

一般相対論的磁気流体シミュレーションで探る カーブラックホール周りにおける 超臨界降着円盤のエネルギーと物質の流れ

Utsumi et al. 2022 + α

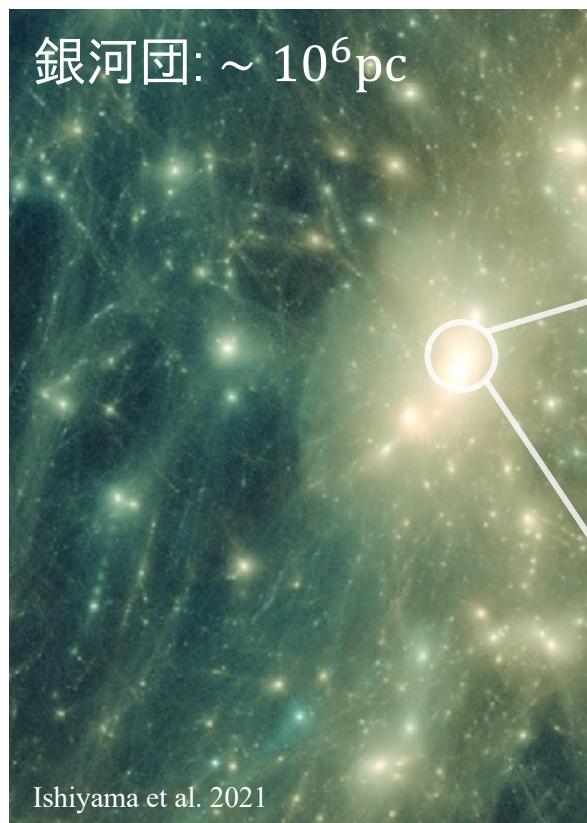
内海 碧人
筑波大学

大須賀 健 (筑波大学)
高橋 博之 (駒澤大学)
朝比奈 雄太 (筑波大学)
小川 拓未 (筑波大学)

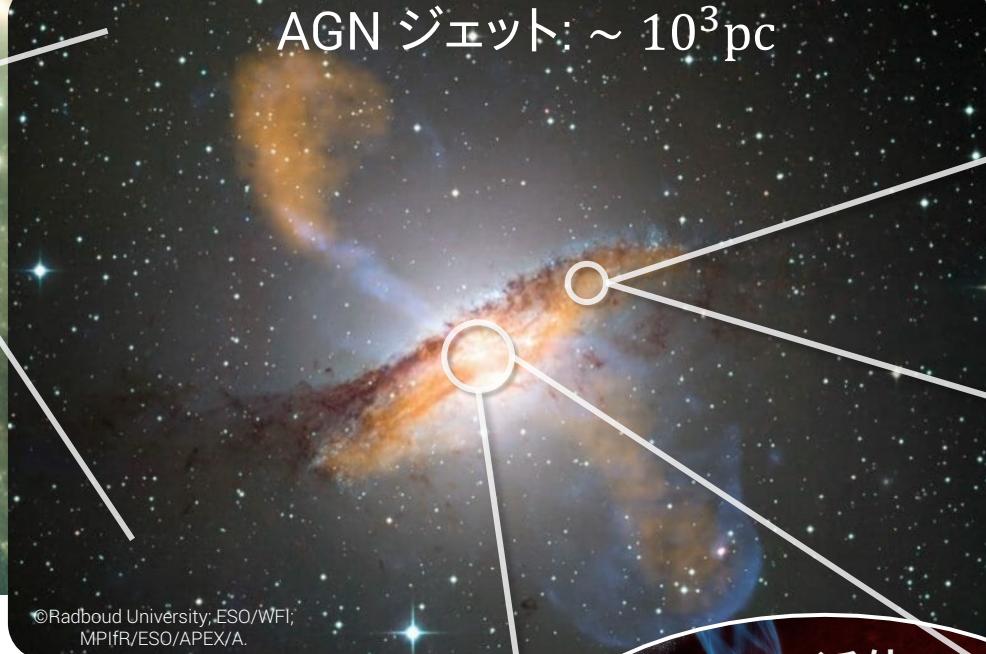
宇宙進化とブラックホール(BH)

銀河団: $\sim 10^6$ pc

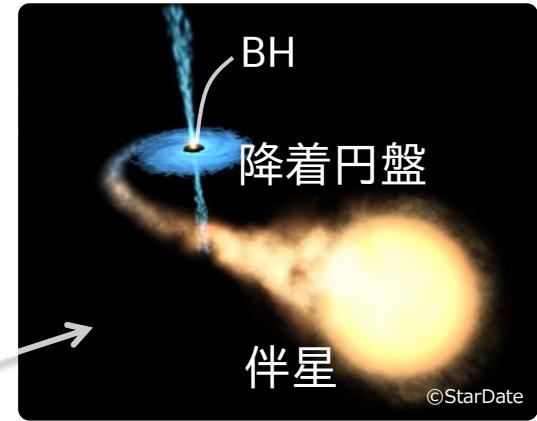
BHは様々なスケールで
莫大なエネルギーの源として機能.



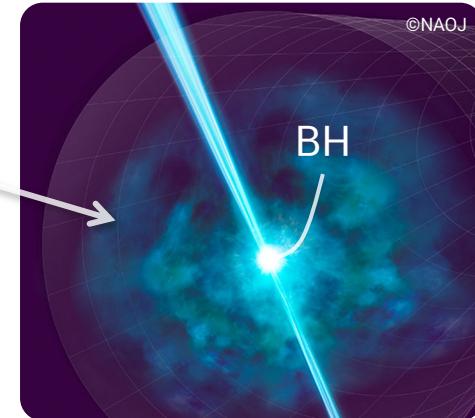
AGN ジェット: $\sim 10^3$ pc



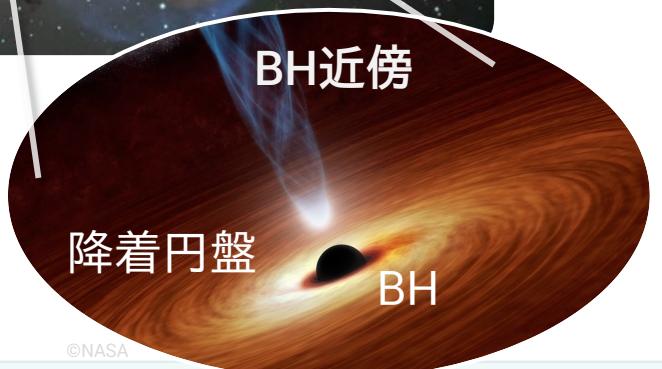
連星系からのジェット: $\sim 10^{-2}$ pc



ガンマ線バースト



BH降着円盤の調査は
宇宙進化における、
BHの役割の理解を深める.



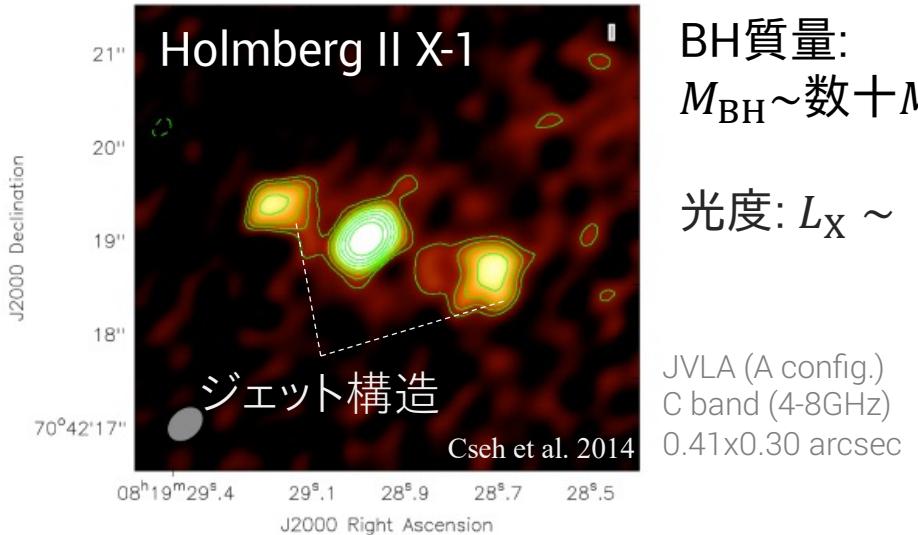
← 今回注目のスケール

Introduction: 高光度コンパクト天体

BH 降着円盤を持つ天体の中でも
放射される光度の大きい天体に注目.

◆ Ultraluminous X-ray sources (ULXs)

- X線光度: $L_X > 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$
- 銀河中心から離れた位置に存在.



エネルギー源の候補

- 恒星質量BH (or 中性子星) + 超臨界降着
- 中間質量BHへの亜臨界降着

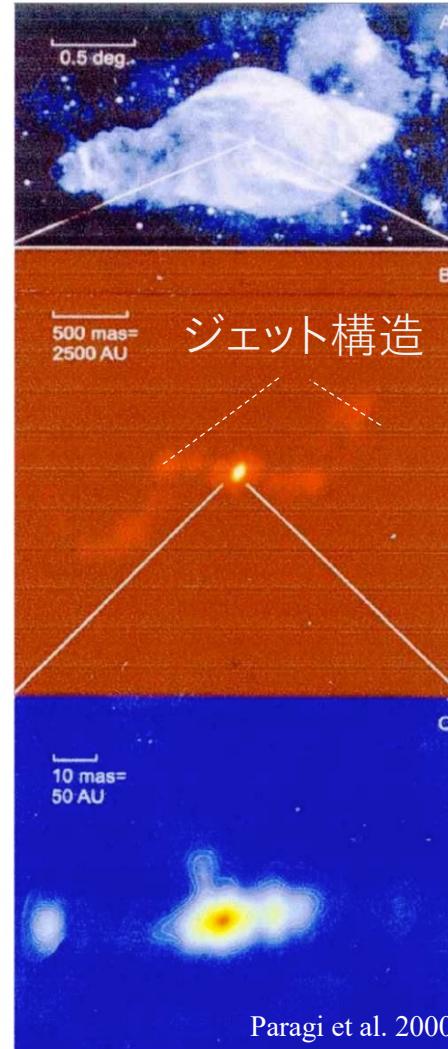
◆ SS433

光度: $\sim 10^{40} \text{ erg s}^{-1}$
 $\sim 100 L_{\text{Edd}}$ ($M_{\text{BH}} \sim 10 M_{\odot}$)

L_{Edd} : エディントン光度

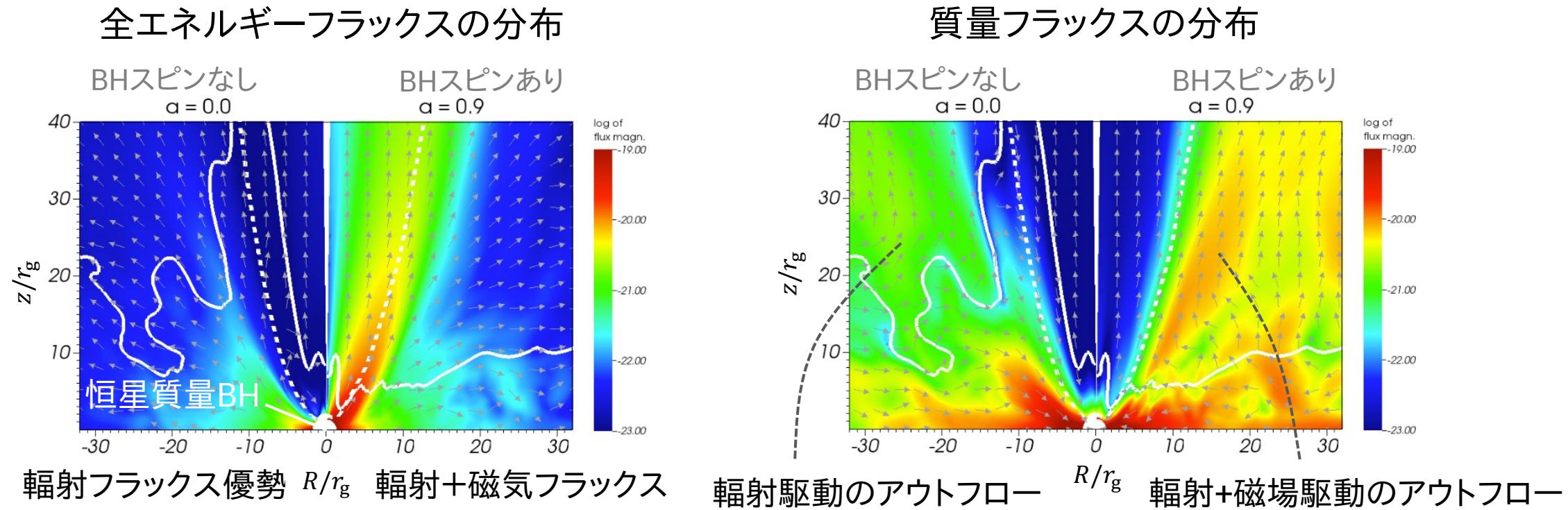
X線光度:
 $L_X \sim 10^{36} \text{ erg s}^{-1}$

円盤風による遮蔽



超臨界降着円盤: 輻射以外のエネルギーの重要性

- 高降着により、基本的に輻射が重要な役割を果たす。
 - BHがスピンしている場合、磁場によるエネルギー解放も重要な。
- General Relativistic Radiation MHD (GRRMHD)シミュレーションによる先行研究: Sadowski et al. 2014



- 輻射・磁場・流体のダイナミクスを同時に考慮する必要性。
- BHスピン依存性の調査は不十分。

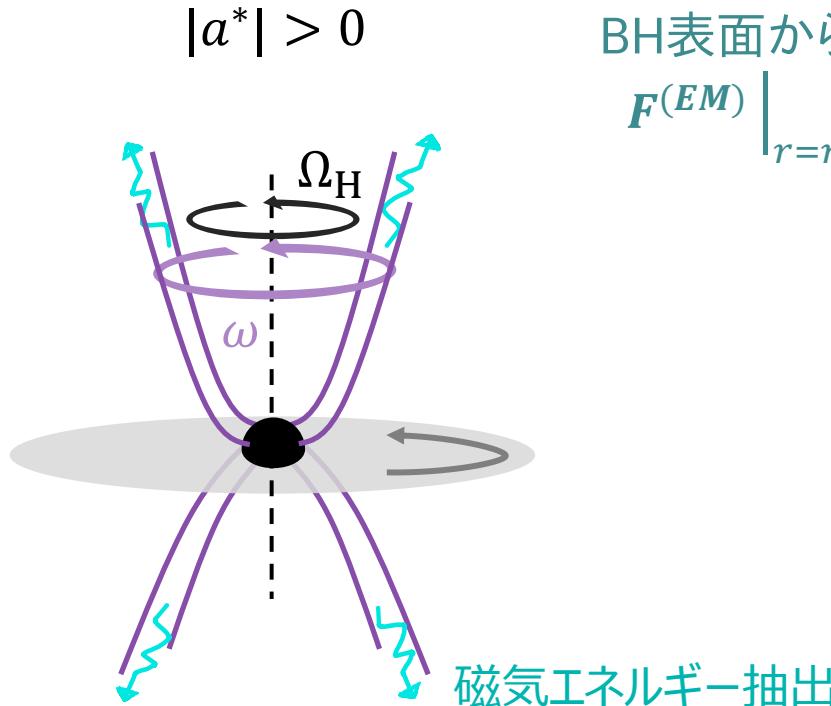
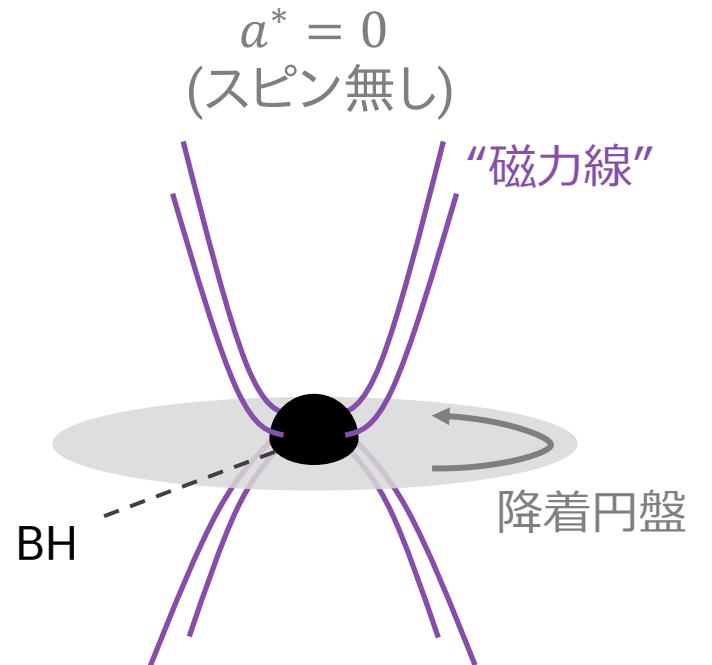
r_g : 重力半径

BHスピンによる磁気エネルギーの解放: ジェットの駆動力

◆ Blandford-Znajek (BZ) 機構 Blandford & Znajek 1977

- 磁場を介して、BHの回転エネルギーを抽出する機構.

BHのスピンパラメータを a^* とする.



BH表面から抽出される磁気エネルギー

$$F^{(EM)} \Big|_{r=r_H} = 2(B^r)^2 \omega r_H (\Omega_H - \omega) \sin^2 \theta$$

Mckinney and Gammie 2004

B^r : 動径方向の磁場
 Ω_H : ブラックホールの角速度
 ω : 磁力線の角速度
 r_H : Event Horizon

BHがスピンしている場合、
超臨界降着円盤においても磁場によるエネルギー解放が無視できなくなる。

本研究のモチベーションと目的

高光度コンパクト天体のエネルギー源の候補

- 恒星質量BHへの超臨界降着現象



(a) 輻射・磁場・ガスダイナミクスの同時調査が必要.
→ どの成分がどの程度優位に働く? (未解明)

(c) 磁場が比較的弱い状態の降着円盤の調査.
磁場が最大まで蓄積した円盤 (MAD) Narayan et al. 2022
Ricarte et al. 2023

(b) BHがスピンしている場合:
BZ機構による磁気エネルギーの解放



(a),(b),(c)のもと

GRRMHD シミュレーション: UWABAMI Takahashi et al. 2016

- “磁場の弱い超臨界降着円盤 + BZジェット” の質量噴出・エネルギー解放機構の調査.
- 高光度コンパクト天体の観測結果の理論的解釈を深める.

GRRMHD 基礎方程式

- 連続の式

$$(\rho u^\nu)_{;\nu} = 0$$

- 磁気流体のエネルギー運動量保存則 輻射4元力

$$(T_\mu^\nu + M_\mu^\nu)_{;\nu} = \mathbf{G}_\mu$$

$$T^{\mu\nu} = (\rho + e + p_g)u^\mu u^\nu + p_g g^{\mu\nu} \text{ (流体成分)}$$

$$M^{\mu\nu} = 2p_m u^\mu u^\nu + p_m g^{\mu\nu} - b^\mu b^\nu \text{ (磁場成分)}$$

- 輻射場のエネルギー運動量保存 (M1 closure)

$$R_{\mu;\nu}^\nu = -\mathbf{G}_\mu$$

$$R^{\mu\nu} = p_{\text{rad}}(4u_{\text{rad}}^\mu u_{\text{rad}}^\nu + g^{\mu\nu})$$

輻射と磁気流体の
相互作用による
エネルギー交換

- ・電子散乱
- ・自由-自由吸収

- 誘導方程式

$$\partial_t(\sqrt{-g}B^i) = [\sqrt{-g}(B^i v^j - B^j v^i)]$$

- 磁場のGauss則

$$\partial_j(\sqrt{-g}B^j) = 0$$

Note.

c : 光速 ($c = 1$)

ρ : 質量密度

u^μ : 4元速度

$T^{\mu\nu}, M^{\mu\nu}, R^{\mu\nu}$:

エネルギー運動量テンソル

g : 計量 $g_{\mu\nu}$ の行列式
(Kerr-schild 計量)

B^i : 3元磁場

v^i : 3元速度

e : 内部エネルギー

p_g : ガス(プラズマ)圧

p_m : 磁気圧

b^μ : 4元磁場

p_{rad} : 輻射圧

u_{rad}^μ : 輻射4元速度

モデル & 初期条件

- 回転軸対称 2次元計算.
- グリッド数: $(N_r, N_\theta, N_\phi) = (264, 264, 1)$
- 計算領域: $[R_{\text{in}}, R_{\text{out}}] = [r_{\text{H}}, 250r_g]$
- BH質量: $M_{\text{BH}} = 10M_\odot$
- BHスピン: $a^* = 0, \pm 0.3, \pm 0.5, \pm 0.7, \pm 0.9$
- 円盤状態: Standard and Normal Evolution (SANE) 円盤.
Magnetic flux parameter: $\phi_{\text{BH}} \sim 25$

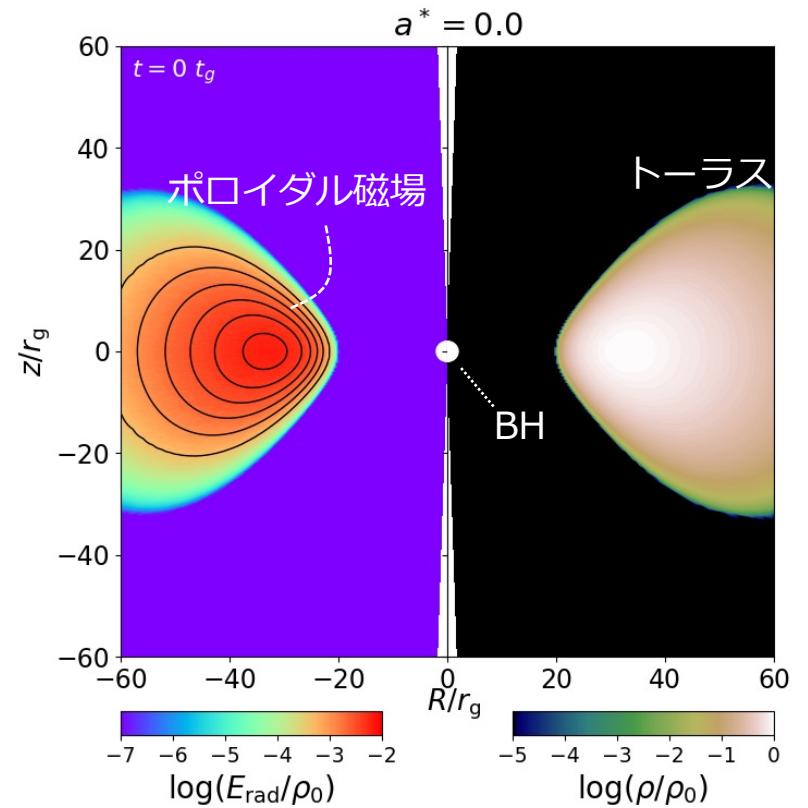
$$\phi_{\text{BH}} = \frac{\Phi_{\text{BH}}}{\sqrt{\dot{M}_{\text{in}}}} = \frac{\sqrt{4\pi}}{2\sqrt{\dot{M}_{\text{in}}}} \int_\theta \int_\phi |B^r|_{r=r_{\text{H}}} \sqrt{-g} d\theta d\phi$$

\dot{M}_{in} : 質量降着率
 B^r : 動径方向の3元磁場

初期条件

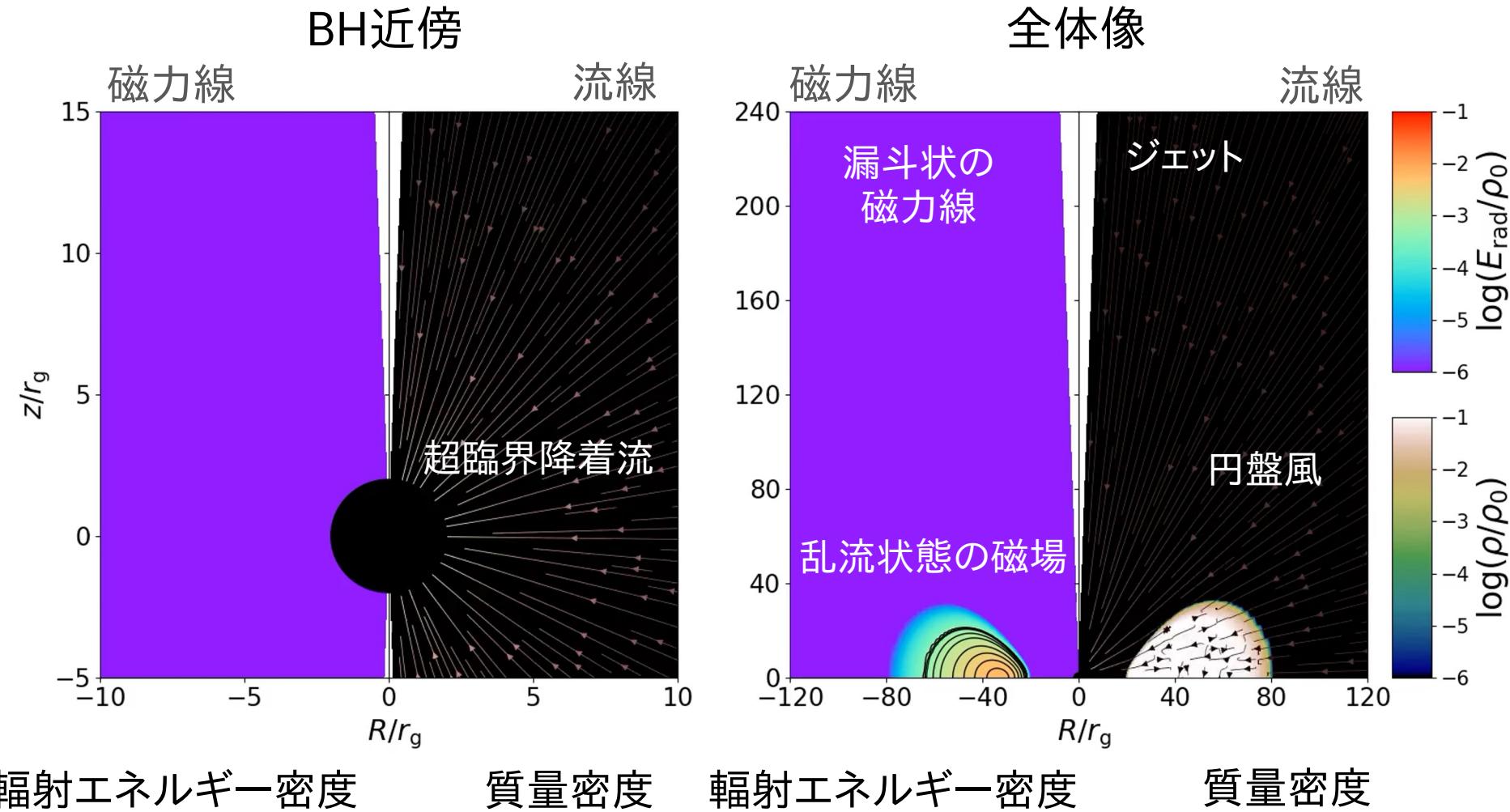
- プラズマベータ: $\beta = \frac{p_g + p_{\text{rad}}}{p_m} = 100$
- ポロイダル磁場 (r, θ) を持った 回転平衡トーラス
- トーラスの初期最大密度: $\rho_0 = 1.4 \times 10^{-2} \text{ g cm}^{-3}$
 $\rightarrow \dot{M}_{\text{in}} \sim 100L_{\text{Edd}}/c^2$

r_{H} : Event Horizon
 $r_g = \frac{GM_{\text{BH}}}{c^2}$: 重力半径
 G : 重力定数



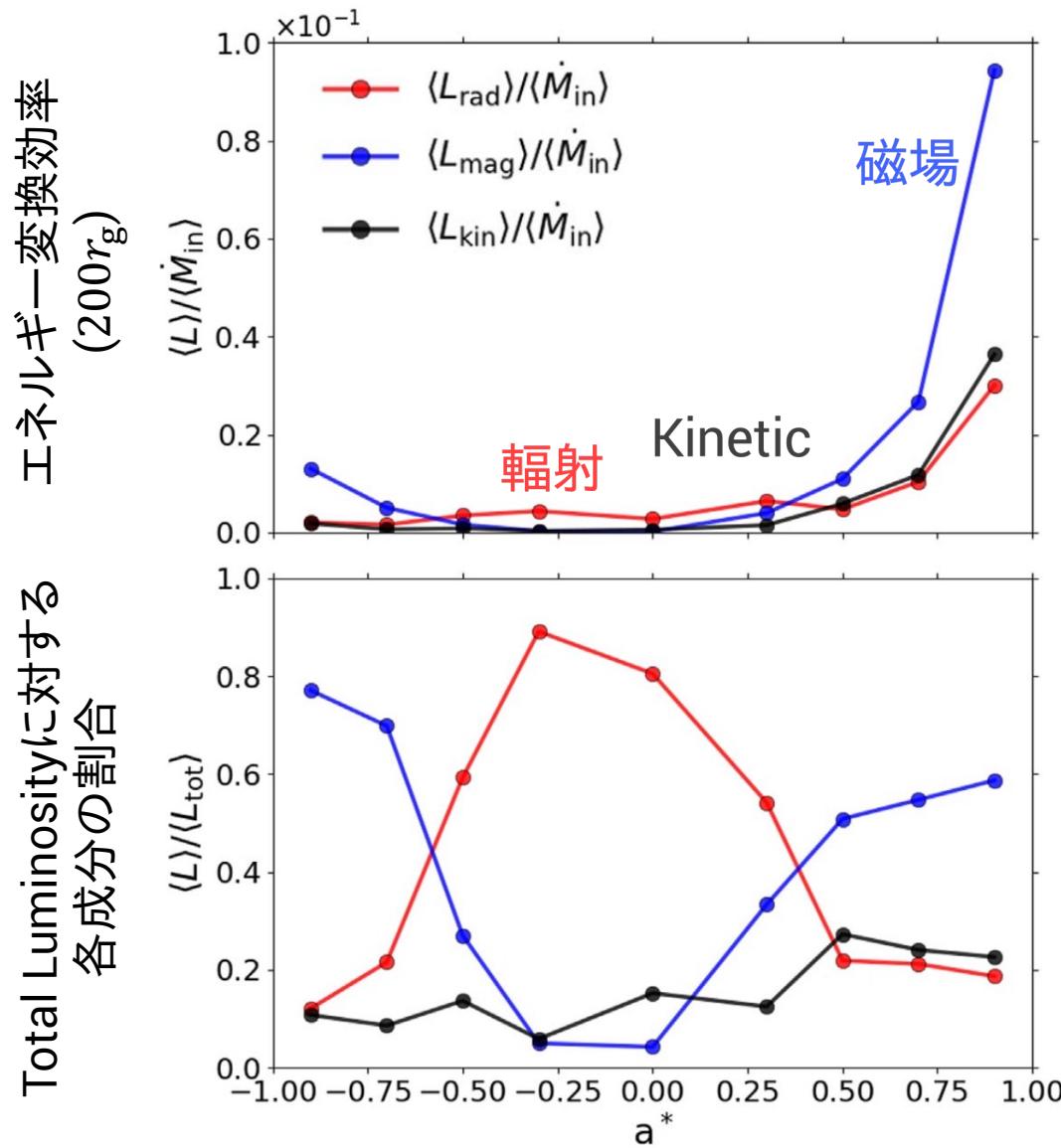
輻射エネルギー密度 質量密度

超臨界降着円盤の形成



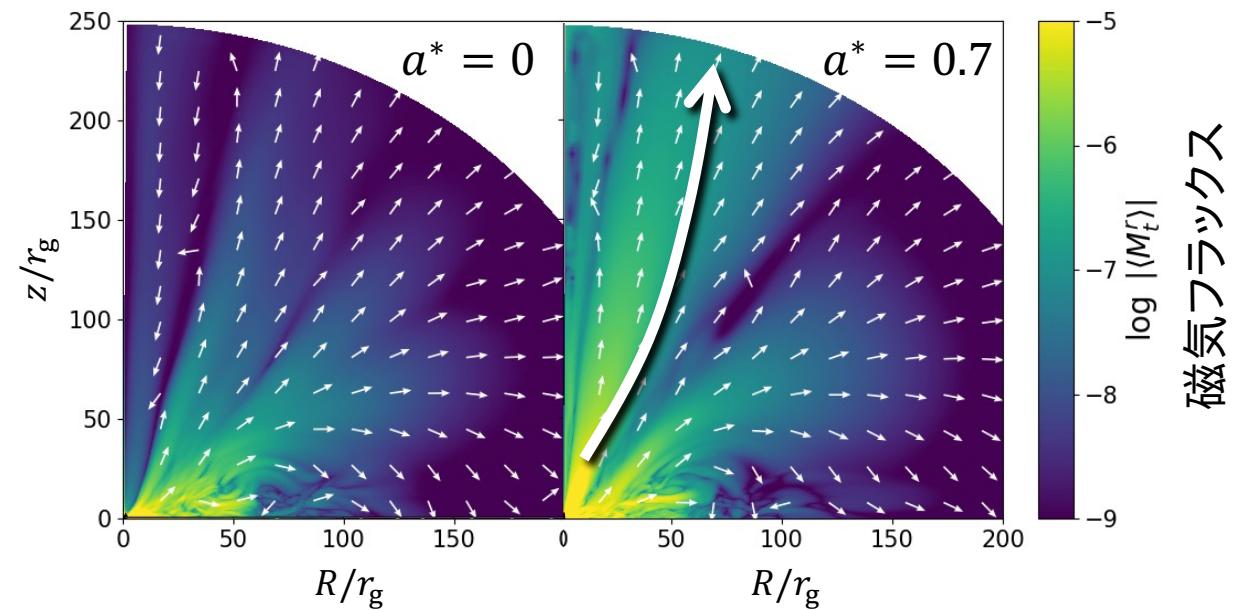
いずれのBHスピンのモデルも
"準定常な降着円盤"と"ジェット・円盤風"を形成.

エネルギー解放機構のブラックホールスピン依存性

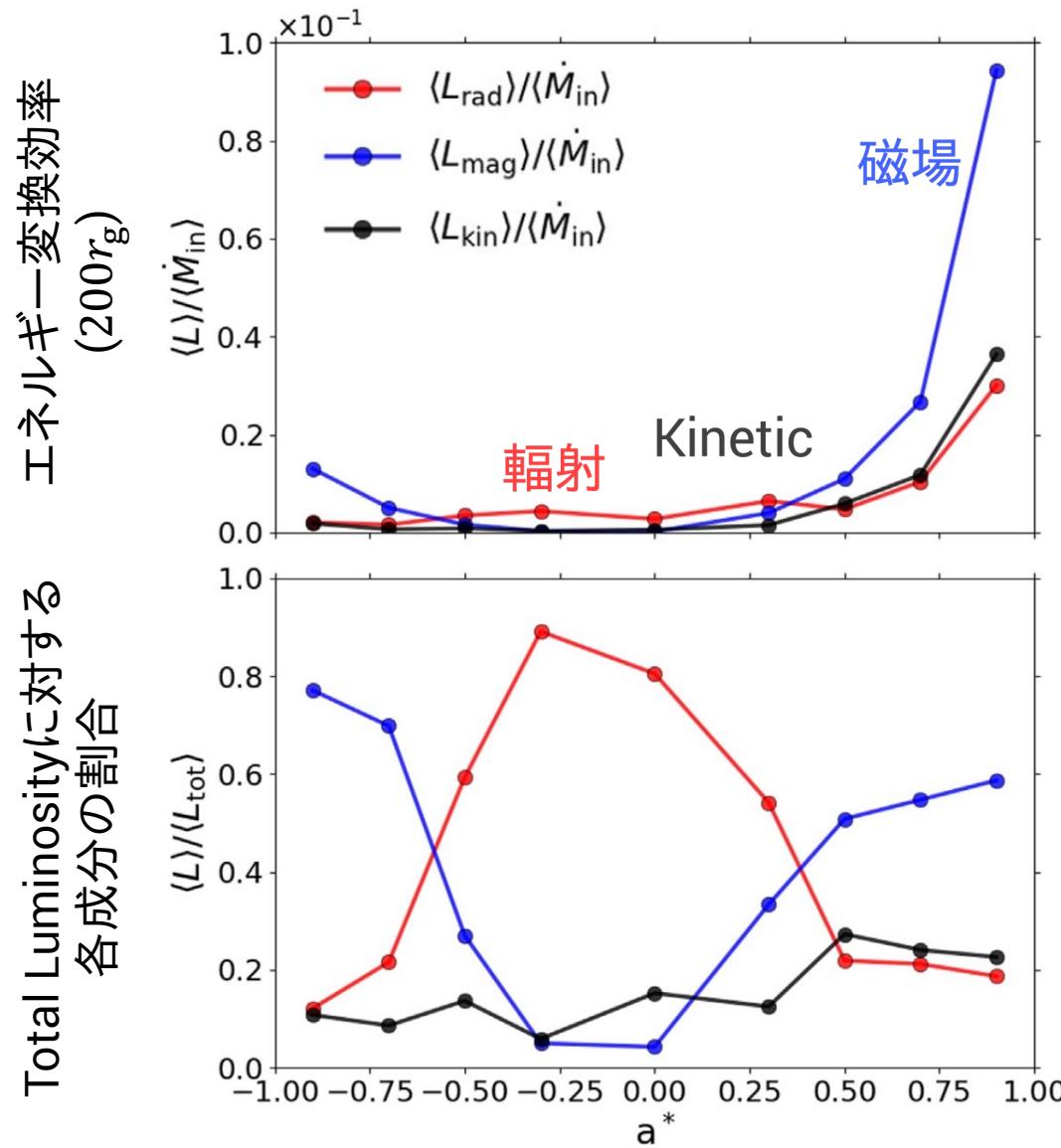


磁場成分

- 変換効率は $|a^*|$ と共に増加し、最大~10%.
- "超臨界降着円盤"においても、 $|a^*| \gtrsim 0.5$ のとき、磁場成分がTotal Luminosityの50%以上を占める
→ BZ機構によるエネルギー解放.
(解析解と数値計算結果がEvent Horizonにおいて一致).

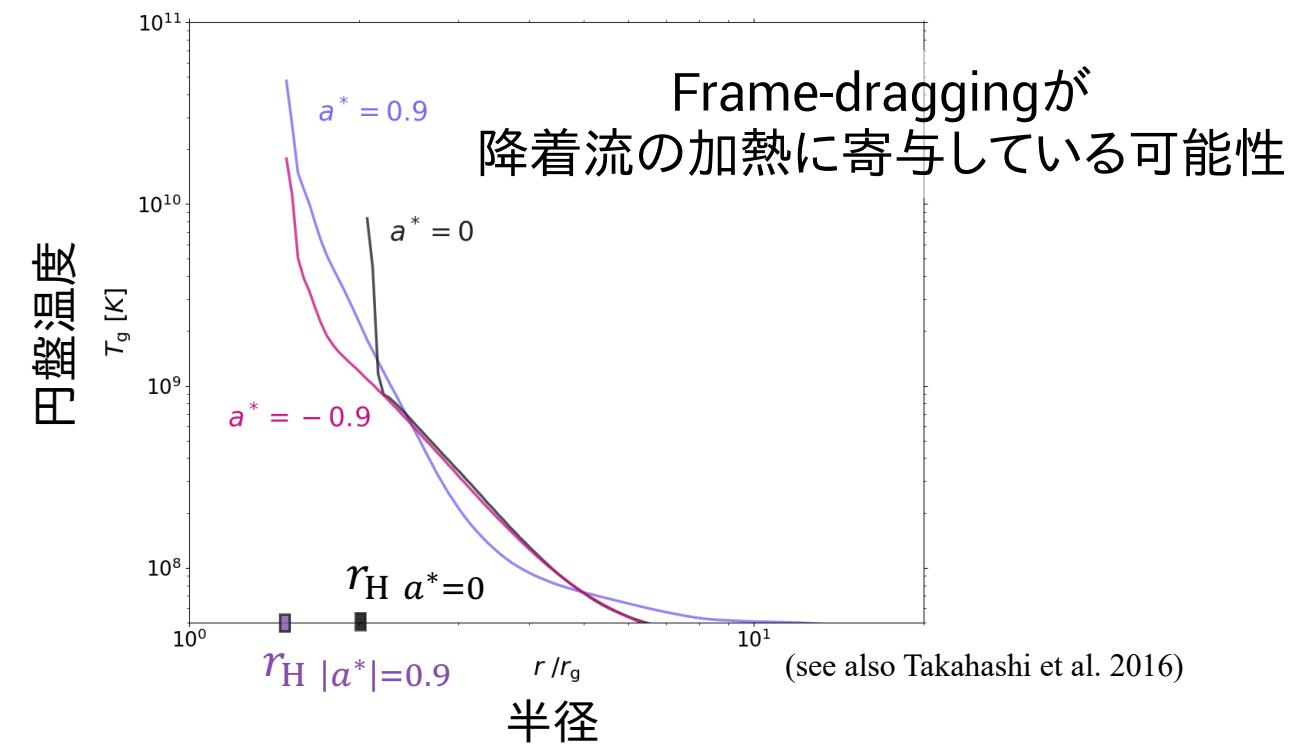


エネルギー解放機構のブラックホールスピン依存性



輻射成分

- 全てのスピンモデルで輻射によるエネルギー解放を確認.
- $a^* \geq 0.7$: 変換効率が比較的顕著に増大.
- $|a^*| \lesssim 0.5$: Total Luminosityに対して50 – 90%を占める.
→ 低スピンモデル:
降着円盤からのエネルギー解放が支配的.

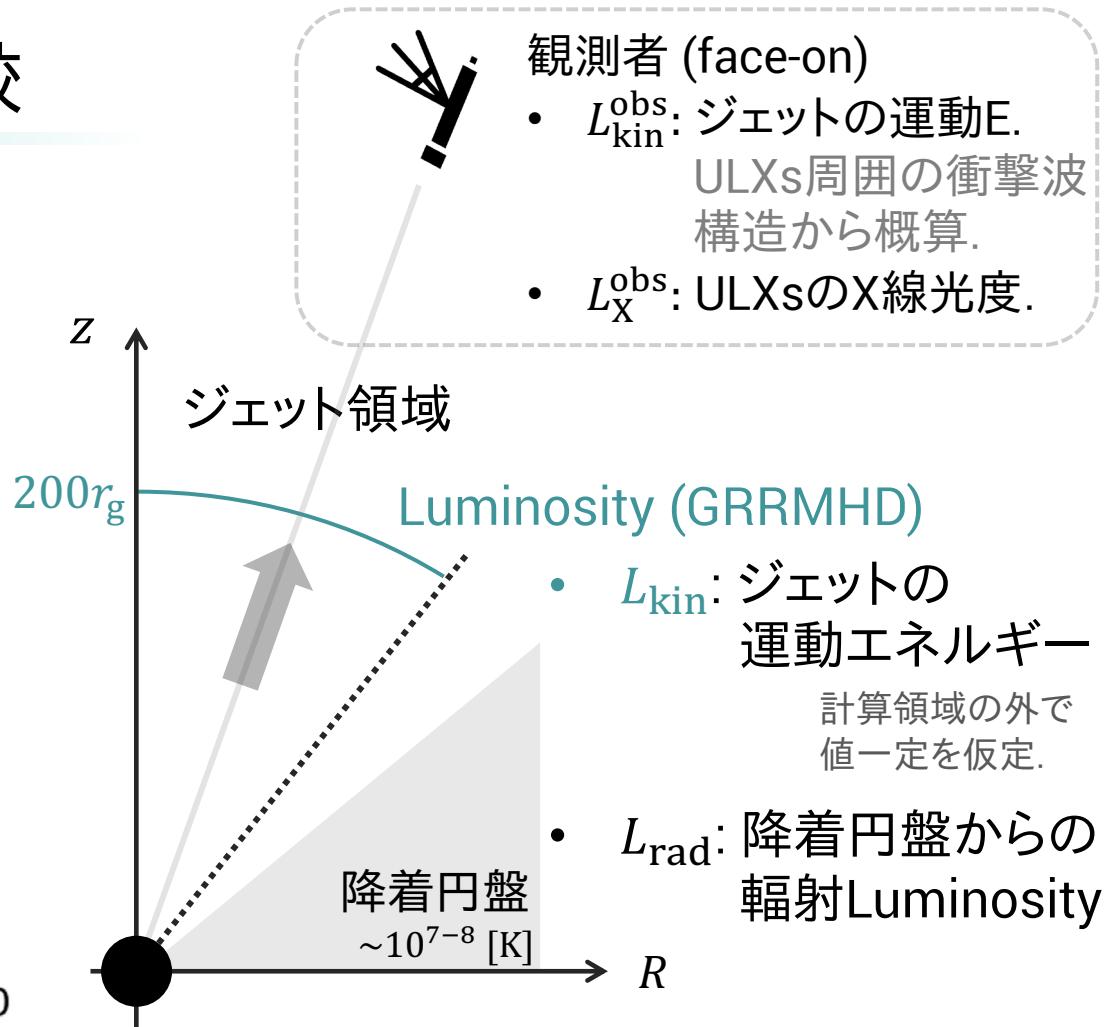
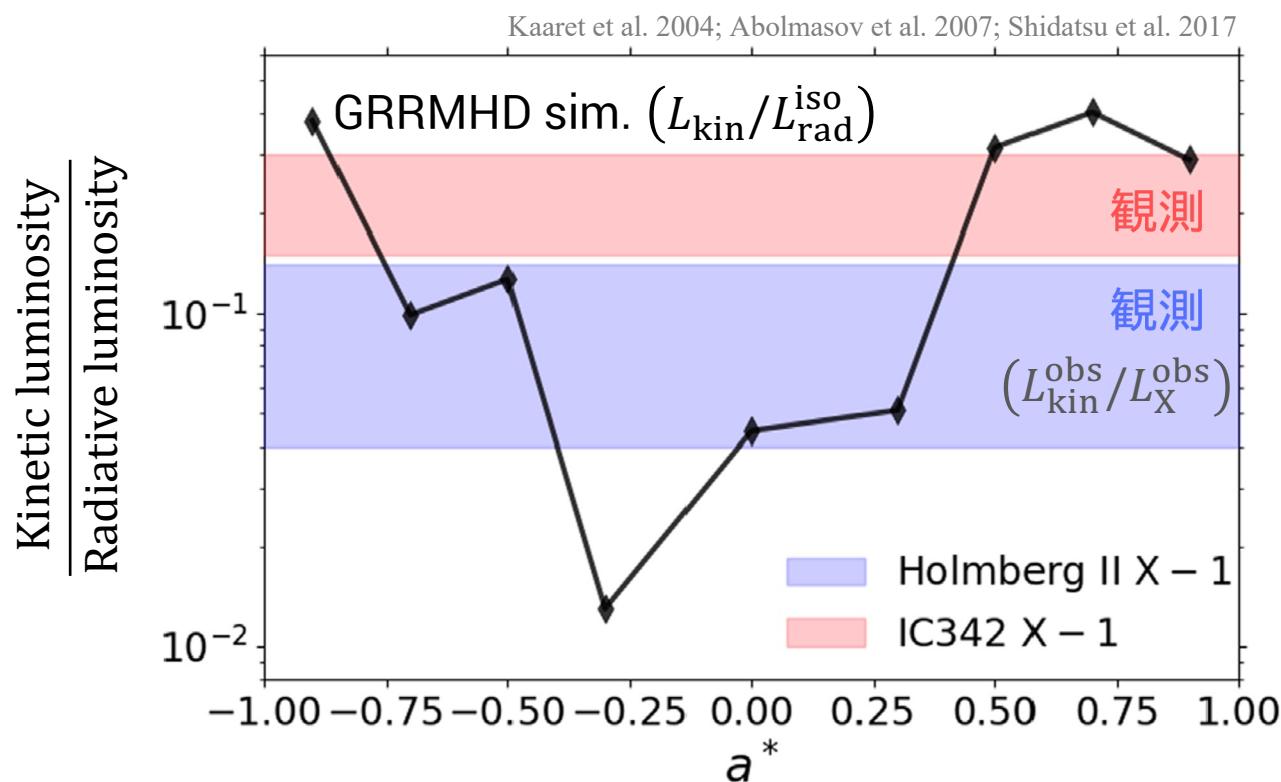


議論①

超臨界降着円盤(SANE: $\phi_{\text{BH}} \sim 25$)のシミュレーション結果と
Ultra Luminous X-ray source の比較

Ultra Luminous X-ray source との比較

■ 運動エネルギー/輻射 Luminosity 比

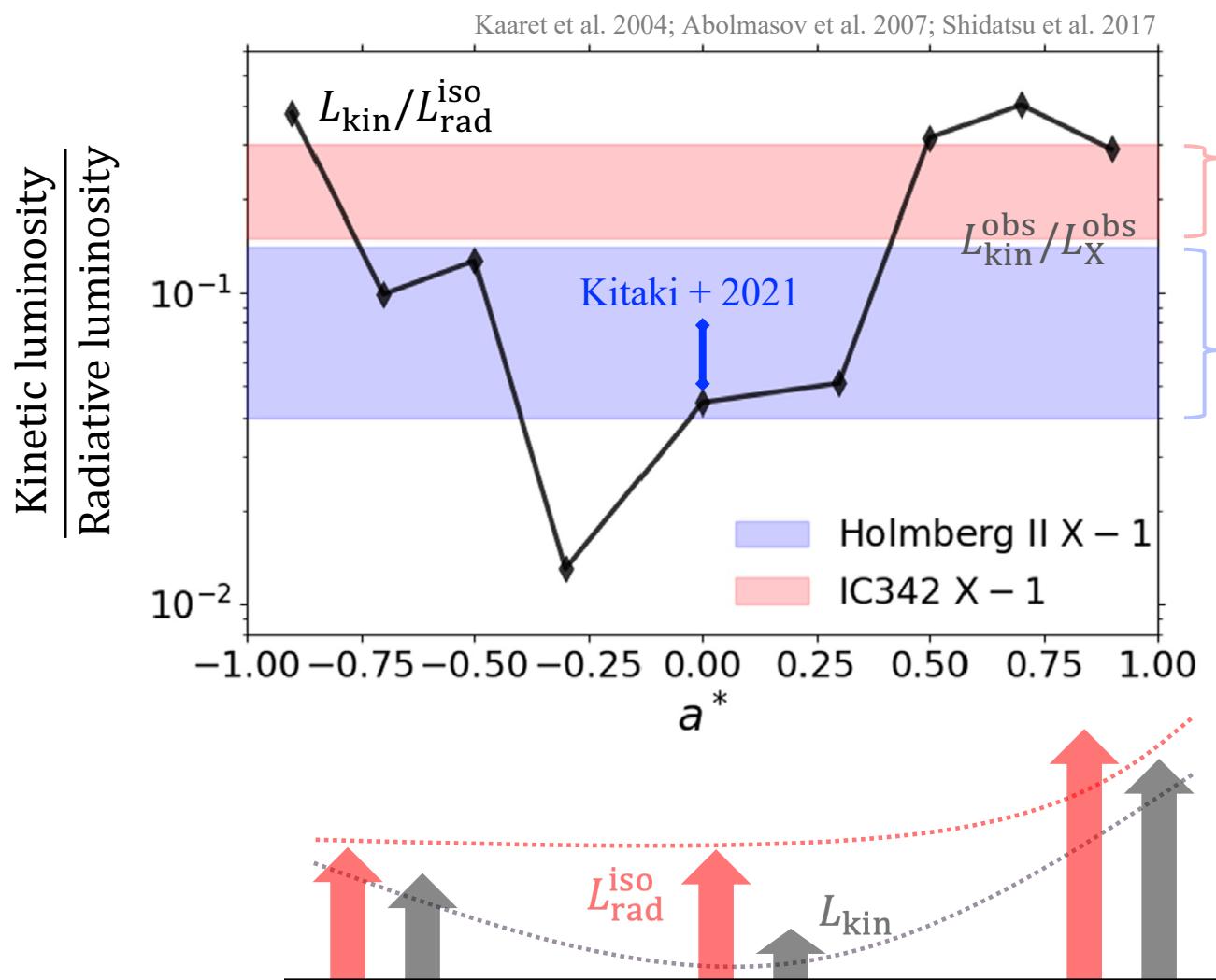


輻射 Luminosity (isotropic):

$$L_{\text{rad}}^{\text{iso}} = 4\pi \left[\frac{L_{\text{rad}}}{2\pi \int \sin\theta d\theta} \right]$$

Ultra Luminous X-ray source との比較

■ 運動エネルギー/輻射 Luminosity 比



□ 本シミュレーションによる予測.

- IC342 X-1
高回転BHモデル
($a^* = -0.9, a^* \geq 0.5$)
- Holmberg II X-1
低回転(無回転)BHモデル
($-0.7 \leq a^* \leq 0.3$)

□ Kitaki et al. 2021

- : 2次元 輻射流体シミュレーション
- $a^* = 0$
- 降着円盤が準定常となる半径: $\sim 300r_g$
(我々の計算 $\sim 20r_g$)
- $L_{\text{kin}}/L_{\text{rad}}^{\text{iso}} \sim 0.05 - 0.08$
- 磁場の影響の少ない
→ 本研究の $a^* = 0$ モデルと無矛盾.

議論②

超臨界降着円盤(SANE: $\phi_{\text{BH}} \sim 25$)中心における
BHのスピン進化可能性について

“流れ”がBHスピンに与える影響の評価

Spin-up parameter エネルギー流束、質量流束がBHスピンに与える影響

$$s \equiv \frac{da^*}{dt} \frac{M}{\dot{M}_{\text{in}}} = j - 2ea^*$$

Gammie et al. 2004

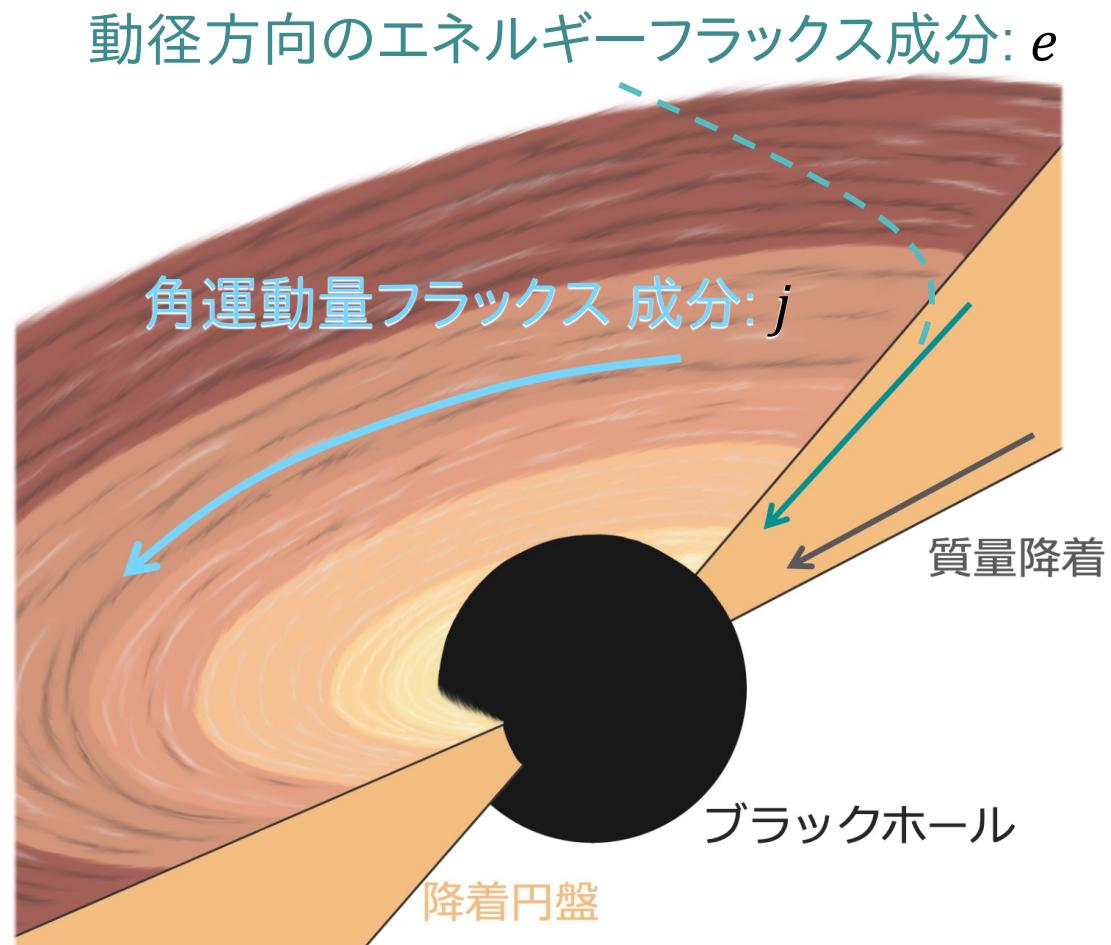
(質量降着のタイムスケールにおけるBHスピンの変化)

- $s > 0$: Spin-up ($\Delta a^* > 0$) $a^* \rightarrow 1$
- $s = 0$: スピン変化なし ($\Delta a^* = 0$)
- $s < 0$: Spin-down ($\Delta a^* < 0$) $a^* \rightarrow -1$

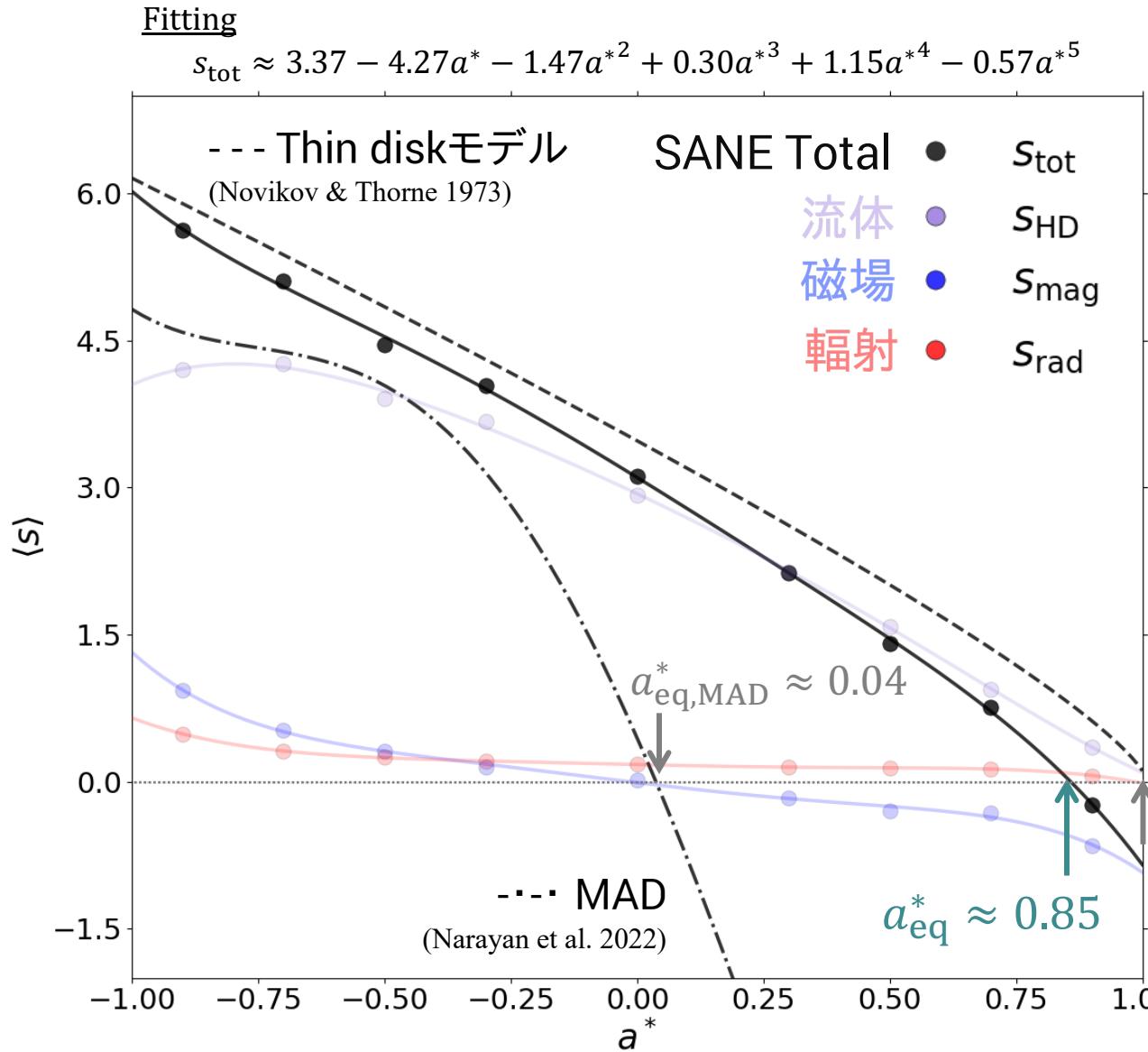
Spin-up parameter を以下の成分に分ける.

$$s_{\text{tot}} = s_{\text{HD}} + s_{\text{mag}} + s_{\text{rad}}$$

順に流体、磁場、輻射 由来のエネルギーに起因する成分.



Spin-up Parameter のBHスピン依存性



s_{tot} :

- Thin disk と同様の傾向 (絶対値は全体的に小さい).
- $s_{\text{tot}} = 0$: スピンパラメータは平衡状態.
→ $a^*_{\text{eq}} \approx 0.85$: 標準円盤やMADと異なる

標準円盤モデル: 磁場未考慮

MAD: 磁場の限界蓄積状態

SANE 円盤: MADよりも磁場の弱い円盤

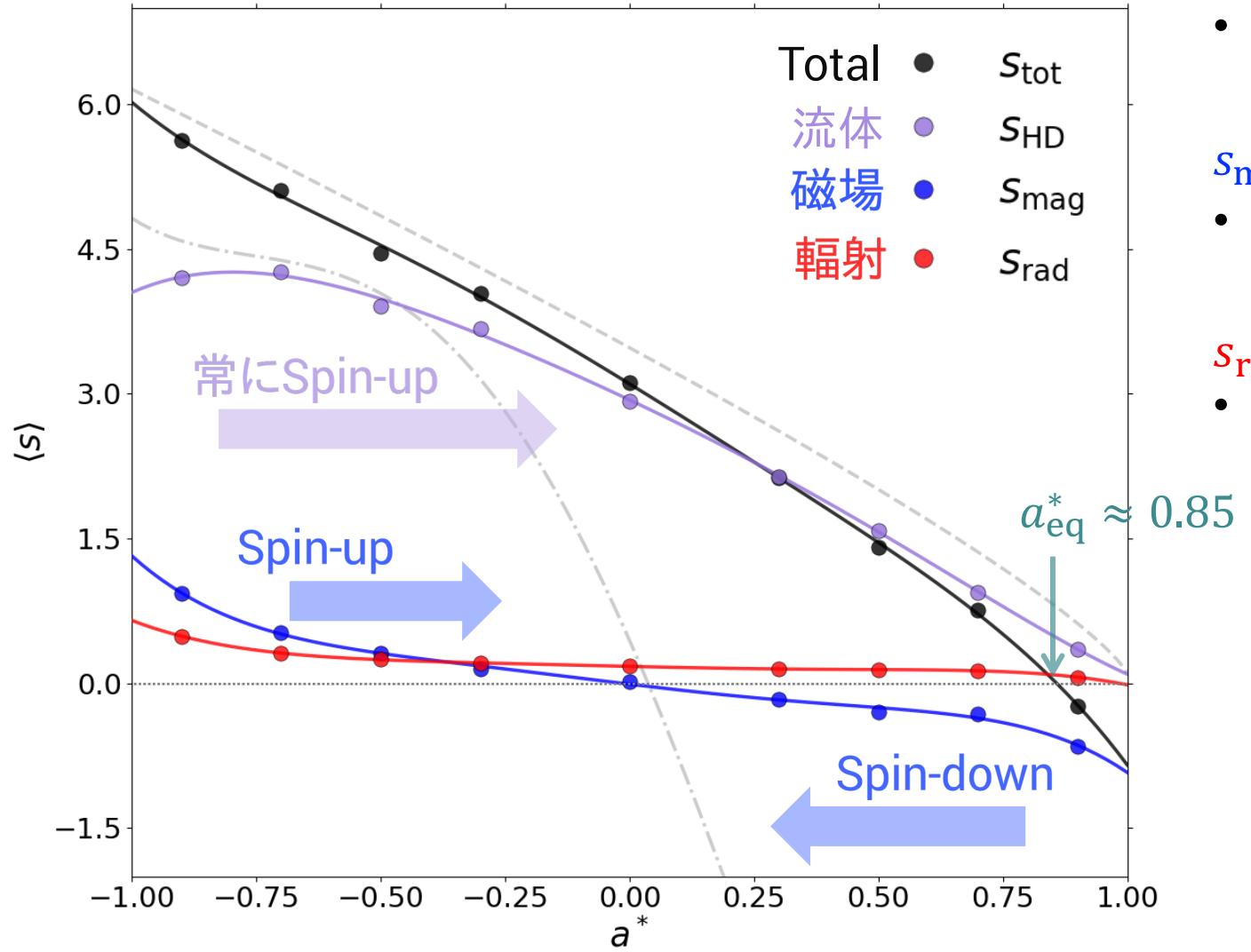
Magnetic flux parameter

$$\phi_{\text{BH}} = \frac{\Phi_{\text{BH}}}{\sqrt{\dot{M}_{\text{in}}}} = \frac{\sqrt{4\pi}}{2\sqrt{\dot{M}_{\text{in}}}} \int_{\theta} \int_{\phi} |B^r|_{r=r_{\text{H}}} \sqrt{-g} d\theta d\phi$$

\dot{M}_{in} : 質量降着率

B^r : 動径方向の3元磁場

Spin-up Parameter のBHスピン依存性



S_{HD} :

- S_{tot} の主な傾向を決定しているのは流体成分.
→ 質量降着による角運動量の獲得.

S_{mag} :

- $a^* = 0$ を境に $|a^*|$ を低下させる向きに作用.
→ BZジェットによるスピニエネルギーの抽出.

S_{rad} :

- 他の成分に比べ S_{tot} に対する影響が小さい.
(光子捕獲は質量降着の10%程度)

“質量降着で S_{tot} の主な傾向が決定”

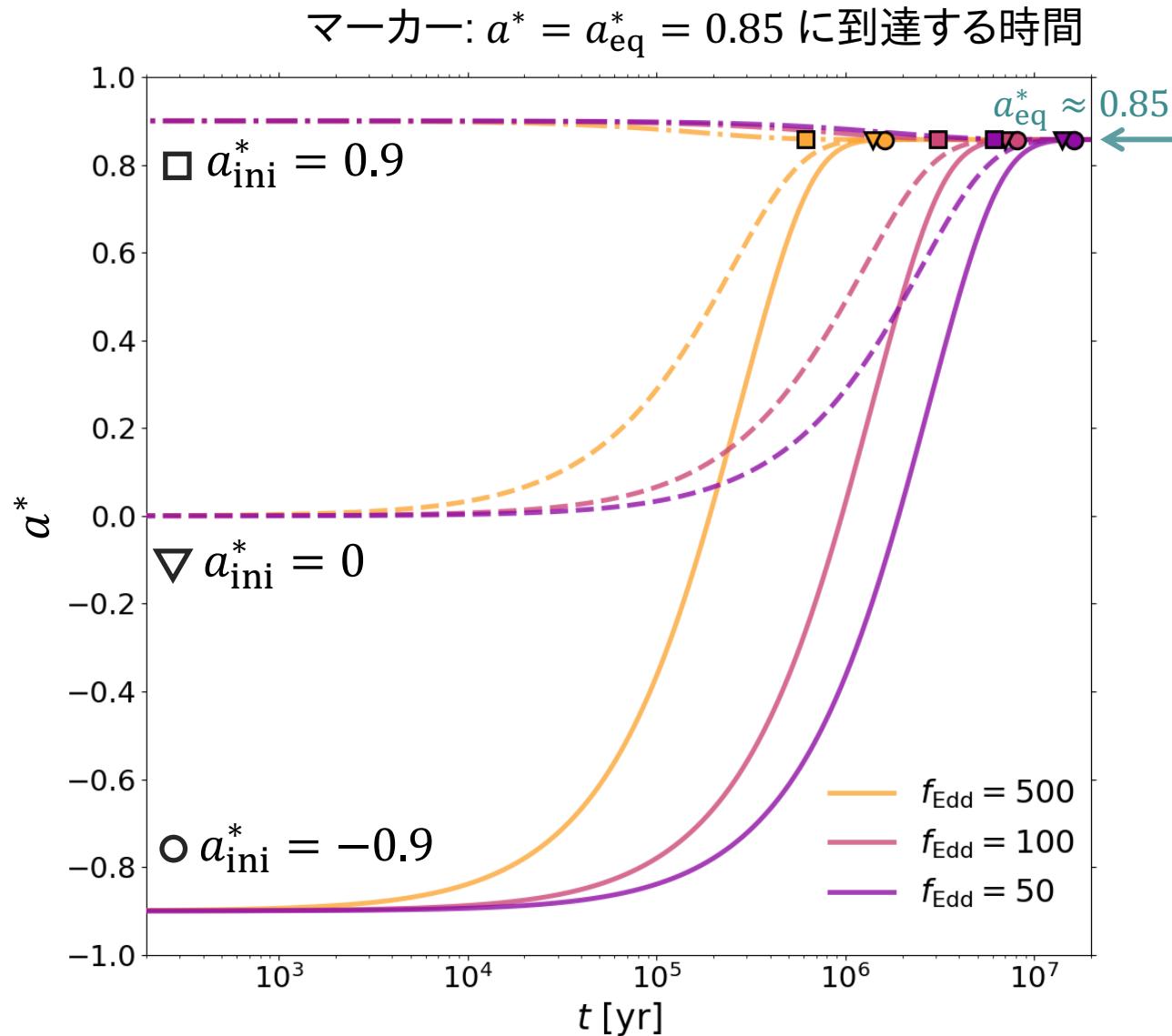
+

“BZ 機構によるスピニエネルギーの抽出”

↓

Thin diskともMADとも異なる
 $S_{\text{tot}} = 0$ となるスピニ値 a^*_{eq} を得る.

BHスピンの進化可能性 (超臨界SANE降着円盤の維持を仮定)



セットアップ

初期スピンパラメータ: $a_{\text{ini}}^* = 0, \pm 0.9$

質量降着率(エディントン比): $f_{\text{Edd}} = \frac{\dot{M}}{\dot{M}_{\text{Edd}}} = \text{const.}$

$$\frac{da^*}{dt} = f_{\text{Edd}} \frac{\dot{M}_{\text{Edd}}}{\dot{M}} s_{\text{tot}}$$

GRRMHDから得たFitting function

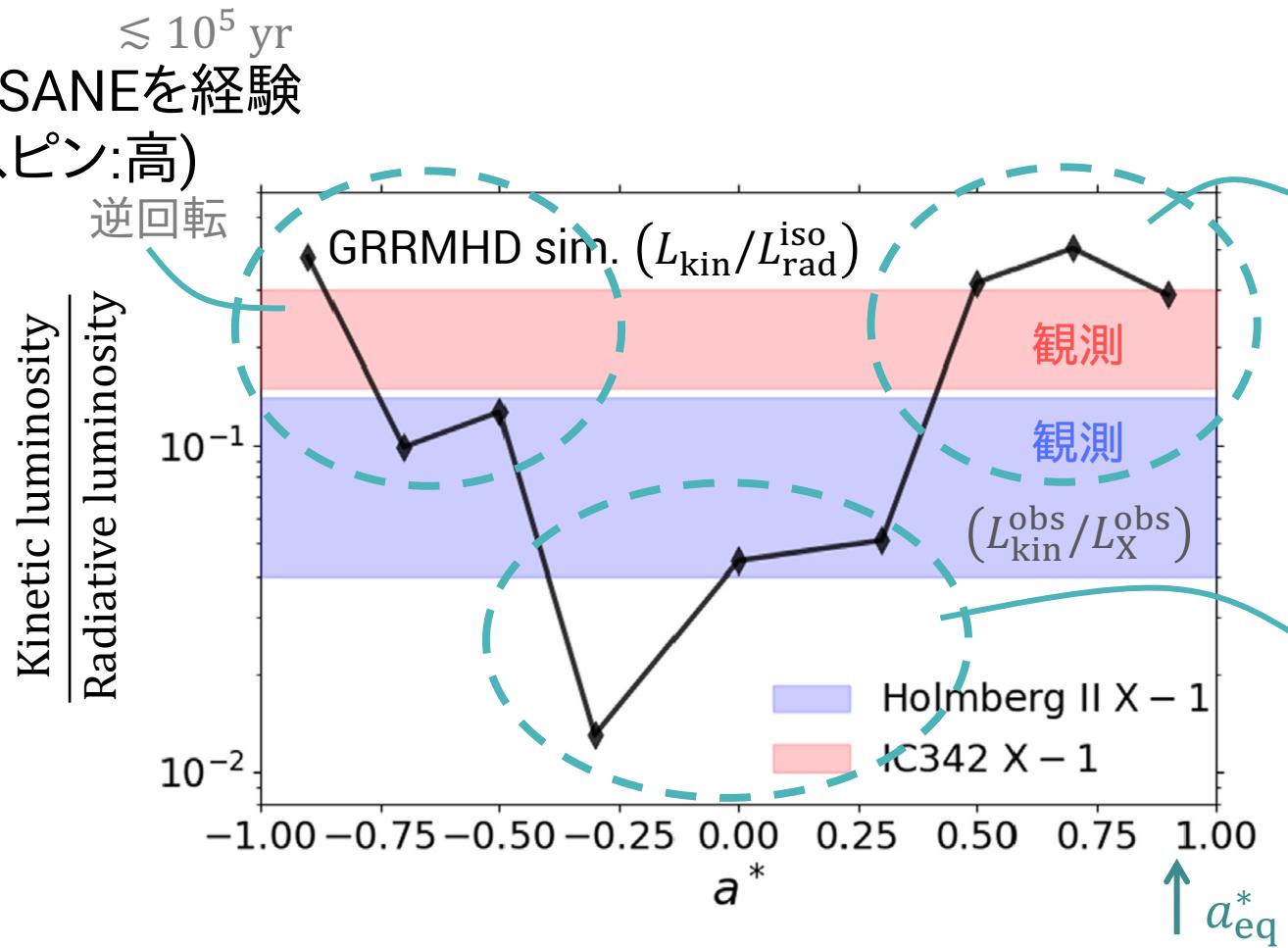
$$s_{\text{tot}} \approx 3.37 - 4.27a^* - 1.47a^{*2} + 0.30a^{*3} + 1.15a^{*4} - 0.57a^{*5}$$

- 逆回転モデルであっても
 $f_{\text{Edd}} = 100 \rightarrow \sim 10^6 [\text{yr}]$ で a_{eq}^* に収束.
- 伴星($\sim 100 M_{\odot}$)の寿命: $\sim 10^6 [\text{yr}]$.
超臨界SANE降着円盤のBHは
高回転への到達が可能.

超臨界SANE降着が起こっている天体の
BHスピン進化を追跡可能.

ULX中心のBHと超臨界SANE円盤の進化の考察

- 短期間SANEを経験
(初期スピン:高)



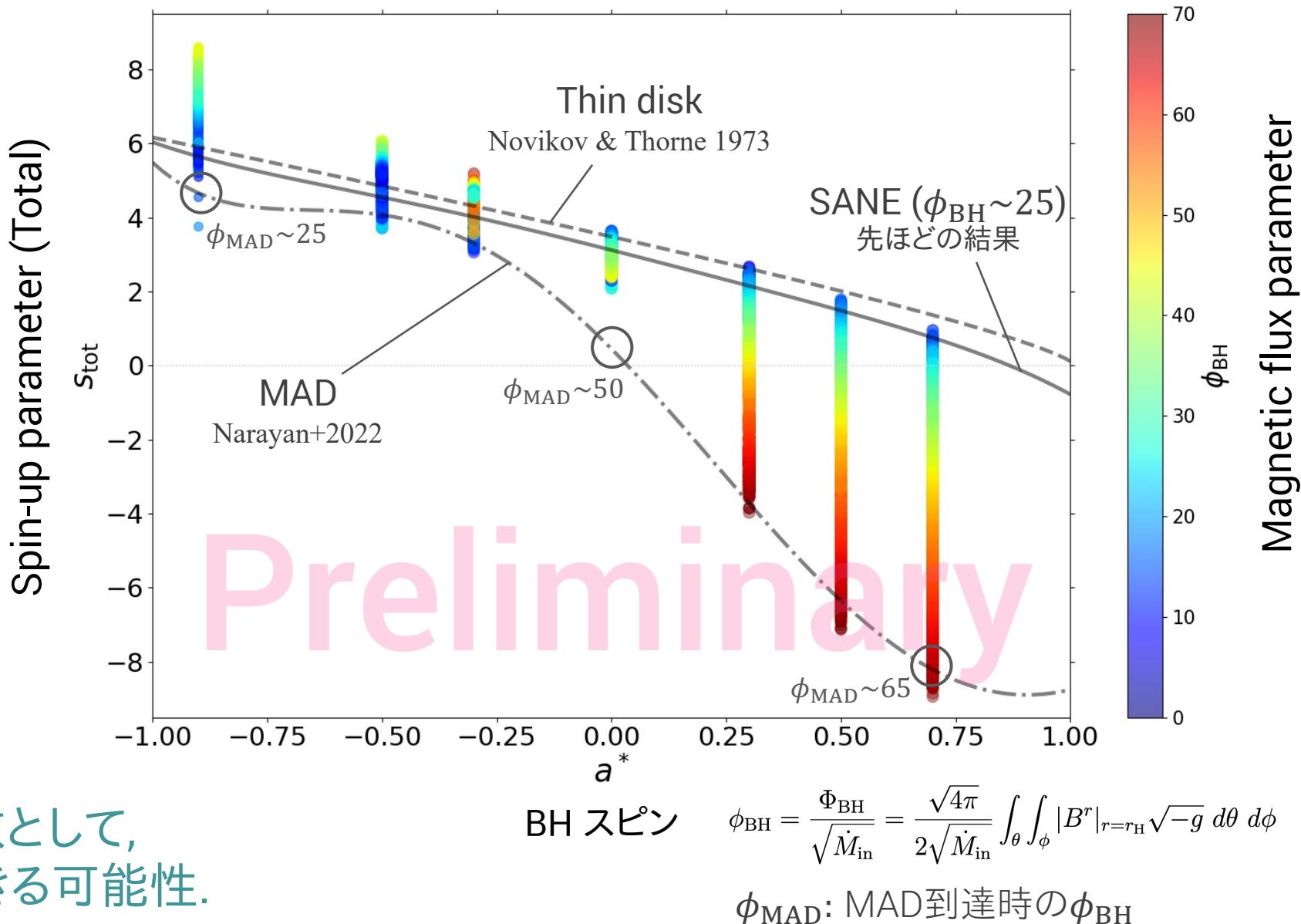
- 十分長い時間SANEを経験
 - 短期間SANEを経験
(初期スピン:高)
 - 短期間SANEを絏験 (初期スピン:低)
 - 比較的長い時間SANEを絏験
(初期スピン:高)
- $\sim 10^5 \text{ yr}$
- 逆回転

BHスピンと円盤状態(磁場強度・質量降着率)がわかれば
BH進化に関する理論的解釈をより深めることができる。

Future work: Spin-up parameterの磁場強度依存性

2次元 GRRMHD 計算

- 弱磁場状態から
強磁場状態まで包括的に計算.
- $\dot{M}_{\text{in}} \sim 100L_{\text{Edd}}/c^2$
- グリッド数:
 $(N_r, N_\theta, N_\phi) = (300, 300, 1)$
- 初期プラズマベータ
 $\beta_{\text{ini}} = 50$
- $t_{\text{max}} = 40,000t_{\text{g.}}$



Magnetic flux parameter
(円盤磁場強度の指標)の関数として,
Spin-up parameterを評価できる可能性.

まとめ

Kerr-BHを持つ超臨界SANE降着円盤の2次元回転軸対称 GRRMHDシミュレーションを行い、エネルギー解放機構および BHスピンの進化の可能性について調査を行った。

	高回転モデル	低回転モデル	スpinの進化可能性について
系から解放される 主なエネルギー	磁気エネルギー	輻射エネルギー	スpinの平衡値 $a_{\text{eq}}^* = 0.85$ MAD や Thin diskと異なる
エネルギー源	BZ機構	降着円盤	主な要因 質量降着による 角運動量の獲得
ULX天体との比較	IC342 X-1	Holmberg II X-1	スpinアップパラメータの議論は BH進化にも応用することができる。

Future work

- スpinアップパラメータの磁束依存性(円盤状態との関係)の理解.
- 3次元 long-term GRRMHD計算.