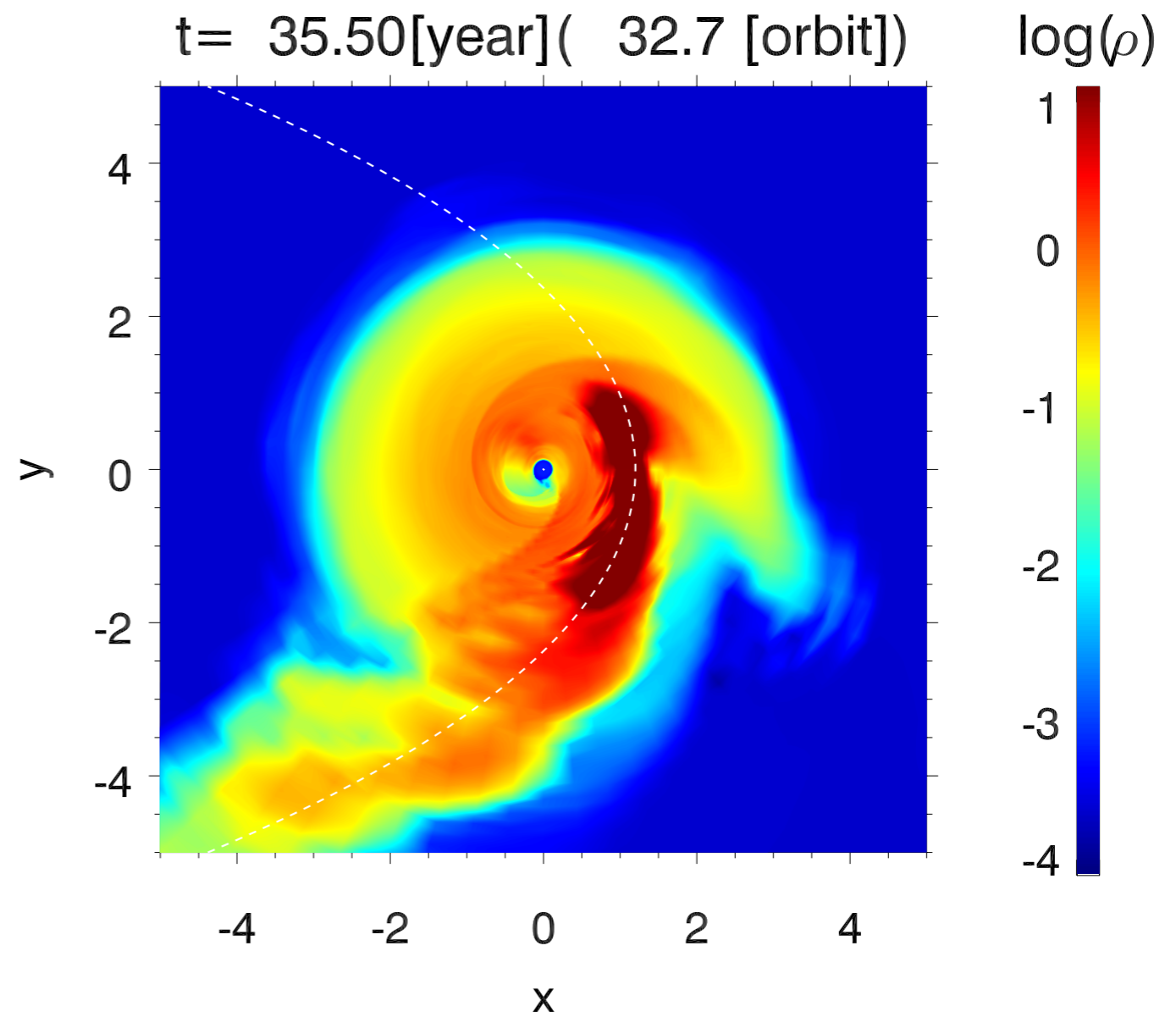


# 高温降着流を通過するガス雲の 3次元MHDシミュレーション

川島 朋尚 (国立天文台)  
松元亮治 (千葉大)

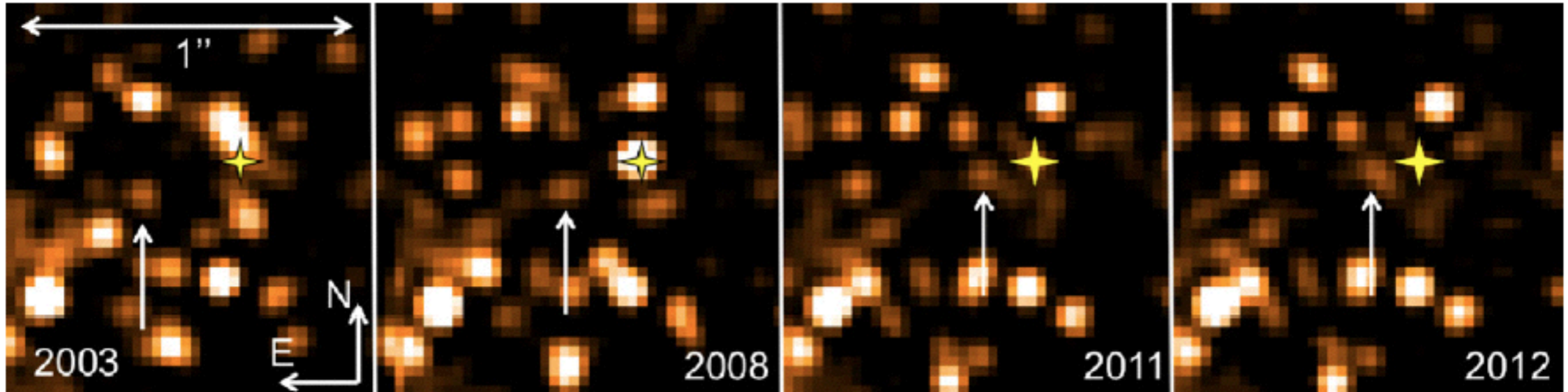
2014年10月4日「第24回 ブラック  
ホール地平平面勉強会」研究会@山口



# アウトライン

- 1) ガス雲G2について
- 2) 銀河中心の高温降着流とガス雲G2の相互作用の3次元MHDシミュレーション
- 3) 輻射冷却込みのシミュレーション

# 銀河中心に接近するガス雲G2



Observation of L' band (Gillessen et al. 2013)

- Gillessen et al. (2012) で銀河中心に接近するガス雲G2が報告された。
- G2の質量は3  $M_{\text{earth}}$ で半径は $\sim 100\text{AU}$ と見積もられた。Sinfoniによる Br- $\gamma$  lineの観測から超大質量ブラックホール(SMBH)から2400シュバルツシルト半径に位置する近点を2014.25に通過すると見積もられた(Gillessen et al. 2013)。
- G2は降着流の降着率を上昇させ、その結果フレアが観測される可能性があり、多くの関心を集めてきた。

# G2の正体は？

- 広がったガス雲説と、windを伴う原始星(or Tタウリ星)説がある。
- 今回われわれは、前者を仮定。

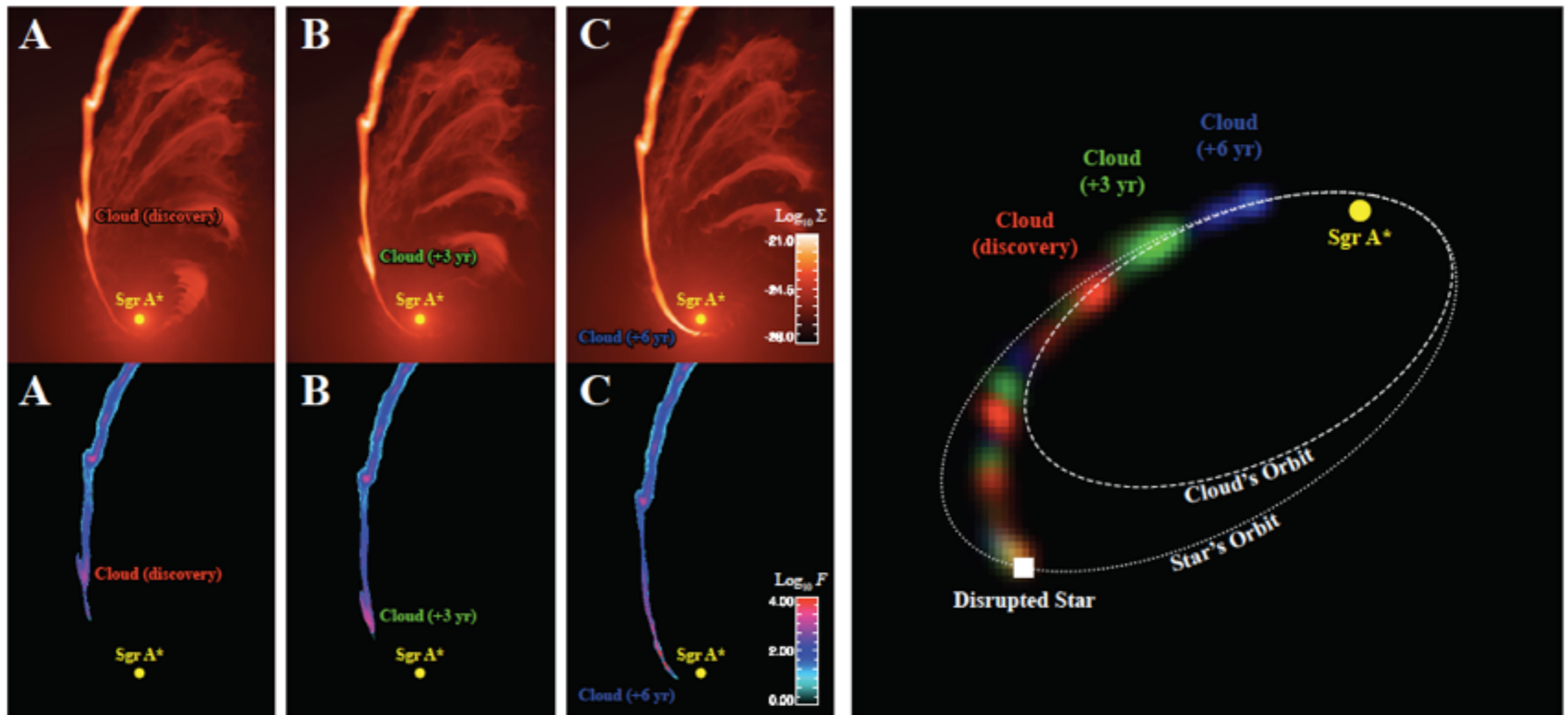


FIG. 1. — Snapshots from a hydrodynamical simulation demonstrating the dynamics of a returning stream produced by the disruption of a giant star. In the left six panels (labeled A, B, and C) we show a time-sequence of the returning gas, with the surface density  $\Sigma$  shown in the top panels and total line-cooling flux  $F$  shown in the bottom panels. Labeled in each panel is a prominent cloud that forms within the stream, falling onto the black hole over a period of  $\sim 6$  yr. In the right panel we show  $F_{\text{Br}\gamma}$ , with the simulation volume rotated such that its projection matches the best-fitting orientation for the G2 cloud as found by our MLA, smoothed over 100 AU (33 AU per pixel). In addition to the lead cloud, there are a trail of clouds that follow it, but not on a path identical to leading cloud.

# これまでのG2(ガス雲仮説)の数値シミュレーション例

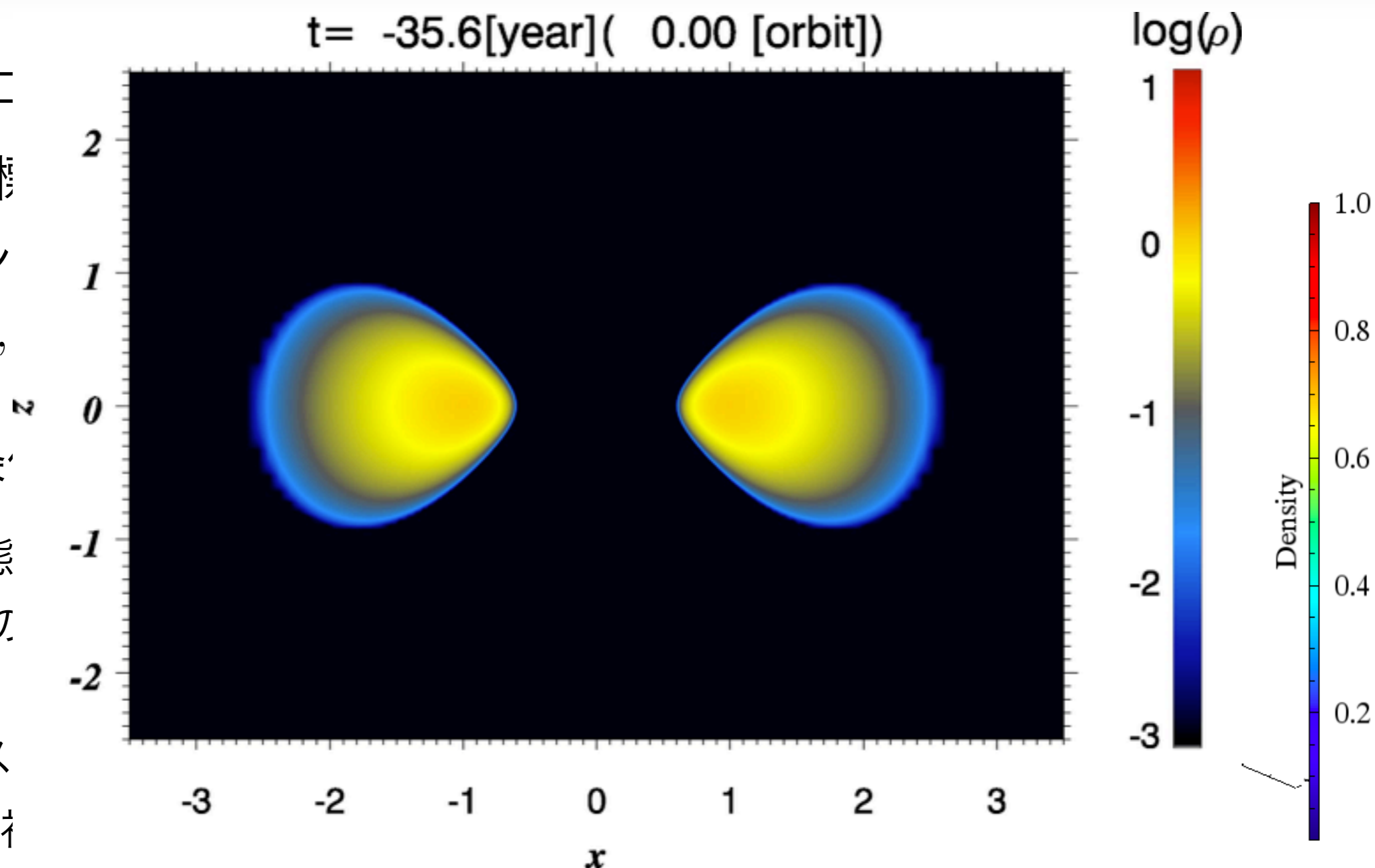
	HD/MHD	dimension	wi accretion flow and outflow?	wi radiative cooling?
Burkert et al. (2012)	HD	2	No	No
Anninos et al. (2012)	HD	3	No	No
Saitoh et al. (2013)	HD(SPH)	3	No	Yes
Sadowski et al. (2013)	MHD	3	Yes	No
Abarca et al. (2013, airXiv)	HD	3	(partly) Yes	No

- Sgr A\*には高温降着流が存在することがこれまでの観測で示されており、Chandraによる鉄輝線の観測ではアウトフローの存在も示唆されている(Wang et al. 2013)。
- G2が接近したときに何が起こるかの予測や、また観測結果を解釈するためには降着流とアウトフローを考慮に入れたG2の計算が必要不可欠。
- Sadowski et al. (2013)は唯一3D-MHDシミュレーションを実施しているがG2が接近した際のバウ衝撃波にのみ注目しており、その後の円盤進化については取り扱っていなかった。

# シミュレーション・セットアップ

## (1) Sgr A\*への高温降着流

- CAN+二
- 円筒座標
- メッシ  
( $N_{\varpi}$ ,
- 初期条  
- 平衡状態  
は非回転の  
に設置。  
- トーラス  
(コロナは



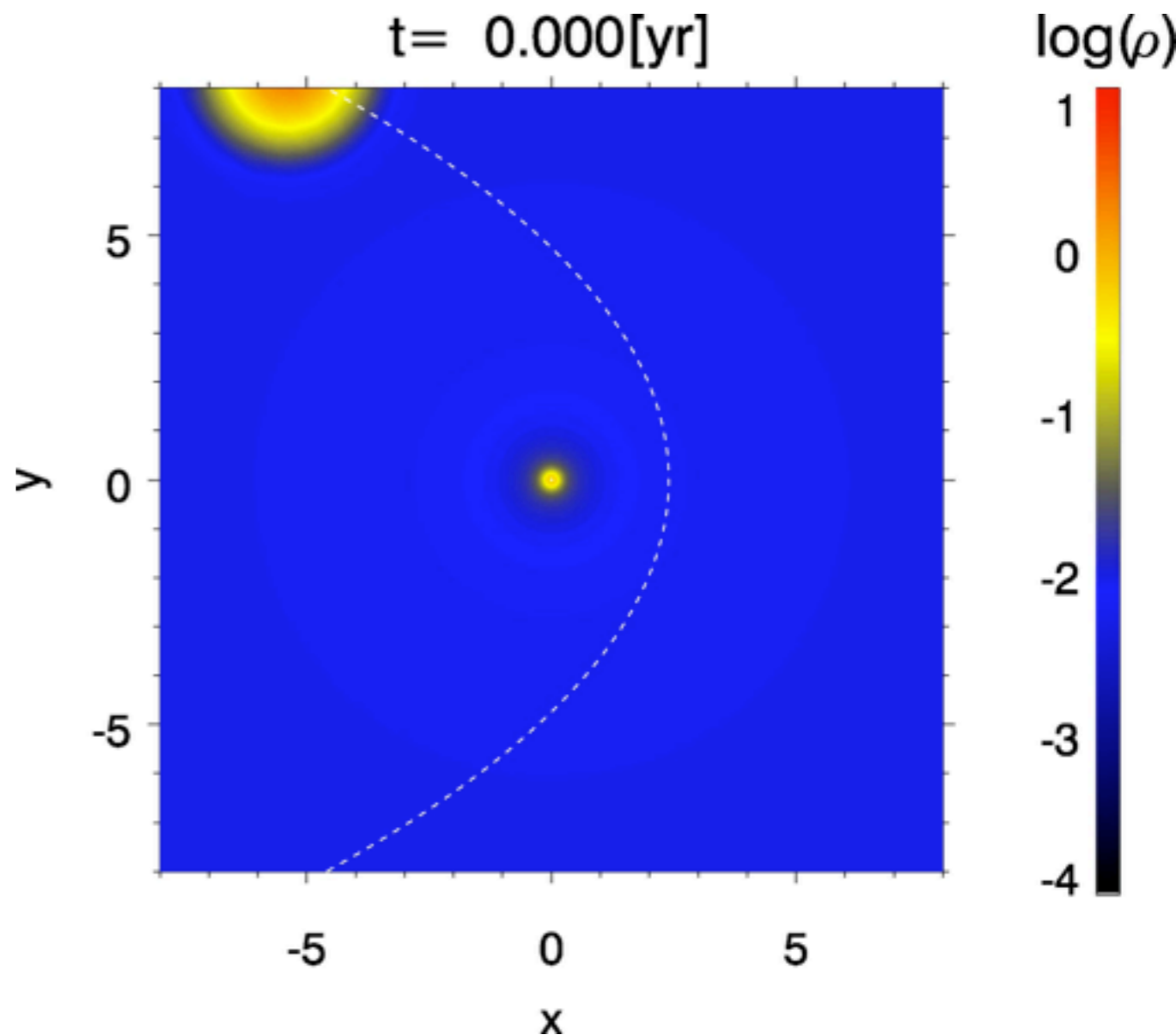
G2はMRIが十分成長し、降着流が形成されてから設置。

(具体的にはトーラスの圧力最大位置 (トーラス中心)で30回転した後に設置.)

# シミュレーション・セットアップ

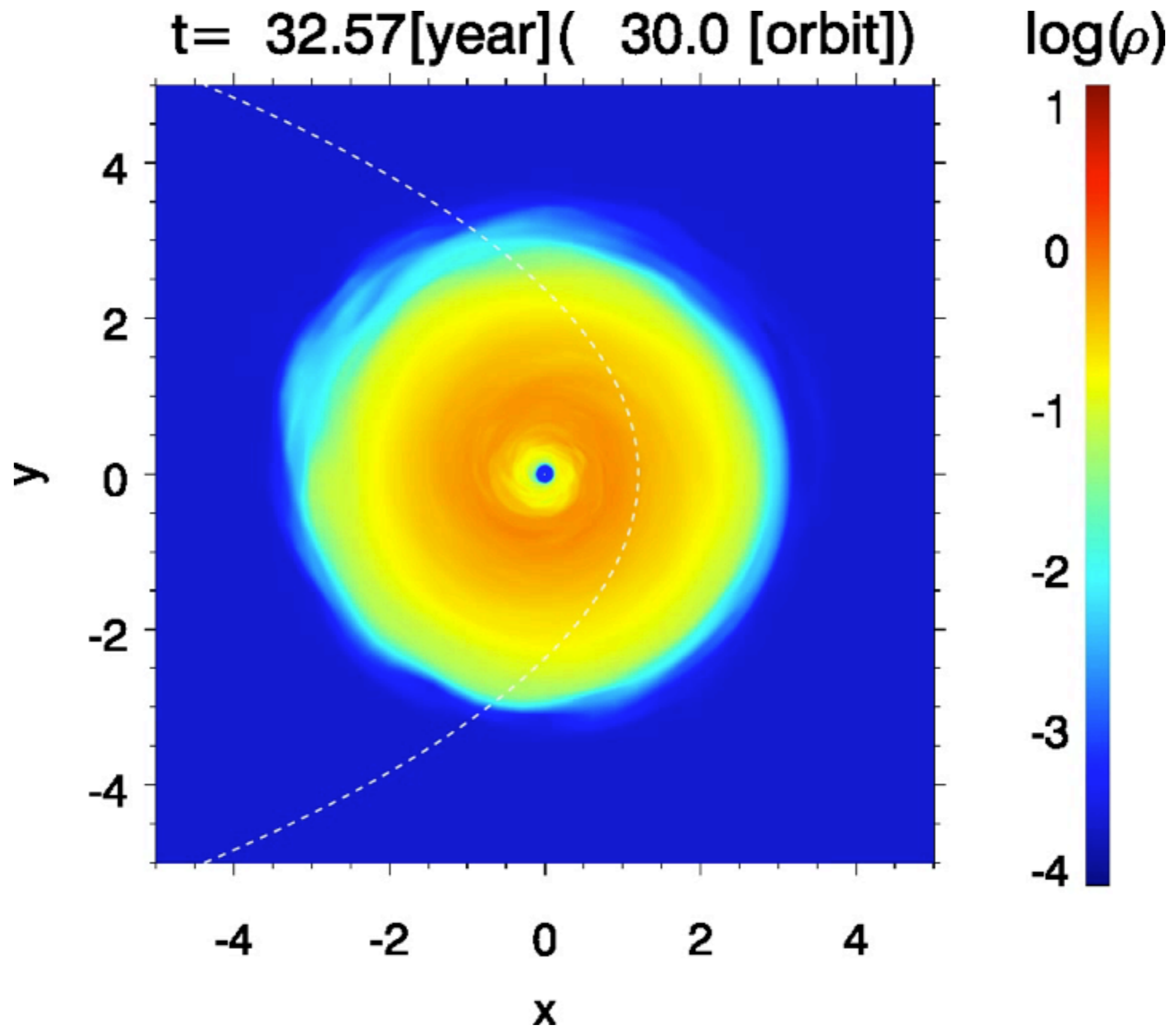
## (2) G2

- G2を初期にSMBHから  $20,000R_s$ 離れた位置に設置.
- G2の質量：  $3M_{\text{earth}}$ .
- G2の密度はガウス分布に従うように空間分布させた ( $\text{FWHM}=3 \times 10^{15}$  cm).
- 速度は G2内部で一定と仮定。
- 圧力と磁場はバックグラウンドのプラズマと同じ値を設定。
- G2軌道面と円盤赤道面の成す軌道傾斜角を  $i$  をパラメーターとした(例： $i=0$  はG2の軌道は円盤赤道面上)。



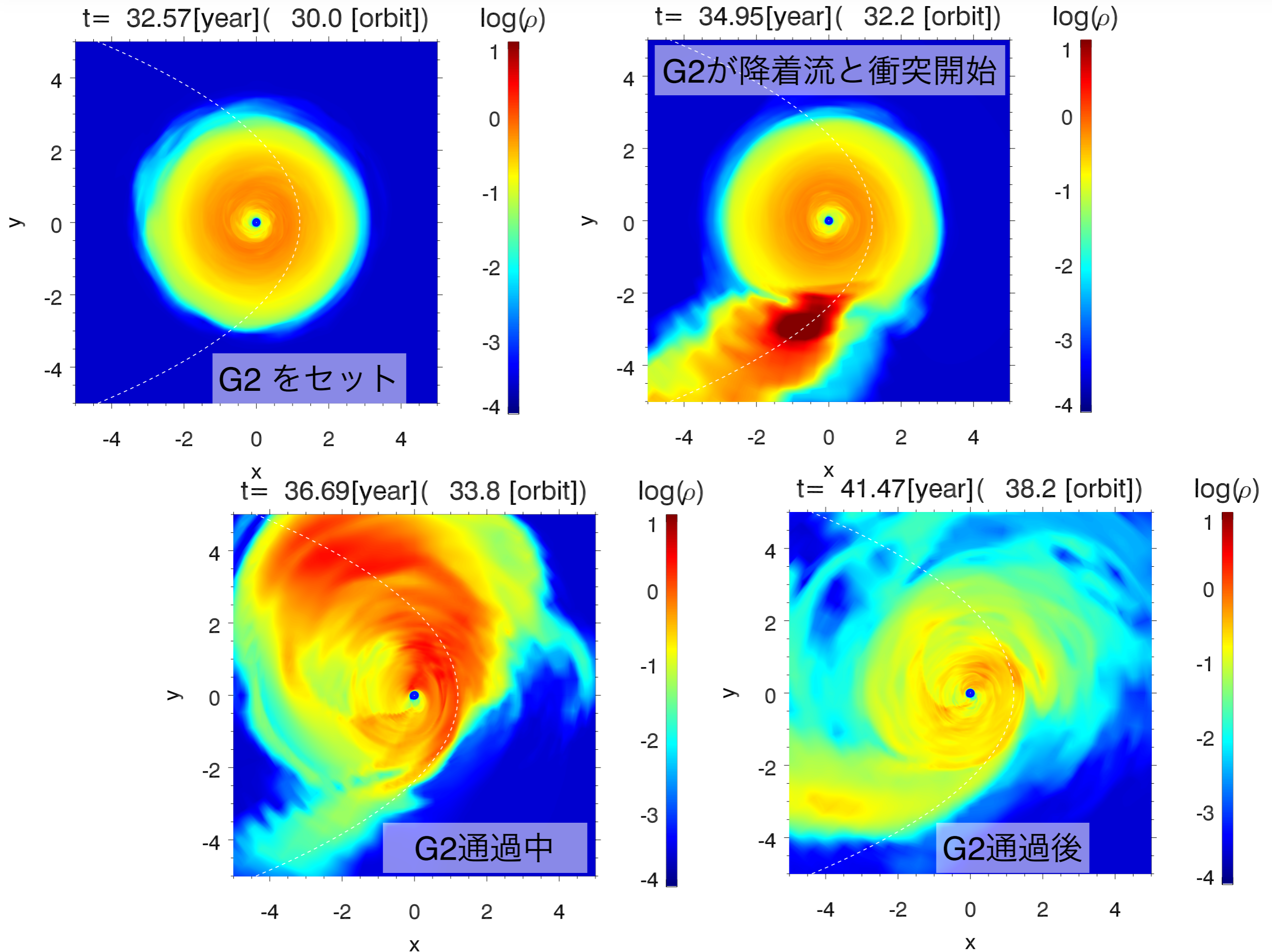
# 密度分布の時間発展

長さスケール：2,000rs

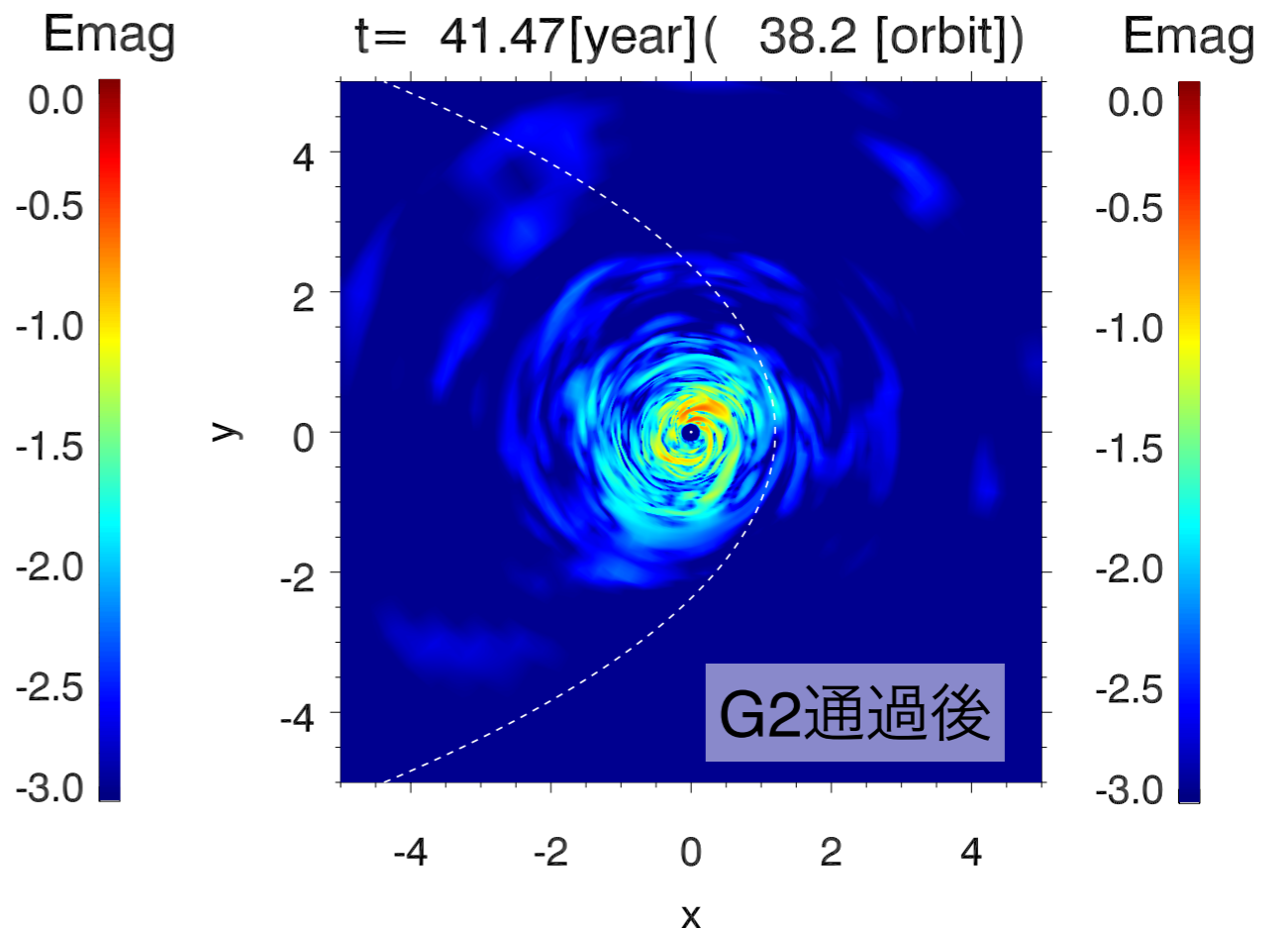
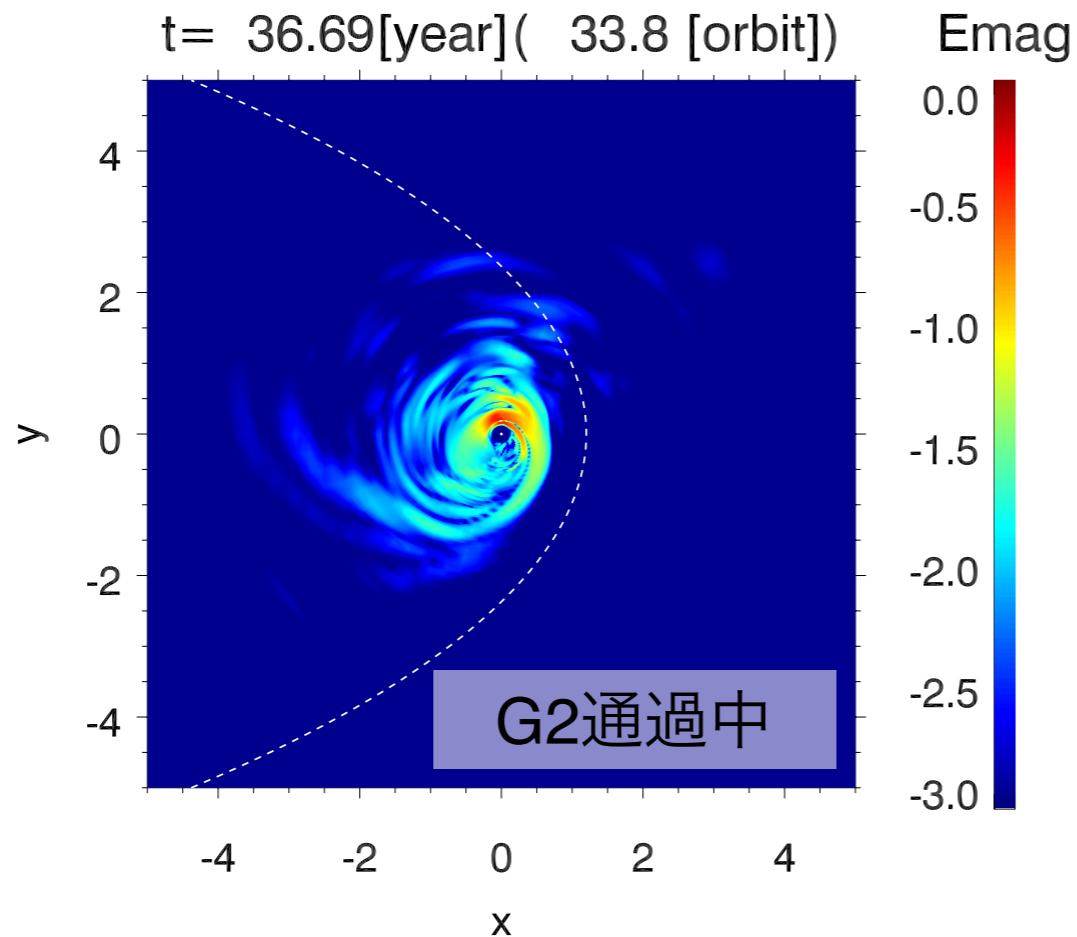
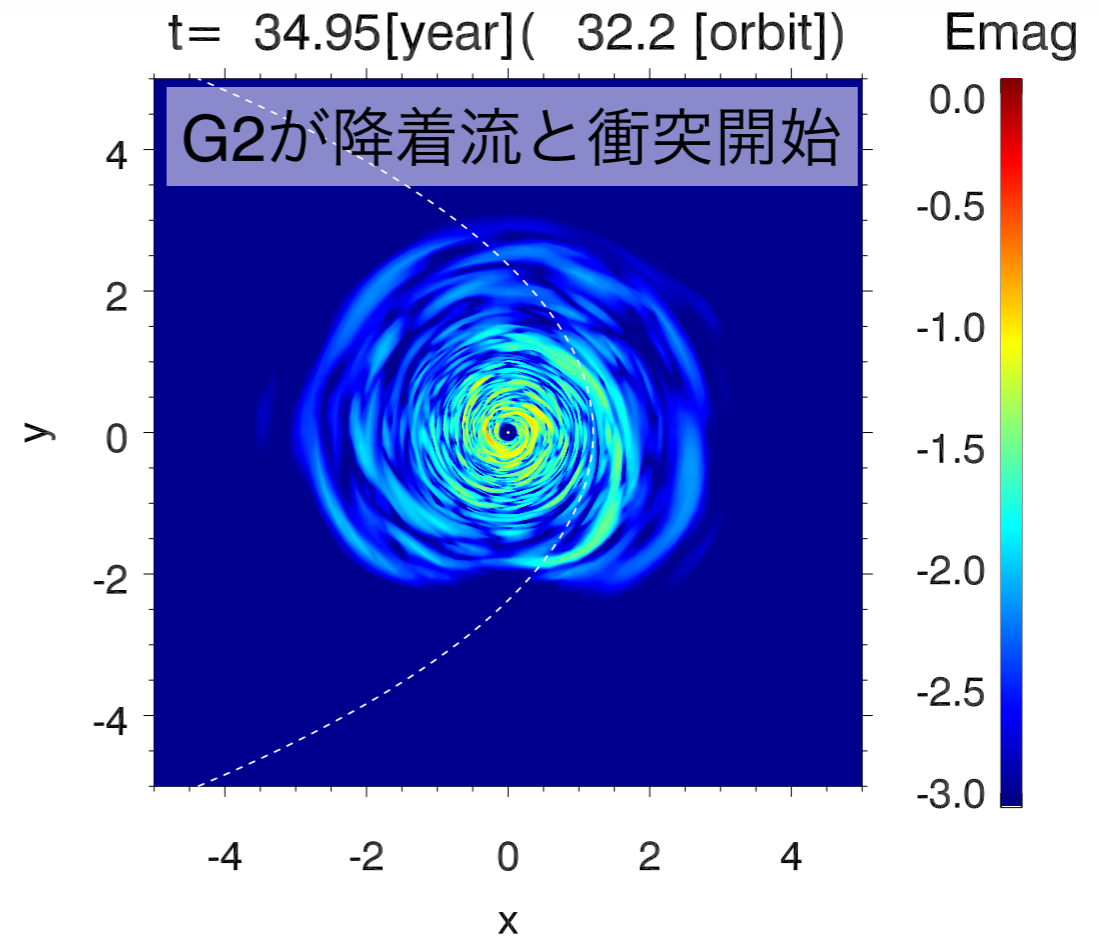
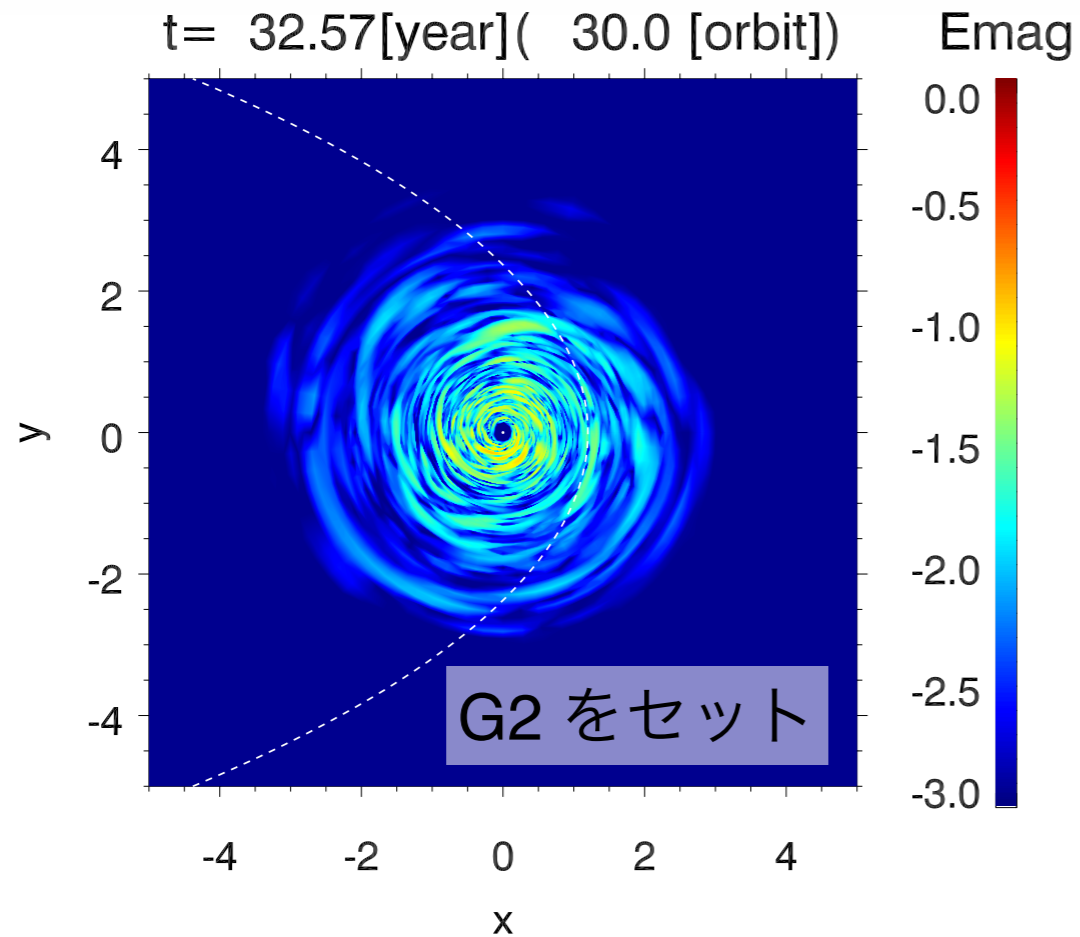


# 密度の時間発展(スナップショット)

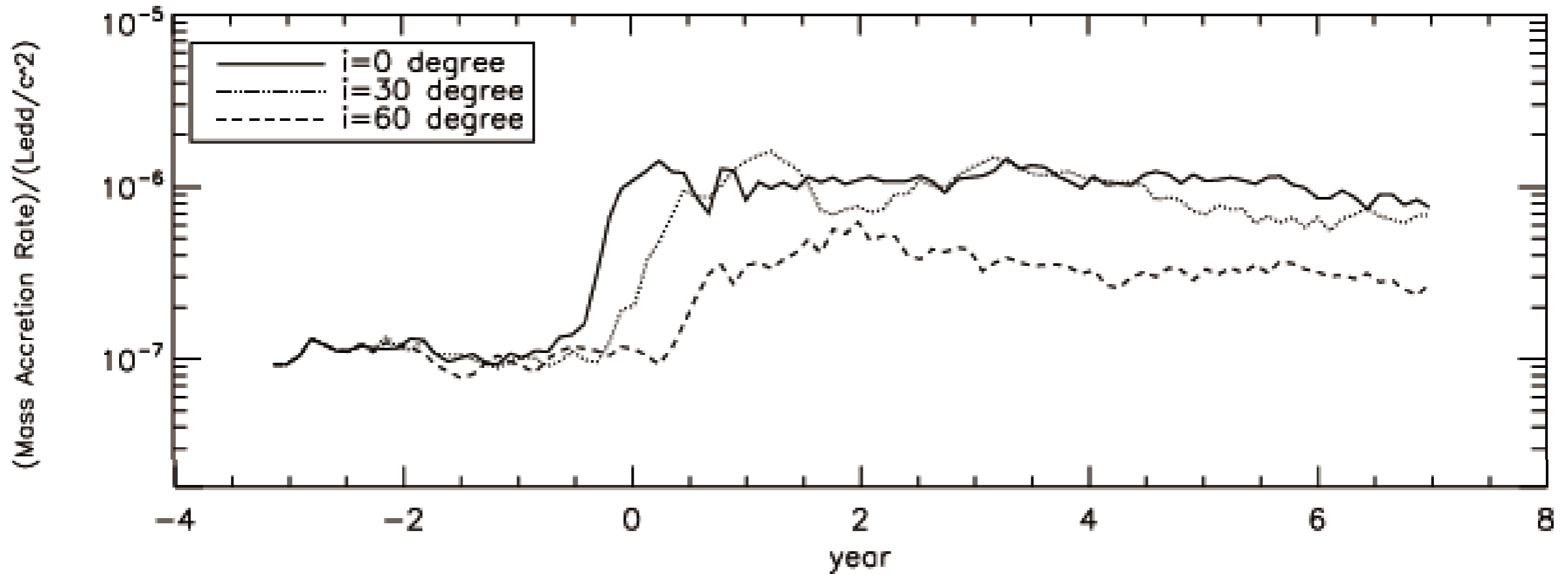
unit of length: 2,000rs



# 磁気エネルギー密度

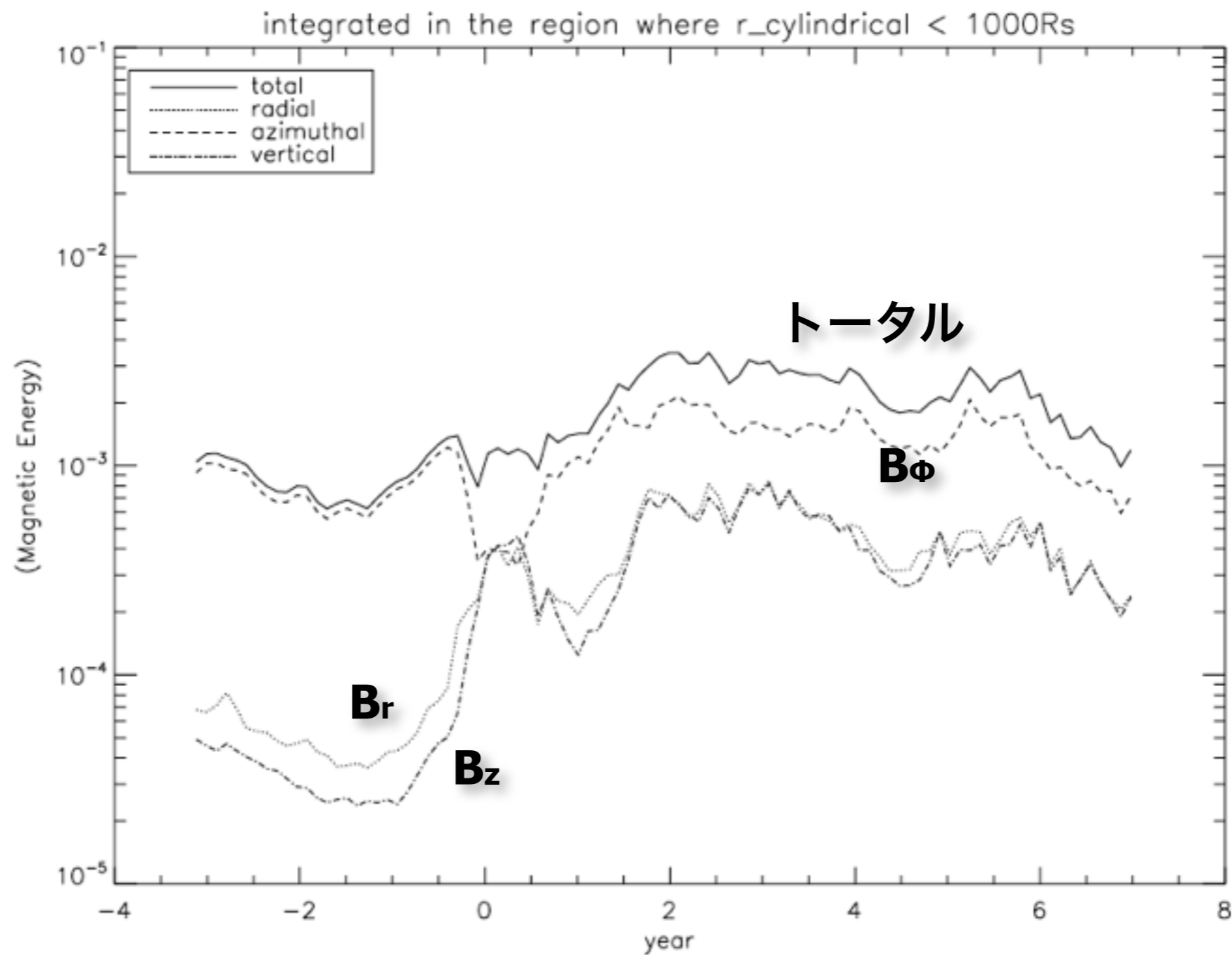


# Evolution of Mdot at 300Rs



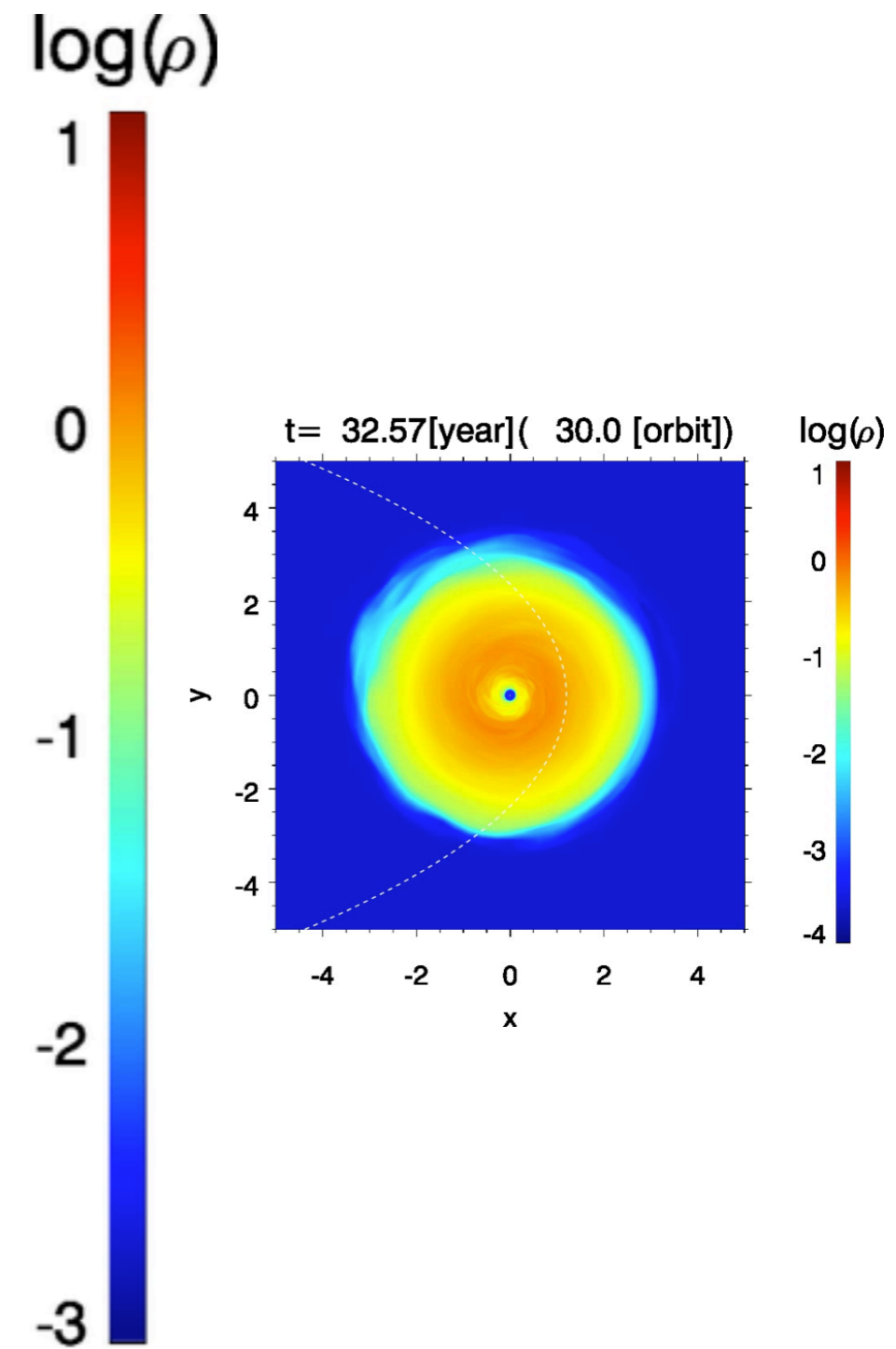
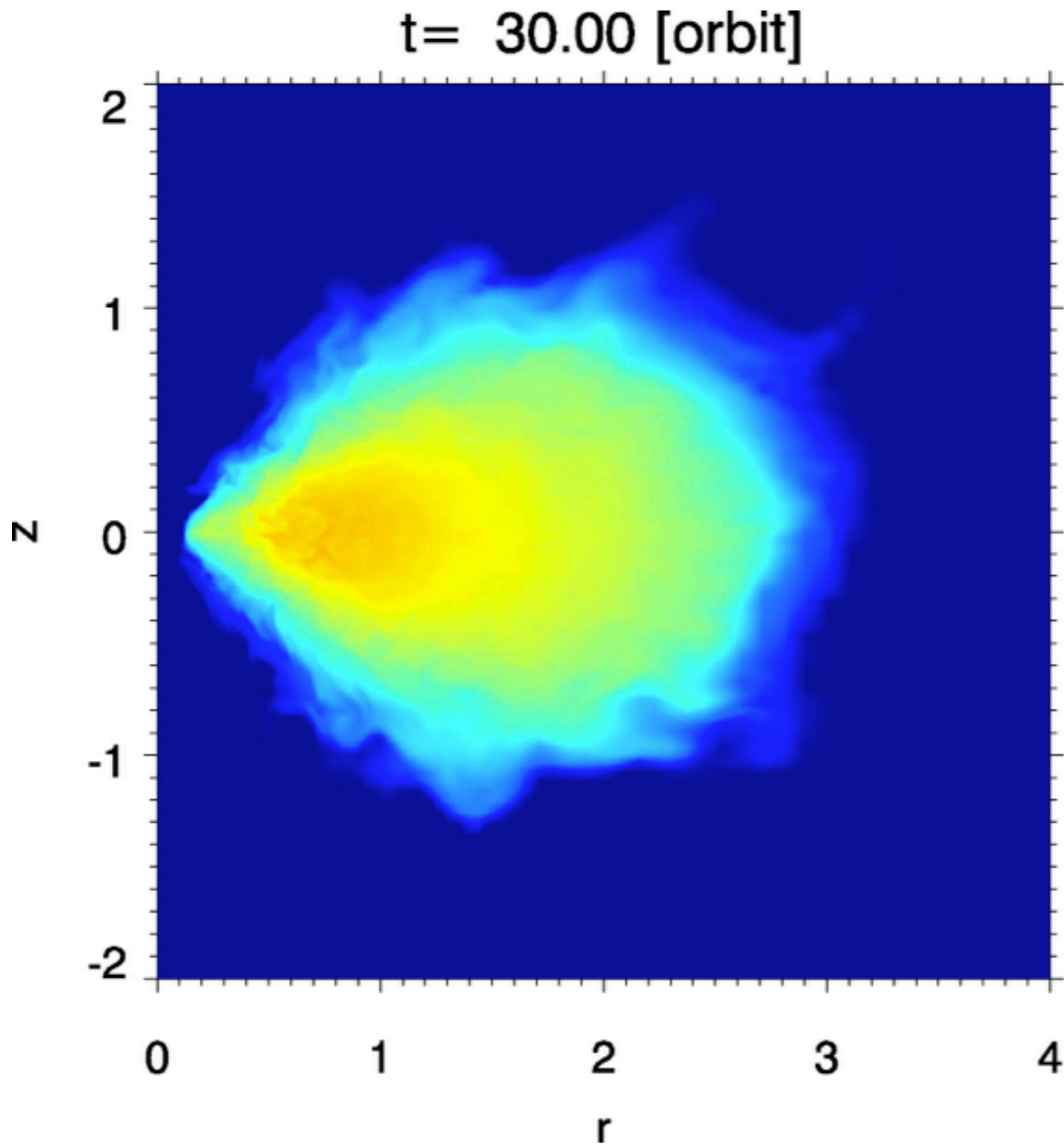
- inclinationが大きくなると、ガス雲が降着流と相互作用する時期が遅れるため降着率が上昇する時期は遅れる(半年~1年遅れるかも)

# 磁気エネルギーの時間進化(1000Rs以内)



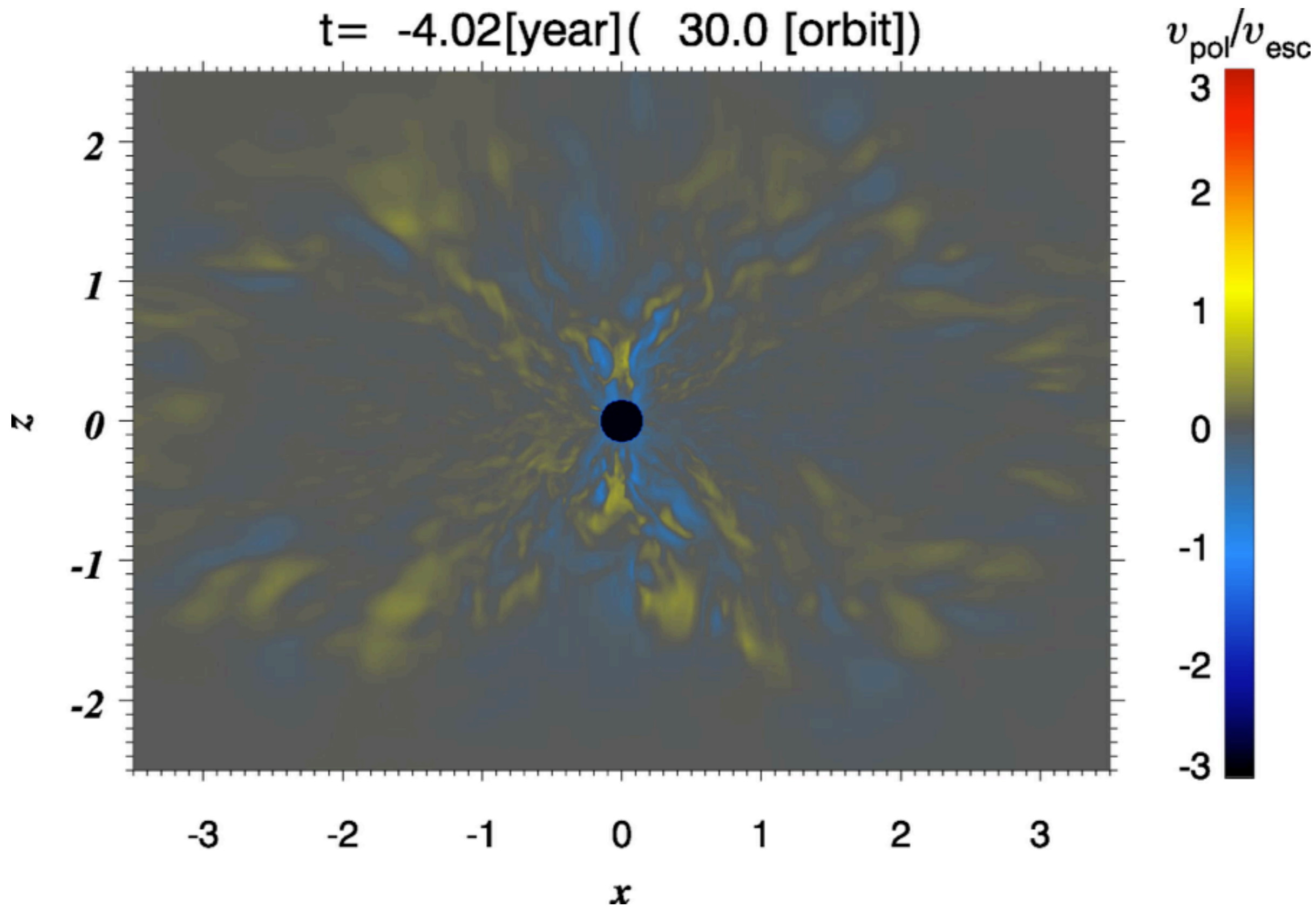
- およそ1000Rsでのdynamoの時間スケールで磁場増幅
- 近点通過から2年後ぐらいでシンクロトロンでファクター一倍増光する可能性がある。

# ジェットが噴出 (駆動機構は調査中)

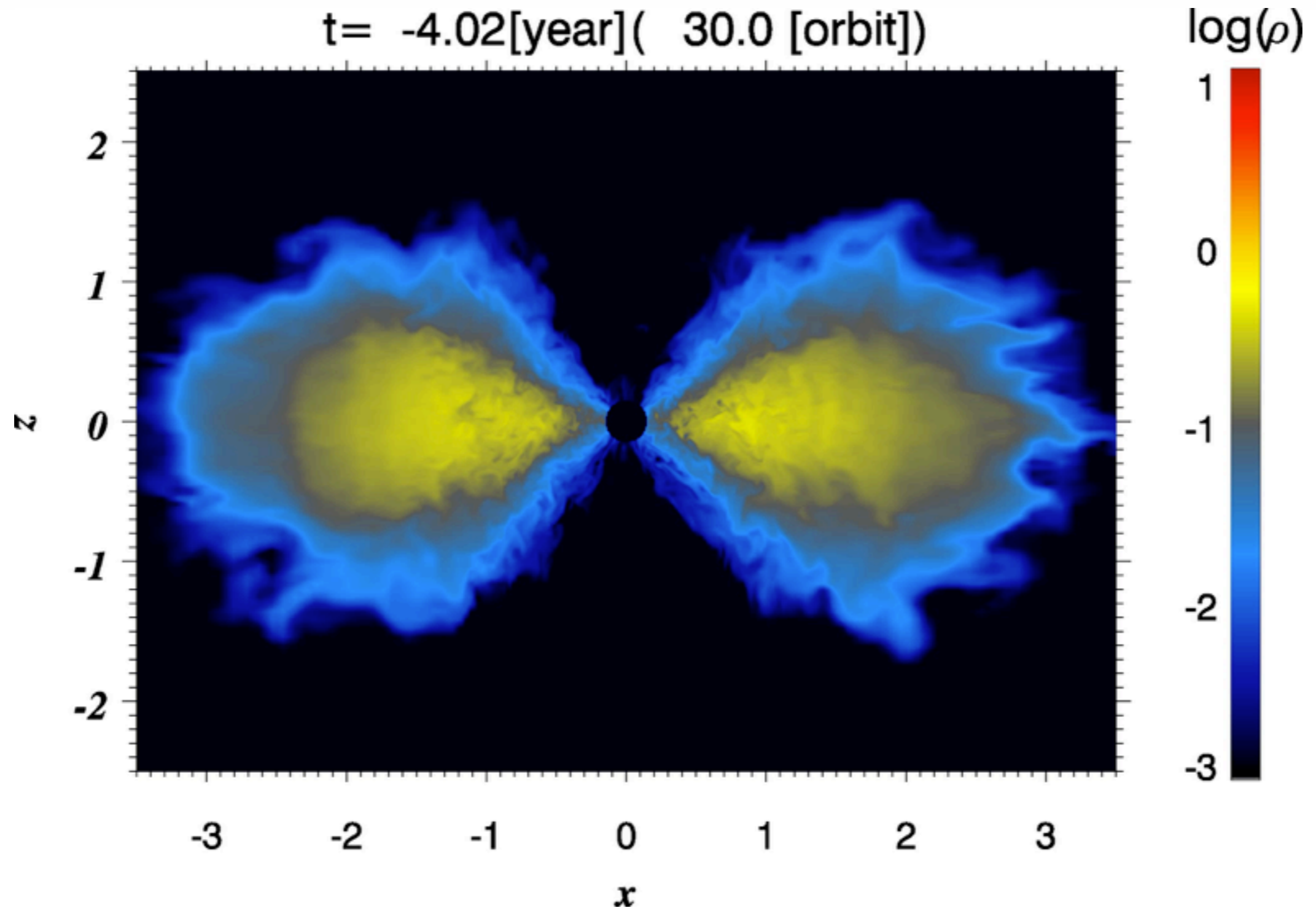


# 動径方向速度 / 脱出速度

$t = -4.02[\text{year}]$  ( 30.0 [orbit])



# $i=60^\circ$ の場合、円盤は傾く



- ガス雲の質量 ~ 降着流の質量
- 巨大BH降着流の回転軸は外的な要因で乱されているかも？

# これまでのG2(ガス雲仮説)の主な数値シミュレーション

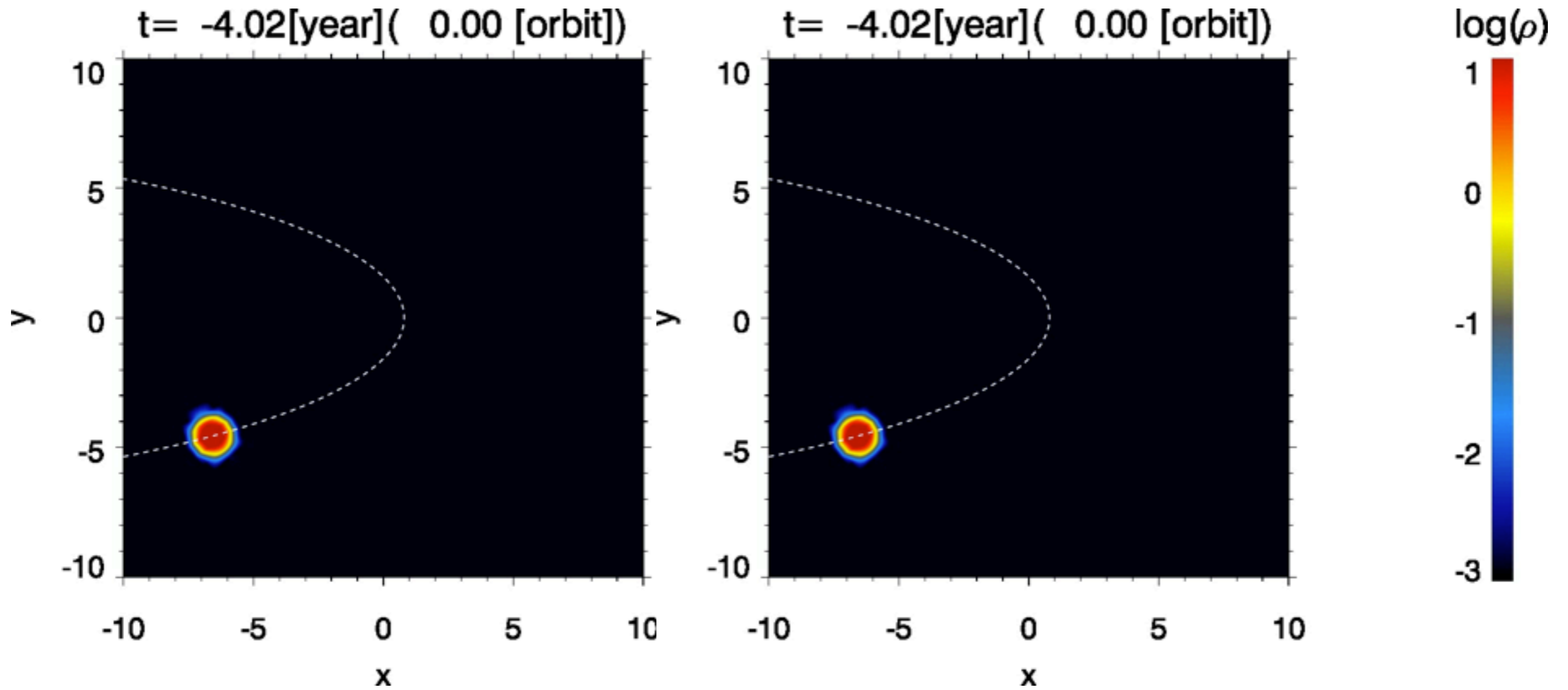
	HD/MHD	dimension	wi accretion flow and outflow?	with radiative cooling?
Burkert et al. (2012)	HD	2	No	No
Anninos et al. (2012)	HD	3	No	No
Saitoh et al. (2013)	HD(SPH)	3	No	Yes
Sadowski et al. (2013)	MHD	3	Yes	No
Abarca et al. (2013, airXiv)	HD	3	(partly) Yes	No

- 輻射冷却込みの円盤シミュレーションはまだ無し。

# 冷却on/off (密度分布)

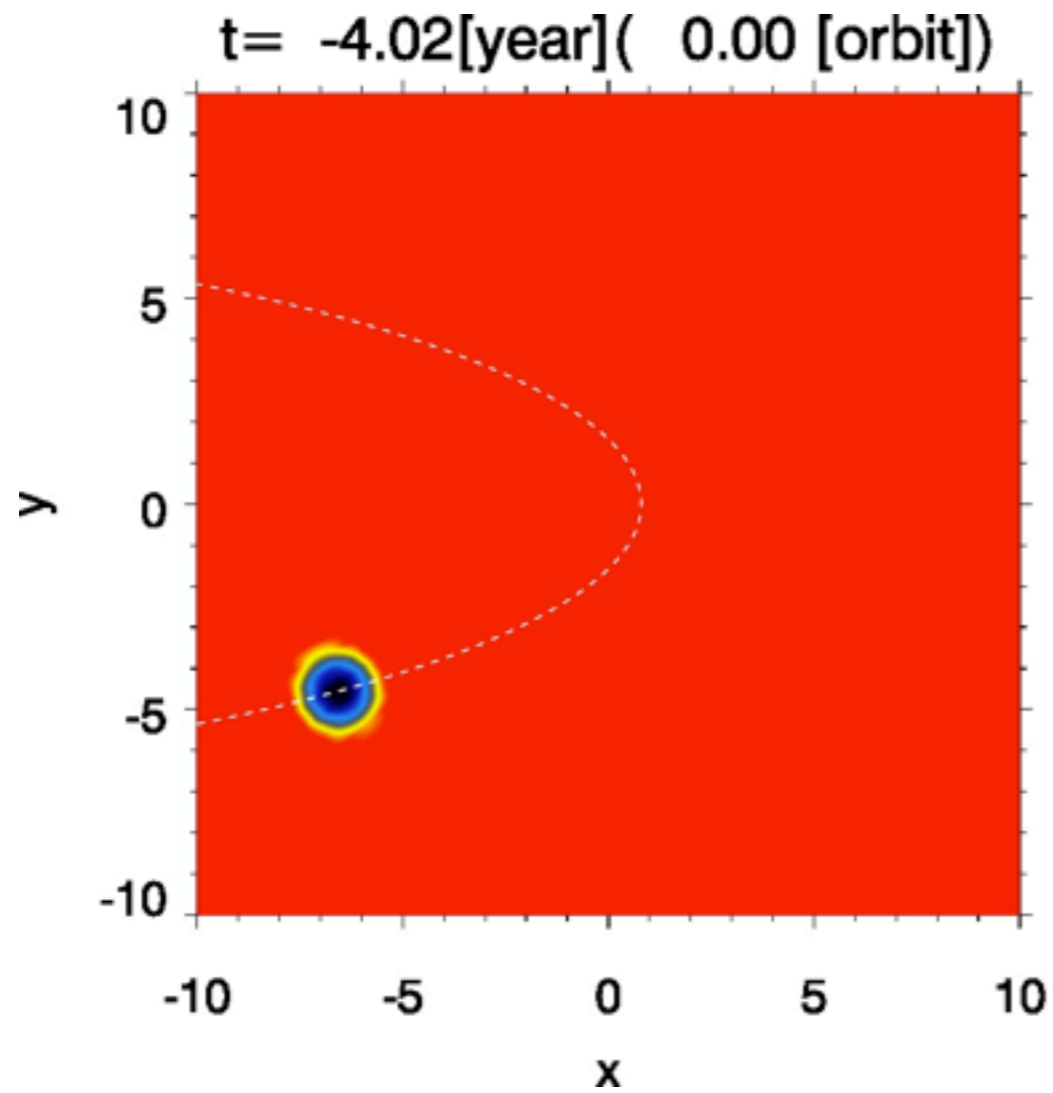
## 輻射冷却ON

## OFF

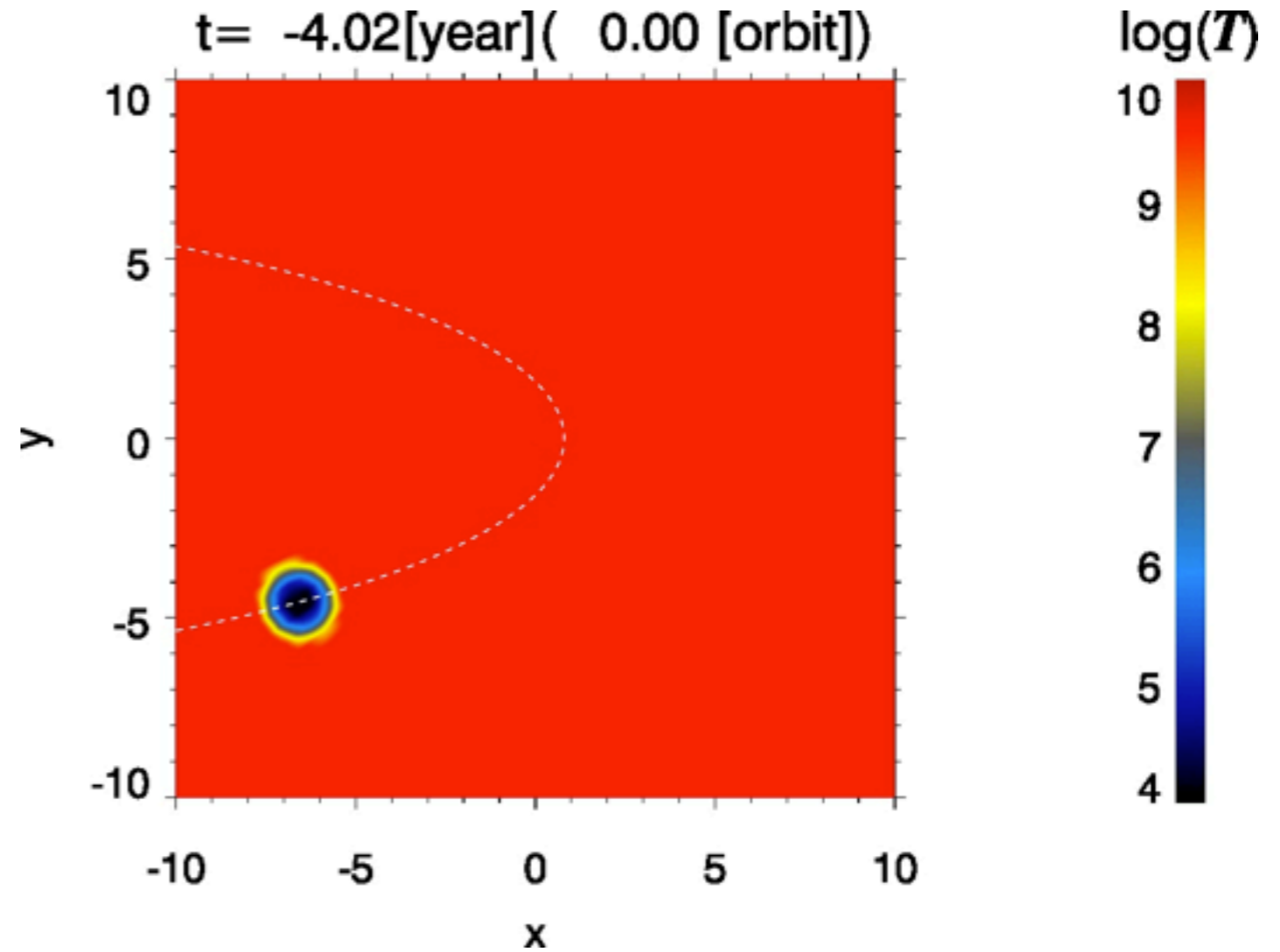


# 冷却on/off (温度分布)

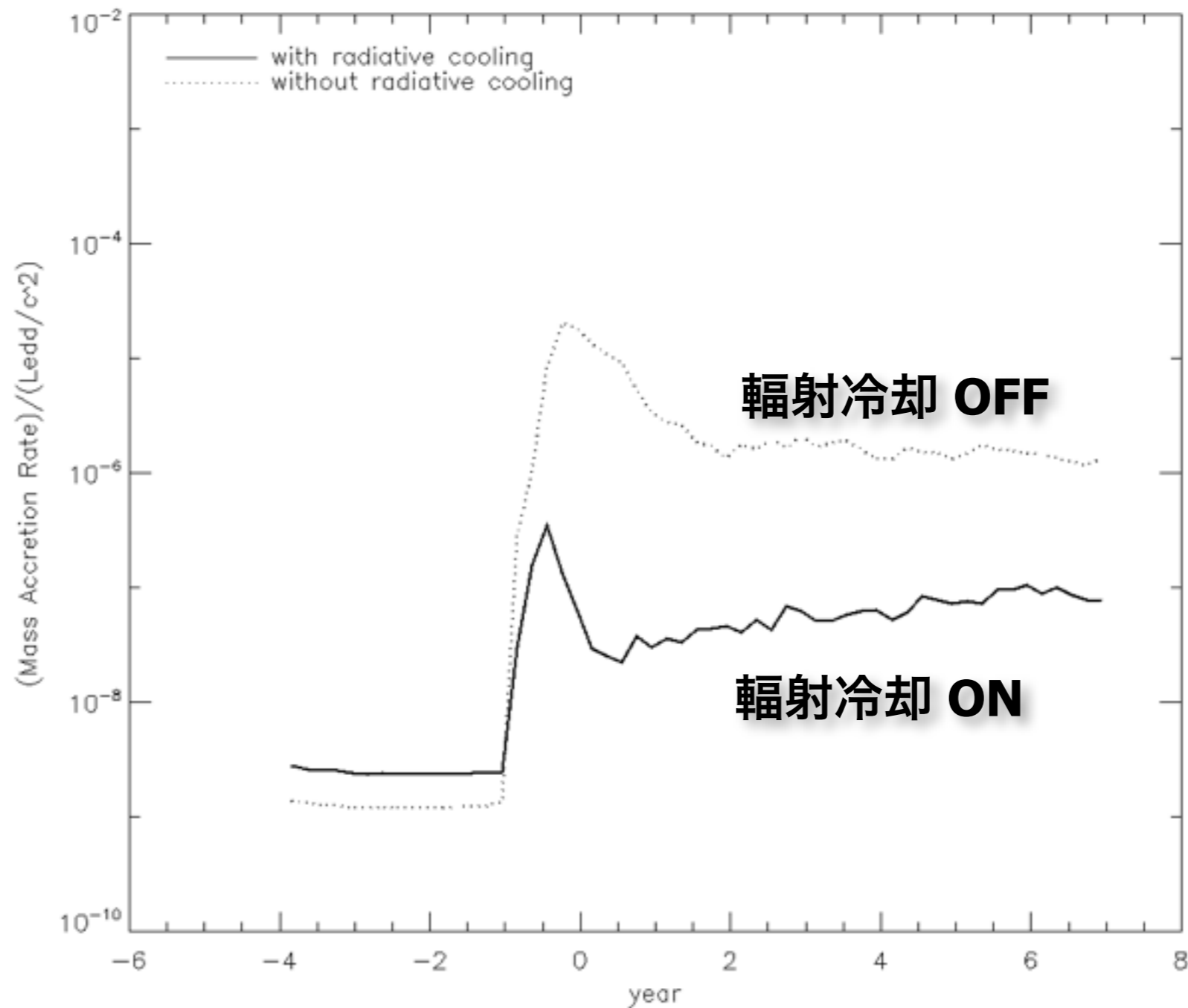
## 輻射冷却ON



## OFF

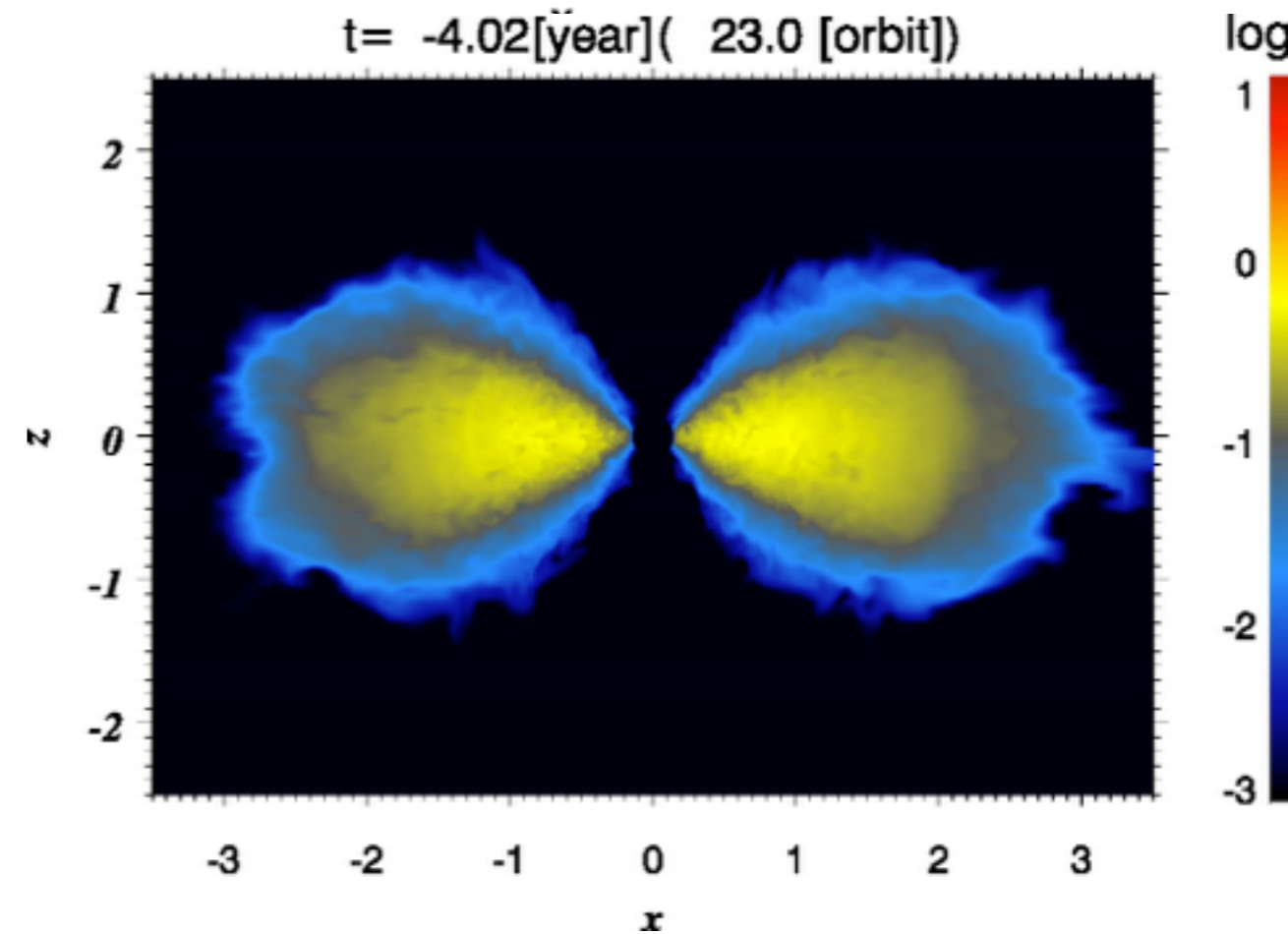
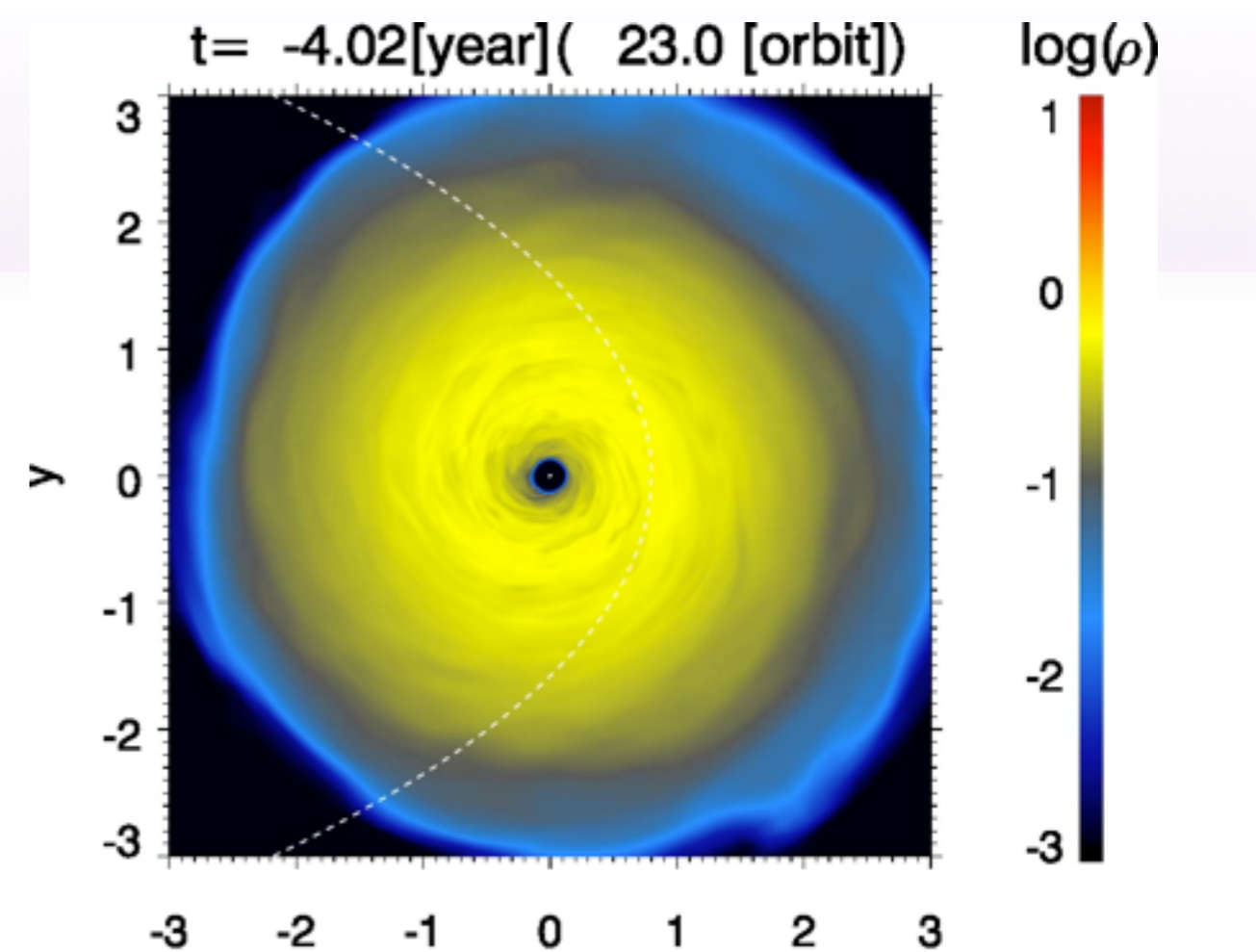
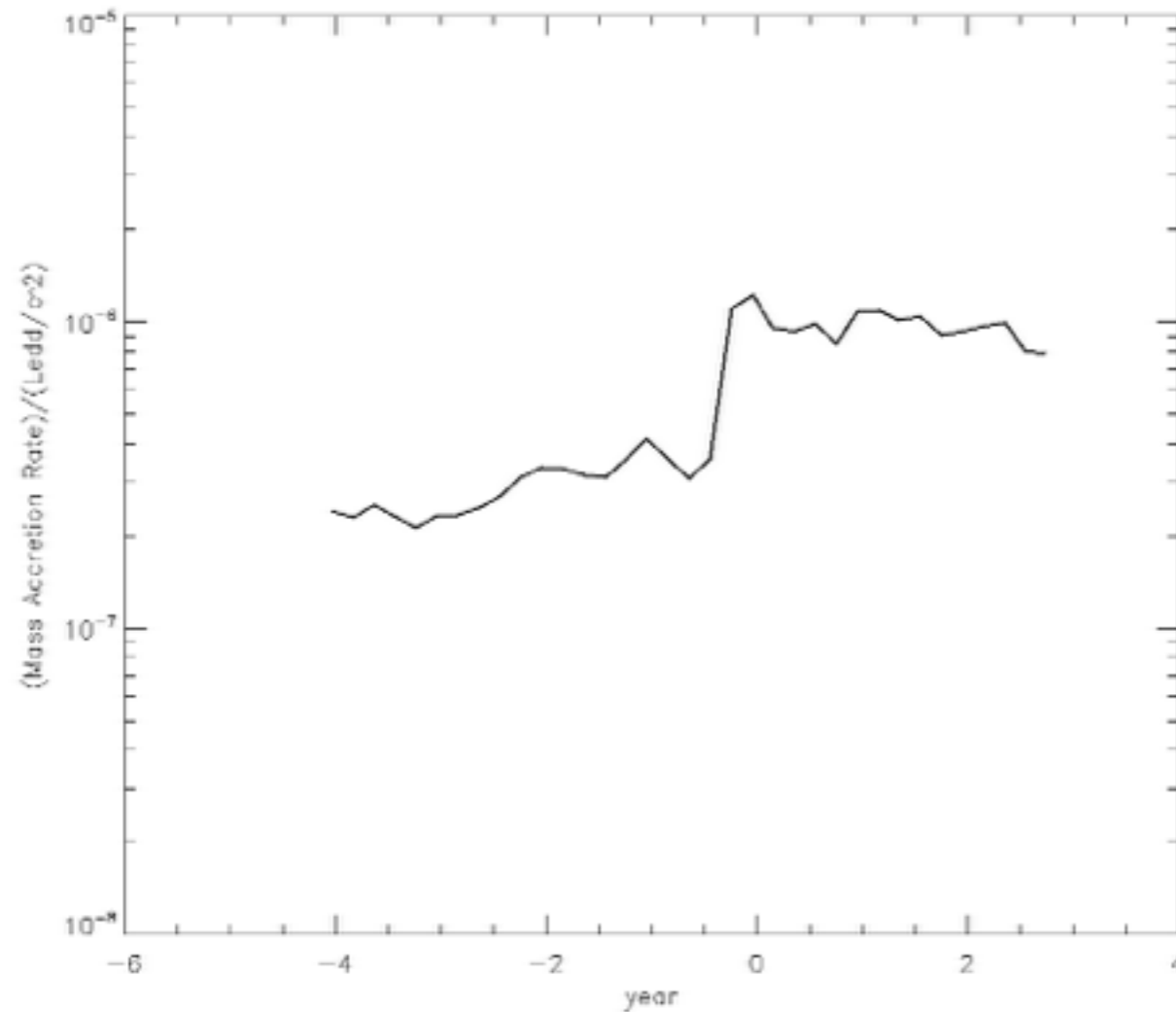


# 降着率 (輻射冷却 ON/OFF)



- 輻射冷却の効果によるガス雲収縮 → 断面積減少して ラム圧減少  
→ 角運動量の輸送率低下により降着率の上昇は冷却なしの場合より抑えられる。(Saitoh et al. 2013 と同様のことが起こった。)

# 円盤との衝突



- 降着率増加は少し抑えられた
- ジェット駆動も抑えられている？

# まとめ

- 高温降着流とG2の相互作用の3次元MHDシミュレーションを実施した。
- G2衝突半径の内側で磁場が増幅した。質量降着率は約10倍増加。Inclinationが増加するほど質量降着率増加の磁気は遅れる。磁場の増幅は2年後ぐらいになるかも。
- 輻射冷却を入れるとガス雲の断面積が減少し、ラム圧を受けにくくなり、降着率の増加の割合はファクター一倍減少した。

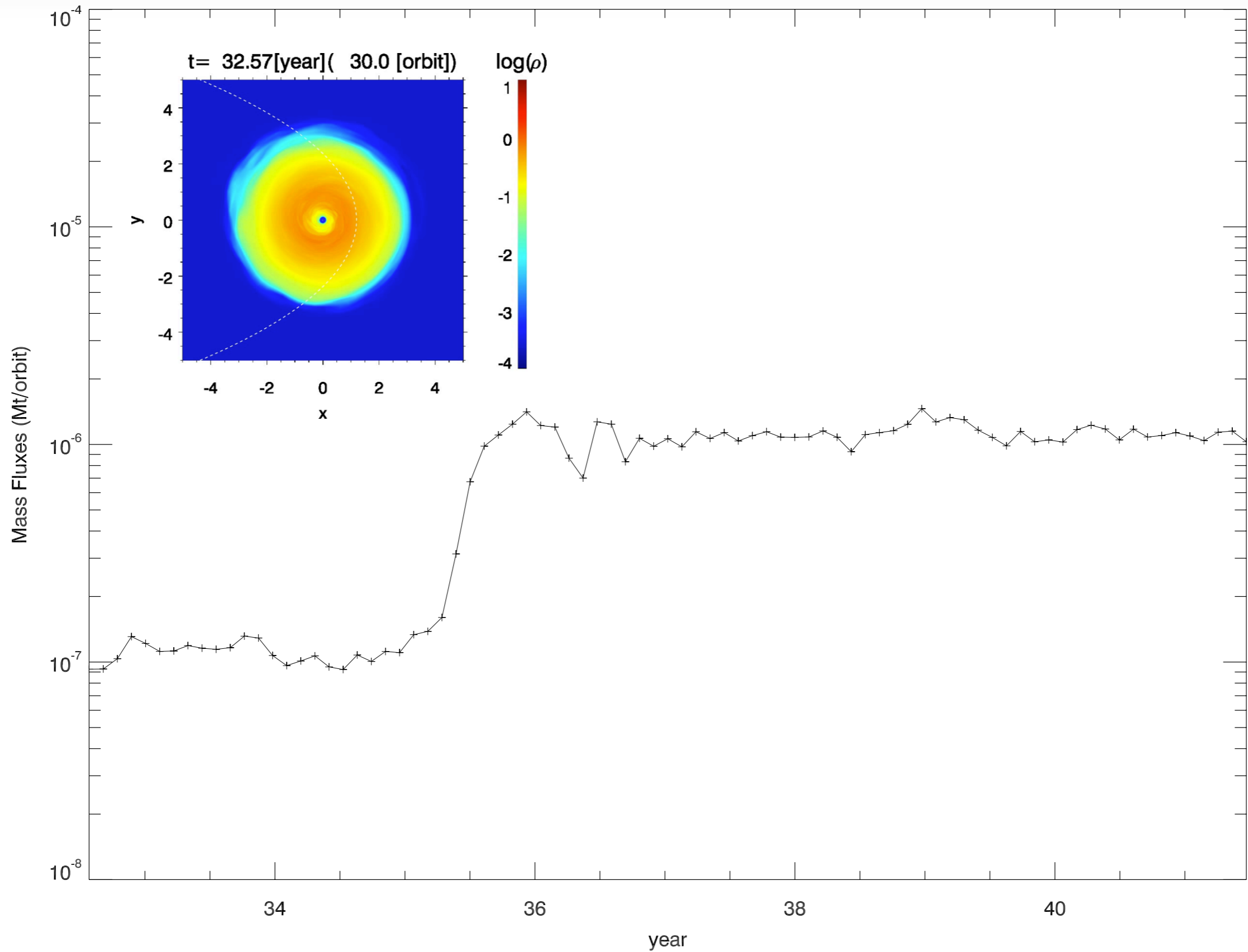
# 今後の課題

- 冷却入りの計算をパラメーターサーベイしたい。さらに熱伝導入りも計算するべき(ダイナミカル時間スケール～熱伝導によるガス雲加熱の時間スケール)のパラメータ・サーベイを実施し、今後の増光可能性を調べる。
- 衝撃波加速で加速粒子が生成され電波で増光することが予言されていた(Narayan et al. 2012)。これは近点通過前から増光することを予言。しかし、実際には明るくなっていない。千葉大の松本洋介さんとの共同研究で、MHDシミュレーション結果をもとにPICシミュレーションを実施し、粒子加速が起こるかを検証していく予定です。

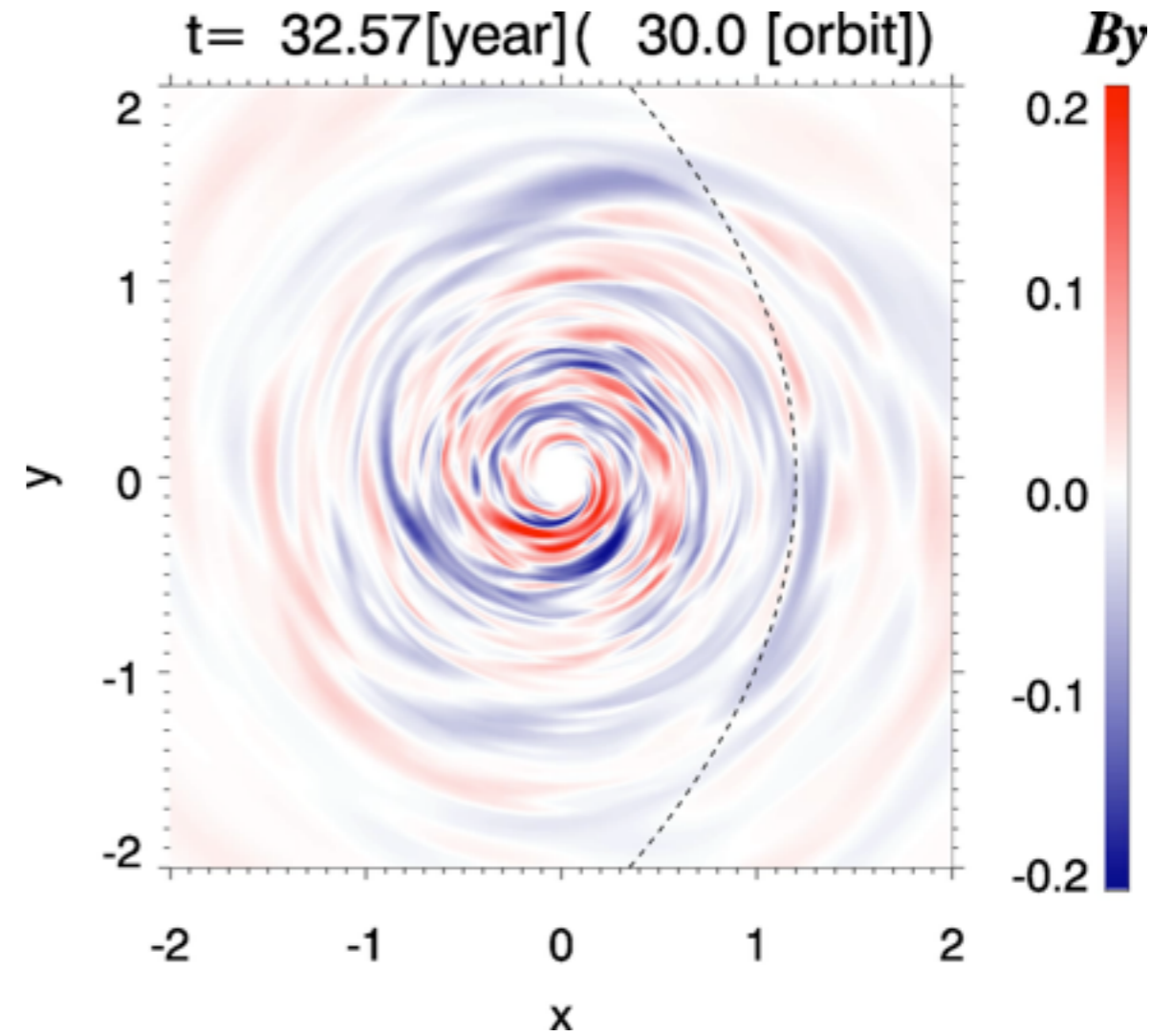
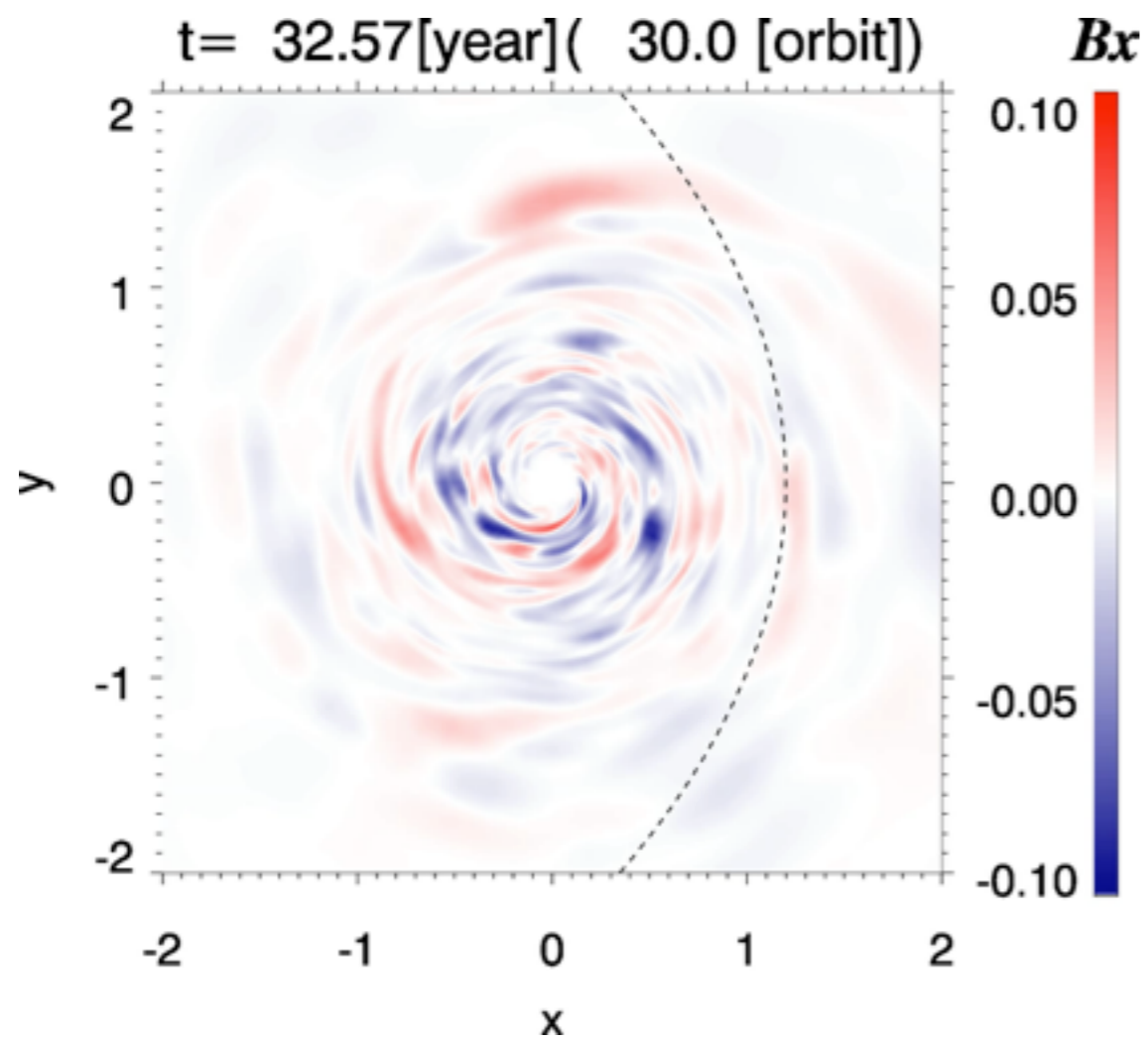
SgrA\*明るくなると面白いなあ。。

**appendix**

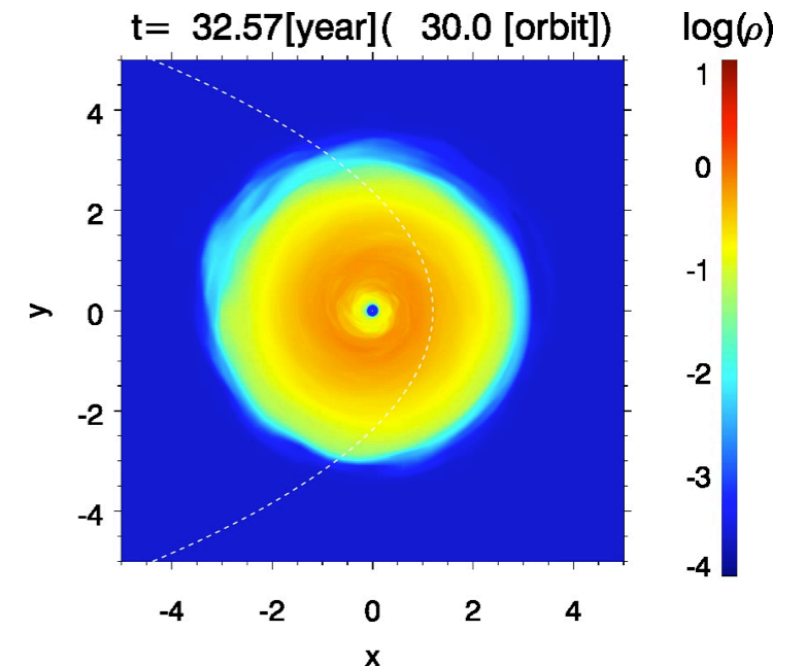
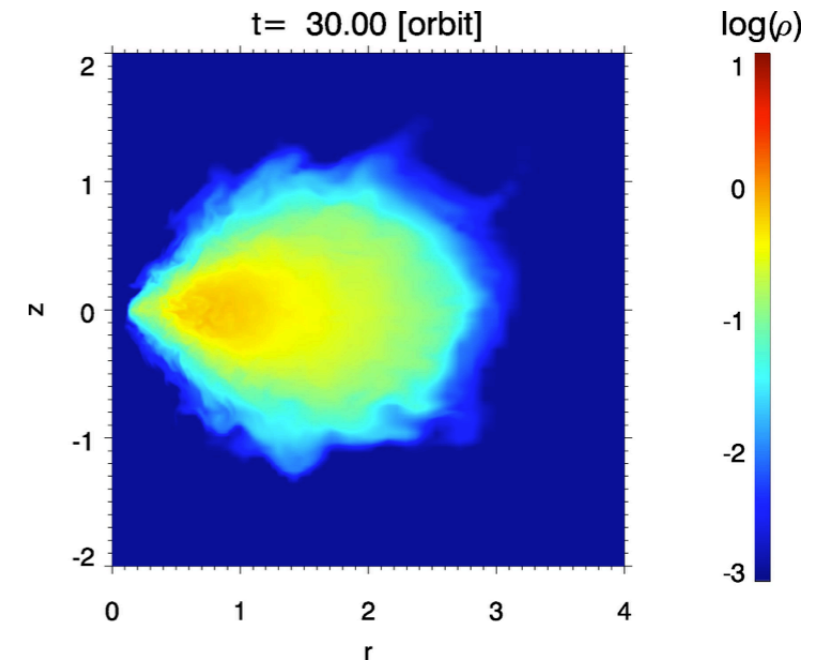
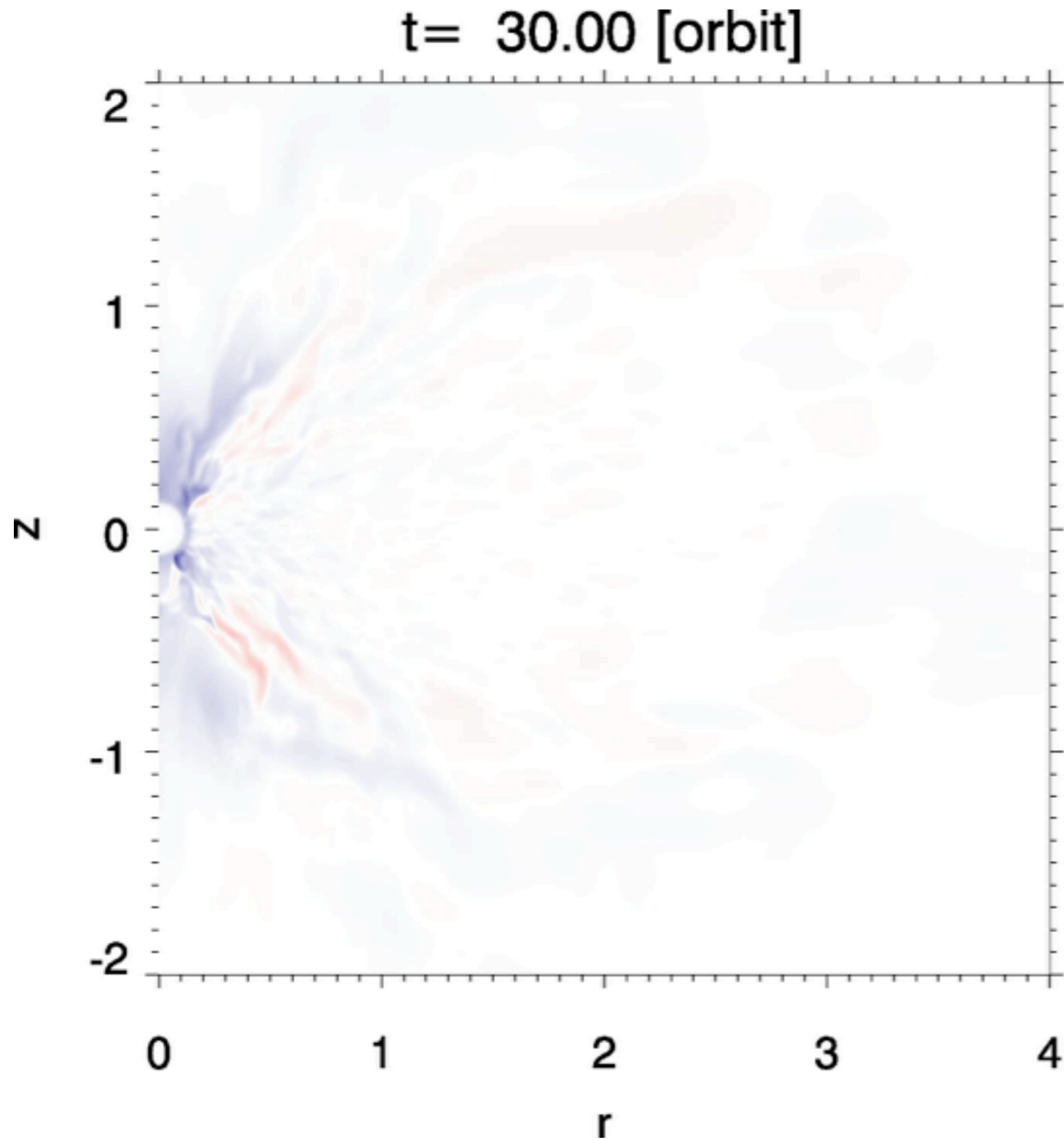
# 質量降着率の時間発展 (300rs)



# Evolution of the B-field in the Midplane



# 動径方向速度



# 子午面でのBz

