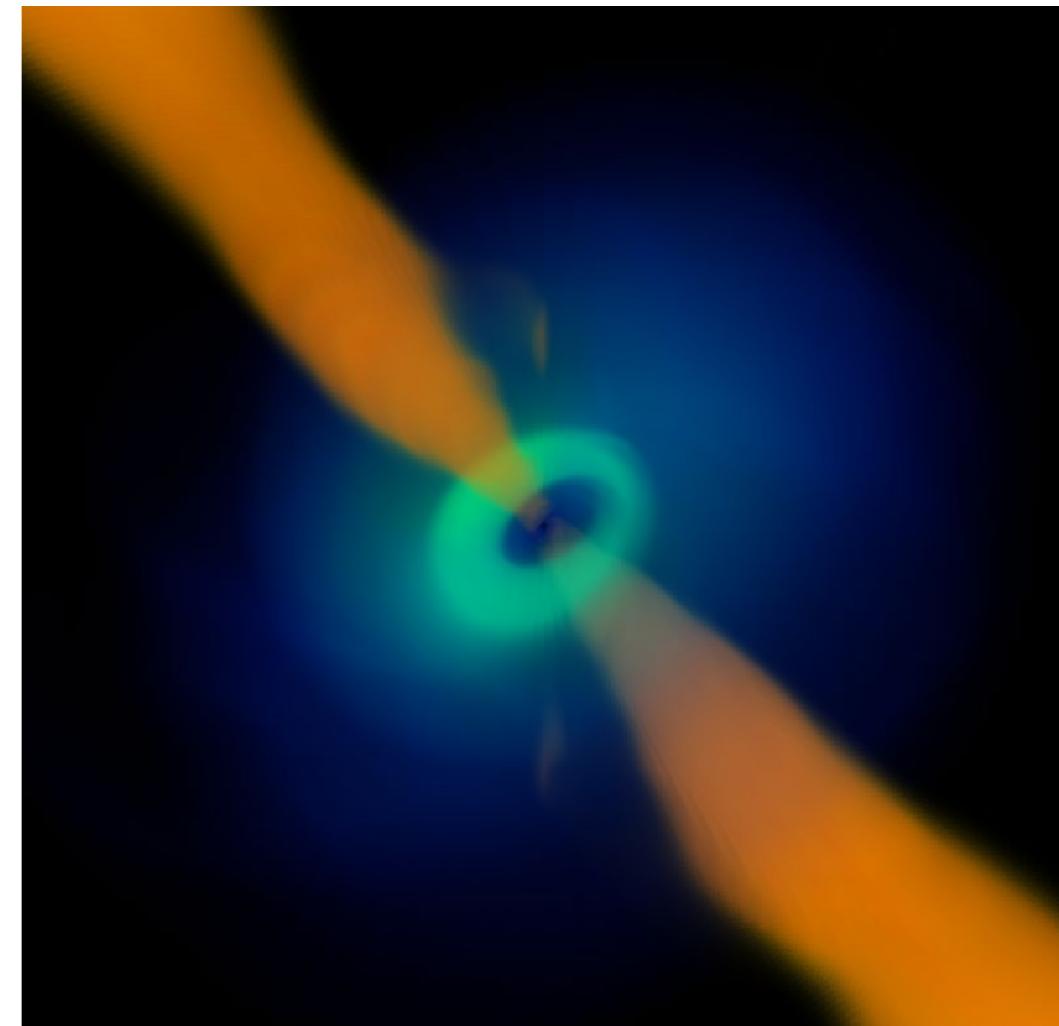


ブラックホール降着円盤の数値シミュレーション

朝比奈雄太（筑波大学）

大須賀健, 内海碧人, 上野航介
(筑波大学)

高橋博之（駒澤大学）



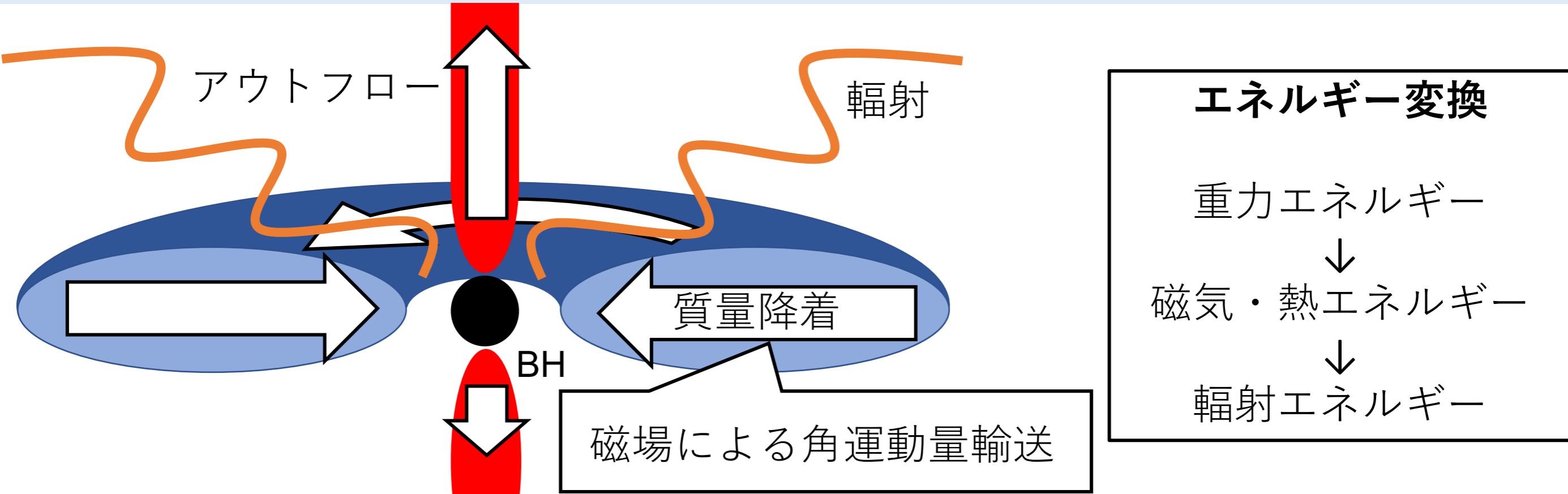
Contents

1. ブラックホール降着円盤の基礎と一般相対論的輻射磁気流体(GR-RMHD)シミュレーション
2. 歳差運動する降着円盤シミュレーション
3. より正確に輻射場を解くための輻射輸送の解法
4. 機械学習の活用
5. まとめ

Contents

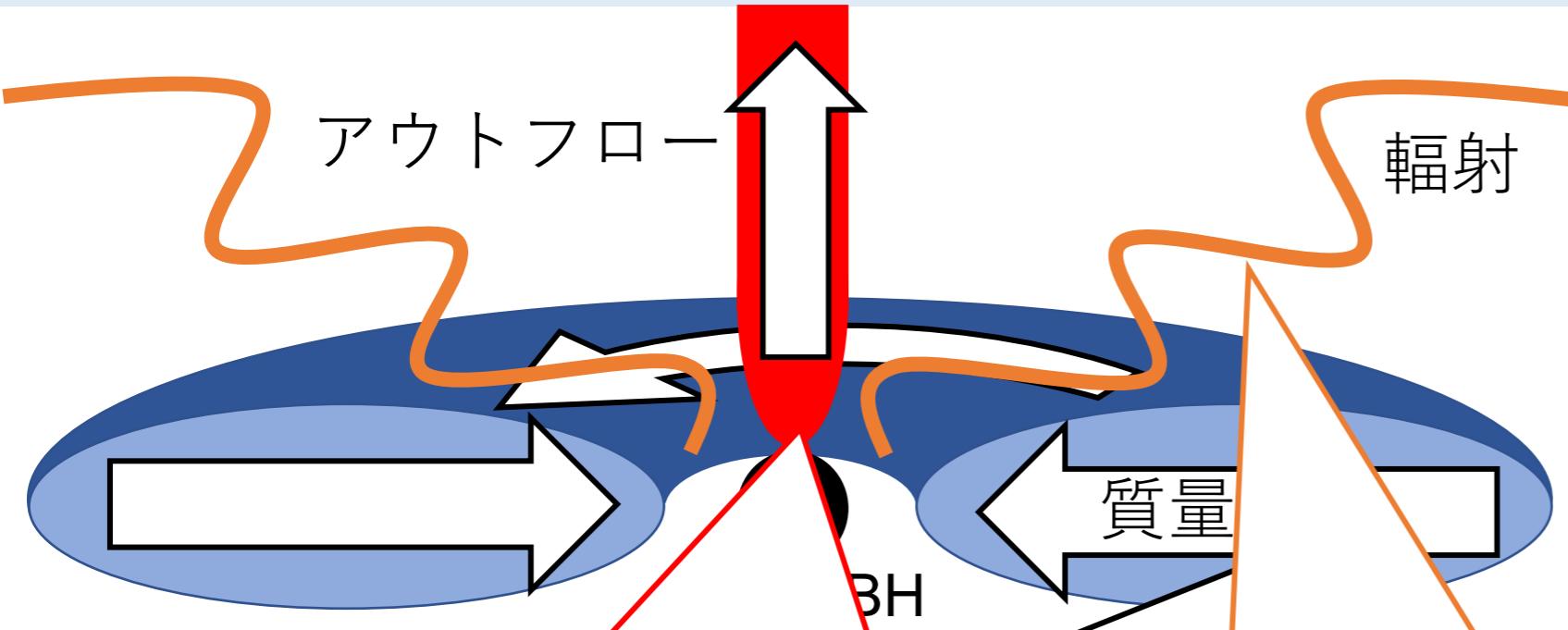
1. ブラックホール降着円盤の基礎と一般相対論的輻射磁気流体
(GR-RMHD)シミュレーション
2. 歳差運動する降着円盤シミュレーション
3. より正確に輻射場を解くための輻射輸送の解法
4. 機械学習の活用
5. まとめ

ブラックホール (BH) 降着円盤



- BH周囲のガスは降着円盤を形成し、回転しながら降着する
- 解放された重力エネルギーの一部は輻射エネルギーに変換される
- 質量降着率が高い場合には、輻射力などの輻射の効果を考慮する必要がある

ブラックホール (BH) 降着円盤



ガスは何によって加速されるのか?
アウトフローの構造や速度を決めて
いるのは何か?
どの程度のエネルギーが解放され
るのか?

どの程度明るく輝くのか?
アウトフローや降着円盤にどのよ
うな影響があるのか?

一部は輻射エネルギーに変換される

エネルギー変換

重力エネルギー



磁気・熱エネルギー



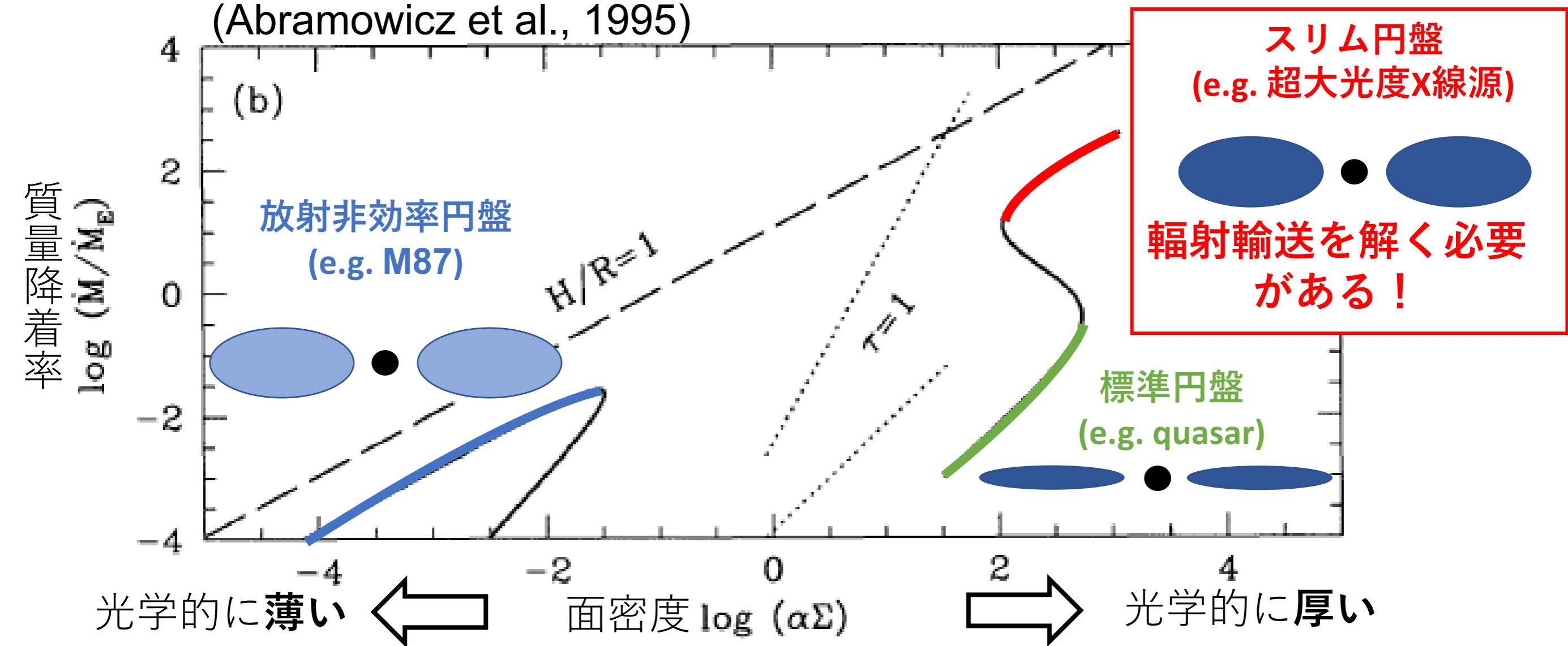
光エネルギー

- 質量降着率が高い場合には、輻射力などの輻射の効果を考慮する必要がある

3種類の降着円盤

降着円盤について3種類の熱平衡解が得られている

(Abramowicz et al., 1995)



一般相對論的輻射磁氣流體(GR-RMHD)方程式

磁氣流體

質量保存則

$$\frac{\partial(\rho u^t)}{\partial t} + \frac{\partial(\sqrt{-g}\rho u^i)}{\sqrt{-g}\partial x^i} = 0$$

エネルギー・運動量保存則

$$\frac{\partial T_\nu^t}{\partial t} + \frac{\partial(\sqrt{-g}T_\nu^i)}{\sqrt{-g}\partial x^i} - T_\lambda^\kappa \Gamma_{\nu\kappa}^\lambda = G_\nu$$

誘導方程式

$$\frac{\partial(b^t u^j - b^j u^t)}{\partial t} + \frac{\partial[\sqrt{-g}(b^i u^j - b^j u^i)]}{\sqrt{-g}\partial x^i} = 0$$

輻射

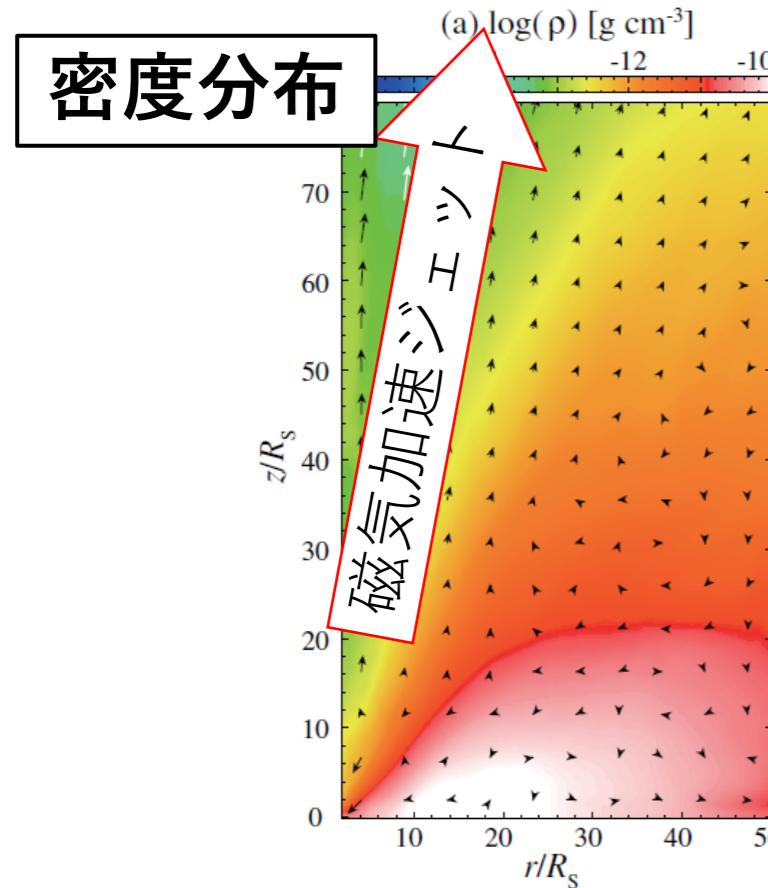
エネルギー・運動量保存則

$$\frac{\partial R_\nu^t}{\partial t} + \frac{\partial(\sqrt{-g}R_\nu^i)}{\sqrt{-g}\partial x^i} - R_\lambda^\kappa \Gamma_{\nu\kappa}^\lambda = -G_\nu$$

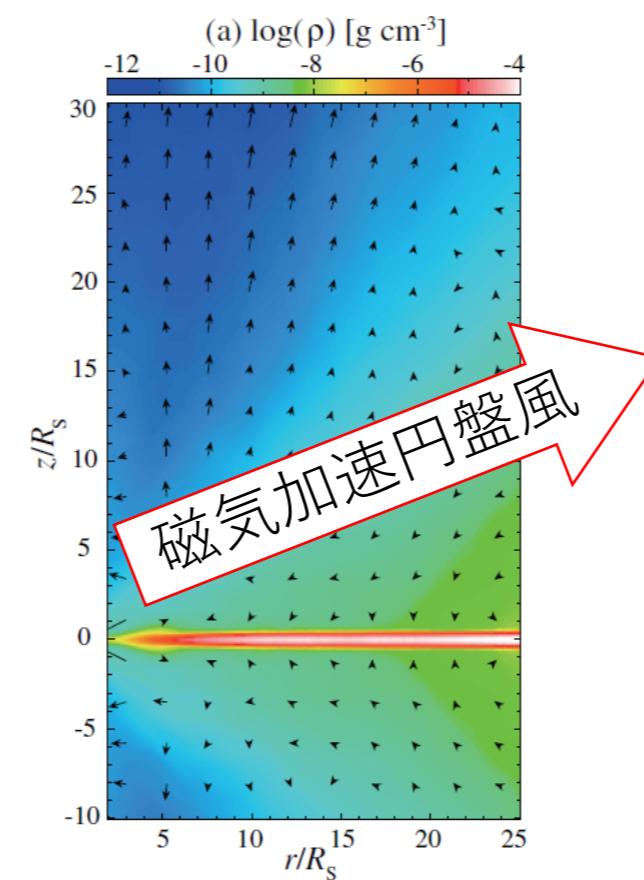
輻射4元力 G_ν を通じて磁氣流體と
輻射は相互作用する。

RMHD計算による3種類の降着円盤の再現

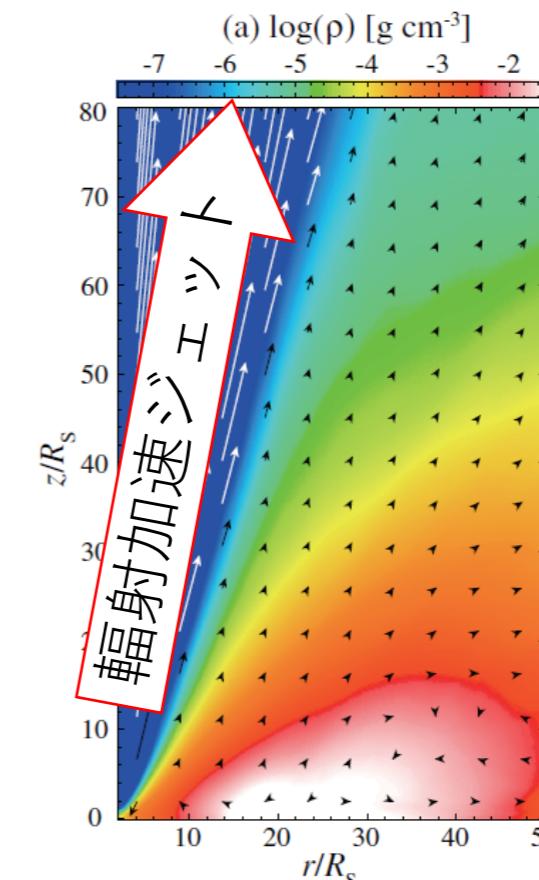
放射非効率円盤



標準円盤



スリム円盤



低

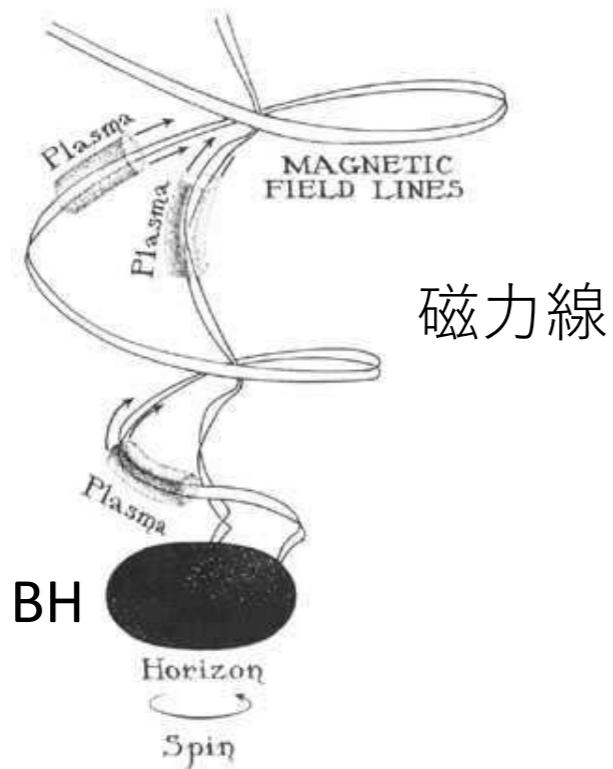
質量降着率

高

Ohsuga et al. (2009, 2011)

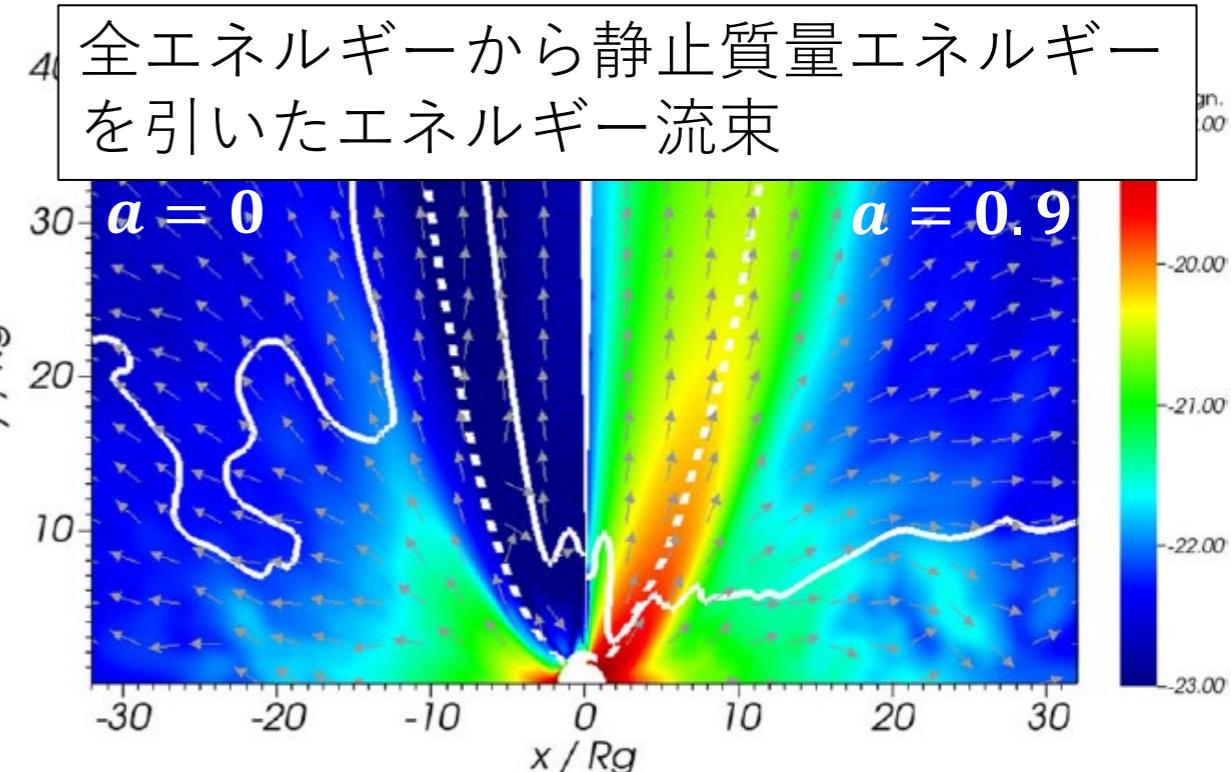
Blandford-Znajek (BZ) 機構

磁場を介して回転BHからエネルギーが引き抜かれる機構をBZ機構と呼ぶ
(Blandford & Znajek, 1977)



K. Thorne, Black Holes and Time Warps
(W.W.Norton and Company, 1994).

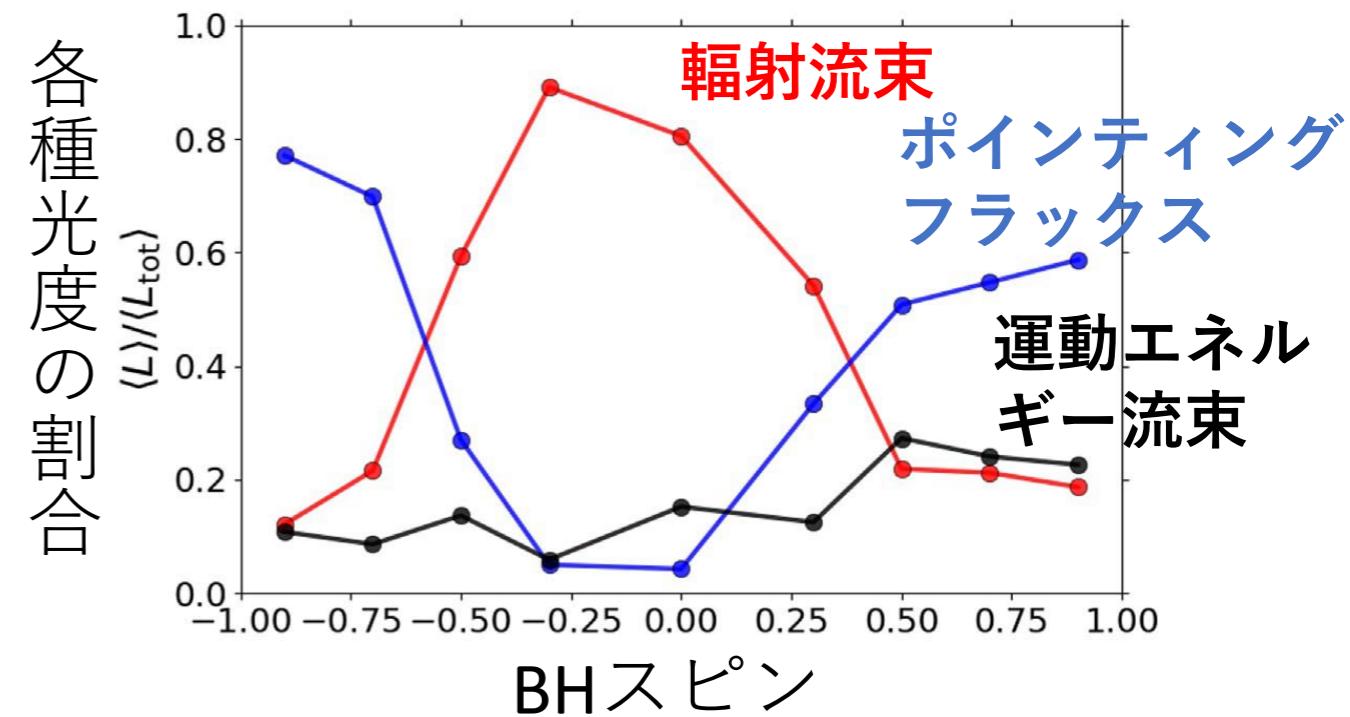
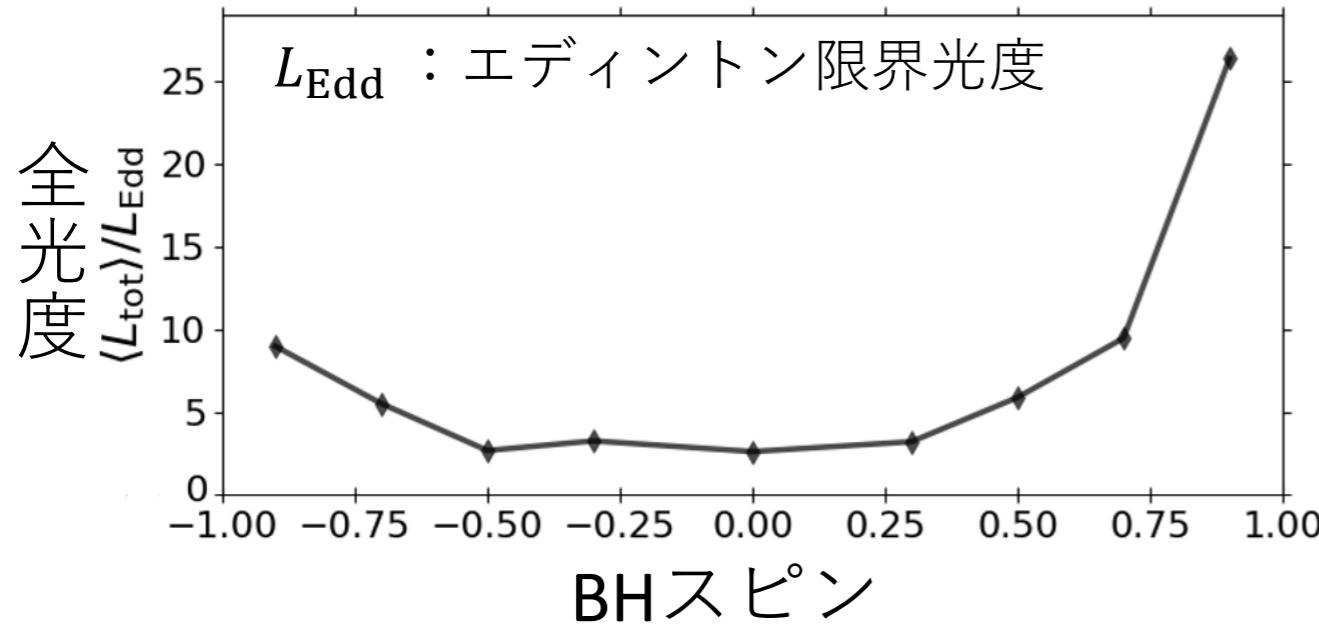
BHスピンが0と0.9のGR-RMHD計算の結果 (Sadowski et al. 2014)



BZ機構の結果としてジェット領域を満たすポインティングフラックスが現れている可能性が示されている。

各種光度のBHスピン依存性

様々なBHスピンに対するGR-RMHD計算が実施された
(Utsumi et al., 2022, 詳細は内海さんの講演)



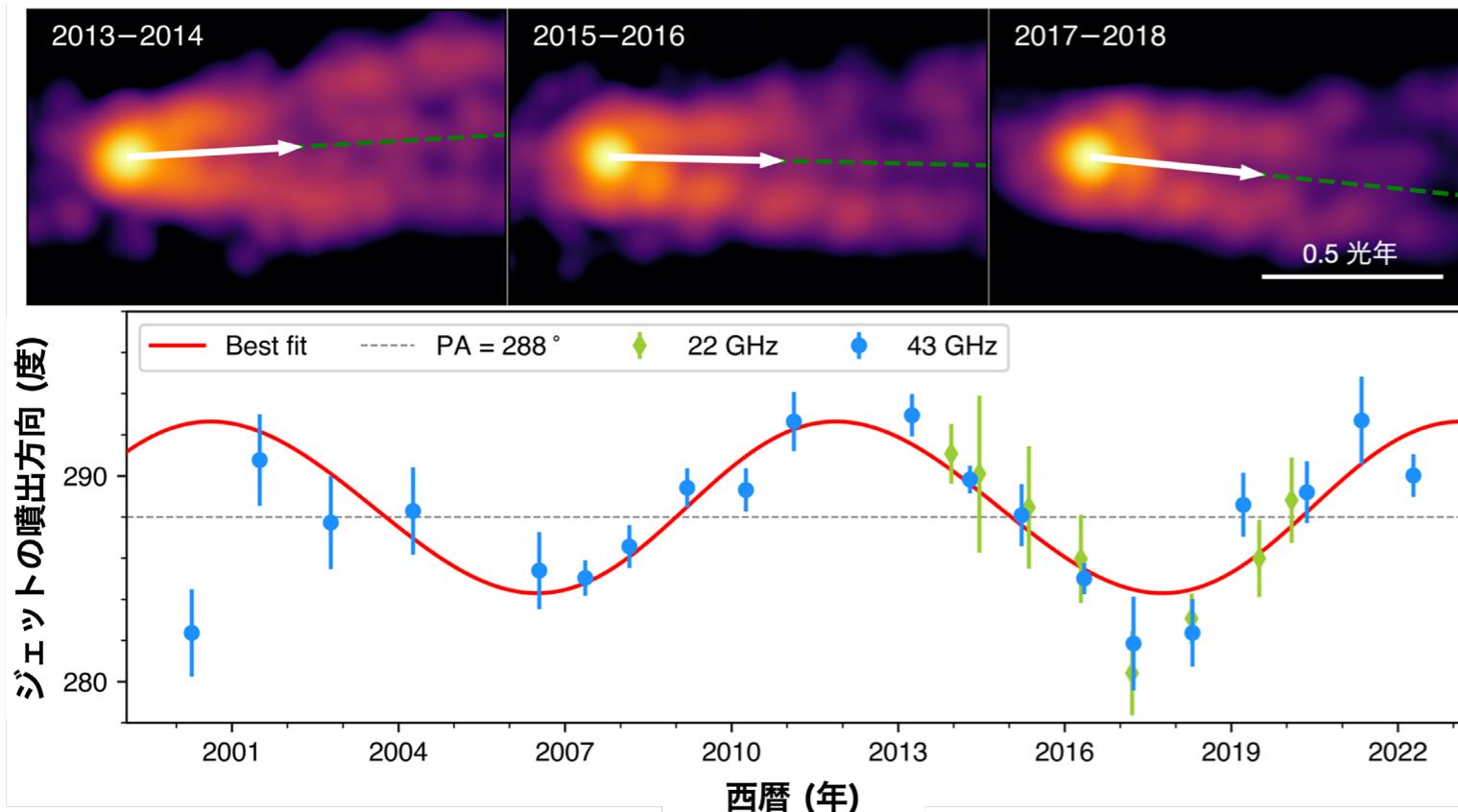
- BZ機構によってBHスピンの絶対値の上昇に伴い、全光度と磁気エネルギーの割合は上昇する
- 回転BHはより明るく輝き、より強力なジェットを噴出する可能性が

Contents

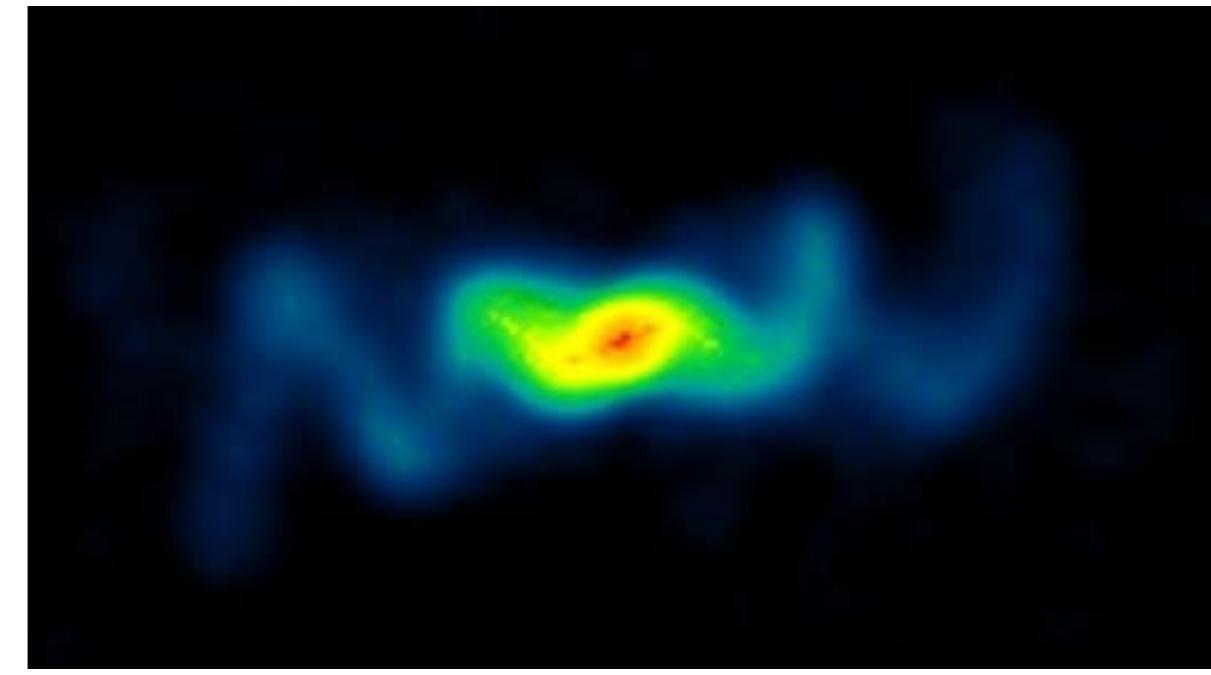
1. ブラックホール降着円盤の基礎と一般相対論的輻射磁気流体
(GR-RMHD)シミュレーション
2. 歳差運動する降着円盤シミュレーション
3. より正確に輻射場を解くための輻射輸送の解法
4. 機械学習の活用
5. まとめ

歳差ジェットの電波観測

M87の歳差ジェット (周期は11年)



SS433歳差ジェット (周期は162日)



<https://public.nrao.edu/radio-astronomy/black-holes/>

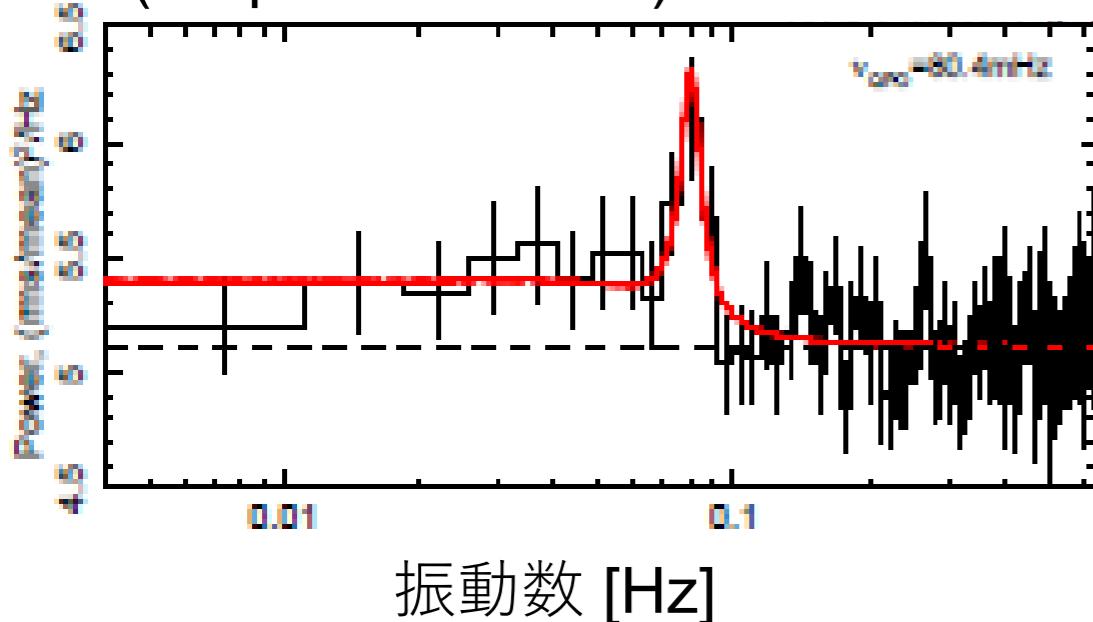
光度の準周期振動 (QPOs)

超大光度X線源 (ULXs):

X線光度が $10M_{\odot}$ BH のエディントン限界光度($\sim 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$) より明るい天体

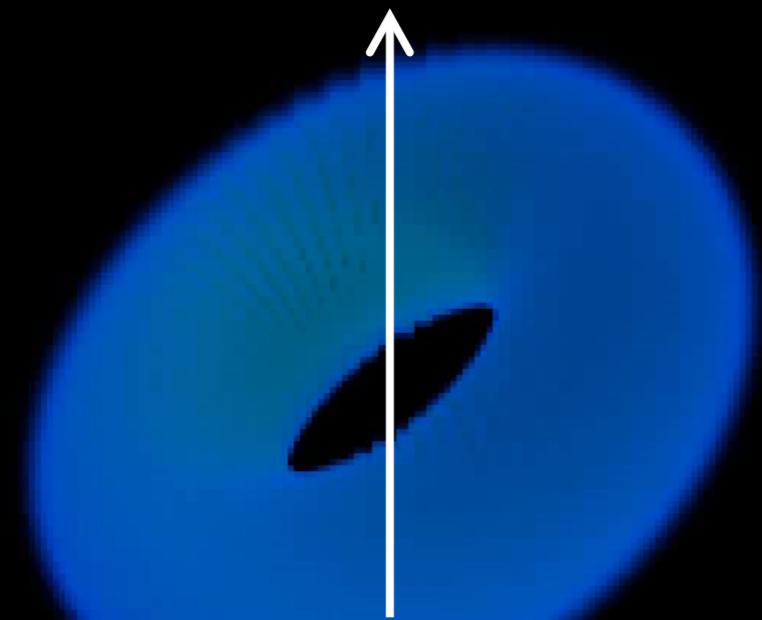
- 振動数が約0.01 – 1 Hz程度のQPOsがULXsで観測されている
- 例としてNGC1313 X-1では約80 mHzのQPOが観測されている
- このようなQPOsは降着円盤の歳差運動によって引き起こされている可能性が指摘されている

NGC1313 X-1のパワースペクトル
(Atapin et al. 2019)



Lense-Thirring効果

BHのスピン軸

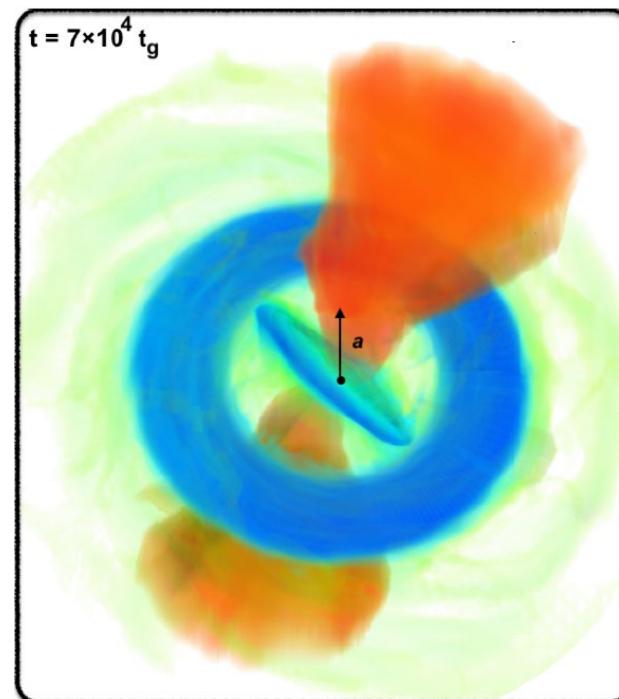


歳差運動する降着円盤のイメージ動画

- BHのスピン軸と降着円盤の回転軸が揃っていない場合、一般相対論的な時空の引きずりの効果によって、降着円盤が歳差運動する(Lense-Thirring効果)
- 降着円盤の歳差運動による周期的な見込み角の変動によってQPOsが引き起こされている可能性がある
- 歳差ジェットの原因となっている可能性もある

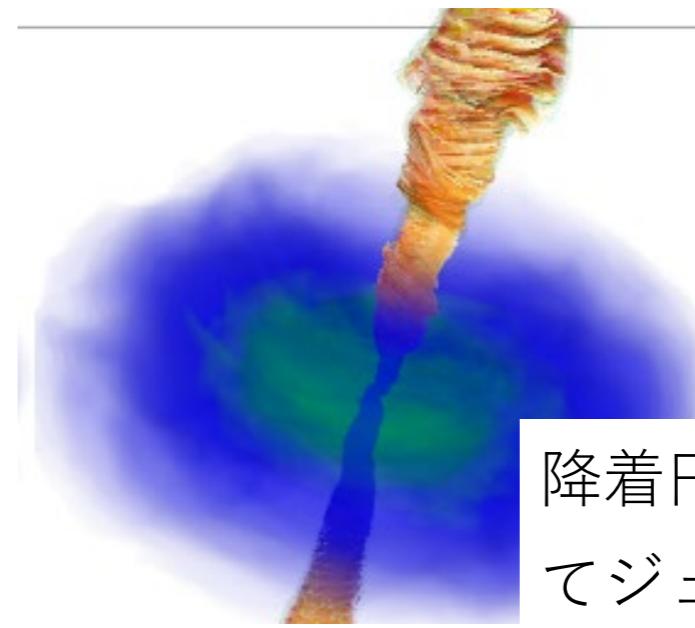
歳差運動する降着円盤のGR-MHD計算

幾何的に薄い降着円盤のGR-MHD計算
(Liska et al. 2019)

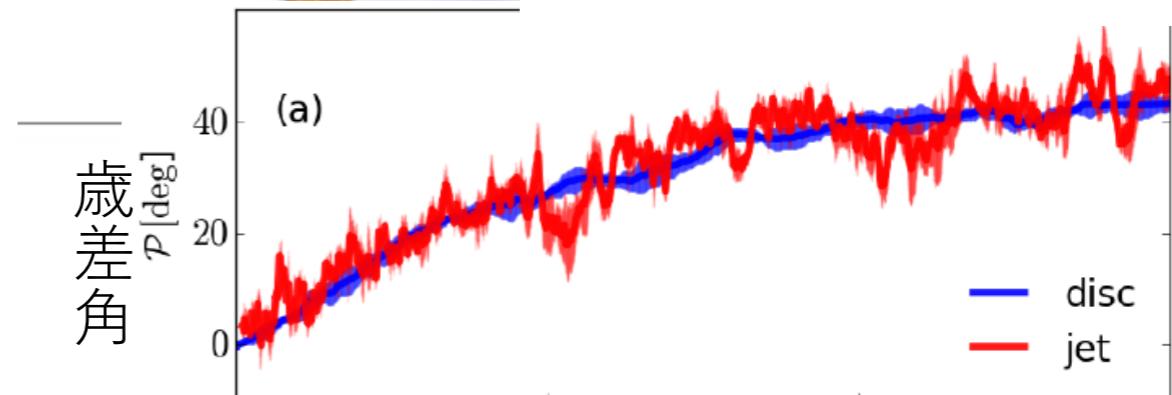


降着円盤がちぎれて歳差周期の短いinner sub-discと歳差周期の長いouter sub-discが形成される

幾何的に厚い降着円盤のGR-MHD計算
(Liska et al. 2018)

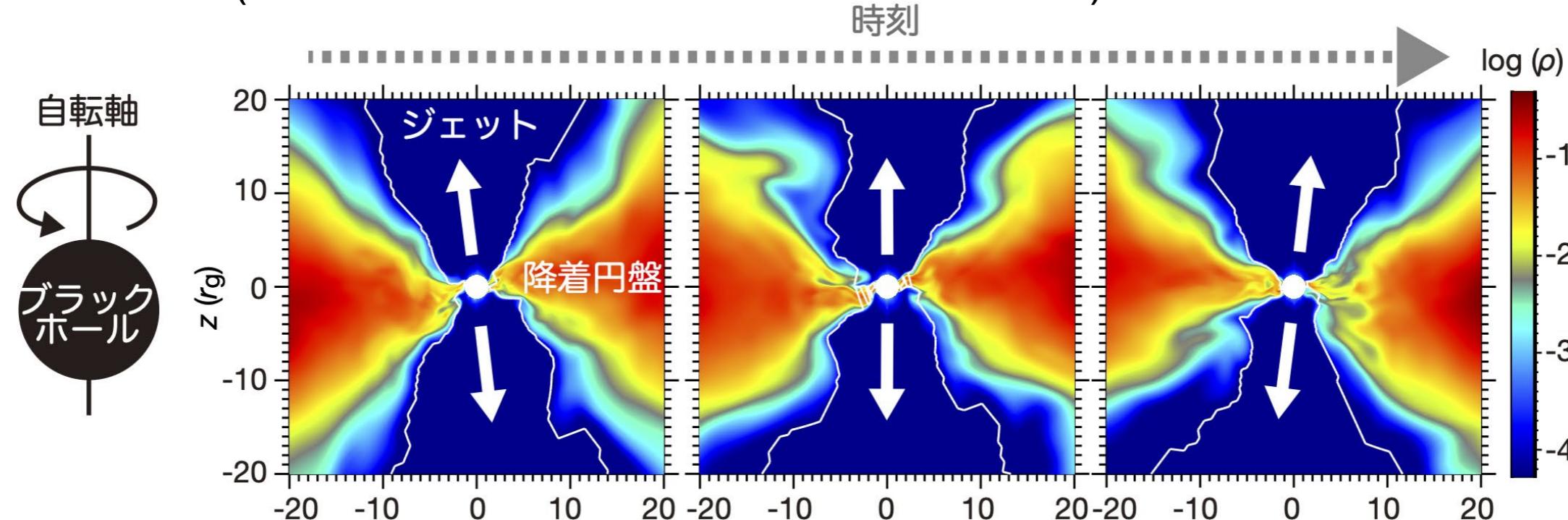


降着円盤の歳差運動に伴ってジェットも歳差運動する



歳差運動する降着円盤のGR-MHD計算

M87の歳差ジェットはLense-Thirring効果によって引き起こされている可能性がある。(周期は観測11年、シミュレーション16年)

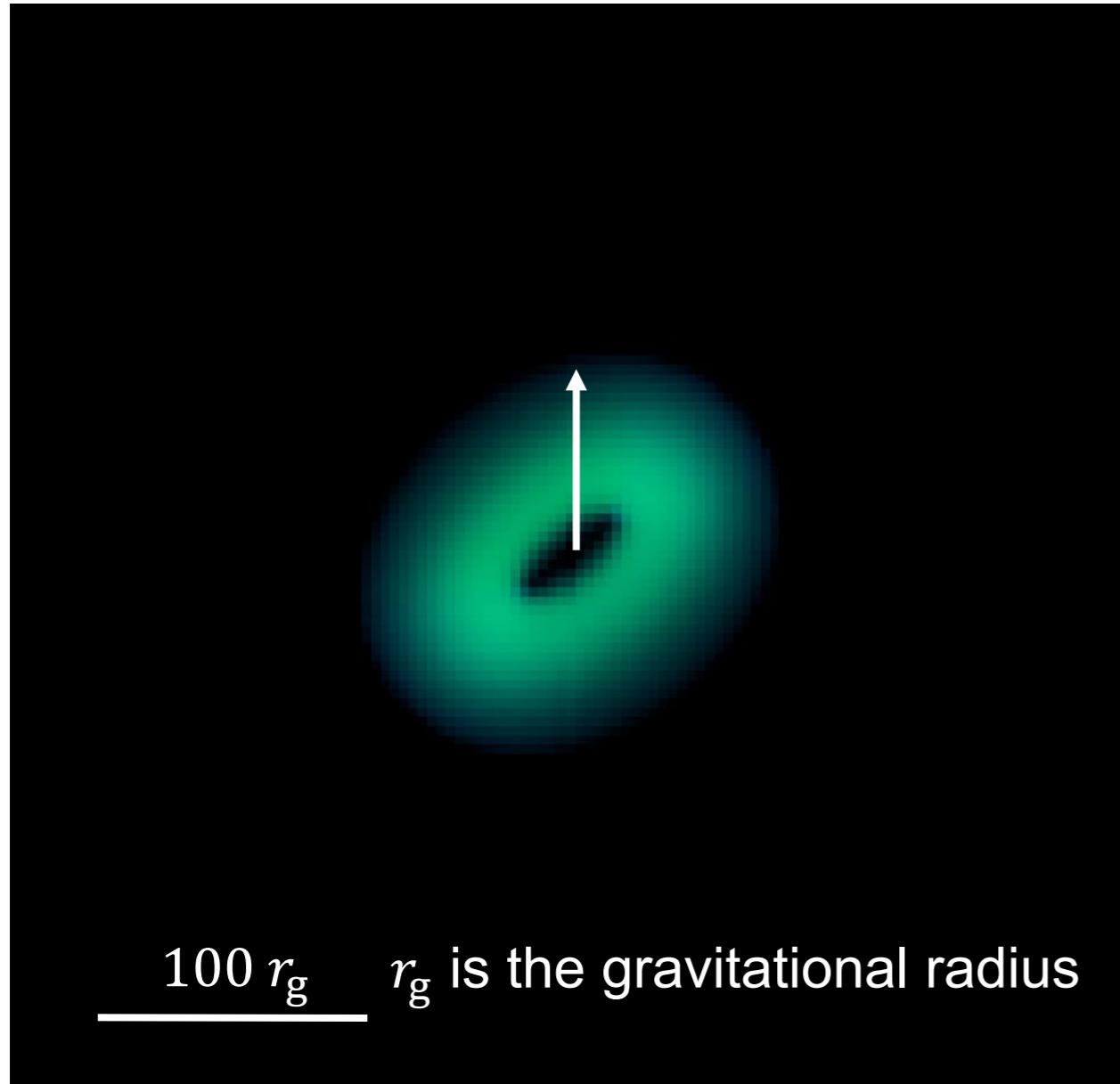


高橋博之さんが開発したコードを用いた川島朋尚さんによるGR-MHD計算

(Cui Yuzhu et al. 2023, <https://www.cfca.nao.ac.jp/pr/20230928>)

さらに詳しい結果については川島さんの講演で

歳差運動する降着円盤のGR-RMHD計算



- 明るい天体に適用するために強輻射場を考慮した歳差運動する降着円盤の計算を実施した (Asahina & Ohsuga, submitted)
- 薄緑色は歳差運動する降着円盤、オレンジ色は光速の30%の速度を持つジェットを表している
- 質量降着率が約 $300L_{\text{Edd}}$ の超臨界降着円盤が形成された
- 先行研究と同様にジェットは降着円盤の回転軸方向に噴出しており、降着円盤とともに歳差運動している

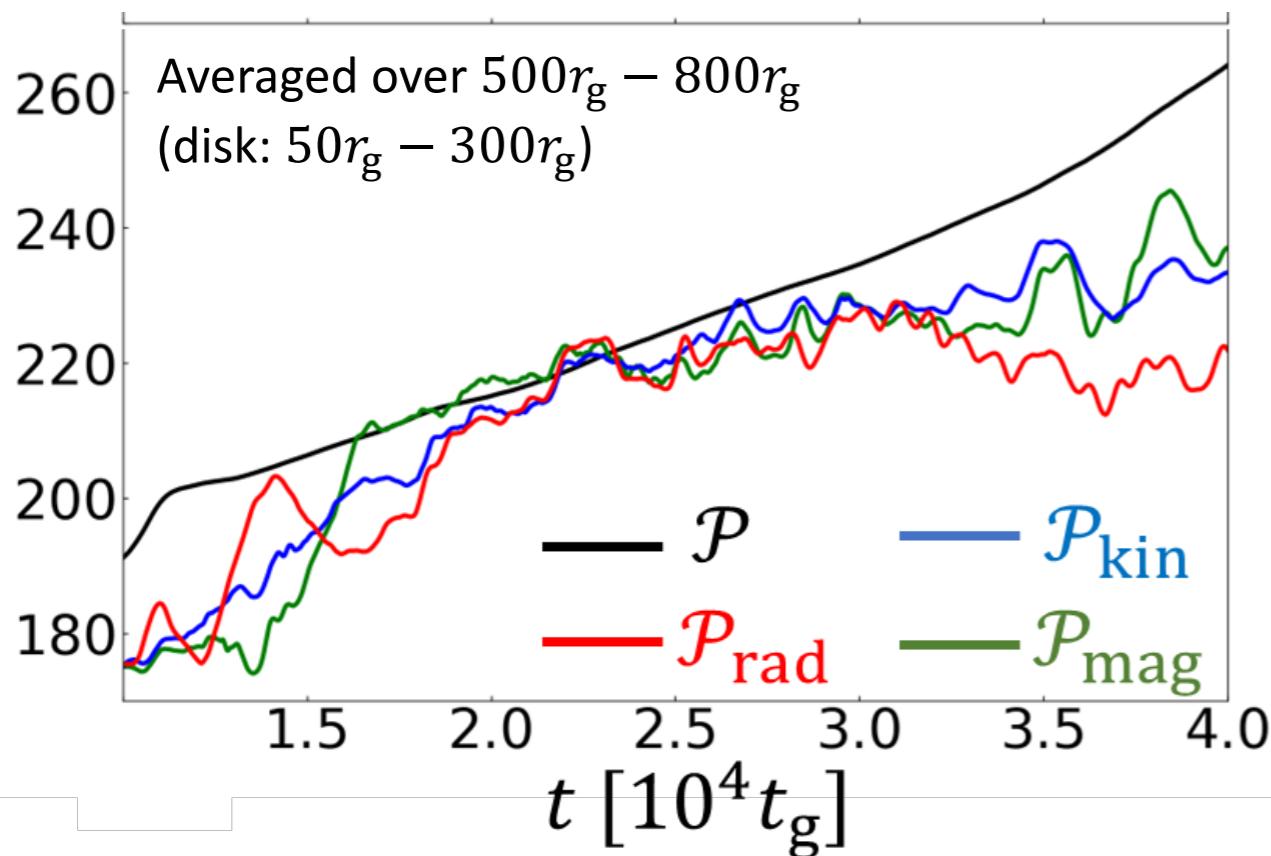
ジェットや輻射エネルギーの噴出方向の歳差角

\mathcal{P} : 降着円盤の回転軸の歳差角

\mathcal{P}_{rad} : 輻射エネルギーの噴出方向の歳差角

\mathcal{P}_{kin} : ジェットの噴出方向の歳差角

\mathcal{P}_{mag} : 磁気エネルギーの伝播方向の歳差角

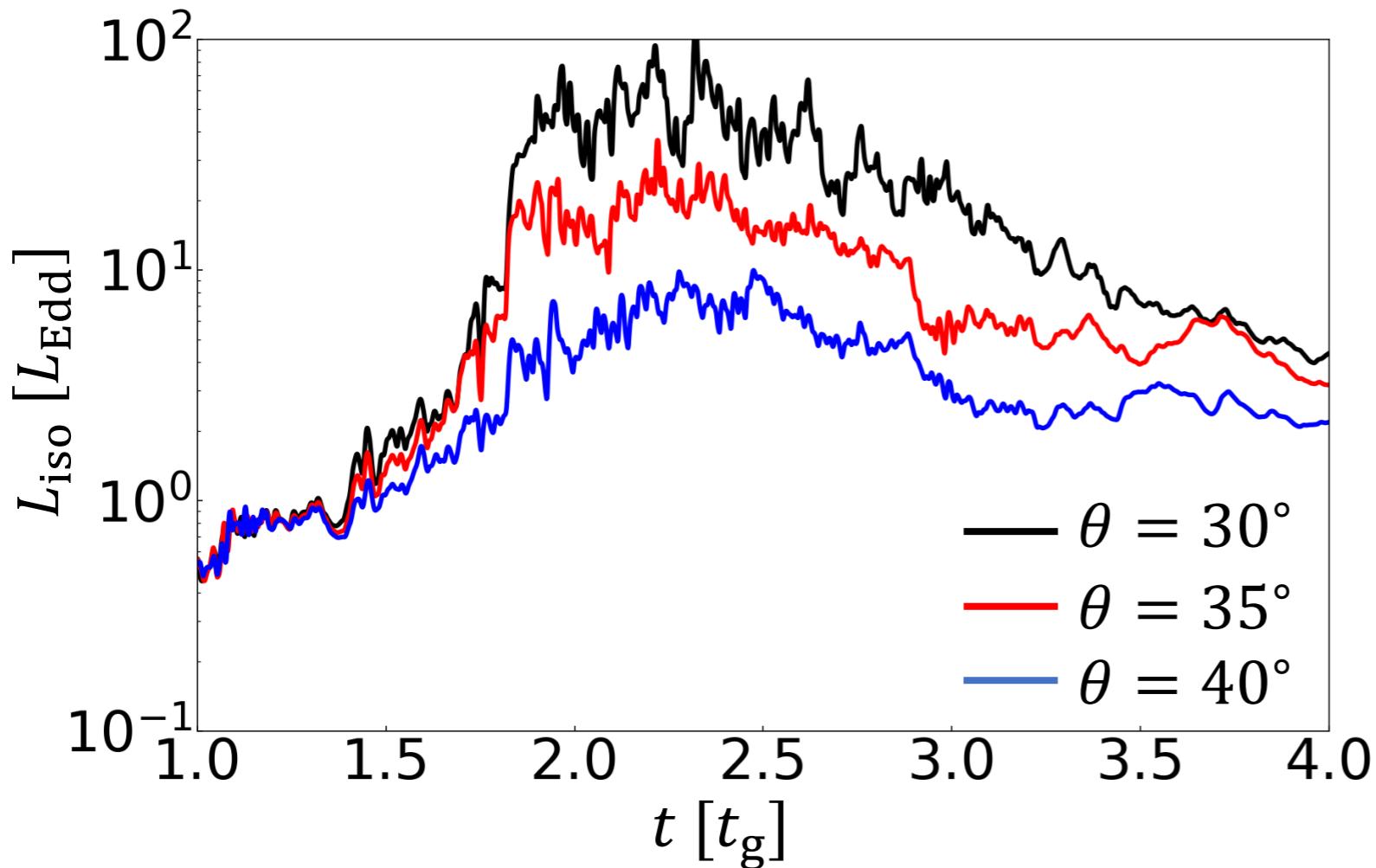


- $\mathcal{P}_{\text{rad}}, \mathcal{P}_{\text{kin}}, \mathcal{P}_{\text{mag}}$ は振動しながら平均的には時間と共に増加している
- 1.5秒間の \mathcal{P} の増加量~65°よりわずかに小さいが、 $\mathcal{P}_{\text{rad}}, \mathcal{P}_{\text{kin}}, \mathcal{P}_{\text{mag}}$ は約50°程度増加している (周期は10秒程度)

ジェットと輻射の噴出方向は降着円盤の歳差運動と共に歳差運動している
→このような歳差運動は約0.1HzのQPOsを説明しうる

歳差運動による増光と減光

$r = 800r_g, \phi = 225^\circ, \theta = 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ で
測った光度の時間進化



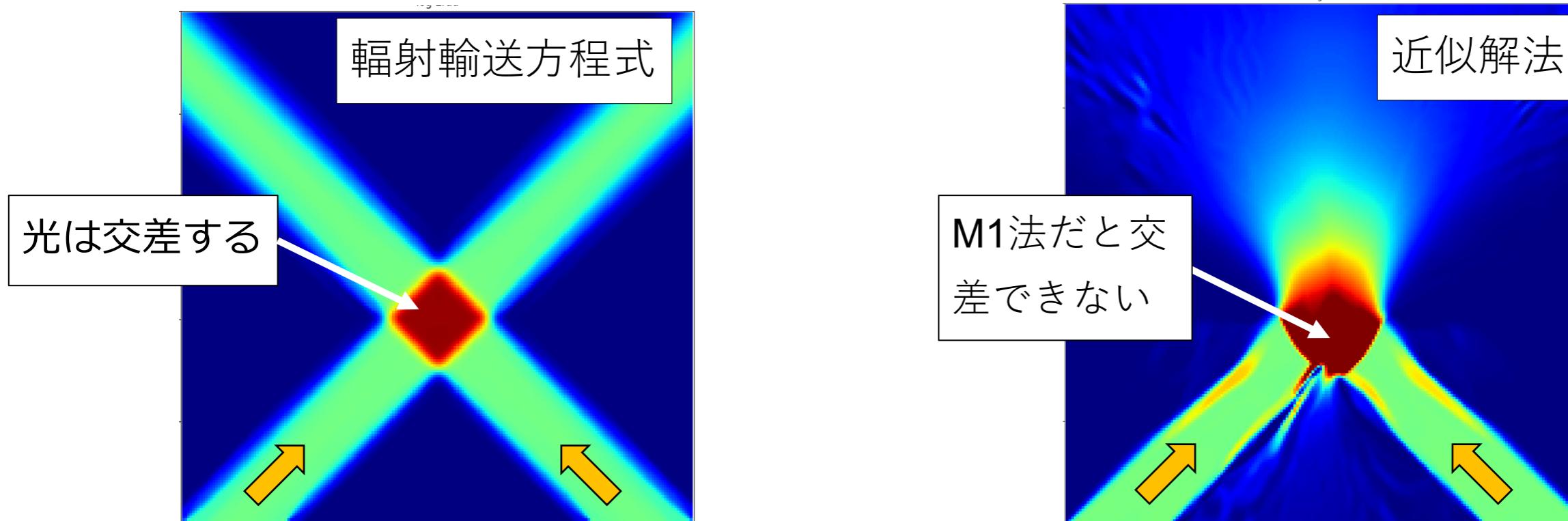
- 光度は最大で約200倍程度明るくなり、その後 $1/20$ 程度まで暗くなる
- 歲差運動が続くと仮定すると光度は周期的に振動すると予想できる
- このような周期振動の性質を詳しく調べるためにさらなる長時間シミュレーションが必要である

Contents

1. ブラックホール降着円盤の基礎と一般相対論的輻射磁気流体
(GR-RMHD)シミュレーション
2. 歳差運動する降着円盤シミュレーション
- 3. より正確に輻射場を解くための輻射輸送の解法**
4. 機械学習の活用
5. まとめ

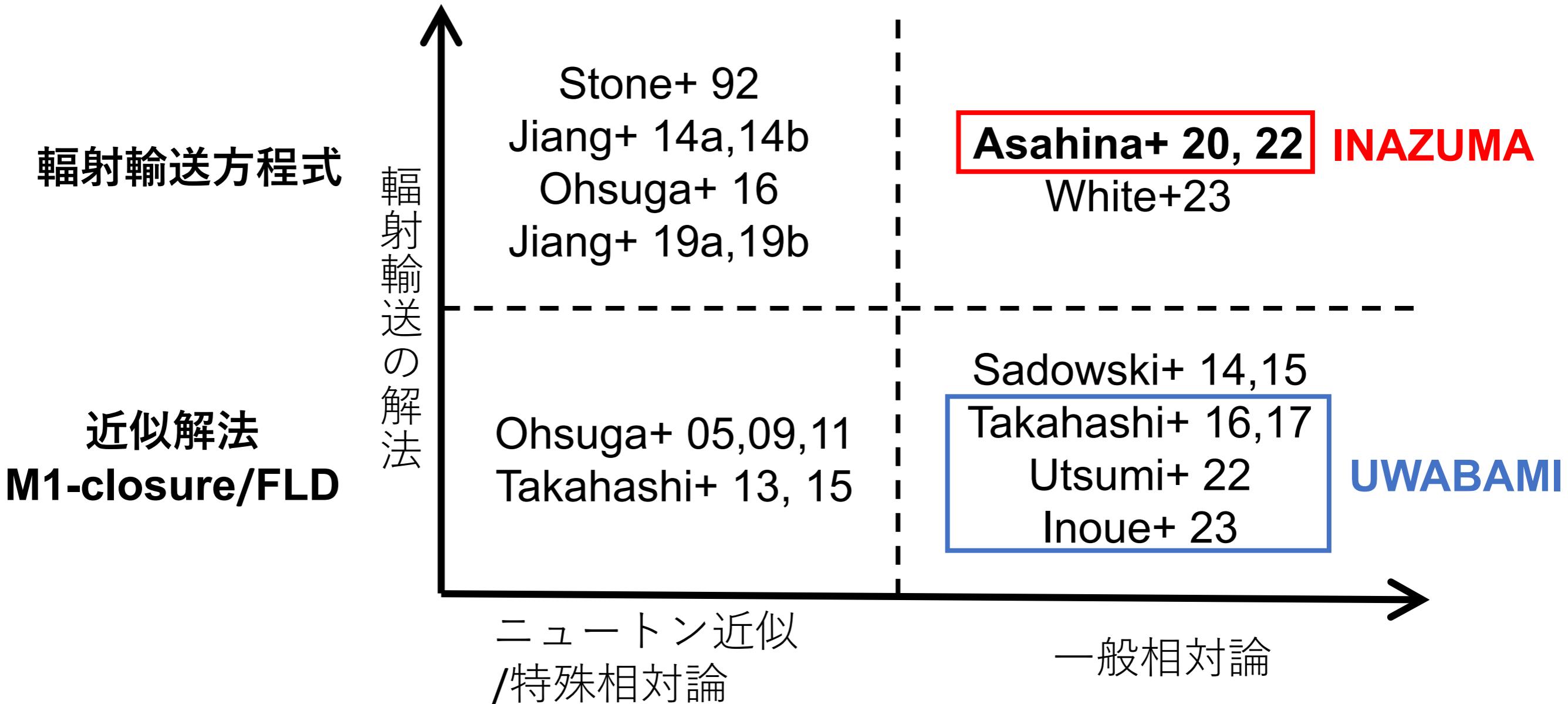
輻射輸送の近似解法の問題点

先行研究のGR-RMHDシミュレーションの多くは、計算コスト削減のため、輻射輸送計算の解法として近似解法の1つであるM1法が用いられている。
M1法では光学的に薄い領域で、輻射輸送計算の信頼性が下がってしまう。



ビーム交差のテスト計算結果の輻射エネルギー密度分布

計算コードの発展



輻射輸送の数値解法

輻射輸送方程式

$$\frac{\partial I}{\partial t} + \mathbf{n} \cdot \frac{\partial I}{\partial \mathbf{x}} = 0 \quad \rightarrow$$

モーメント式

$$\frac{\partial E_r}{\partial t} + \frac{\partial F^i}{\partial x^i} = 0, \frac{\partial F^i}{\partial t} + \frac{\partial f^{ij} E_r}{\partial x^j} = 0$$

モーメント式を解くためにはエディントンテンソル f^{ij} を決める必要がある

M1 closure

エディントンテンソルを輻射エネルギー密度・流束から近似的に求める
(Gonzalez et al. 2007)

$$f^{ij} = \frac{1 - \chi(E_r, \mathbf{F})}{2} \delta^{ij} + \frac{3\chi(E_r, \mathbf{F}) - 1}{2} n^i n^j$$

I : 輻射強度

\mathbf{n} : 光子の伝播方向

E_r : 輻射エネルギー密度

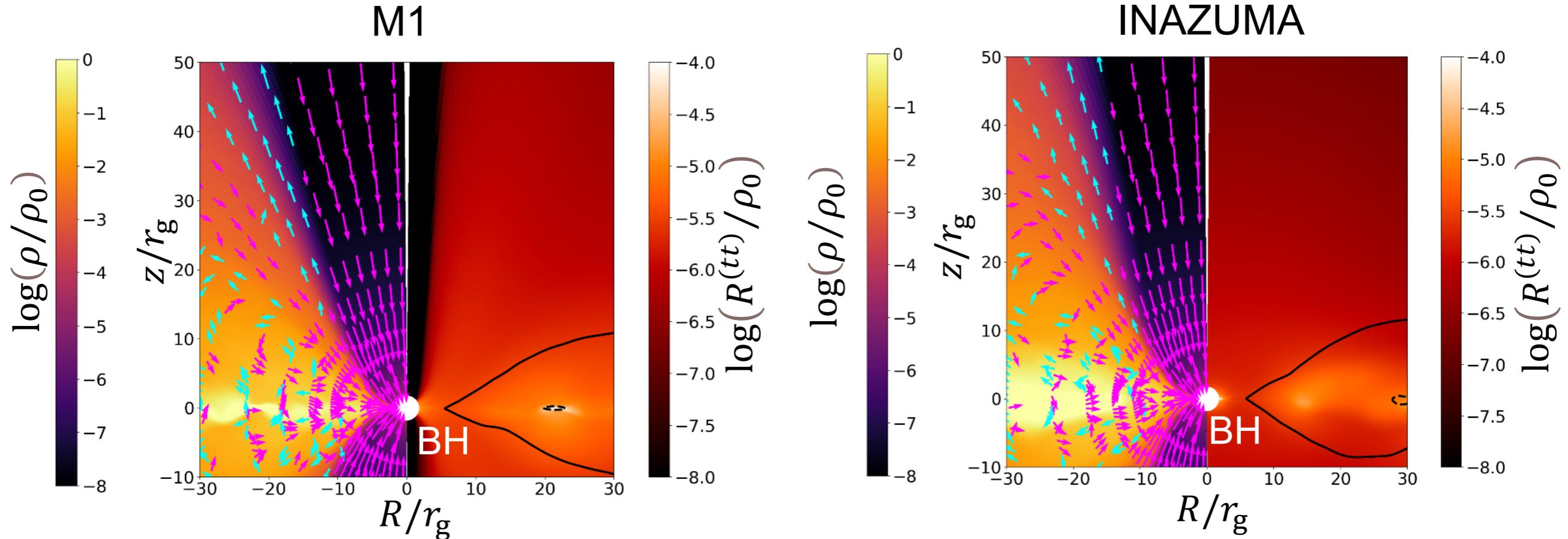
F^i : 輻射エネルギー流束

INAZUMA Variable Eddington Tensor closure

エディントンテンソルを輻射輸送方程式を解いて得られた輻射強度から求める

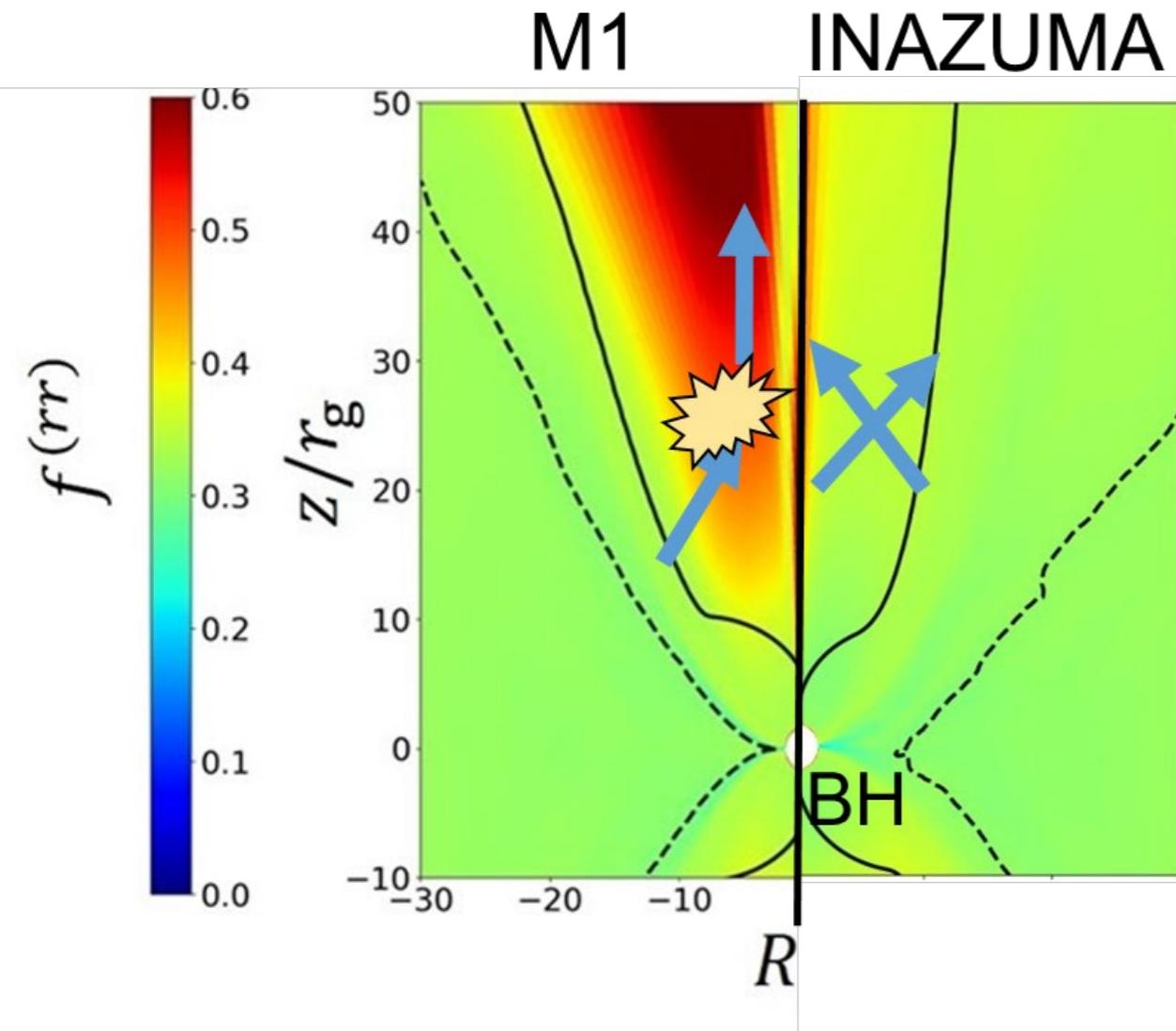
$$f^{ij} = \frac{\int n^i n^j I d\Omega}{\int I d\Omega}$$

低降着率モデル ($\dot{M}_{\text{in}} \sim 0.1 L_{\text{Edd}} / c^2$)



- 赤道面に高密度な降着円盤、斜め方向に中密度の円盤風、回転軸付近に低密度のファンネル領域が形成されるなど、全局的な構造はM1とINAZUMAで変わらない
- M1で回転軸付近の輻射エネルギー密度が小さくなっている。

エディントンテンソルの比較 ($\dot{M}_{\text{in}} \sim 10^4 L_{\text{Edd}}/\text{c}^2$)



- 実線より赤道面側の光学的に厚い領域では輻射はほぼ等方 ($f^{(rr)} \sim 1/3$) となる
- M1法では光学的に薄い回転軸近傍で、輻射が非物理的な衝突を起こし、輻射の伝播方向が r 方向に揃って $f^{(rr)}$ が大きくなる
- INAZUMAでは回転軸付近での輻射の非物理的な衝突が起きないため $f^{(rr)} \gtrsim 1/3$ となる

見込み角による光度依存性

半径 $r = 100 r_g$ の輻射フラックスから観測される輻射光度を計算した。

低降着率モデル

	INAZUMA	M1
$\theta \sim 0$	$\sim 2 \times 10^{-3} L_{\text{Edd}}$	> 0
$\theta = 10^\circ$	$\sim 2 \times 10^{-3} L_{\text{Edd}}$	$< \sim 10^{-2} L_{\text{Edd}}$

高降着率モデル

	INAZUMA	M1
$\theta \sim 0$	$\sim 10 L_{\text{Edd}}$	$< \sim 60 L_{\text{Edd}}$
$\theta = 10^\circ$	$\sim 20 L_{\text{Edd}}$	$< \sim 200 L_{\text{Edd}}$

- 低降着率モデルでは $\theta \sim 0$ のとき、M1 では輻射が回転軸まで届いていないので暗く見える
- M1 では光度を 5 – 10 倍程度大きく見積もる可能性がある

Contents

1. ブラックホール降着円盤の基礎と一般相対論的輻射磁気流体
(GR-RMHD)シミュレーション
2. 歳差運動する降着円盤シミュレーション
3. より正確に輻射場を解くための輻射輸送の解法
- 4. 機械学習の活用**
5. まとめ

輻射輸送を正確に解く機械学習モデルの開発

エディントンテンソルを正しく計算できれば、輻射輸送を正確に解くことができる！

超新星爆発分野で、エディントンテンソルを機械学習で予測する先行研究がある

(Harada et al. 2022)。

Input Data

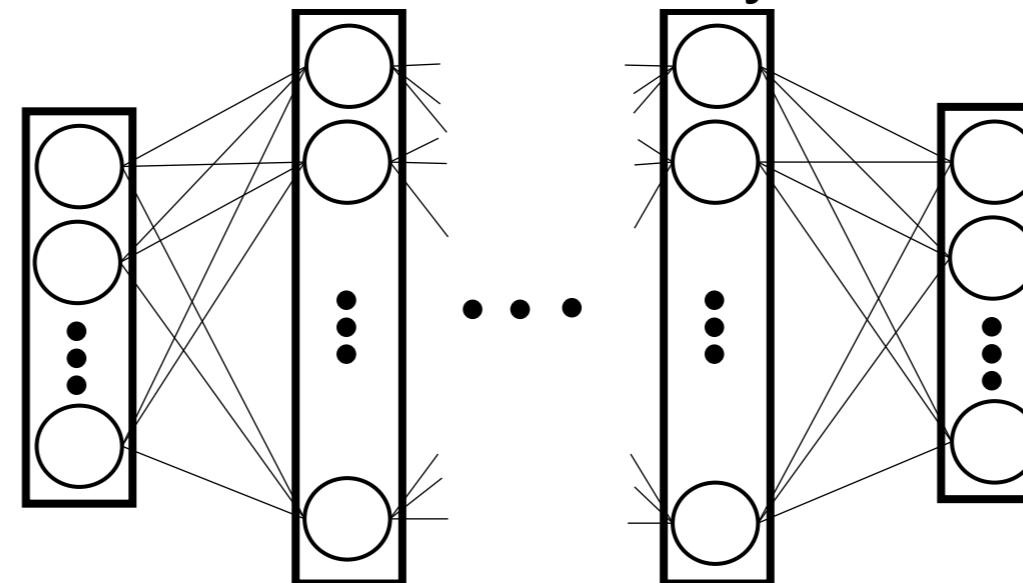
輻射流束と輻射エネルギー密度の比
 F^i/E

$$F^i/E$$

ガス密度、ガス圧、速度
 ρ, p, u^i

Hidden Layers

64 Neurons × 4Layers



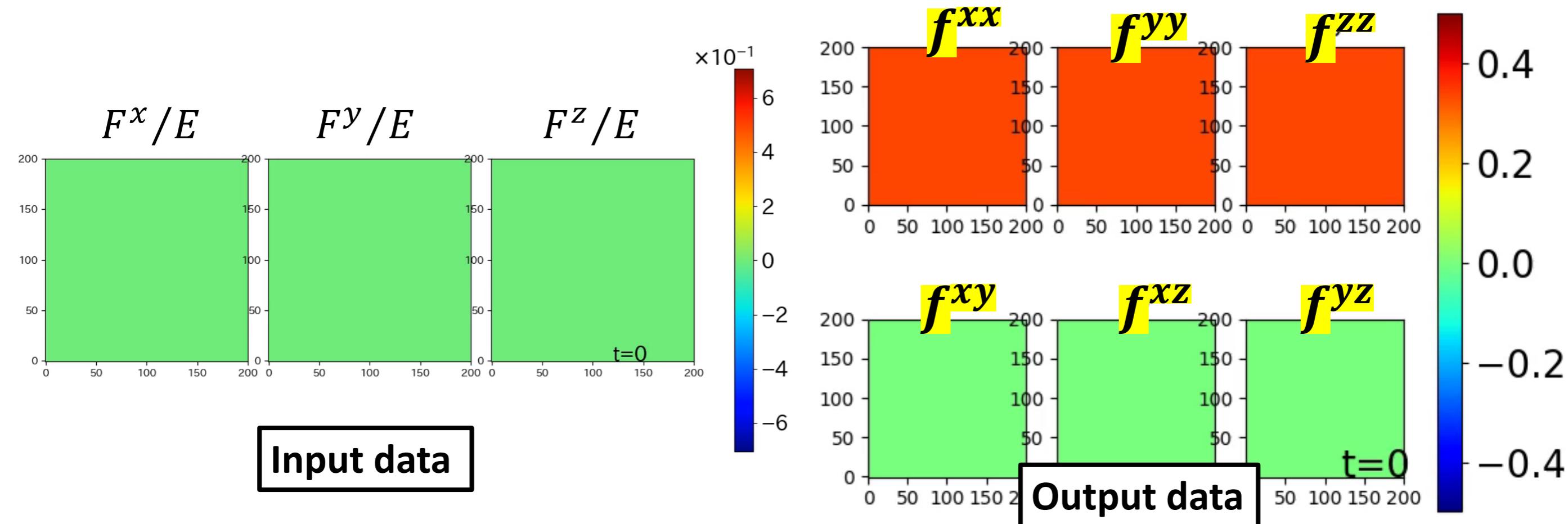
Output Data

エディントンテンソル
 f^{ij}

上のDeep Neural Network (DNN)にINAZUMAの計算結果を学習させる

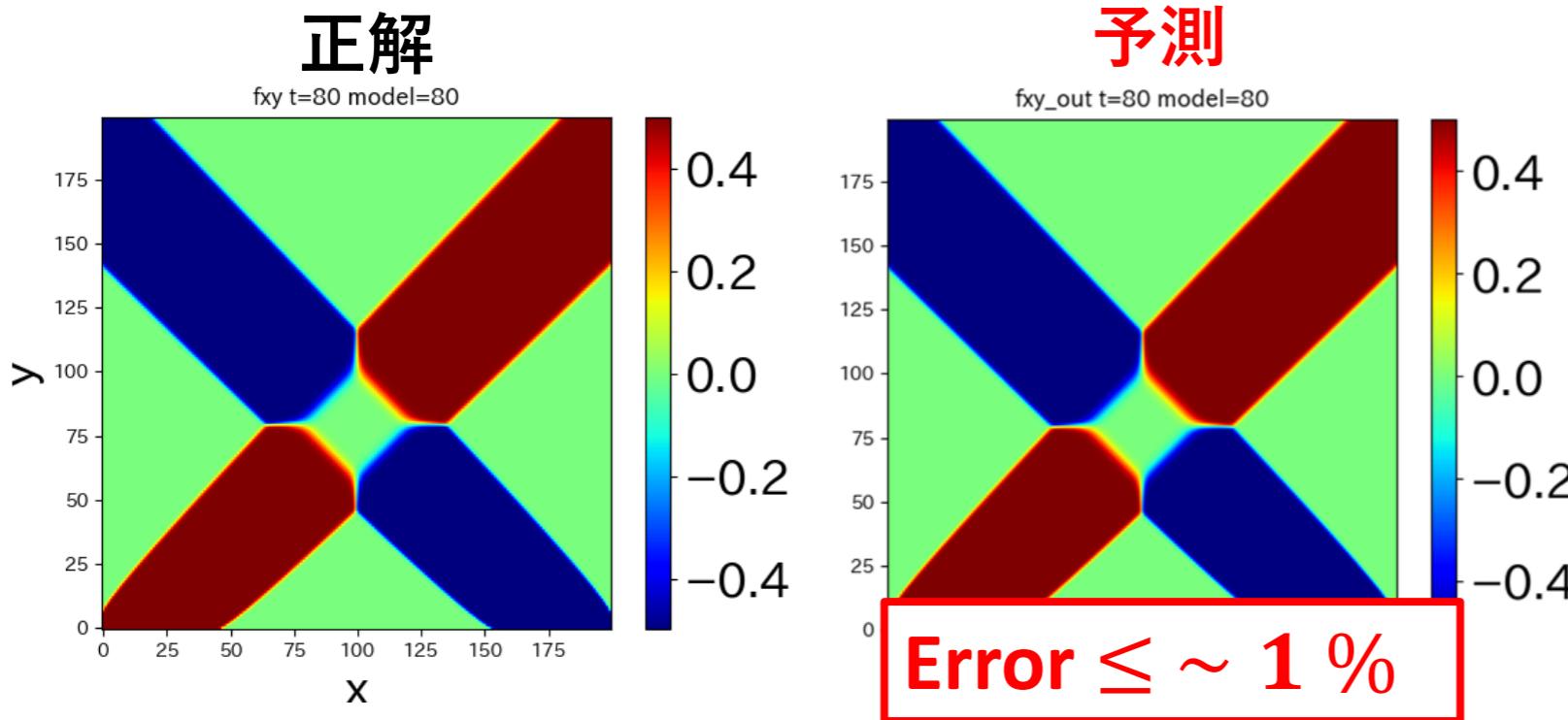
ビーム交差テスト

- INAZUMAの時間発展データ(Asahina et al. 2020)を学習データとして用いた
- 流体のパラメータ(ρ, p, u^i)は一様となっている(学習に影響しない)

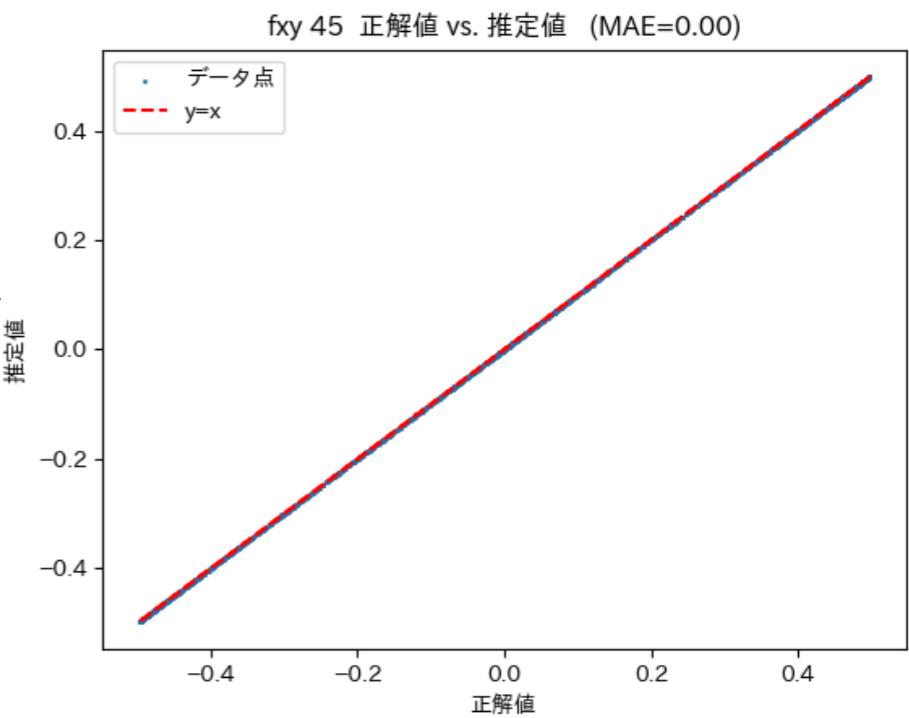


スナップショットの再現

正解値と予測値の比較 (f^{xy})



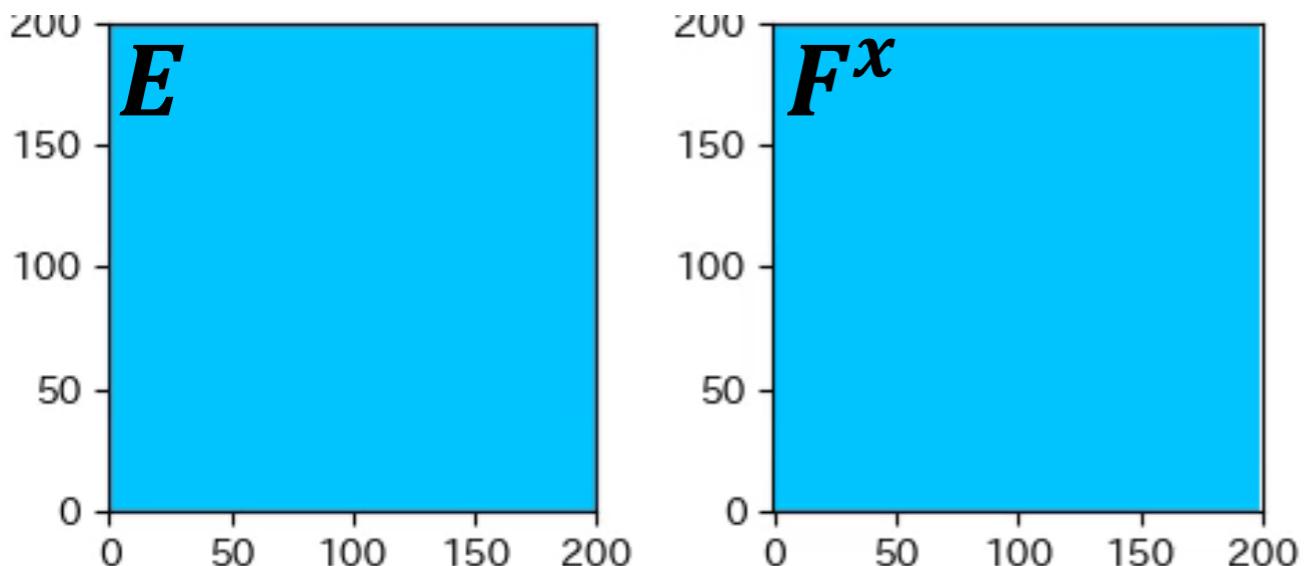
赤破線: 正解を表す直線
青点: 予測点



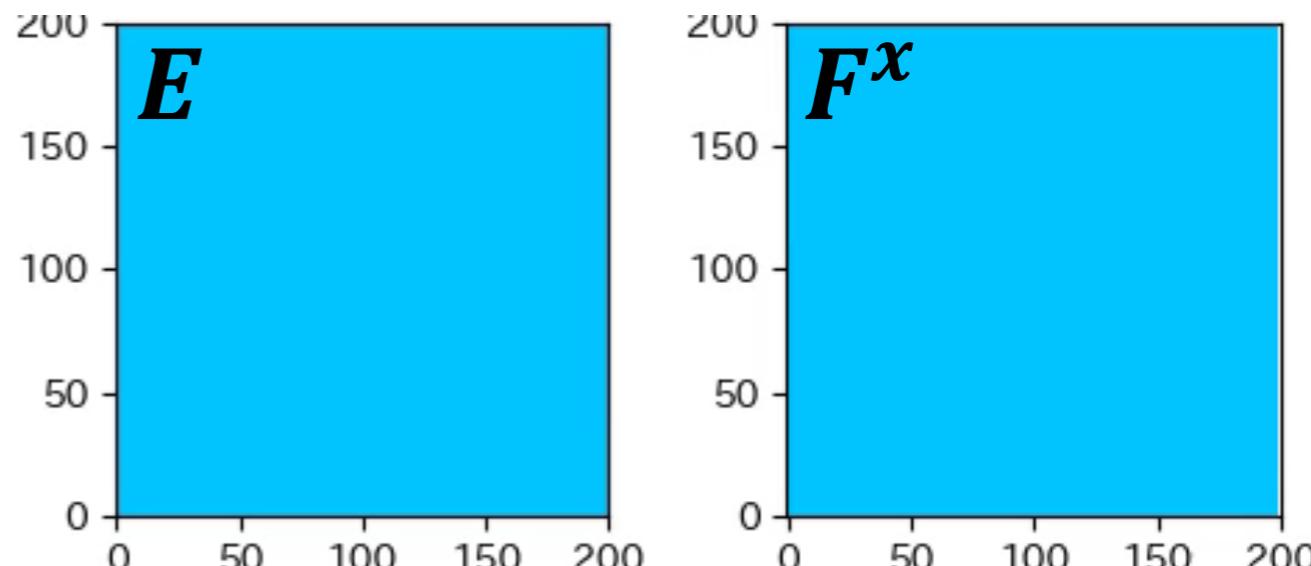
機械学習モデルは f^{xy} をほぼ正確に再現できており、典型的な相対誤差は 1% 以下である
他の成分についても、機械学習モデルはほぼ正確に正解値を再現できた

DNNモデルを用いた時間発展シミュレーション

INAZUMA
(計算時間：12分)



DNNシミュレーション
(計算時間：3分)

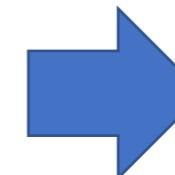
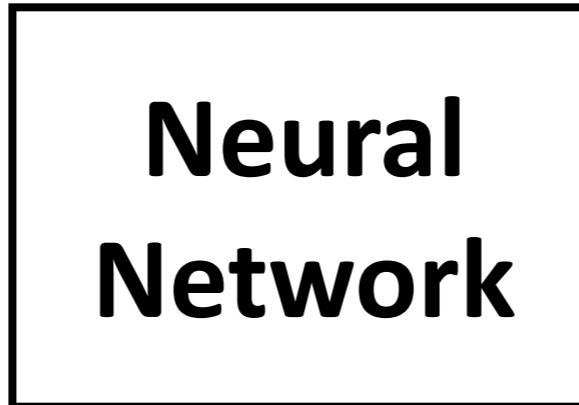
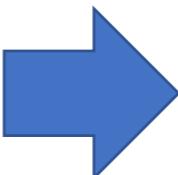
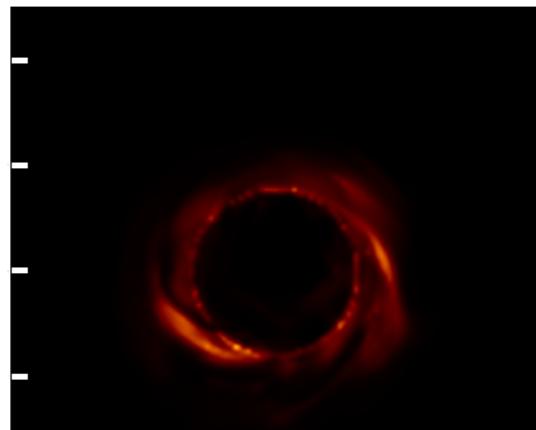


- DNNモデルを用いたシミュレーションでは輻射の非物理的な衝突を起こすことなくビーム交差テストを解けている
- INAZUMAの約4倍の高速化に成功した
- BH降着円盤に適用した結果については午後のセッションの上野さんの講演をご覧ください

観測とシミュレーションを繋ぐ機械学習

Deep Horizon (Jefferey et al. 2020): BHシャドウの画像から物理パラメータを復元する畳み込みNeural Network

$$M = 5.0e+09 M_{\odot}$$



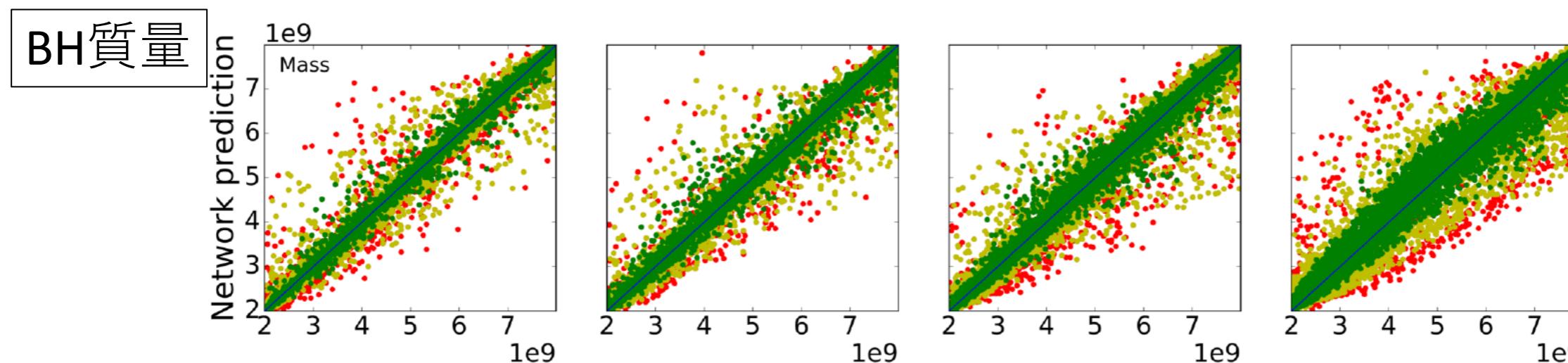
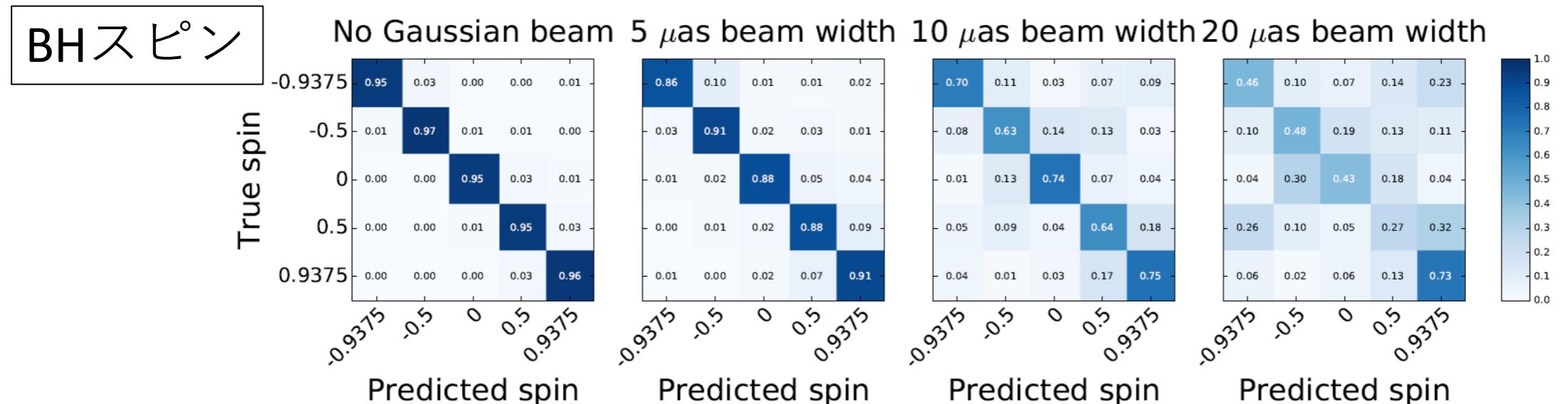
学習データ (GR-MHD simulations)

Parameter	Range
i	[15° , 25°]
\dot{M}	[$2 \times 10^{-6} M_{\odot}/\text{yr}$, $0.01 M_{\odot}/\text{yr}$]
R_{high}	[1, 100]
M	[$2 \times 10^9 M_{\odot}$, $8 \times 10^9 M_{\odot}$]
PA	[0° , 360°]
a	$0, \pm 0.5, \pm 0.9375$

- Viewing angle i
- Mass accretion rate \dot{M}
- electron heating prescription R_{high}
- BH mass M
- Position angle
- Spin parameter a

ビーム幅に対する依存性

小(高解像度) ← → 大(低解像度)



まとめ

- 回転BHはBZ機構により、より明るく強力なジェットを形成した
- 歳差運動する降着円盤計算によって、輻射とジェットの噴出方向が降着円盤と共に歳差運動することを示し、QPOsの原因になる可能性を示した
- 輻射輸送方程式を解くことにより、降着円盤の回転軸付近の光学的に薄い領域の輻射場を正確に計算することができた
- エディントンテンソルを予測する機械学習により、高速で正確に輻射輸送を解くことができた
- Deep Horizonのようなシミュレーション結果と観測を結びつける機械学習も将来的に重要になってくるであろう