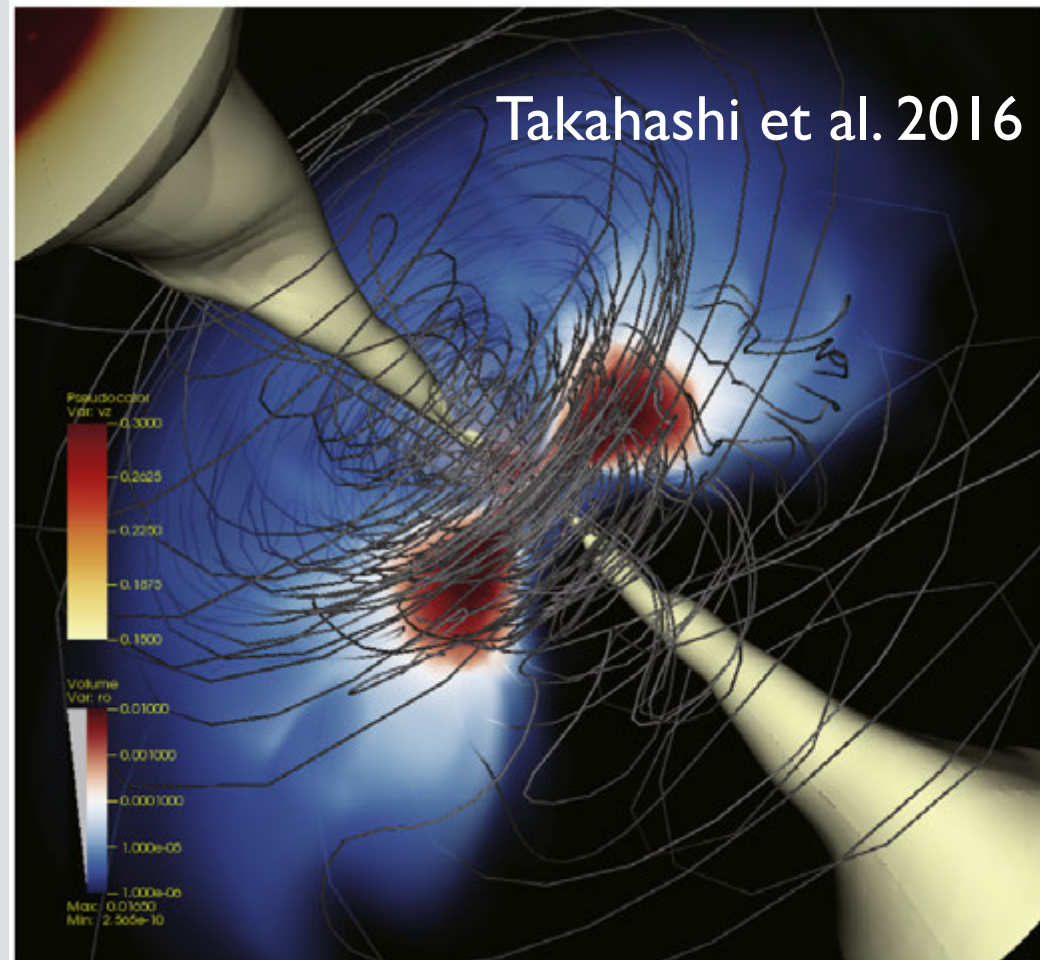
(1) - (3) はそれぞれが密接に関係する。

→ 一般相対論、流体(プラズマ)、輻射輸送に関する包括的な理解が必要不可欠。

手法：観測的可視化の重要性

理論・シミュレーション

得られるもの：流体場
(密度・温度・速度・磁場等)



観測

得られるもの：光子
(イメージ・スペクトル等)

詳細な輻射輸送計算による観測的可視化が必要

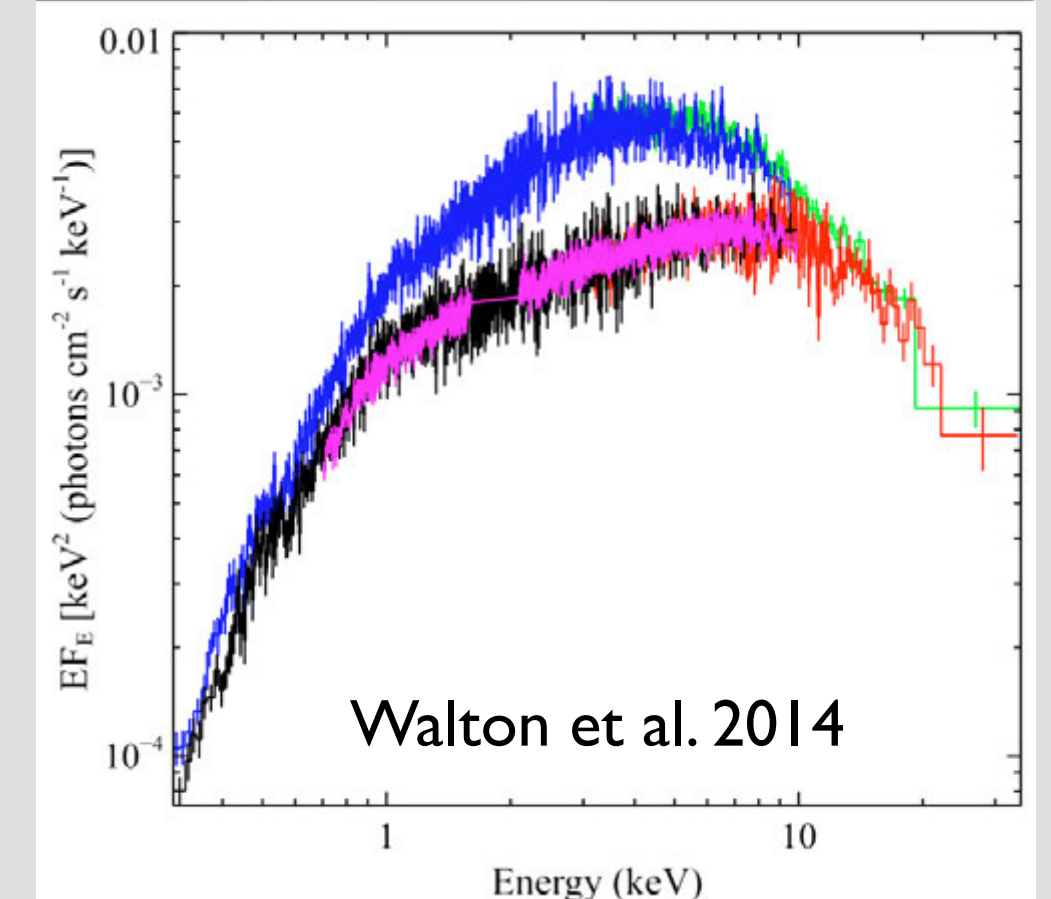
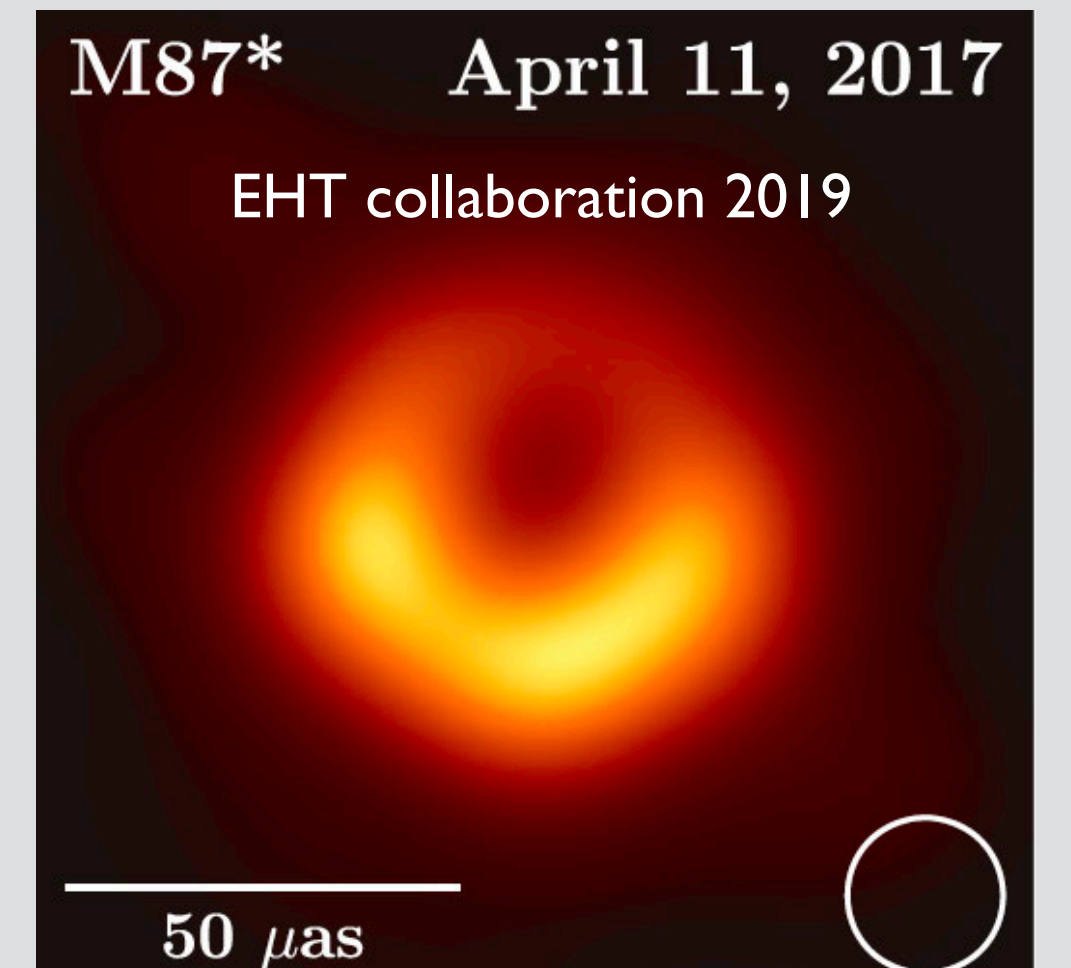
- ・輻射スペクトル計算
- ・イメージング計算

BH周囲で重要な様々な輻射過程を取り入れた
輻射輸送計算で

- ・BH時空構造(質量・スピン)
- ・降着流・噴出流のダイナミクス

を明らかにする

(すなわち重力エネルギーの解放現場を探る！)



多波長一般相対論的輻射輸送コード「RAIKOU(来光)」の開発

Kawashima, Ohsuga, Takahashi (in prep.), EHT GRRT code comparison paper (submitted)

RAIKOU: Radiative trAnSfer In Kerr-spacetime for accretiOn and oUtfLOW

• Ray-tracing法:

✓ 8次のembedded Runge-Kutta法 with adoptive stepsize control

• 輻射過程:

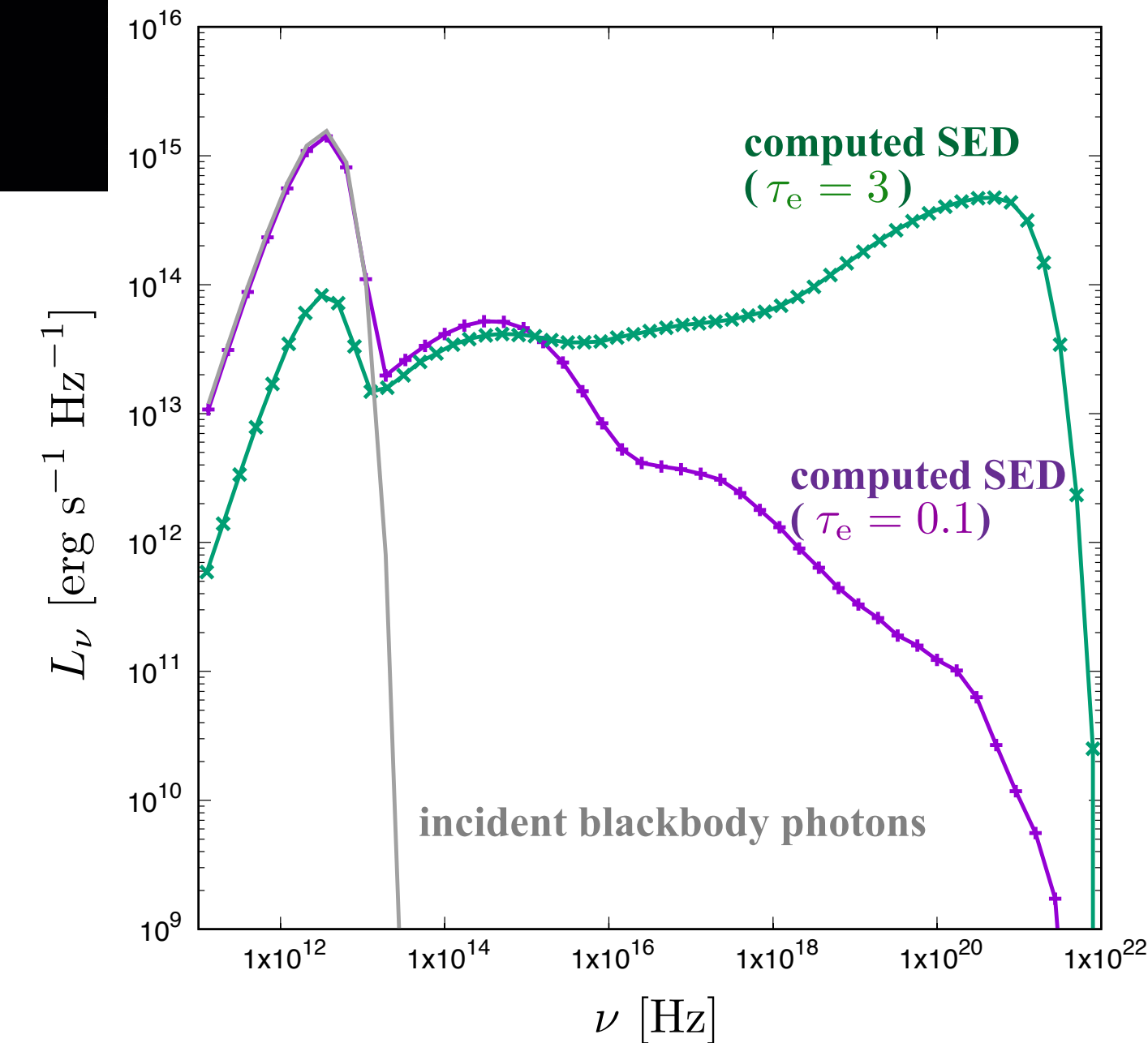
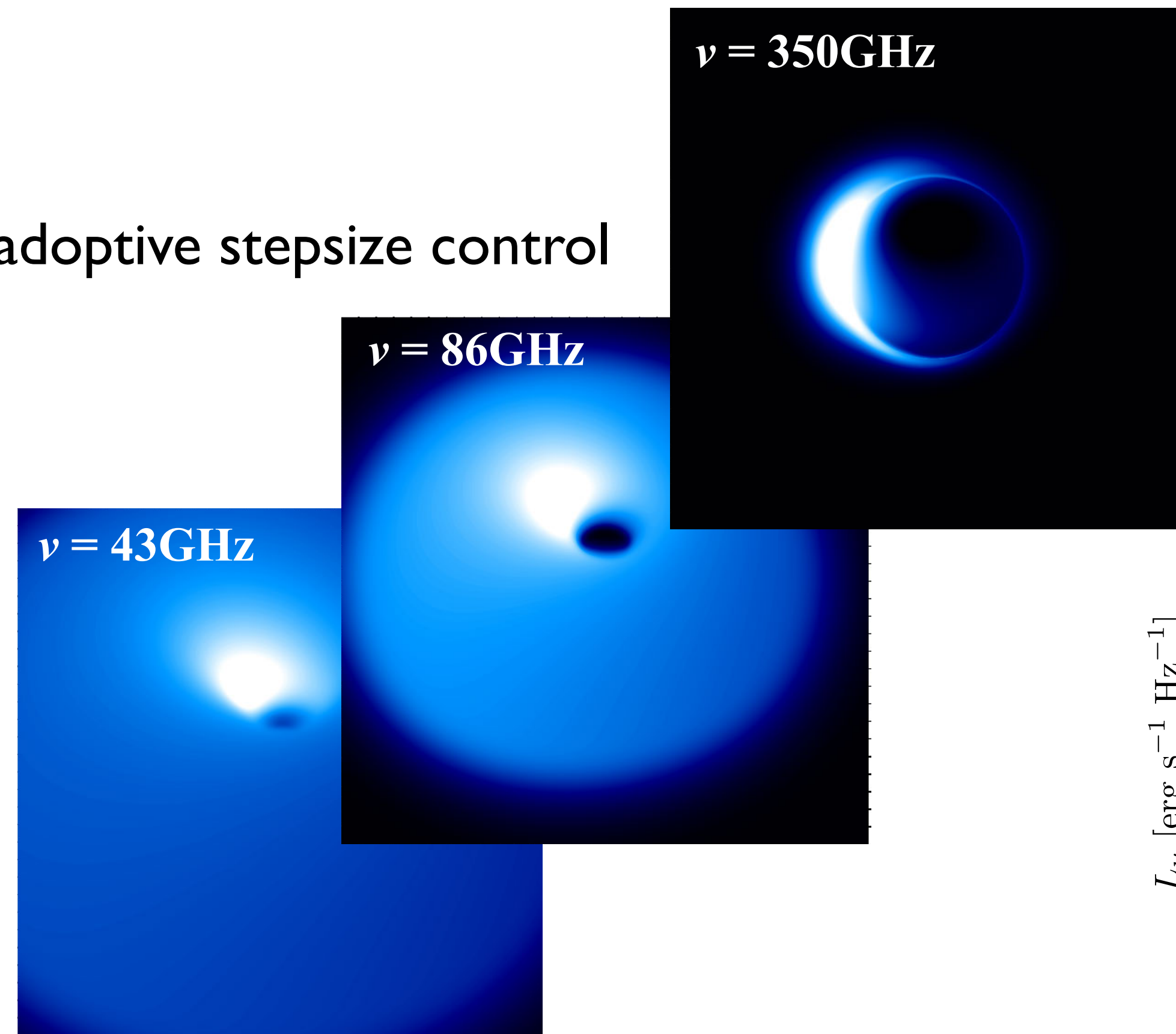
✓ 放射/吸収

- 熱的電子 サイクロ-シンクロトロン
- 非熱的電子 シンクロトロン
- 熱的電子 制動放射

✓ 散乱 (Monte-Carlo 法)

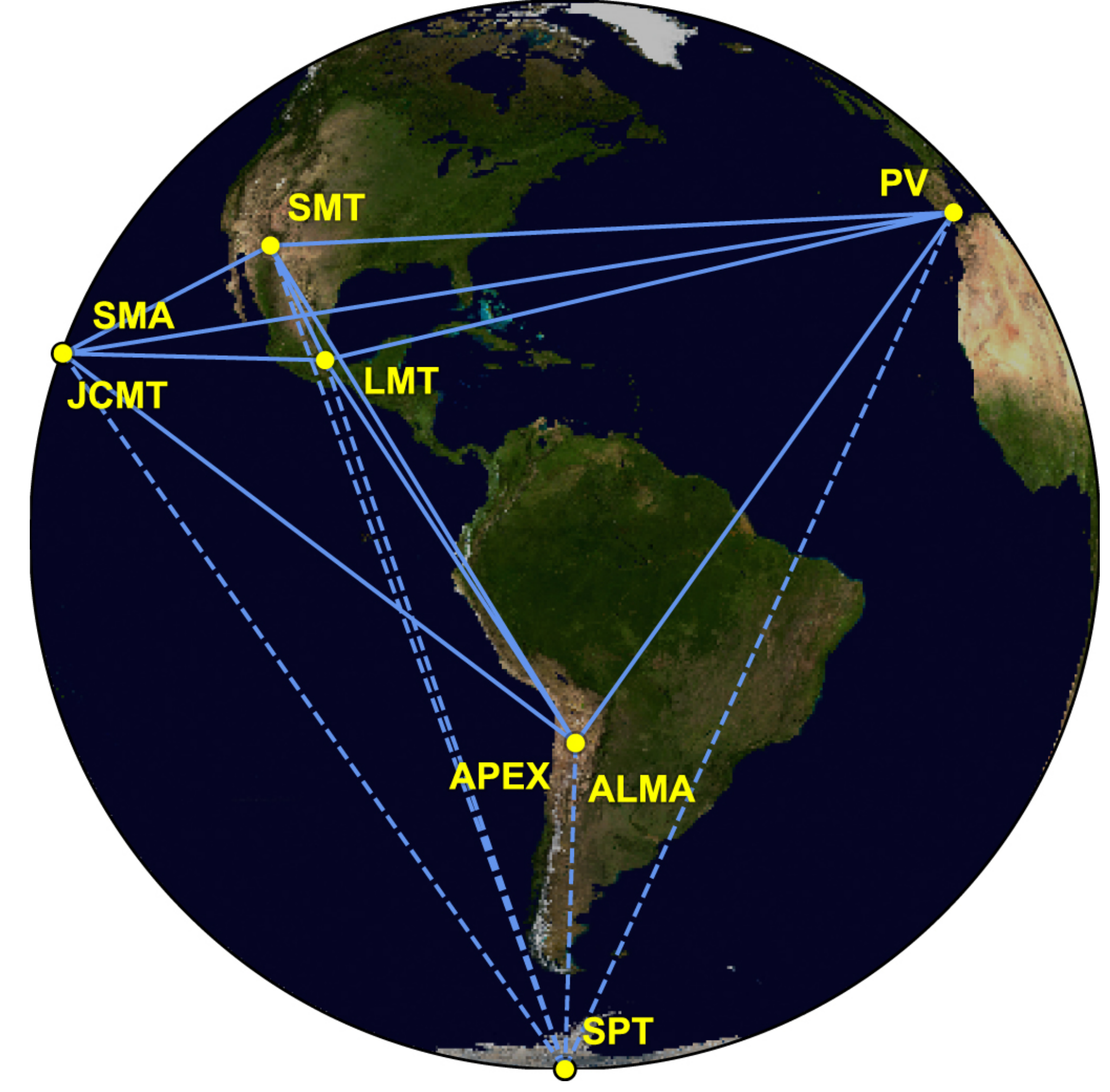
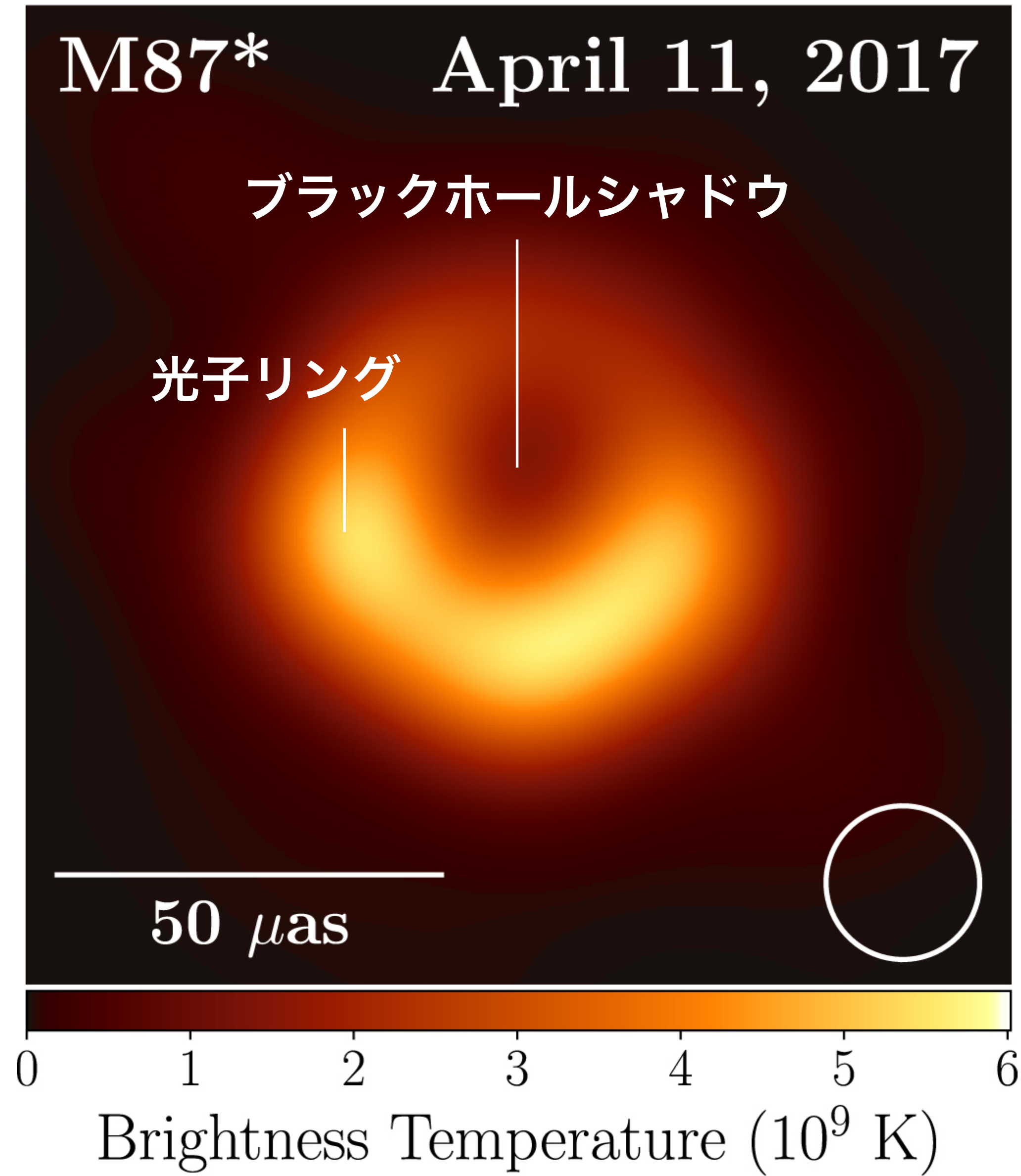
- 熱的電子 コンプトン/逆コンプトン
- 非熱的電子 コンプトン/逆コンプトン (*最近実装)

✓ 偏光 (実装中)



BH近傍で重要な連続線輻射過程が全て入っている

BHシャドウ初観測 (EHT Collaboration 2019 incl. T Kawashima)



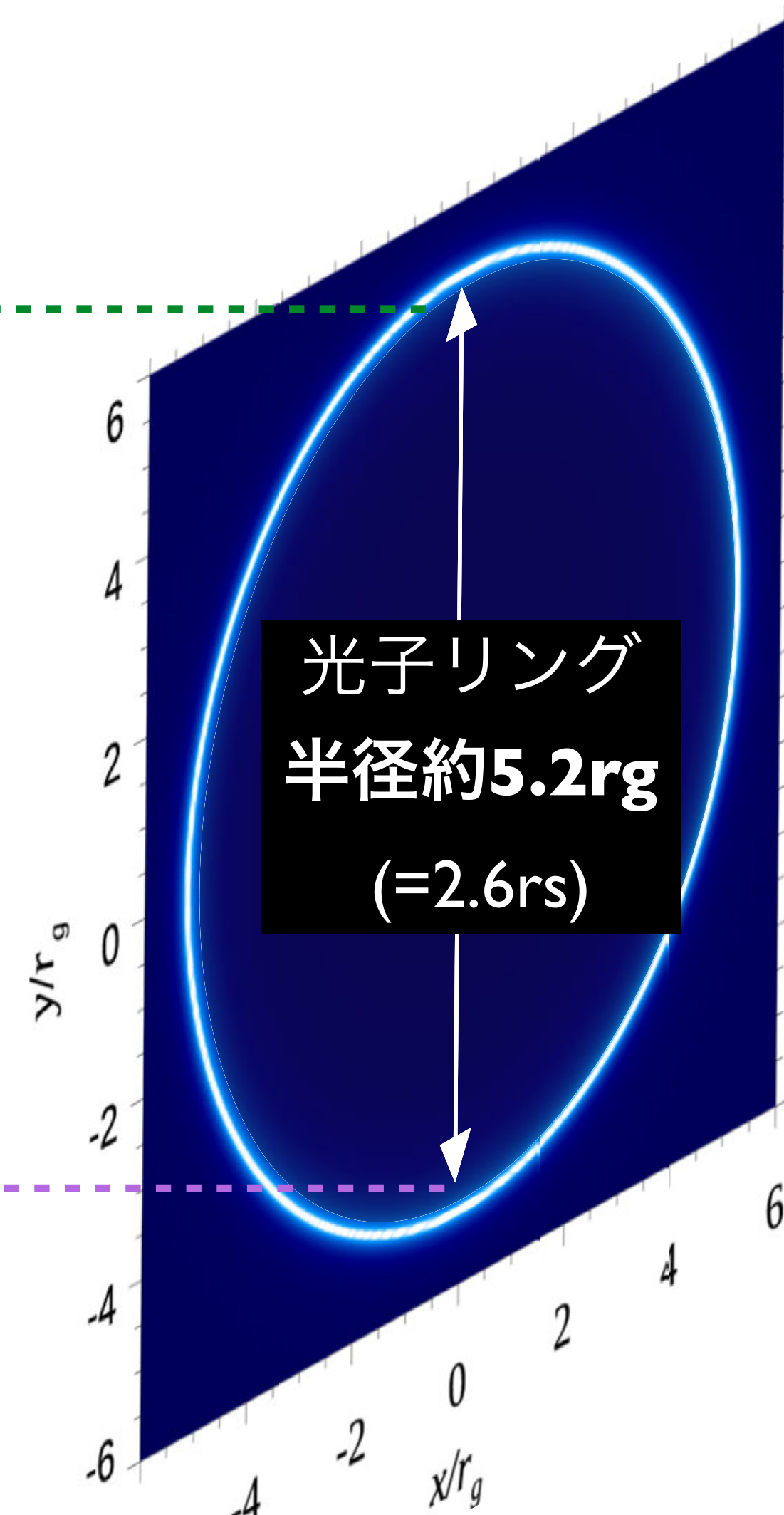
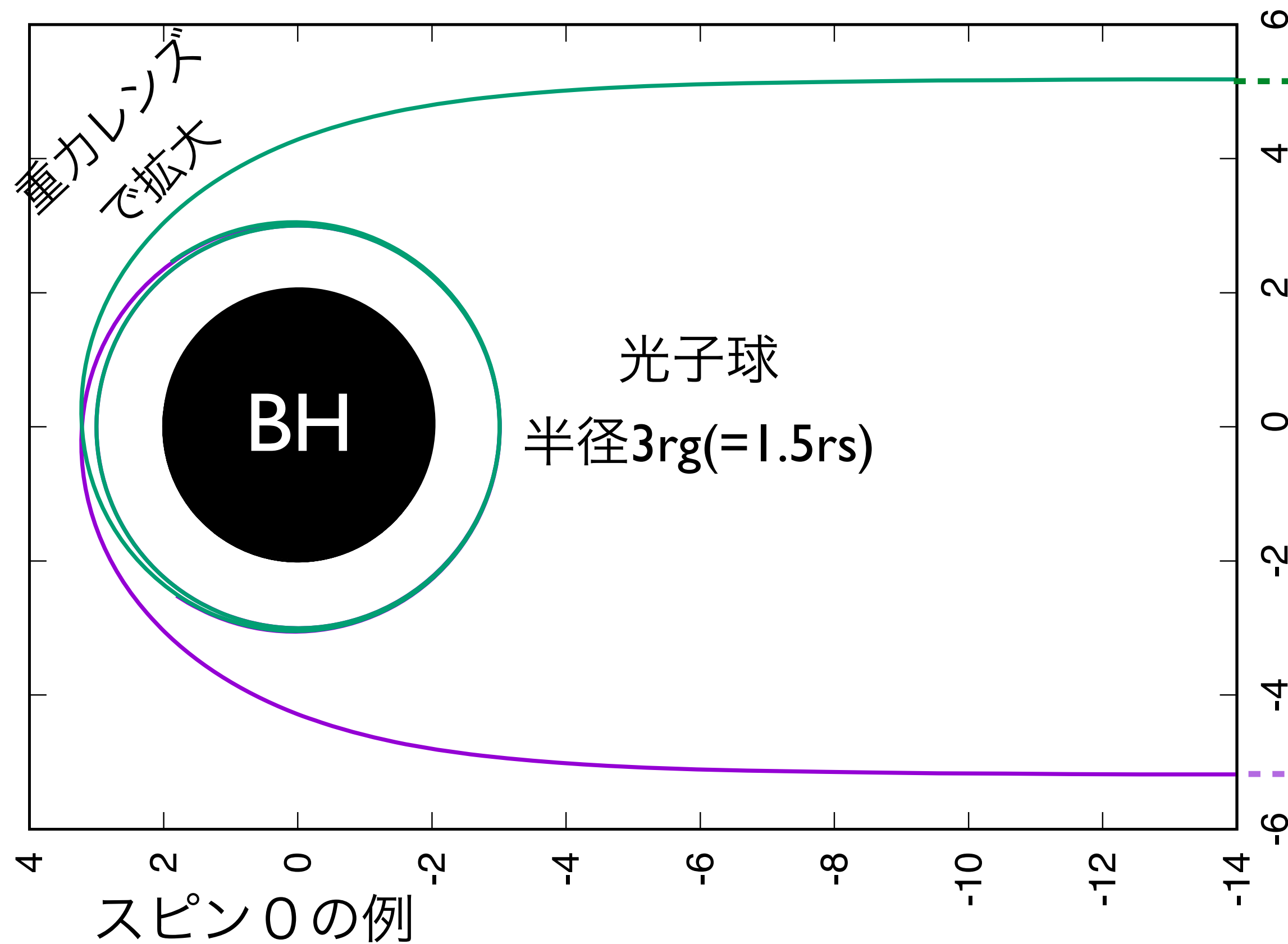
Event Horizon Telescope (EHT)により、BHシャドウが遂に観測された

ブラックホールシャドウと光子リングの形成

- 光子リング：光子球を通った光子が重力レンズで拡大された明るいリング
- 光子球：BH周りの光子の球軌道

光子球で光線はぐるぐる回り明るさを稼ぐ → 光子リングが明るくなる

※ r_g ：重力半径, r_s ：シュバルツシルト半径, $r_g = 0.5 r_s$

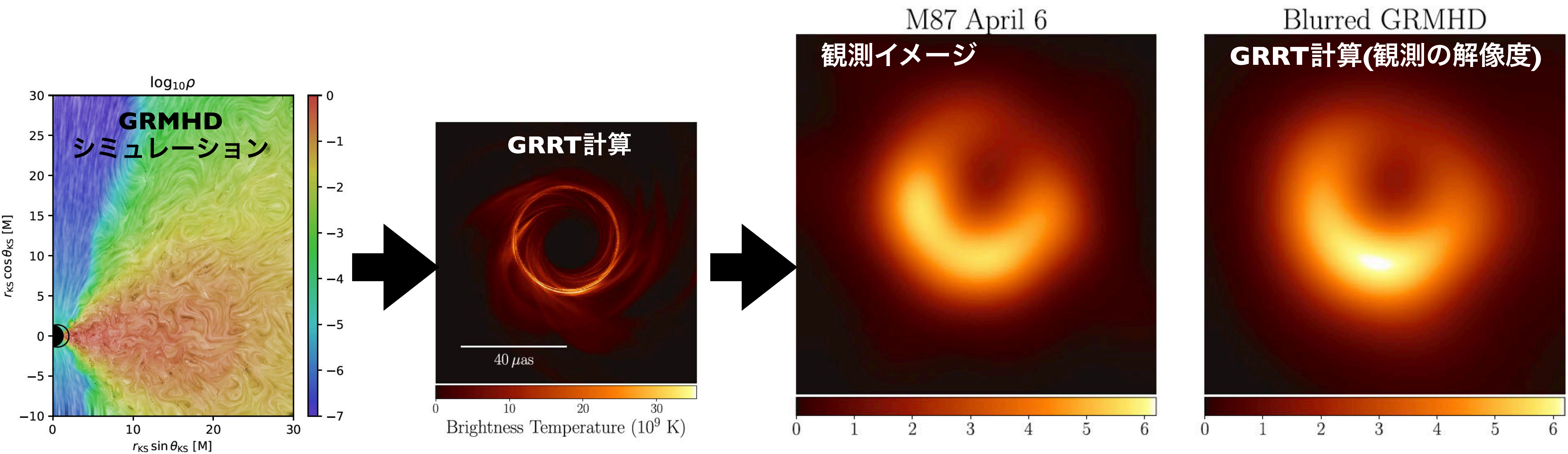


EHT Collaboration M87*の光子リング計算

EHT Collaboration (inc. Kawashima T.) 2019

GRMHDシミュレーション + 一般相対論的輻射輸送(GRRT) 計算

6.5x10⁹太陽質量のブラックホールのシャドウであることがわかった。



EHT 2017観測でわかったこと・残された大きな課題

- 到達点：

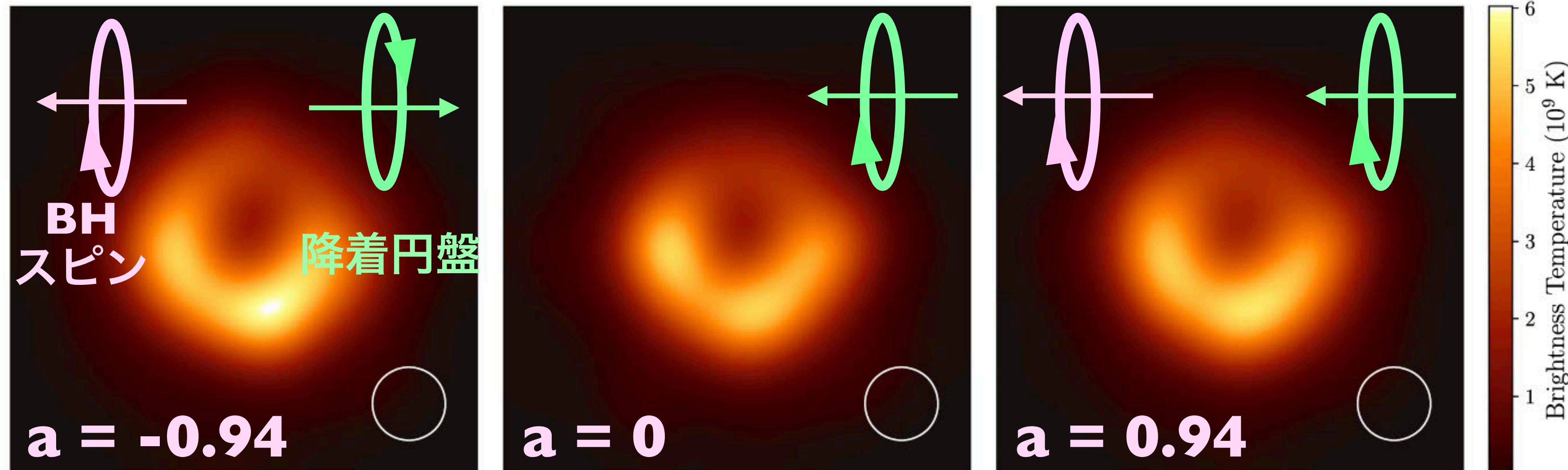
- ✓ BHシャドウを初観測。
- ✓ M87におけるBH質量が明らかに。
- ✓ 巨大BHの存在をほぼ証明。

- (主な) 課題：

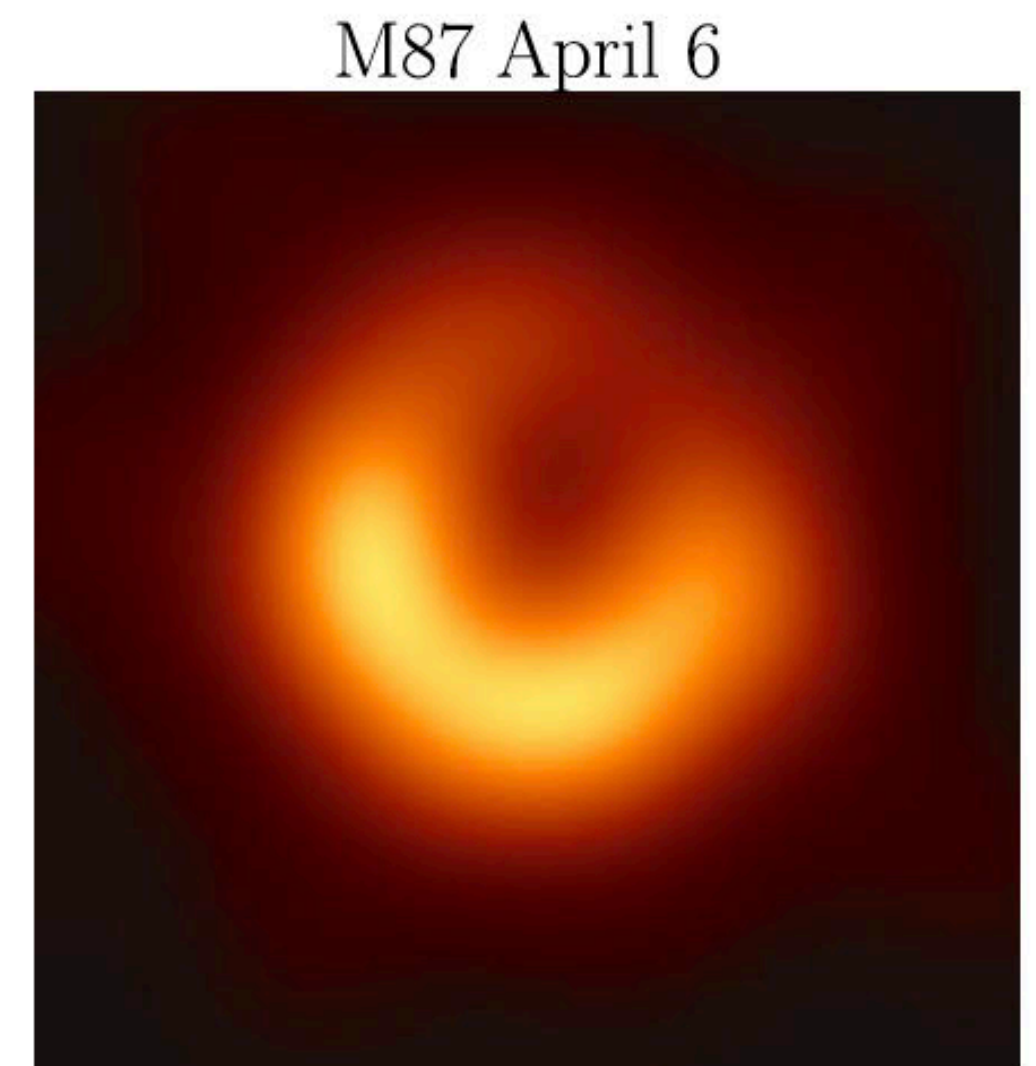
- ✓ BHスピンの大きさは？
- ✓ 相対論的ジェットの出発メカニズムは？
- ✓ 降着流の状態は？
- ✓ 放射領域は降着流かジェットか？
- ✓ 他のBHは？ (例: Sgr A*)

BHスピンを変えたシミュレーションの結果

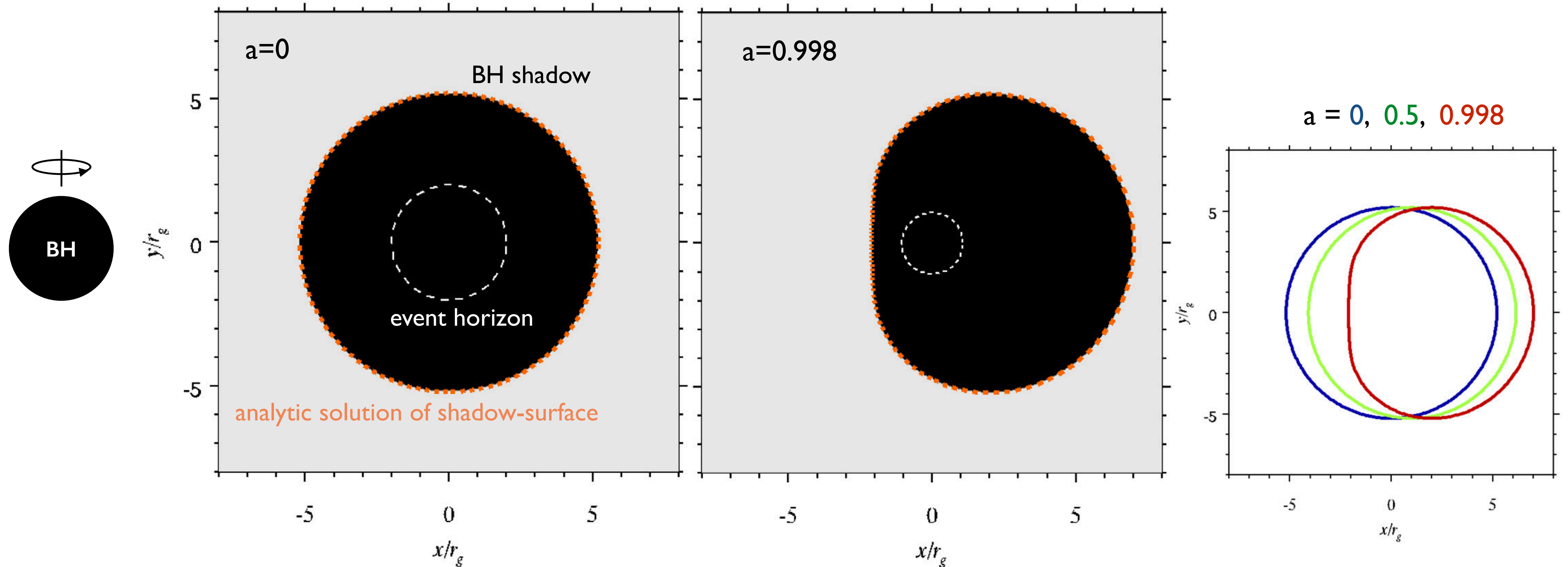
Simulated EHT observations



EHT2017観測結果

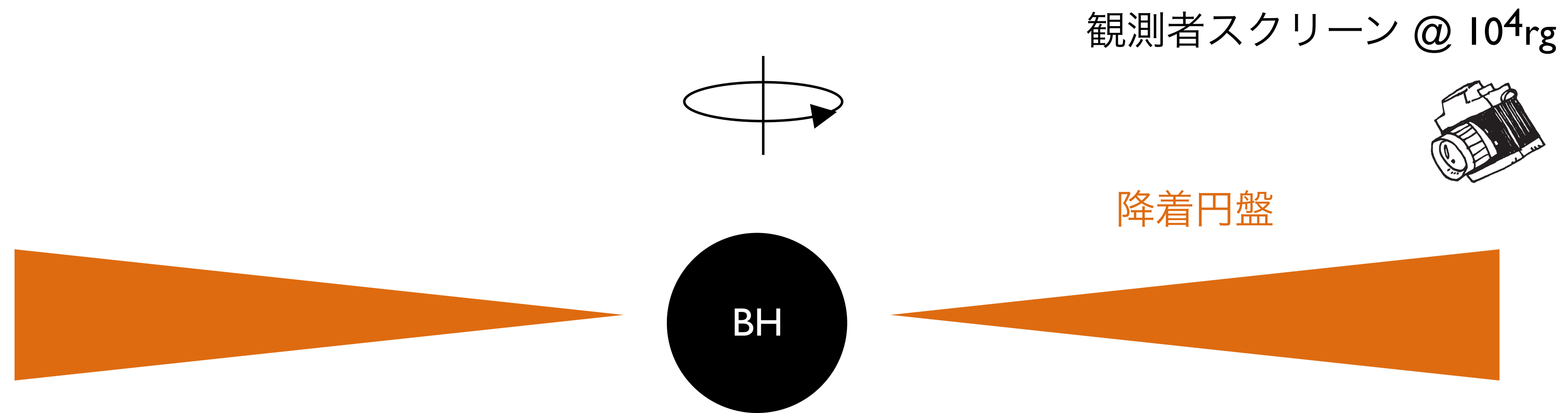


BHシャドウのspin依存性



- BH質量依存性：光子リング(BHシャドウ)のサイズはBH質量に比例。
- BHスピン依存性：サイズはわずかに約 $\pm 5\%$ のずれ。
光子リング(シャドウ)の位置がスピン軸に垂直方向にずれるのみ。
- BH質量を決めるのには適している。一方でスピンを決めるのは困難。

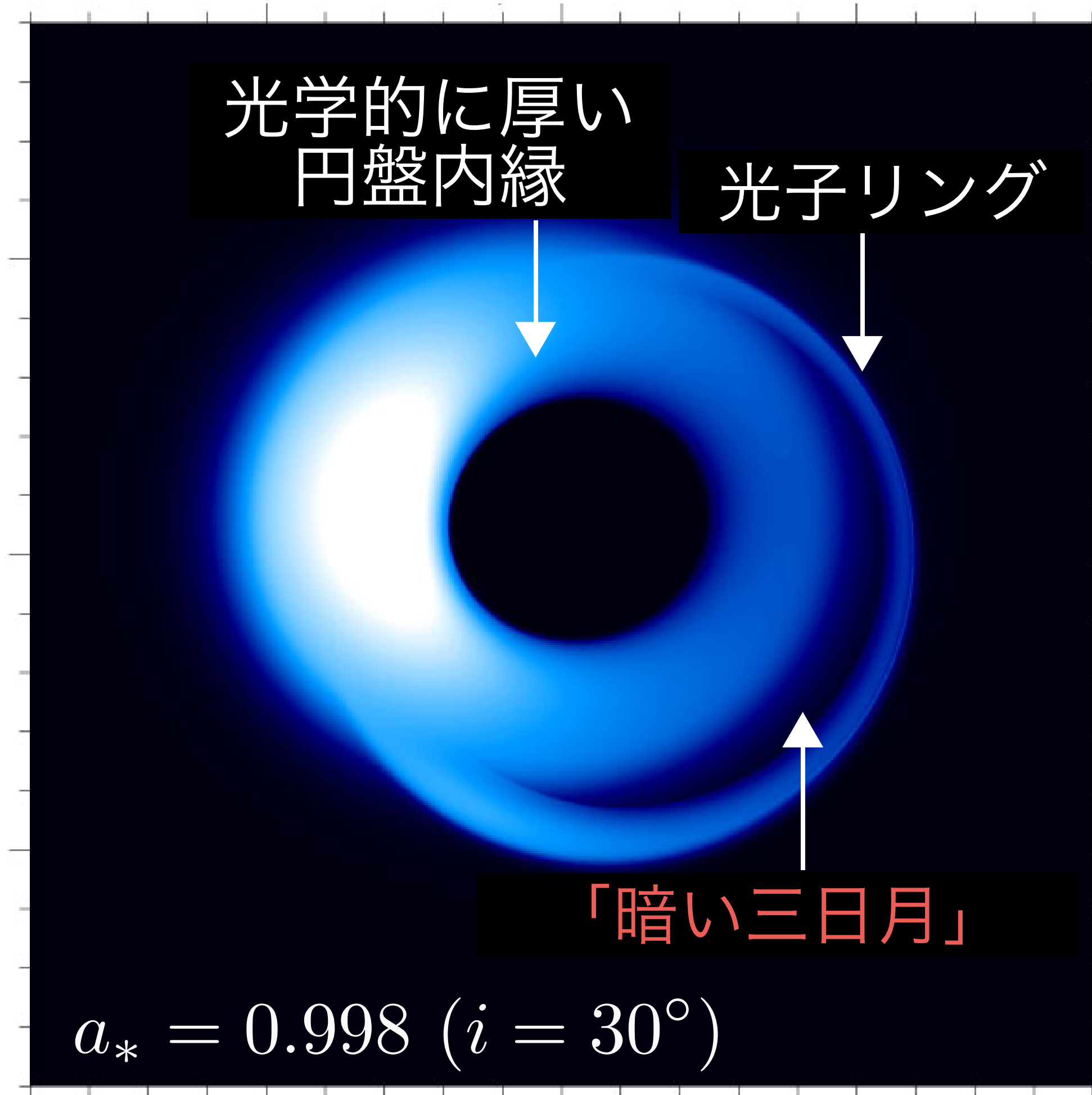
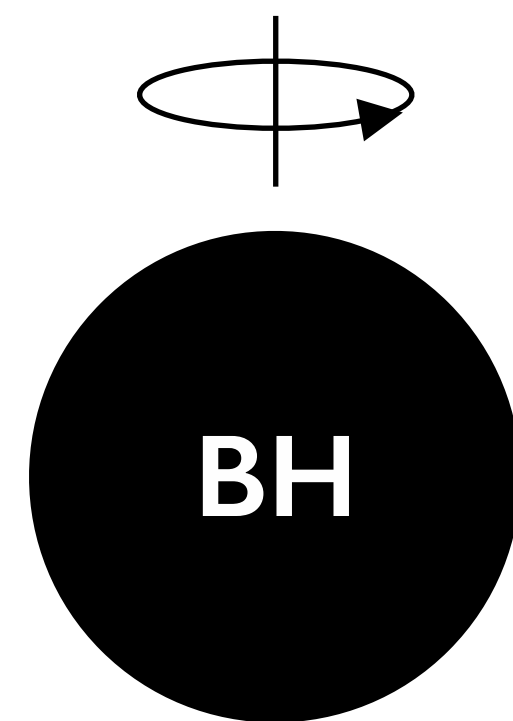
今回のEHT 2017の観測時よりも少し光学的厚みが高い状況(質量降着率が高い状況、フレア状態)を仮定し、新たなスピン制限方法を考える。



- 簡単のため降着円盤のみ考慮 (Keplearian shell model: Broderick & Loeb 2006)
- サイクロ-シンクロトロン放射/吸収を考慮
- BH質量 6.2×10^9 太陽質量
- BHスピン $a = 0.5, 0.75, 0.998$, 視線角度 $i = 15, 30$ 度
- EHT 2017以上の明るさになる降着率 $\gtrsim 10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$

M87におけるBHスピンの新測定法の提案 (Kawashima + 2019)

- 降着率がやや高いときには、光学的に厚い領域が円盤内縁に残る。
- 内縁付近より外は光学的に薄い、つまり光子リングが現れる。



降着円盤の内縁と
光子リングの隙間に
暗い三日月が現れる

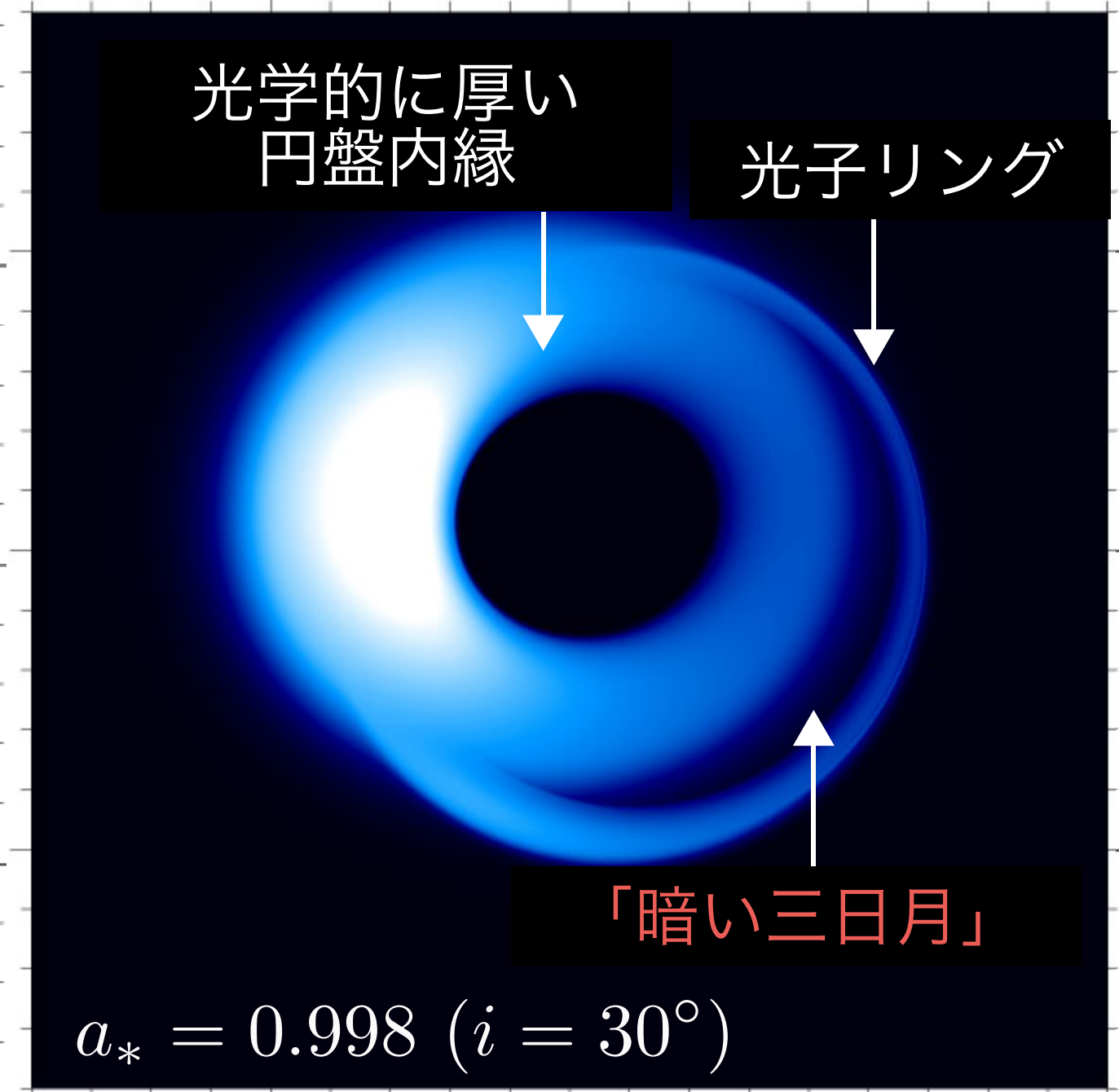
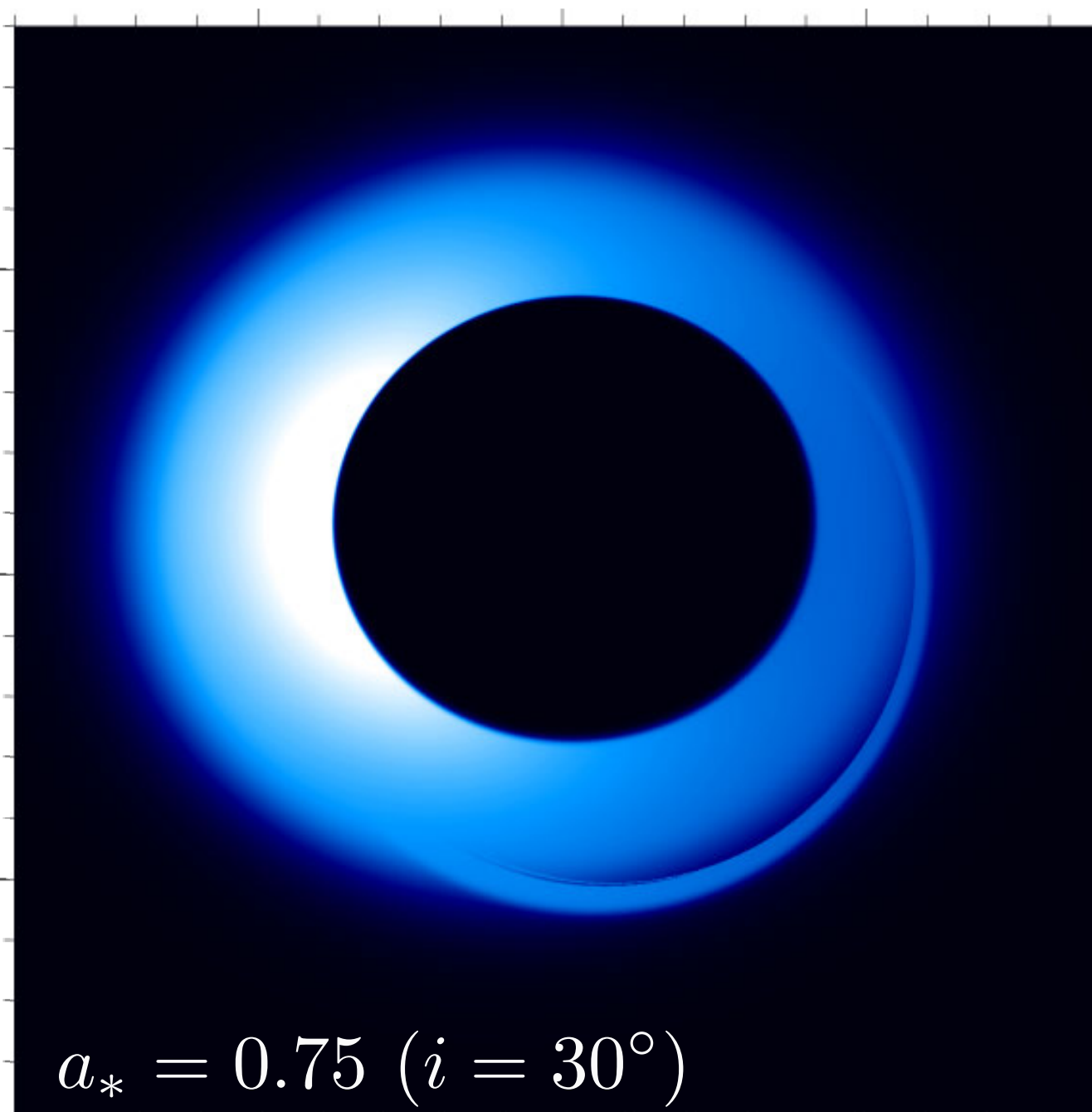
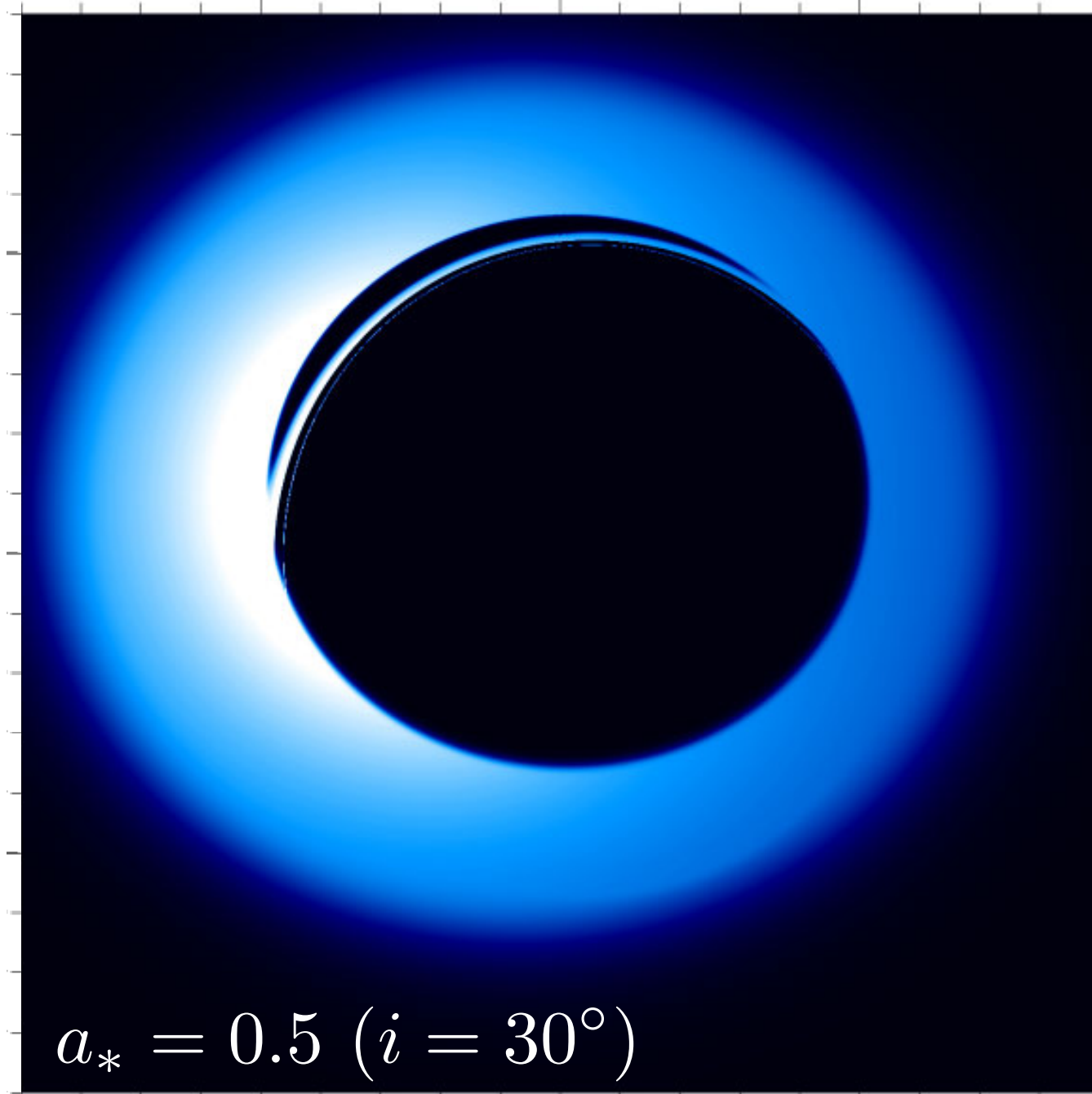
BHシャドウの形状のBHスピン依存性

高スピン

$a=0.5$

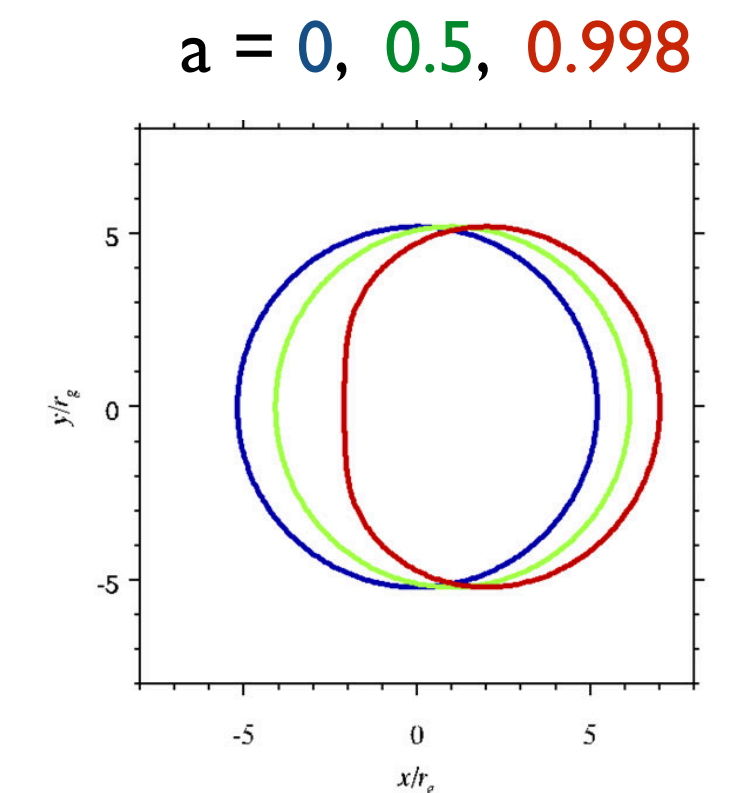
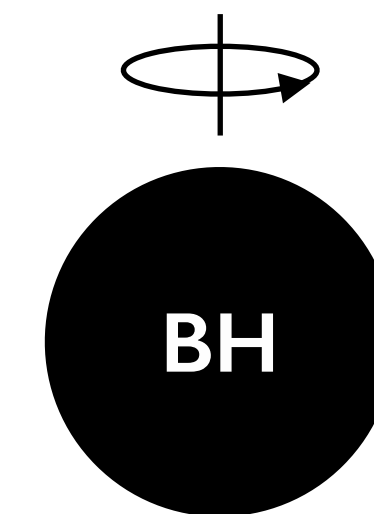
$a=0.75$

$a=0.998$

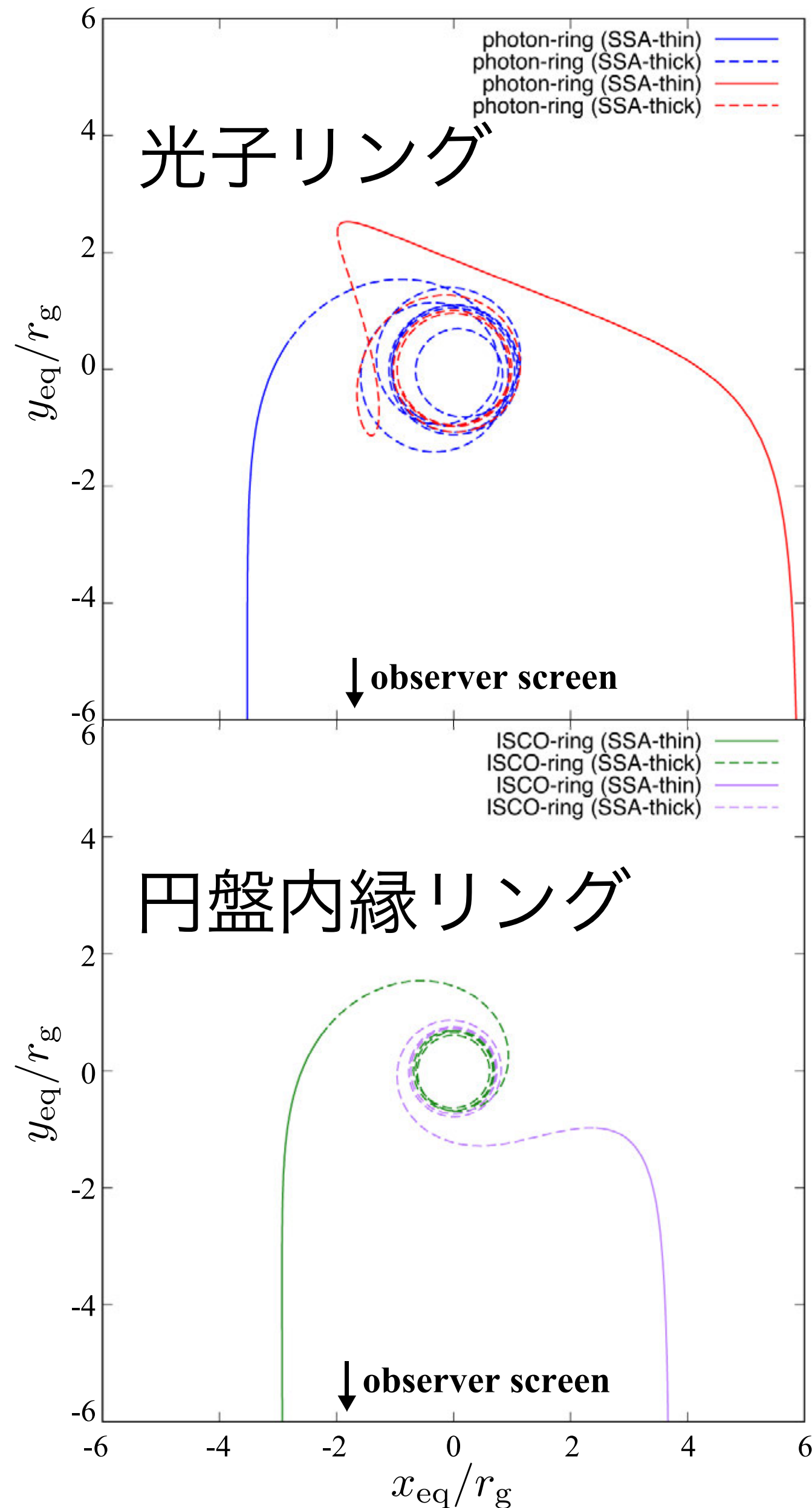


- BHスピンの高いと光子リングが右にシフト→ 暗い三日月が現れる。

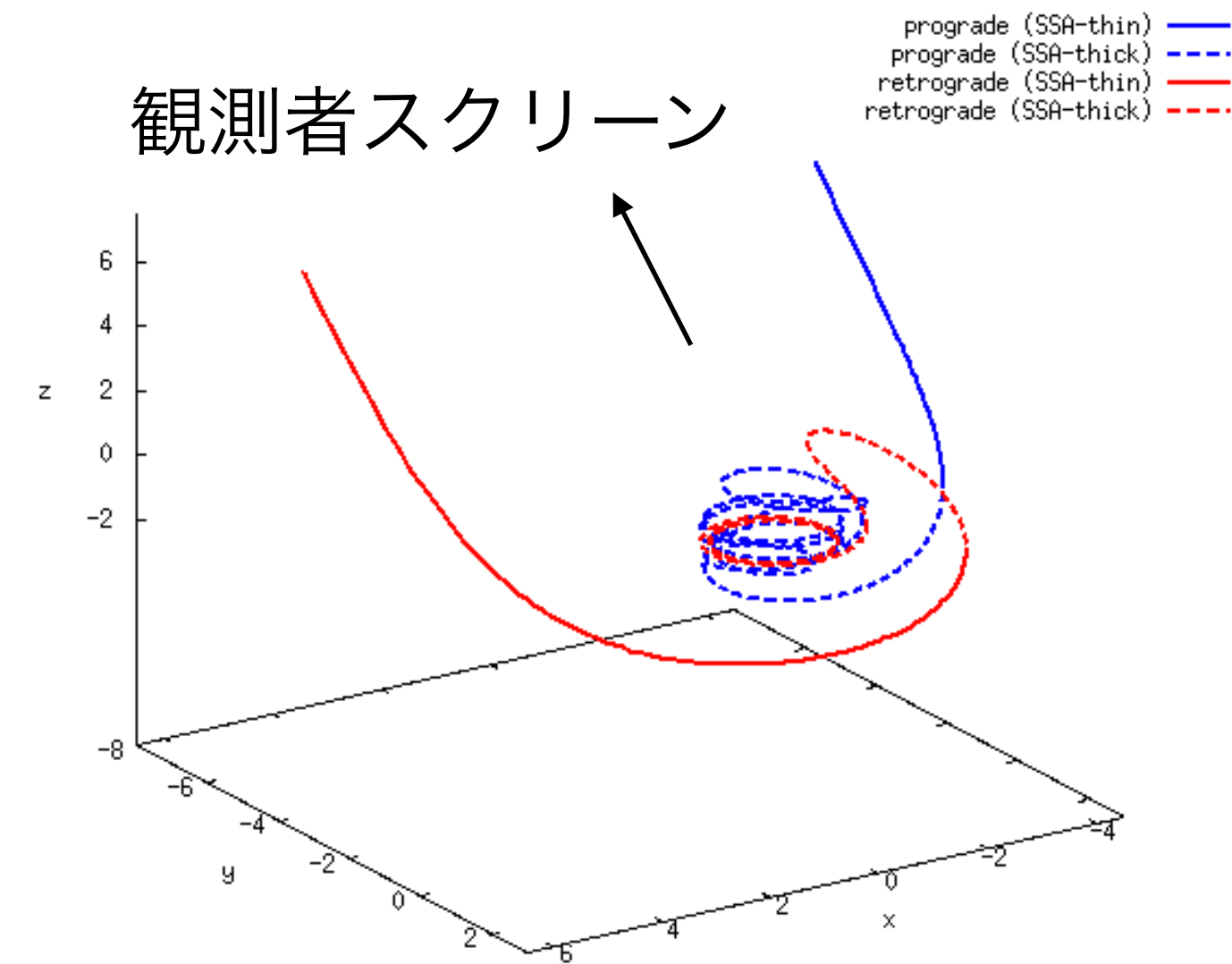
BHスピンを決める新たな方法



光子リングと円盤内縁リングの中心のズレ：光子軌道から

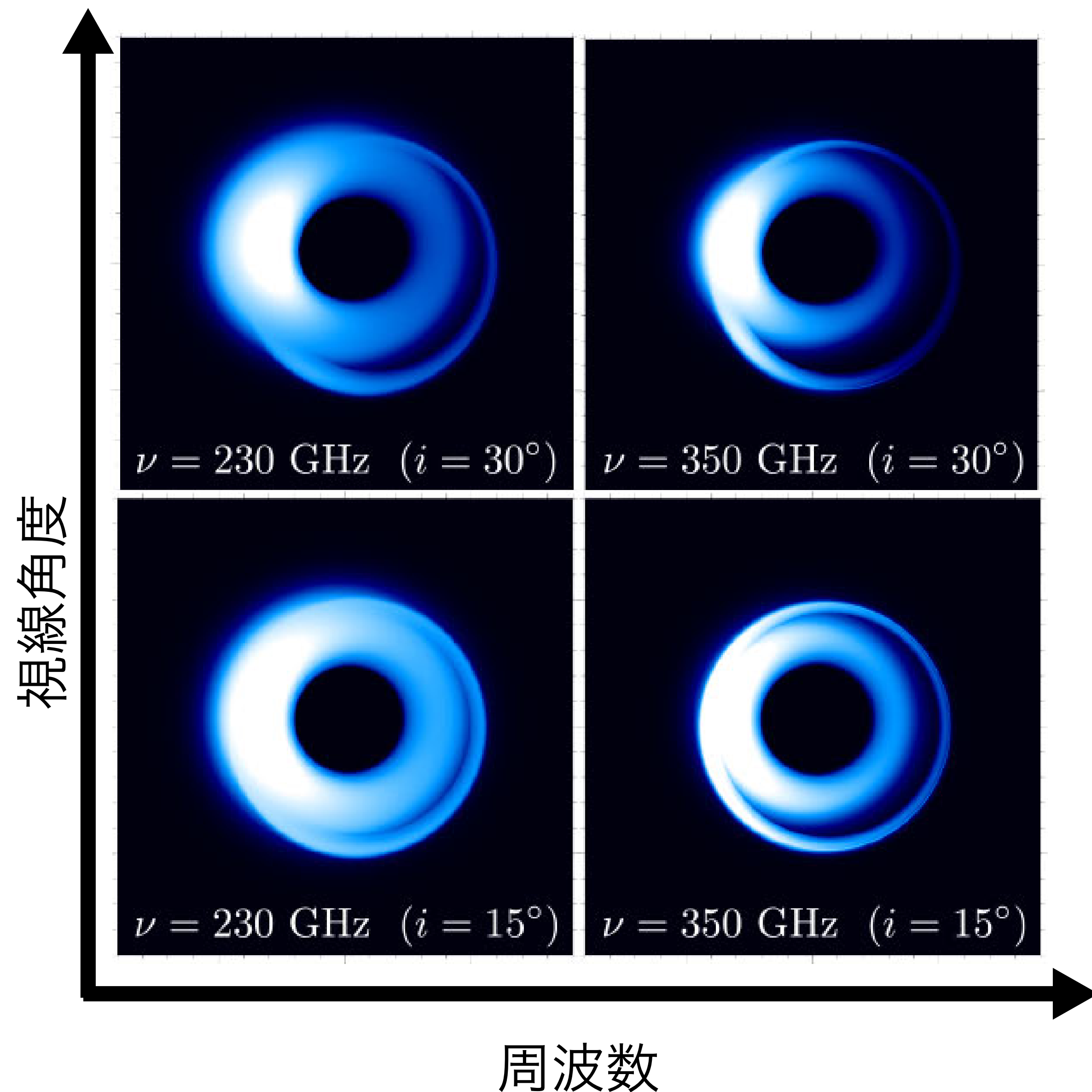


赤道面に射影



- 光子リングは大きさはスピンの依存しないが、位置はスピンの依存(横にシフト)。
これは光子球軌道はスピンに対して順回転、逆回転で大きく半径が変わるため。
- 円盤内縁リングを形成する光子は光子球に乗る必要がないので角運動量の正負にあまり依存しない。

角度と光子周波数依存性



- 高周波数

- 吸収オパシティ減少

- 光学的に厚い円盤内縁縮小

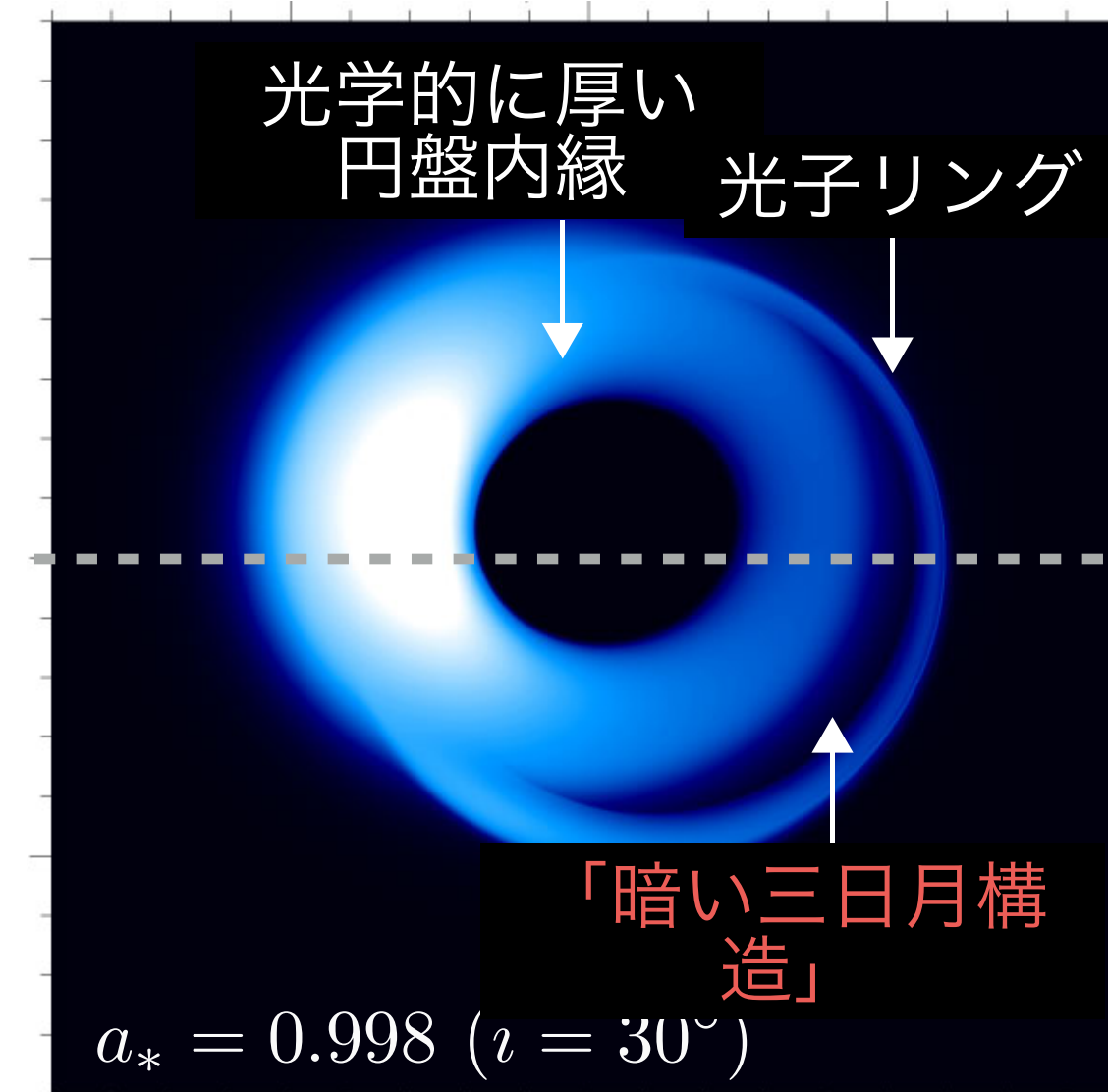
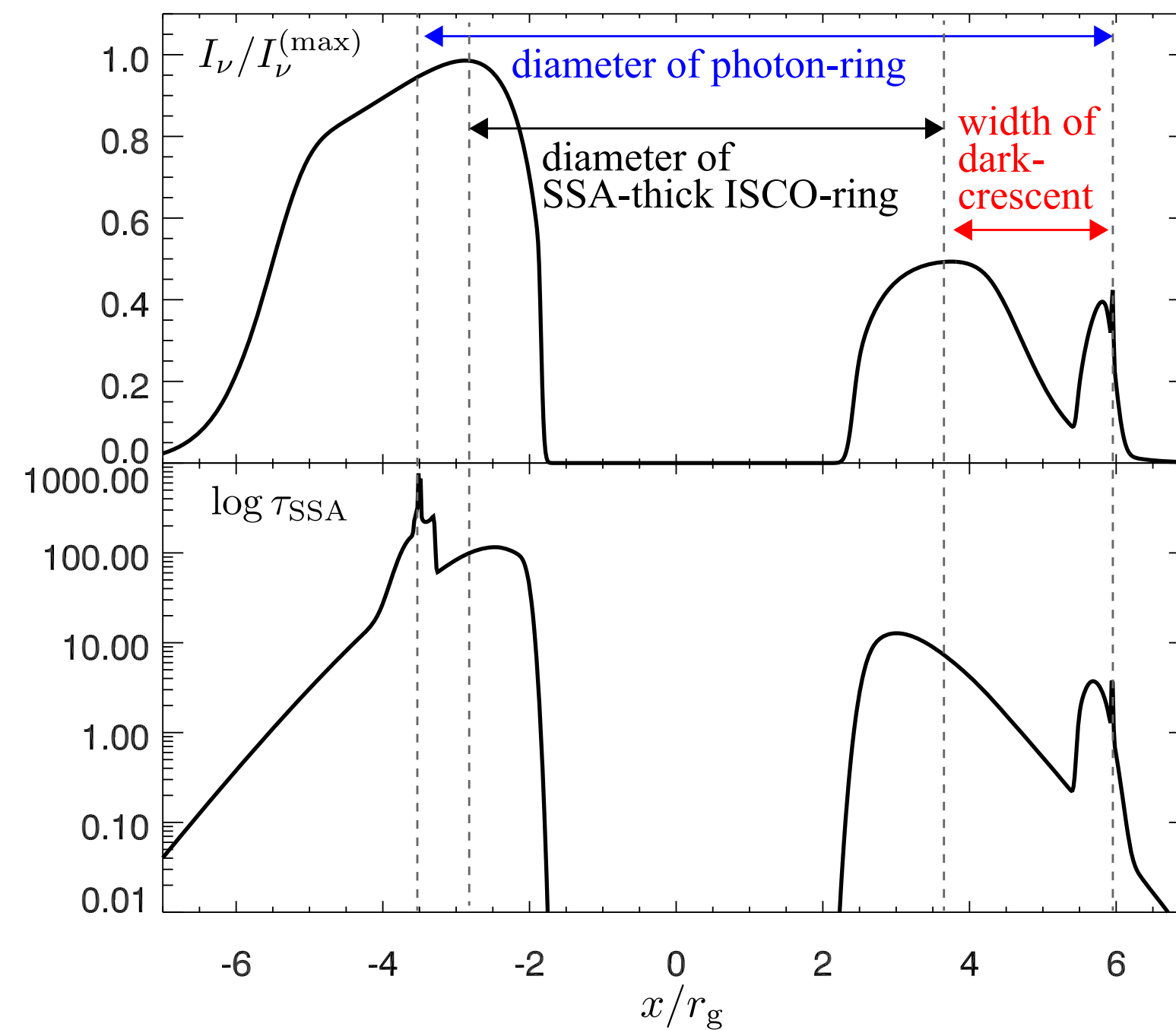
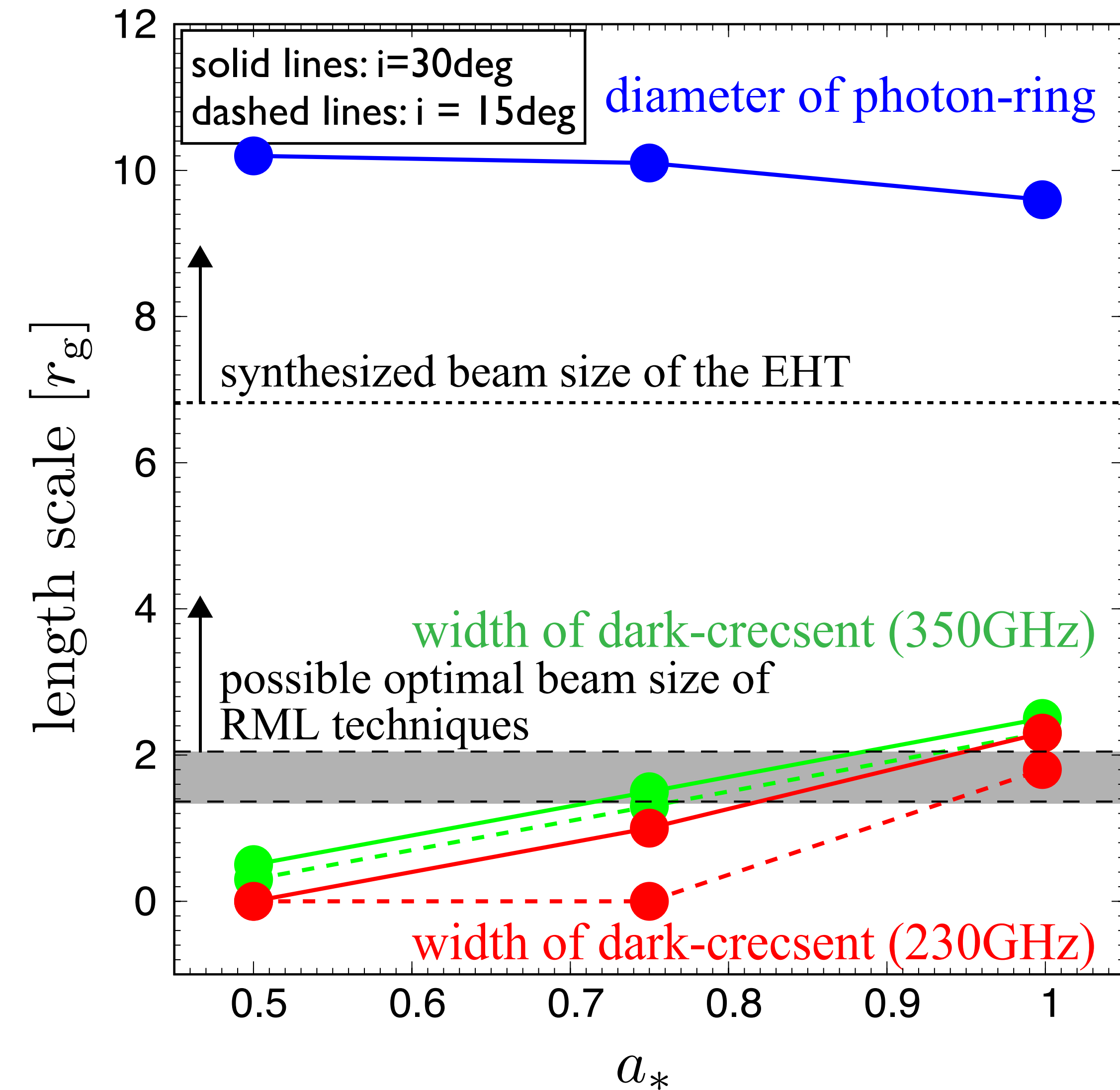
- **暗い三日月が大きくなる**

- 小さい視線角度

- 光子リングの位置シフト小

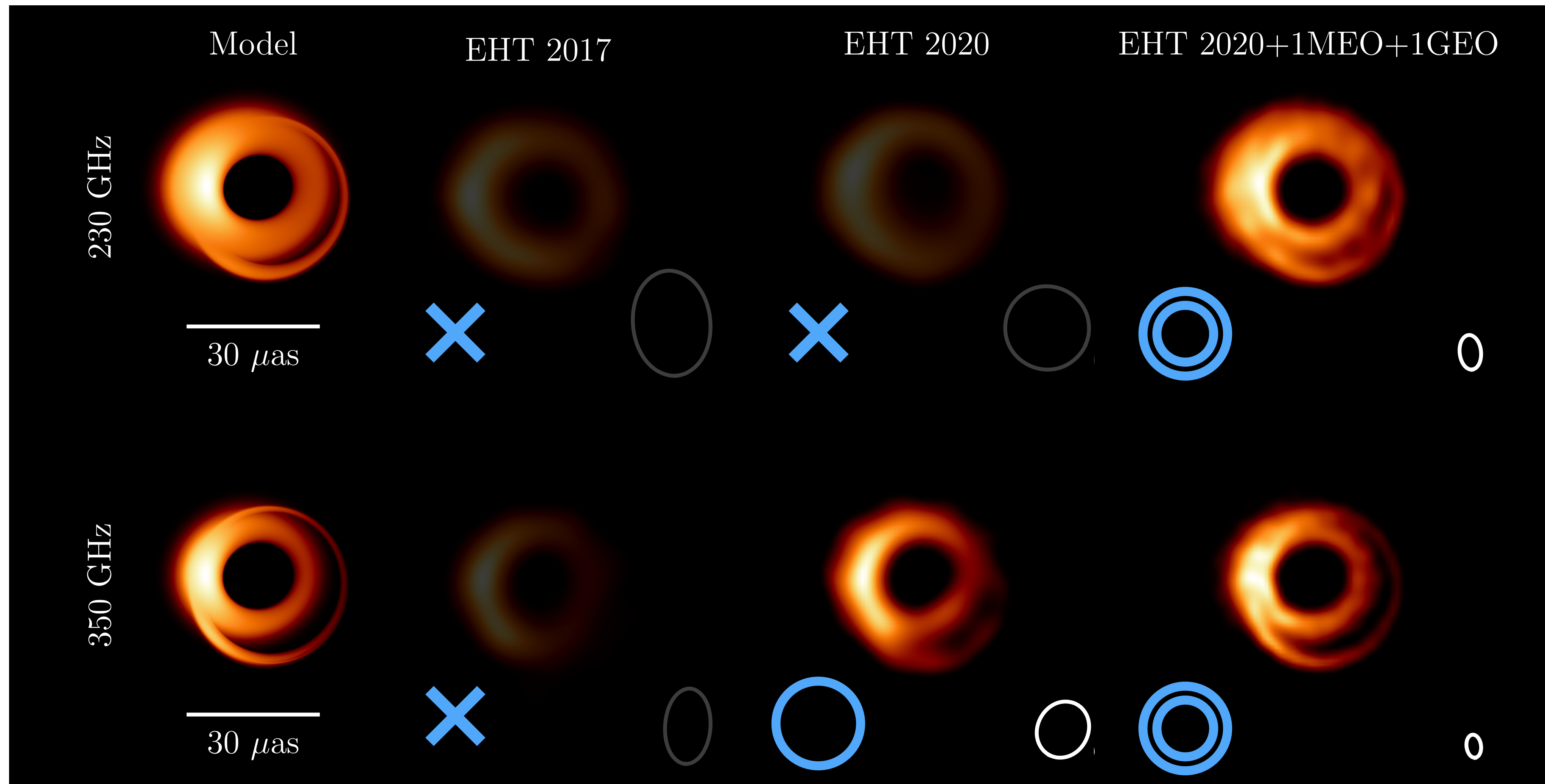
- **暗い三日月は小さくなる、しかし依然として現れる**

暗い三日月構造のEHTによる観測可能性



ブラックホールスピンの場合 > 0.8 以上のとき EHT 2017 で解像できる？

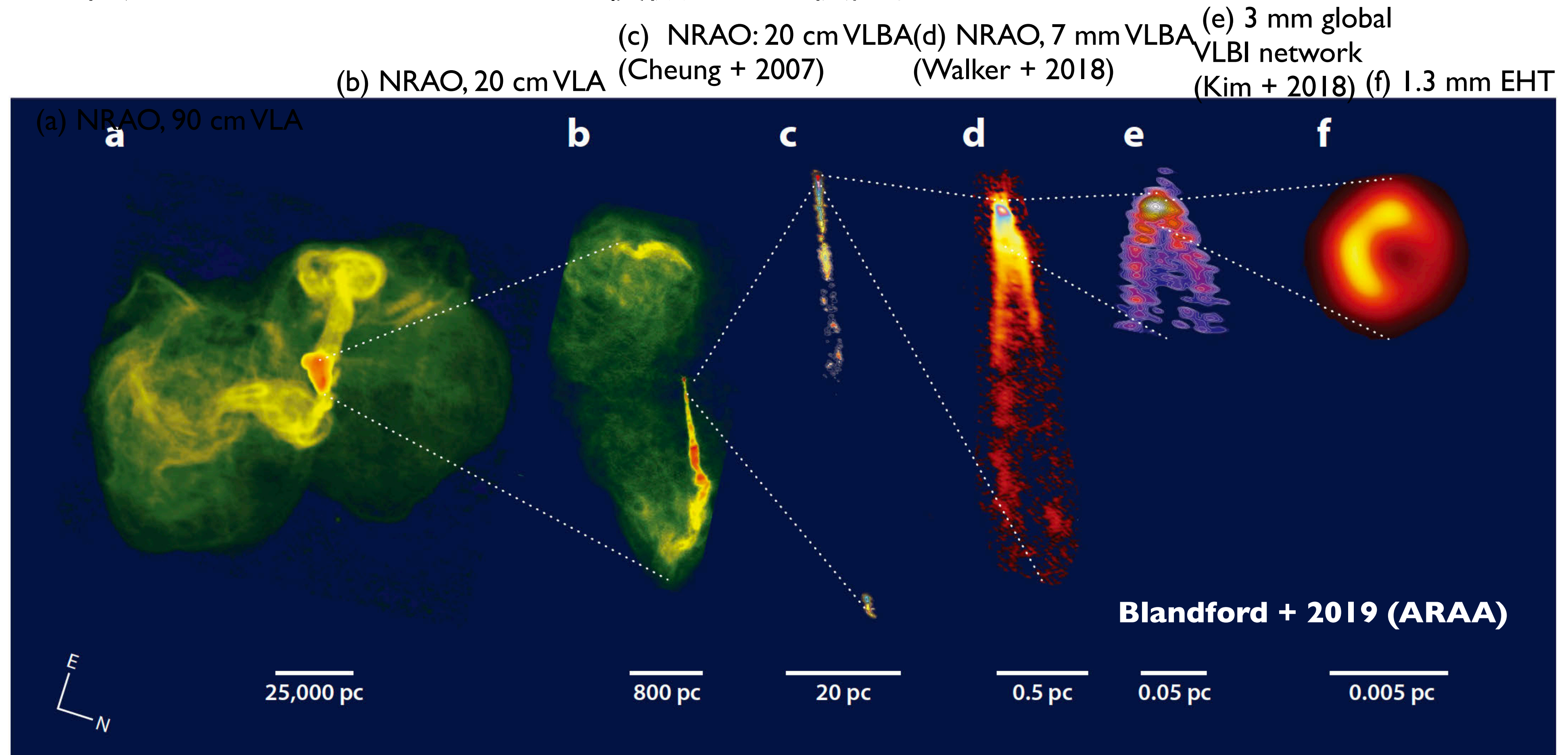
理論イメージの模擬観測



- **2020年代のspace-VLBIに拡張されたEHTがあれば観測可能！**
- **230GHzと350GHzを組み合わせるとより確実に検出可能。**

ジェット根元の電子陽電子からの電波放射はEHT2017の結果を再現するのか？

- 電波観測で周波数を上げるとジェットは光学的に薄くなる→よりジェット根元が見えてくる。
- ジェット内の動径速度0の面(よどみ面)で電子陽電子注入の可能性(Broderick & Tchekhovskoy 2015)
- このジェット根元放射がリングイメージを模倣するか検証。



モデルセットアップ

• 淀み面の底はjet funnelの外壁付近に現れる

→リング状のプラズマを仮定

✓ 淀み面の底の位置： $r = 13, 10, 6.5, 4 r_g$ (r_g は重力半径) for $a_* = 0.5, 0.7, 0.9, 0.99$ (Nakamura + 2018 の一般相対論的磁気流体シミュレーション結果をもとに設定)

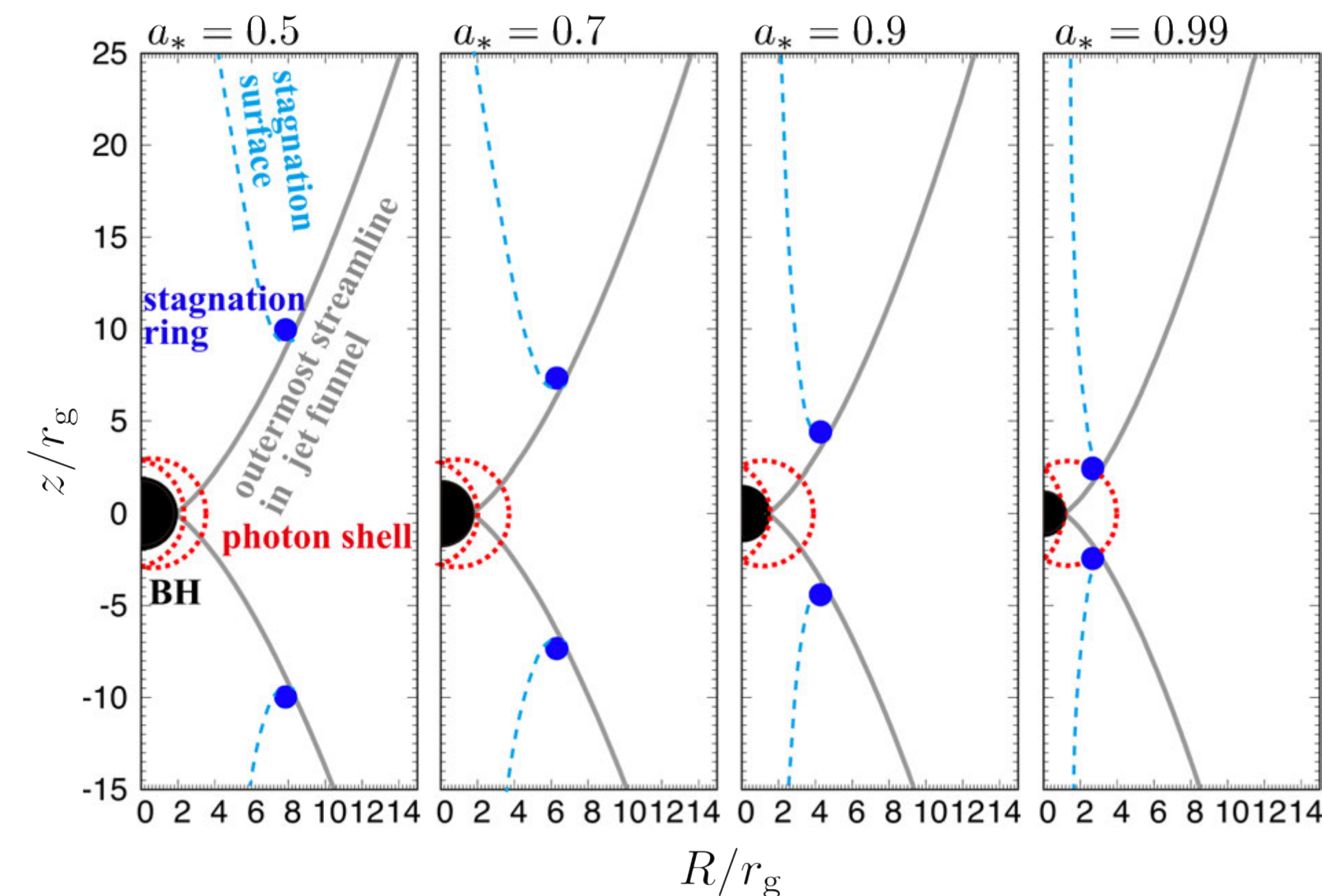
✓ 磁場： $B = 50$ G (Kino + 2015)

✓ 電子陽電子対プラズマ密度： $n_e = 4.45 \times 10^2, 6 \times 10^2, 1.75 \times 10^3, 3 \times 10^3$ 1/cm³ for $a_* = 0.5, 0.7, 0.9, 0.99$ (230GHzで0.6 Jyとなるように設定)

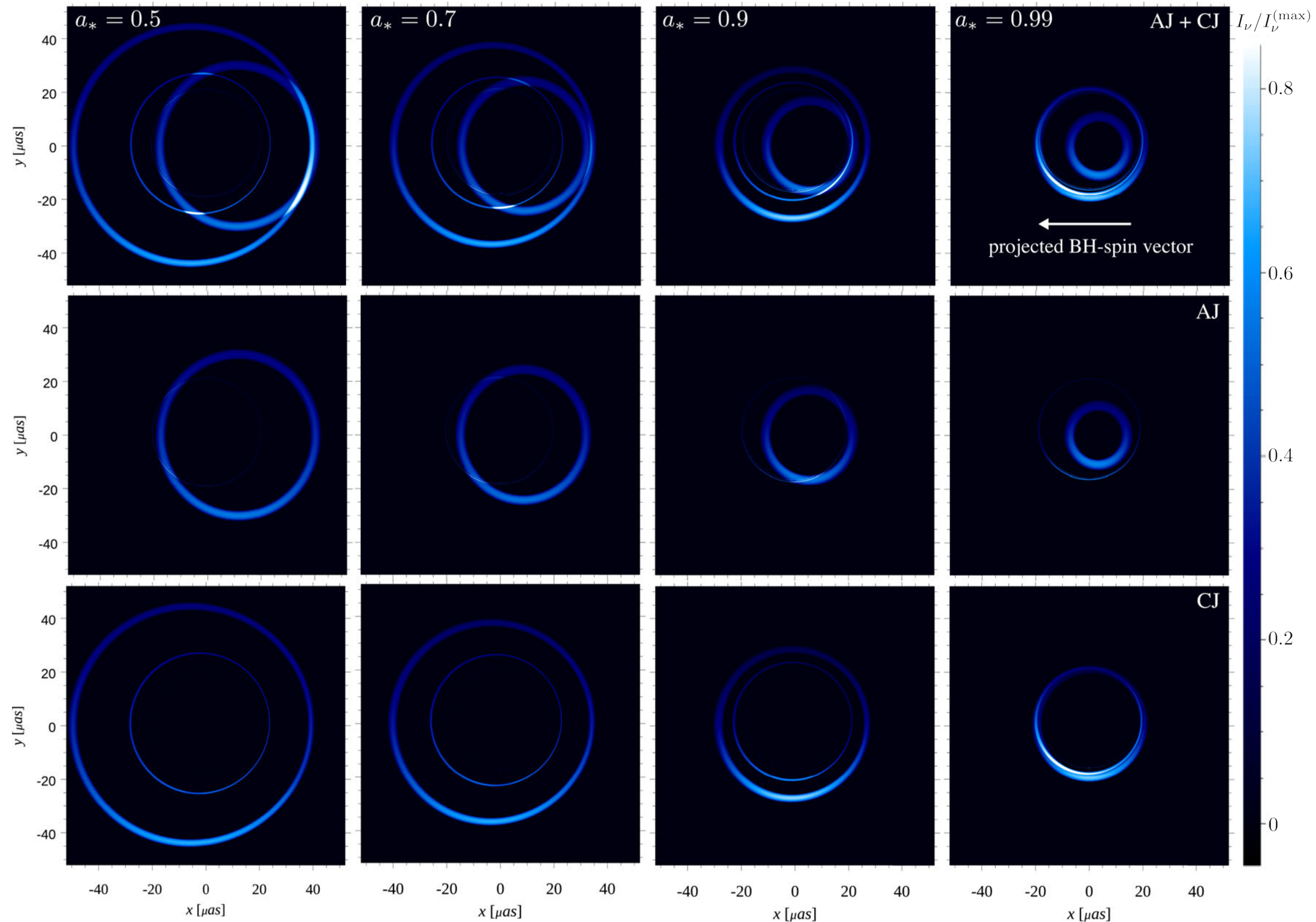
✓ 非熱的電子・陽電子の分布関数：
ローレンツ因子50-5000の範囲で冪分布

✓ 角速度： $\Omega = 0.06, 0.08, 0.15, 0.2 c/r_g$ for $a_* = 0.5, 0.7, 0.9, 0.99$ (Nakamura + 2018で示唆されるBH磁気圏回転角速度)

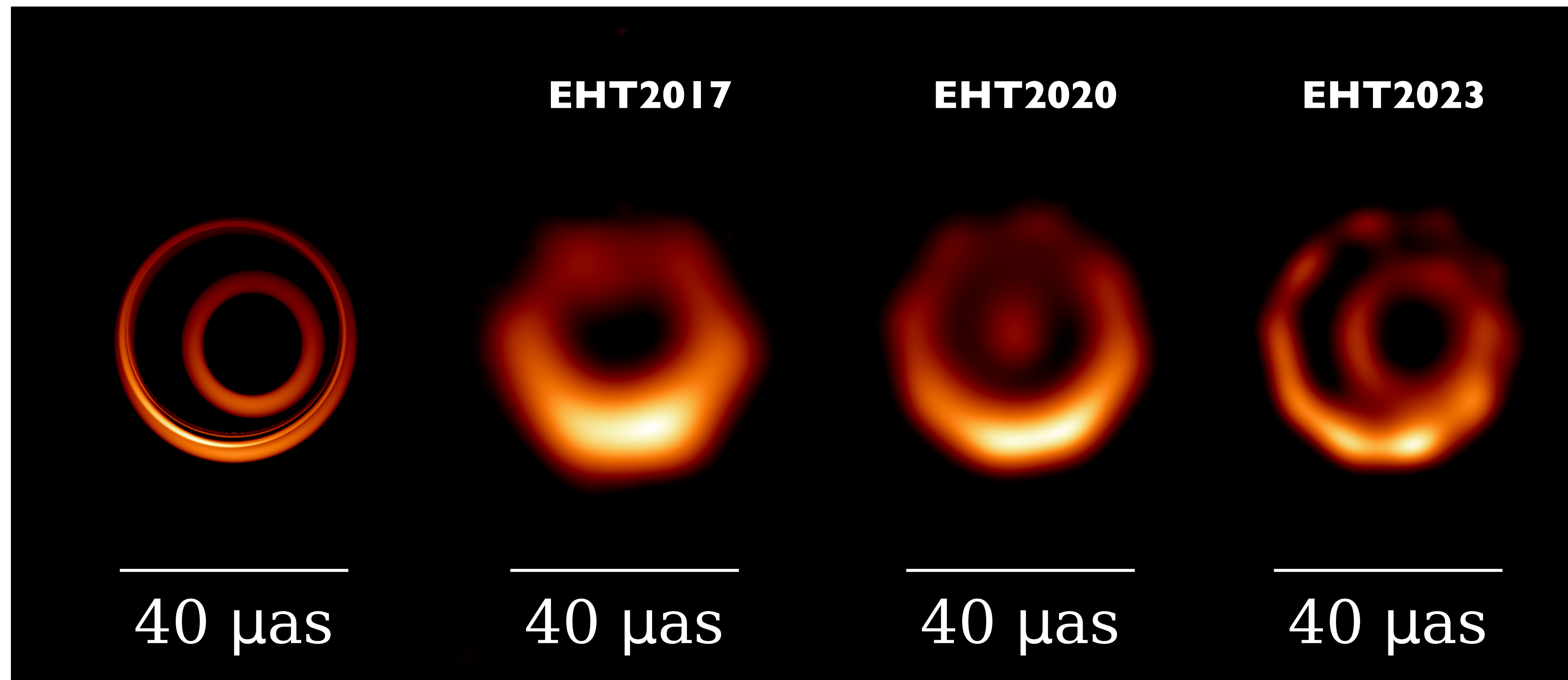
※ BH自転角速度の約半分



stagnation surface の見え方



EHT arrayを仮定した模擬観測

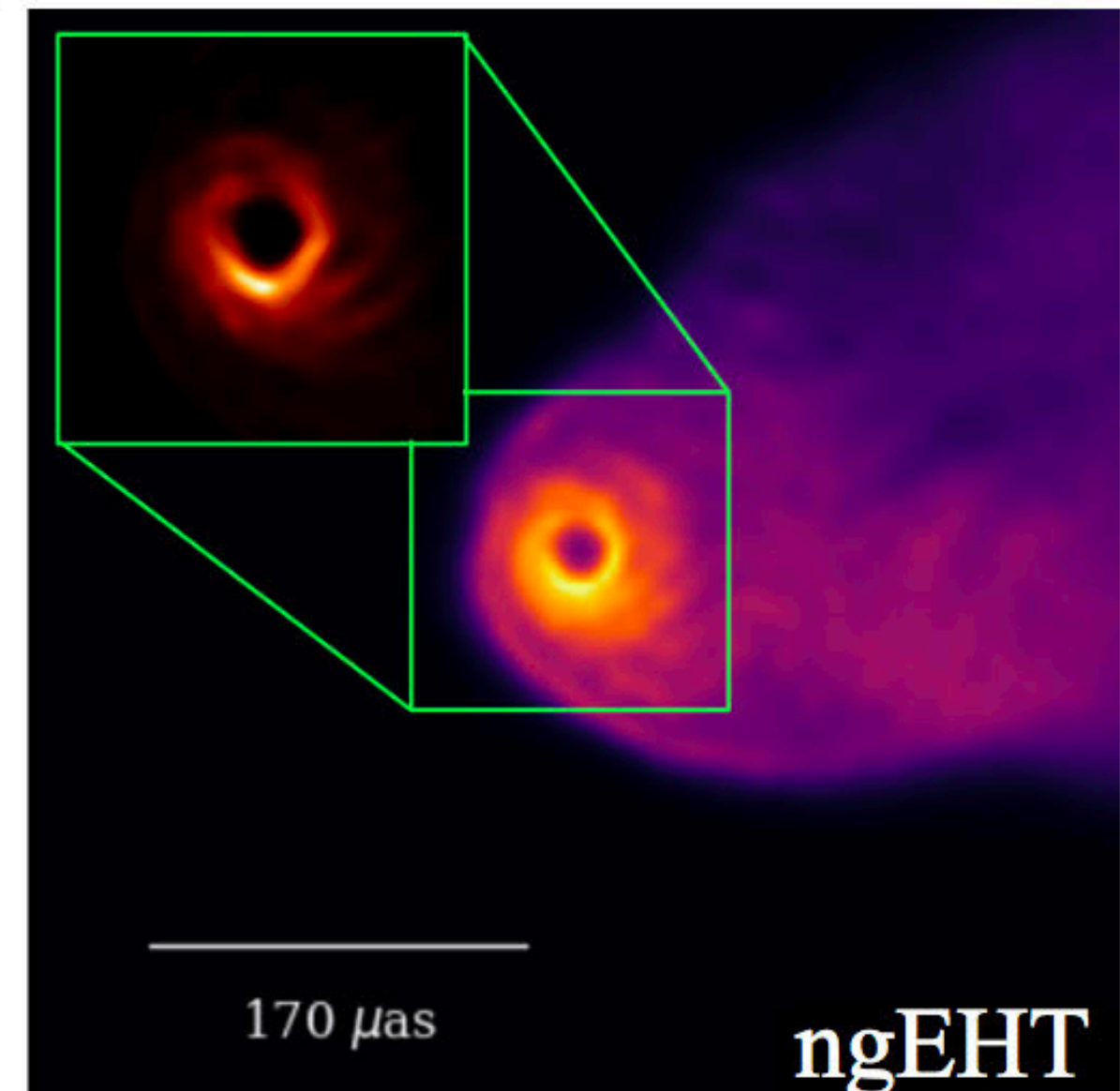
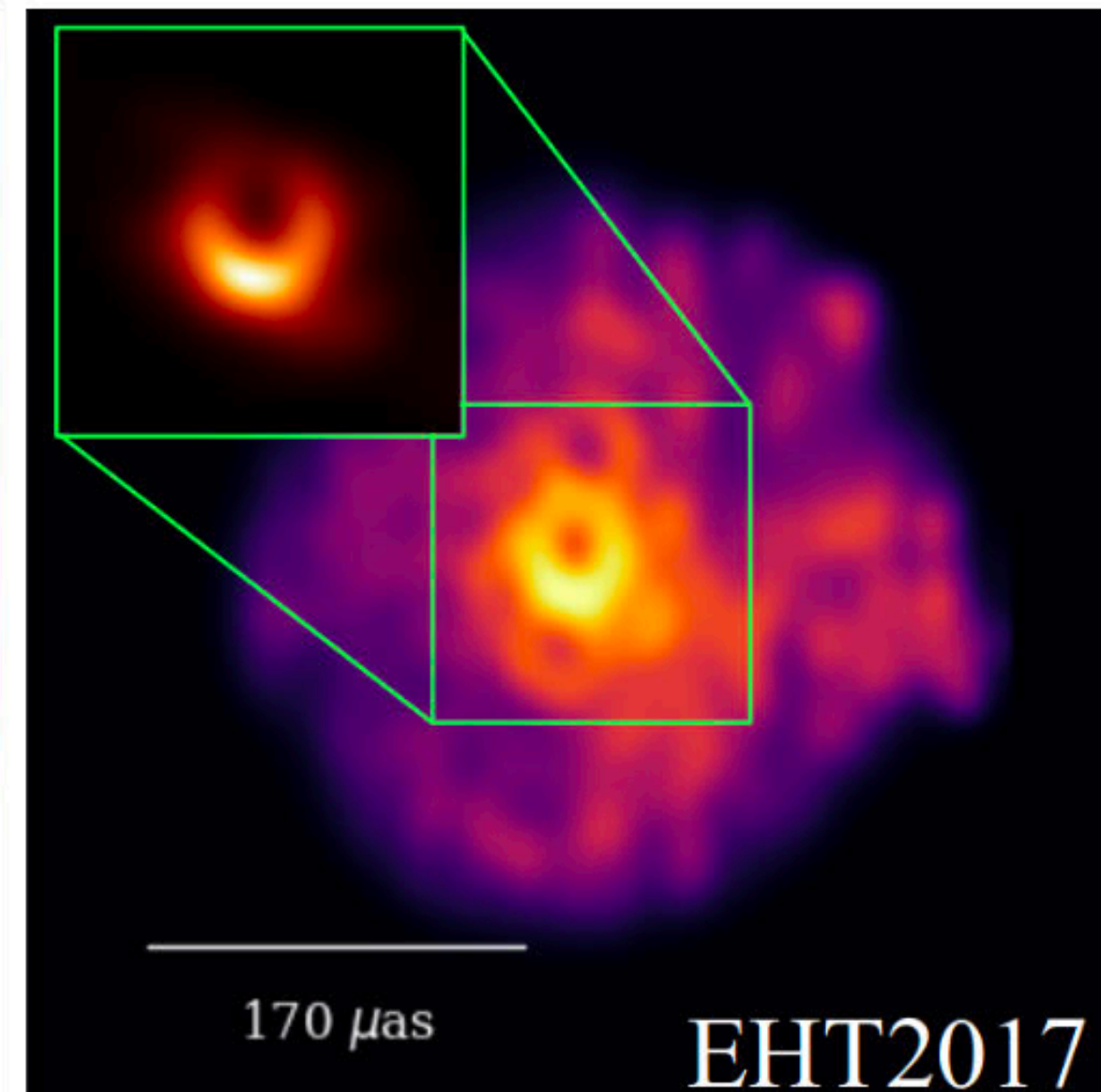
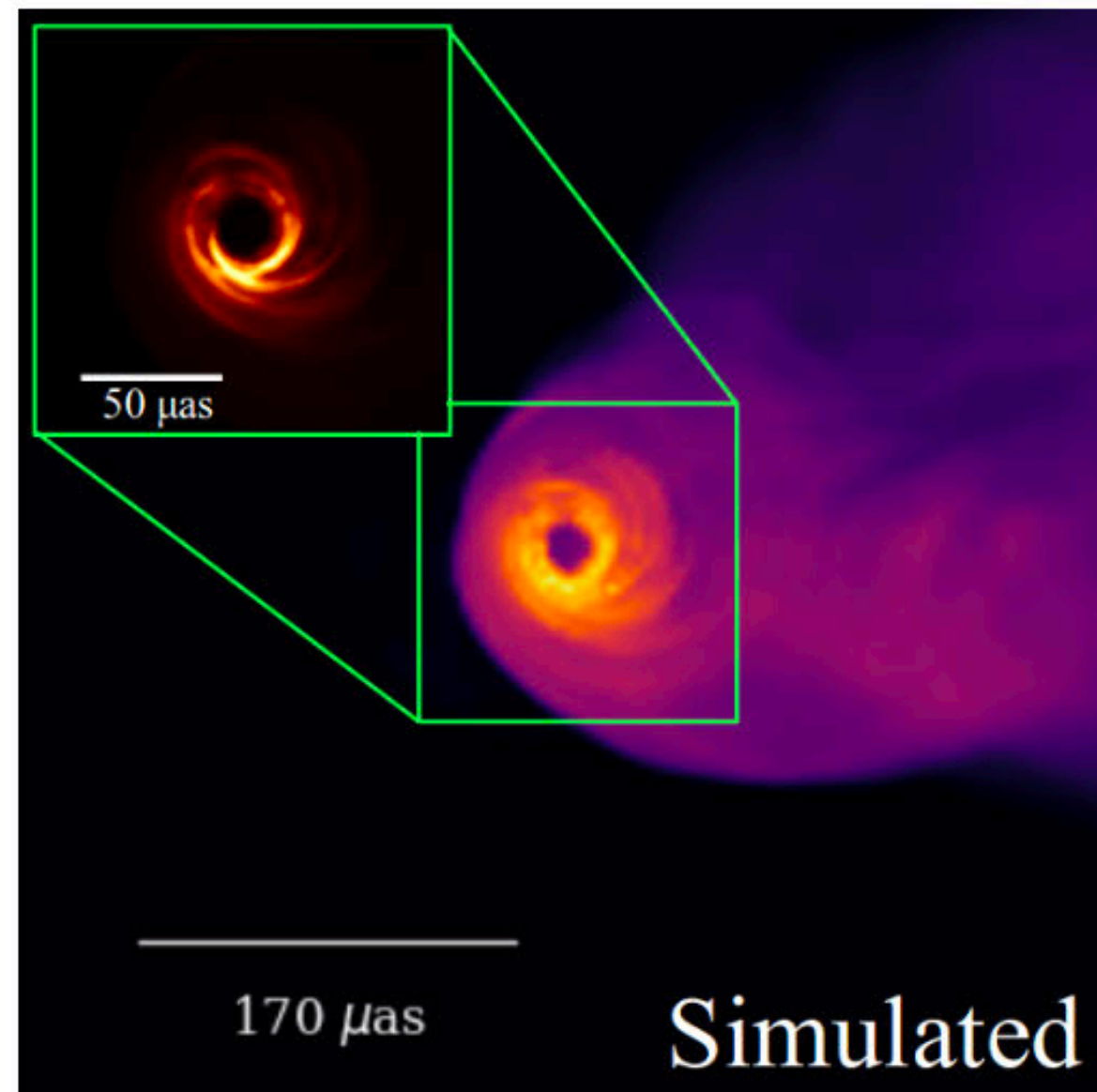


- (Fine tuningモデルだが) これまでのEHT解像度は「光子リング+ジェット根元放射」で観測再現。
ジェットの重要情報を含む可能性あり。
- 近い将来のEHTで検証可能。(Kawashima, Toma et al, to be submitted)

次世代EHTによる大局的なジェットの観測に向けて

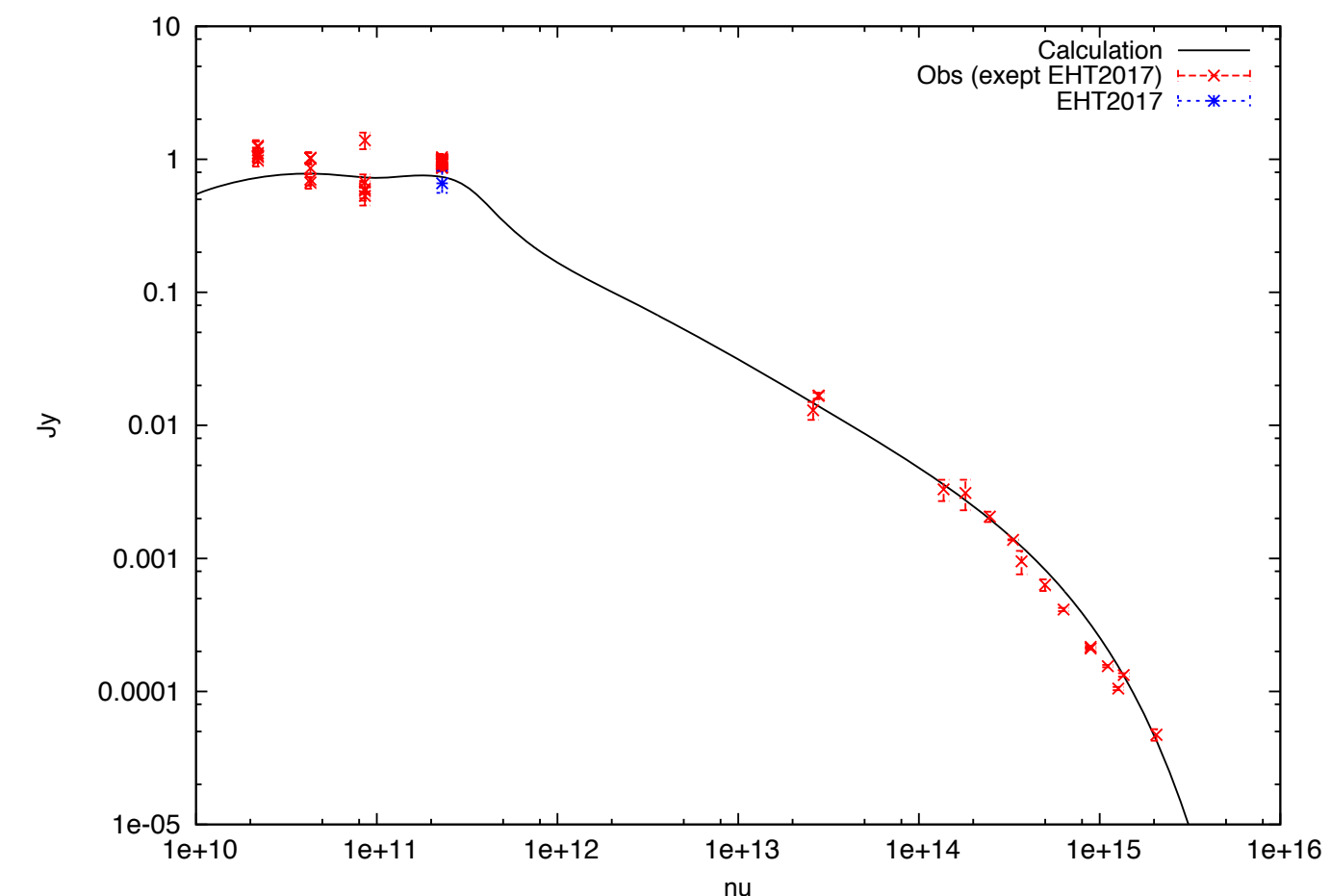
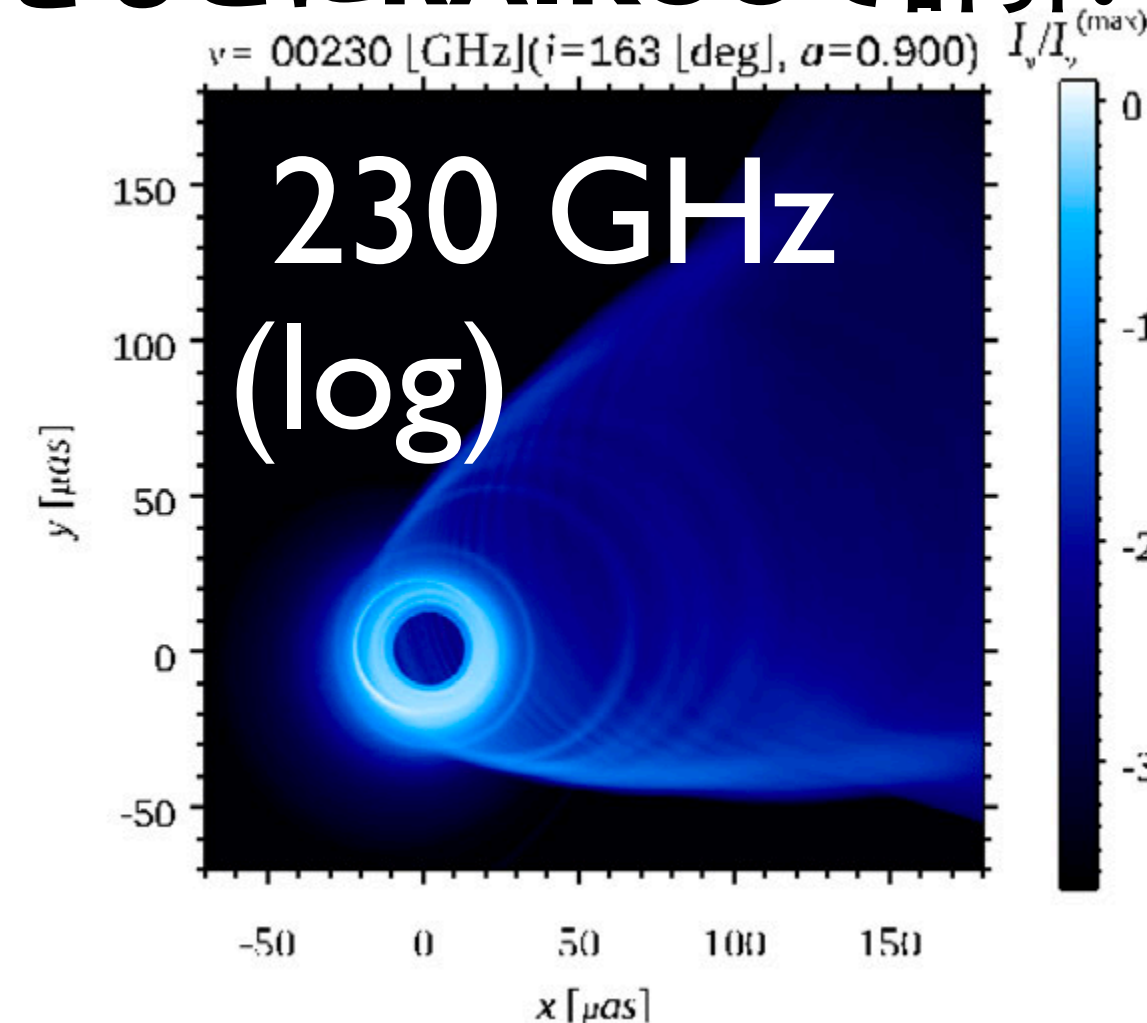
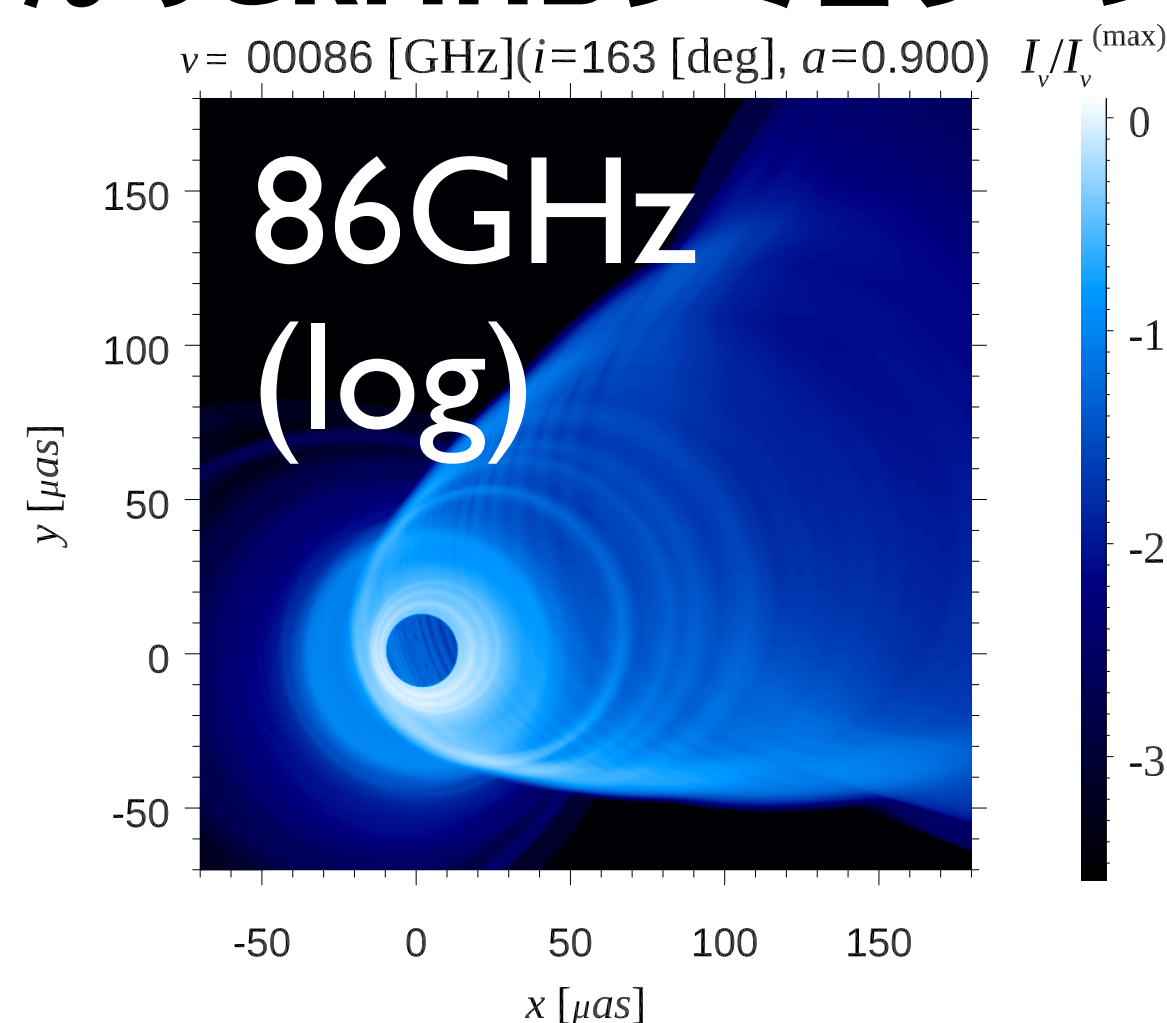
- 短基線のアンテナを増やすと大局的なジェットが解像できてくる。
- ジェットの根元(プラズマ注入ポイント)とともに重要な知見が得られると期待。

Blackburn et al. 2019
 astro2020 white paper
 (GRRMHD simulation: Chael + 2019)



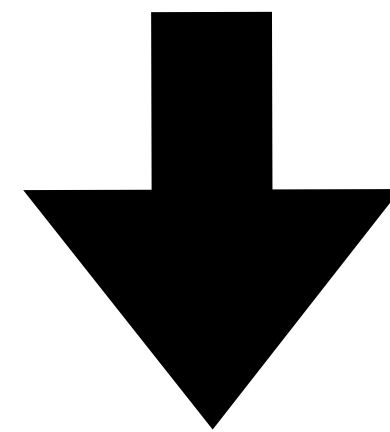
我々も非熱的電子を含むモデルを構築中

(中村雅徳さんのGRMHDシミュレーションをもとにRAIKOUで計算. Kawashima, Nakamura et al. in prep.)



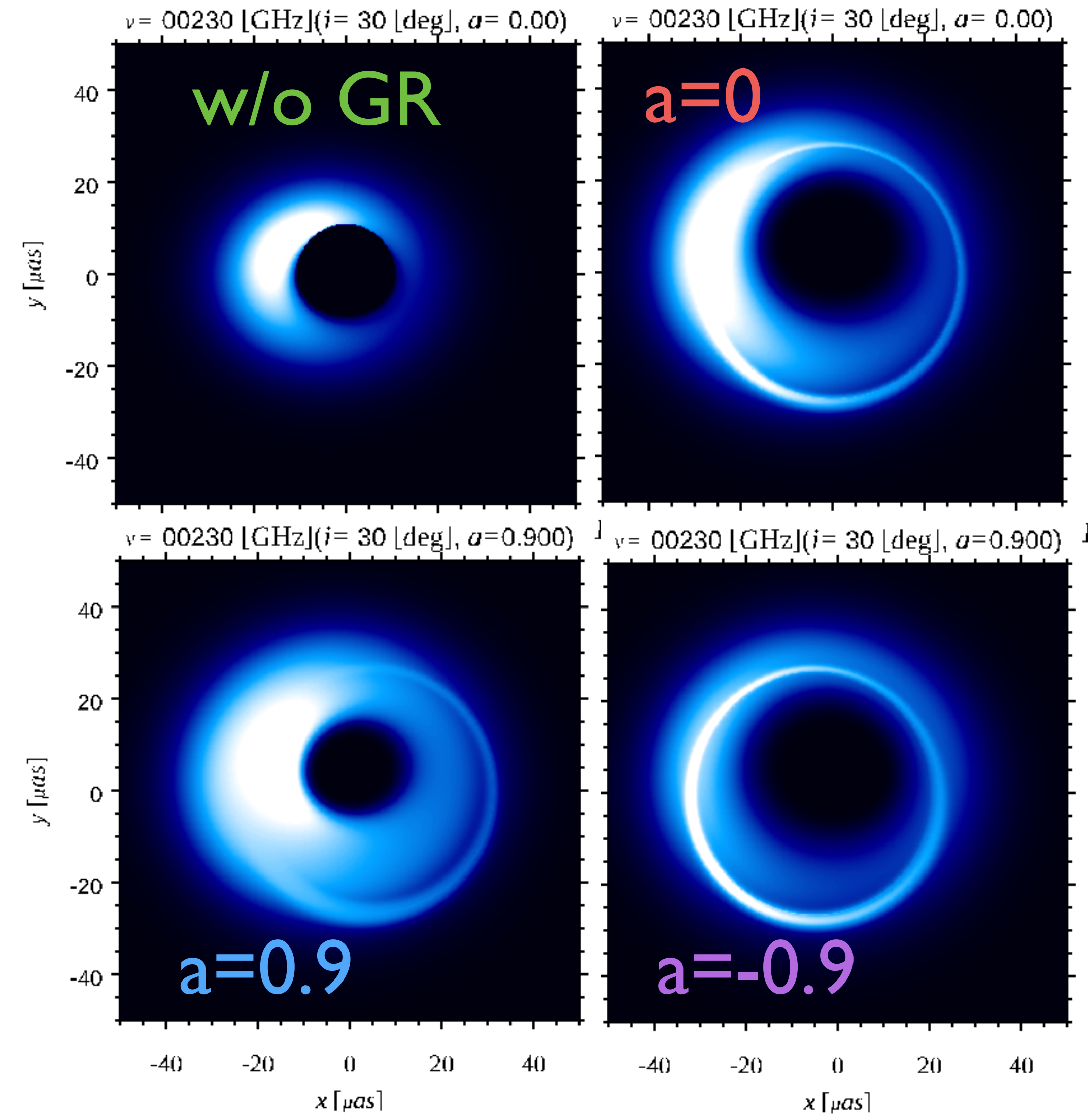
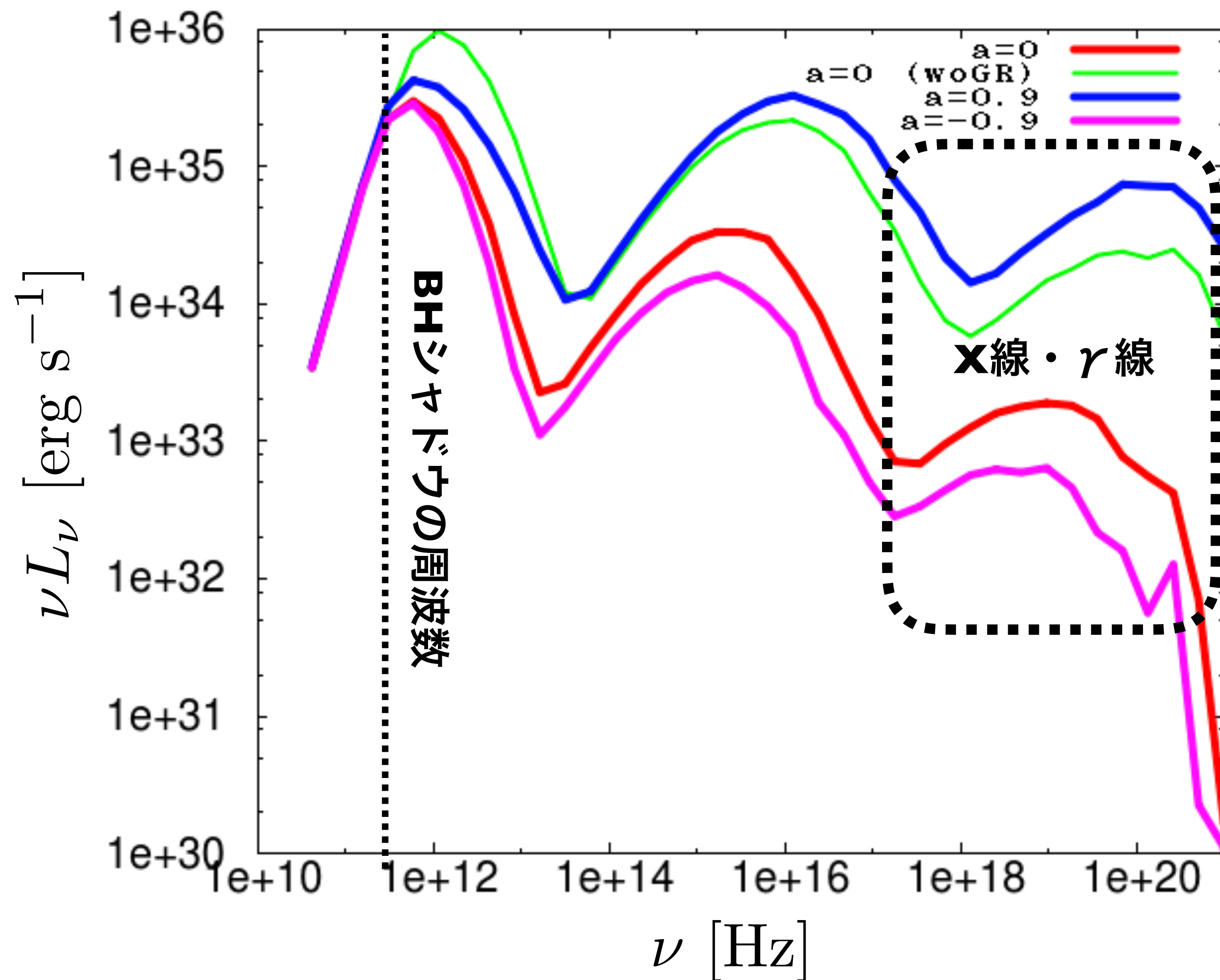
今後の計画

- EHTにより、BH近傍のプラズマからの放射の電波イメージが得られるようになった。
(BH天文学の新時代の到来)
- しかし、電波イメージだけでは、物理パラメータは縮退し続ける可能性。
- 複数の観測情報を組み合わせて物理量を抽出する必要がある。



- BHシャドウ+多波長スペクトル(電波- γ 線)計算。
- BH時空構造や周囲のプラズマのダイナミクス(降着流+ジェット)に関する情報を最大限に引き出す。
- 特に γ 線の時間変動スペクトルからジェットの根元の構造に関する情報を引き出す。

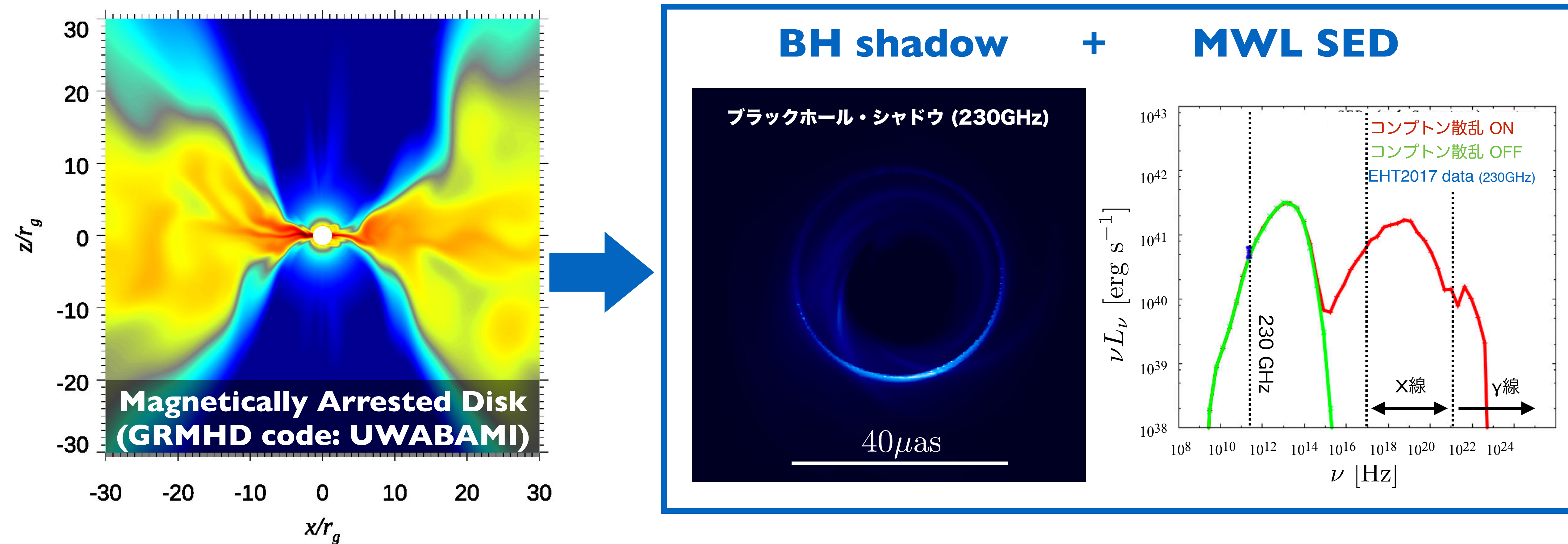
計画例 I) BHシャドウ + 多波長スペクトル (toy model)



• SgrA*の簡易的な放射不良高温降着流モデル

• スピンにより特にX線、 γ 線スペクトルは大きく変わる→ BHシャドウ形状がもし解像度の問題で同じに見えても、BHスピンを探れる可能性あり

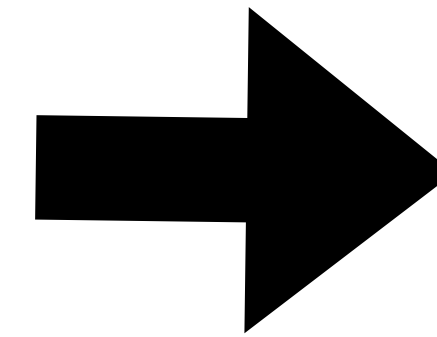
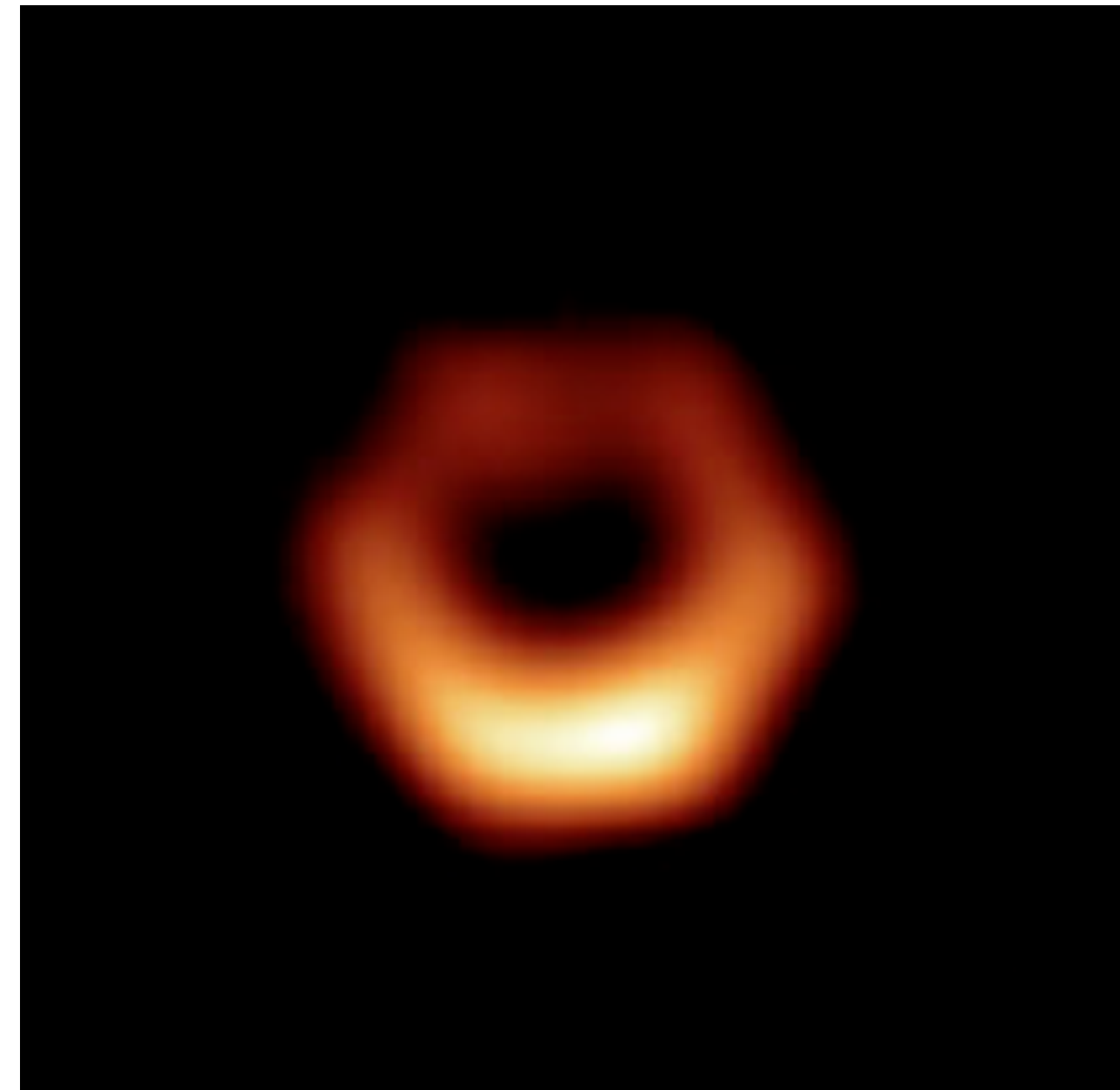
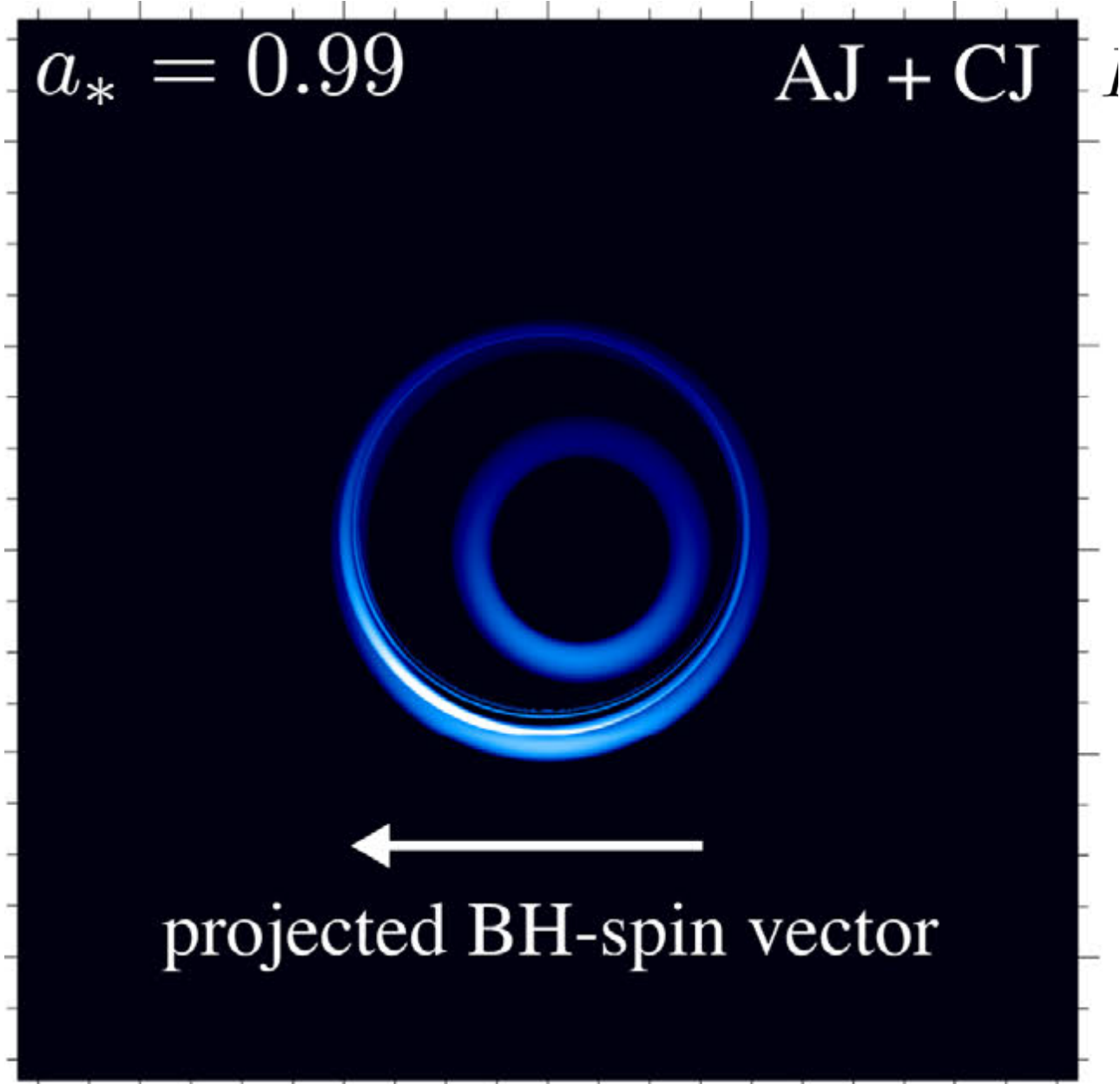
計画例 2) トイモデルから一般相対論的磁気流体シミュレーションへ



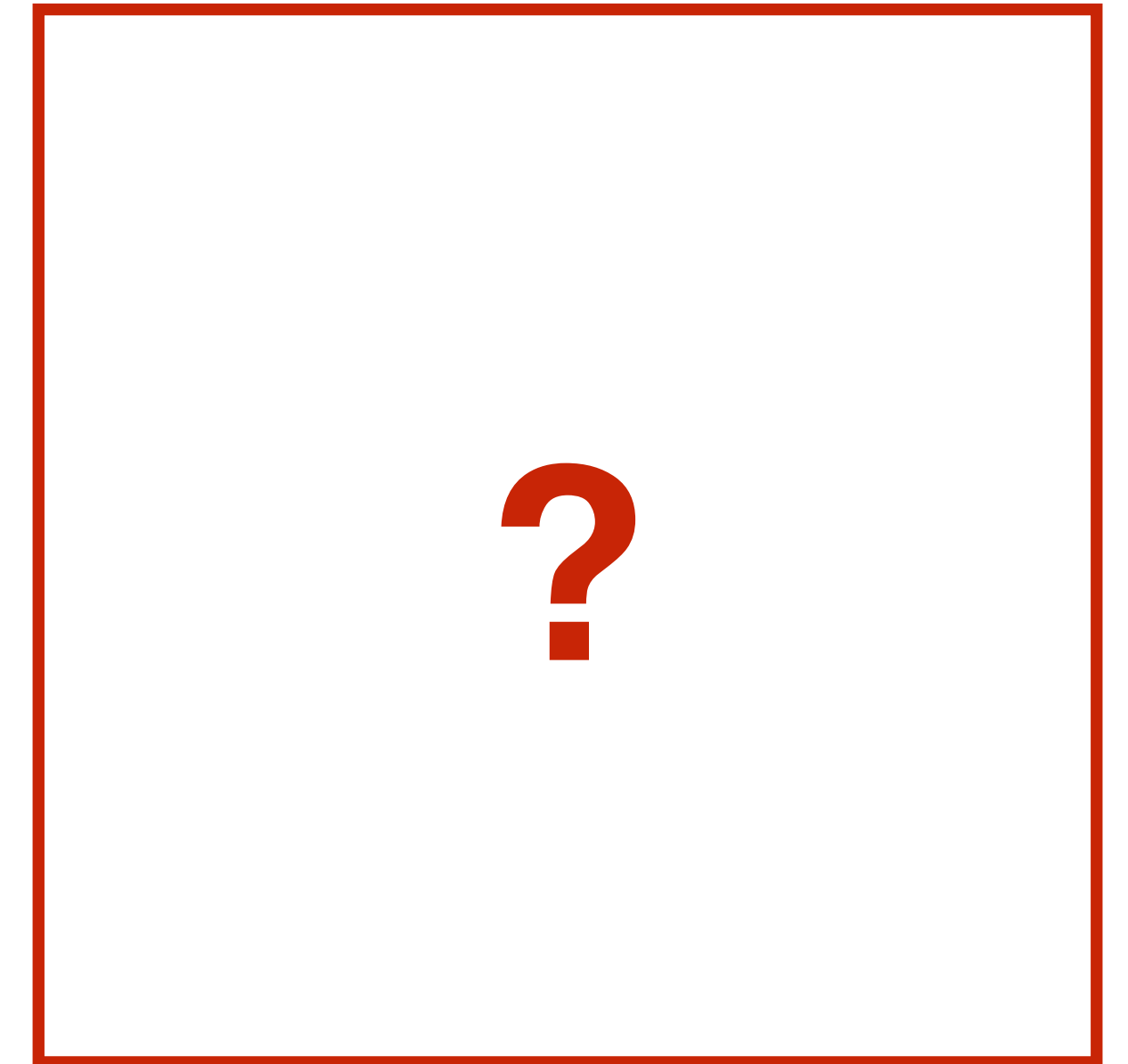
- GRRMHD code UWABAMI (高橋さんのコード)を用いて3次元GRMHDモデル(w/強磁場ジェット, i.e., Magnetically Arrested Disk)の BHシャドウ + 多波長スペクトル計算に着手。
- 多波長スペクトル計算(電波~X線 γ 線)から物理パラメータの抽出可能性を探る予定。

計画例3) γ 線観測との比較によるジェット起源の解明

電波イメージ



γ 線スペクトル



- よどみ面での非熱的電子陽電子モデル(TK+ to be submitted)が γ 線観測と整合的か明らかにする。
- γ 線スペクトル変動も明らかにし、ジェット起源を探る。
- MAGICの観測提案、将来のCTA観測に向けた予言。
- IC310 (MAGIC collaboration 2013)の γ 線観測への応用も視野に。

偏光を考慮した輻射輸送計算へ

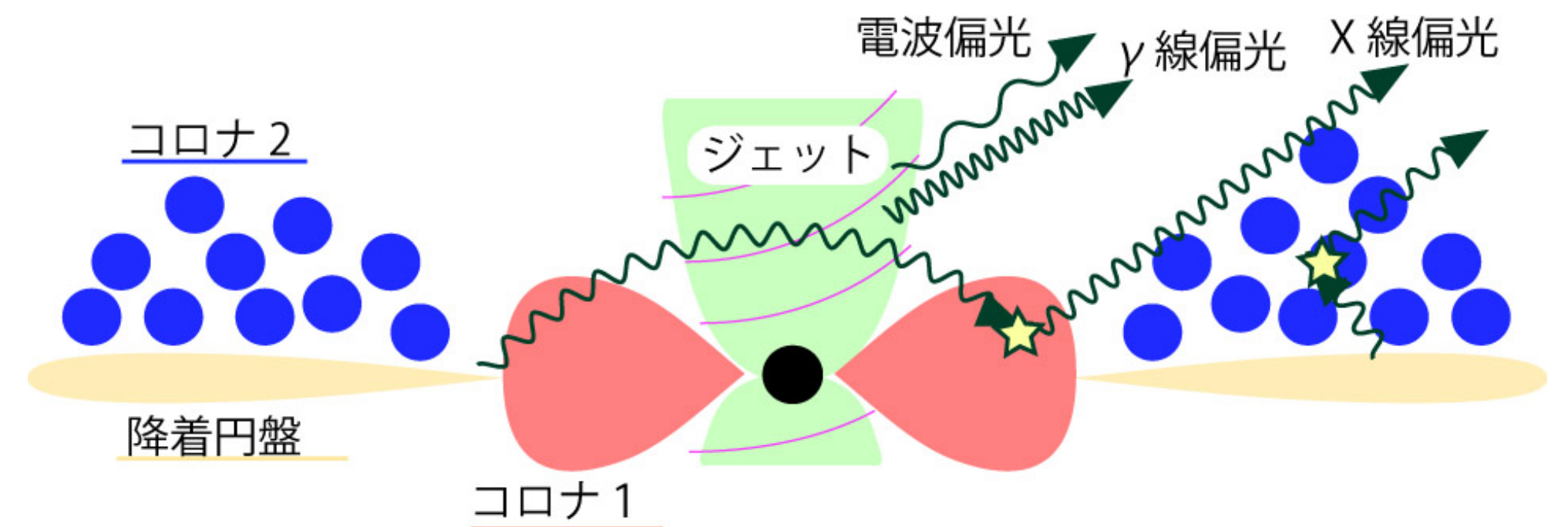
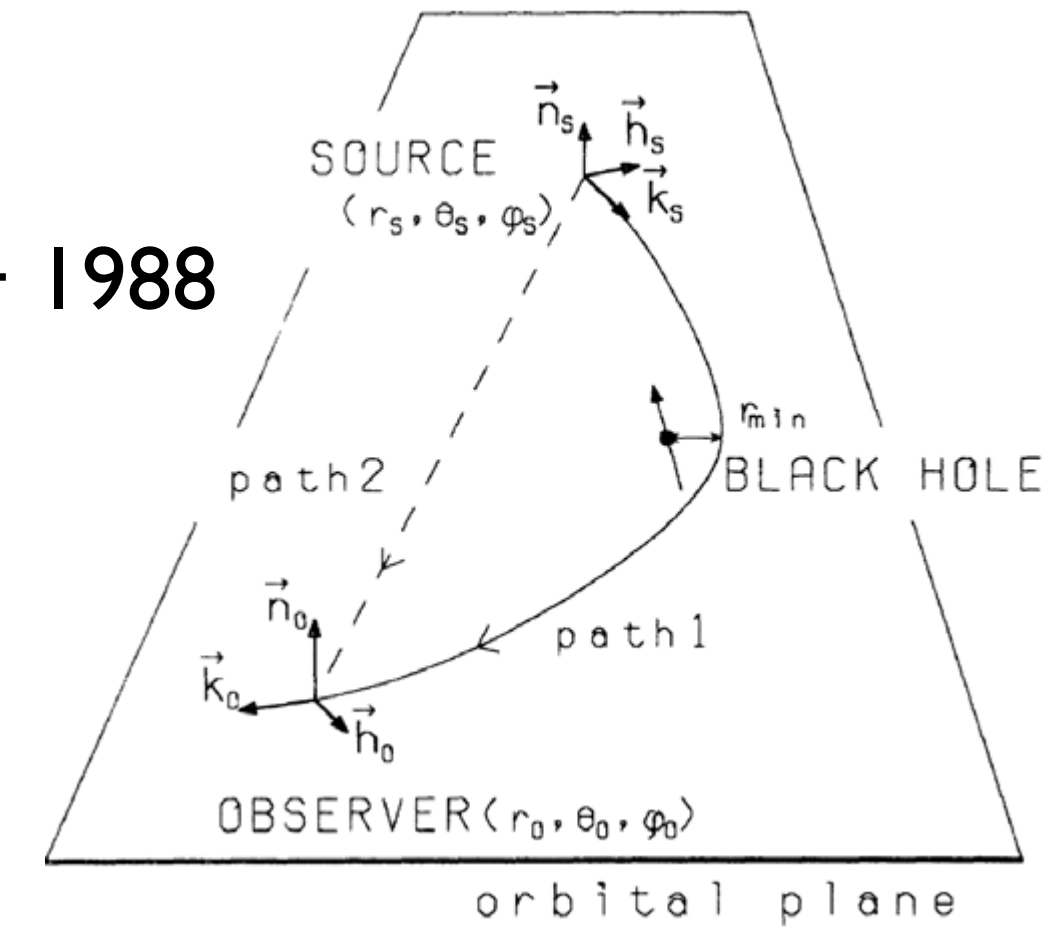
- 偏光 (ストークスパラメータ I, Q, U, V) を含めた輻射輸送で得られる情報は格段に増える！

- ✓ 重力ファラデー回転
→ BHスピンの情報

- ✓ コンプトン散乱
→ 主にプラズマの幾何学的構造 + 速度場
→ 降着流・ジェットの状態

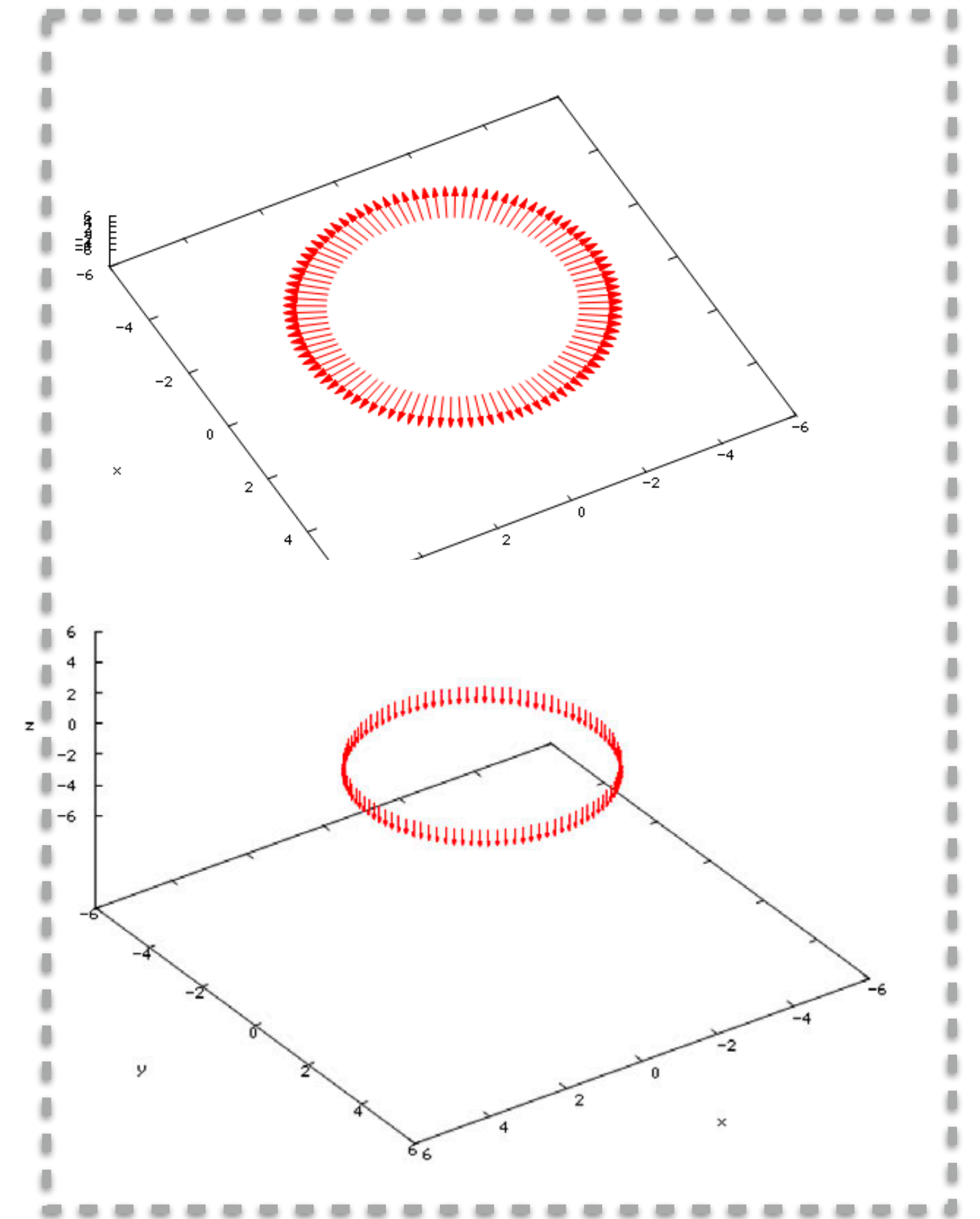
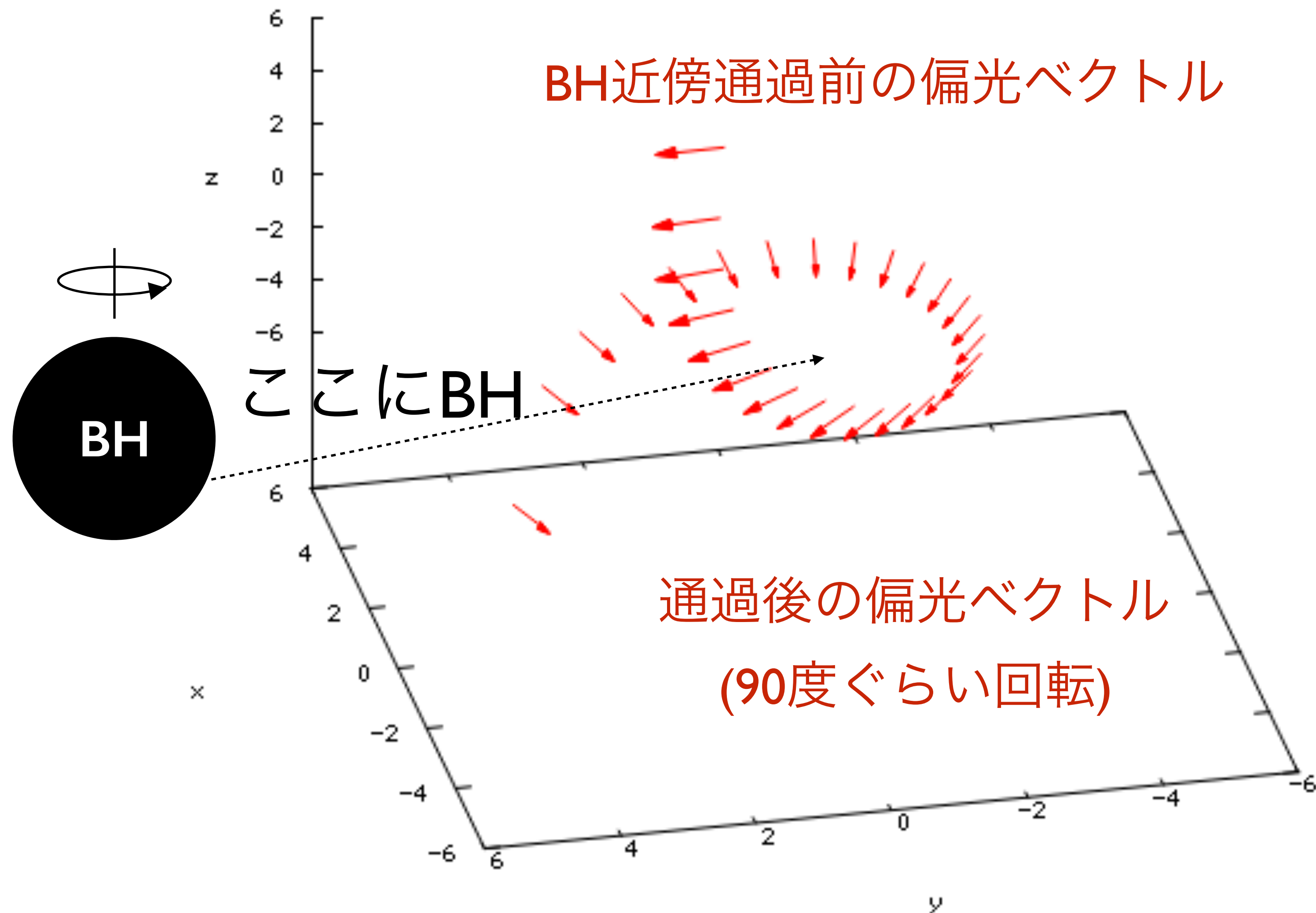
- ✓ シンクロトロン放射、吸収、ファラデー効果
→ 主に磁場の情報
→ ジェット噴出機構

Ishihara + 1988



RAIKOUへの偏光計算の実装 (一般相対論効果)

- 偏光ベクトルの輸送計算のテスト (重力ファラデー回転)
- BHスピンの効果で偏光ベクトルの向きが回転

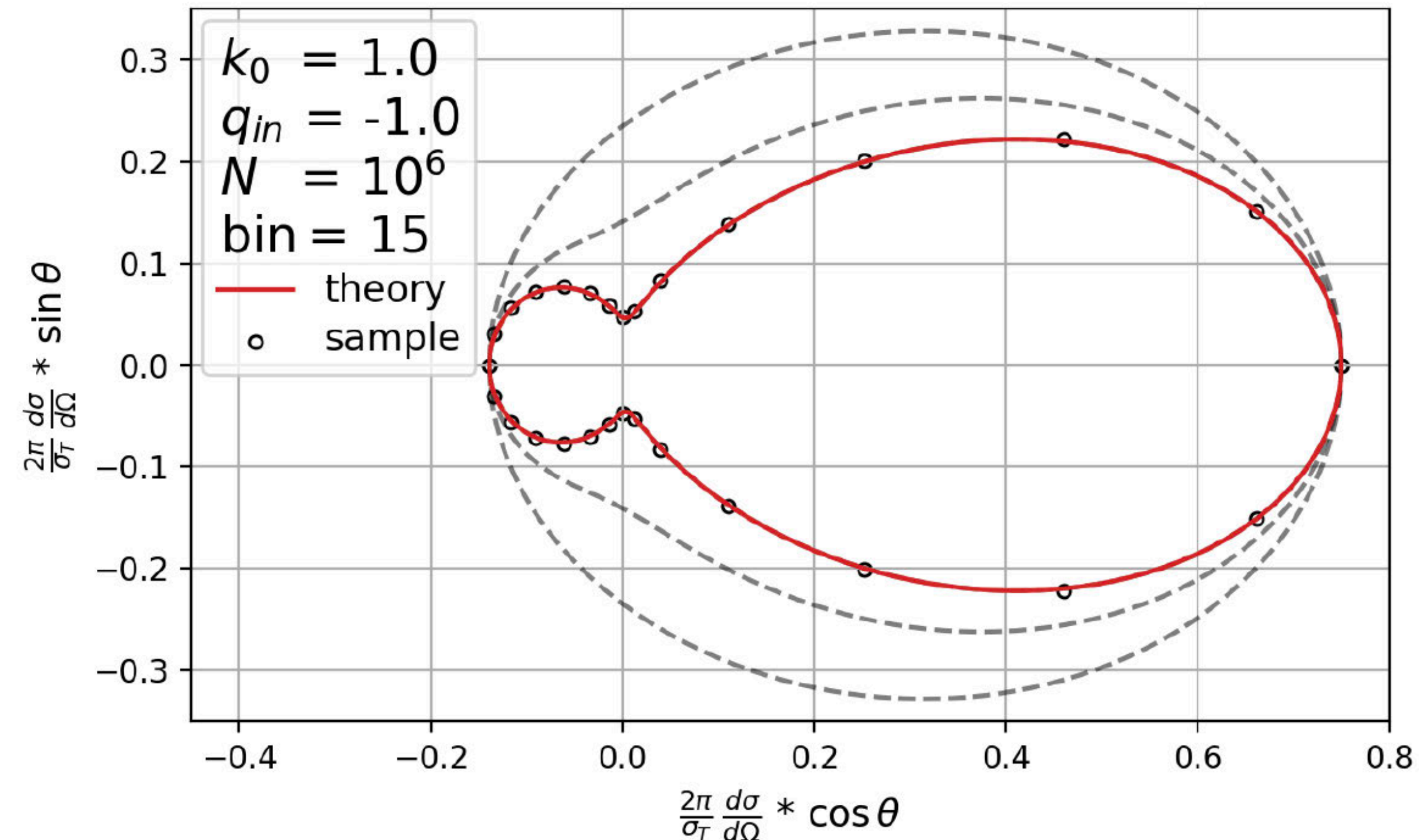


赤道面での輸送テスト

偏光を考慮したコンプトン散乱

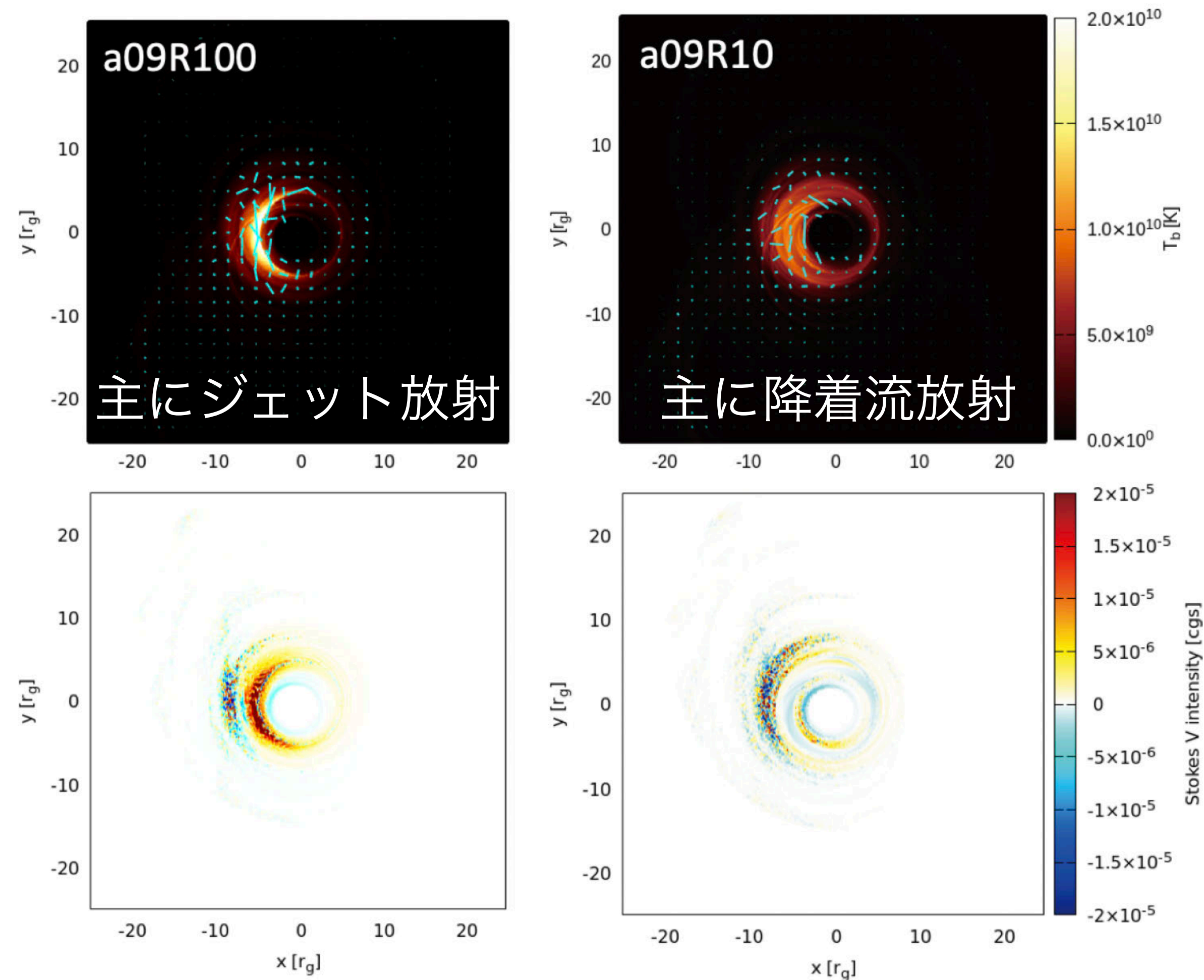
- 筑波大学の学生(岩永君ら)との共同研究
- 直線偏光によりコンプトン散乱の微分断面積は変化
- MC法で計算した光子のコンプトン散乱後の光子の方向は微分断面積の式とコンシステント。

$$\frac{d\sigma_{\text{KN}}}{d\Omega} = \frac{3\sigma_{\text{T}}}{16\pi} \left(\frac{k_0^{\prime e}}{k_0^e} \right)^2 \left[\frac{k_0^{\prime e}}{k_0^e} + \frac{k_0^e}{k_0^{\prime e}} - (1 - q^{\text{e-in}}) \sin^2 \theta \right]$$



シンクロトロン過程・ファラデー効果

- 京大院生(恒任君)との共同研究 (Tsunetoe + 2020)
- 直線偏光 + (特に)円偏光 から放射源 (降着流かジェットか)に制限を与えられるかもしれない



まとめ

EHT 2017の到達点

- M87*でBHシャドウが初めて観測された。
- 約65億倍の巨大BHと考えて矛盾がない。
- BH天文学の新しい時代に突入！

残された謎とアプローチ

- BHスピンの大きさがわからない→降着率が高い状態での三日月状シャドウでのスピンの新制限法の提案 (2020年代以降のspace-VLBIに期待)
- ジェット噴出機構→ジェット根元のプラズマ放射の観測(次世代EHTで検証可)
- 上記+降着流ダイナミクス+その他諸々 → X線・ γ 線まで含む多波長スペクトル(+偏光)から新たな情報を引き出せないか検証を始めている。