

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

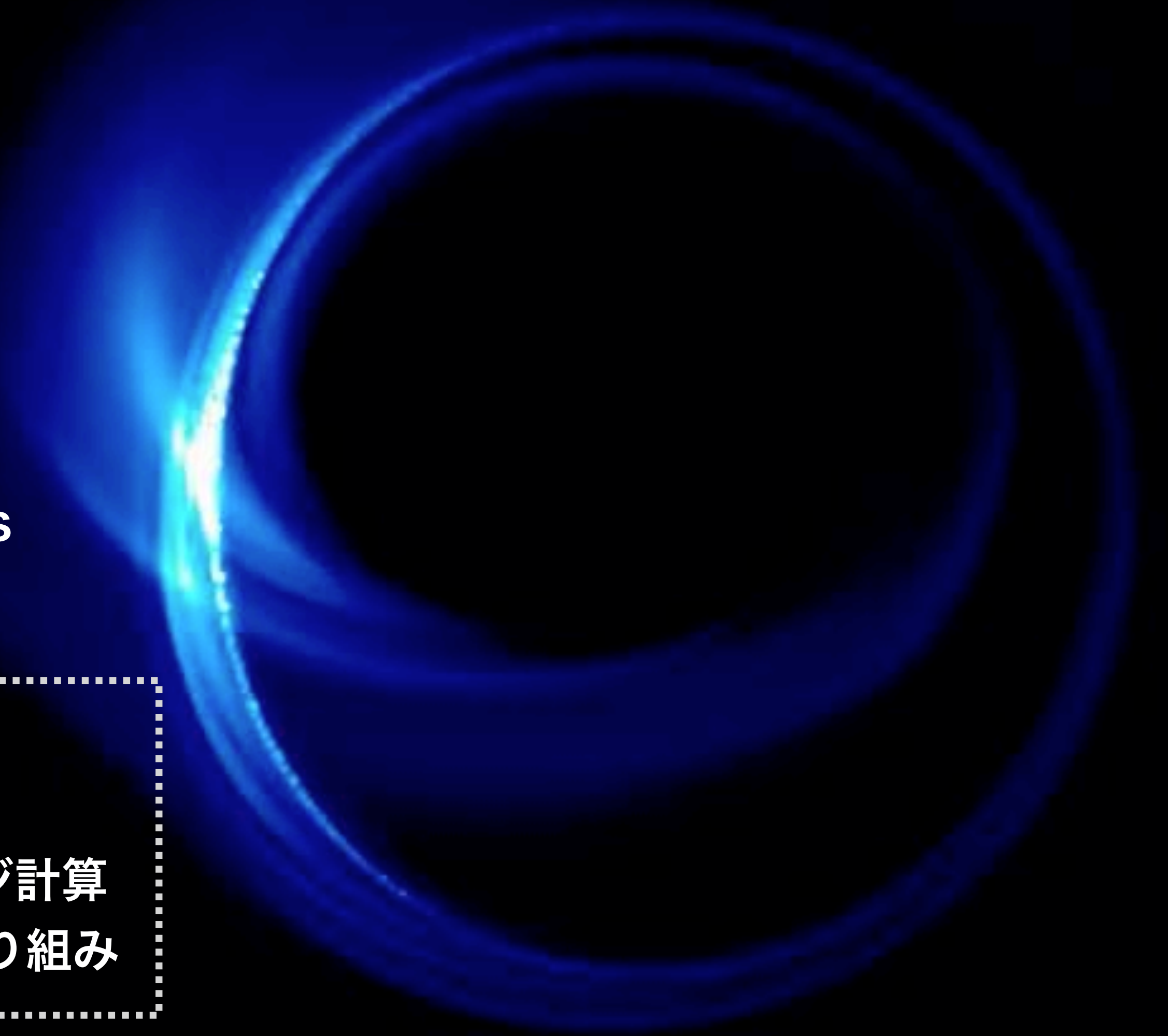
川島 朋尚 (東大宇宙線研)

主な共同研究者(50音順)

秋山 和徳 (NRAO/MIT), 大須賀 健 (筑波大),
紀基樹 (工学院大/国立天文台), 高橋博之 (駒澤大),
當真賢二 (東北大), 中村雅徳 (八戸高専),
森山小太郎 (MIT), EHT Collaboration members

本日の内容：

- 1) 導入(BH天文学やEHT関連の理論的課題)
- 2) BHスピン制限・ジェット噴出機構解明に向けたイメージ計算
- 3) (非熱的電子を含む)多波長スペクトル計算についての取り組み



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

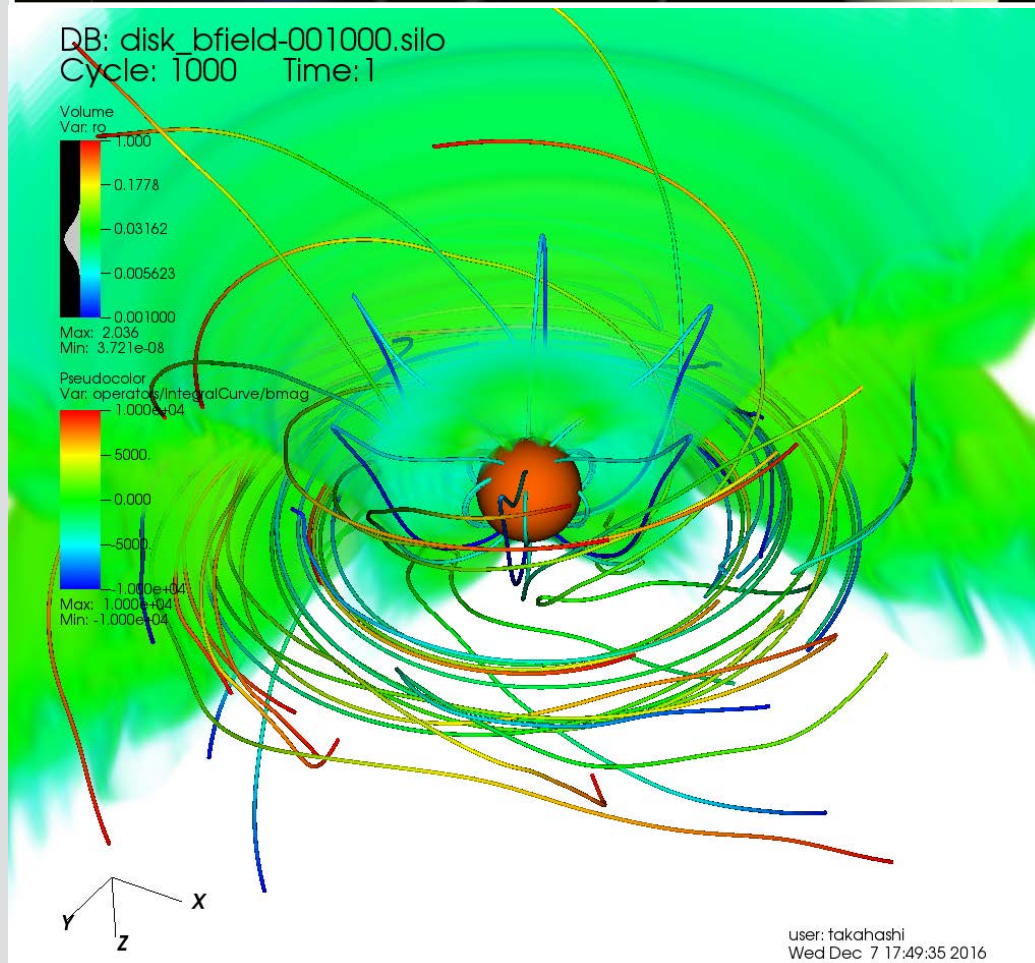
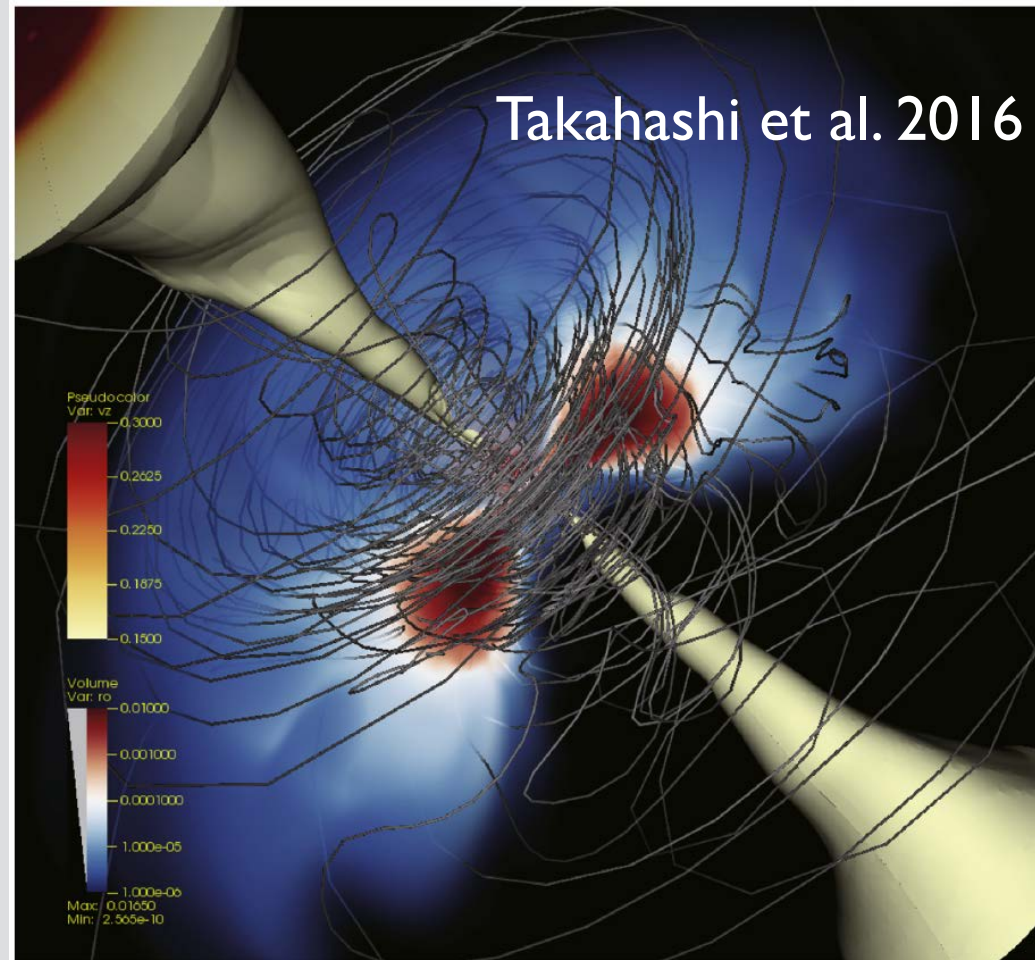
(1) - (3) はそれぞれが密接に関係する。

→ 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。

どうアプローチするか？：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

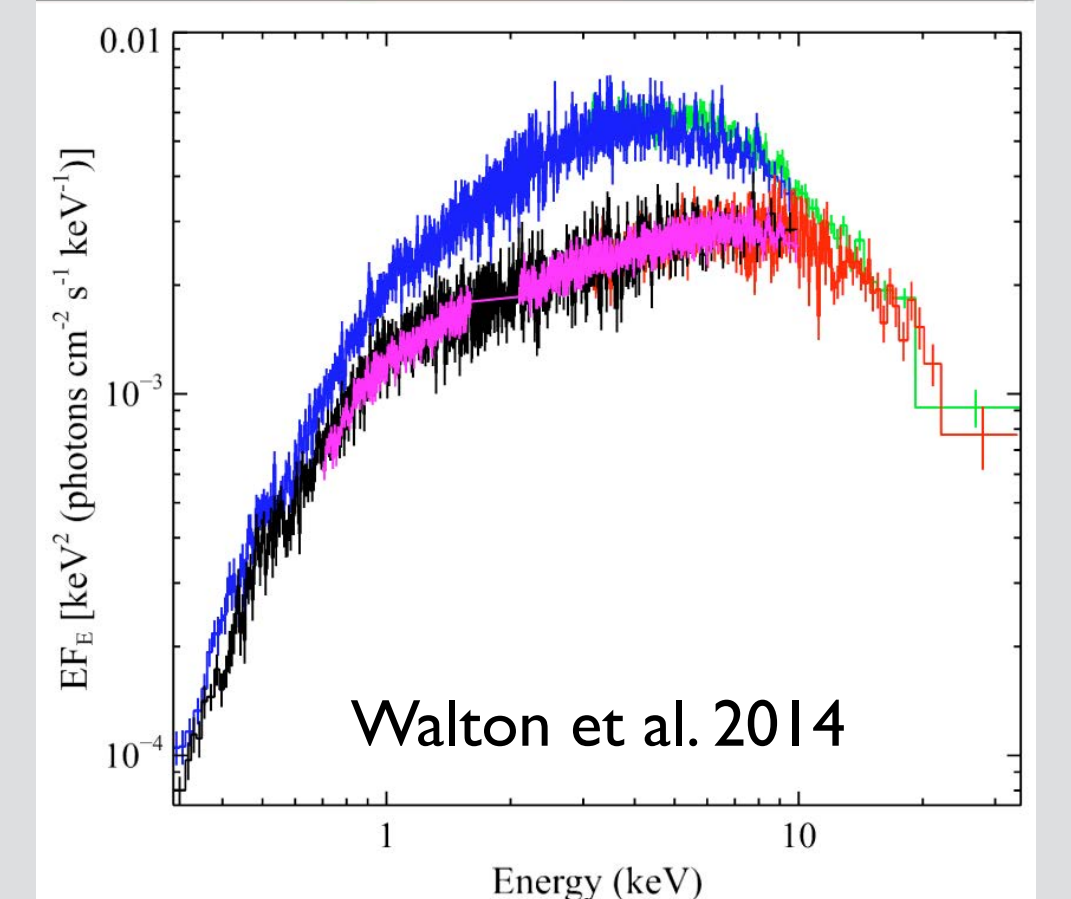
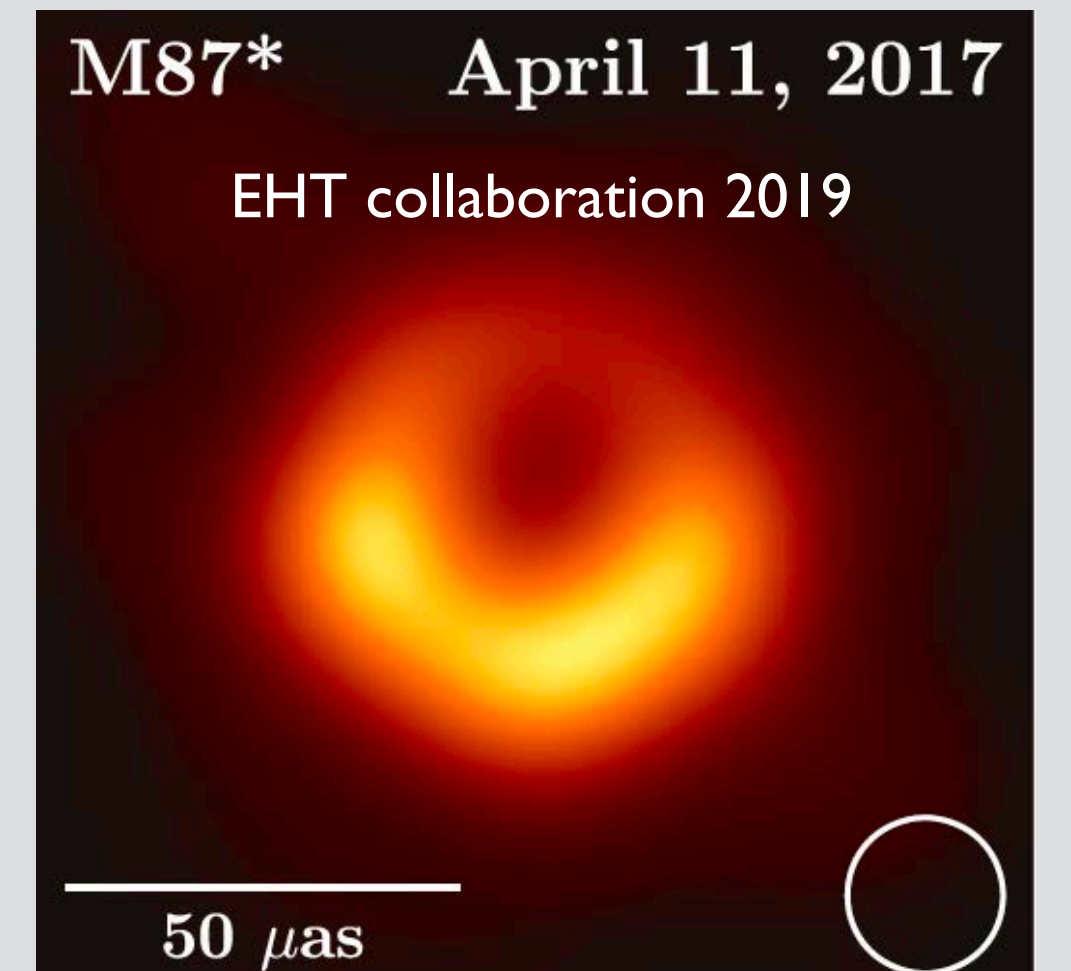
- ・輻射スペクトル計算
- ・イメージング計算

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！)



多波長の一般相対論的輻射輸送コード「RAIKOU(来光)」

Kawashima, Ohsuga, et al. (in prep.), EHT GRRT code comparison paper (2020)

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

• Ray-tracing法:

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

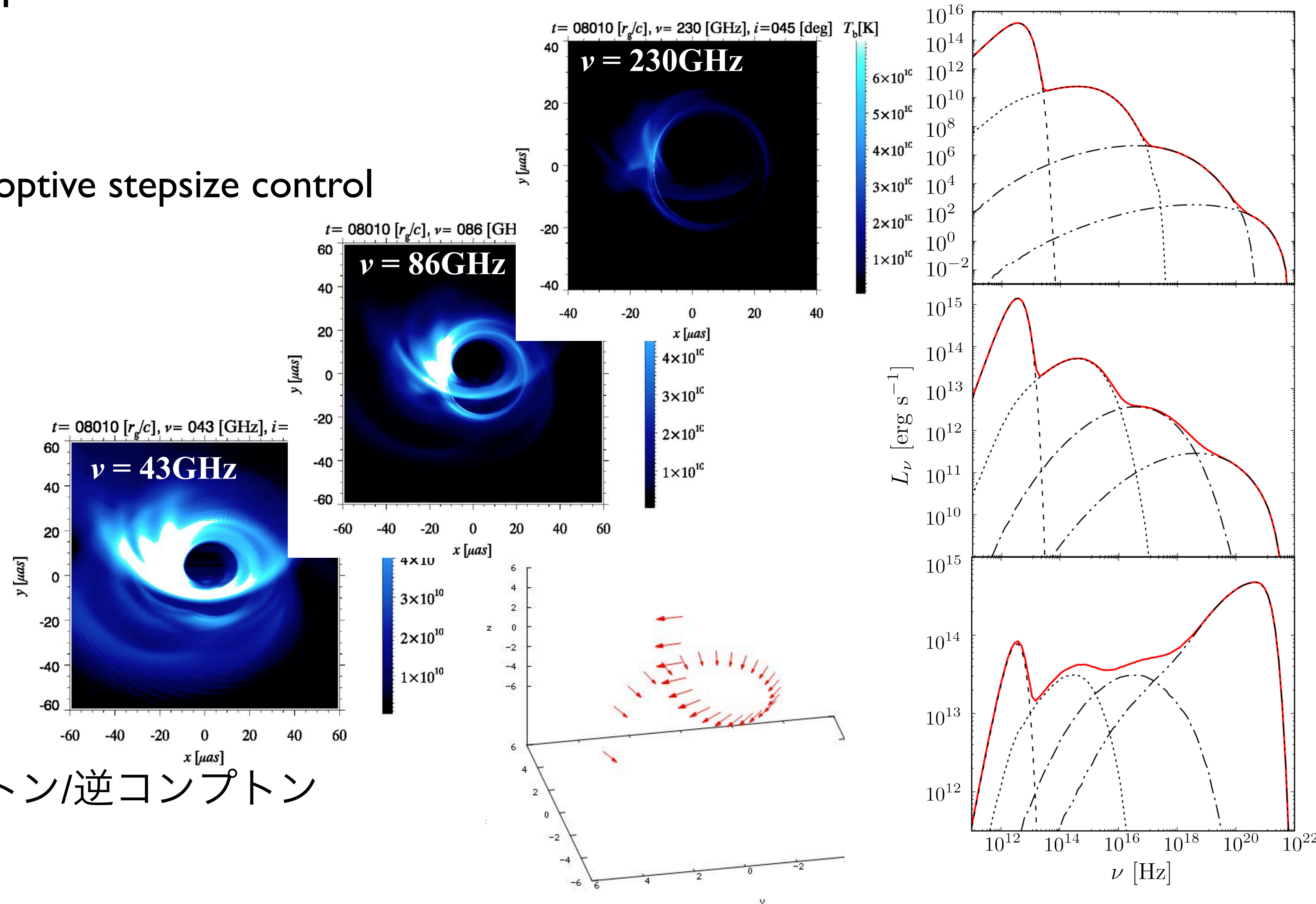
• 輻射過程:

✓ 放射/吸収

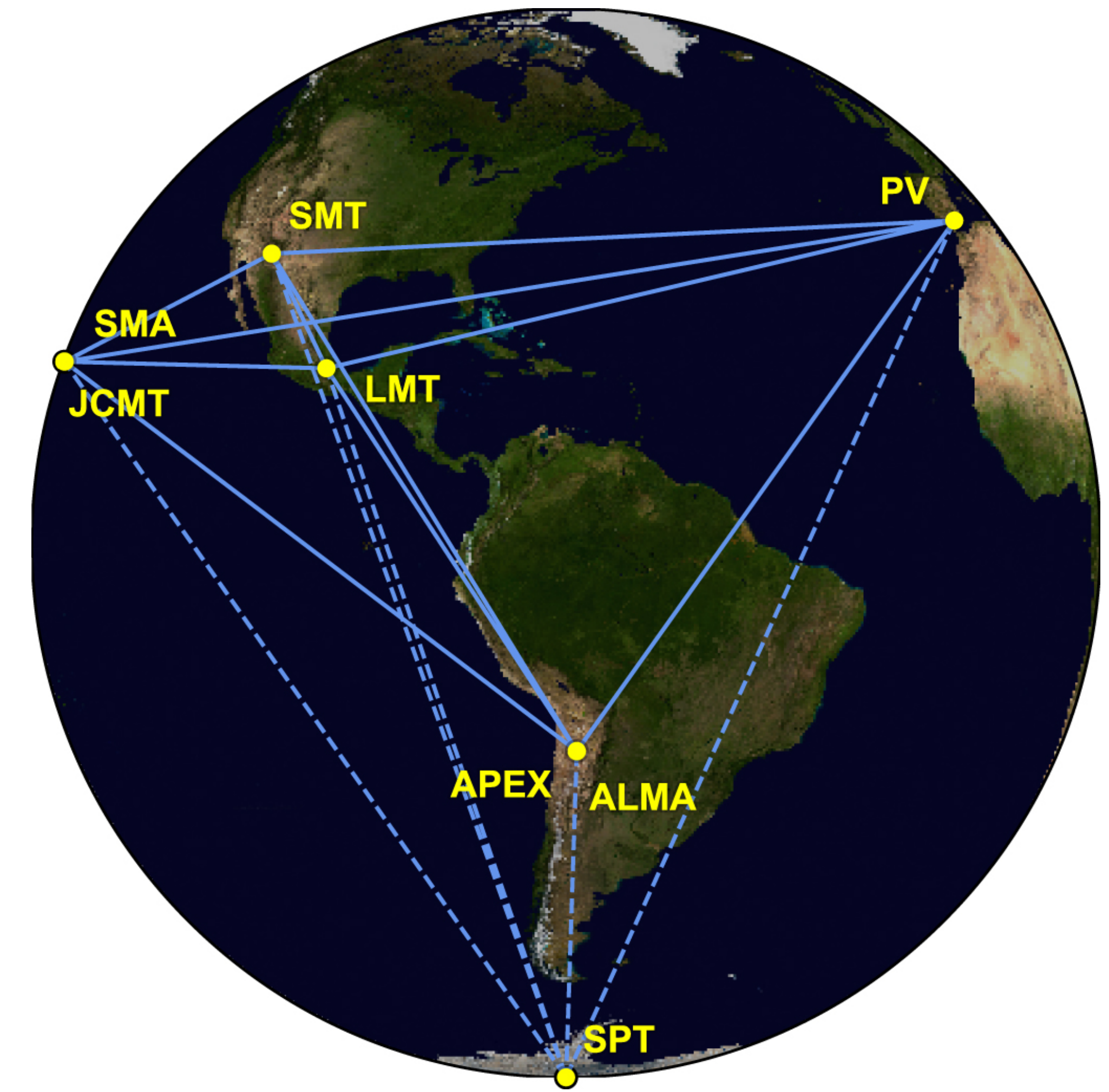
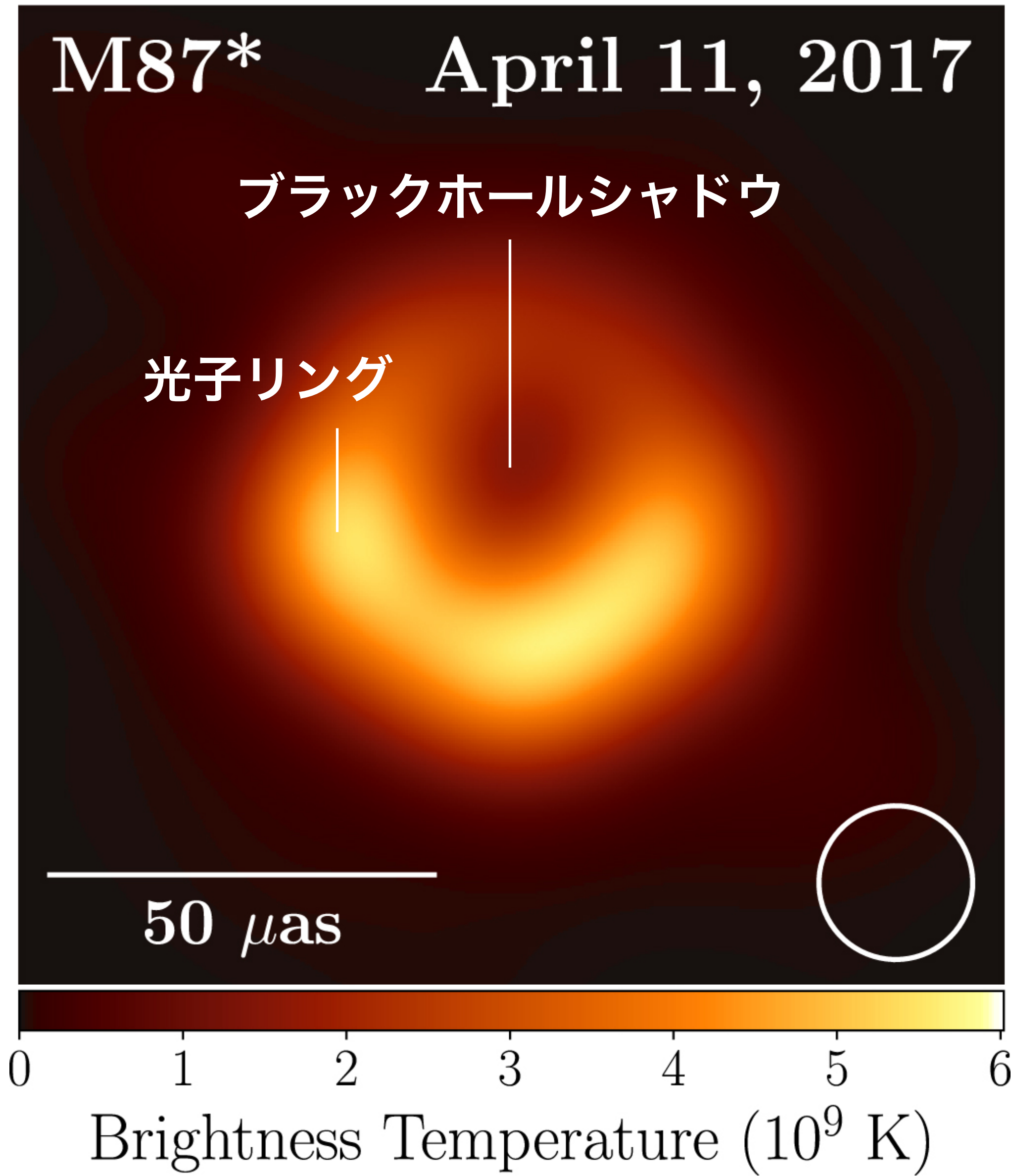
- 熱的電子 サイクロ-シンクロトロン
- 非熱的電子 シンクロトロン
- 熱的電子 制動放射

✓ 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 (single, broken PL) コンプトン/逆コンプトン
- 偏光 (実装中)



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



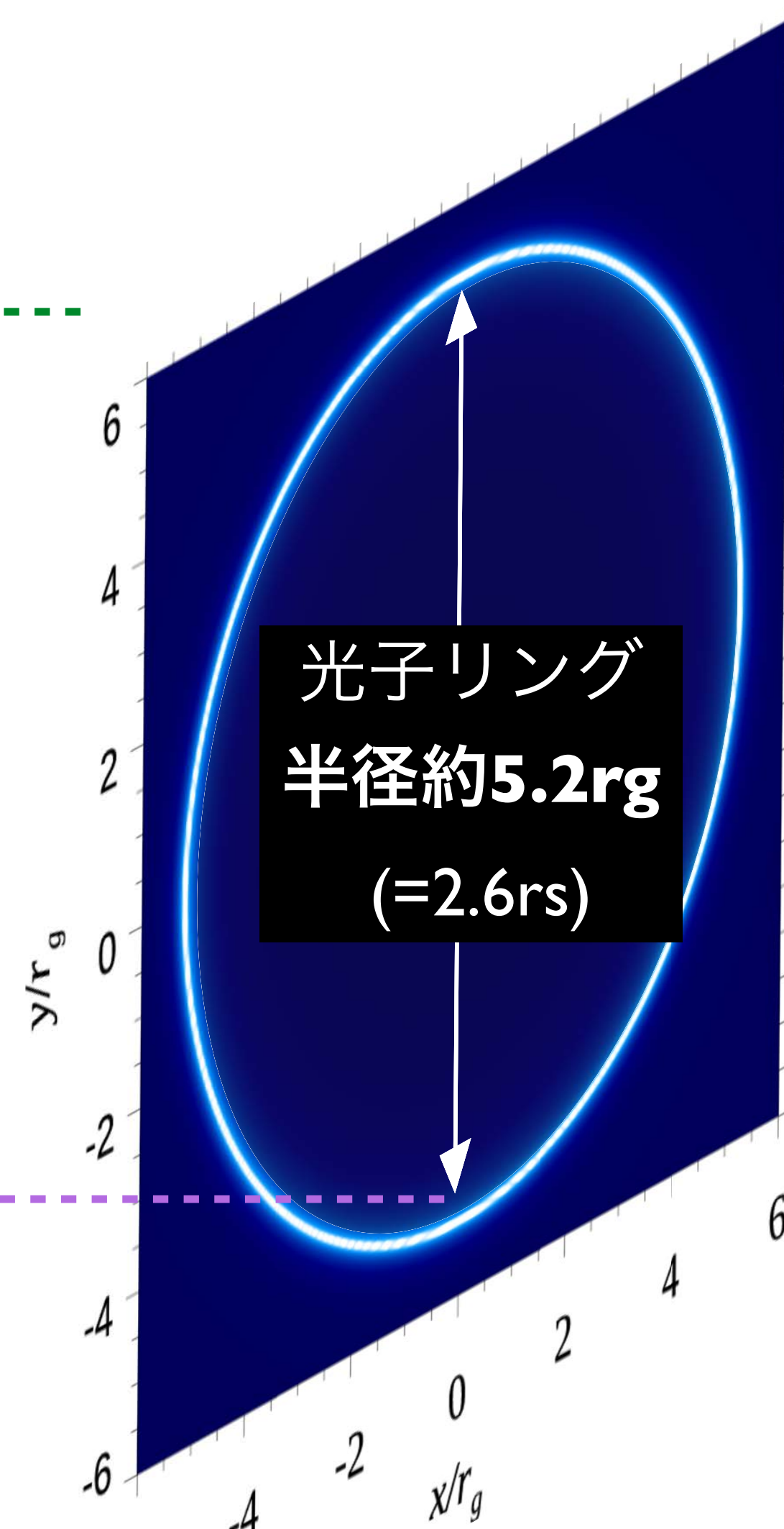
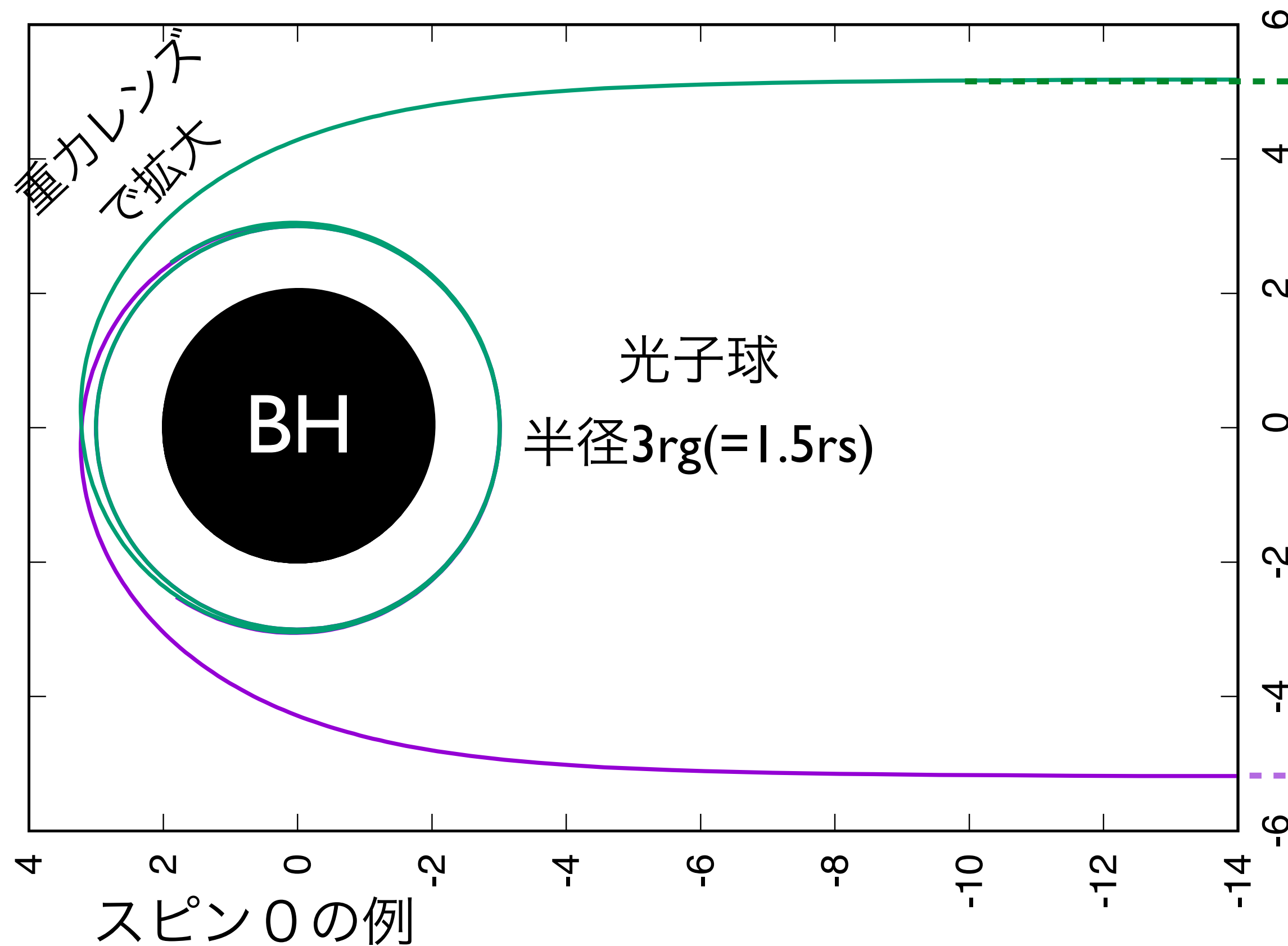
Event Horizon Telescope (EHT)により、BHシャドウが遂に観測された (今年の観測は新型コロナでキャンセル)

ブラックホールシャドウと光子リングの形成

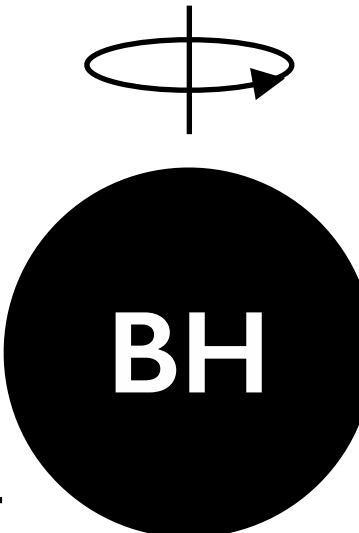
- 光子リング：光子球付近を通った光子が重力レンズで拡大された明るいリング
- 光子球：BH周りの光子の球軌道

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

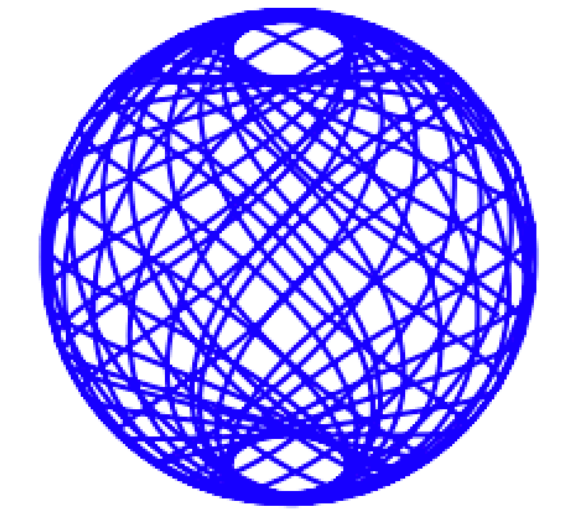
※ r_g ：重力半径, r_s ：シュバルツシルト半径, $r_g = 0.5 r_s$



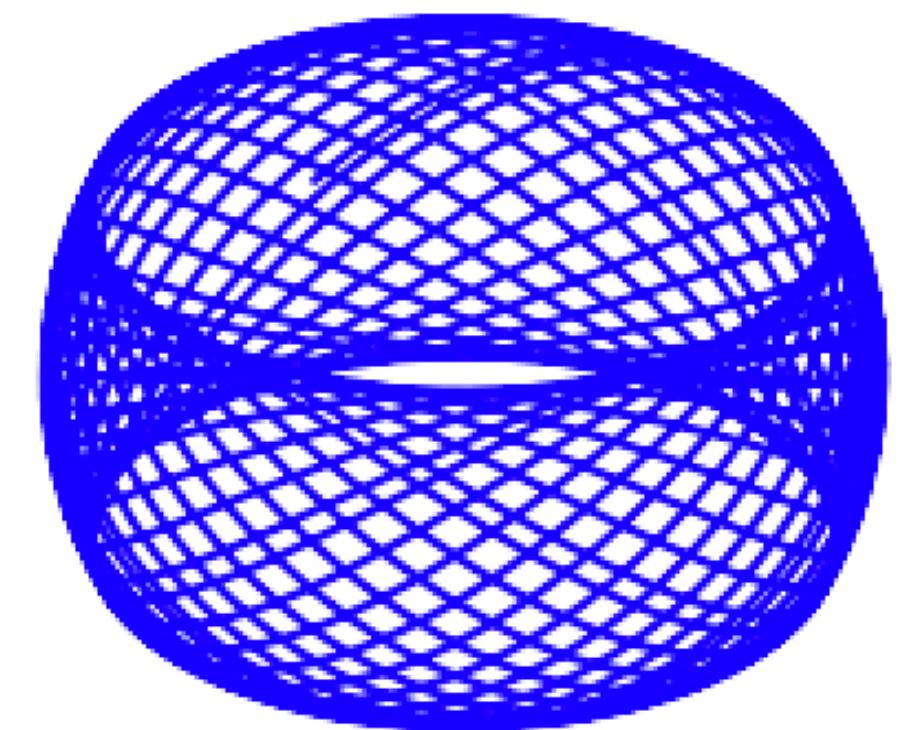
補足
スピン有限($a=1$)
の場合)



光子球
半径 $2r_g (=1r_s)$

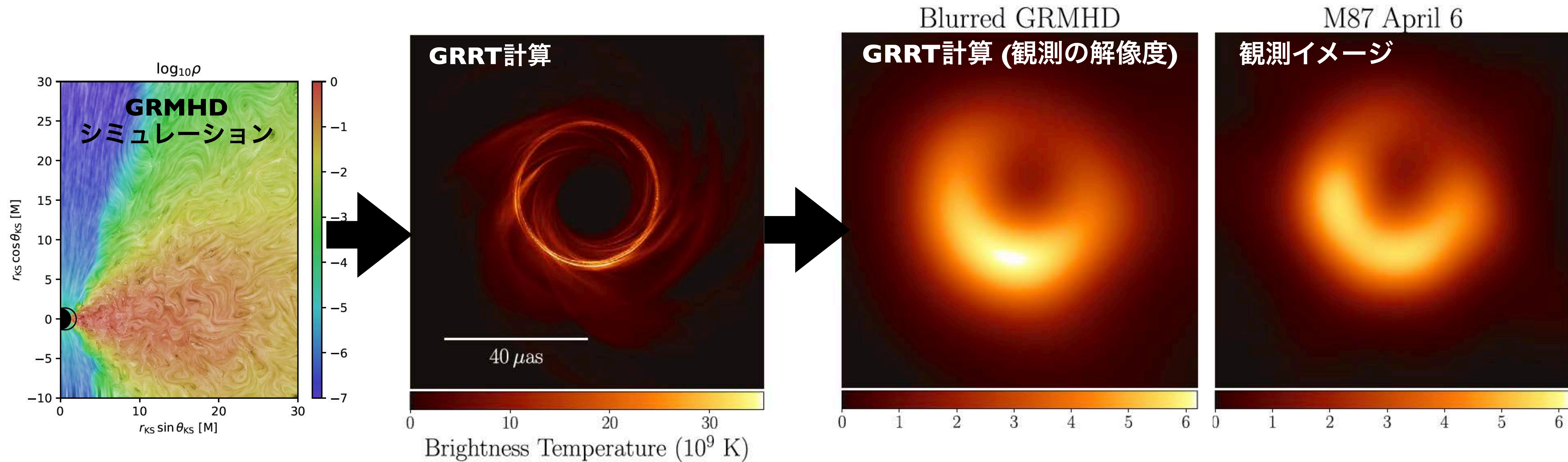


光子球
半径 $\sim 3.8r_g (=1.9r_s)$



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

- **6.5×10^9 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。**
- **超巨大ブラックホールの存在をこれまでで最も直接的に証明**

EHT 2017観測でわかったこと・残された大きな課題

- 到達点：

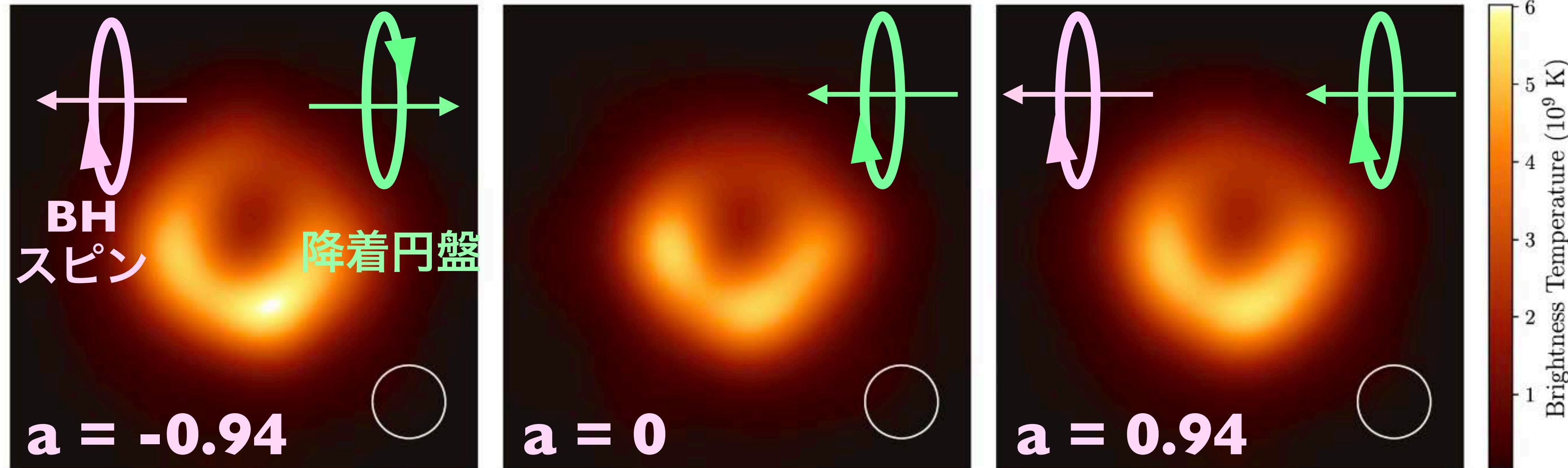
- ✓ BHシャドウを初観測。
- ✓ M87におけるBH質量が明らかに。
- ✓ 巨大BHの存在をほぼ証明。

- (主な) 課題：

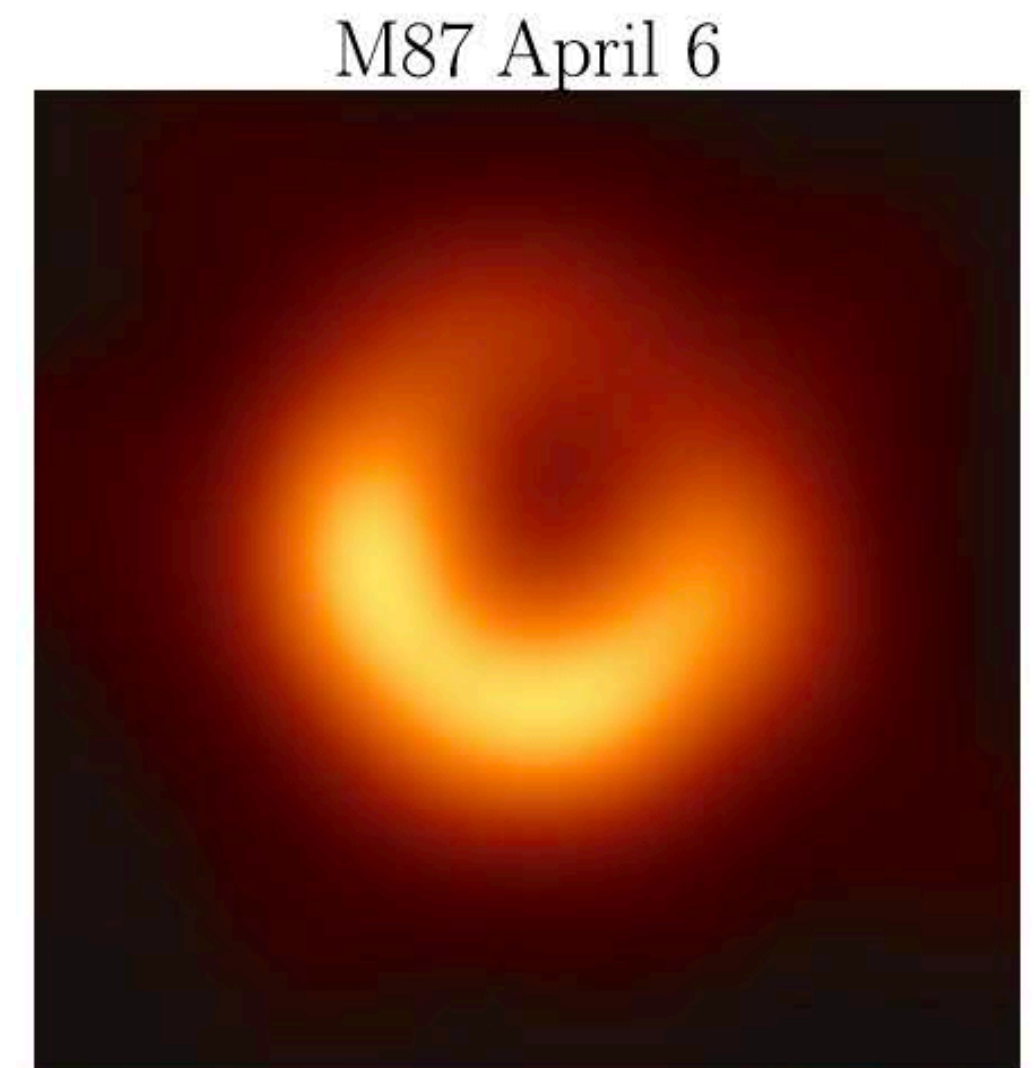
- ✓ BHスピンの大きさは？
- ✓ 相対論的ジェットの出発メカニズムは？
- ✓ 降着流のダイナミクス？強磁場を伴う？
- ✓ 放射領域は降着流かジェットか？
- ✓ 他のBHは？(例: Sgr A*)

BHスピンを変えたシミュレーションの結果

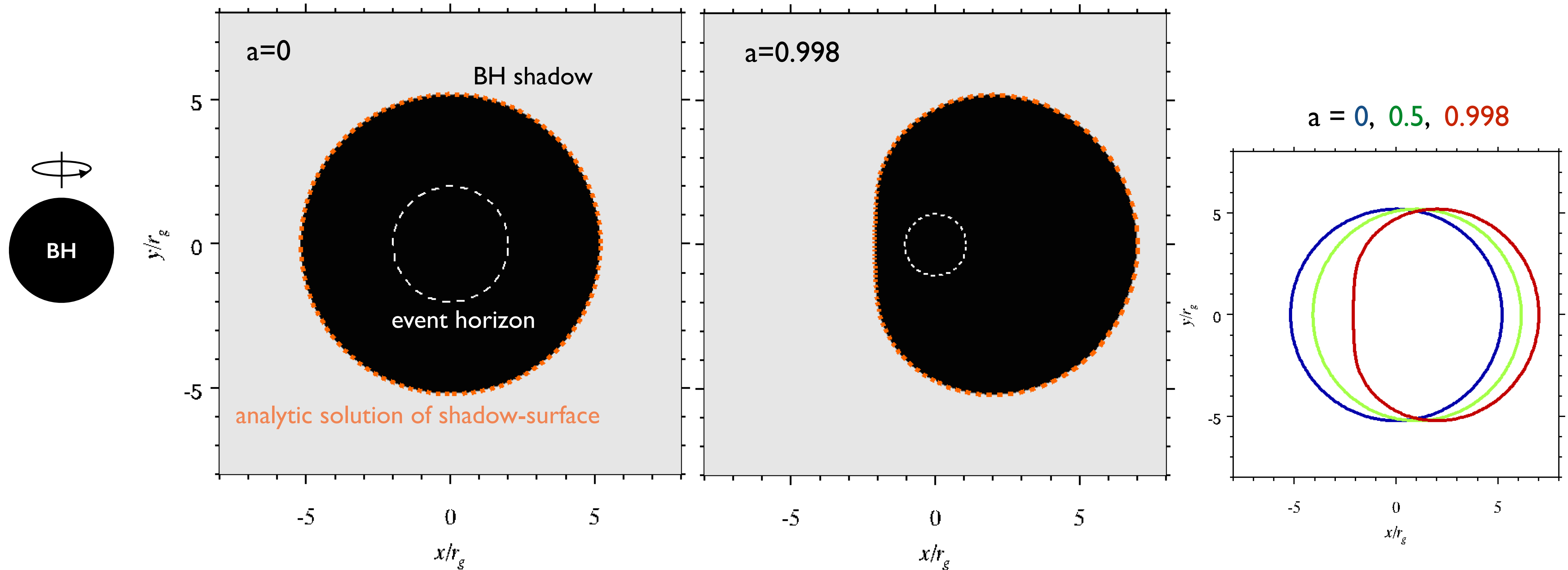
Simulated EHT observations



EHT2017観測結果

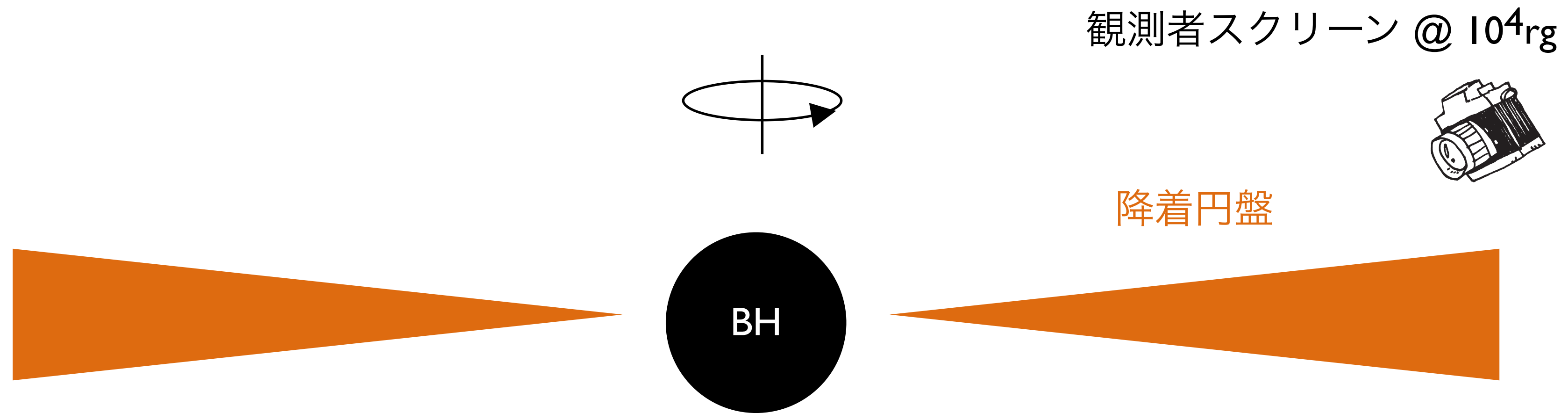


BHシャドウのspin依存性



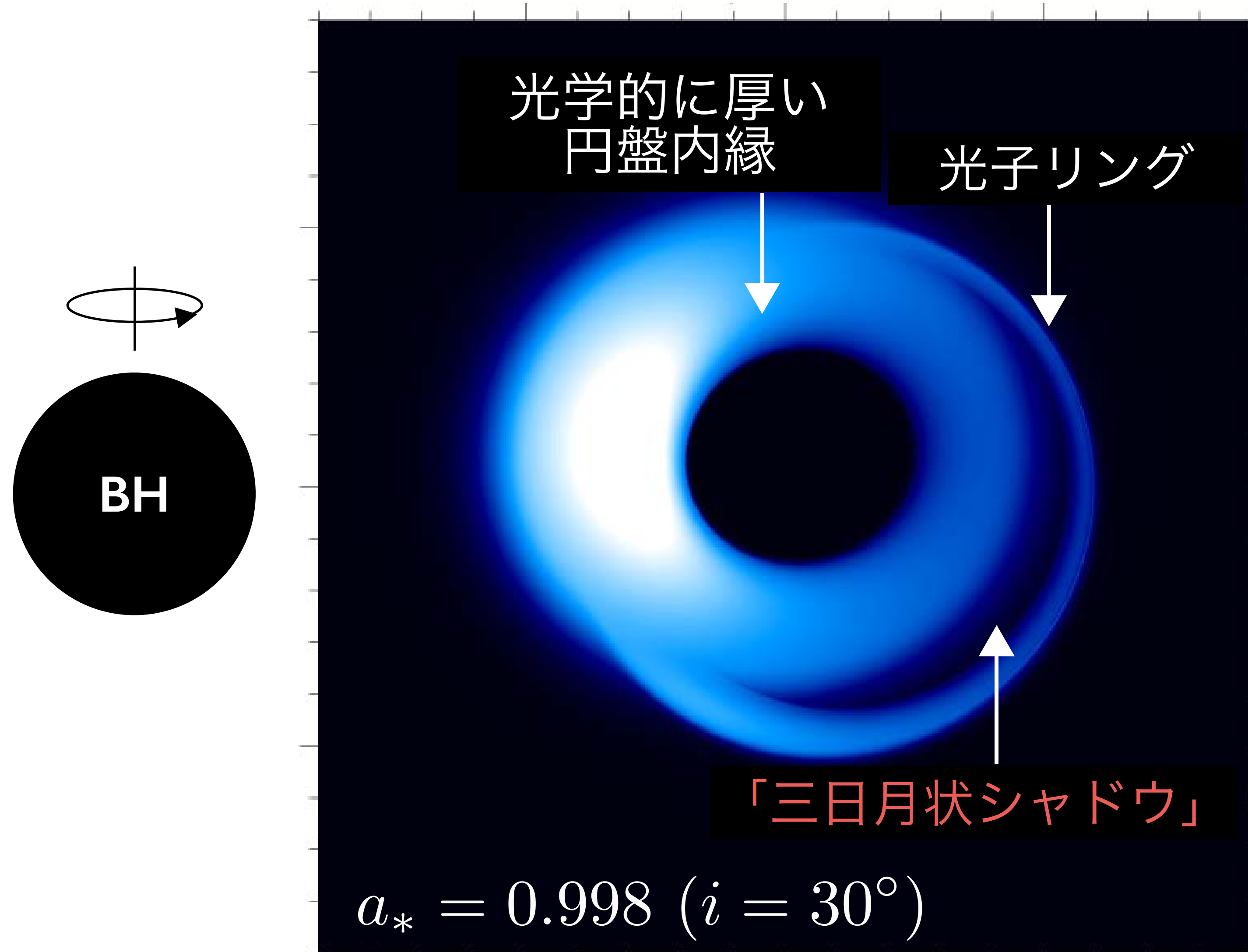
- BH質量依存性：光子リング(BHシャドウ)のサイズはBH質量に比例。
- BHスピン依存性：サイズはわずか約 $\pm 5\%$ のずれ。
光子リング(シャドウ)の位置がスピン軸に垂直方向にずれるのみ。
- BH質量を決めるのには適している。一方でスピンを決めるのは困難。

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(Keplearnian 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 $\gtrsim 10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$

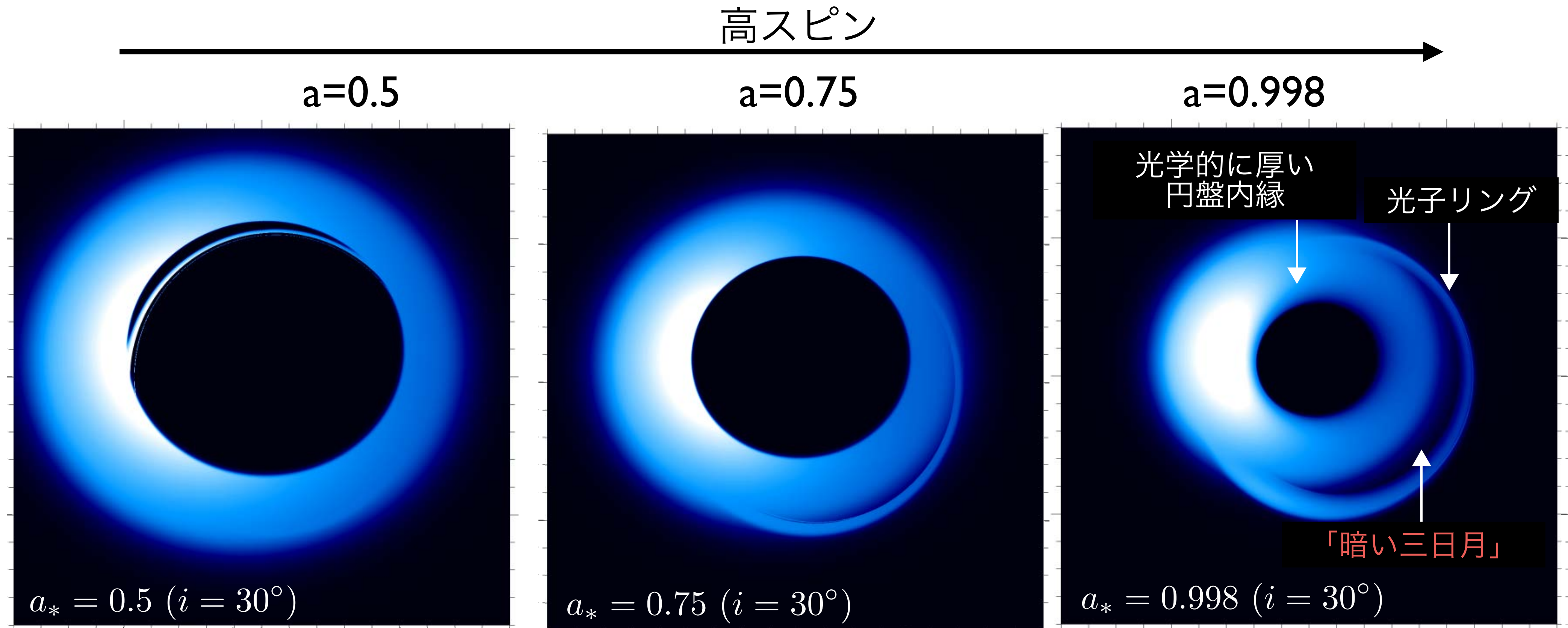
M87におけるBHスピンの新測定法の提案 (Kawashima + 2019)



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。

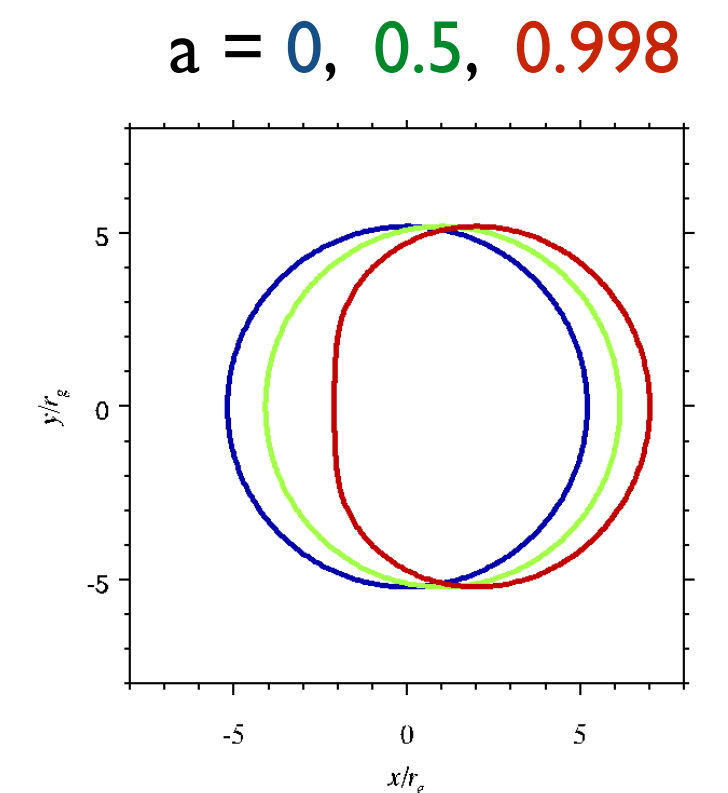
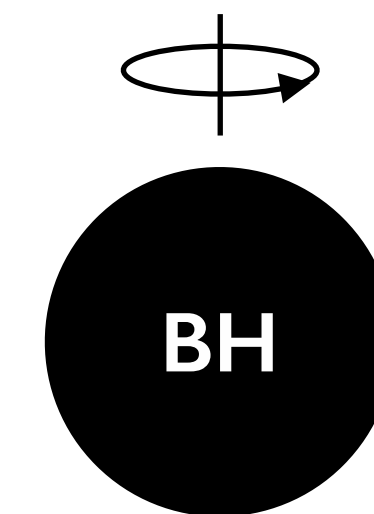
降着円盤の内縁と
光子リングの隙間に
三日月状シャドウが現れる

BHシャドウの形状のBHスピン依存性

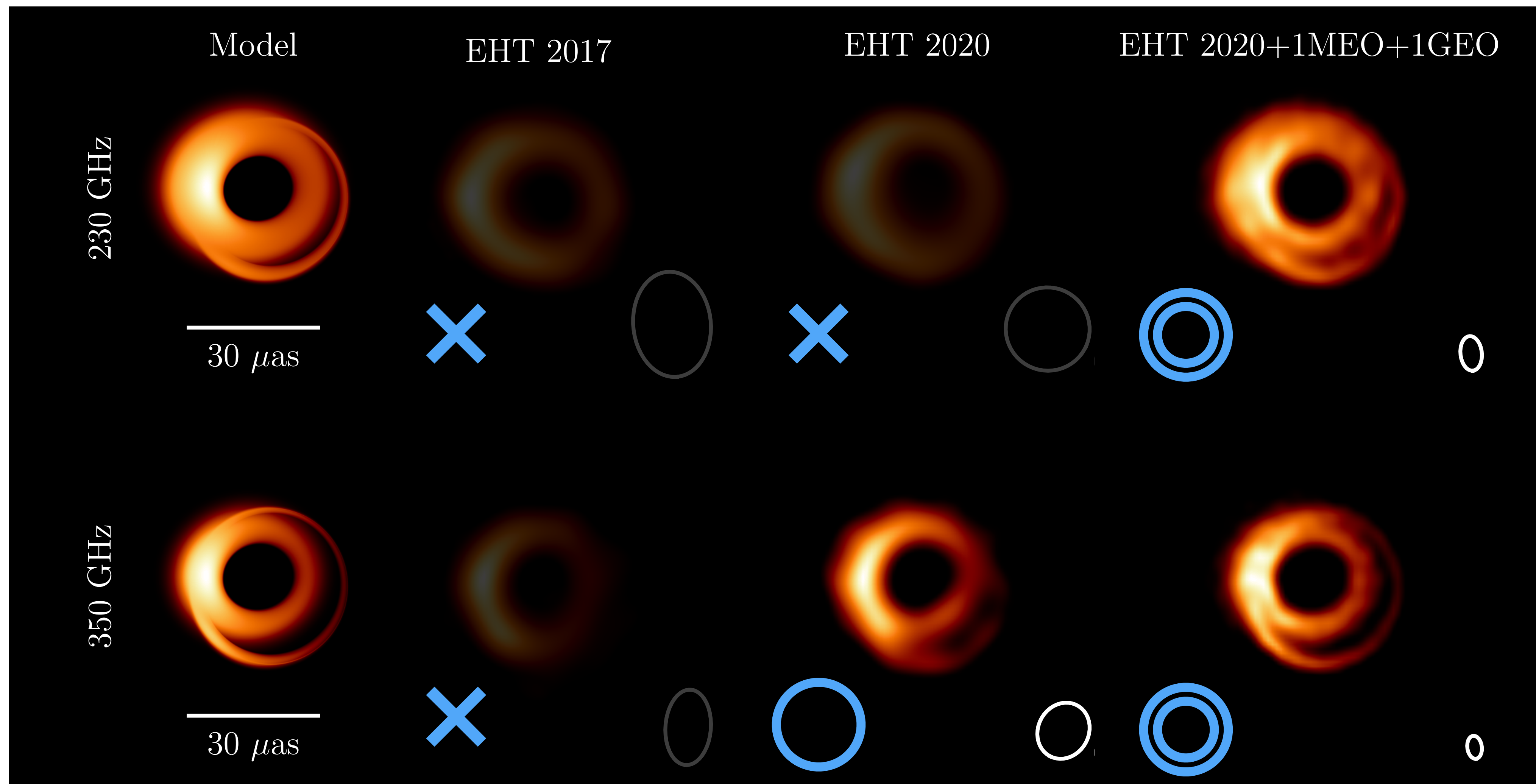


- BHスピンの高いと光子リングが右にシフト
→ 暗い三日月が現れる。

- **BHスピン**を決める新たな方法



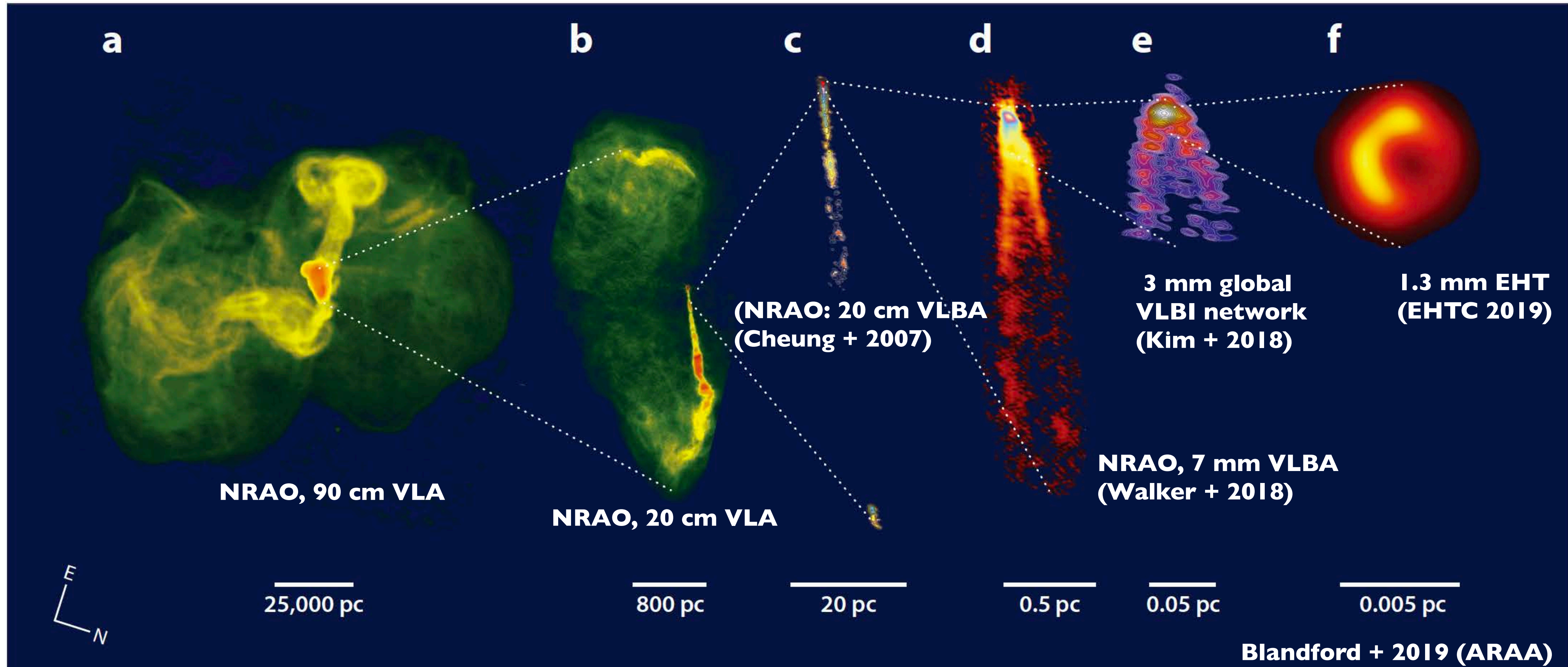
理論イメージの模擬観測



- **2020年代(30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

GRMHDシミュレーションに基づく、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 GRMHD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： $n_e = 4.45 \times 10^2, 6 \times 10^2,$

$1.75 \times 10^3, 3 \times 10^3$ $1/\text{cm}^3$ for $a^* = 0.5, 0.7, 0.9,$

0.99 (230GHzで0.6 Jyとなるように設定)

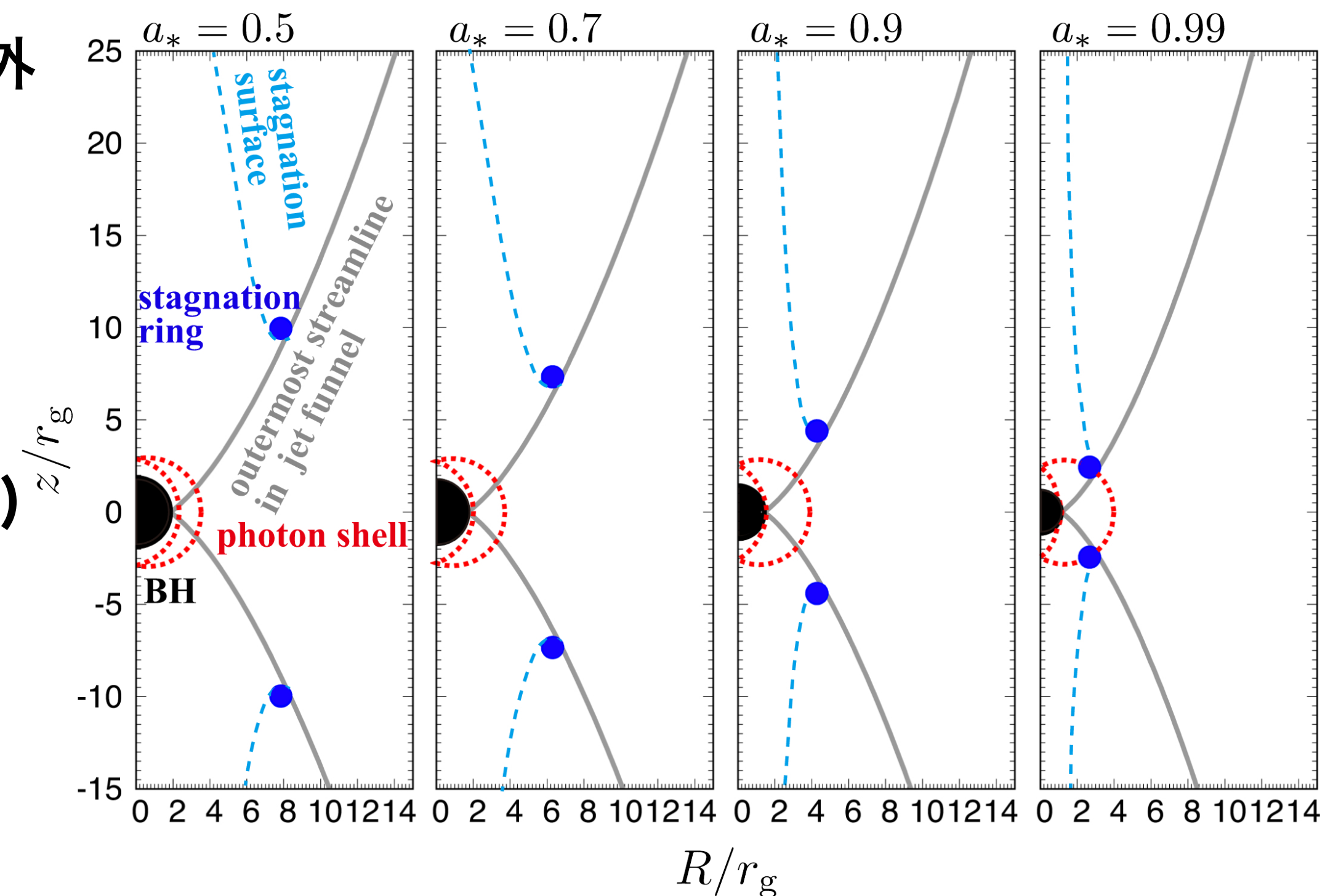
• 非熱的電子・陽電子の分布関数：

• ローレンツ因子50-5000の範囲で冪分布角速度： $\Omega = 0.06,$

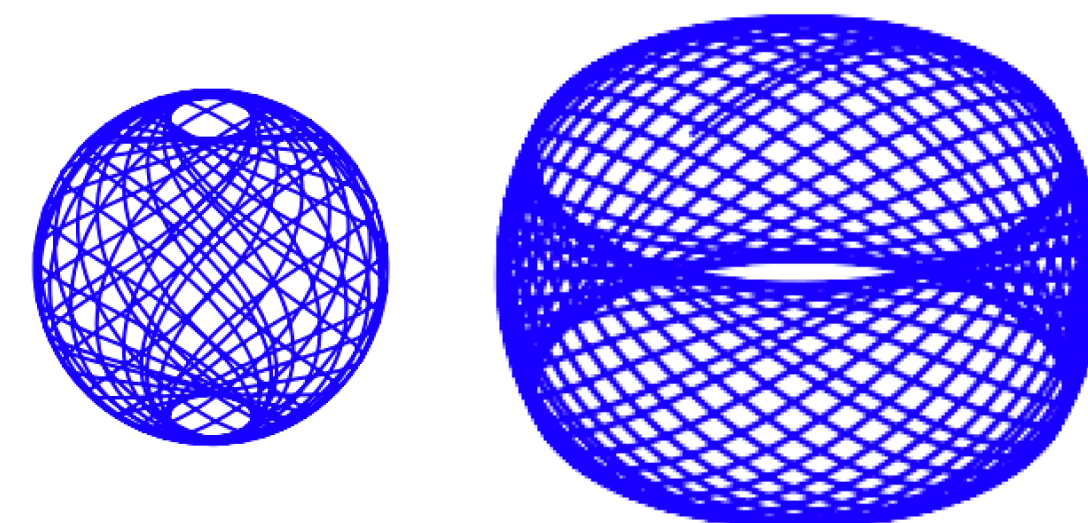
$0.08, 0.15, 0.2$ c/r_g for $a^* = 0.5, 0.7, 0.9, 0.99$

(Nakamura + 2018よりBH磁気圏回転角速度)

※ BH自転角速度の約半分

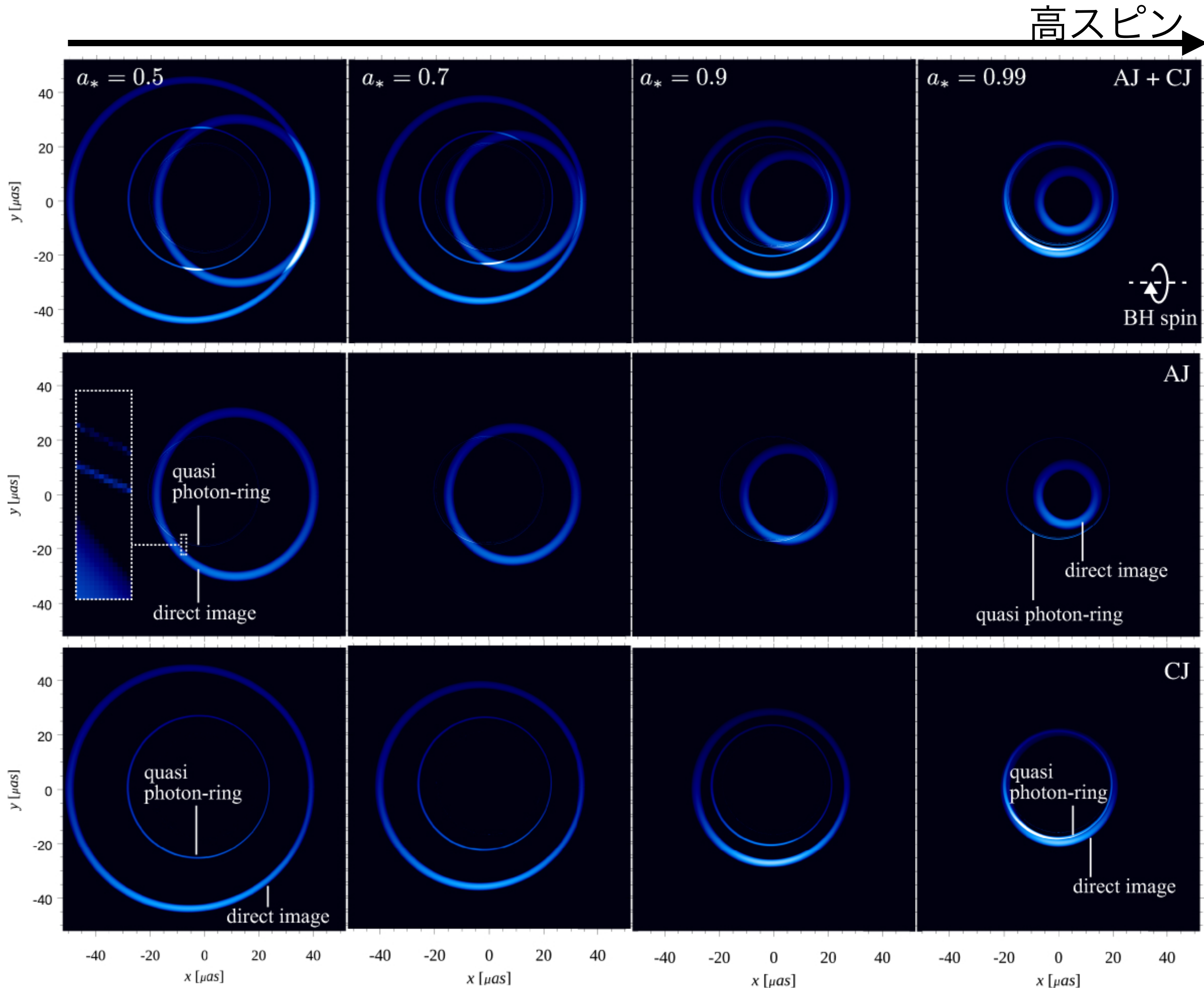


参考) $a=1$ の
光子球

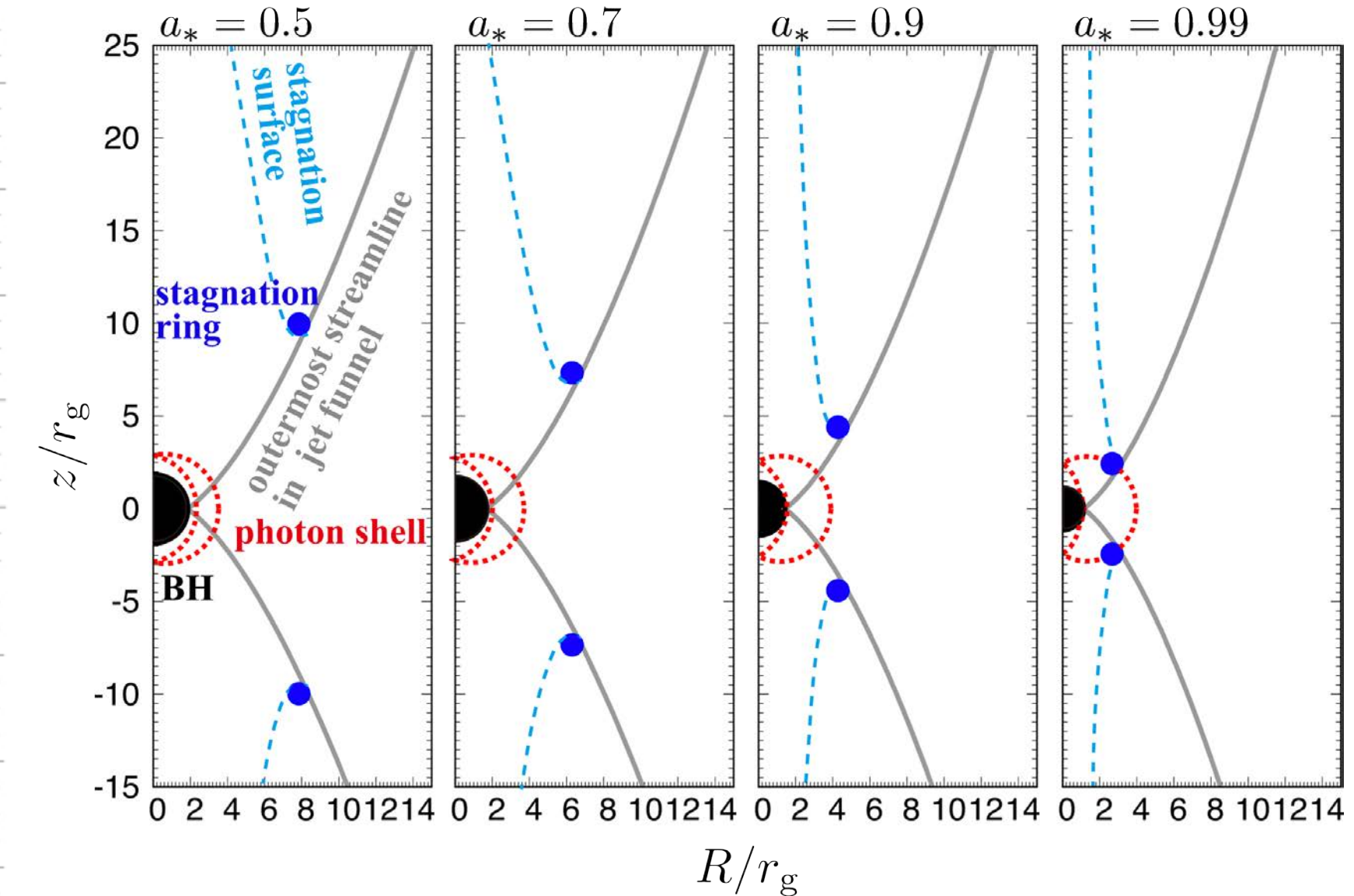


ジェット根元(プラズマ注入ポイント)の見え方

全体



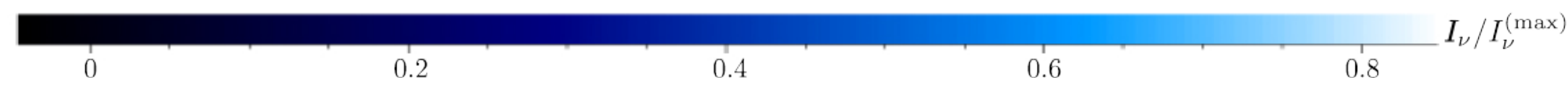
高スピン →



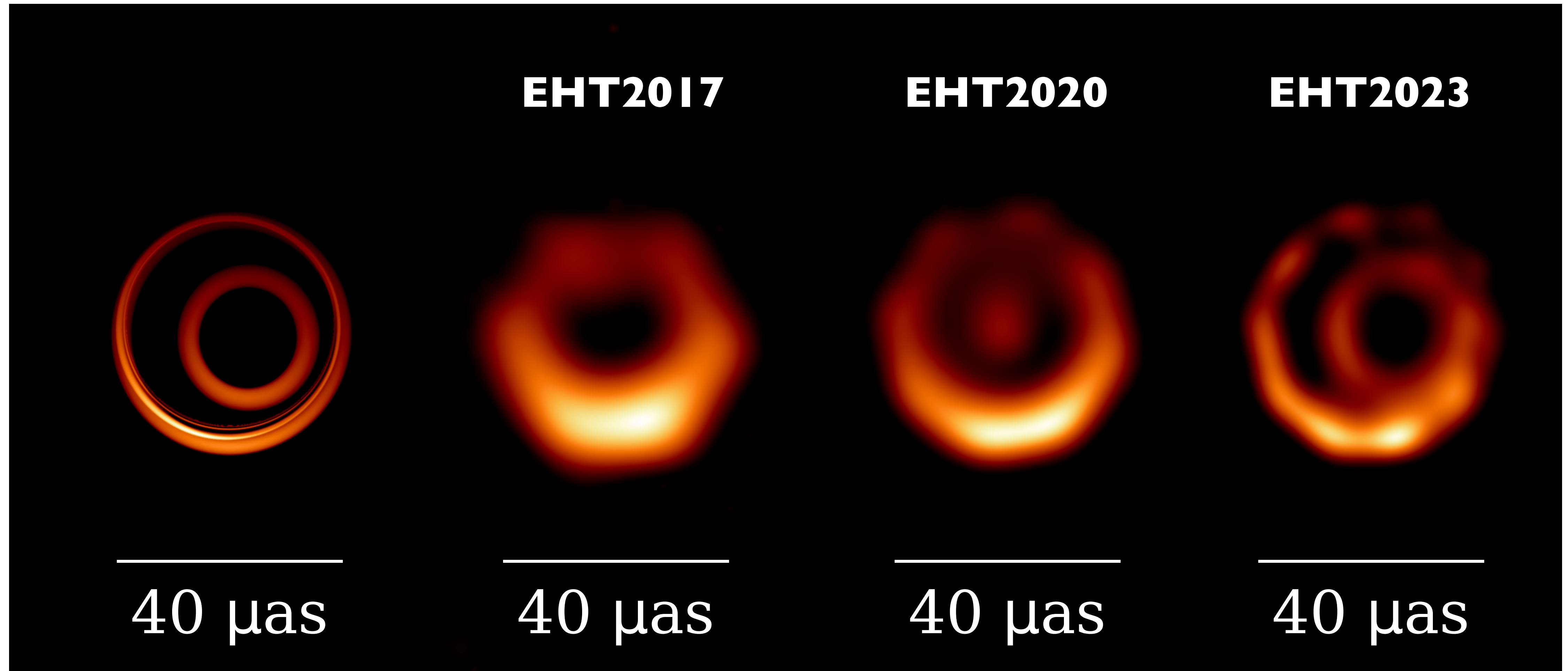
観測者側

反対側

- スピン大 → ジェット注入ポイントの実像が光子リングへと重なっていく。
 - $a=0.99$ で反対側の実像と光子リングは合体、が、観測者側の実像が残る。
- EHT観測と不整合か？ (次頁で検証)



EHT arrayを仮定した模擬観測

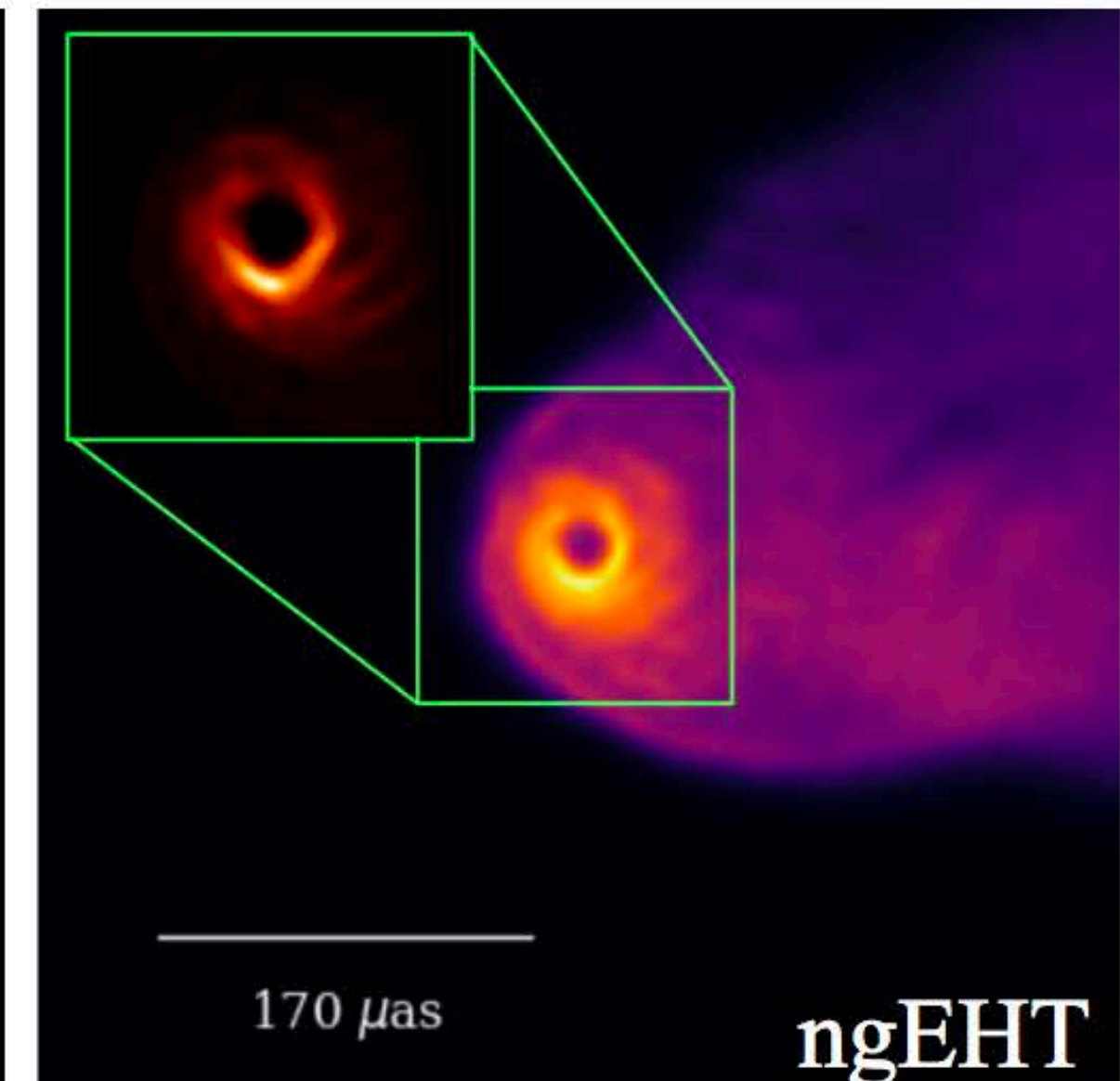
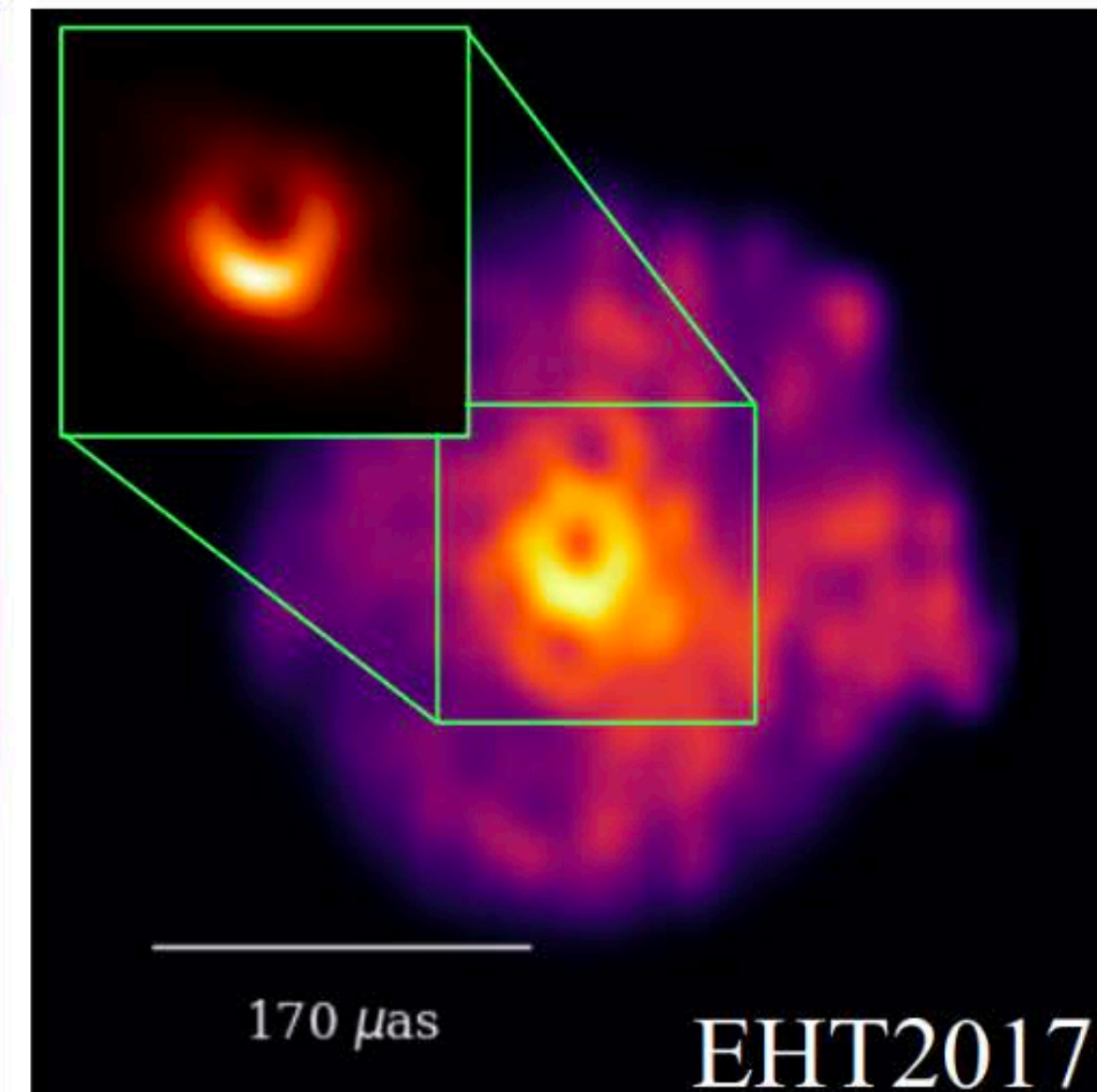
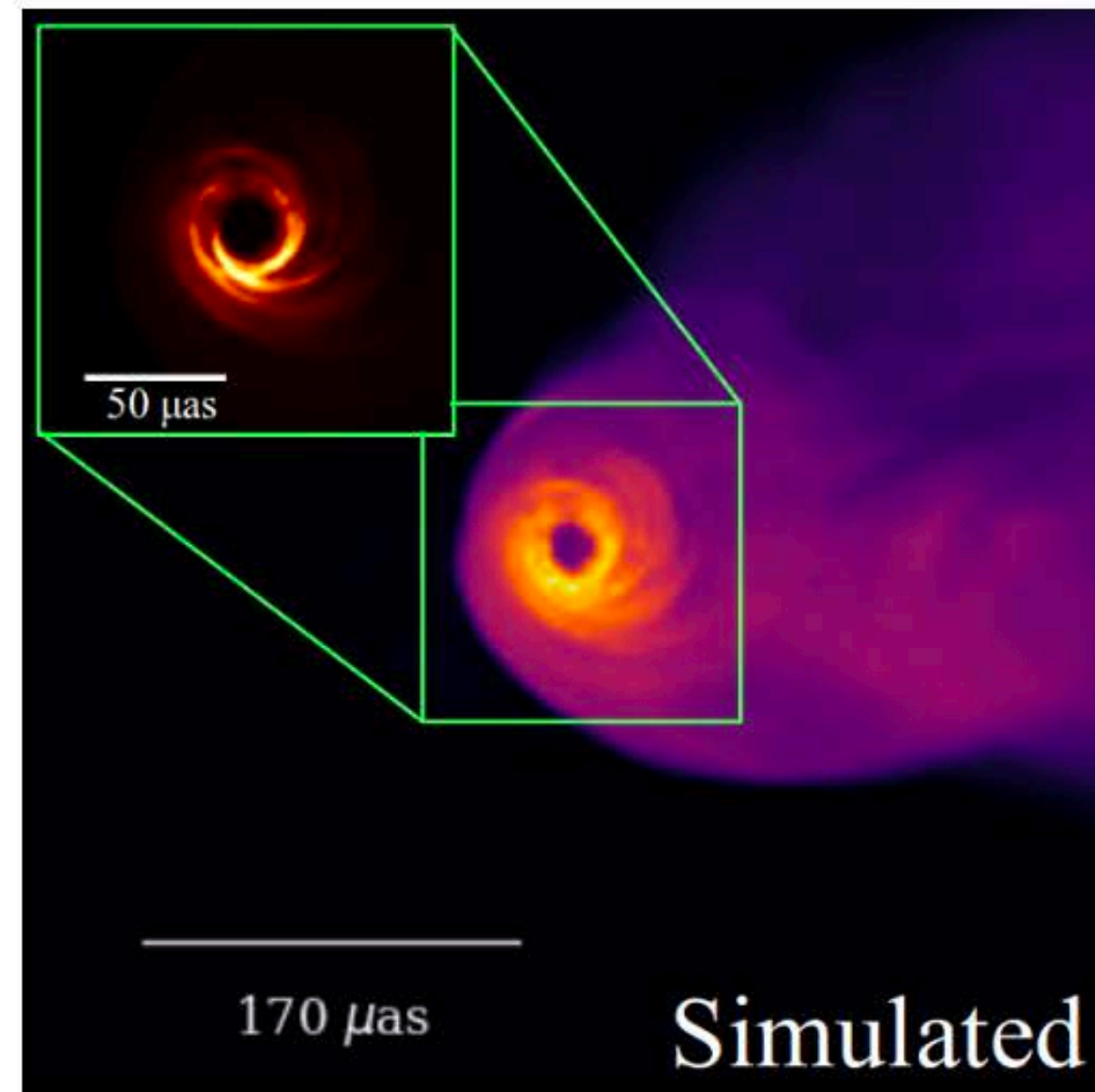


- (Fine tuningモデルだが) これまでのEHT解像度は「光子リング+ジェット根元放射」で観測再現。
ジェットの重要情報を含む可能性あり。このモデルが正しければM87のスピンは $a > 0.9$ 。
- 近い将来のEHTで検証可能。(Kawashima, Toma, Kino et al, ~~submitted to ApJ~~
accepted for publication in ApJ)

次世代EHTによる大局的なジェットの観測に向けて

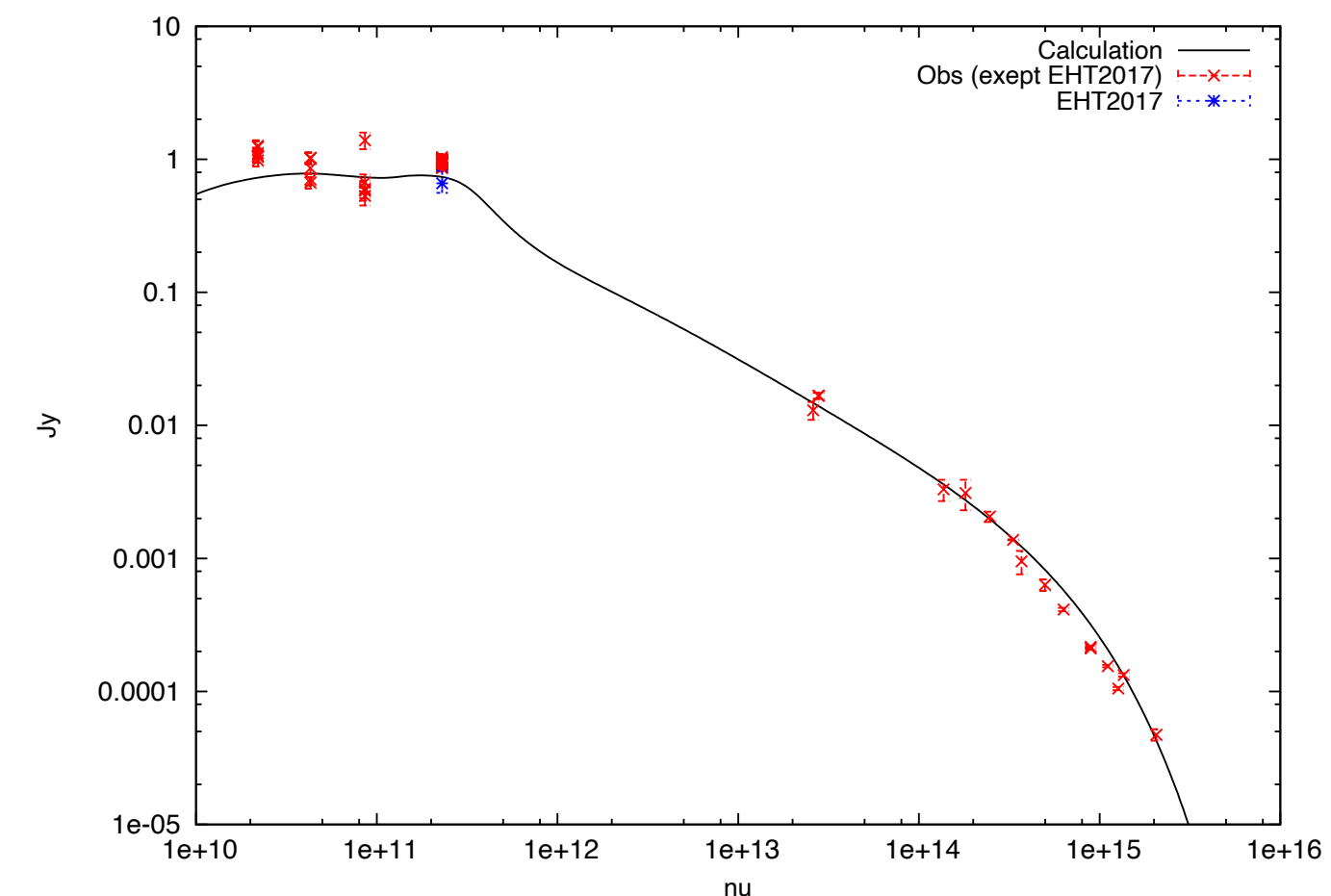
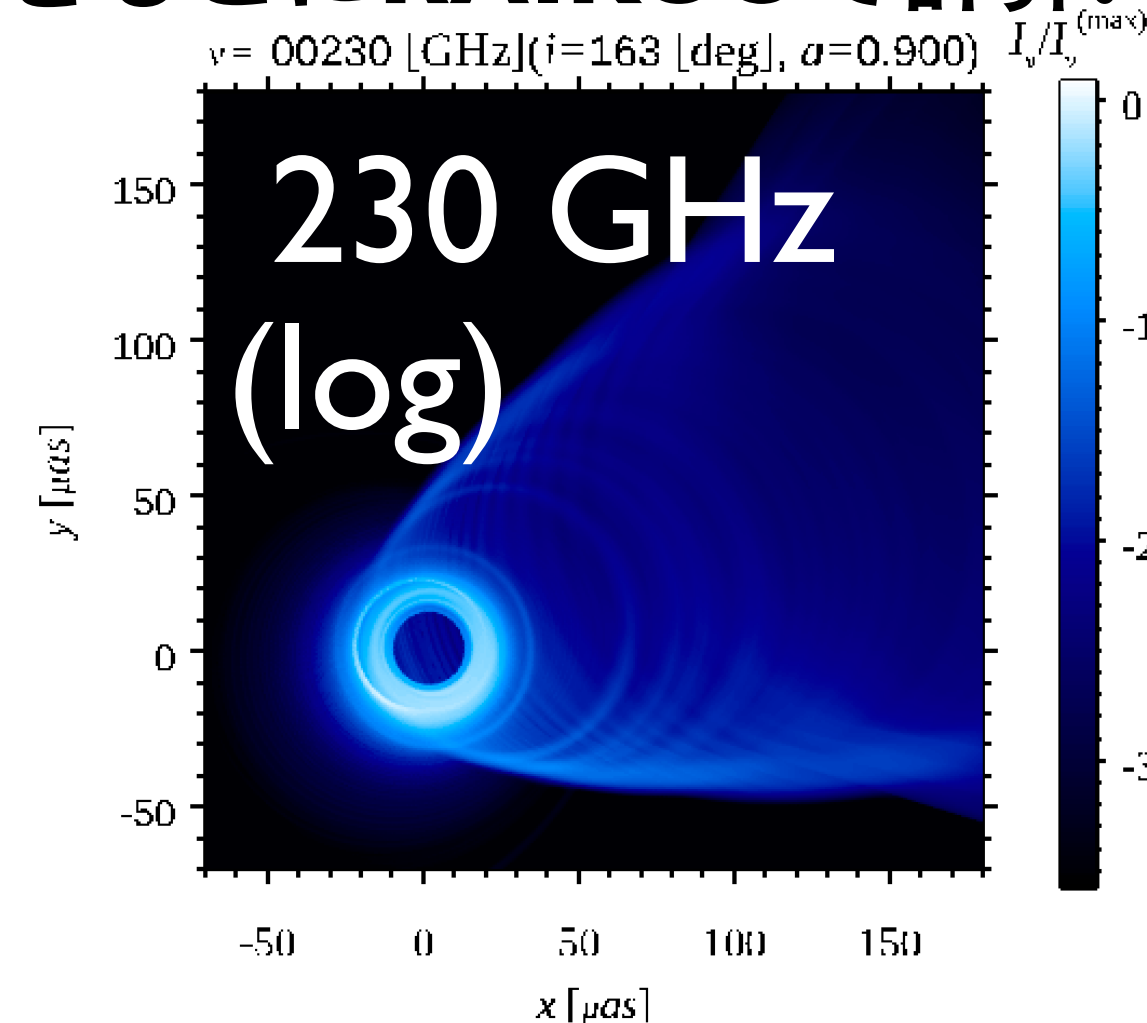
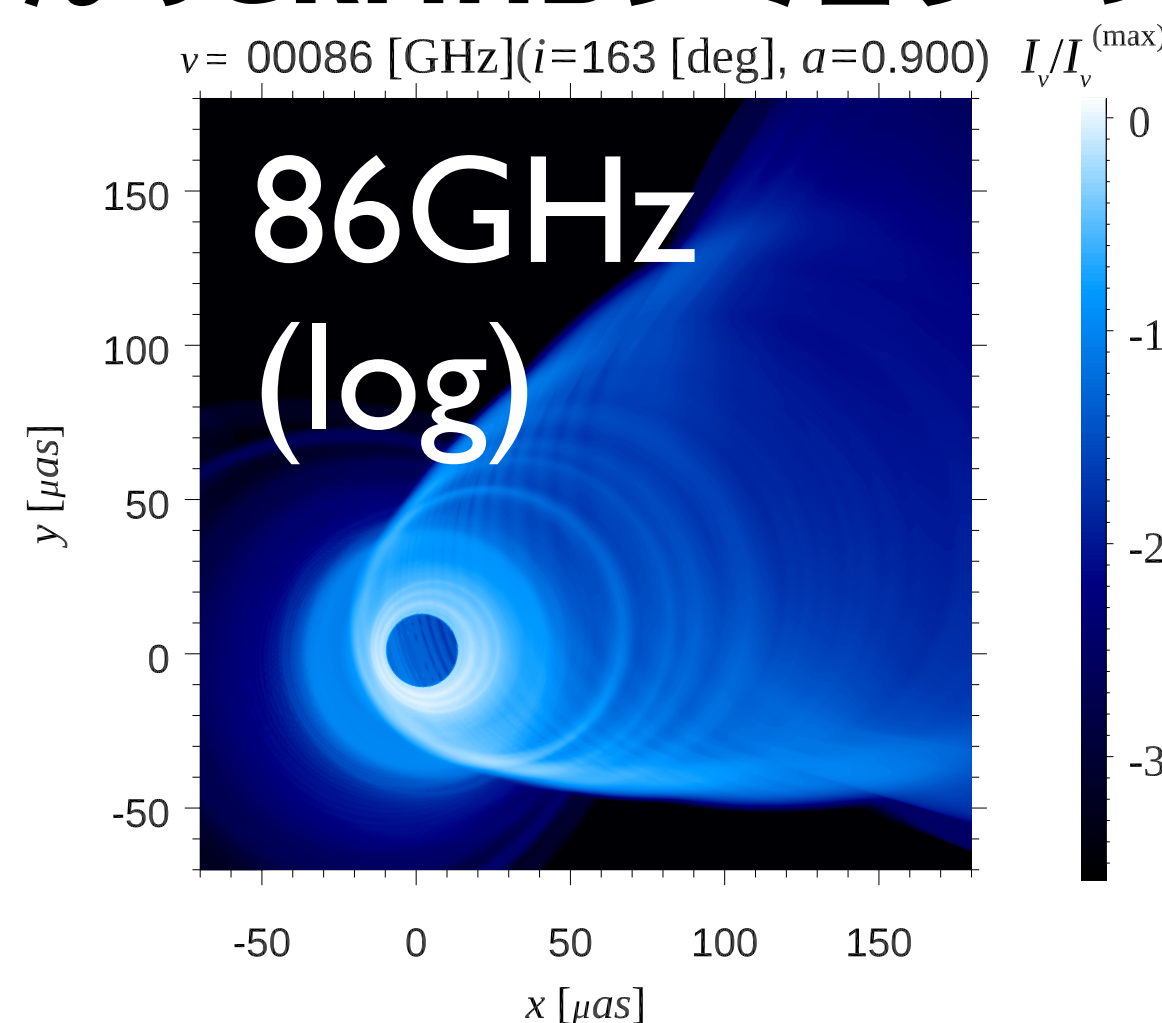
- 短基線のアンテナを増やすと大局的なジェットが解像できてくる。
- ジェットの根元(プラズマ注入ポイント)とともに重要な知見が得られると期待。

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

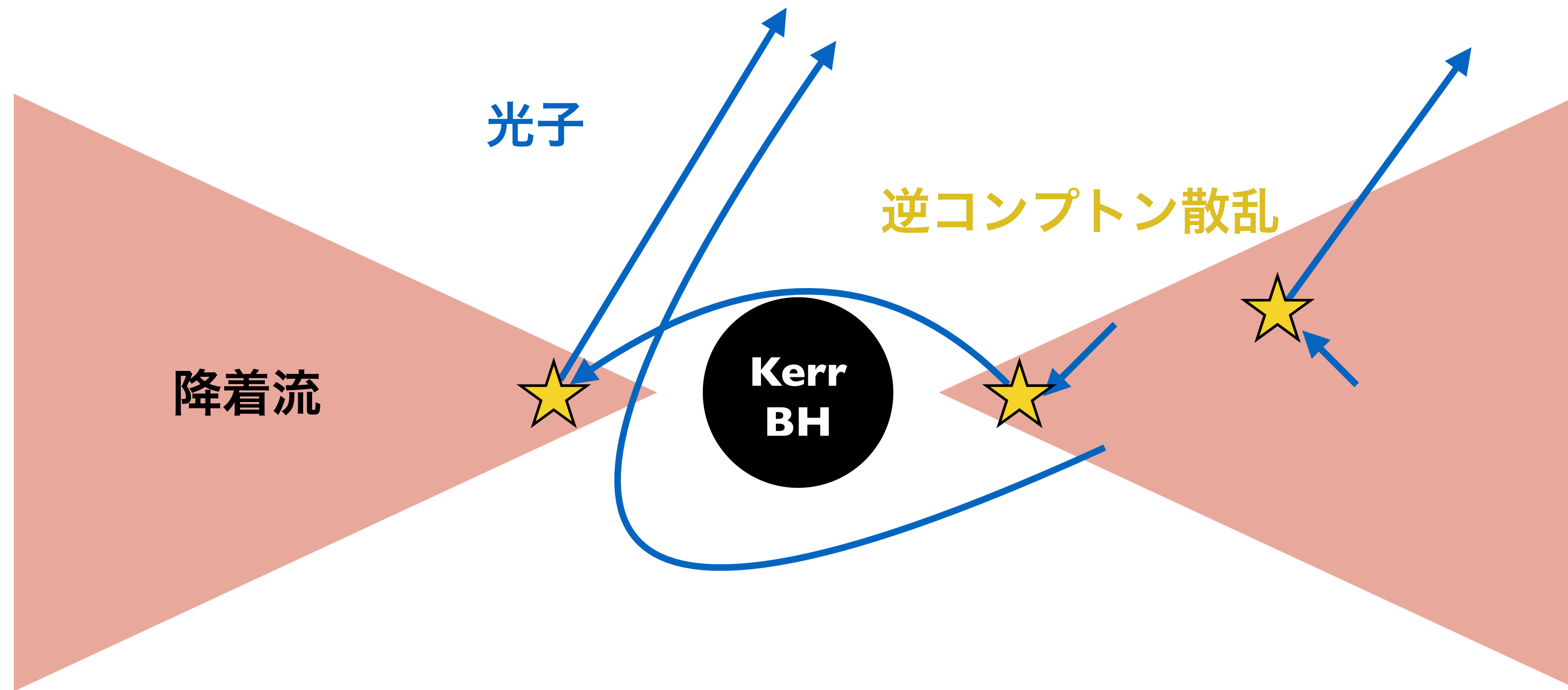


我々も非熱的電子を含むモデルを構築中

(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.)

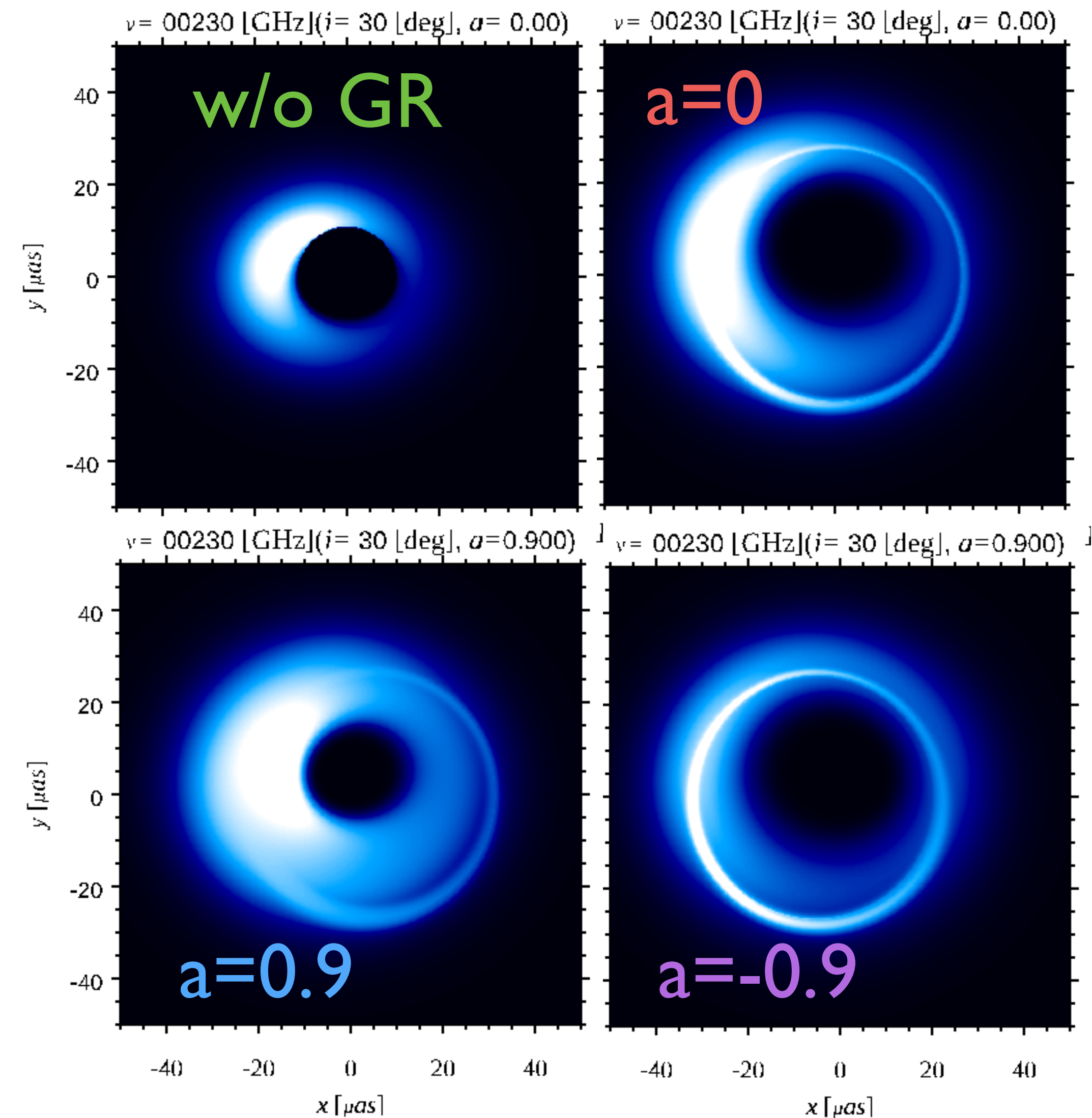
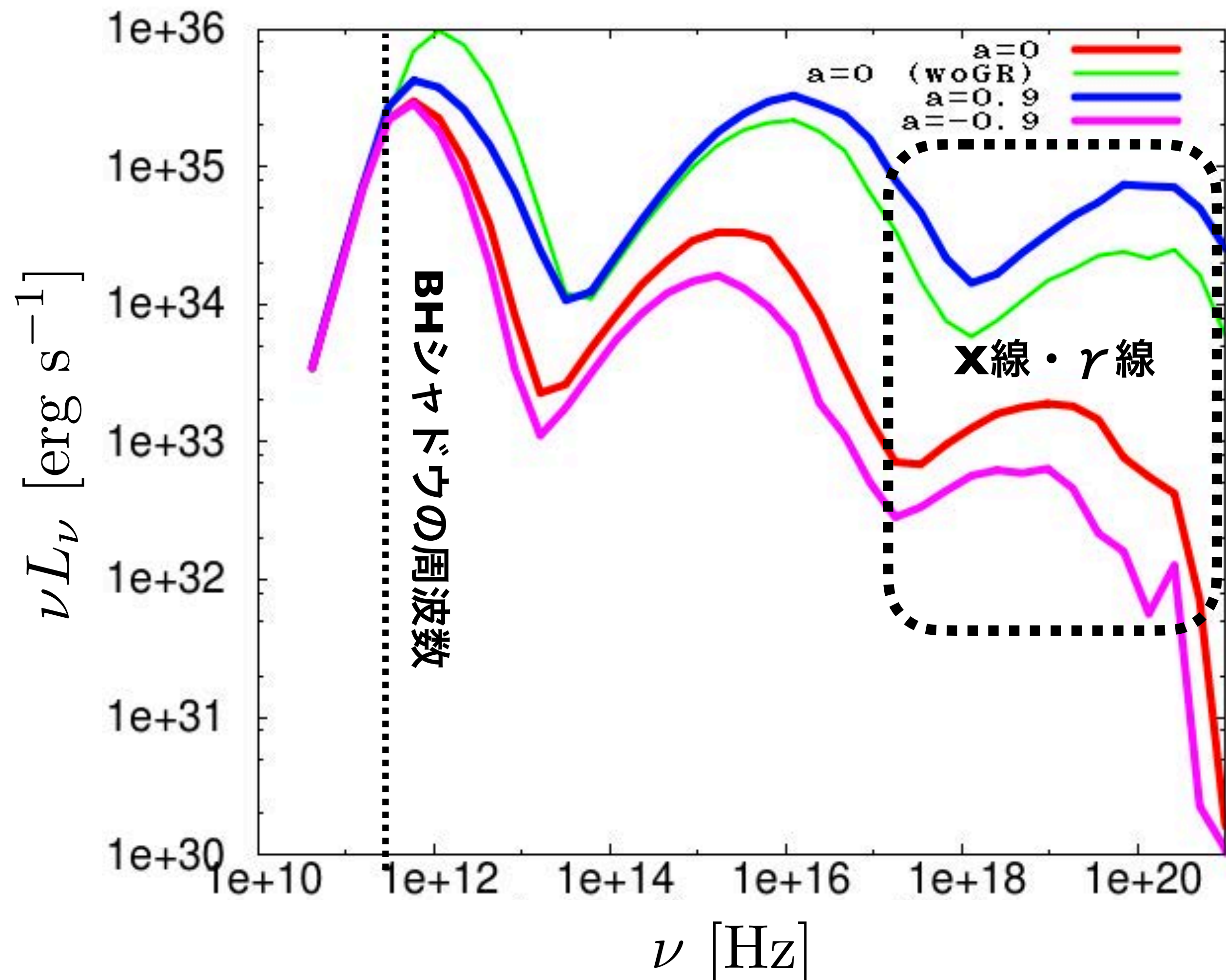


多波長計算へ：計算方法



- 簡単のため降着円盤のみ考慮 (Keplerian shell model: Broderick & Loeb 2006)
- サイクロ-シンクロトロン放射/吸収 + コンプトン/逆コンプトン散乱
- BH質量 4.3×10^6 太陽質量
- BHスピン $a = -0.9, 0, 0.9$ 視線角度 $i = 30$ 度
- 230GHz で 1 Jy となる密度分布 (質量降着率)

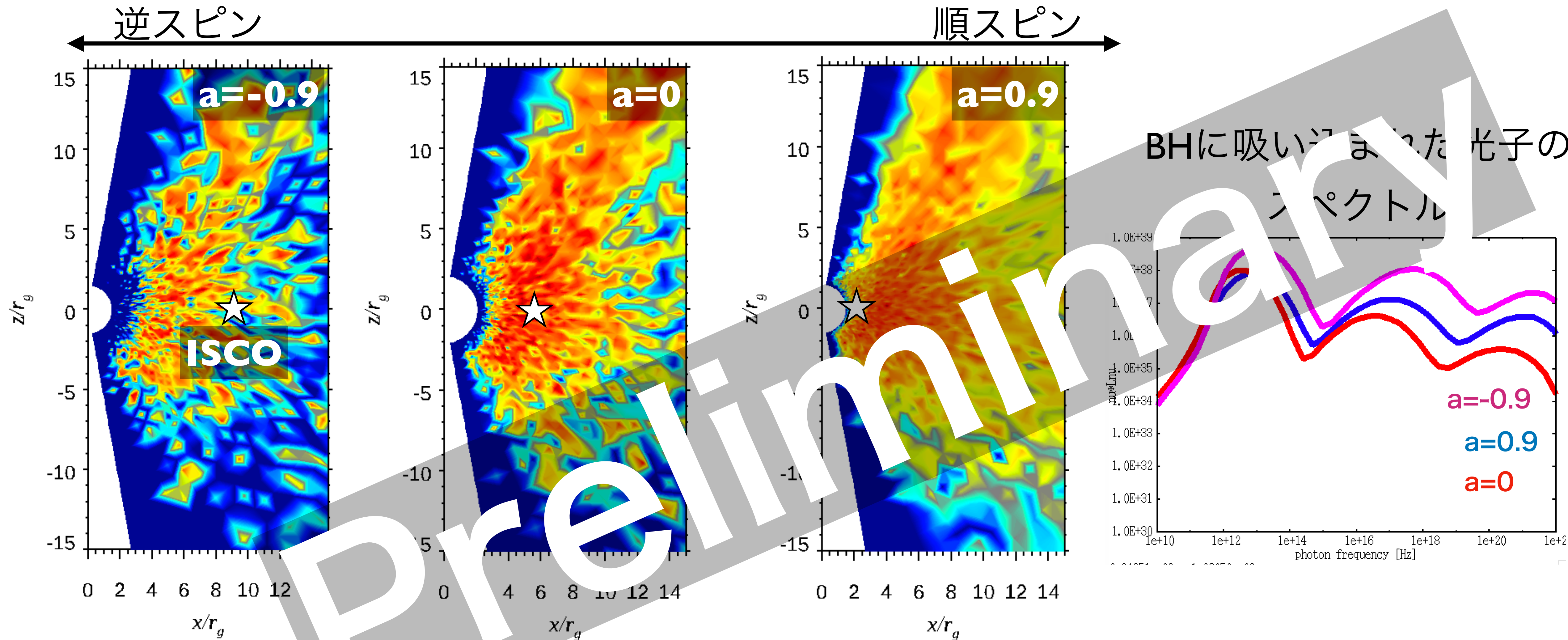
BHシャドウ + 多波長スペクトル (toy model)



• 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 \rightarrow 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

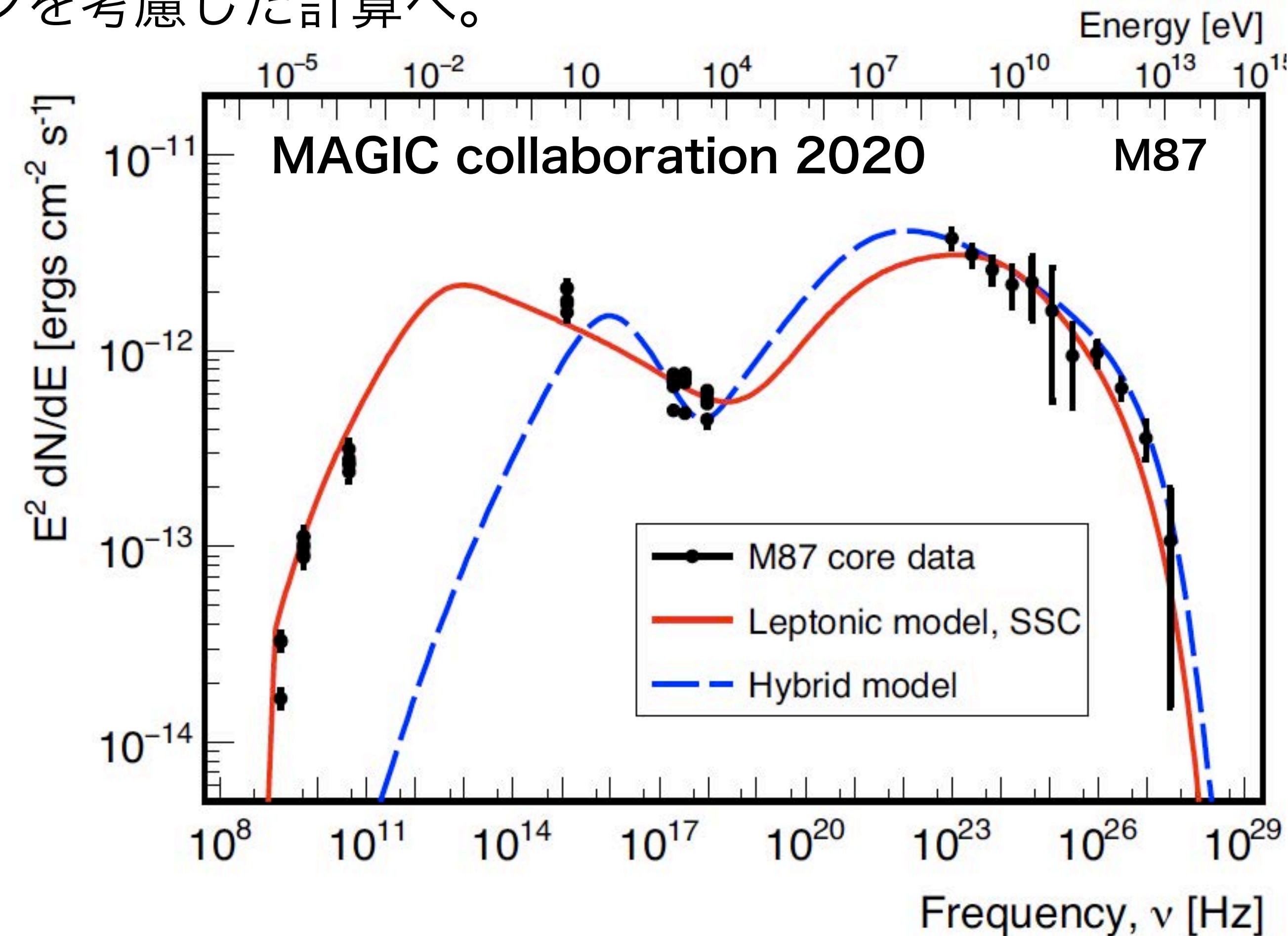
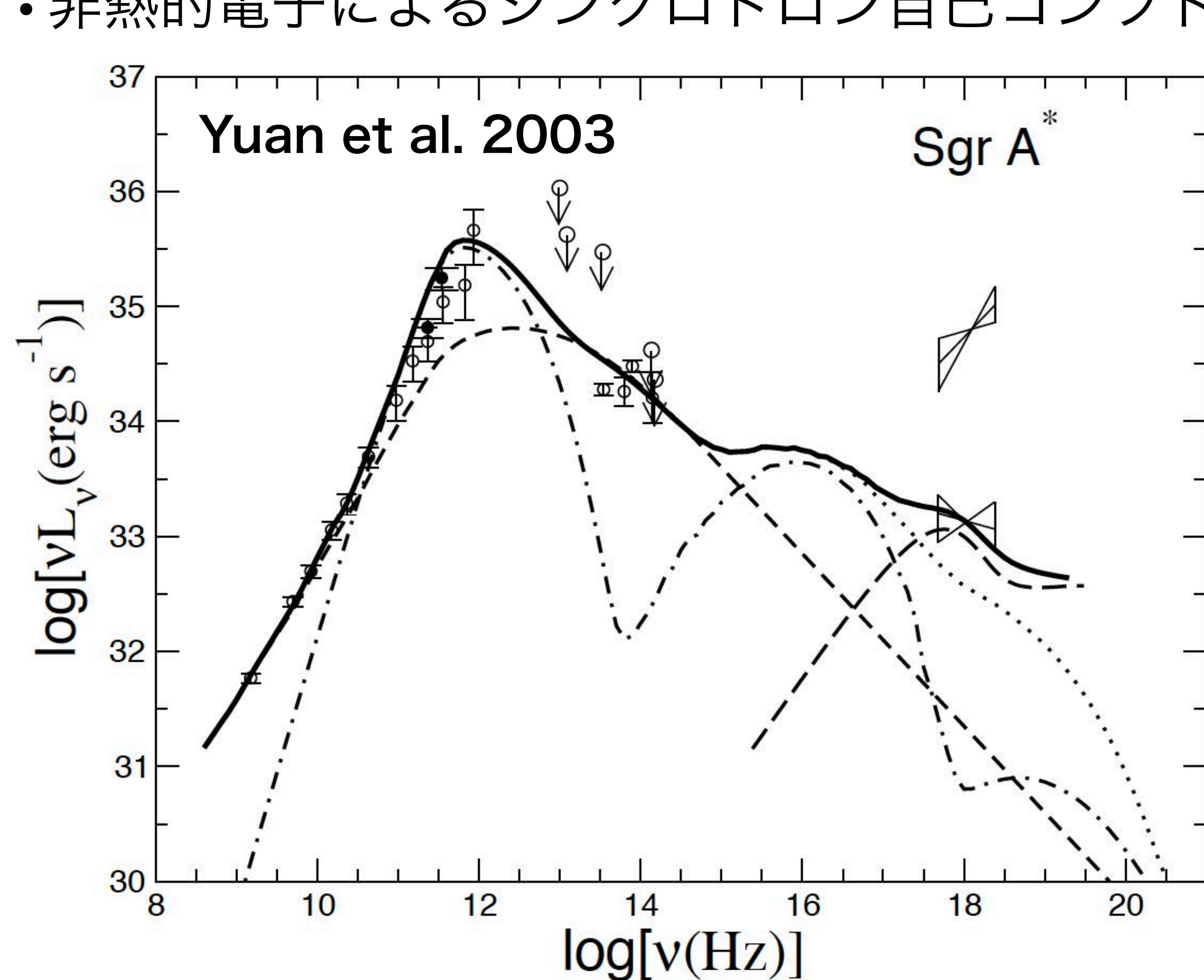
逆コンプトン散乱領域とISCOの関係



- $i=30$ 度の観測者へ届く光子が最大周波数に達した位置情報 (色は規格化した光子数。赤色ほど多くの光子を散乱)
- 逆スピン \rightarrow ISCO外側 \rightarrow 散乱後高速落下流によりBHに吸い込まれる (吸い込まれるX線光子のエネルギーは $a = -0.9 > 0.9 > 0$, Compton-Penrose processも複合的に効いているか? 調査中。) \rightarrow 観測スペクトルはソフト

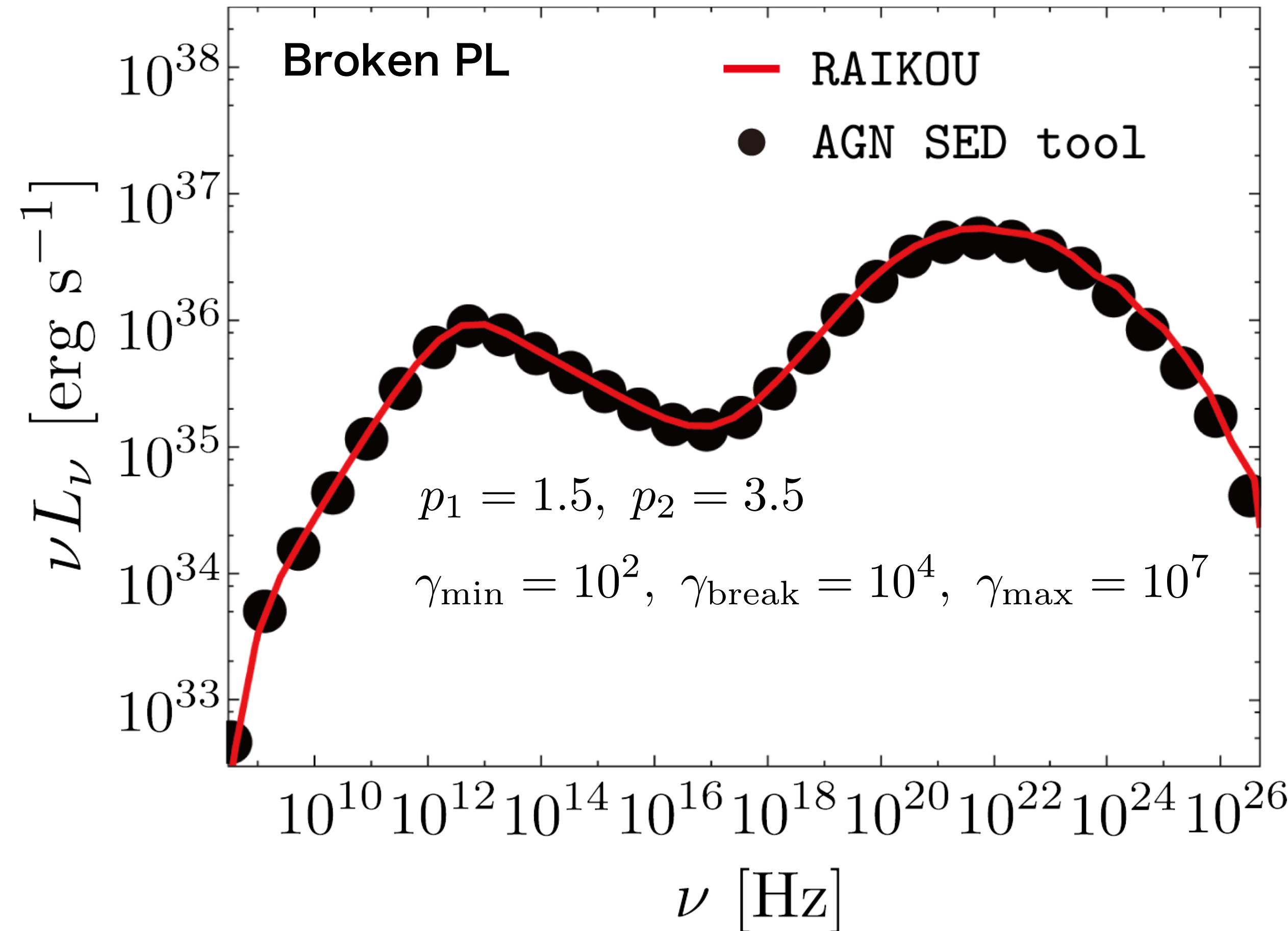
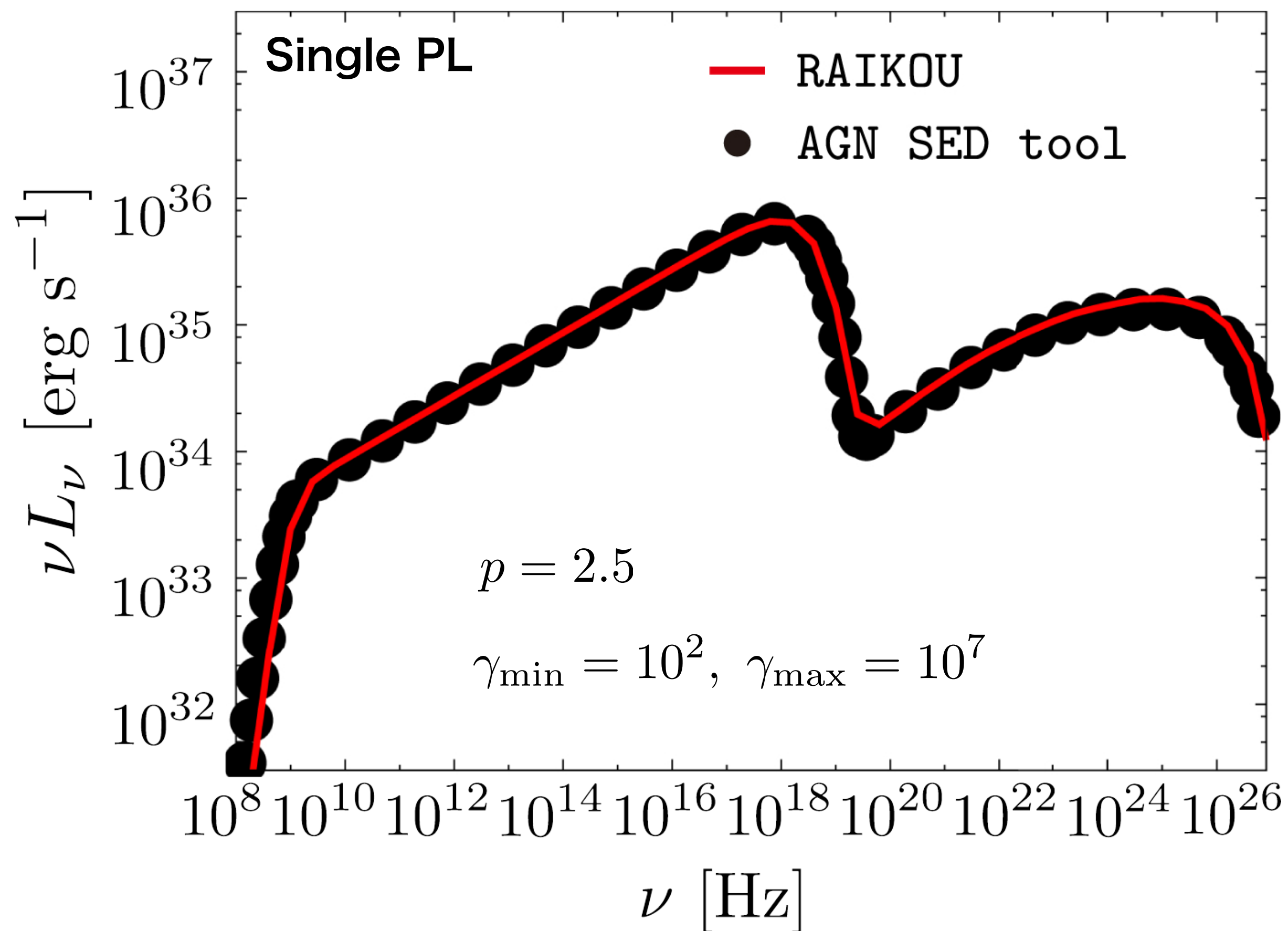
非熱的電子の重要性

- SgrA*やM87の電波の低周波 (<100 GHz)では非熱的電子がSEDに寄与すると考えられている。
- M87のVHE ガンマ線放射も非熱的電子が重要
- 非熱的電子によるシンクロトロン自己コンプトンを考慮した計算へ。



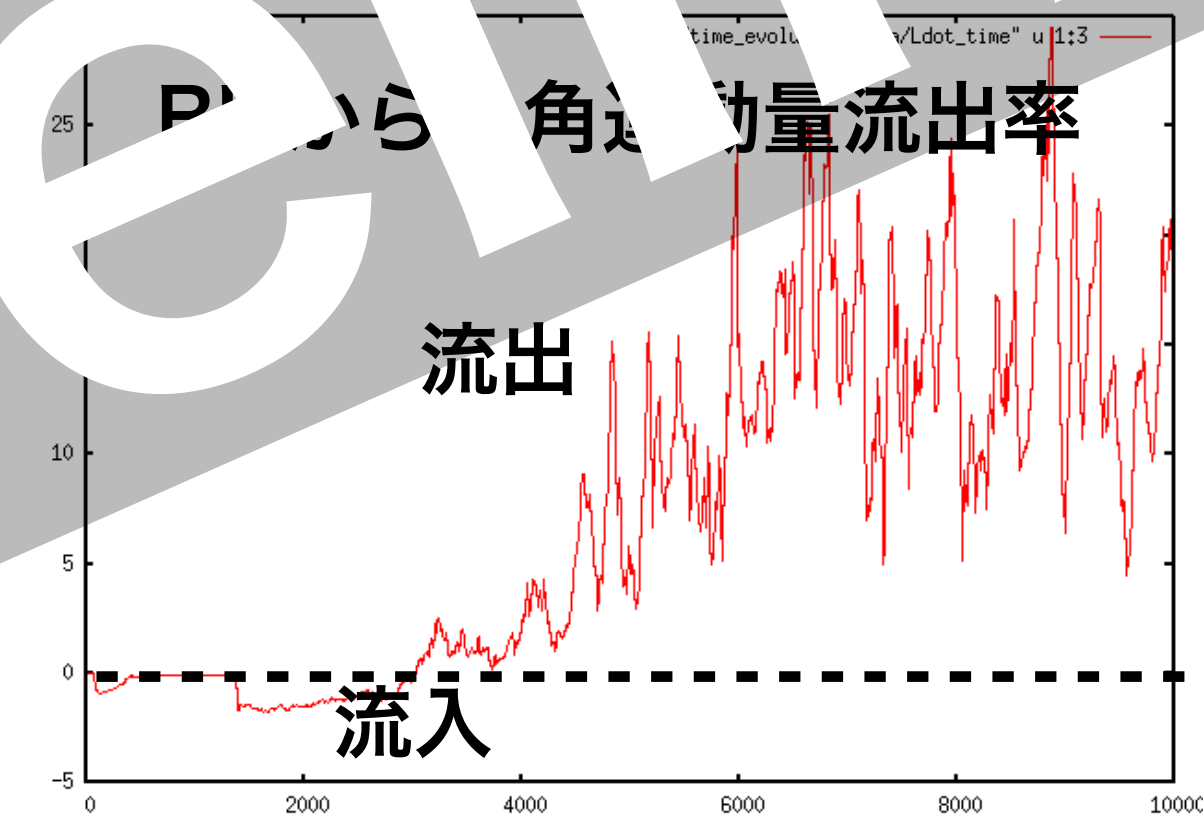
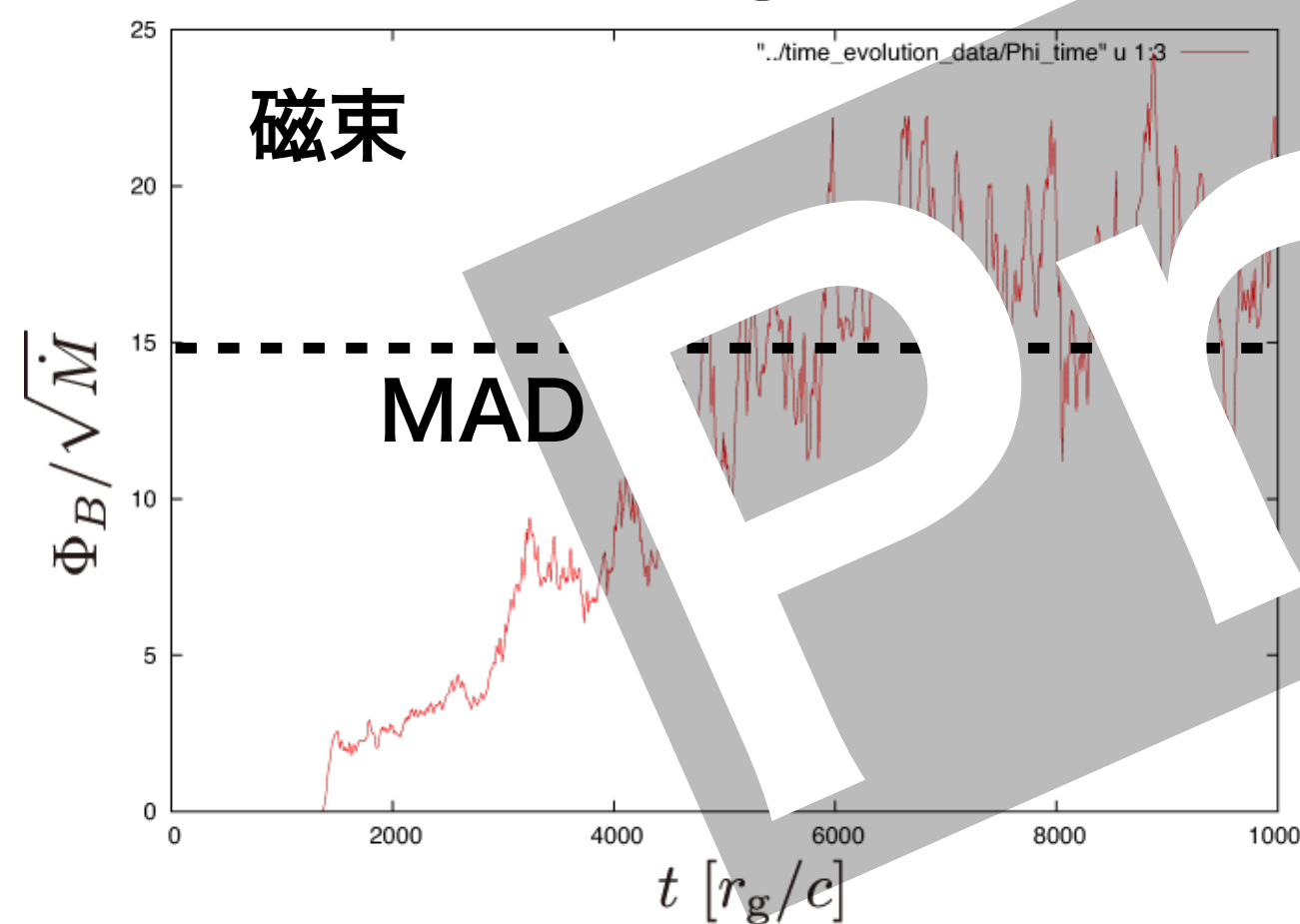
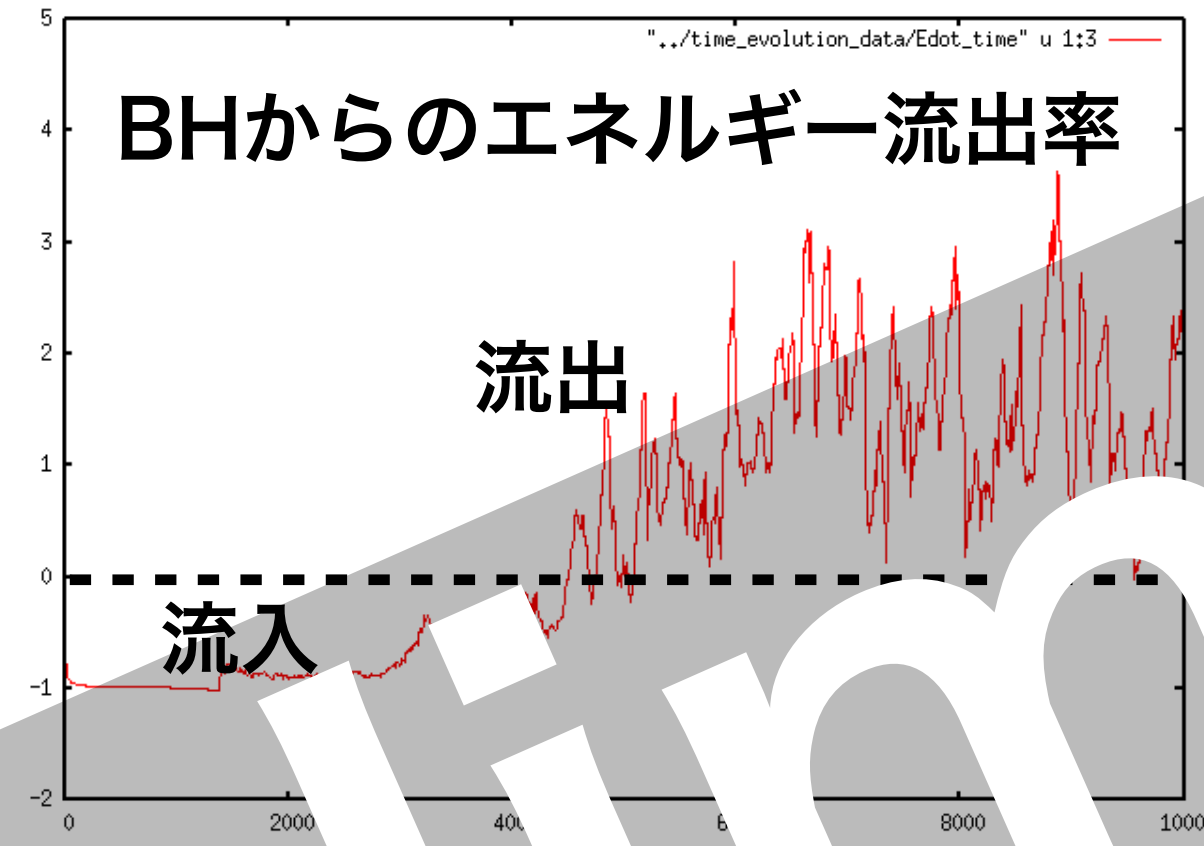
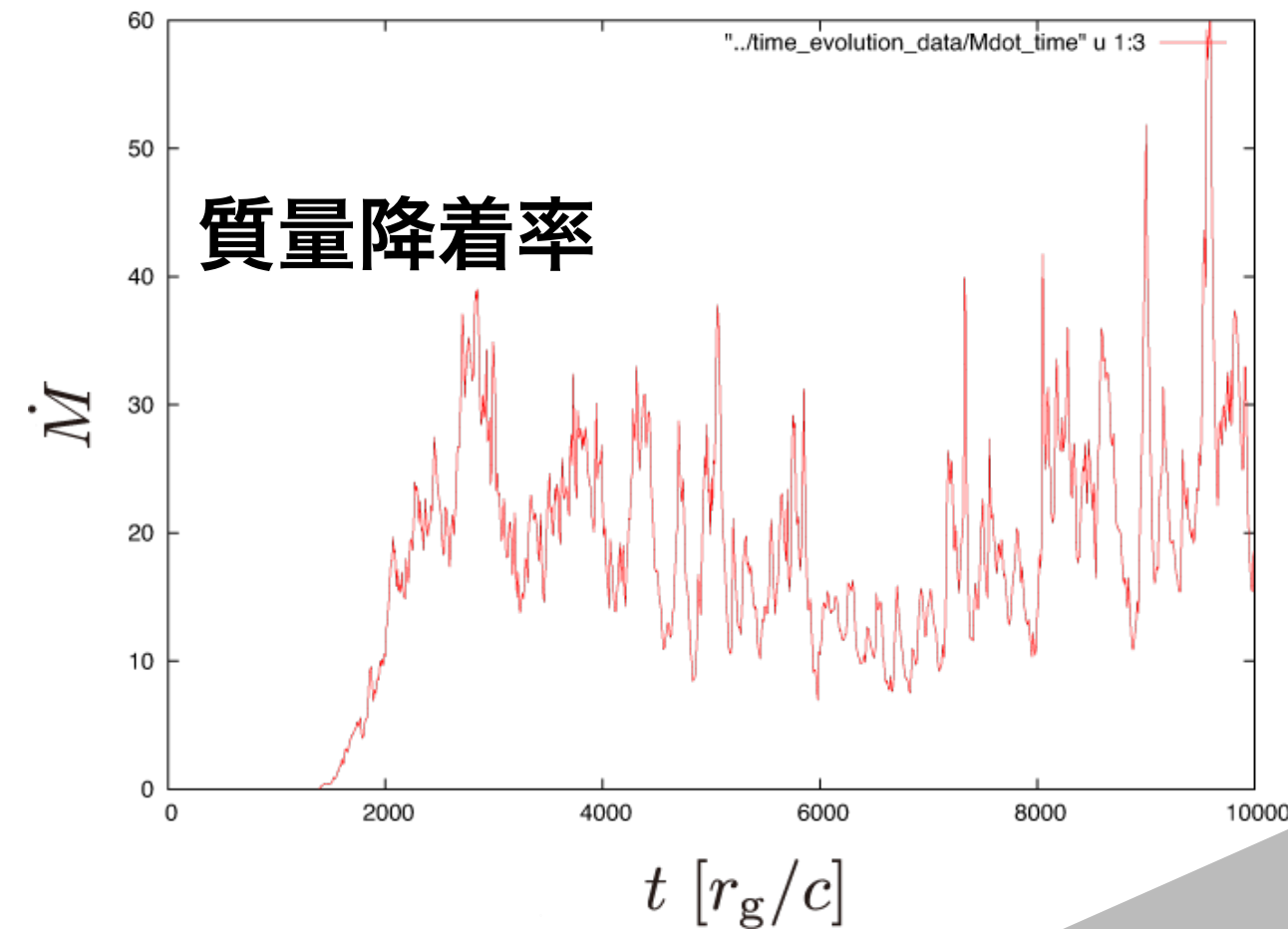
非熱的電子によるシンクロトロン自己コンプトン (SSC) のテスト計算

- Single/broken power-law分布のSSCテスト計算
- 一様プラズマ球 ($r=10^{15}$ cm, $n_e=10^3$ cm $^{-3}$), 等方的ランダム磁場($B=0.01$ G)
- 他のコードの結果を再現。



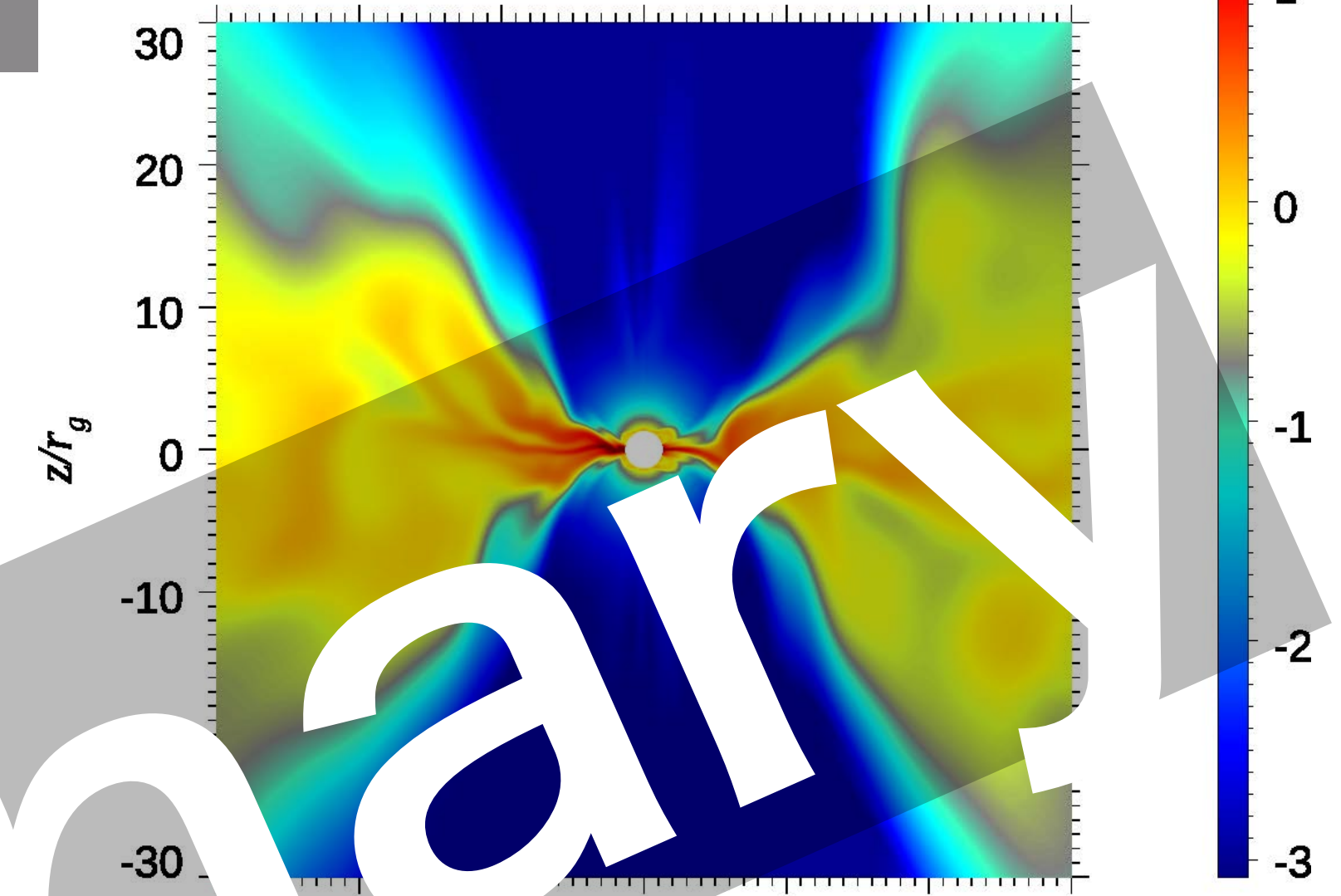
GRMHD + GRRT w/ nonthermal electrons (I)

- GRMHD: UWABAMI コード (Takahashi, H.R. + 2016) を用いた MAD (Magnetically Arrested Disk) シミュレーションを実施
- BH スピン: $a = 0.9375$



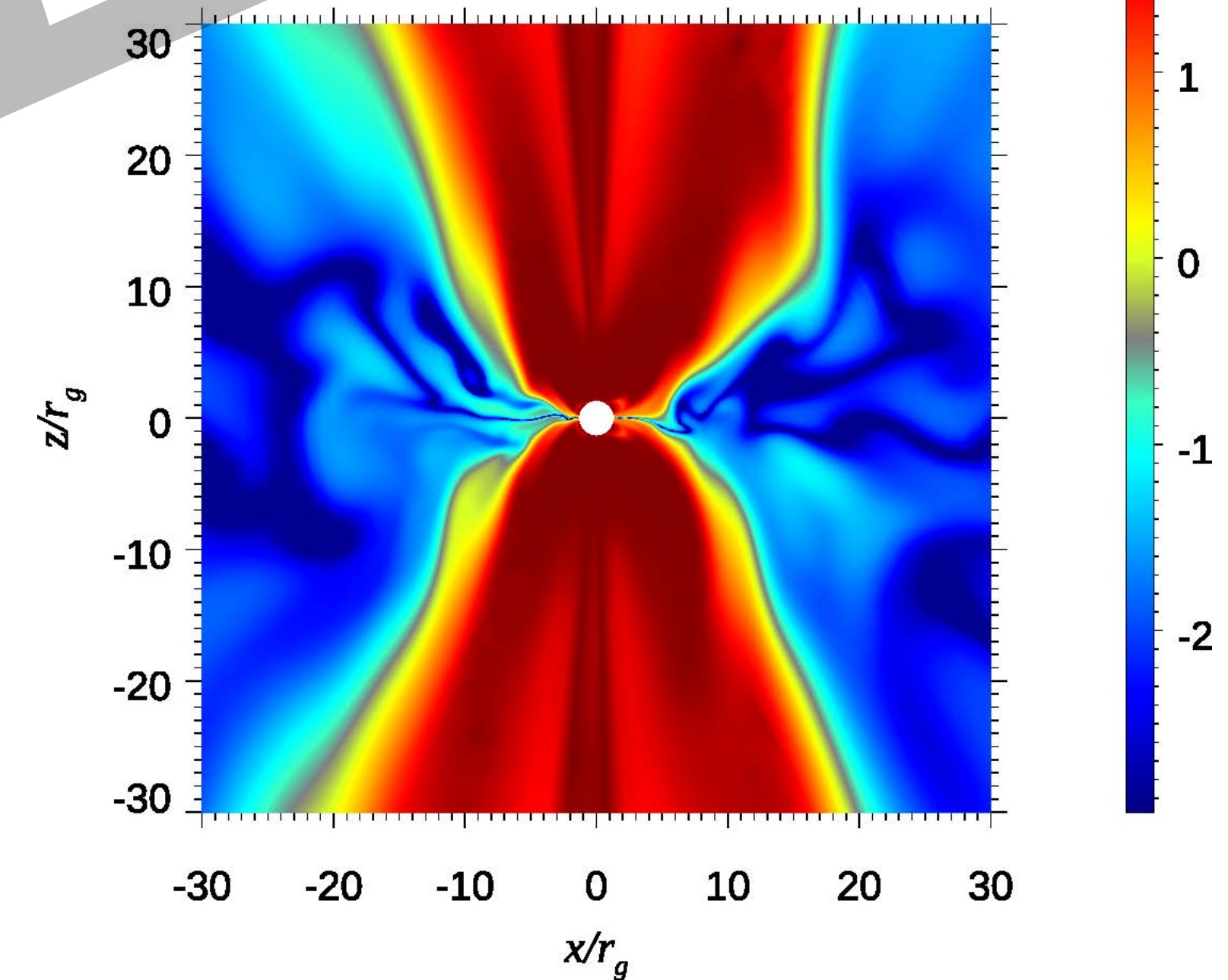
質量密度 (ムービー)

$t = 09000$



$\sigma = B^2 / \rho c^2$ (ムービー)

$t = 09000$



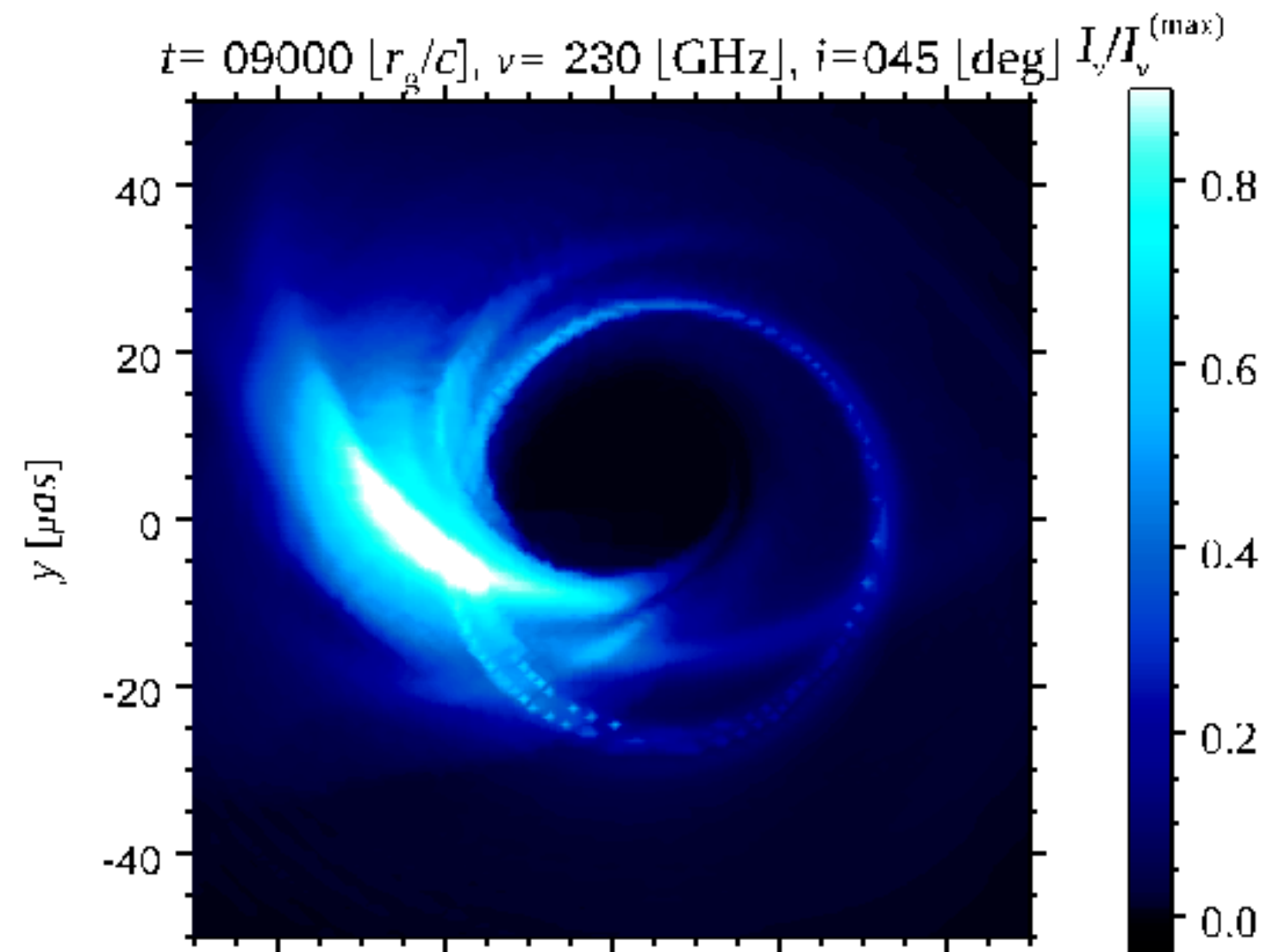
(MAD code comparison project)

GRMHD + GRRT w/ nonthermal electrons (2)

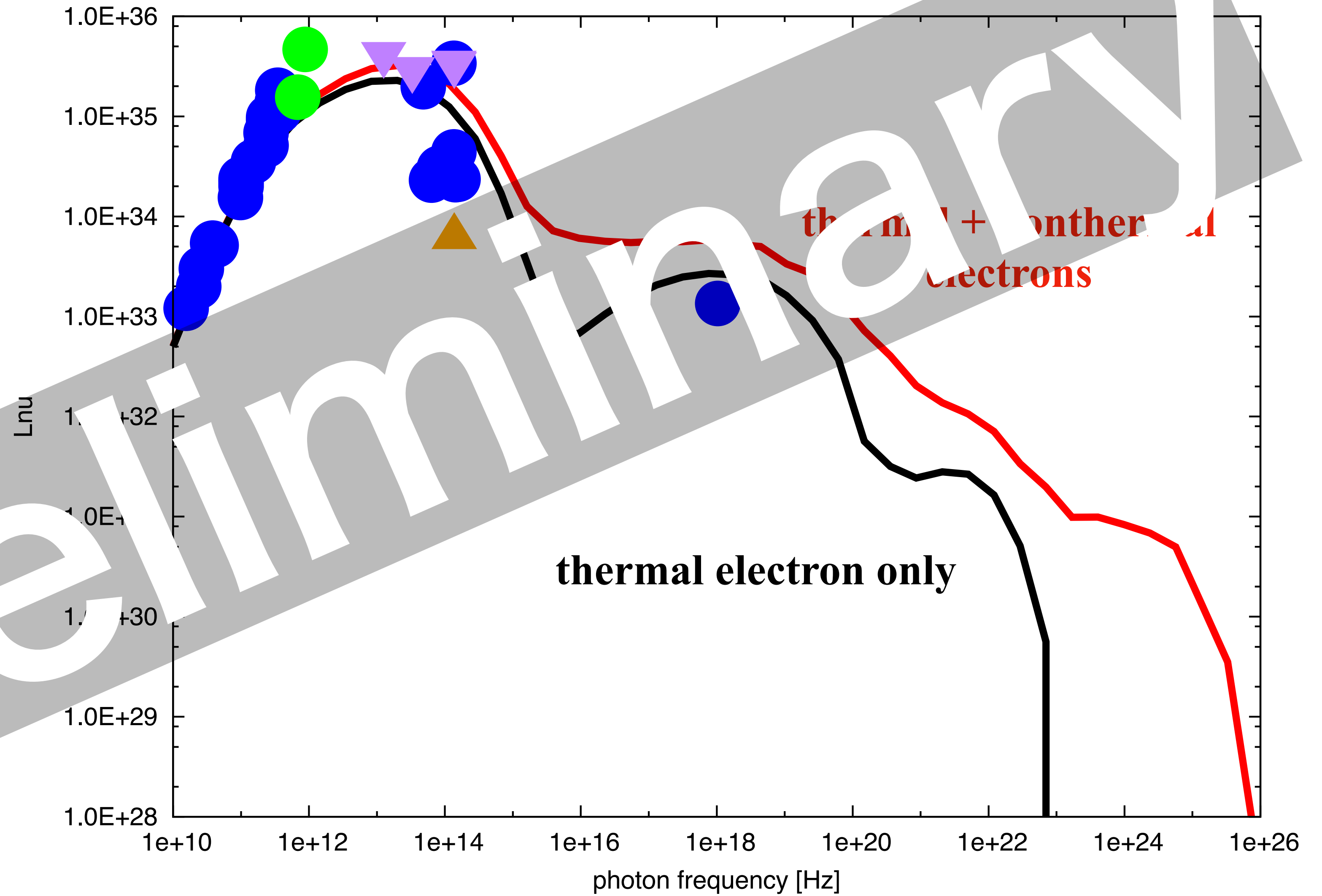
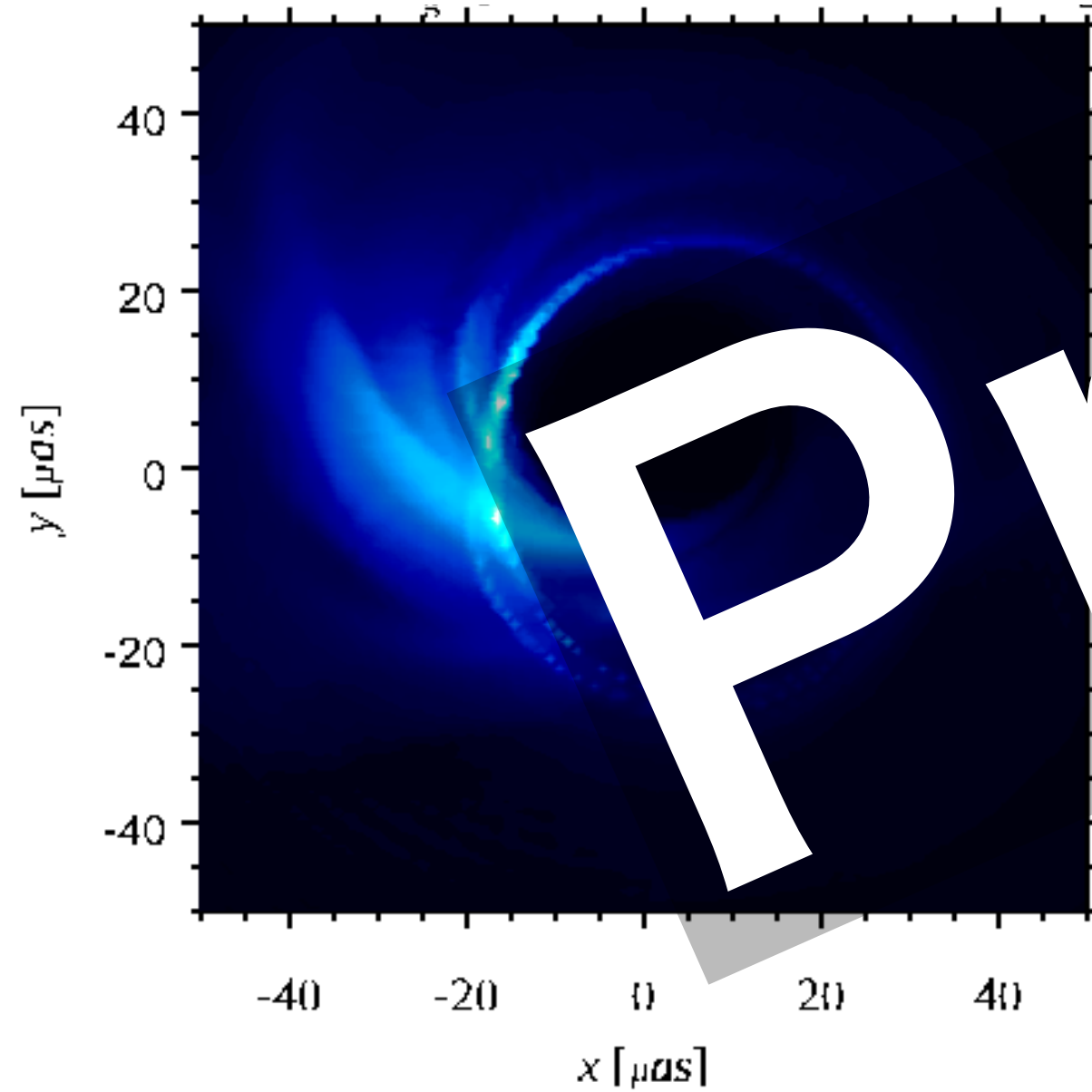
- GRRT: RAIKOU コード
- ターゲット天体 : Sgr A* ($M_{\text{BH}}=4.1$ 太陽質量, $D=8.1$ kpc)
- 視線角度: 45 度
- 熱的電子: $R_{\text{high}} = 10, R_{\text{low}} = 1$ $\frac{T_p}{T_e} = R_{\text{high}} \frac{\beta^2}{1 + \beta^2} + R_{\text{low}} \frac{1}{1 + \beta^2}$
- 非熱的電子
 - Single power law, $\gamma_{\text{min}} = 100, \gamma_{\text{max}} = 10^6, \text{PL index} = 3.5$
(Chael + 2017 と似た設定)
 - 各位置において 磁気エネルギー密度の 1% が非熱的電子のエネルギーに
(Dexter+ 2011 と同様の扱い).

Result of a test calculation

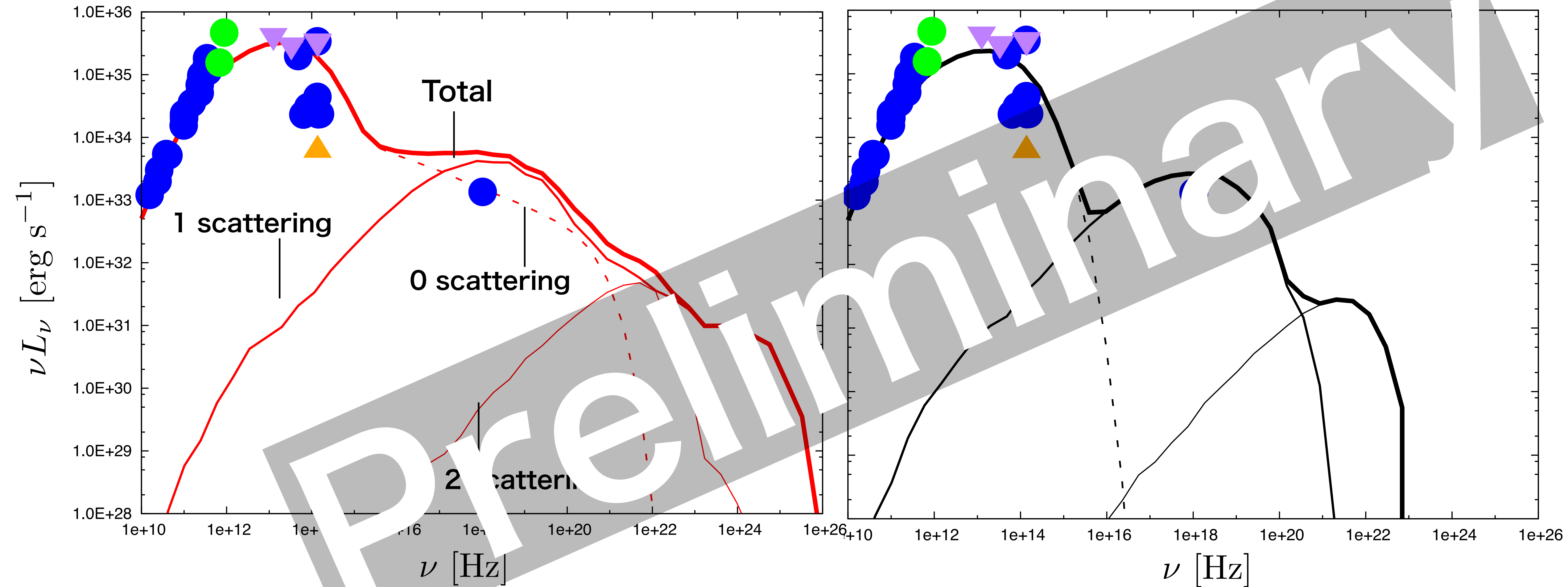
thermal + nonthermal



thermal only



Decomposition of SEDs



まとめと展望

- EHTにより事象の地平面近傍プラズマからの放射がダイレクトに観測できるBH天文学の新たな時代が到来した。
- BHスピンの測定や相対論的ジェット噴出機構等、依然として多くの面白く重要な謎が残されている。
- 将来EHTの高解像度イメージ観測によりBHスピンや相対論的ジェット噴出機構の手がかりが得られるかもしれない(三日月状シャドウやstagnation surface)。
- 多波長SEDは今後、モデル(BH spin, SANE/MAD)の制限に向けて強力な道具になりつつ、VHEガンマ線起源を探れる可能性あり。非熱的粒子の注入・冷却・伝搬を取り入れたGRRMHDシミュレーションに向けて少しずつアップデートしたい(5年ぐらいの計画?)
- 近いうちにニュートリノ計算 w/ 浅野さん