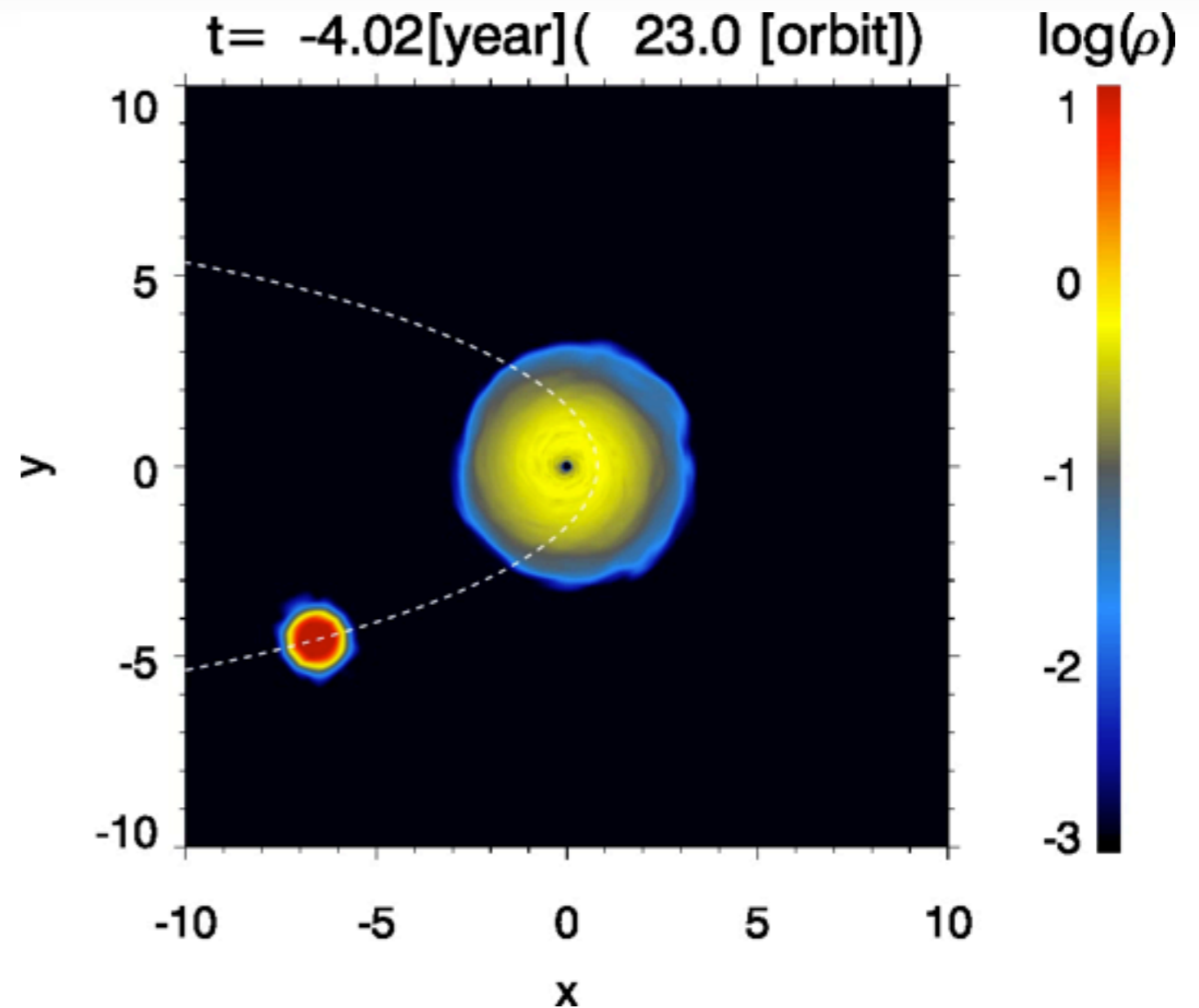


ガス雲G2がブラックホール降着流に与える影響

川島 朋尚 (国立天文台)
松本 洋介 (千葉大)
松元亮治 (千葉大)

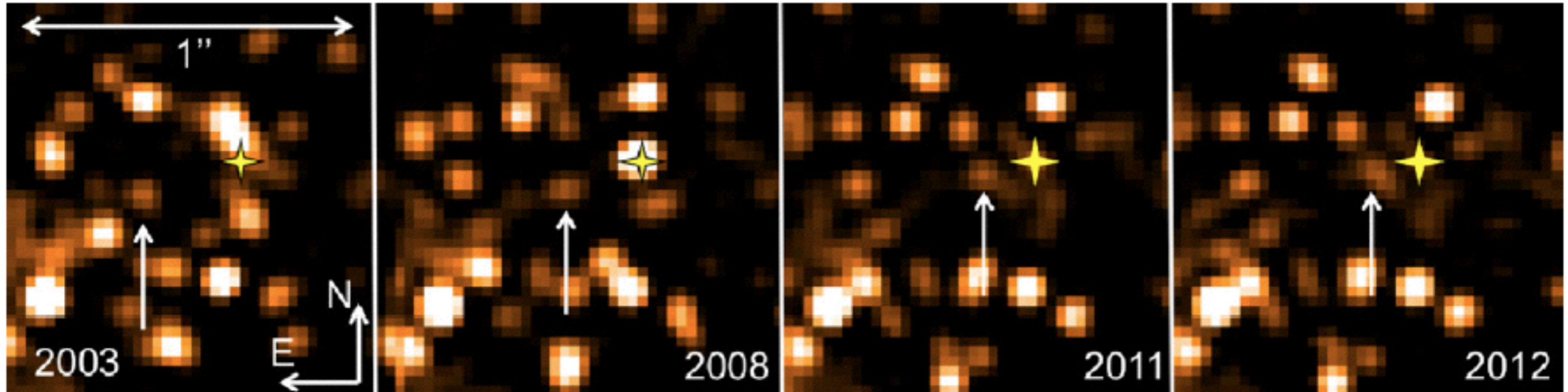


2014年11月15日 銀中祭り(長野ブラックホール天文教育研究会)@戸隠

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_{earth} で半径は $\sim 100\text{AU}$ と見積もられた。Sinfoniによる Br- γ 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。しかし、まだ明るくなっていない。。。

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。

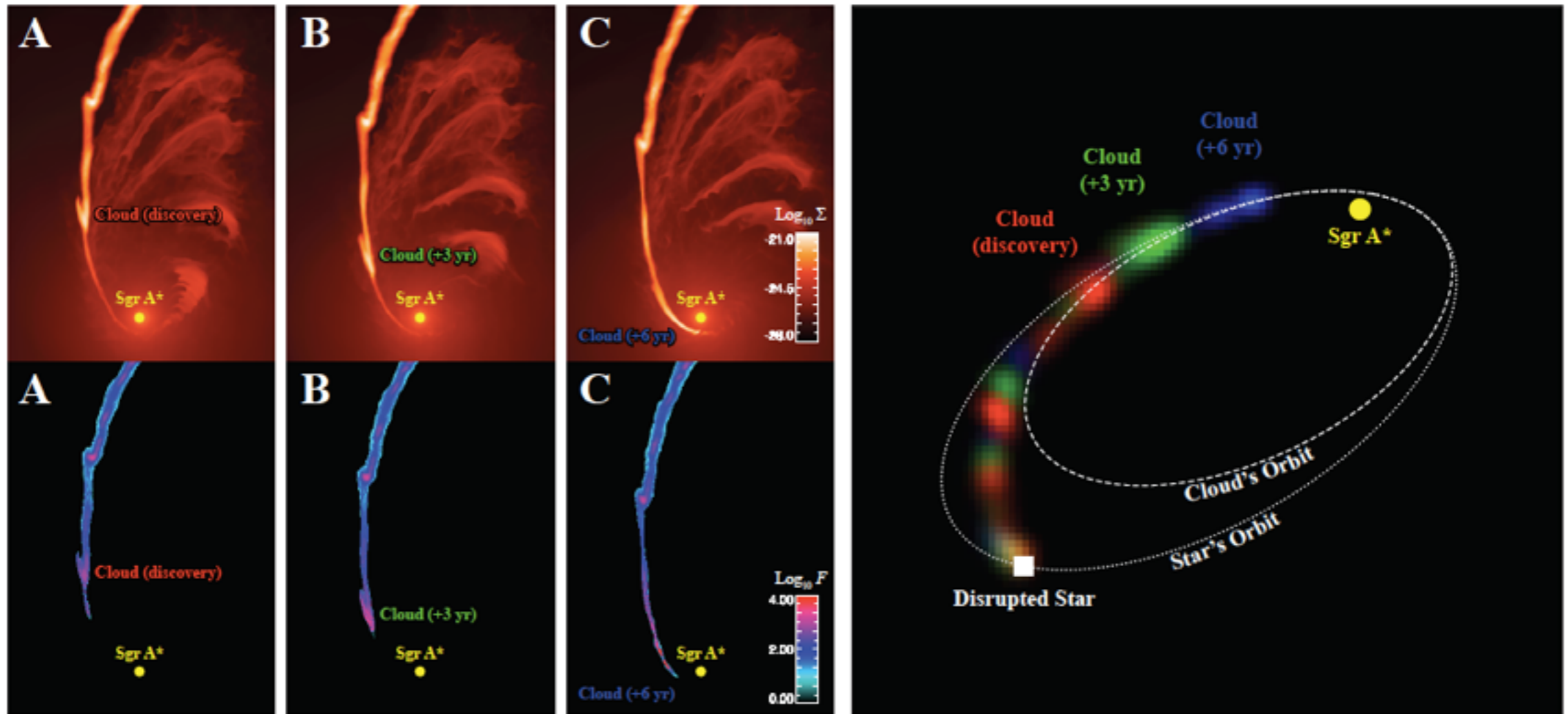


FIG. 1. — Snapshots from a hydrodynamical simulation demonstrating the dynamics of a returning stream produced by the disruption of a giant star. In the left six panels (labeled A, B, and C) we show a time-sequence of the returning gas, with the surface density Σ shown in the top panels and total line-cooling 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 ~ 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.

潮汐力の影響

(Gillessen et al. 2013)

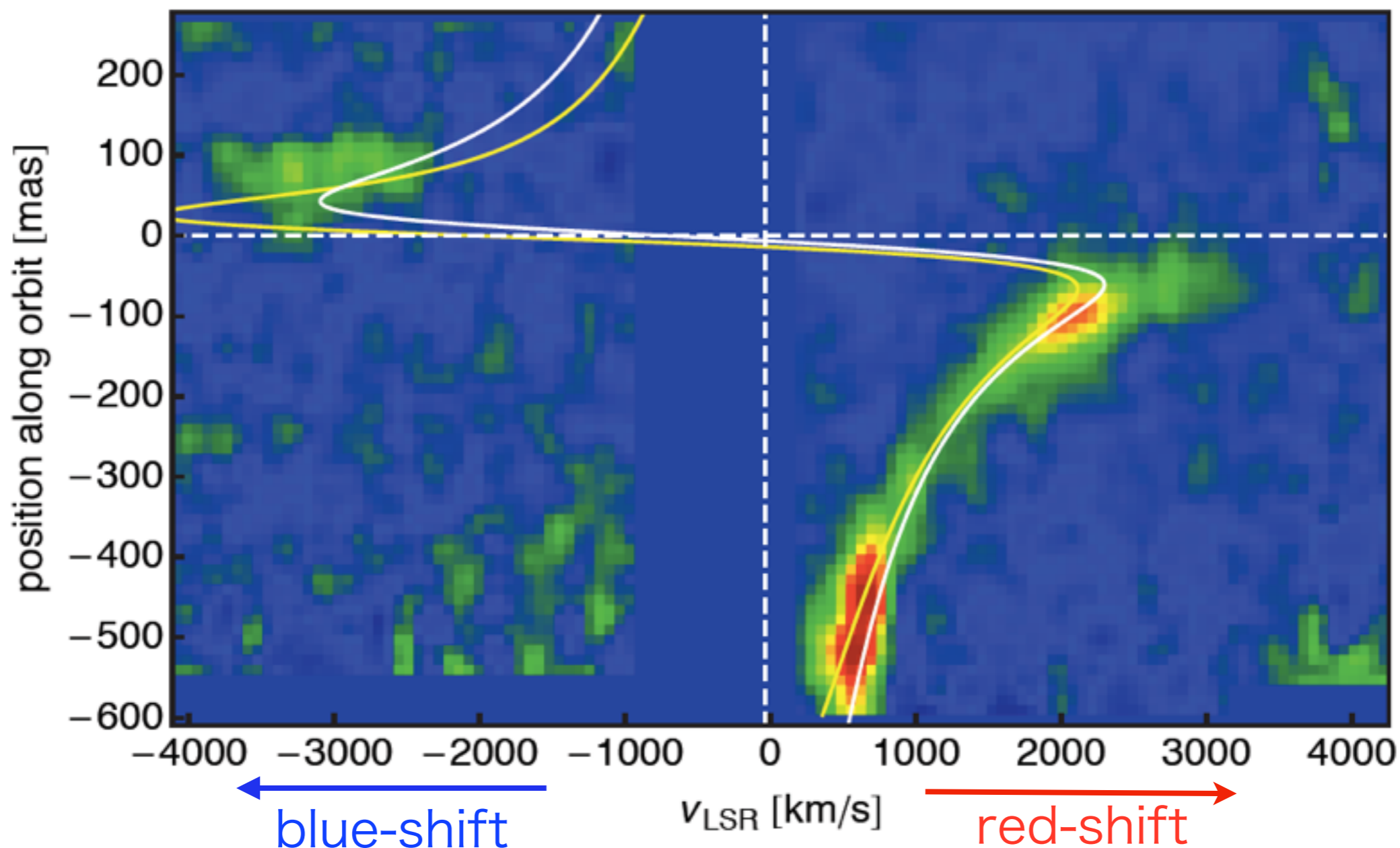


Figure 2: Position-velocity-diagram of G2, extracted from our April 2013 SINFONI data set along the orbit projected into the cube. This diagram is a co-add around the lines Brackett- γ , Helium-I, and Paschen- α . The yellow line delineates the L'-band based orbit, the white line the Brackett- γ based one.

- 潮汐力が効いていることは確か→何かしら広がったガスはある

これまでのG2(ガス雲仮説)の数値シミュレーション例

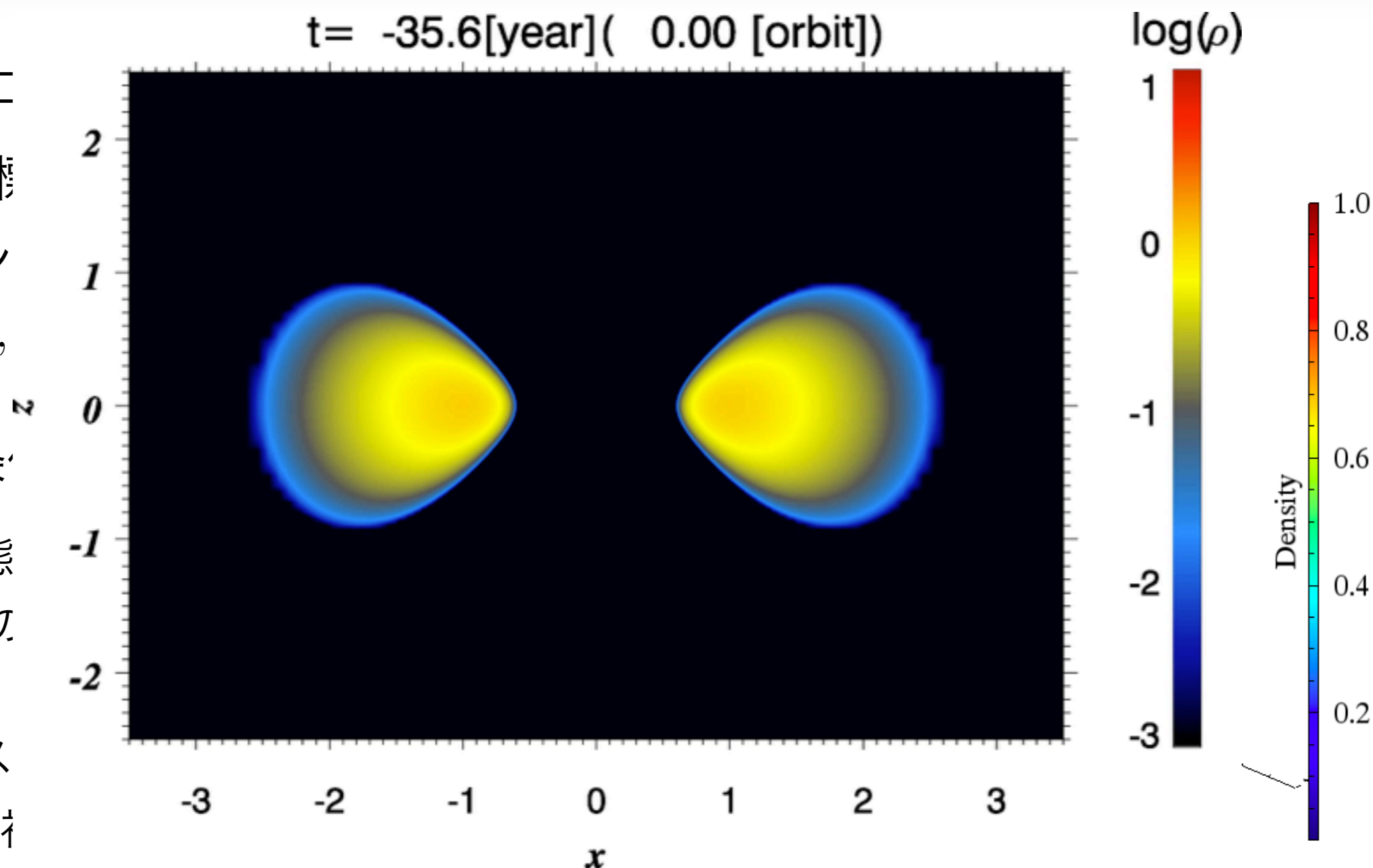
	HD/MHD	dimension	wi accretion flow and outflow?	wi radiative cooling?
Burkert et al. (2012)	HD	2	No	No
Anninos et al. (2012)	HD	3	No	No
Saitoh et al. (2013)	HD(SPH)	3	No	Yes
Sadowski et al. (2013)	MHD	3	Yes	No
Abarca et al. (2013, airXiv)	HD	3	(partly) Yes	No

- 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_{ϖ} ,
- 初期条
- 平衡状態
は非回転の
に設置。
- トーラス
(コロナは



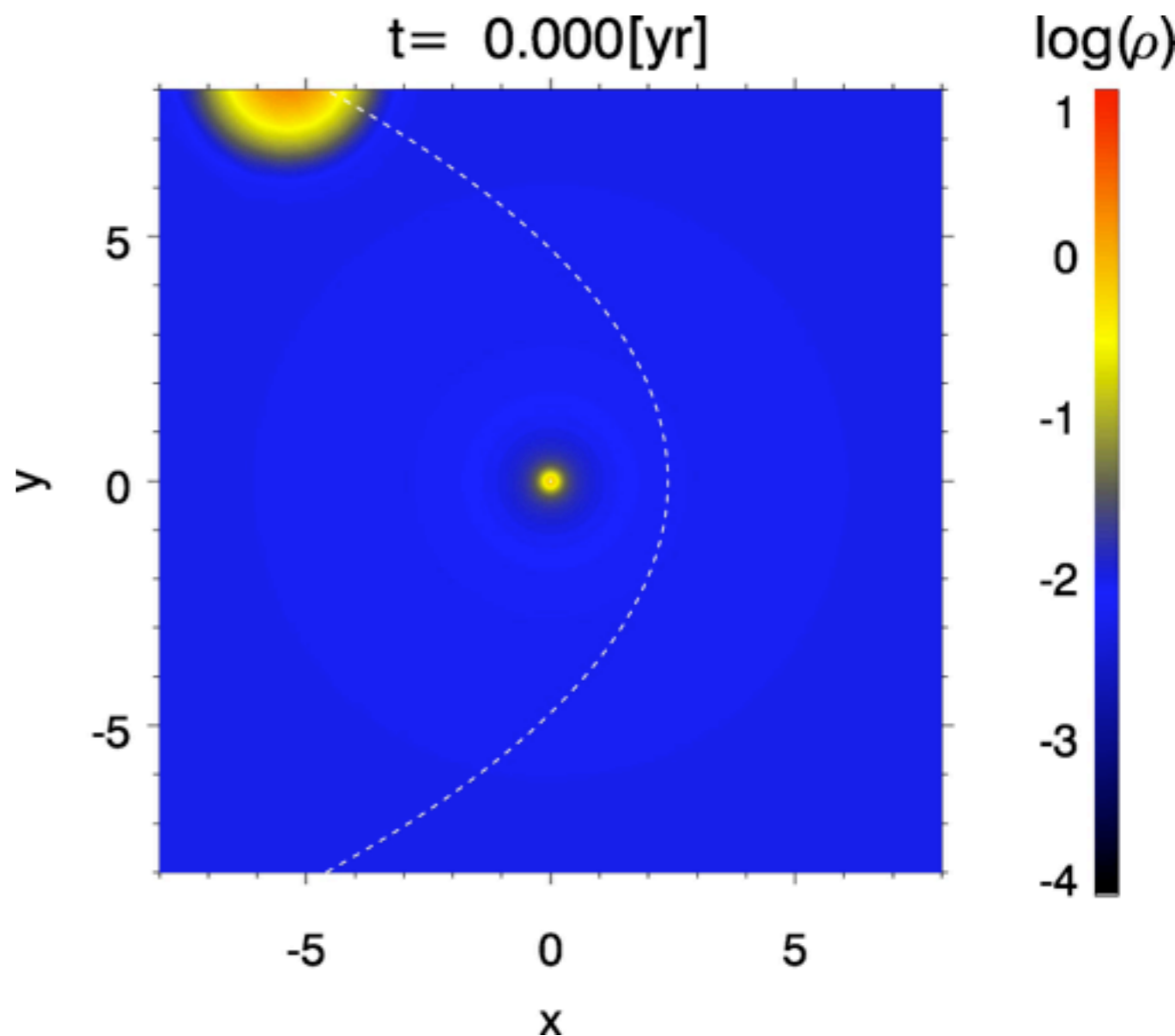
G2はMRIが十分成長し、降着流が形成されてから設置。

(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

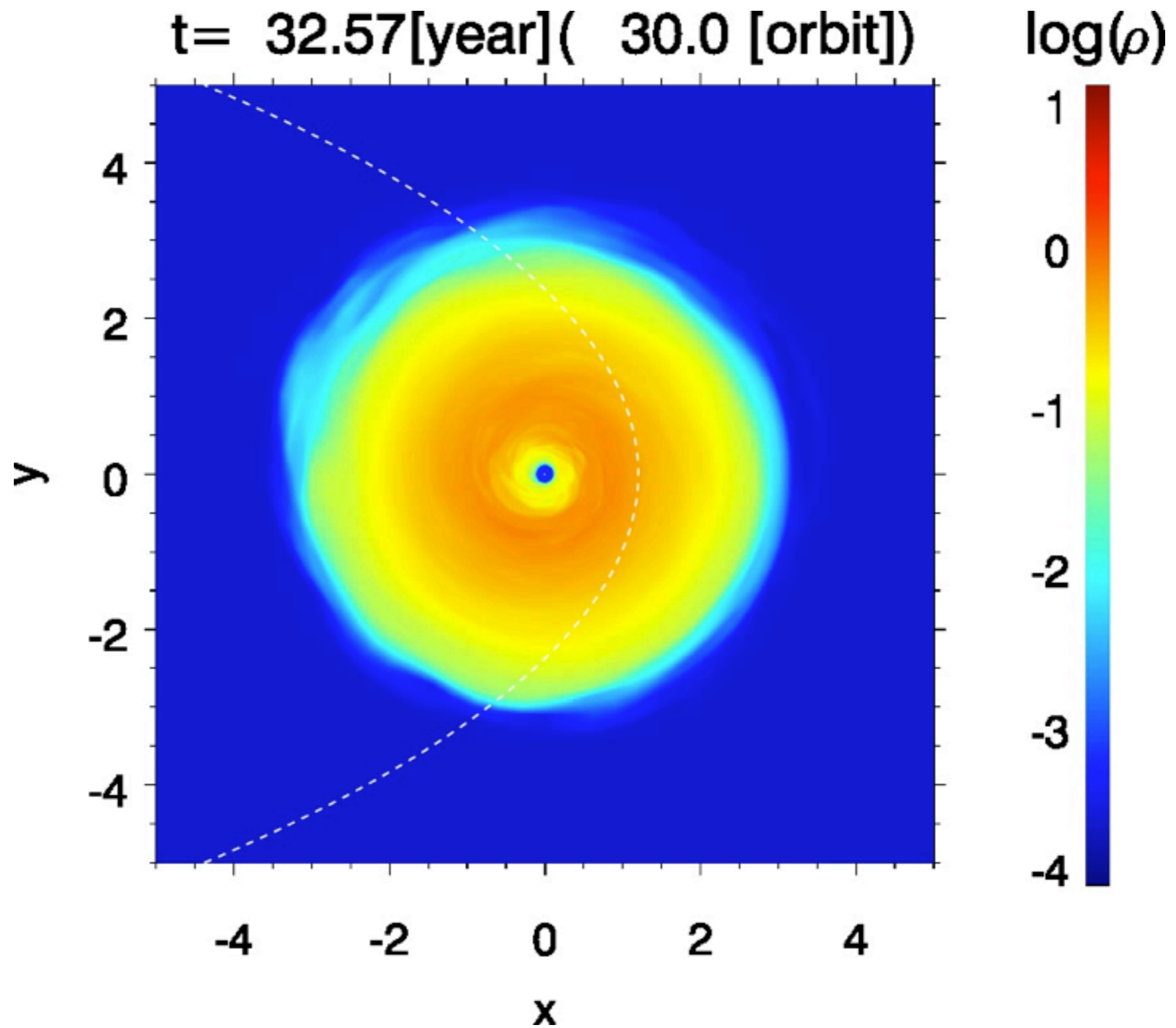
(2) G2

- G2を初期にSMBHから $24,000R_s$ 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)。



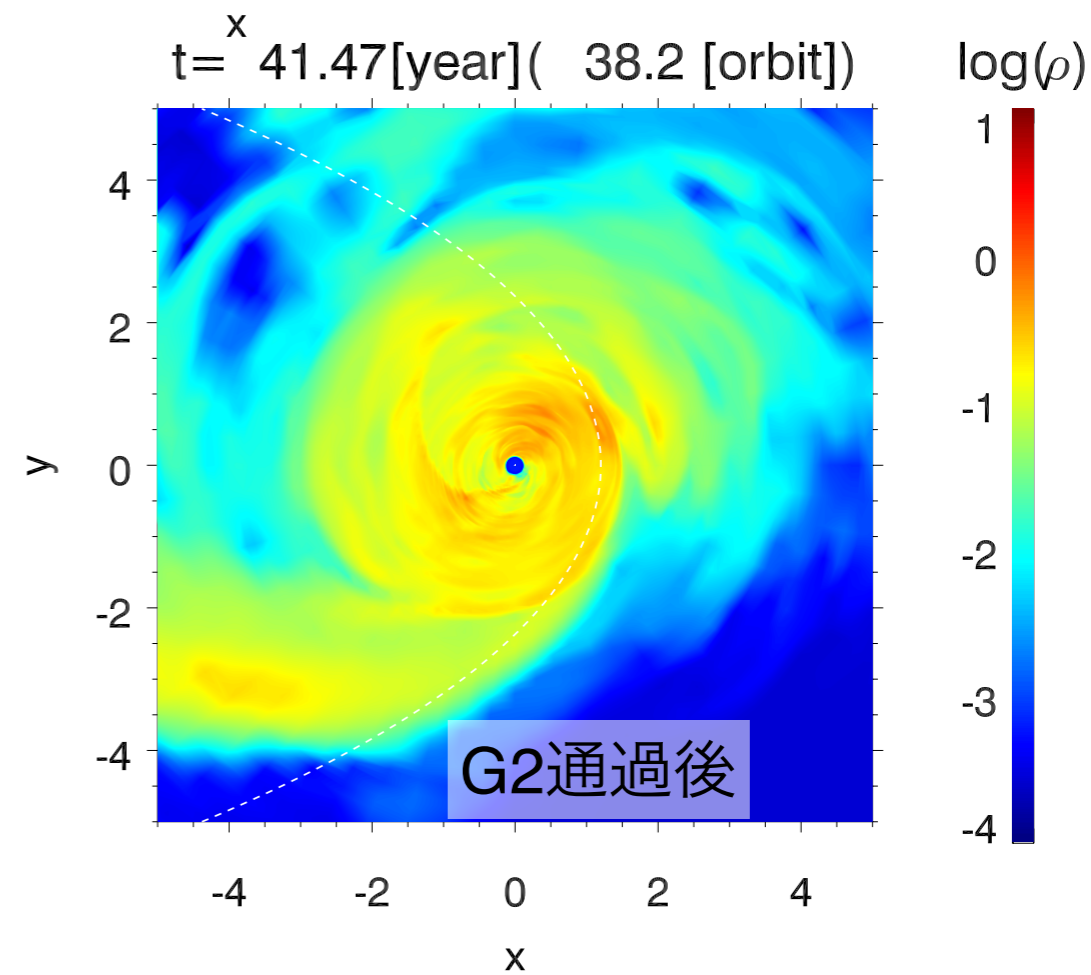
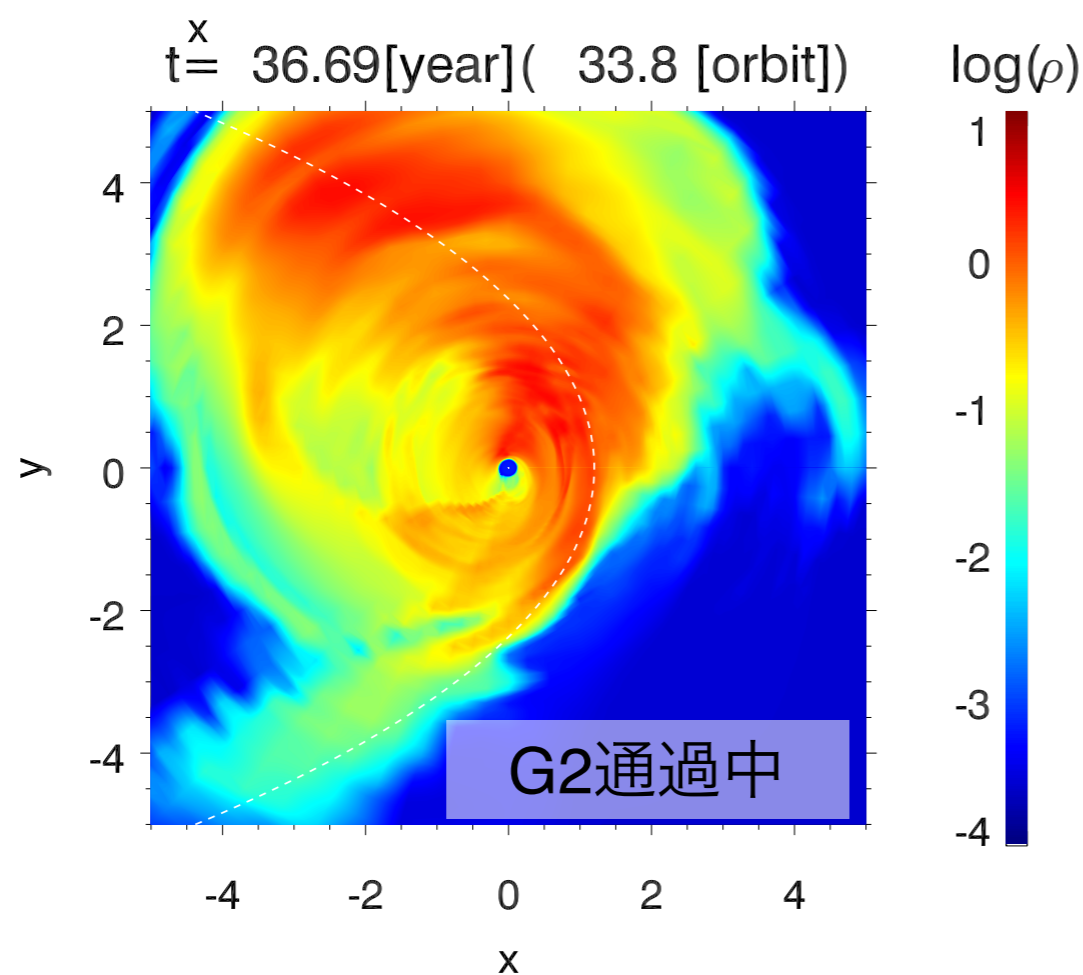
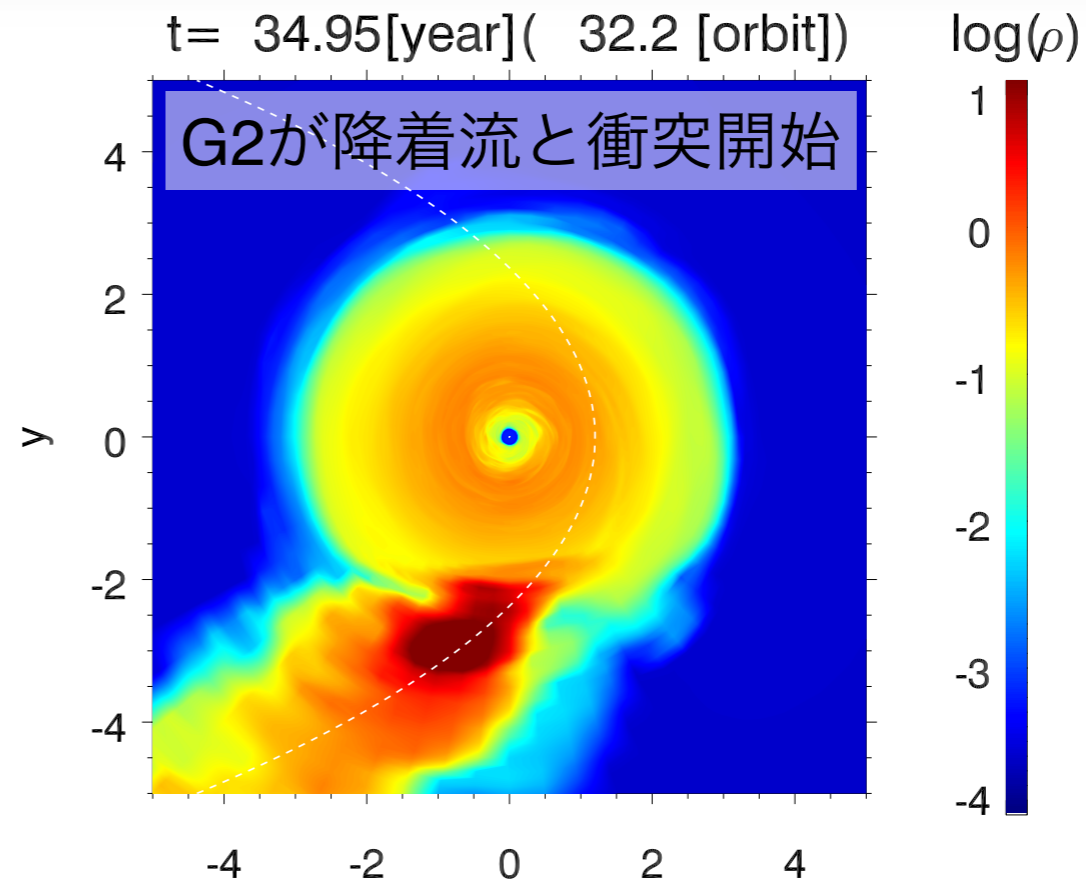
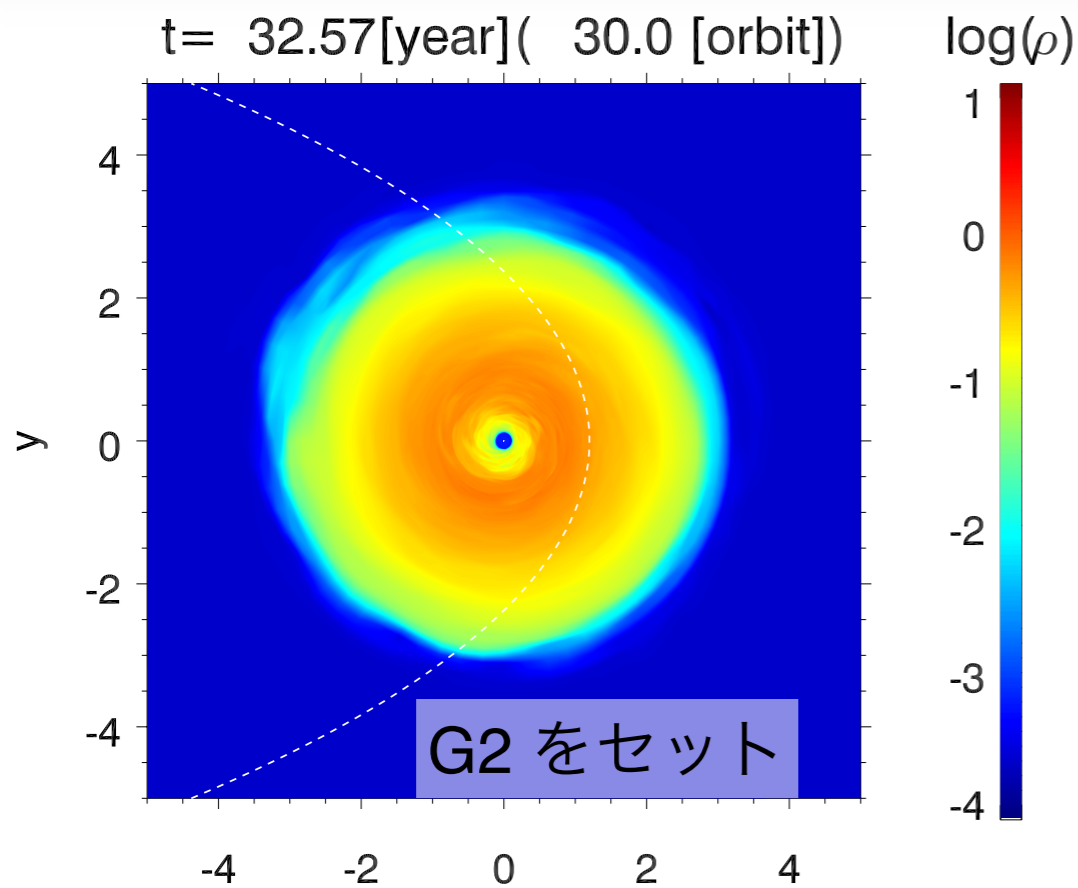
密度分布の時間発展

長さスケール：2,000rs

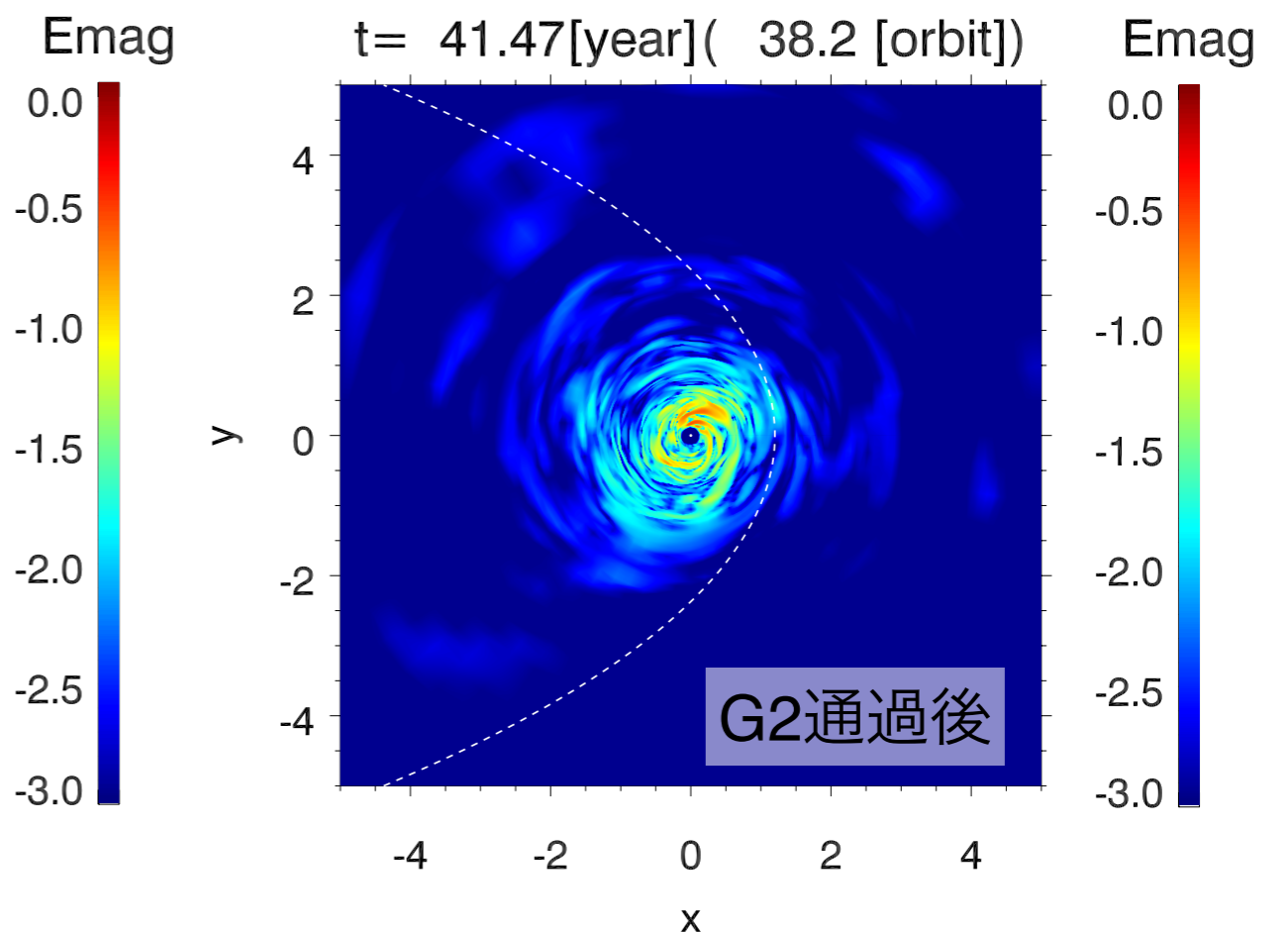
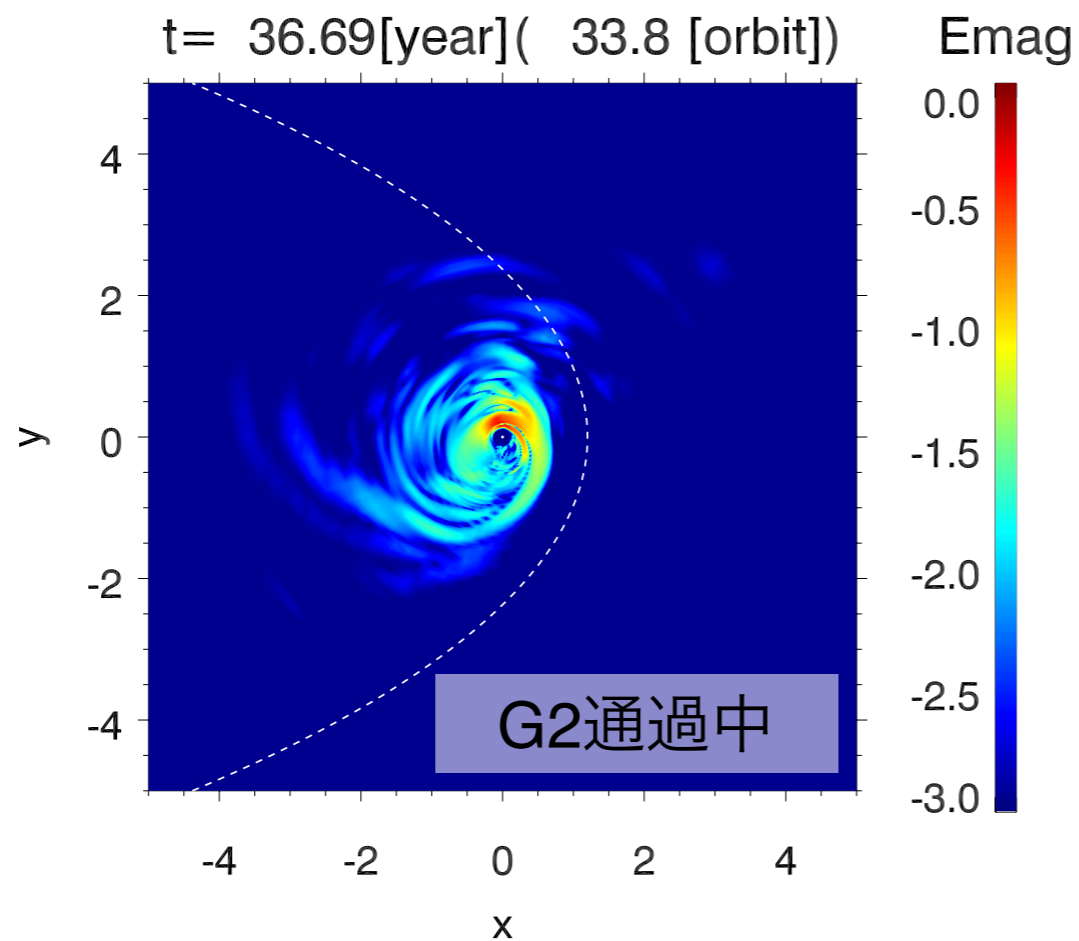
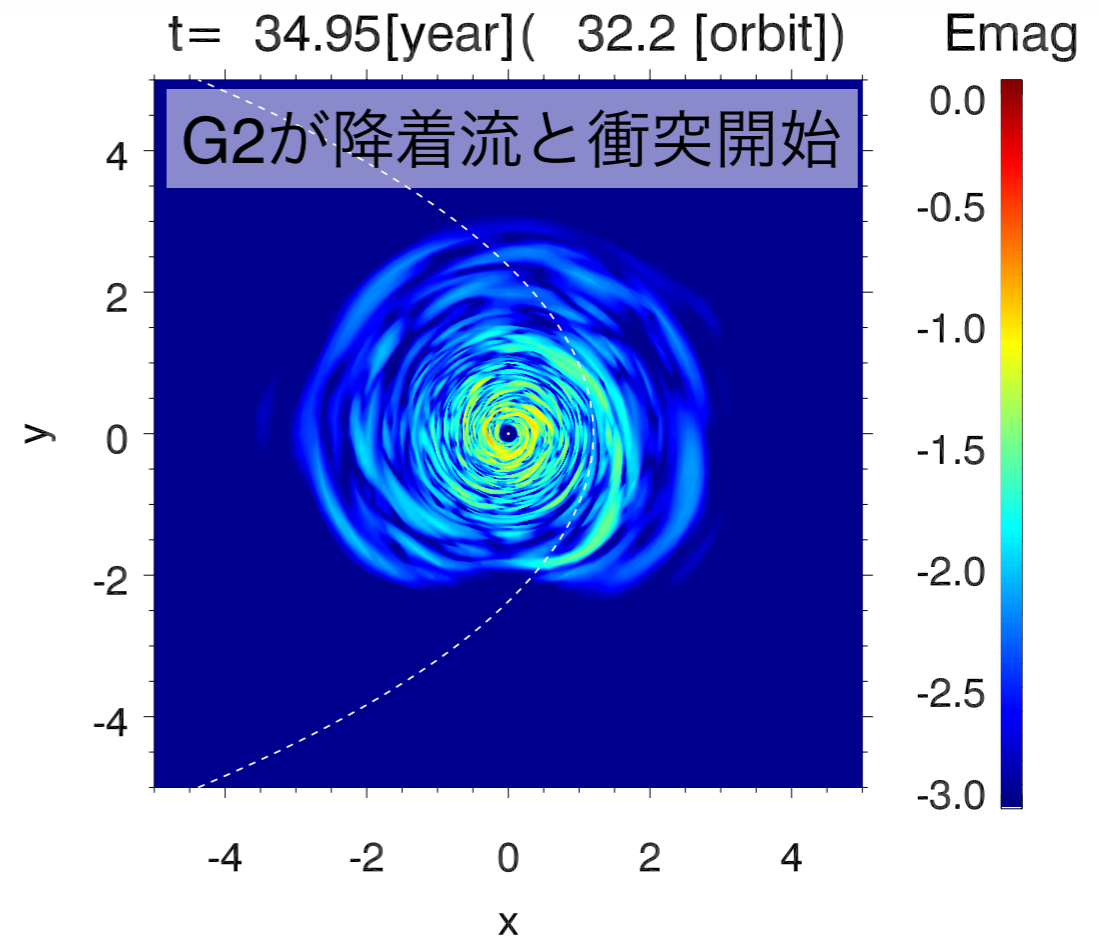
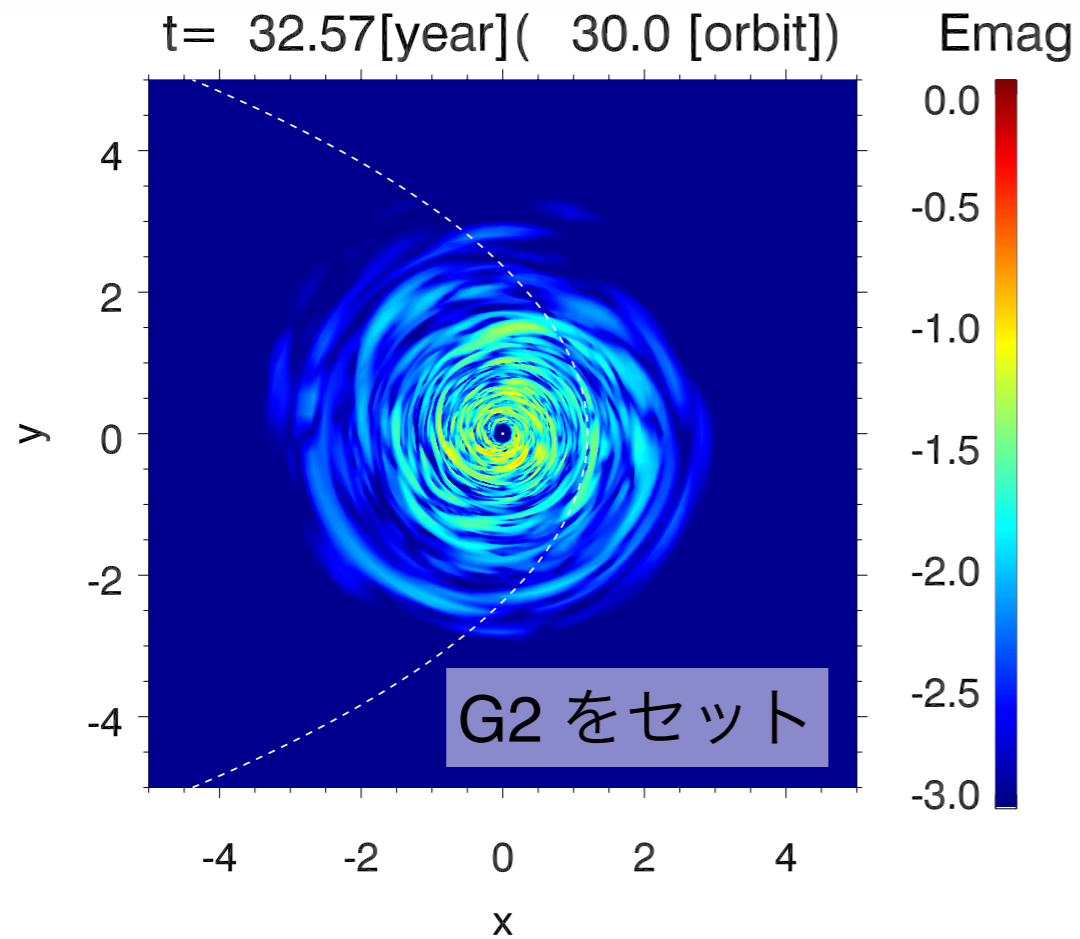


密度の時間発展(スナップショット)

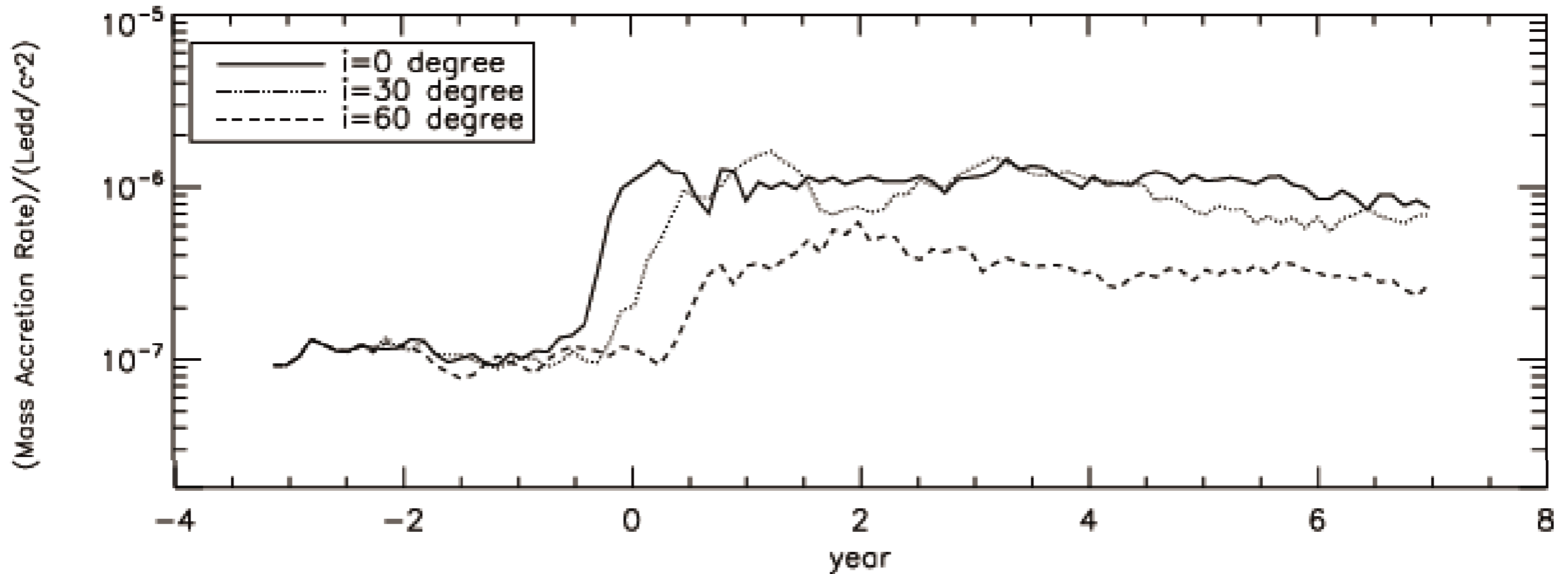
unit of length: 2,000rs



磁気エネルギー密度

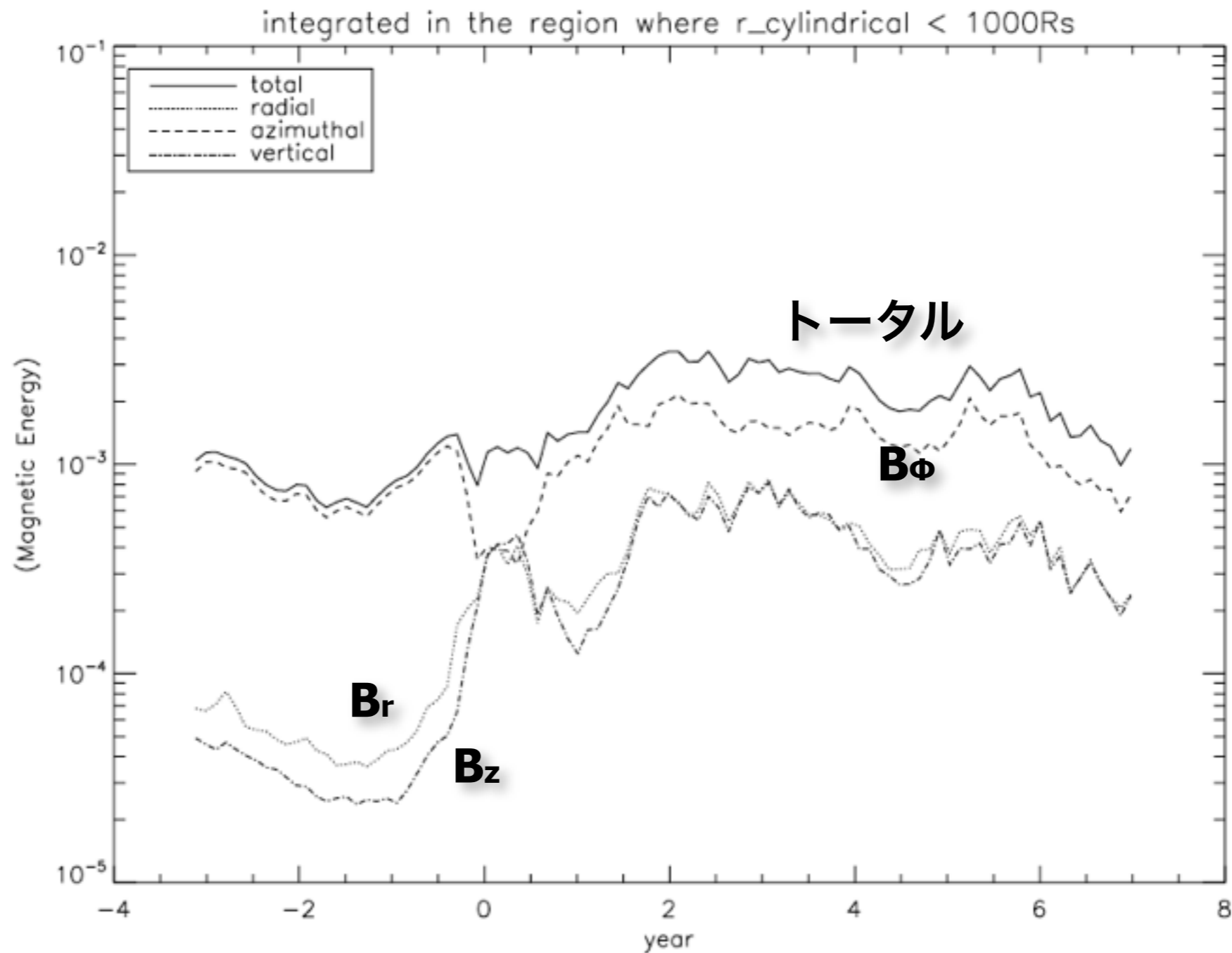


Evolution of Mdot at 300Rs



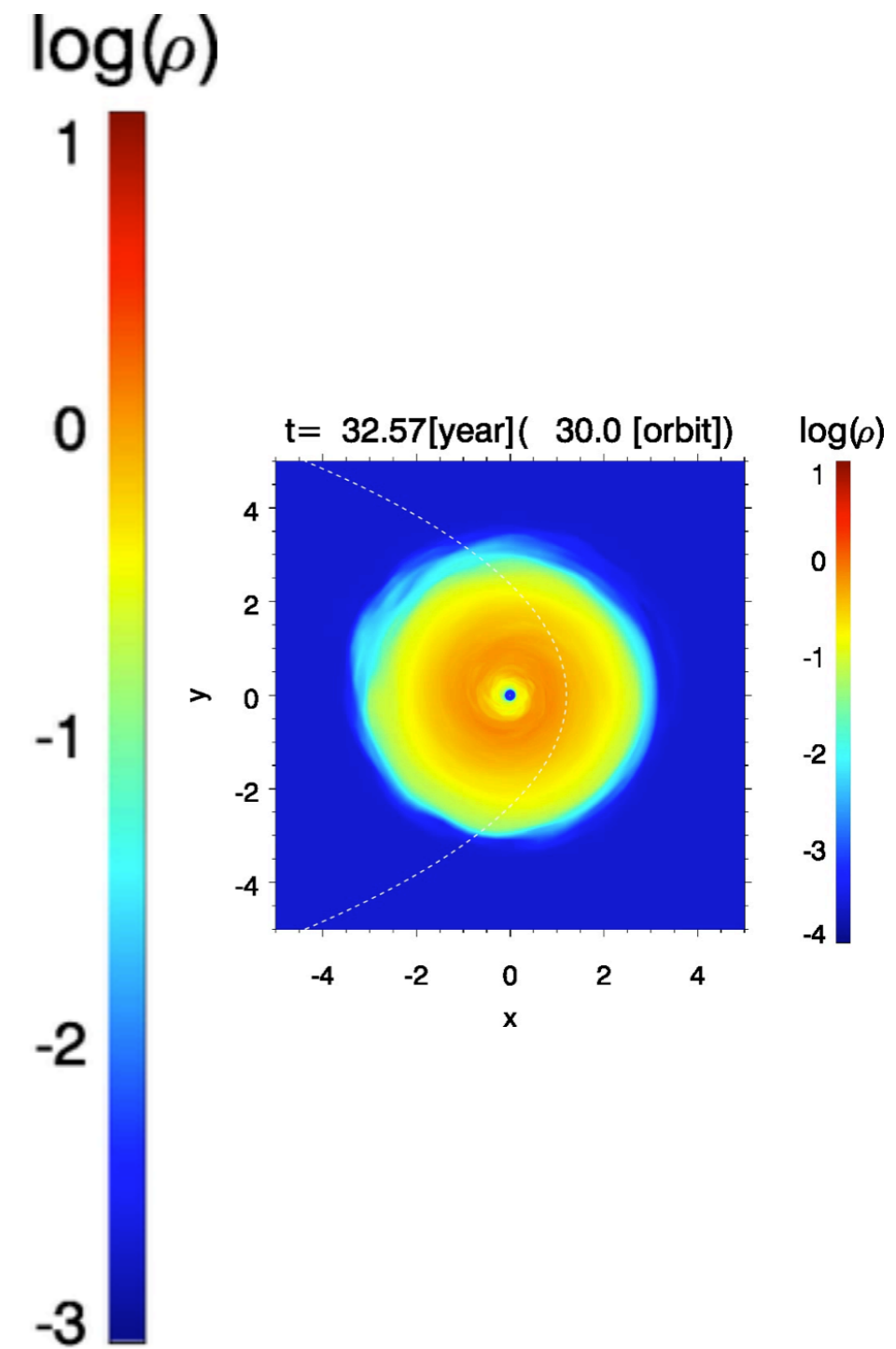
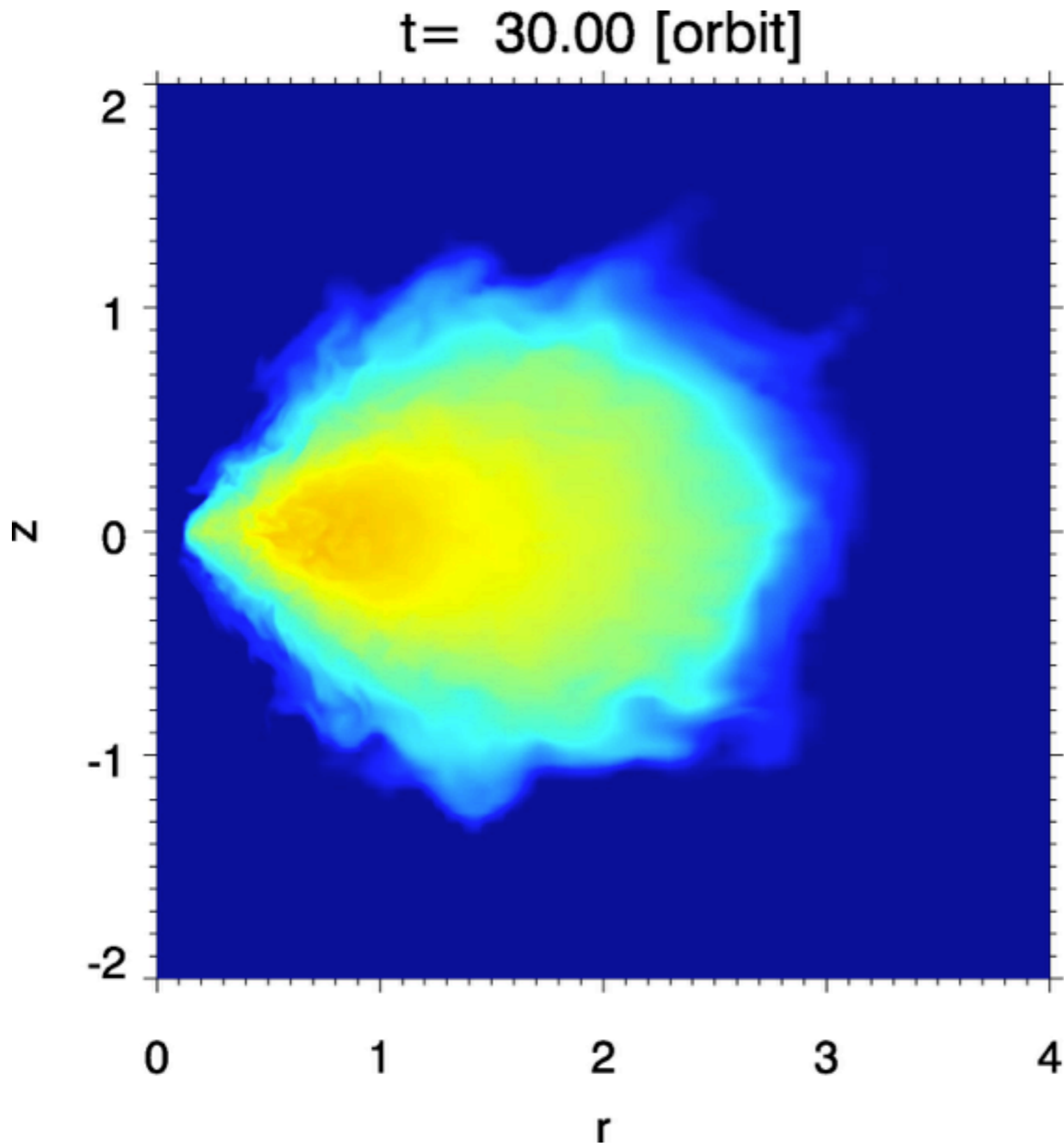
- inclinationが大きくなると、ガス雲が降着流と相互作用する時期が遅れるため降着率が上昇する時期は遅れる(半年~1年遅れるかも)

磁気エネルギーの時間進化(1000Rs以内)



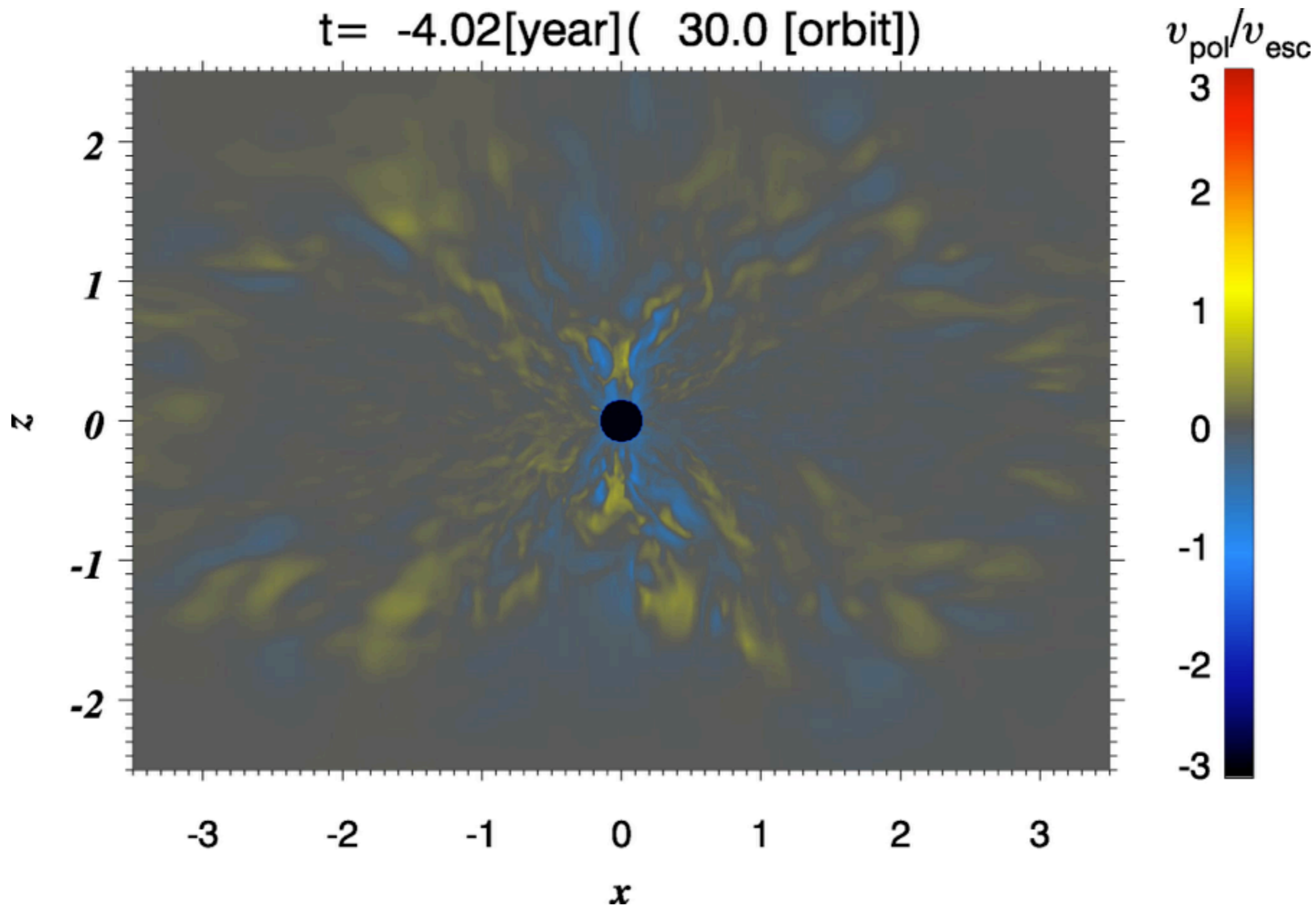
- およそ1000Rsでのdynamoの時間スケールで磁場増幅
- 近点通過から2年後ぐらいでシンクロトロンでファクター一倍増光する可能性がある。

ジェットが噴出 (駆動機構は調査中)

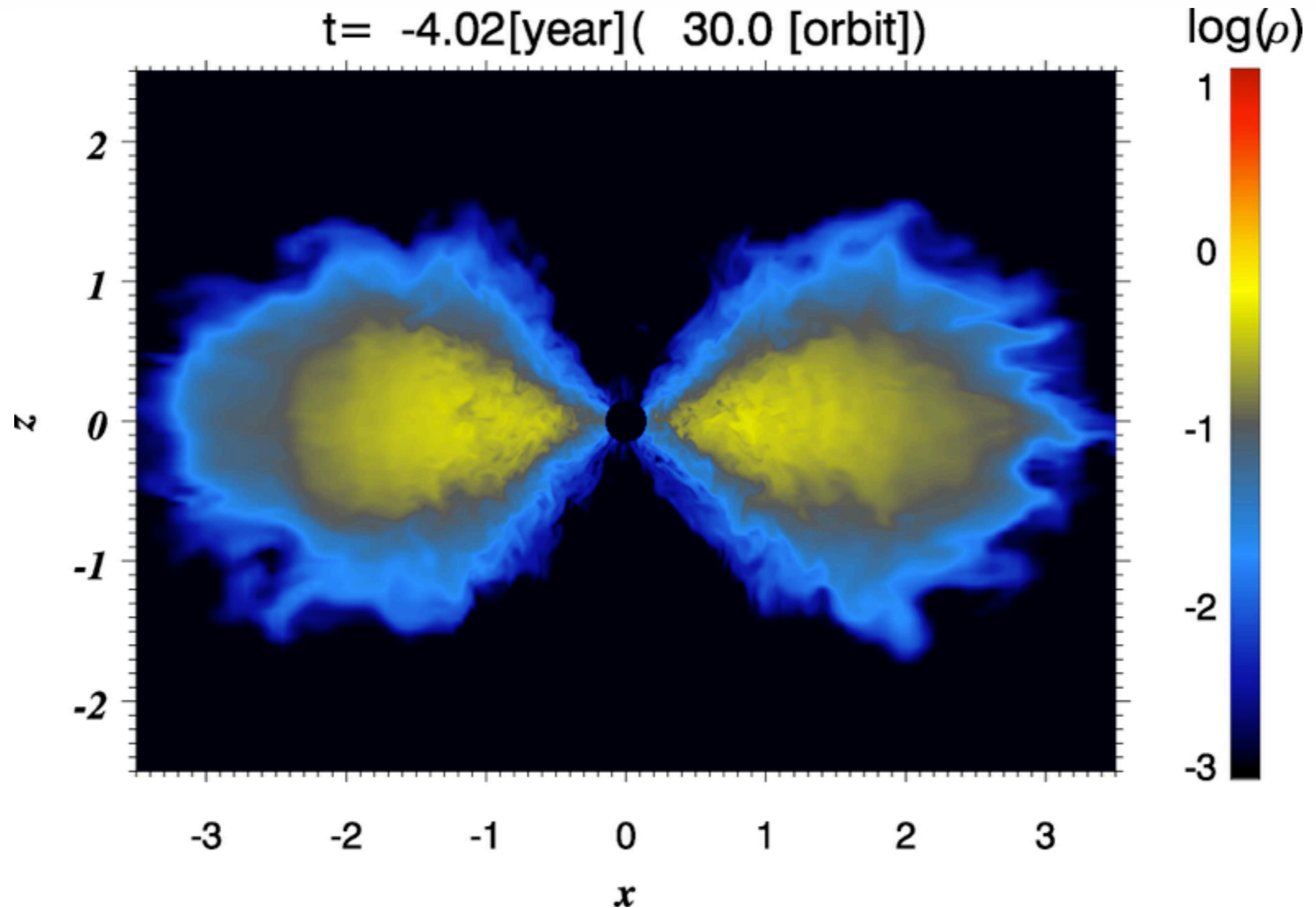


動径方向速度 / 脱出速度

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

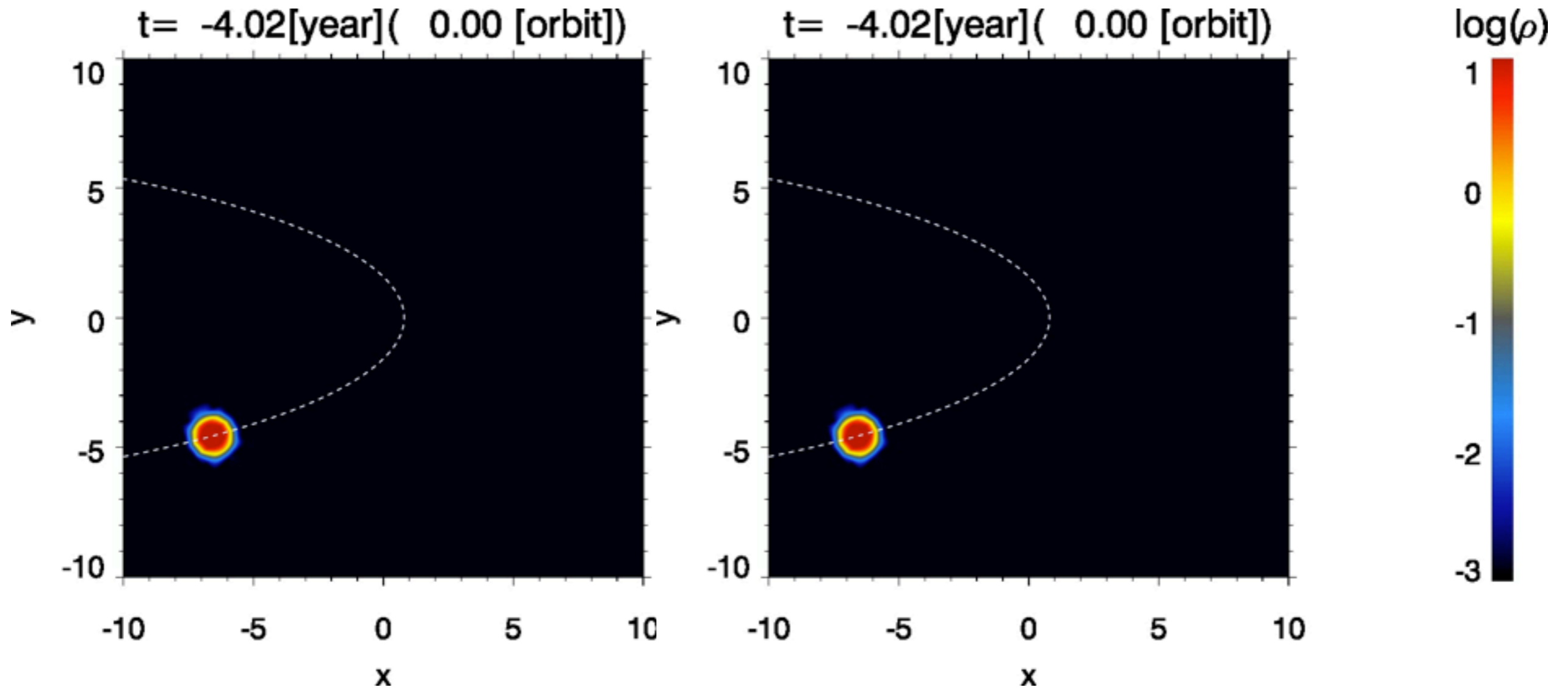
	HD/MHD	dimension	wi accretion flow and outflow?	with radiative cooling?
Burkert et al. (2012)	HD	2	No	No
Anninos et al. (2012)	HD	3	No	No
Saitoh et al. (2013)	HD(SPH)	3	No	Yes
Sadowski et al. (2013)	MHD	3	Yes	No
Abarca et al. (2013, airXiv)	HD	3	(partly) Yes	No

- 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)

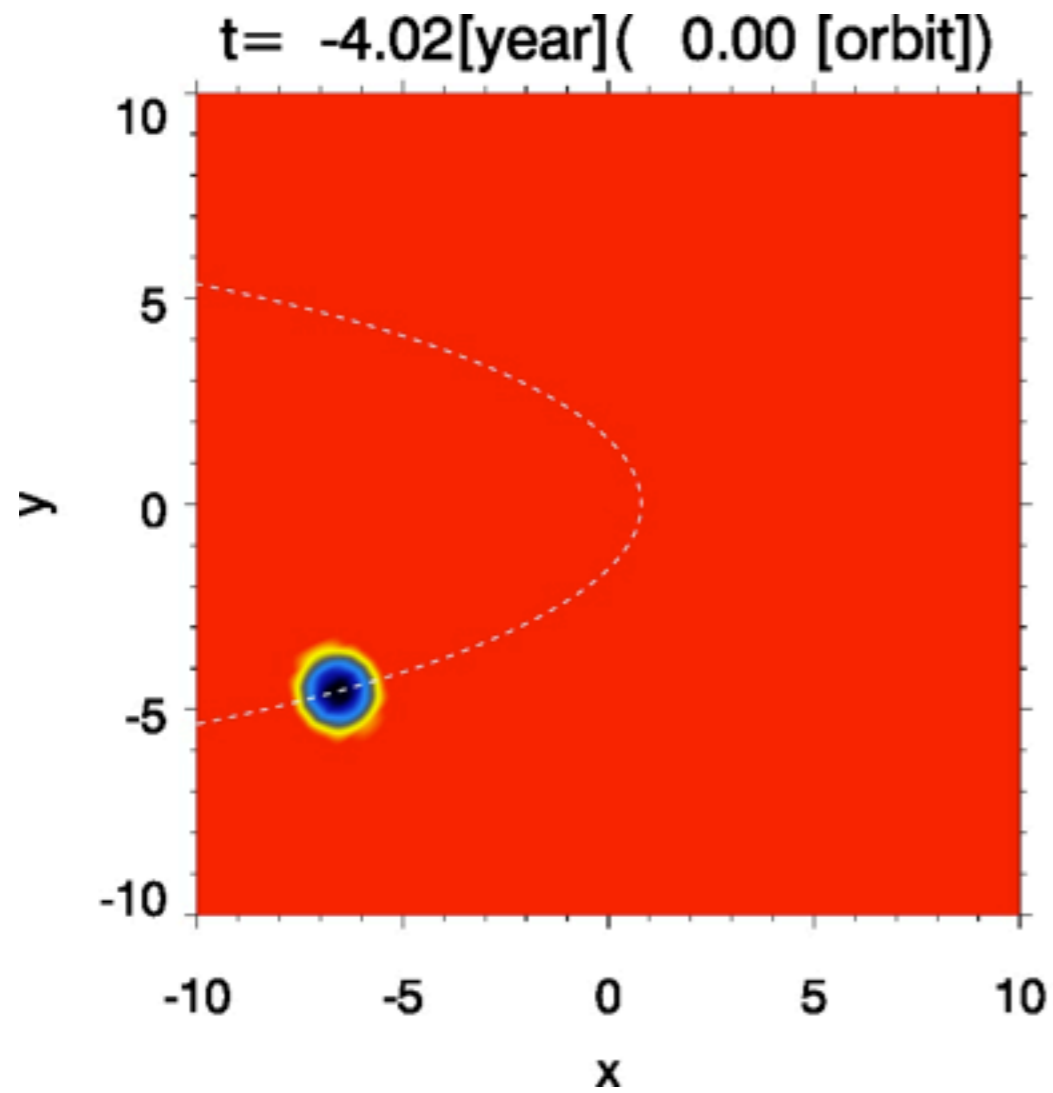
輻射冷却ON

OFF

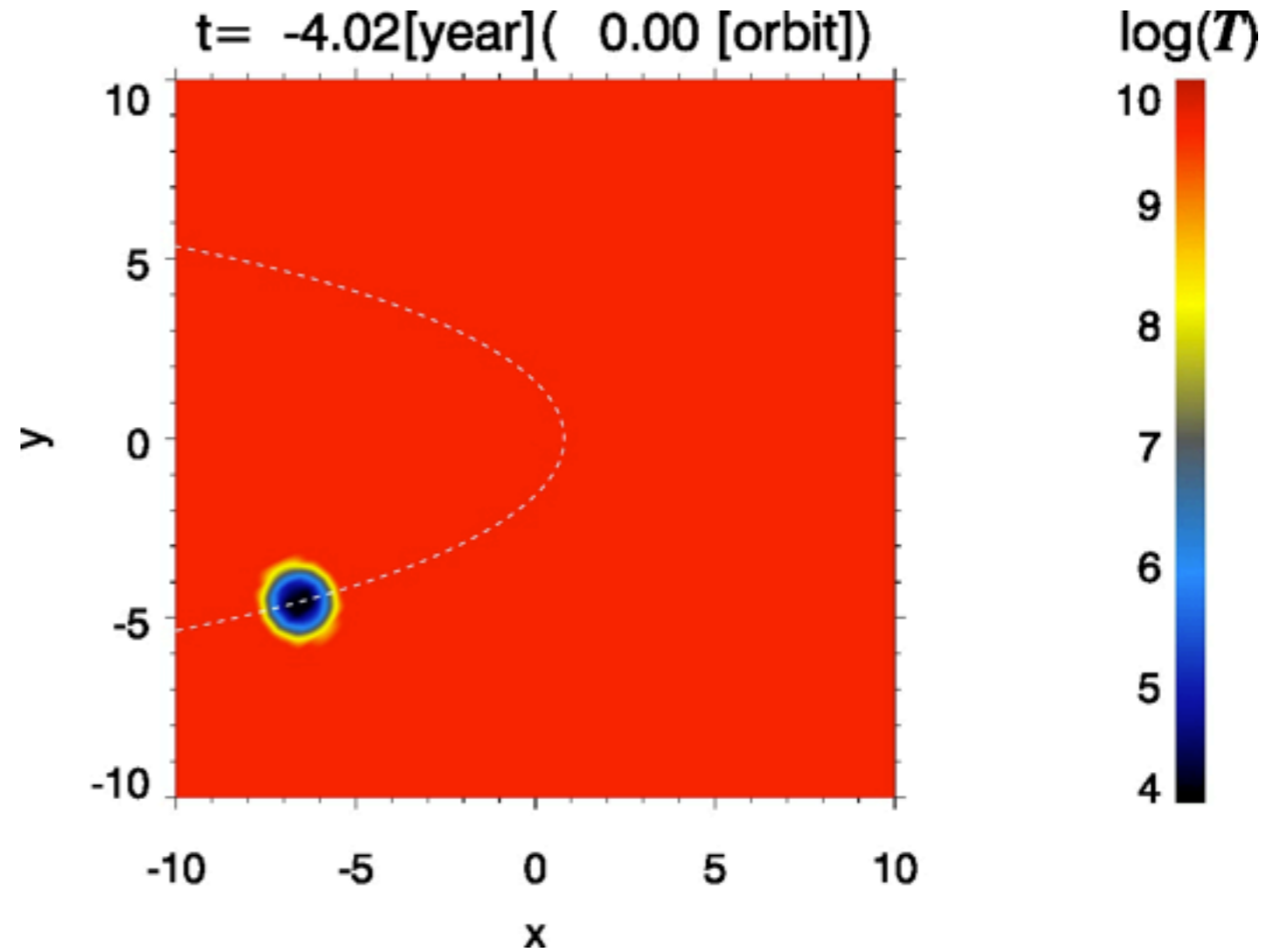


冷却on/off (温度分布)

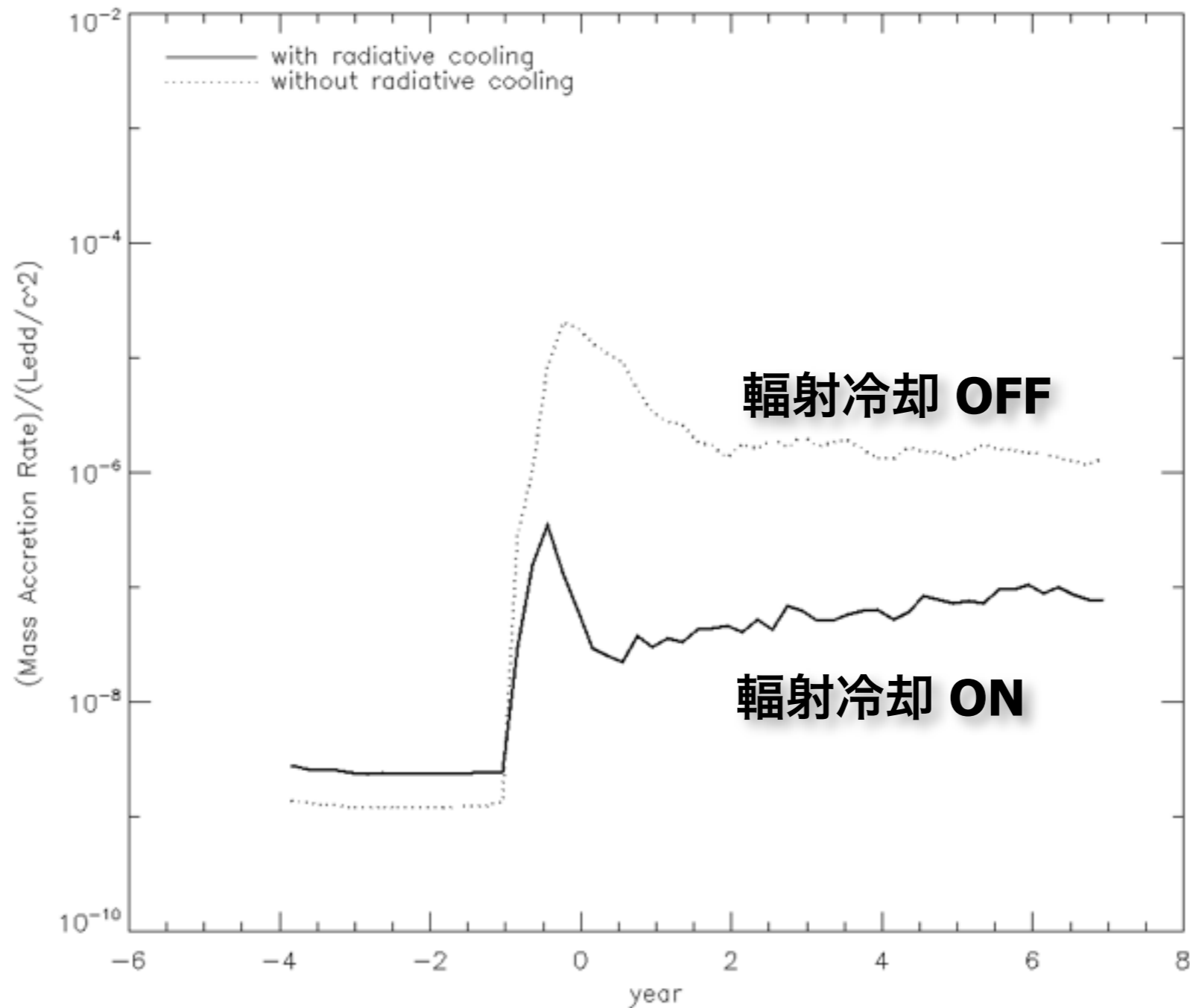
輻射冷却ON



OFF

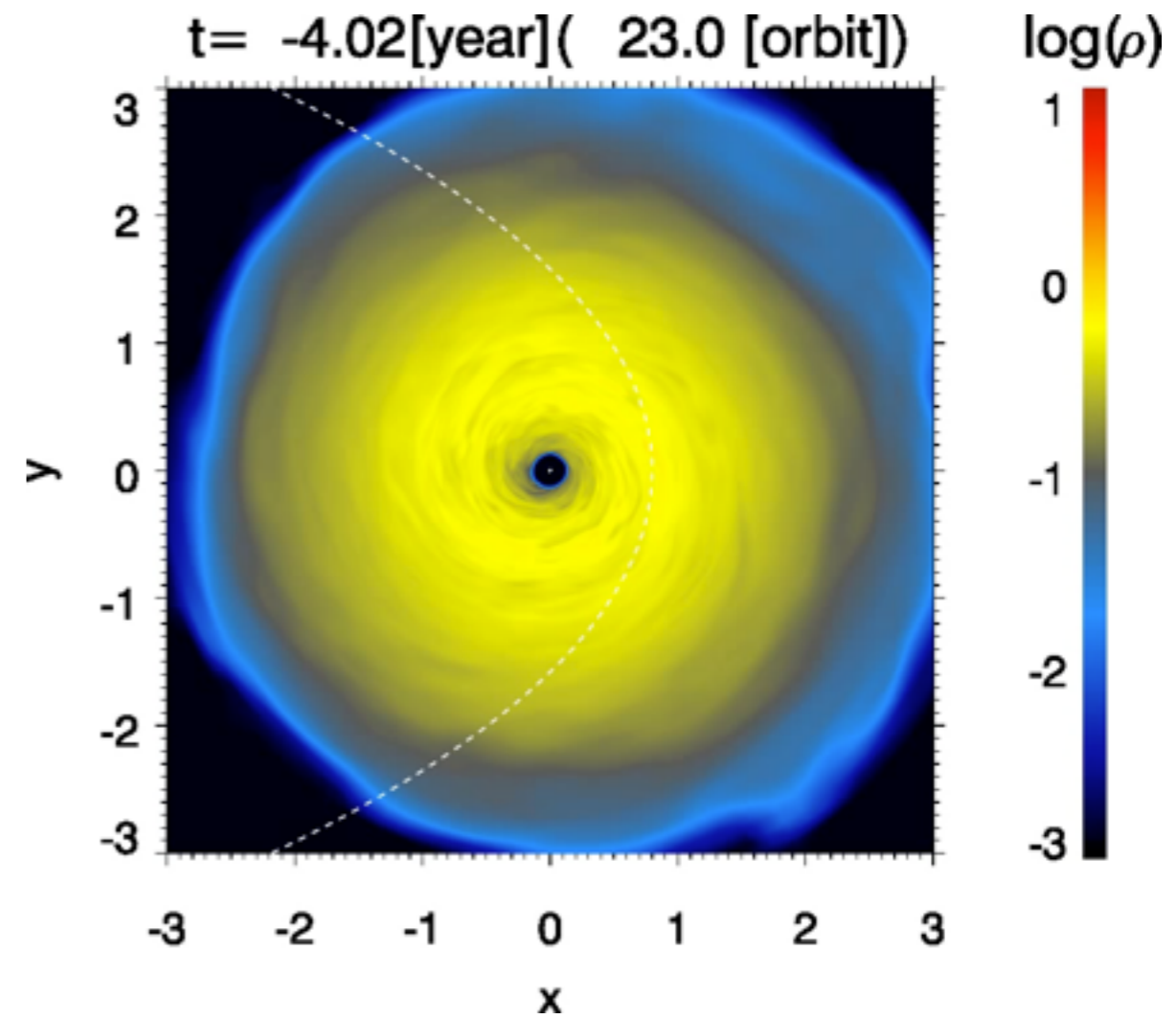
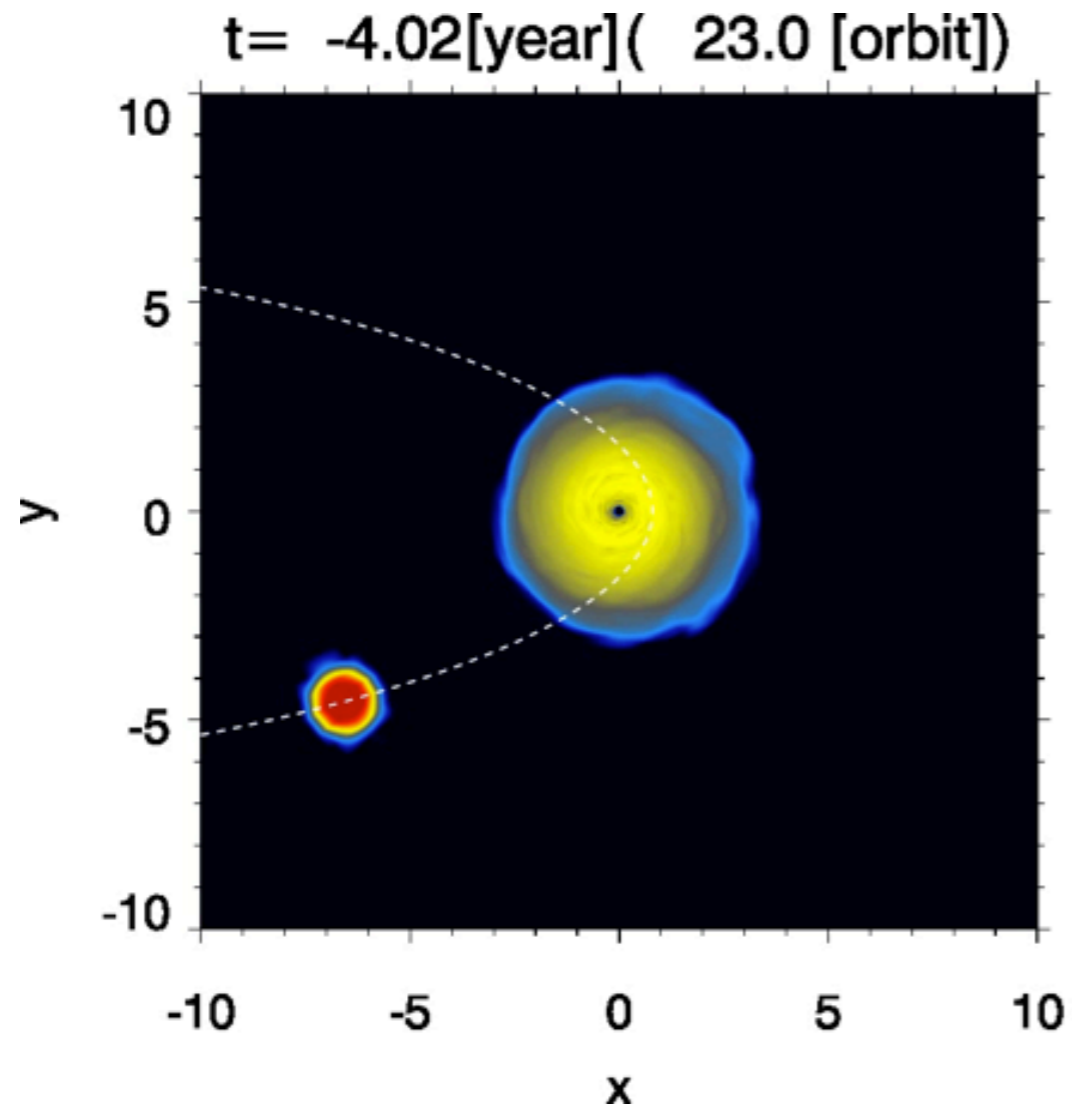


降着率 (輻射冷却 ON/OFF)



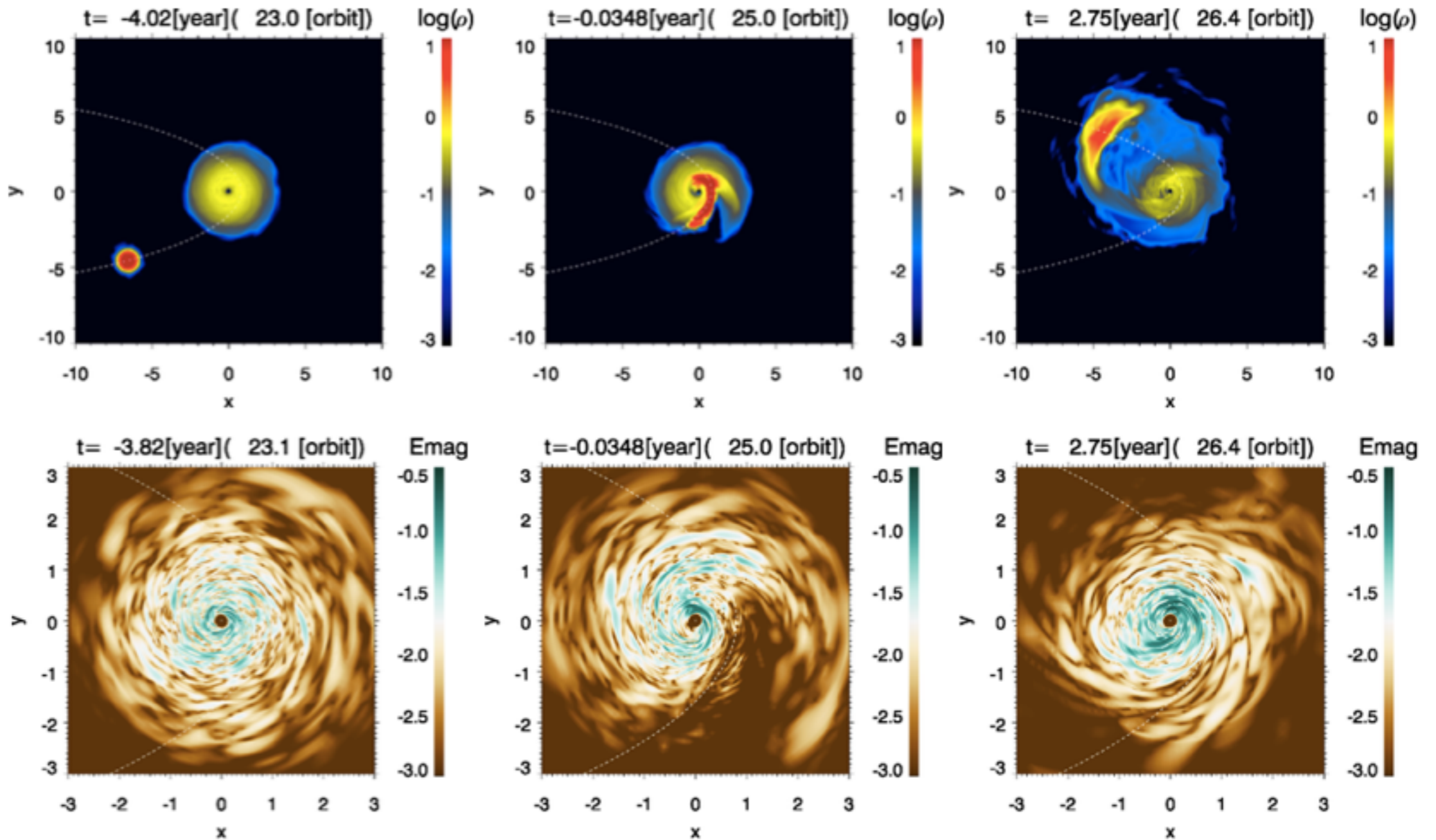
- 輻射冷却の効果によるガス雲収縮 → 断面積減少して ラム圧減少
→ 角運動量の輸送率低下により降着率の上昇は冷却なしの場合より抑えられる。(Saitoh et al. 2013 と同様のことが起こった。)

円盤との衝突 (3000Rsで規格化)



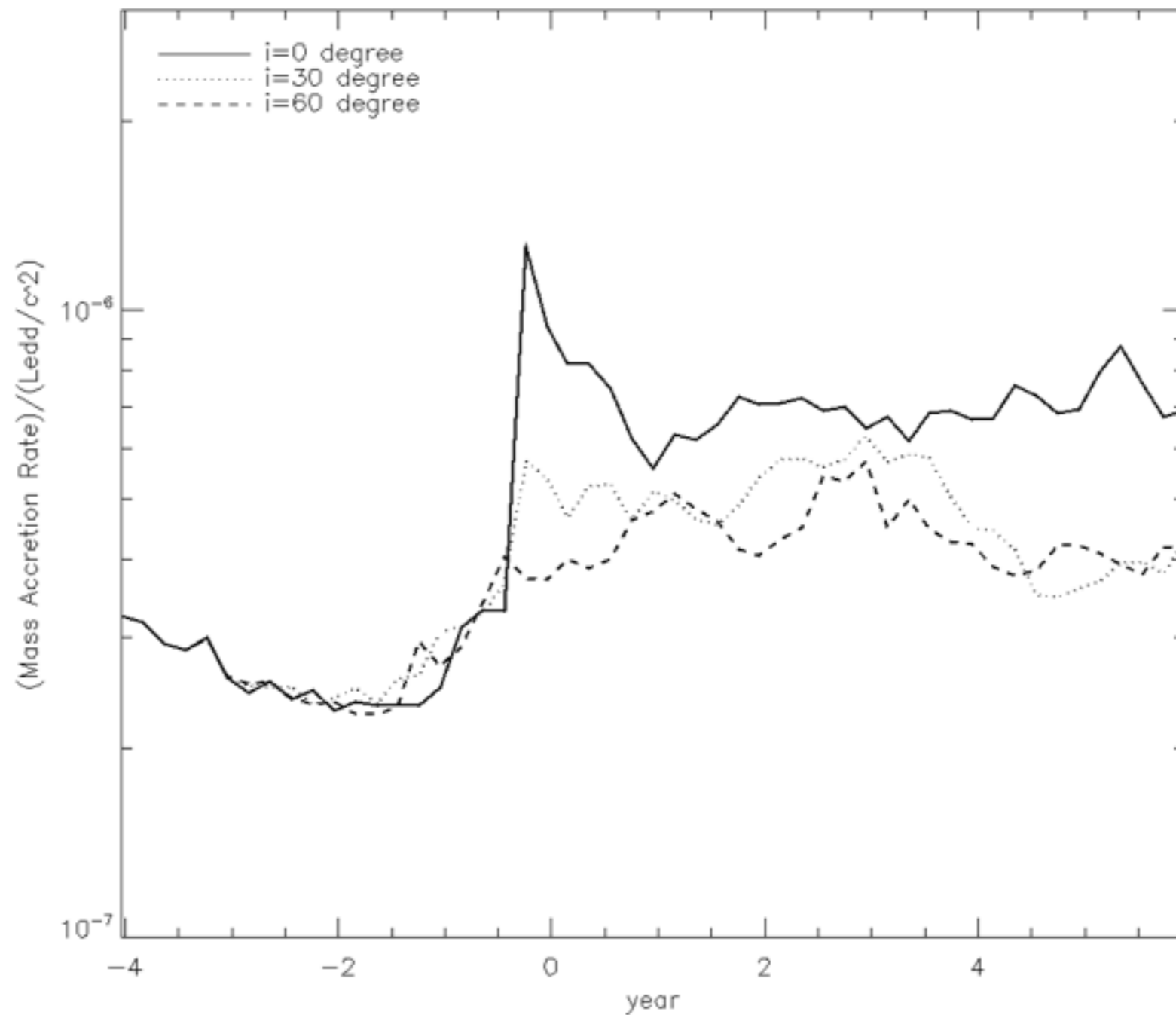
拡大

磁気エネルギーの変化



磁場はやはり増幅しそう

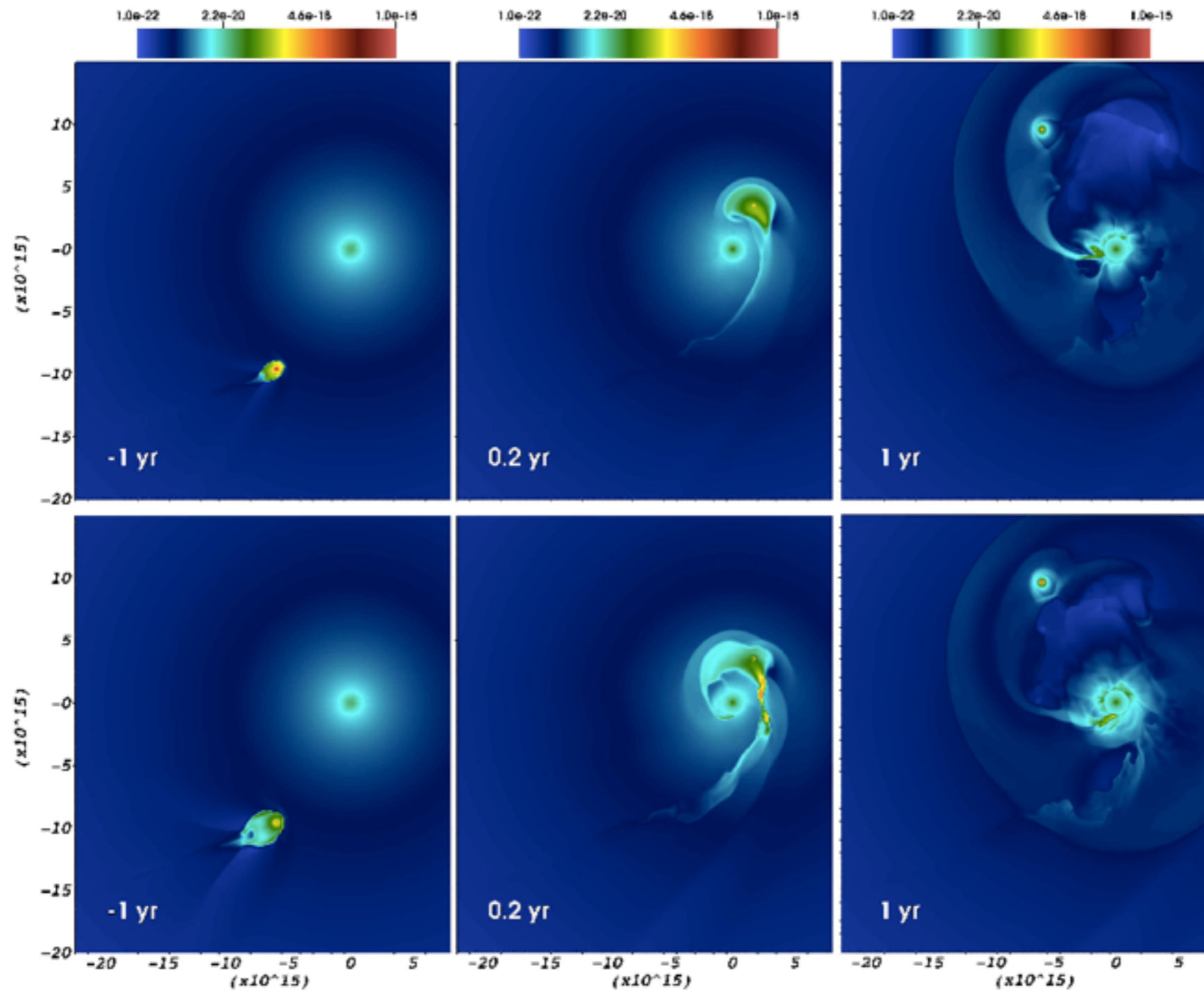
円盤との衝突(2) 質量降着率の変化



- i が大きくてもあまり遅れなくなった。
- 初期のガスの位置を遠くにしたのが原因？

星からのwind?

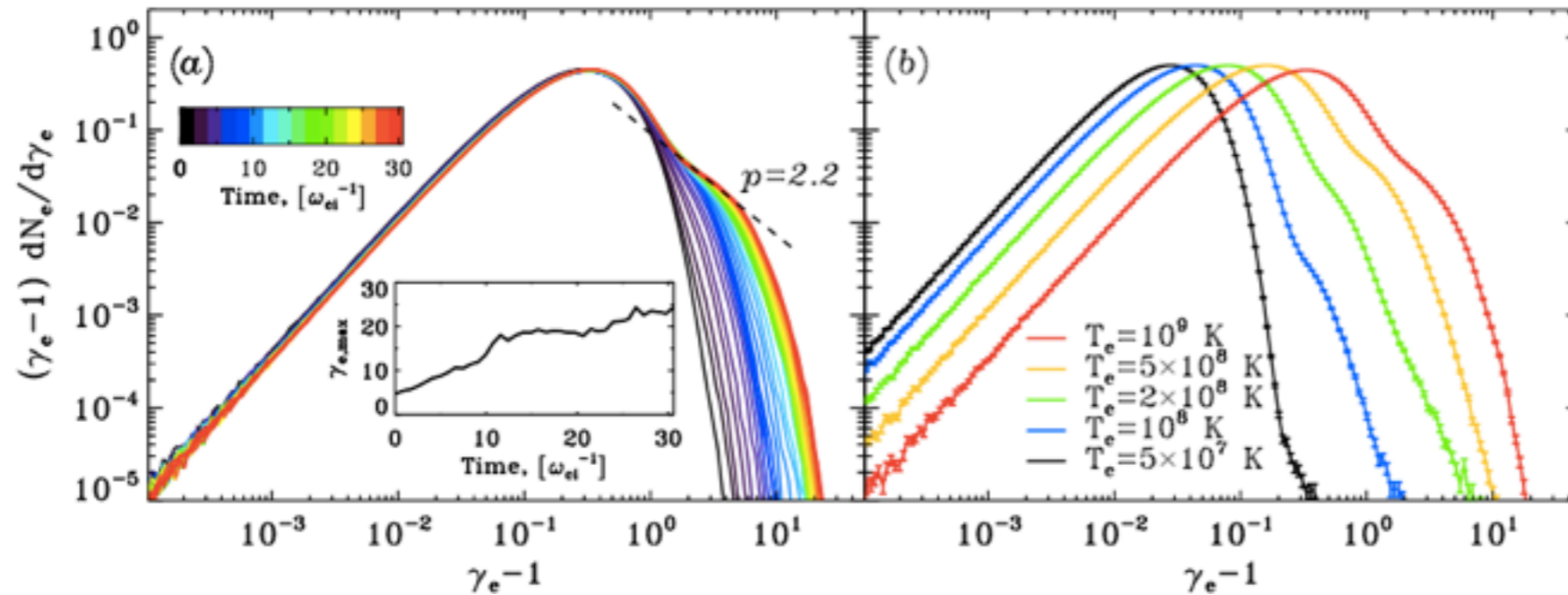
De Colle et al. 2014



- windが星間ガスと相互作用し光る。常にフレッシュなwindを出し続けるので、近点通過後も形はあまり変わらない。

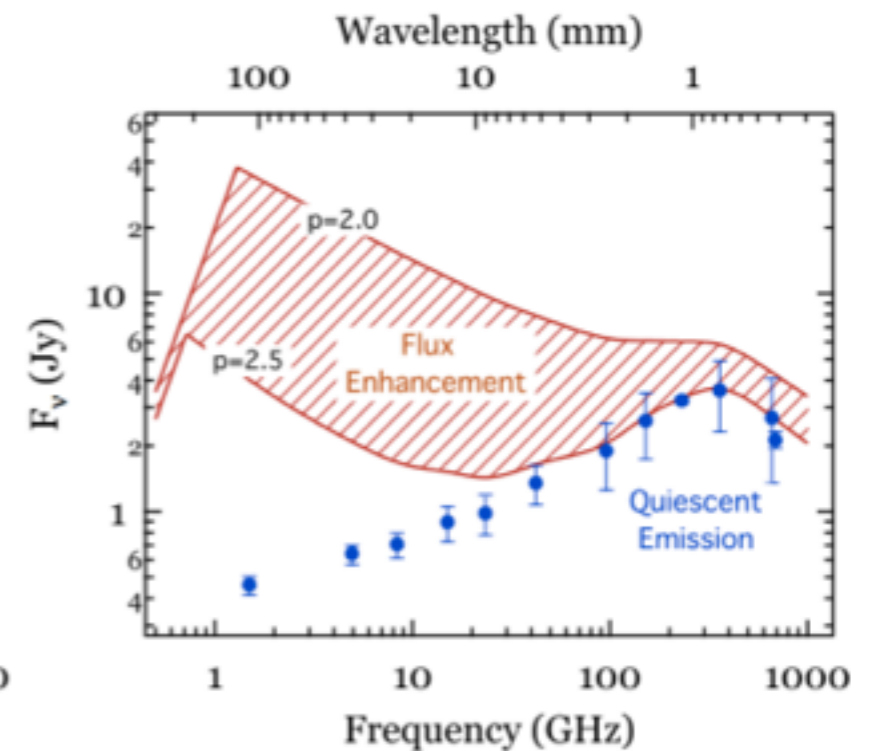
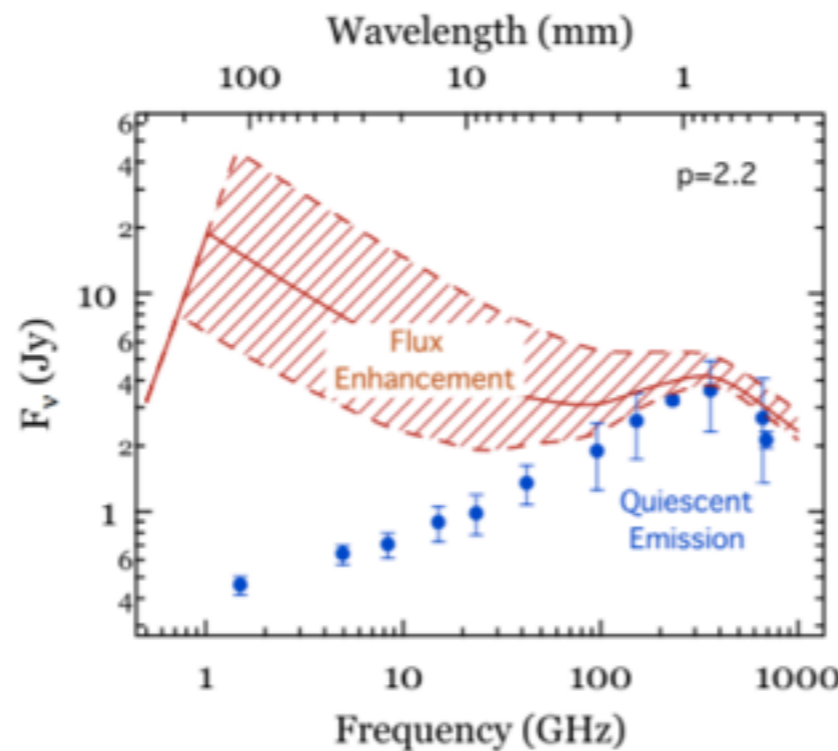
電波で明るくなるはずだった

Narayan et al. 2012



← 電子のエネルギー分布

予想電波強度→



- MHDシミュレーション・データをもとにプラズマシミュレーションを実施して再考を行いたい。

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。(冷却入りは世界初)
- 質量降着率は、早めに増加？光度が大きくなるかどうかは温度にもよるので、今後詳しく調査。
- 磁場は遅れて増加するかもしれない。
- 星の重力を仮定すると、よりコンパクトになる？現在、コードに星の重力場の効果を実装中です。