

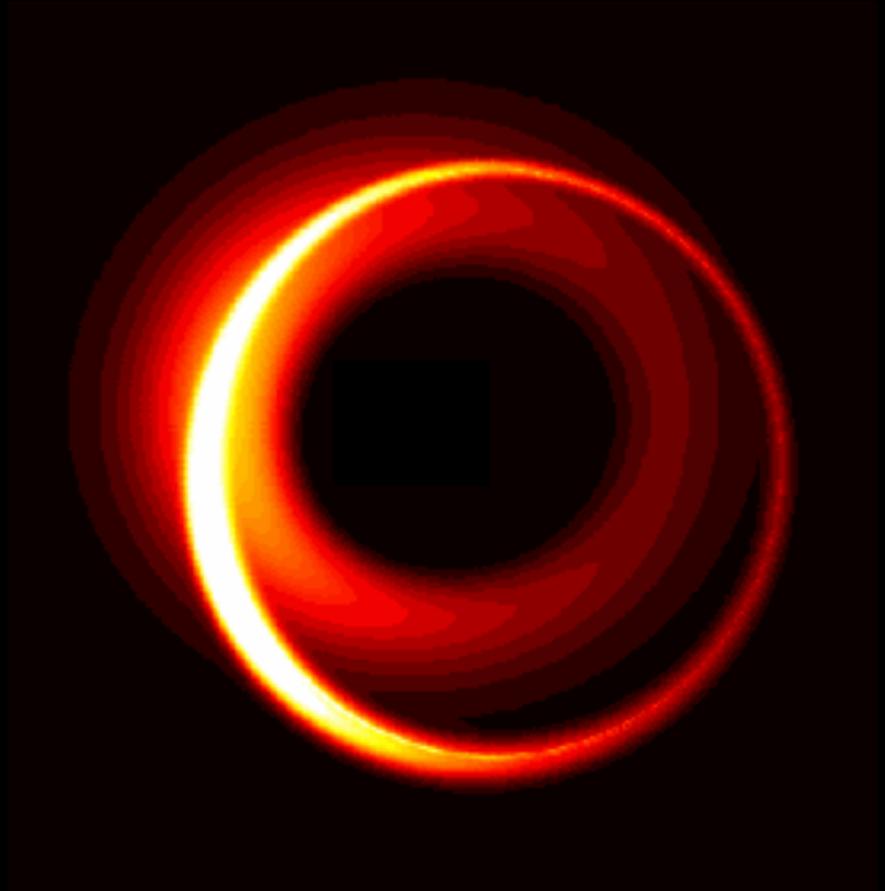
# 時間変動する観測イメージを用いた ブラックホールスピンの推定

高橋幹弥(筑波大学→東京高専)

2024/2/28-3/2 ブラックホール大研究会@御殿場

共同研究者

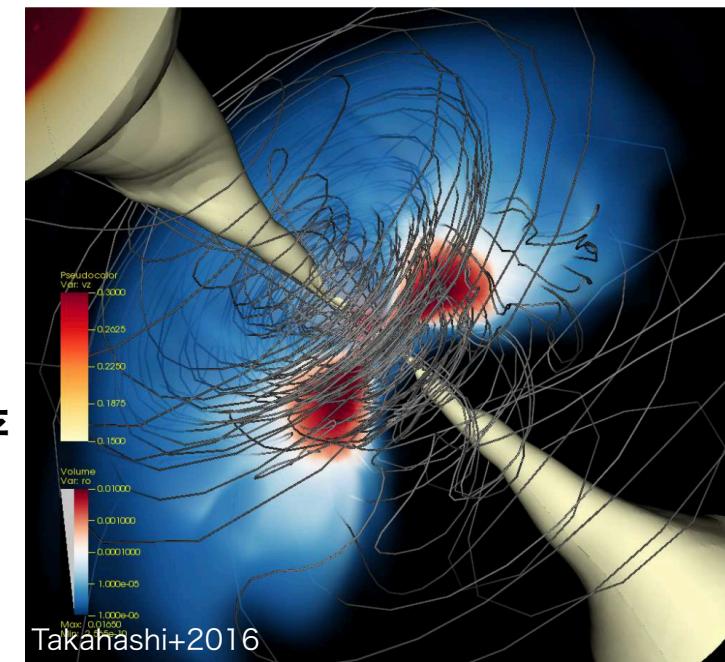
川島朋尚（東大宇宙線研）、大須賀健（筑波大学）



# なぜブラックホールスピンが重要か？

- 重力理論の検証に重要
    - 一般相対論では、ブラックホール(BH)は**質量**と**スピン**(自転角運動量)でほぼ特徴付く
  - BH周囲で起こる現象を理解する上で重要
    - BH近傍で生じる**ジェット**や**ウインド**のパワーはBHスピンに依存  
(Blandford & Znajek 1977, Narayan+2022, Utsumi+2022)
    - BH近傍で生じるアウトフローは非常に遠方まで到達  
(活動銀河核では~100kpc)
- $1 \text{ pc} \simeq 3.0 \times 10^{16} \text{ m}$

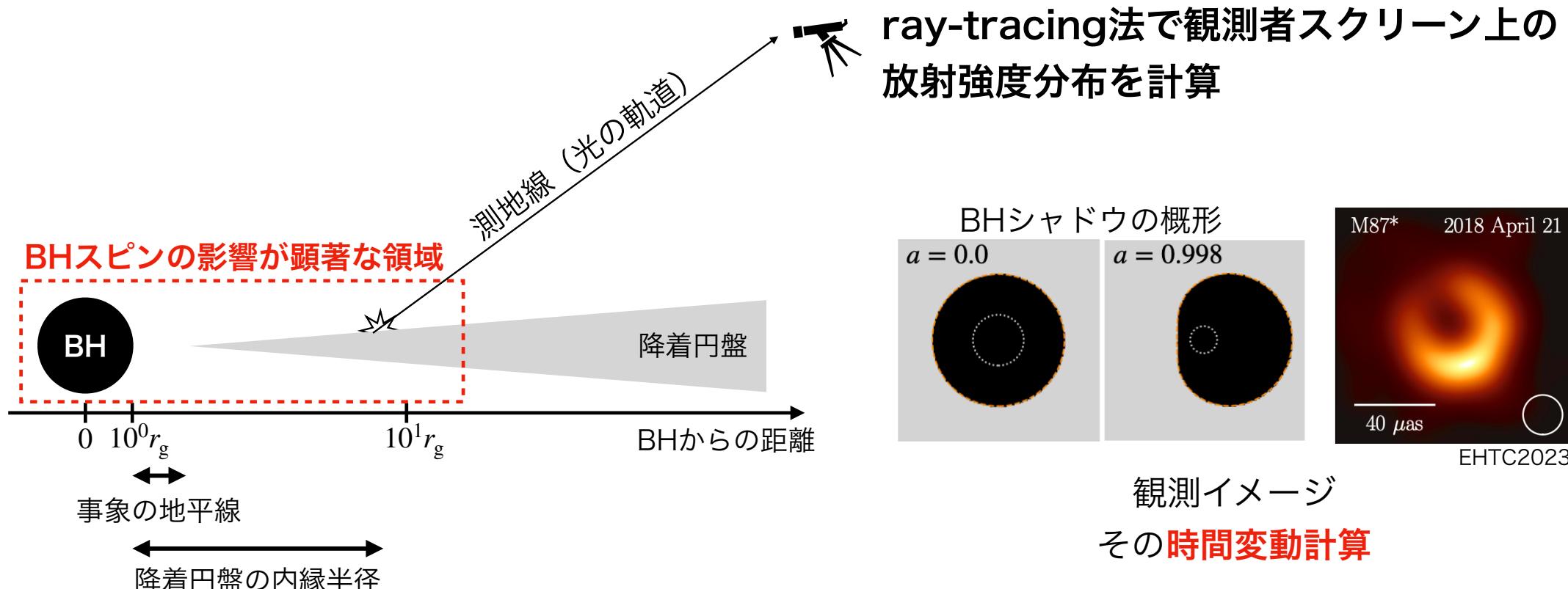
一般相対論的輻射磁気流体計算による  
降着円盤・ジェットの大局部的構造



BHのごく近傍から銀河スケールにわたる幅広い空間スケールでの  
現象や構造を理解する上でBHスピンを正確に知ることは重要！

# ブラックホールスピンを観測的に知るには？

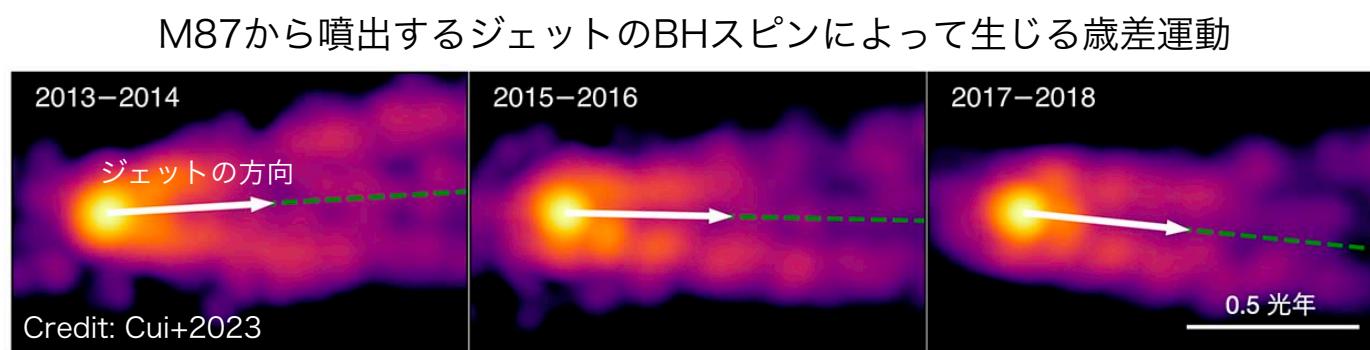
- BHのごく近傍からの放射を捉えることでBHスピンを推定可能 (e.g., BHシャドウ)



**BHスピンにその構造が依存し、近年観測が現実になった観測イメージに注目**

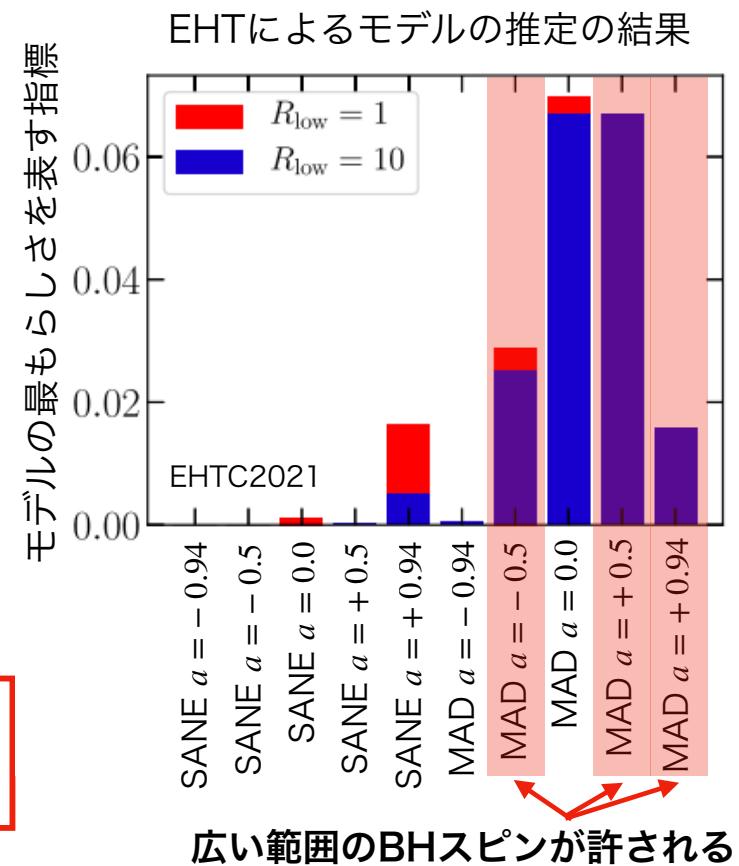
# M87\*の観測的性質

- 電波銀河M87中心には回転する超大質量BHの存在が確実視される



- 基本的には、光学的に薄い降着流とジェットからの放射で観測結果を説明可能 (Narayan+1995, Yuan+2002)

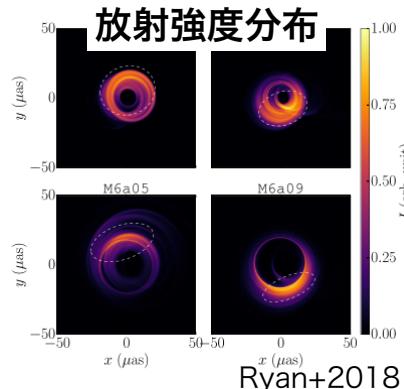
M87\*の存在や回転していることはわかっているものの  
そのスピンの確かな値は得られていない



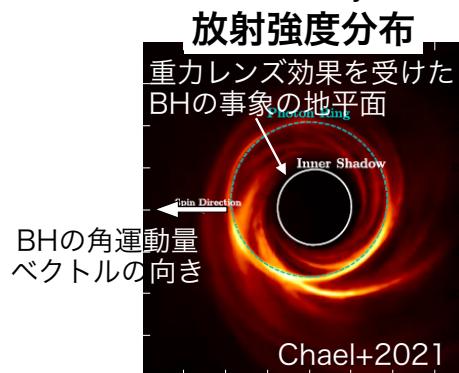
SANE(Standard And Normal Evolution): 磁場が弱い降着流  
MAD(Magnetically Arrested Disk): 磁場が強い降着流

# M87\*のブラックホールスピンの推定

- 光学的に薄い降着流・時間変動なし



観測イメージのサイズと  
多波長スペクトルを  
組み合わせたスピンの推定

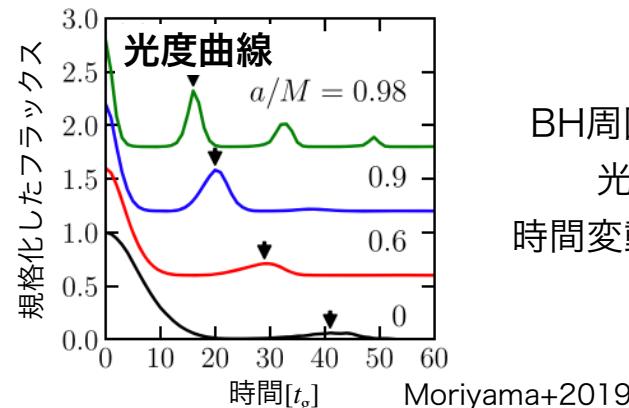


観測イメージの  
特徴的な構造による  
スピンの推定

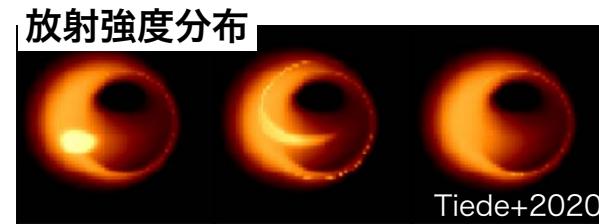
(軸は観測者スクリーン上での座標軸)

- 光学的に薄い降着流・時間変動あり

- 数日スケールの時間変動が観測的にも示唆



BH周囲を回る放射領域による  
光度や観測イメージの  
時間変動によるBHスピンの推定



(軸は観測者スクリーン上での座標軸)

ほぼ全ての先行研究で光学的に薄い降着流に注目して議論されている

# 光学的に厚い降着流を考えることの重要性

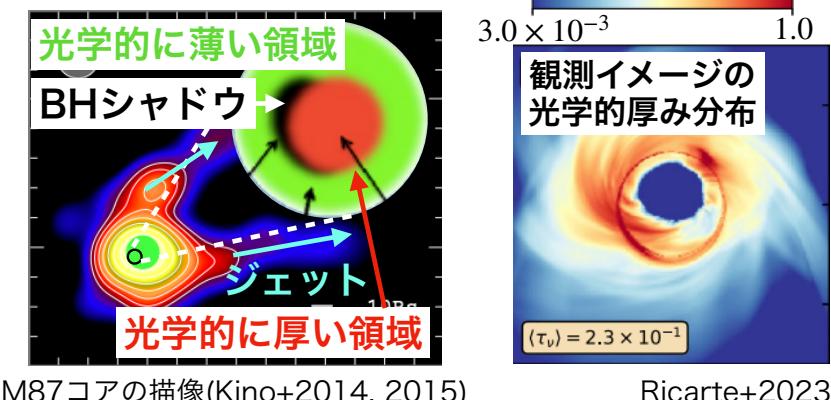
- シンクロトロン吸収が観測イメージの構造に与える影響はあまり調べられていない

- 一時的にM87コアが部分的に光学的に厚くなる可能性  
(Kino+2015)
- 一般的なシミュレーションでも降着円盤内縁部の光学的厚みは0.1 – 1程度 (Ricarte+2023)

- 光学的に**厚い**降着流・時間変動なし (Kawashima+2019)

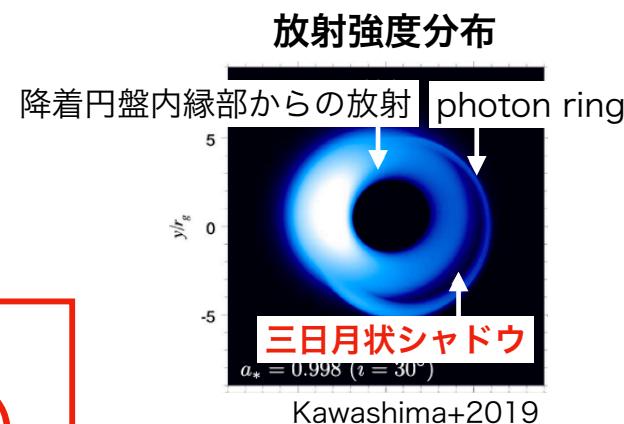
- 部分的に光学的に厚い降着流の観測イメージを計算
- BHスピンに依存する**特徴的な三日月状の構造**を用いた有用なBHスピンの推定手法が提案
- 降着率が高い状態を定常と見なして観測イメージを計算

Kino+2015で解析した期間では他波長でのフレアが観測されており、電波帯で時間変動があっても不自然ではない



M87コアの描像(Kino+2014, 2015)

Ricarte+2023

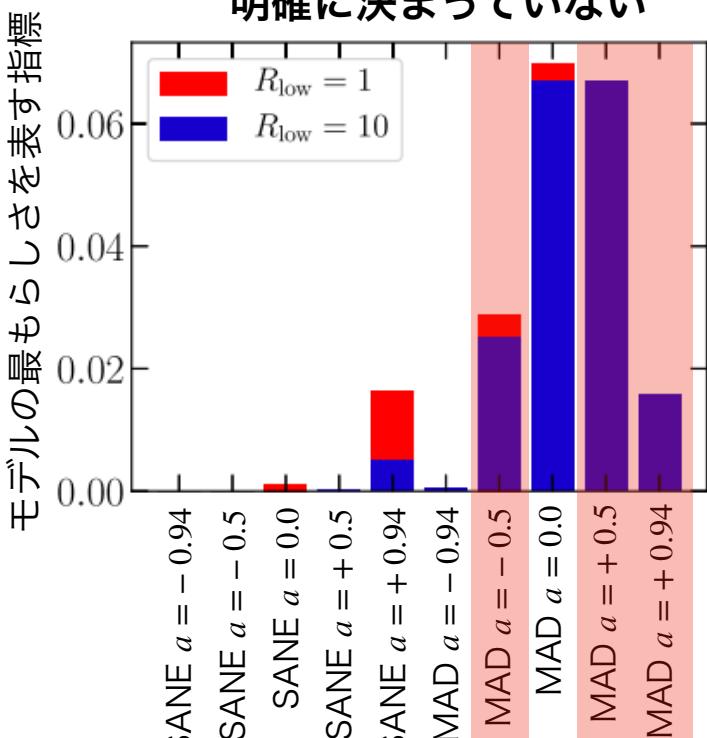


Kawashima+2019

# 第2部の目的

- 対象とするM87\*に関するまとめ

✓ M87\*のスピンは明確に決まっていない



EHTC2021

✓ ほとんどが光学的に薄い降着流に注目

実現され得るケース	時間変動なし	時間変動あり
降着流が光学的に薄い	Ryan+2018 Chael+2021他	Moriyama+2019 Tiede+2020他
降着流が光学的に厚い	Kawashima+2019	本研究

将来の高頻度・高分解能観測を見据えて、  
BHスピンを推定する手法を増やすために  
これまで調べられていない状況に注目して研究する

# ray-tracing法による一般相対論的輻射輸送計算

- 時間依存型一般相対論的輻射輸送コード：CARTOON (Takahashi+2022)
  - 測地線方程式を解いて生成した光の軌道に沿って一般相対論的輻射輸送方程式を直接解く (ray-tracing法)

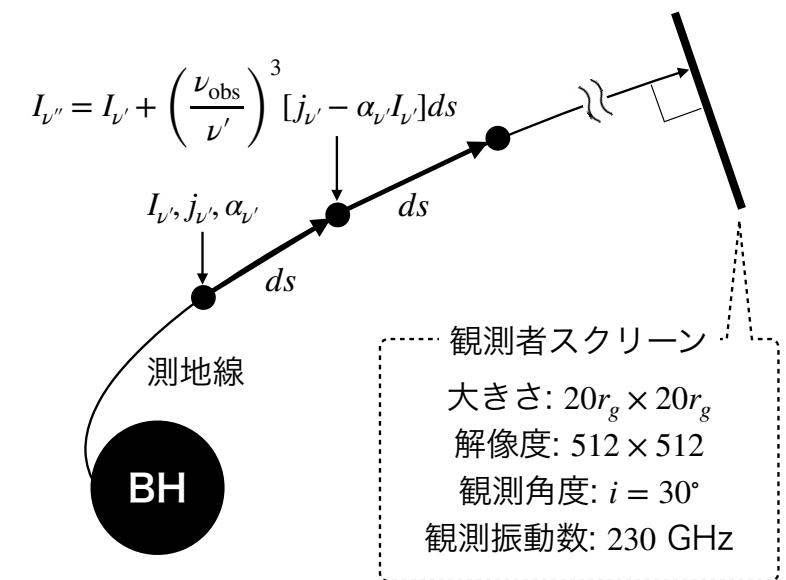
$$\frac{dx^\mu}{d\lambda} = p^\mu, \frac{dp_\mu}{d\lambda} = -\frac{1}{2} \frac{\partial g^{\alpha\beta}}{\partial x^\mu} p_\alpha p_\beta$$

$g_{\mu\nu}$ : 計量テンソル,  $p^\mu$ : 光子の4元運動量,  
 $\lambda$ : 測地線に沿ったパラメータ

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I_{\nu, \text{obs}}}{\partial t} + l^i \frac{\partial I_{\nu, \text{obs}}}{\partial x^i} = \left( \frac{\nu_{\text{obs}}}{\nu'} \right)^3 [j_{\nu'} - \alpha_{\nu'} I_{\nu'}]$$

$I_\nu$ : 放射強度,  
 $\nu_{\text{obs}}$ : 観測周波数,  
 $\nu'$ : 各点の光子の振動数,  
 $j_\nu$ : 放射係数,  
 $\alpha_\nu$ : 吸収係数

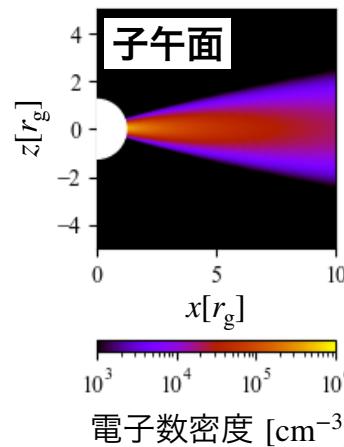
- 光速を無限大として扱う近似なしに、観測イメージの時間変動を厳密に計算 (slow-light calculation)



# 時間変動する降着流のモデル

- 物質分布・速度場

- 初期物質分布



電子数密度

$$n_e = F(t)n_e^0 \left(\frac{r}{r_g}\right)^{-1.5} \exp\left(-\frac{z^2}{2H^2}\right)$$

電子温度

$$T_e = T_e^0 \left(\frac{r}{r_g}\right)^{-1}$$

磁場強度

$$\frac{B^2}{8\pi} = \beta^{-1} n_e m_p c^2 \frac{r_g}{6r}$$

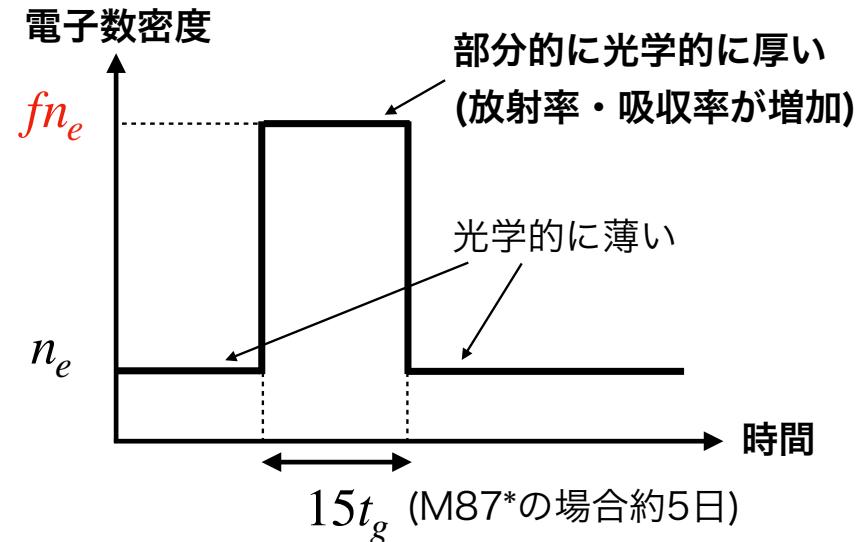
- 速度場はsub-Keplerian

- シンクロトロン放射/吸収を考慮、230 GHzで観測

- 降着流の時間変動

- 電子数密度が矩形波的に時間変動

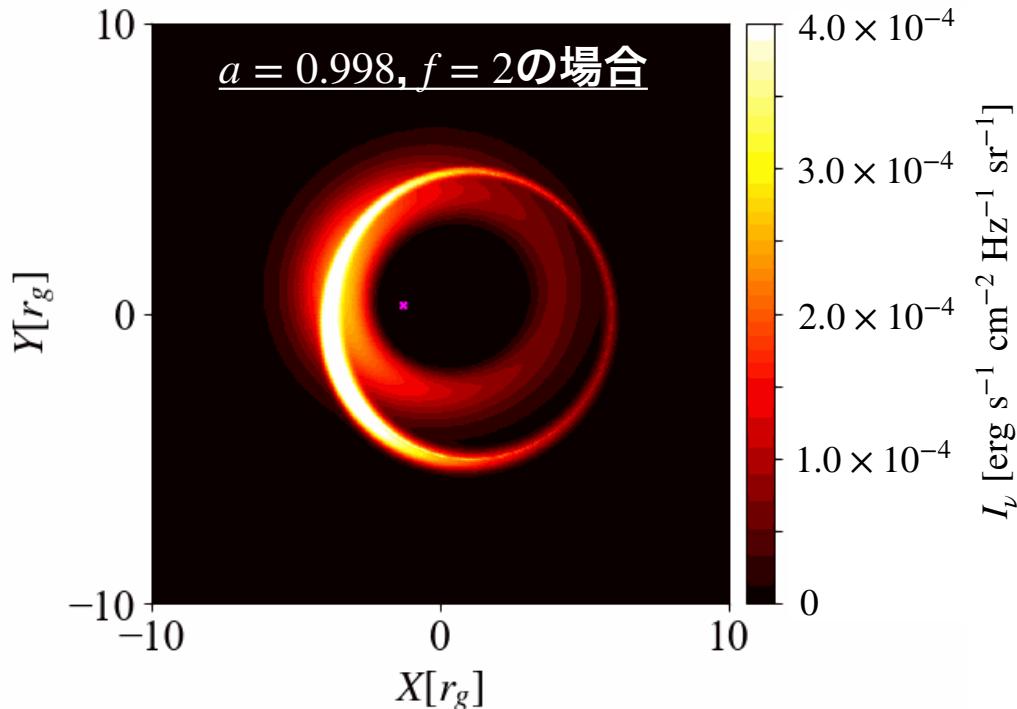
- 光学的に薄い→部分的に厚い状態に変化



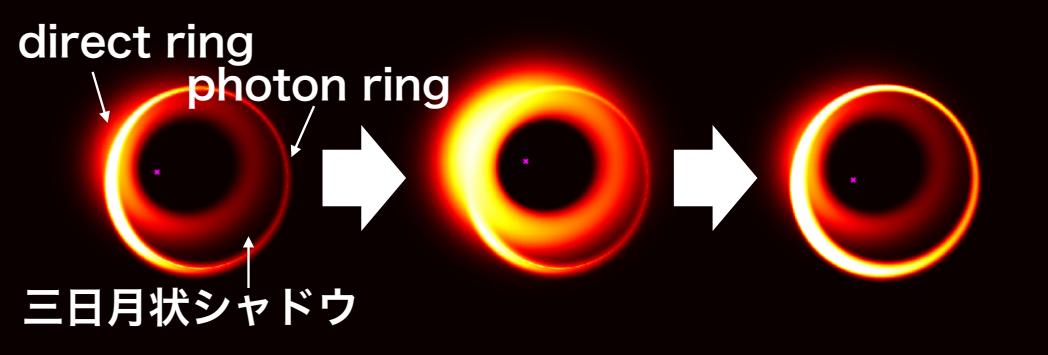
モデルパラメータは2つ

BHスピン  $a$  (3パターン) × variation factor  $f$  (5パターン) = 計15モデル

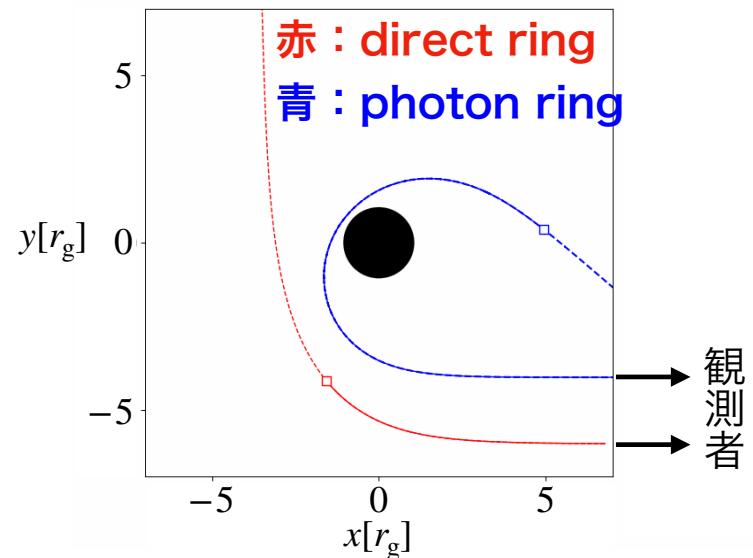
# 230 GHzにおける観測イメージの時間変動：概観



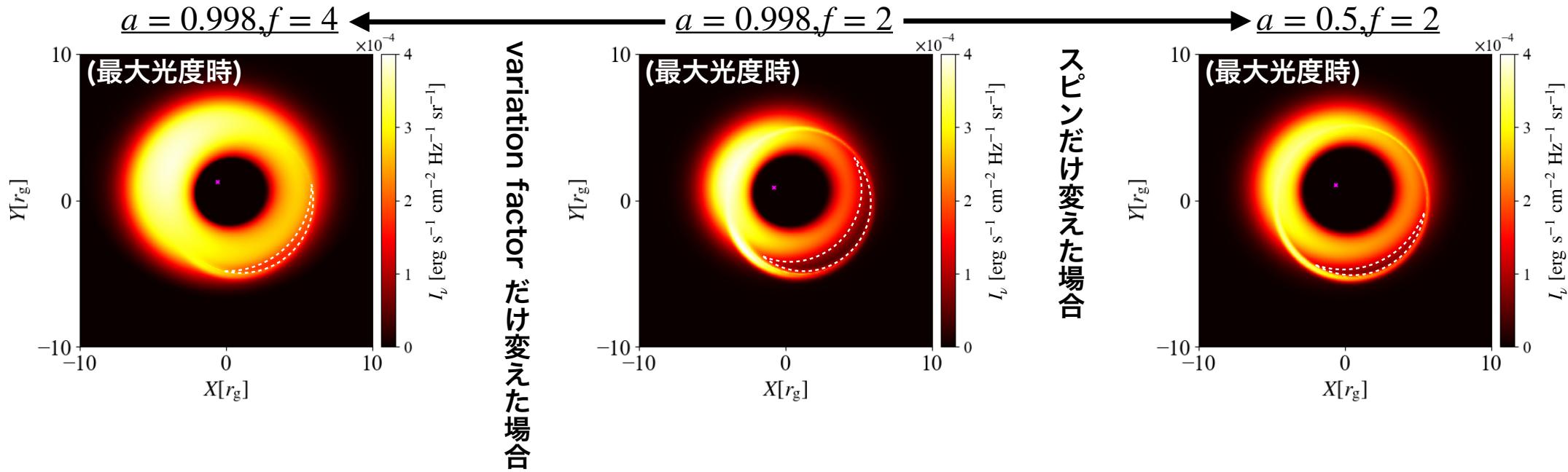
- 初めにdirect ring (観測者に直接到達する成分) が増光
- その後、photon ring (BHの周りを周回して遅れて到達する成分) が遅れて増光
- 両者の間に暗い領域（三日月状シャドウ）が形成



**direct ring**と**photon ring**を作る光子軌道の違い  
光球面から到達する光子の軌道(赤道面への射影)



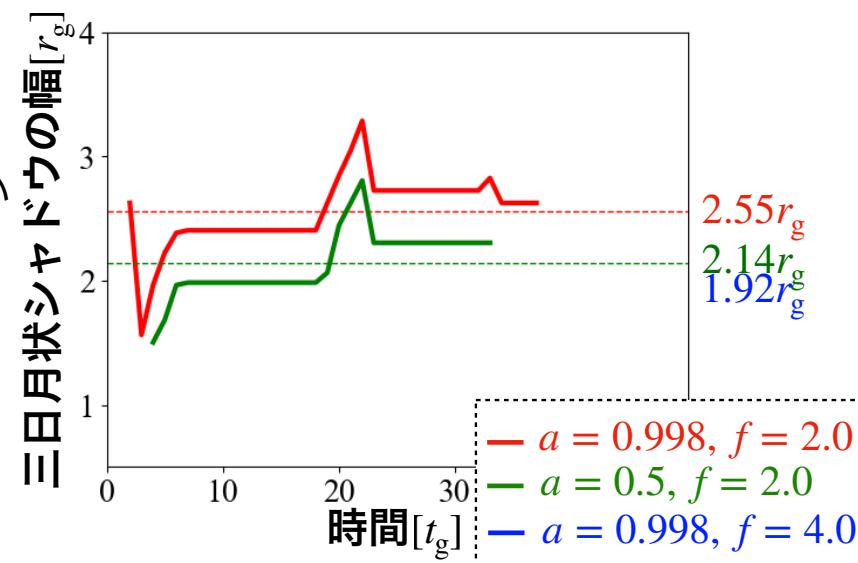
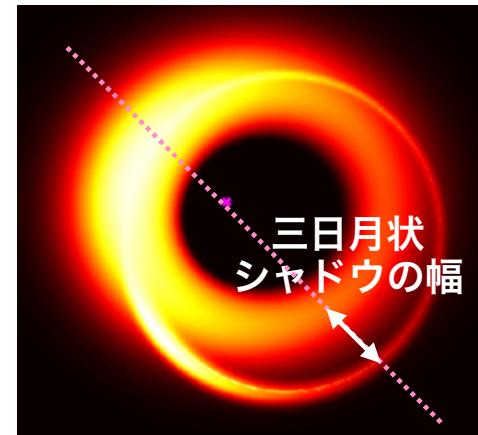
# 観測イメージの時間変動：パラメータによる違い



- 観測イメージの時間変動は、BHスピンとvariation factorの両方に依存
- 最大光度に達する前後（最大光度の50%以上となる期間）だけを抽出して解析を行う

# 観測イメージを特徴づける2つの指標①

- ・ 時間平均した三日月状シャドウの幅
  - ・ direct ringとphoton ringのピーク間の距離を幅と定義
- ・ BHスピンが大きい→三日月状シャドウの幅は大きい
  - BHスピンが大きいほど、direct ringとphoton ringが横方向に大きくずれるため
- ・ variation factorが小さい→三日月状シャドウの幅は大きい
  - variation factorが小さいほど、direct ringの膨張が抑えられるため



# 観測イメージを特徴づける2つの指標②

- 輝度重心の軌道の形状

- 輝度重心の座標

$I_\nu(X, Y)$ :スクリーン上の $(X, Y)$ におけるintensity

$$X_c = \frac{\int_{\text{screen}} I_\nu(X, Y) X dXdY}{\int_{\text{screen}} I_\nu(X, Y) dXdY}, \quad Y_c = \frac{\int_{\text{screen}} I_\nu(X, Y) Y dXdY}{\int_{\text{screen}} I_\nu(X, Y) dXdY}$$

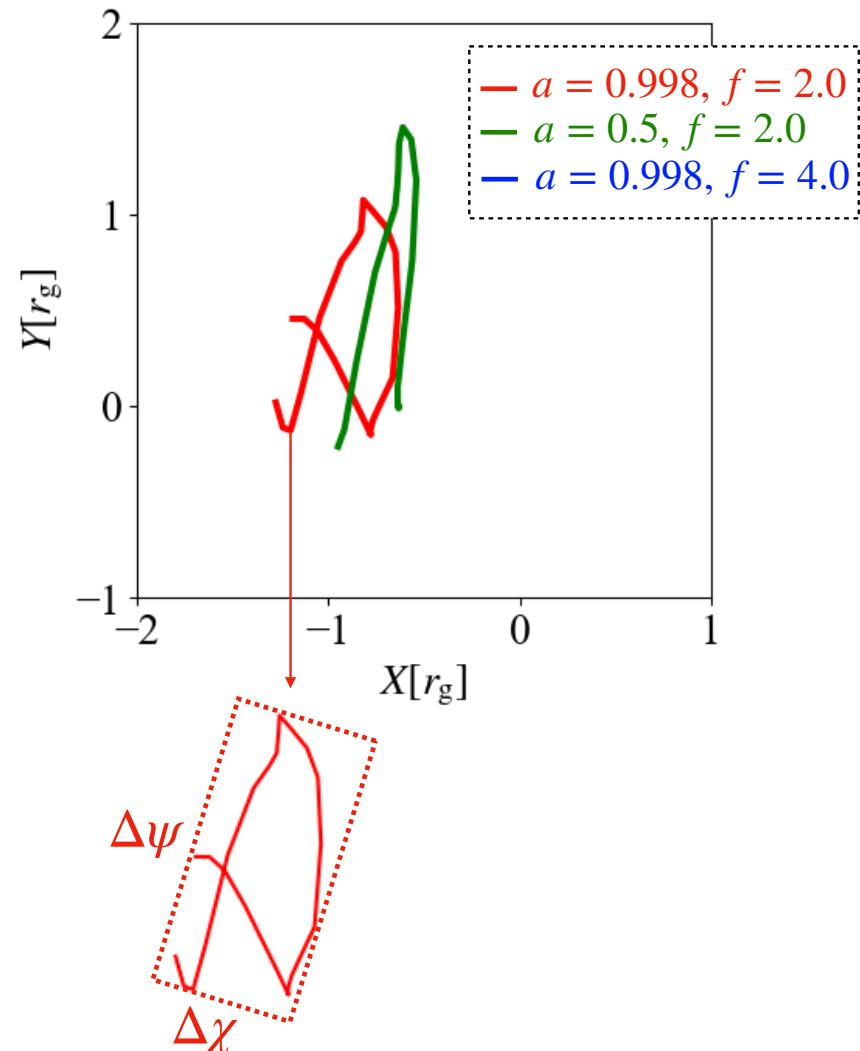
- BHスピンが小さい→軌道は縦に細長くなる

→ BHスピンが小さいほど、direct ringとphoton ringの横方向のずれが小さくなるため

- variation factorが大きい→軌道は縦に細長くなる

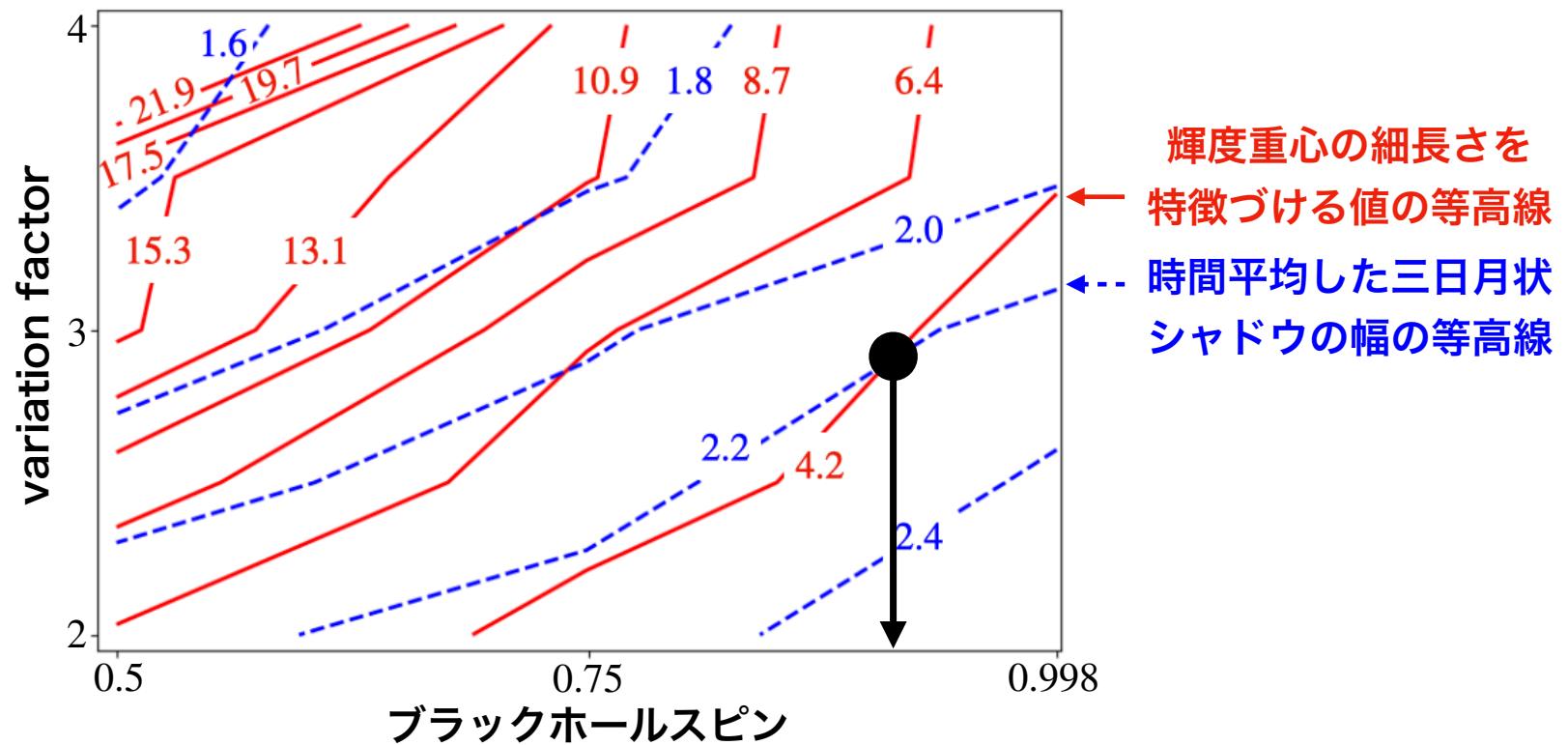
→ variation factorが大きいほど、direct ringが縦方向に大きく膨張するため

- 軌道に外接する長方形の(長辺 $\Delta\psi$ )/(短辺 $\Delta\chi$ )で値を定義



# 三日月状シャドウの幅と輝度重心の軌道によるBHスピンの推定

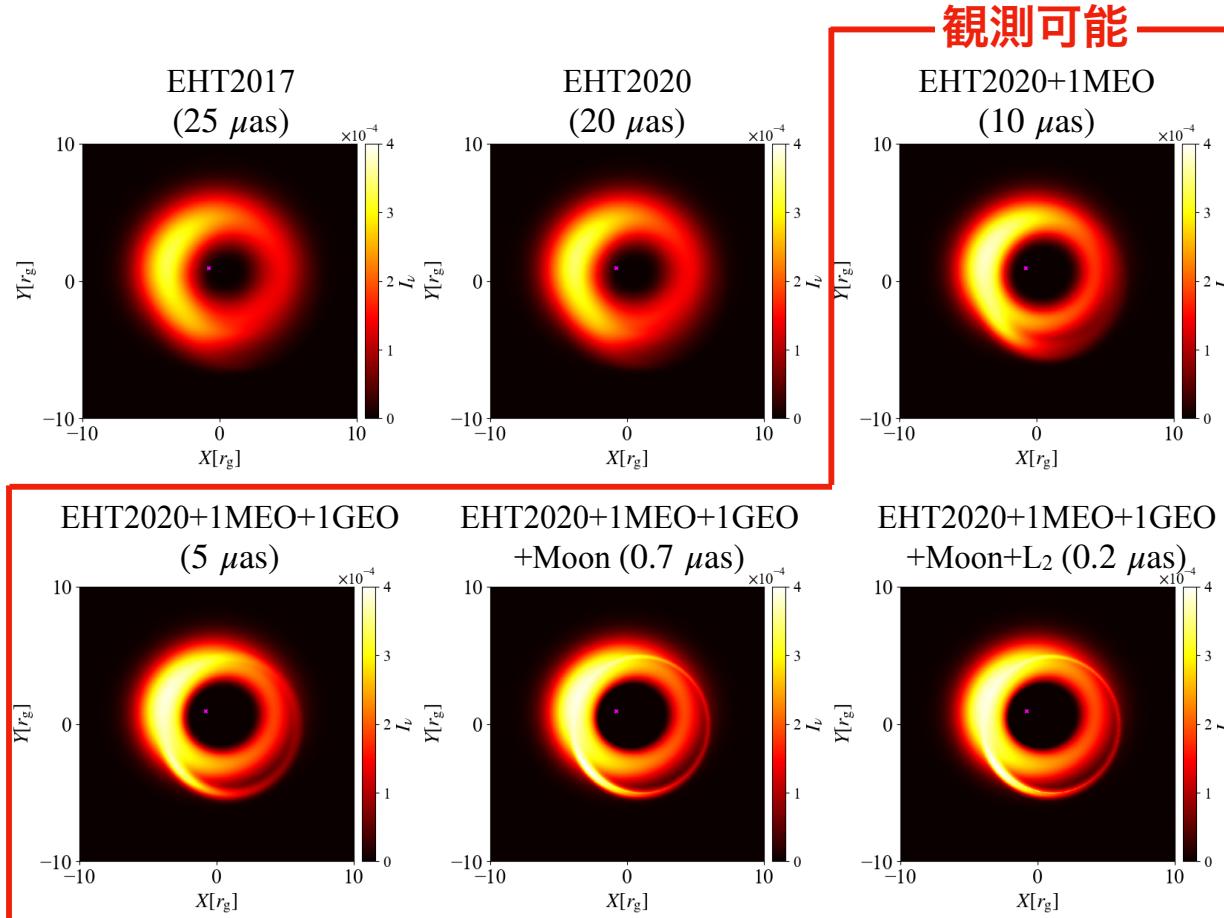
- 「BHスピン-variation factor」平面での2つの指標の分布



三日月状シャドウの幅と輝度重心の軌道を組み合わせた  
BHスピンを推定する新しい手法を提案

# 議論：観測可能性

- 様々な角度分解能でぼかした観測イメージ( $a = 0.998, f = 2.0$ )

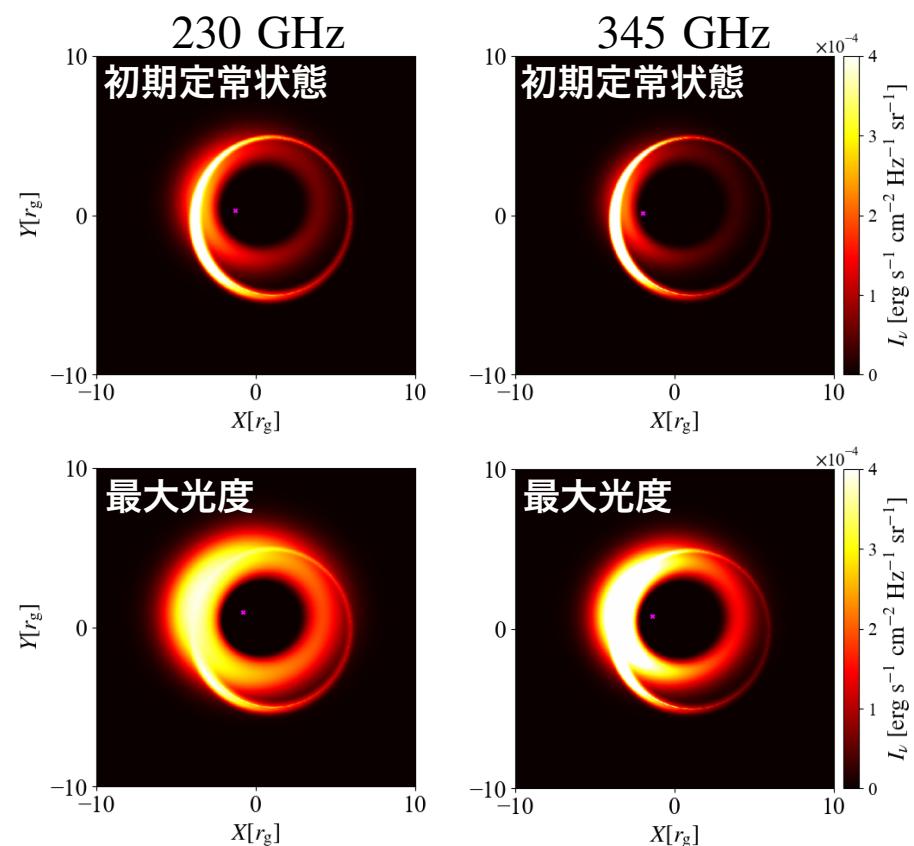
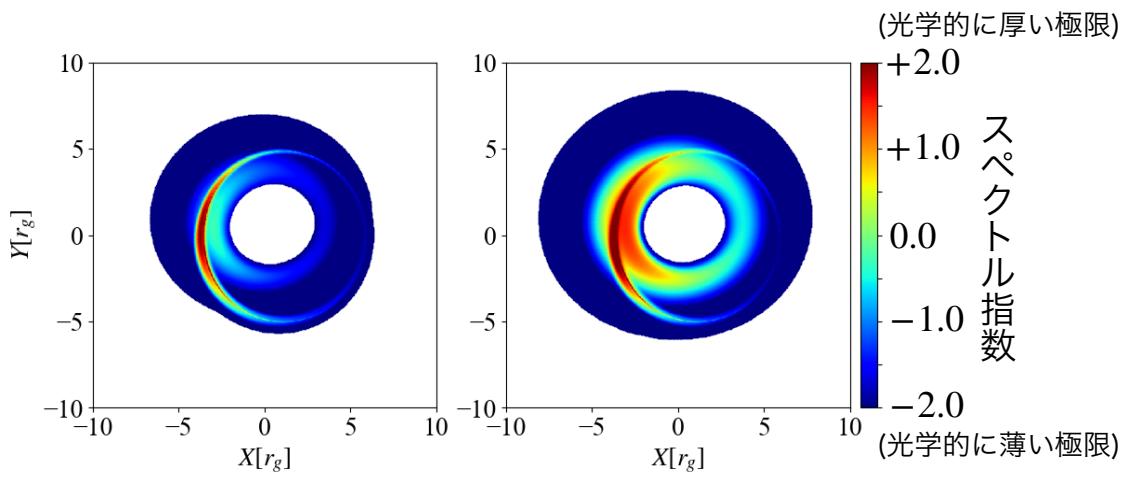


- 高度約10000km以上に位置するスペースVLBI衛星を用いれば三日月状シャドウを検出可能
- 10~100程度のdynamic rangeがあれば三日月状シャドウを検出可能 (EHT2017では10程度)
- 輝度重心に関しては、高頻度観測が重要

以下はspace-VLBI衛星の位置を表す  
 MEO: Middle Earth Orbit (~10000km)  
 GEO: Geostationary Earth Orbit (~36000km)  
 Moon: 月面  
 L<sub>2</sub>: 第2ラグランジュ点

# 議論：345 GHzでの観測イメージ

- 高周波数での観測イメージを計算することは三日月状シャドウを議論する上で重要
  - opacity → direct ringの幅 → 三日月状シャドウの幅
  - (時間平均した幅は $2.55r_g$ (230 GHz),  $2.8r_g$ (345 GHz))
- 電波干渉計の角度分解能は観測周波数に比例
- 観測と比較可能な情報が増える(例：スペクトル指数)



# 本発表のまとめ

- **目的・着眼点**

将来観測を見据えてBHスピンを推定する手法を増やすために、これまで調べられていなかった光学的に厚く時間変動する降着円盤の観測イメージを計算

- **結果**

三日月状シャドウの幅と輝度重心の軌道を組み合わせることでBHスピンを推定する新たな手法を提案

- **インパクト**

M87\*を数日間にわたりEHTの約2倍以上の分解能で観測すれば本発表で提案した手法を適用可能

- **今後の展望**

一般相対論的磁気流体計算を用いて、より現実的な状況下でも適用可能かどうかを調査