

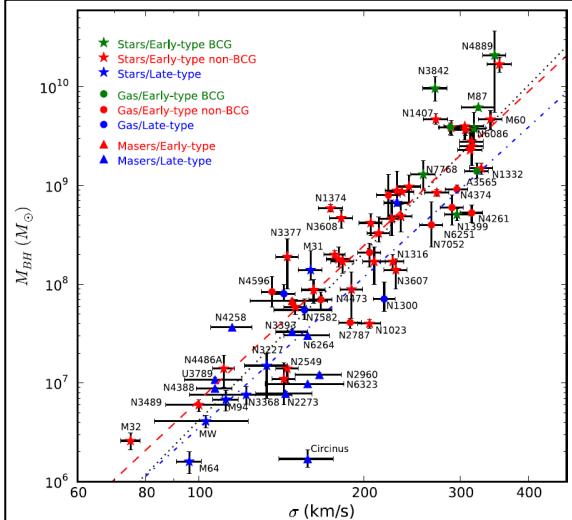
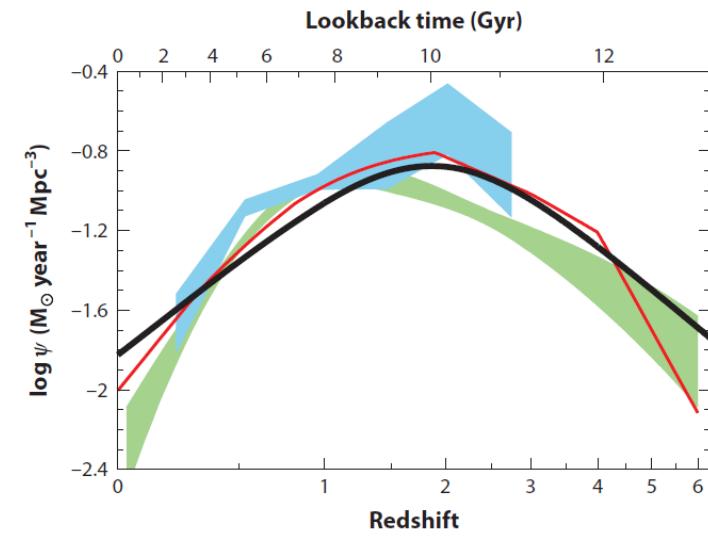
AGNジェットによる 乱流とガス円盤での フィードバック

筑波大学 物理学類 4年
宇宙理論研究室 和間雄司

天体形成研究会 2018.11.02

研究背景

- ◆ 銀河-BHの共進化
 - Madau plot(*Madau & Dickinson, 2014*)
 - $M-\sigma$ 図(*McConnell & Ma, 2013*)
 - 銀河-BHの相互作用が必要
 - ◆ AGNフィードバック
 - 銀河形成の重要な理論の1つ
 - ◆ 相対論的ジェットとISMの相互作用
 - AGNフィードバックの一種
 - その方法は詳しくはわかっていない



研究背景

◆ 本研究の目的

- 相対論的ジェットとISMの相互作用の中でも特に、円盤銀河においてジェットがガス円盤の乱流にどのように影響を及ぼすのかを調べる

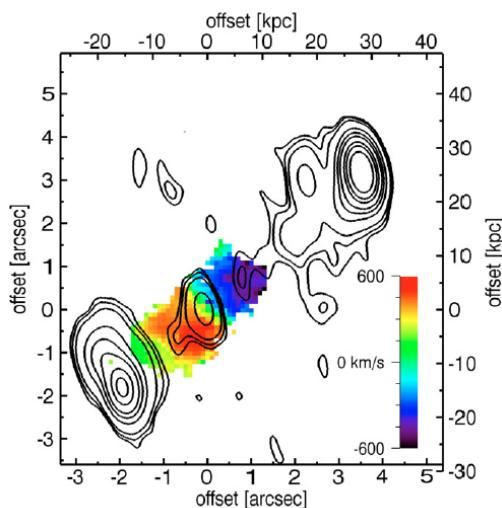
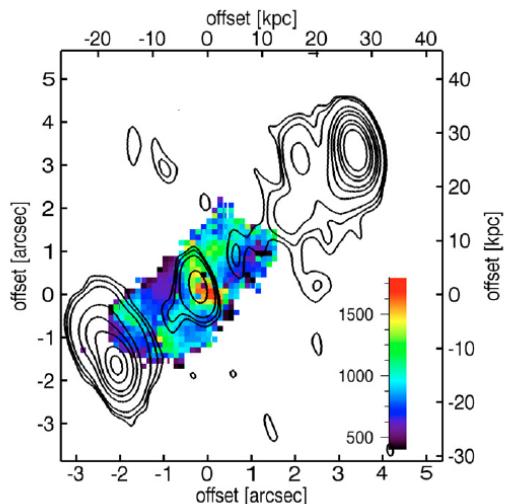
参考論文

Relativistic jet feedback III: feedback on gas disks
Dipanjan Mukherjee et al. 2018

- ◆ 高密度・乱流をもつガス円盤(半径~2kpc)と相対論的ジェット間の相互作用の研究
- ◆ 平均密度・ジェット強度・円盤に対するジェットの噴射角を変えてシミュレーションを実施

Background ~ガス円盤でのフィードバック~

- ◆ $z \sim 2$ の高赤方偏移宇宙では、ガス円盤銀河が多数 (*Glazebrook 2013; Wisnioski et al. 2015*)
 - AGNがこのようなガス円盤銀河で発生すると、ジェットはガス円盤中の平円盤構造を通過
 - 高赤方偏移の電波銀河からのフィードバックの観測結果でこのシナリオは確認済(右図) (*Nesvadba 2008*)
- ◆ 平円盤構造の場合、ジェット経路に沿う柱は低い
 - ジェットフィードバックが銀河のISMに重要な影響を与えるかは明らかではない



Background ~今回のシミュレーション~

◆ 動機

- ジェットやエネルギー・バブルが、広がった規模($\geq 1 kpc$)で円盤とどのように結びつくか
- ジェットの円盤に対する角度の依存性
- 円盤の動力学、乱流に対する影響
- 星形成率との密接な関係

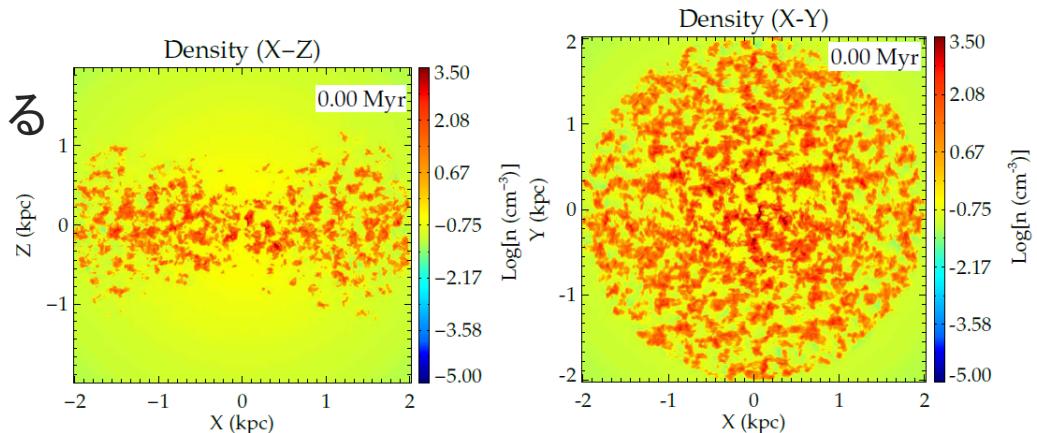
Simulation Setup ~使用コード・初期条件~

◆ 使用するコード PLUTO...相対論的流体力学モジュール

- Grid Code
- 相対論的Riemannソルバー・原子冷却・外部重力を使用
- 乱流速度分散を持つ回転円盤を構築

◆ 初期密度は図の通り

- 高赤方偏移銀河において
観測されている
塊状の星形成領域と似ている



Simulation Setup ~ジェットのパラメータ~

◆7種のシミュレーションでパラメータを表のように設定

◆ θ_{inc} : z軸とジェットのなす角

◆ χ : 比熱比・ジェット圧・密度で決まるパラメータ

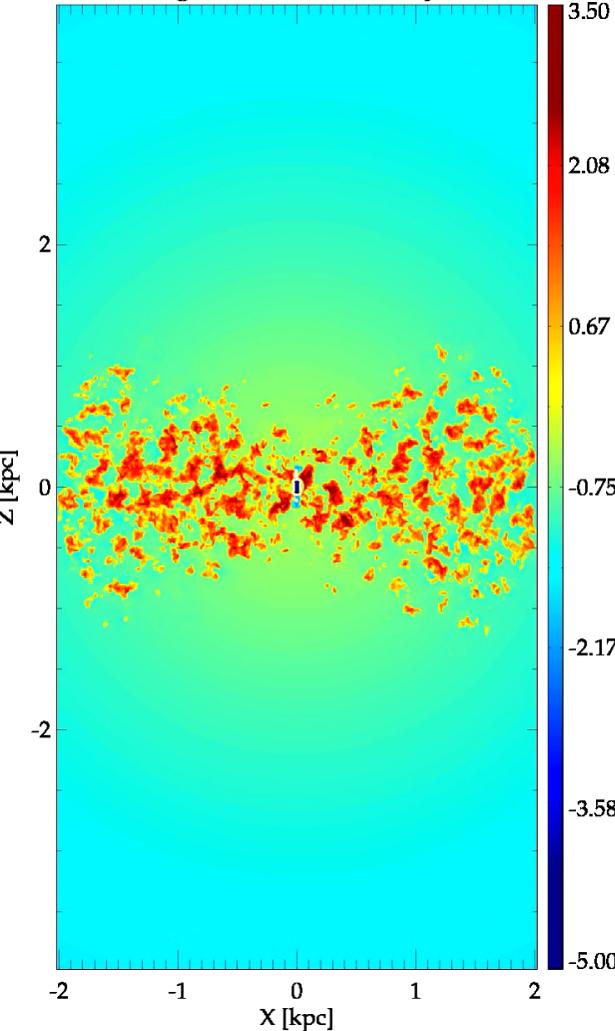
$$\chi = (\gamma - 1/\gamma) \rho c^2 / p_{\text{jet}} \quad \gamma = 5/3 \text{ と仮定} \quad c: \text{光速}$$

◆ Γ : Lorentz因子

Simulation Label	Power (ergs^{-1})	n_{w0} (cm^{-3}) ^a	θ_{inc} ^b	χ ^c	Γ ^d	Gas Mass ($10^9 M_\odot$)
A	10^{45}	100	0	10	5	2.05
B	10^{45}	200	0	10	5	5.71
C	10^{45}	200	20	10	5	5.71
D	10^{45}	200	45	10	5	5.71
E	10^{45}	200	70	10	5	5.71
F	10^{46}	100	0	80	10	2.05
G	10^{46}	200	0	80	10	5.71
H	10^{46}	400	0	80	10	20.68

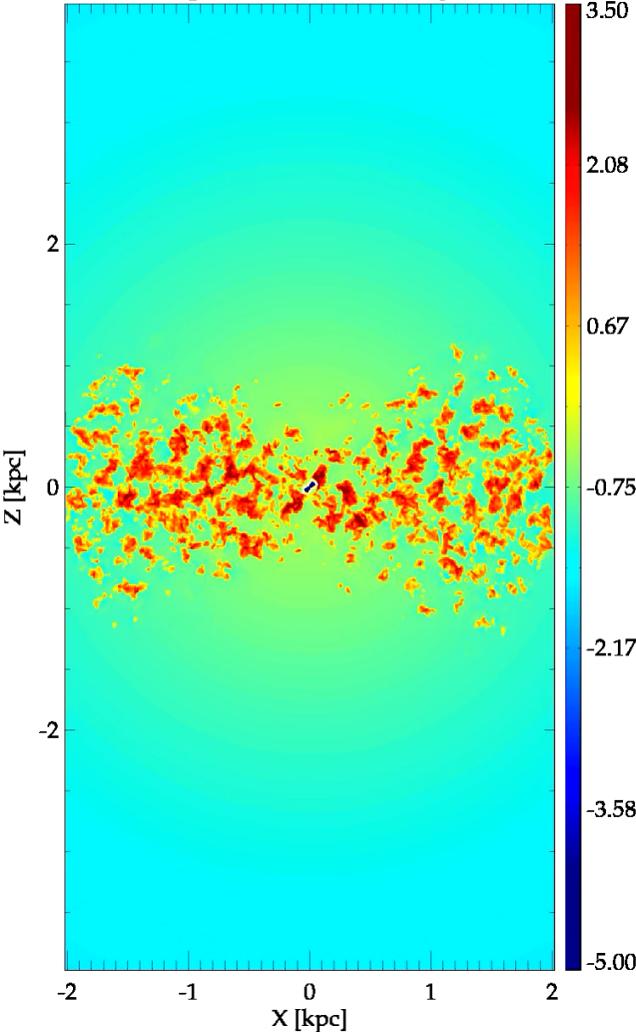
Results ~垂直ジェットの場合~

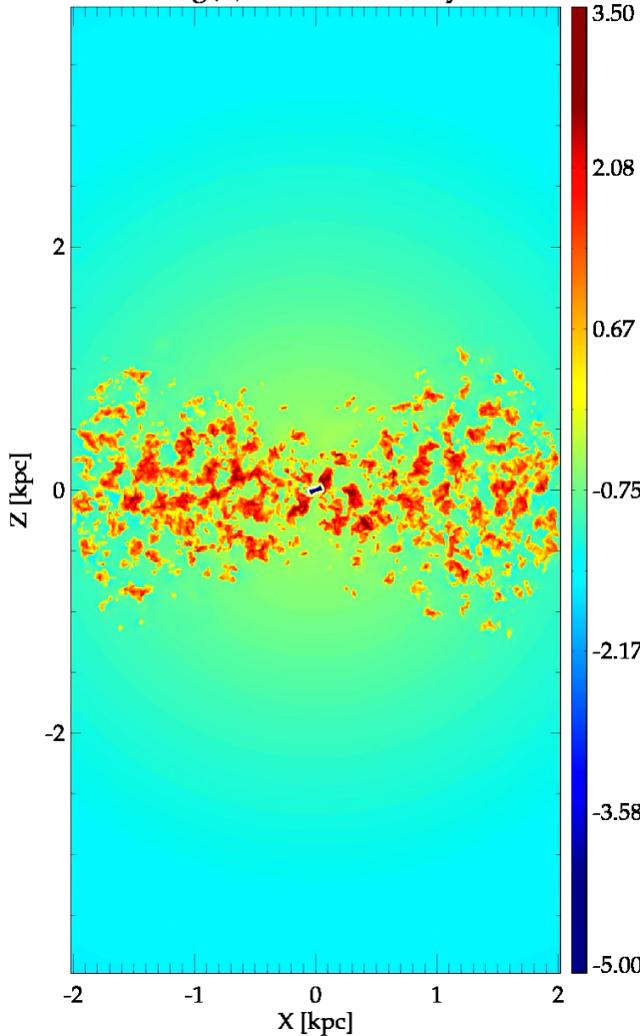
- ◆ ジェットは高圧エネルギー・バブルや
強い衝撃波を生みだす
- ◆ 流されたガスは衝撃波前方の薄い殻に存在
 - 不連続接触における
Rayleigh-Taylor不安定性の特徴
- ◆ 掃き出されたガス
 - 低密・高温→冷却時間 $\sim 1.4 \times 10^{18}$ [yr]を示唆
- ◆ エネルギー・バブル内の圧力
 - ほぼ一定
 - 時間発展は断熱的に膨張する
エネルギー・バブルの自己相似解に近い



Results ~傾いたジェットの場合~

- ◆ 傾いたジェットの研究は少ない
 - 実際に傾いたジェットを持つ銀河が多い
 - 円盤面内に存在するジェットもある
- ◆ ジェットを円盤に対して傾けて計算
 - C:20[deg] D:45[deg] E:70[deg]
- ◆ 通過する雲が厚くなる
 - 相互作用が強くなる
 - すぐには掃きだせない
 - 雲によりジェットが屈折





Results ~ジェットの傾角依存性~

◆ 傾いたジェットの方がより相互作用

- 通過するガス柱の高さが高くなる
- 45[deg]の場合が最も雲を広く吹き飛ばす
- 視線速度の増加
 - 傾角が大きい方が増加し続ける
B,C : ~0.5Myr で減少へ
D,E : ~1Myr

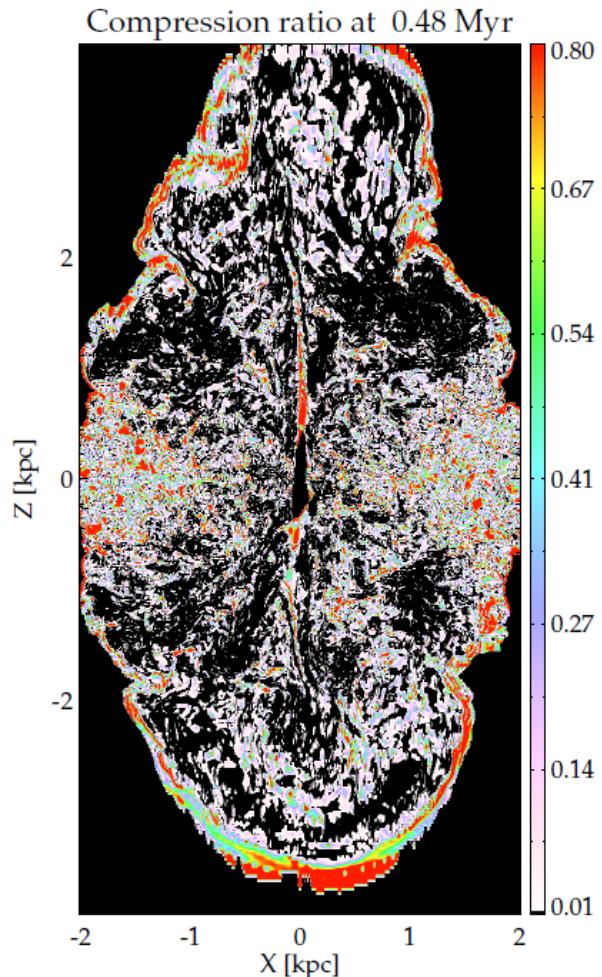
Results ~中心からの垂直アウトフロー~

- ◆ 中心領域($r \leq 500\text{pc}$)
 - ジェットは衝撃波のアウトフロー
- ◆ ジェットと雲の相互作用
 - 加速され掃きだされる
- ◆ 終盤では1kpcを超えて広がる
- ◆ 円盤から1.5kpc以上の高さまで排除されたガスの質量(右図)
 - ジェットパワーが大きいほど多い
 - 傾き角が45度(Sim. D)で最大
- ◆ 排除質量は円盤質量のごく一部

Simulation	Mass ejected ^a
A	$3.71 \times 10^3 M_{\odot}$
B	$2.17 \times 10^5 M_{\odot}$
C	$6.92 \times 10^4 M_{\odot}$
D	$4.11 \times 10^6 M_{\odot}$
E	$3.55 \times 10^6 M_{\odot}$
F	$2.23 \times 10^6 M_{\odot}$
G	$4.33 \times 10^6 M_{\odot}$
H	$1.98 \times 10^6 M_{\odot}$

Results ~円盤内の乱流~

- ◆ ジェットに誘発された流れ
 - 円盤内に運ばれ、乱流を誘発
- ◆ 圧縮性vs非圧縮性
 - 圧縮比 $r/c = \nabla \cdot v / 12 / (\nabla \cdot v / 12 + \nabla \times v / 12)$ を評価(右図)
 - 円盤中心と縁では圧縮性が支配的
 - 衝撃波と円盤や外部領域との衝突
 - それ以外ほとんどは非圧縮性が支配的



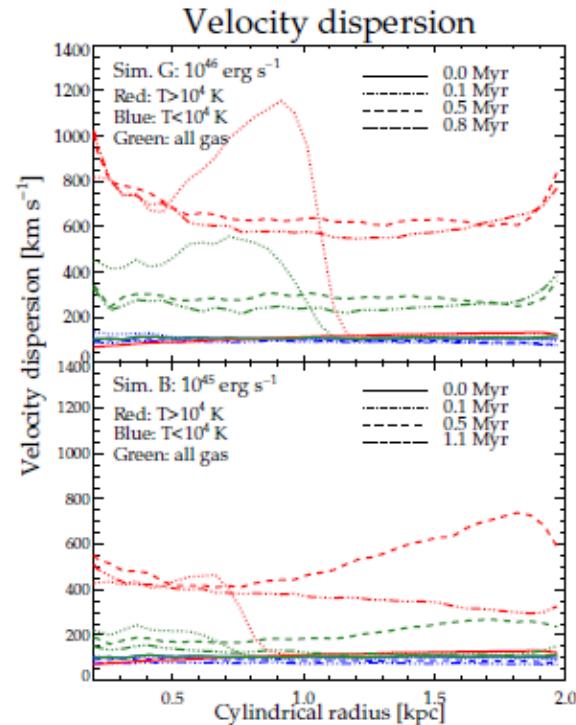
Results ~円盤内の乱流~

◆ 質量で重みを付けた速度分散(右図)

- $V \downarrow i = 1/M \sum \rho V \downarrow i$, $\sigma \downarrow i \parallel 2 = 1/M \sum \rho (V \downarrow i - V \downarrow i \parallel)^2$
- $\sigma \parallel 2 = 1/3 (\sigma \downarrow r \parallel 2 + \sigma \downarrow z \parallel 2 + \sigma \downarrow \phi \parallel 2)$
- 赤：衝撃波の影響を受けたガスの分散
- 青：衝撃波の影響を受けていないガスの分散
- 緑：トータル

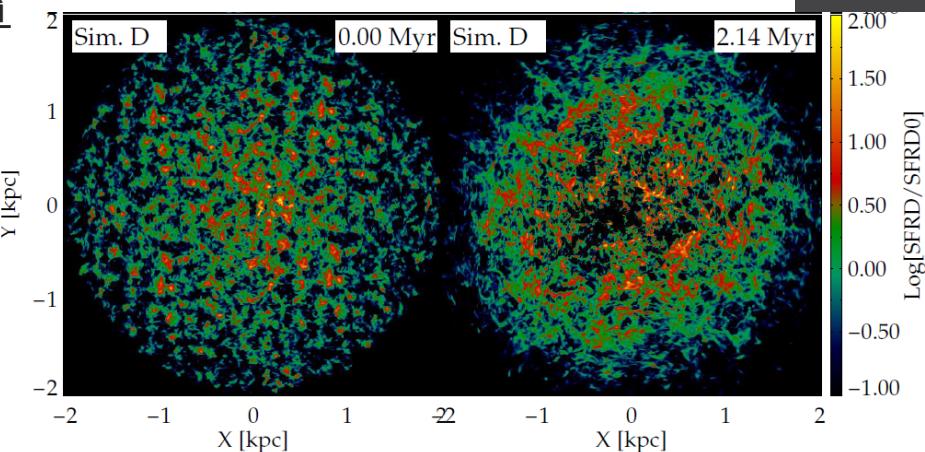
◆ 赤が初期値より大きく増加

- ジェットが円盤内に運んだ衝撃波が強い乱流を発生させていることを示す



今後の展望

- ◆ AGNの及ぼす乱流で星形成が統制されるか
先行研究のデータをもとに解析コードを作成・適用
 - 速度と密度場のFourierスペクトルの計算
 - ストラクチャー・ファンクションの計算
 - Helmholtz 分解
 - 乱流エネルギースペクトルの計算
 - 乱流と星形成率の関係



今後の展望

- ◆ シミュレーションを実行
 - より乱流に焦点を当てて
 - 星形成率をシミュレーション内で計算
 - 観測データとの比較
 - 例：3C326

Fin.

ご清聴ありがとうございました

Simulation Setup② ~セル分割~

◆ セル分割

- X:4kpc-Y:4kpc-Z:8kpc → 672-672-784セル
- X方向・Y方向は一様な格子
- Z方向：中心($\pm 1.6\text{kpc}$)を544セルに
外側($\pm 1.6\sim 4.0\text{kpc}$)を 120×2 セルに
- 【解像度】
中心： $6\text{pc}/3$ 程度
外側：z方向だけ1.017倍に延ばされた

Simulation Setup③ ~初期密度~

◆ ハローガス

- $n \downarrow h(R) = n \downarrow h(0) \exp \{-\phi(R)/k \downarrow B T / (\mu m \downarrow a)\}$
 - $\mu \sim 0.6$: 平均分子量
 - $m \downarrow a = 1.6605 \times 10^{17} - 24$ [g cm $^{-3}$] : 原子質量単位

□ コア半径を越したところで急激に減少

◆ 暖相の密度

- $n \downarrow w(r,z) = n \downarrow w(0,0) \exp \{-1/\sigma \downarrow t^{1/2} [\phi(r,z) - \epsilon^{1/2} \phi(r,0) - (1 - \epsilon^{1/2}) \phi(0,0)]\}$
 - 速度の方位角方向成分を $v \downarrow \phi = \epsilon \sqrt{\Box} r \partial \phi(r,z) / \partial r$ と, Kepler速度の ϵ 倍と仮定.
更に $\epsilon = 0.93$ で固定

Introduction ~ジェットフィードバックの概要~

◆ 大規模BH中心からのフィードバックの機構

□ クエーサーモード

- 流出物が星形成物質を銀河から散らす
- 風は広角であり、明るいAGNからの輻射圧によるものとされている

□ ラジオモード

- 中心BHからの大規模ジェットがIGM(銀河間物質)を熱す
- 流れの冷却や銀河の質量獲得を妨げる

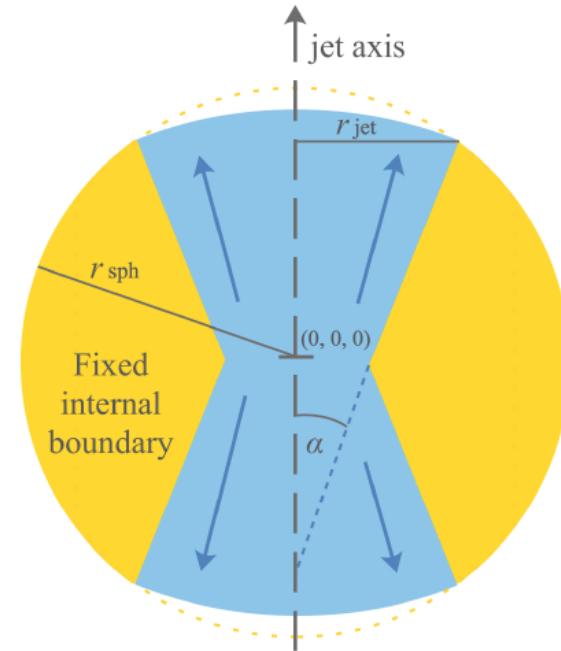
□ 観測的証拠は両者ともに豊富

Introduction ~以前のシミュレーション~

- ◆ 過去のシミュレーション
(*Sutherland & Bicknell, 2007; Gaibler et al., 2011, 2012; Dugan et al., 2017; Cielo et al, 2017*)
 - ジェット軸から数kpc離れてもガス分布に影響を与える
- ◆ 問題点
 - ジェットのパワー・ISM密度・ジェットの角度を系統的に扱えていない
 - しばしば、相対論的効果、外部重力、原子冷却のような本質的な物理が無視されている

Simulation Setup ~ジェットのパラメータ~

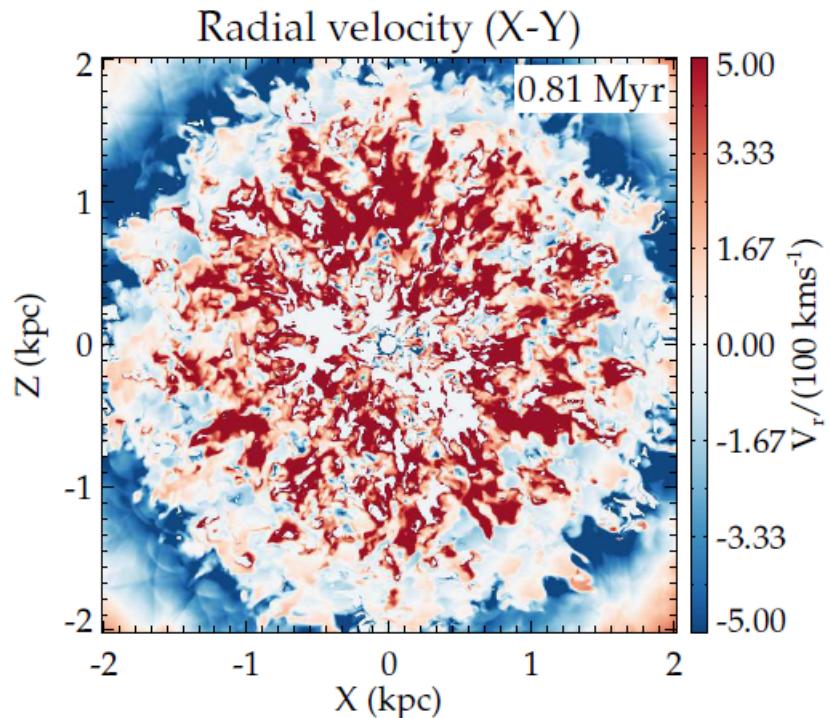
- ◆ $\alpha=20[\text{deg}]$: 開き角
- ◆ $r_{\text{jet}}=30[\text{pc}]$: 注入領域のジェット半径
→ 10セル相当
- ◆ $r_{\text{sph}}=60[\text{pc}]$: 内部領域の半径
→ この中は時間進化しない



Results ~円盤平面内の外向き放射流~

◆ 円盤面内の強い外向きの放射流

- エネルギーバブルの内部圧の影響
- 初期
 - 視線速度は平均0
(内向き外向き同程度)
- 終盤(右図)
 - エネルギーバブルが円盤を覆う
 - 視線速度は外向きが増える



Results ~ジェットのアウトフローに起因するガスの非回転運動~

◆ 異方性パラメータ β vs 半径 r (右図)

□ $\beta_{\text{aniso}} = \langle V_r^2 \rangle + \langle V_z^2 \rangle / 2 \langle V_\phi^2 \rangle$

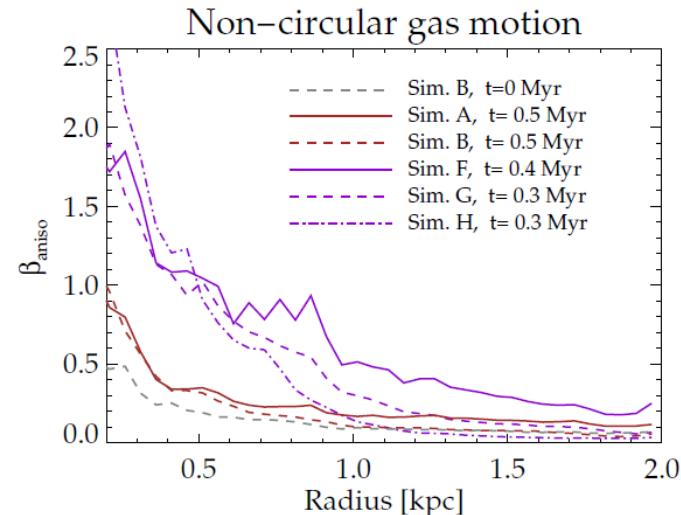
- $\beta \sim 0$: 回転運動
- $\beta \geq 1$: 特徴的な非回転運動

□ $t=0$ の初期(灰色破線)

- ほぼ回転運動
- 若干の β はガス円盤の乱流によるもの

□ その後

- β は増加→非回転運動の発生を示唆



Results ~エネルギー・バブルによる円盤内側への流れ~

◆ 横方向に広がったエネルギー・バブル

- ~500km/sのスピードで円盤に入り込む
- 冷たかった円盤成分の温度上昇
 - 一般には星形成にネガティブな影響と考えられている
- 圧力上昇や密度上昇によって星形成が成長

