冬眠するブラックホール

三木洋平（東京大学 情報基盤センター）

共同研究者：
森正夫（筑波大学）
川口俊宏（尾道市立大学／国立天文台）

講演内容の概要

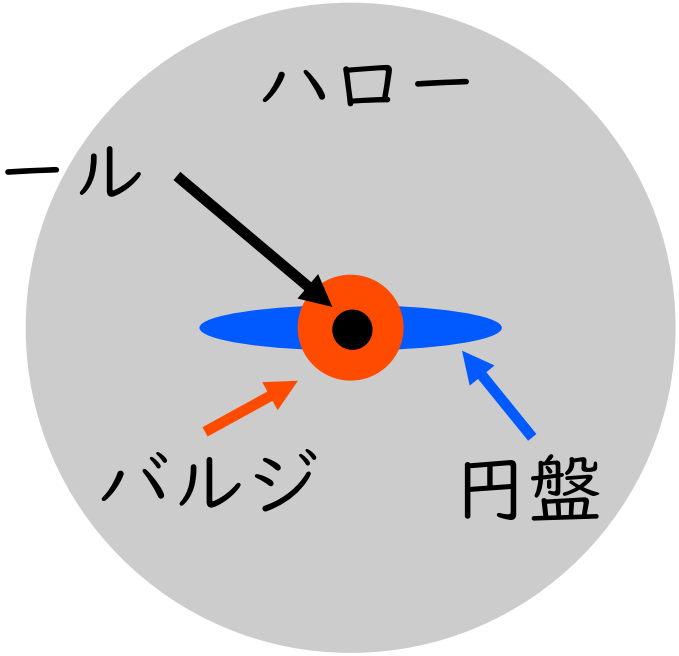
- 銀河，ブラックホール，ブラックホール活動の概説
- 研究成果の紹介
  - 仮説：銀河衝突はブラックホール活動を停止できるか？
  - スーパーコンピュータを用いた3次元数値流体計算の結果

- 論文情報：

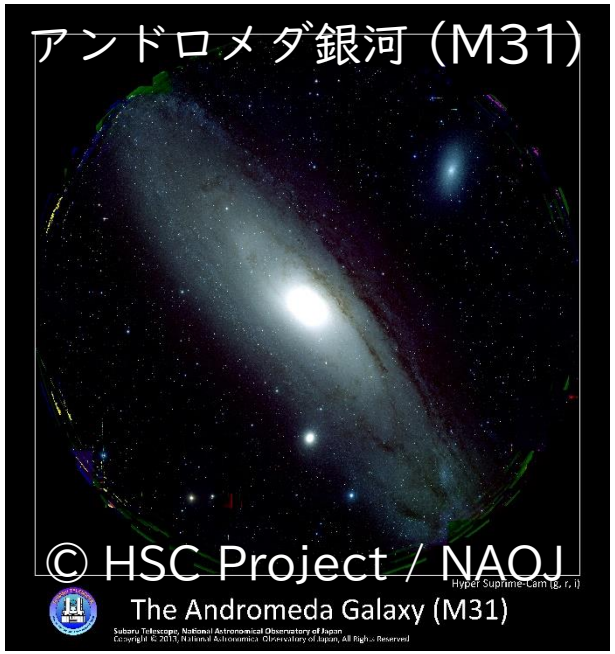
Miki et al. (2021), Nature Astronomy, 5, 478-484

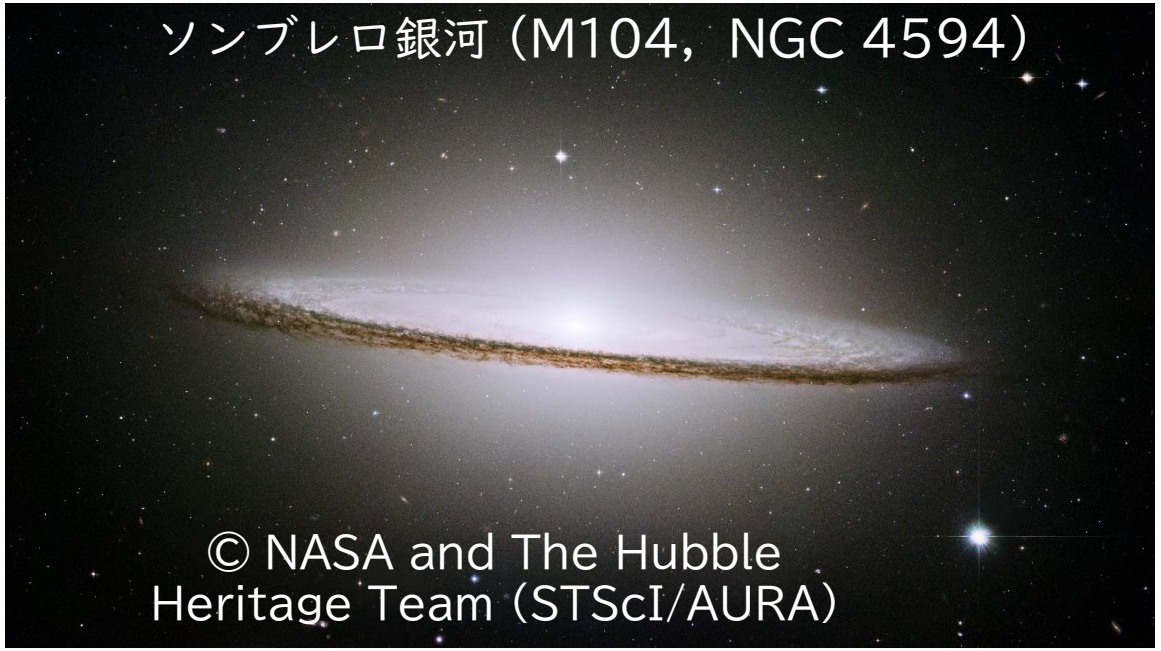
- https://rdcu.be/cebgO

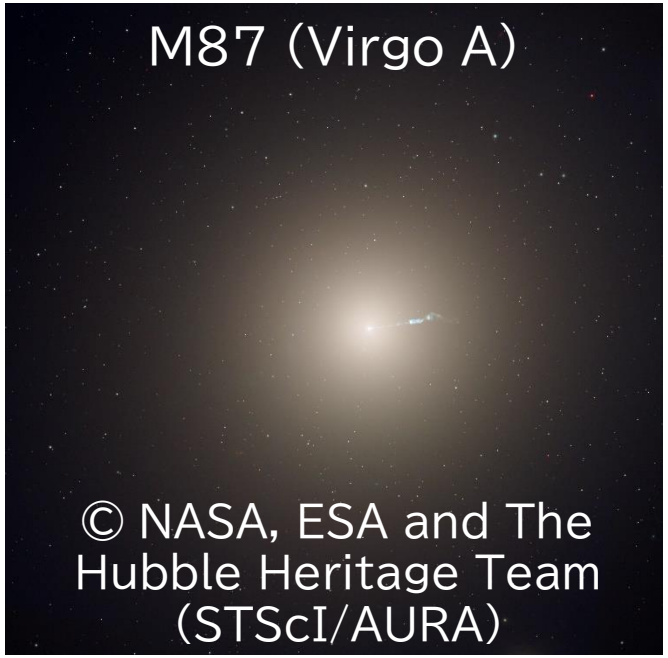
銀河



- 星，ガス，ダークマターからなる天体
  - 天の川銀河（銀河系），アンドロメダ銀河など
  - 質量: $10^{7-13} M_\odot$（$M_\odot$は太陽の質量）
  - サイズ: 10^{3-6}光年
  - 中心に大質量ブラックホール

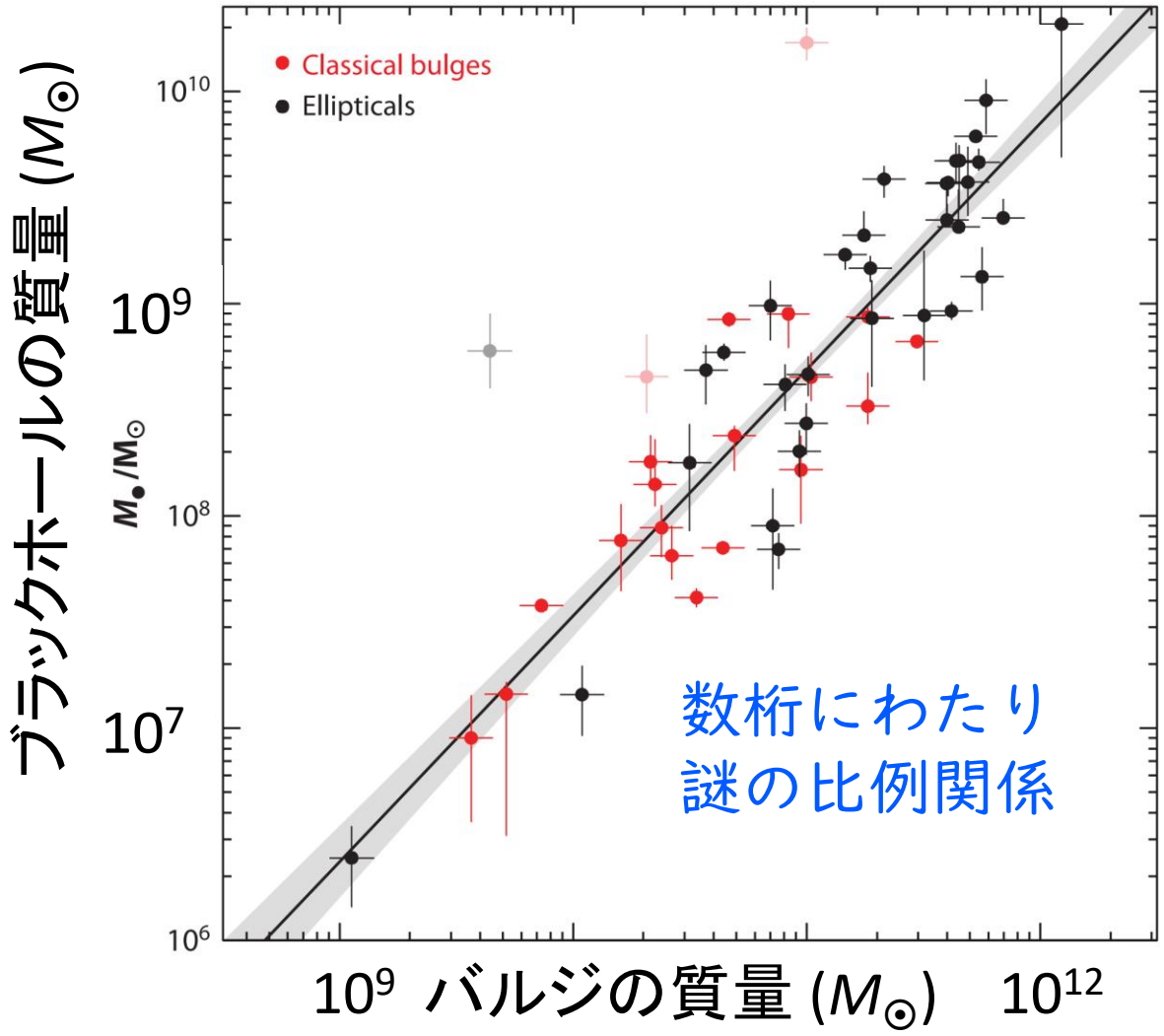






銀河と中心ブラックホールの関係

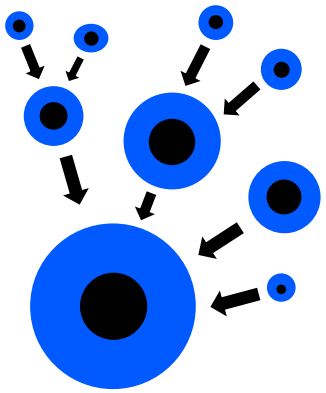
Kormendy & Ho (2013)



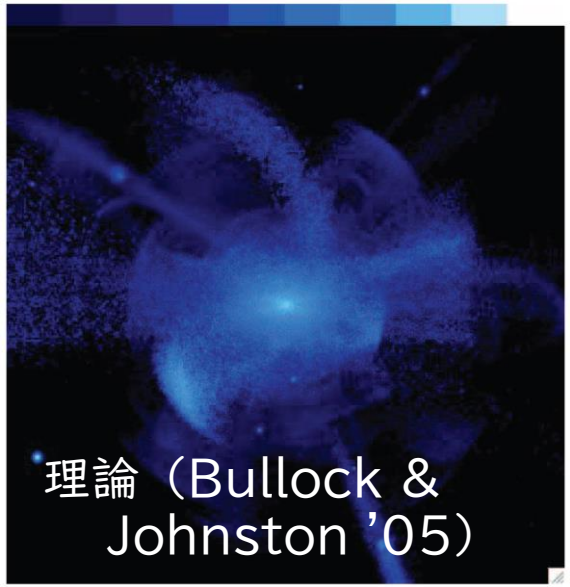
- 銀河の中心領域には $10^{6-10} M_\odot$ の大質量ブラックホール（MBH）が普遍的に存在
- ブラックホール質量がバルジ質量に比例（マゴリアン関係）
- 銀河とMBHの共進化：銀河とMBHが互いに影響を及ぼしあいながら成長してきた
- MBHの形成・成長過程はよく分かっていない
  - ガス降着による成長
  - 銀河衝突に伴うBH合体

標準的な銀河進化シナリオ

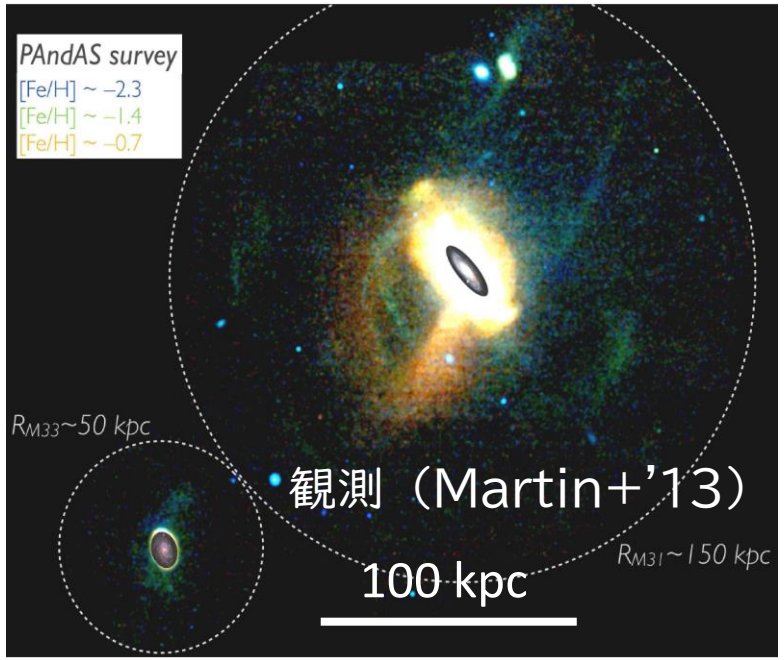
- 小さい構造から先にでき，互いに衝突・合体を繰り返して銀河や銀河団といった大きな構造へと成長



- 銀河の衝突・合体：
  - 銀河進化を考える上で重要な過程
  - 銀河が合体する時に中心ブラックホールどうしも合体すれば，両者の比例関係を維持
    ➔ 銀河と中心ブラックホールの共進化を考える上でも重要な素過程



銀河の周りに残る衝突痕跡



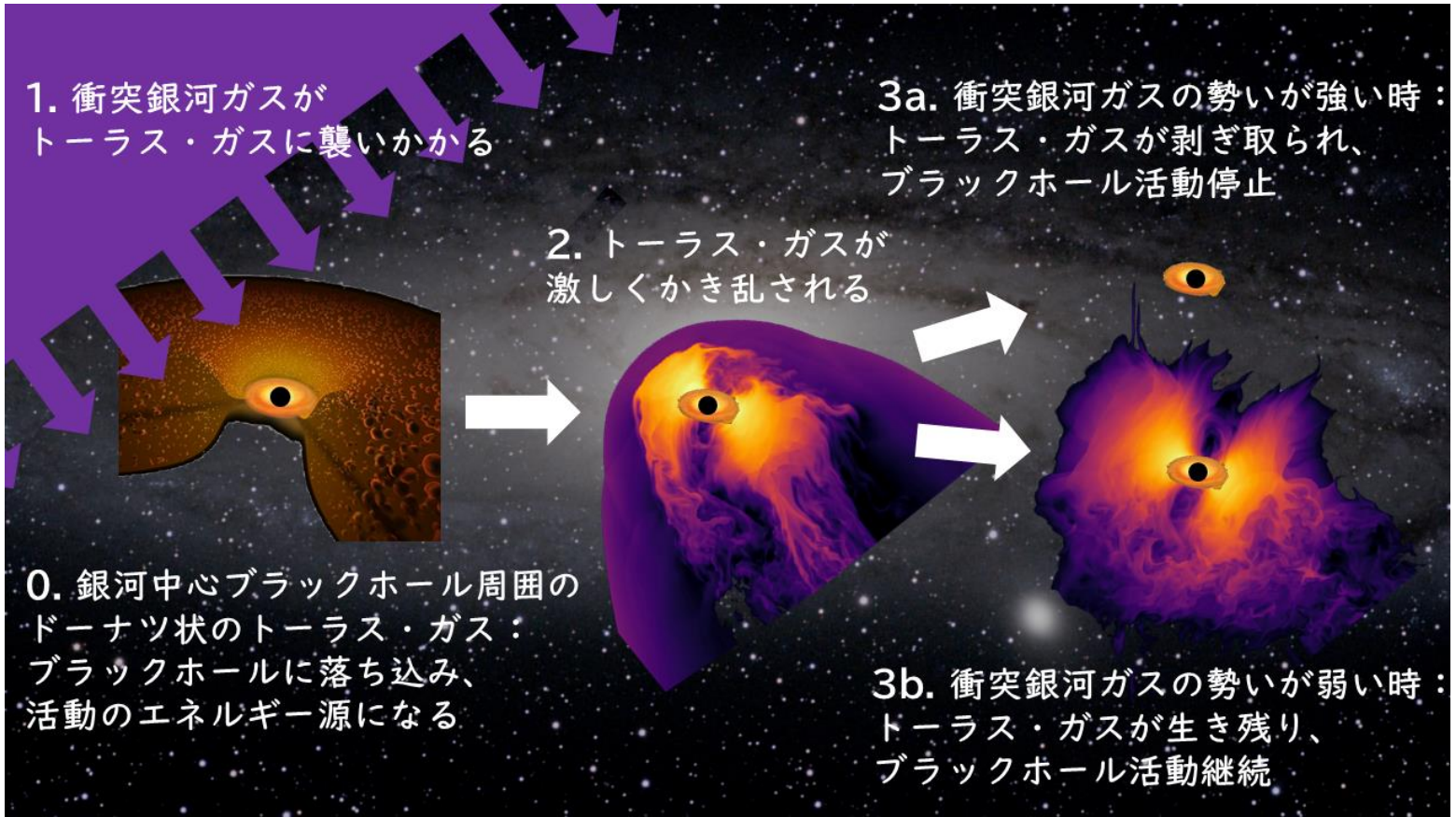
銀河中心ブラックホール活動

- 銀河中心ブラックホールに十分な量のガスが降着
  ➔ガスの位置エネルギーの解放
  ➔活動銀河核として明るく輝く
- 銀河衝突はブラックホール活動を点火：これまでの“常識”
  - 銀河中心へのガス供給の障害は，角運動量（遠心力）バリアー
  - 銀河衝突によって，角運動量輸送が促進され，ガスが中心へと落下
  - 銀河衝突は，銀河が日常的に（頻繁に）経験するありふれた現象
  - BH周辺では，トーラス（ドーナツ）状の構造がガスの“ため池”
- 銀河中心ブラックホールが明るく輝いているのは1億年程度
  - 宇宙年齢138億年の1%程度の期間だけ
  - 多くの銀河中心ブラックホール：ガス欠でエネルギー源の枯渇状態
  - 天の川銀河，アンドロメダ銀河の中心ブラックホールも冬眠状態

https://chandra.harvard.edu/resources/animations/black_hole_lg.mpg

銀河衝突はブラックホール活動を停止できる？

- 銀河衝突によって中心ブラックホールへのガス供給源を取り去ってしまうことは可能か？
  - 可能ならば，やがて中心ブラックホールはガス欠状態に陥る
  - これまでの“常識”とは逆に，銀河衝突がブラックホール活動を消火

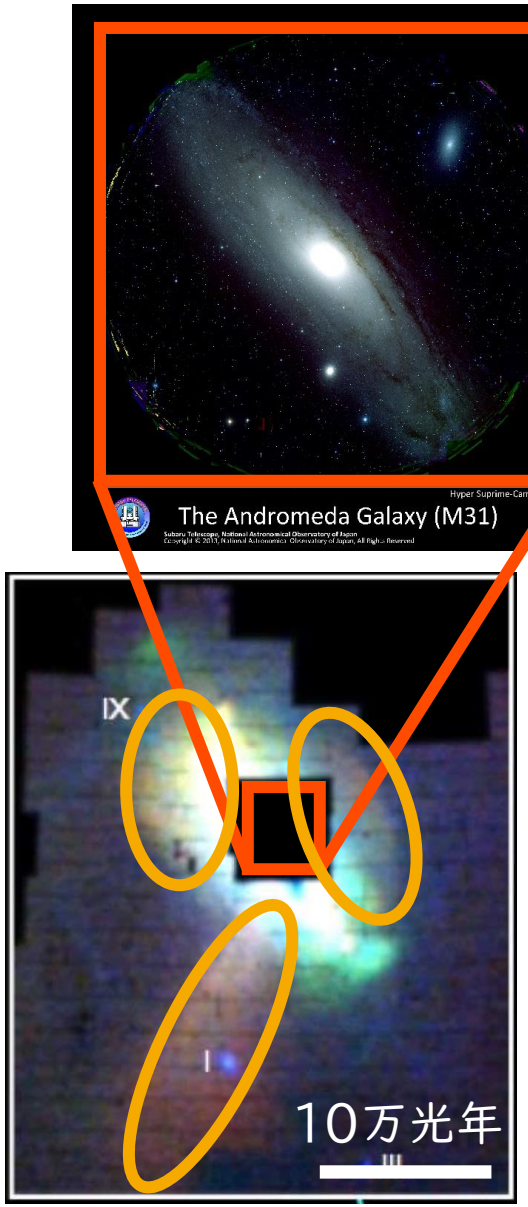


- 相打ちに、
落ちていった衛星銀河は破壊されて粉々に

© HSC Project / NAOJ

アンドロメダ銀河に注目して検証

- アンドロメダ銀河の中心ブラックホールは冬眠状態
- 10億年程度過去に，衛星銀河がアンドロメダ銀河中心を射抜いたと考えられている
  - この銀河衝突で破壊された衛星銀河の残骸が，現在観測されている筋状・貝殻状構造を形成
- 過去の研究で分かっていること（YM+'14, '16）
  - 落下した衛星銀河はアンドロメダ銀河中心を射抜いた
    - 重心はアンドロメダ銀河中心から3000光年の位置を通過
    - 衛星銀河コアのサイズも3000光年程度
  - 衛星銀河はアンドロメダ中心領域を秒速850 kmで通過（100万年程度）
- トーラス・ガスは100万年間に渡って吹き付けてくる高速なガス流に耐えられるか？



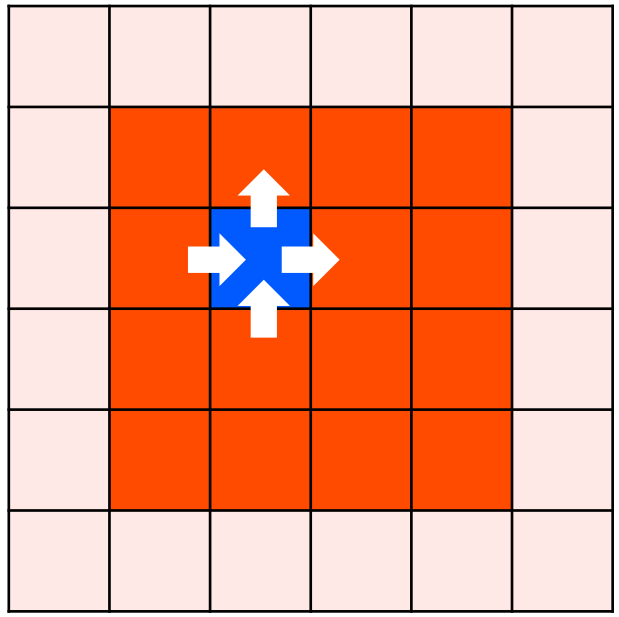
McConnachie+'09

流体力学（fluid dynamics）

- 流体（気体や液体）の挙動を調べる
- 基礎方程式（宇宙物理ではEuler方程式のことが多い）
  - $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{v}) = 0$ 質量保存
  - $\rho \left[\frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial t} + (\boldsymbol{v} \cdot \nabla) \boldsymbol{v} \right] = -\nabla p - \rho \nabla \Phi$ 運動量保存
    - 右辺第2項は重力項
  - $\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{1}{2}\rho v^2 + \frac{p}{\gamma - 1}\right) + \nabla \cdot \left[v \left(\frac{1}{2}\rho v^2 + \frac{\gamma p}{\gamma - 1} \right) \right] = \rho v \cdot (-\nabla \Phi) + G - \Lambda$ エネルギー保存
    - この表式は理想気体を仮定している
    - 重力項に加えて，輻射によるエネルギーの吸収・放出を考えることもある
      （今回の研究では，外場重力は考慮しているが放射冷却などは入れていない）

数値流体力学
（CFD: computational fluid dynamics）

- 先ほどの偏微分方程式系は，「紙と鉛筆」で解くのは難しい
  - 実際に適用したい問題はかなり複雑な状況設定だったりする
  - ➔ 数値的に解いてあげる
  - 数値計算手法は多数あるので，長所・短所を比較したうえで自分の問題に適した手法を選択する
- 今回は有限体積法を採用
  - 計算領域を細切れに分割
  - 隣接要素間で質量・運動量・エネルギーの流入・流出量を評価
  - 計算領域の「外側」の情報もないと解けない（境界条件）

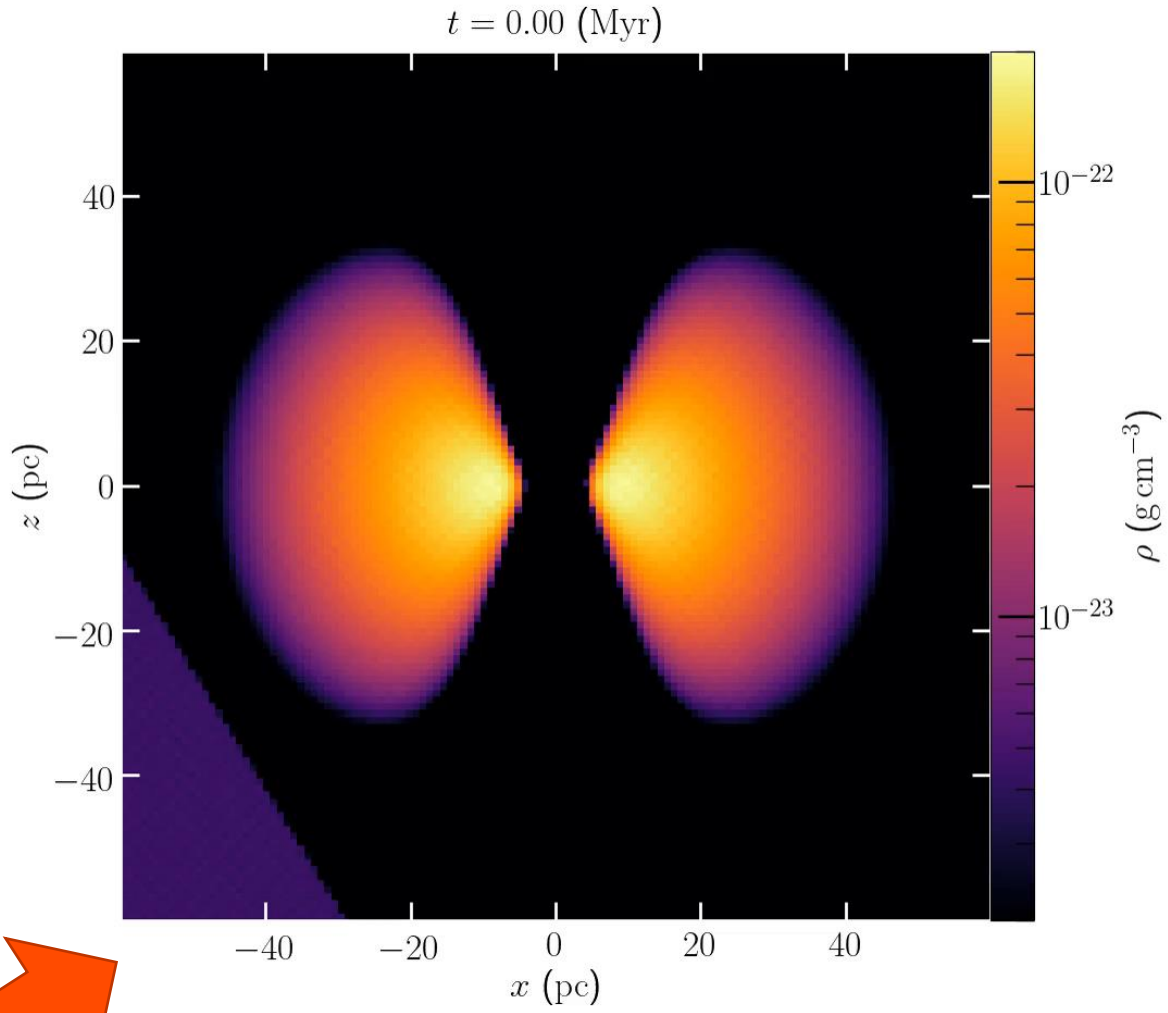


3次元数値流体計算の概要

- アンドロメダ銀河の中心領域だけを切り出した高分解能計算
  - 3次元一様メッシュ
  - HLLC法，空間2次精度（MUSCL）
  - 重力は外場として扱う
  - 断熱の計算
  - 衛星銀河ガスの流入を境界条件として表現
- 今回の研究で用いたスーパーコンピュータ
  - Oakforest-PACS（最先端共同HPC基盤施設）
  - T2K-Tsukuba（筑波大学計算科学研究センター）
  - FIRST（筑波大学計算科学研究センター）

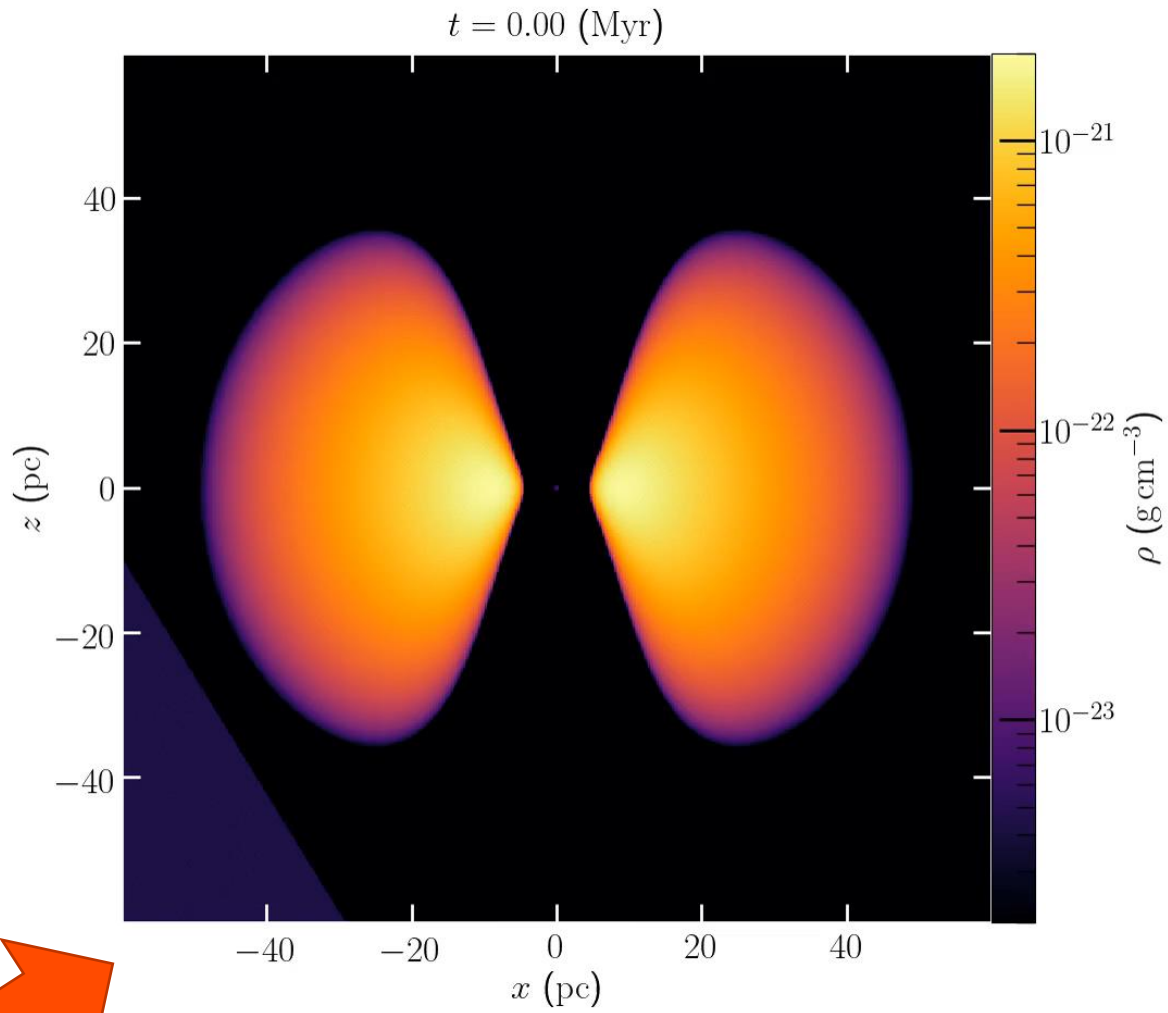
代表的な計算結果（ムービー）

はぎ取られる場合（通常解像度）



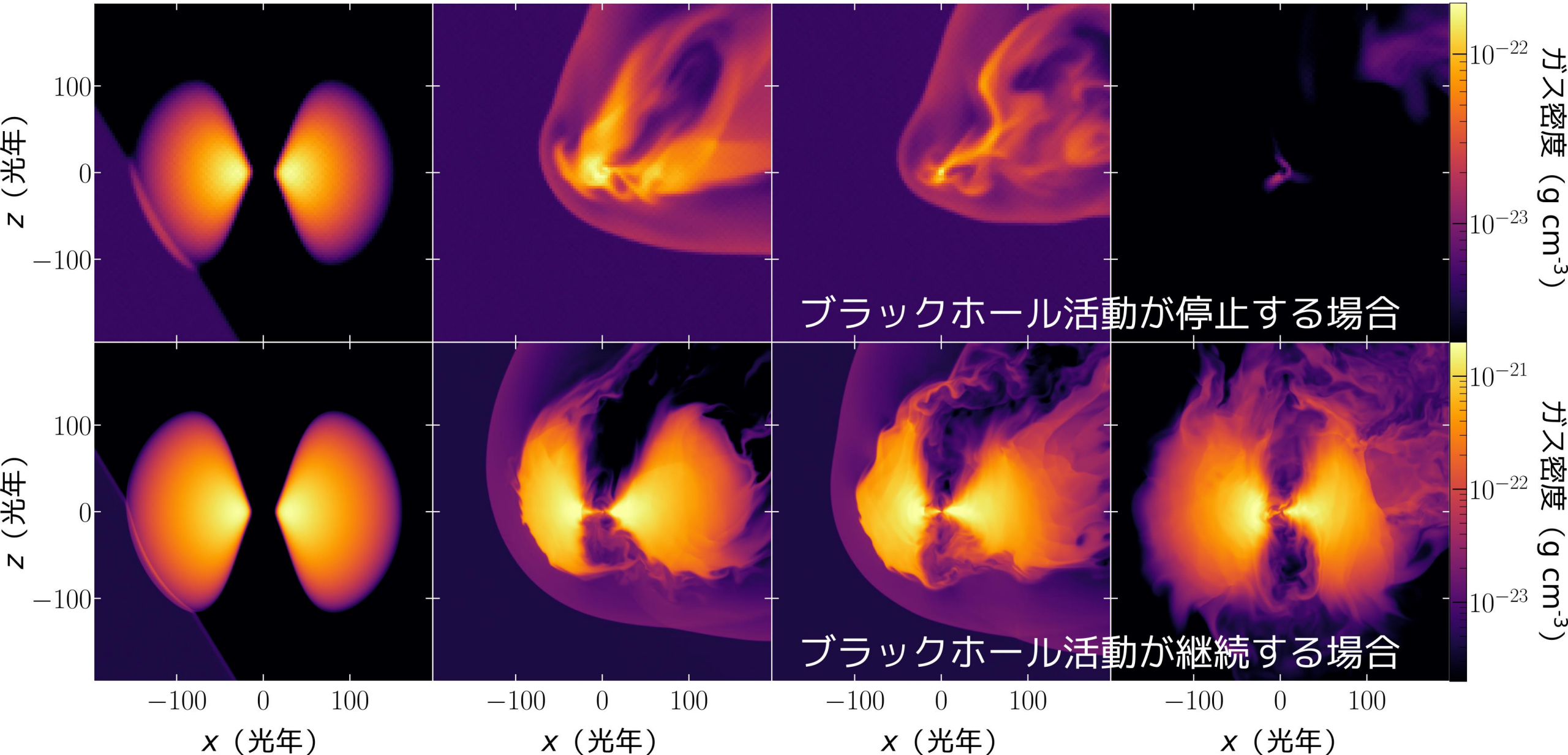
落ちてくる衛星銀河

生き残る場合（高解像度）



落ちてくる衛星銀河

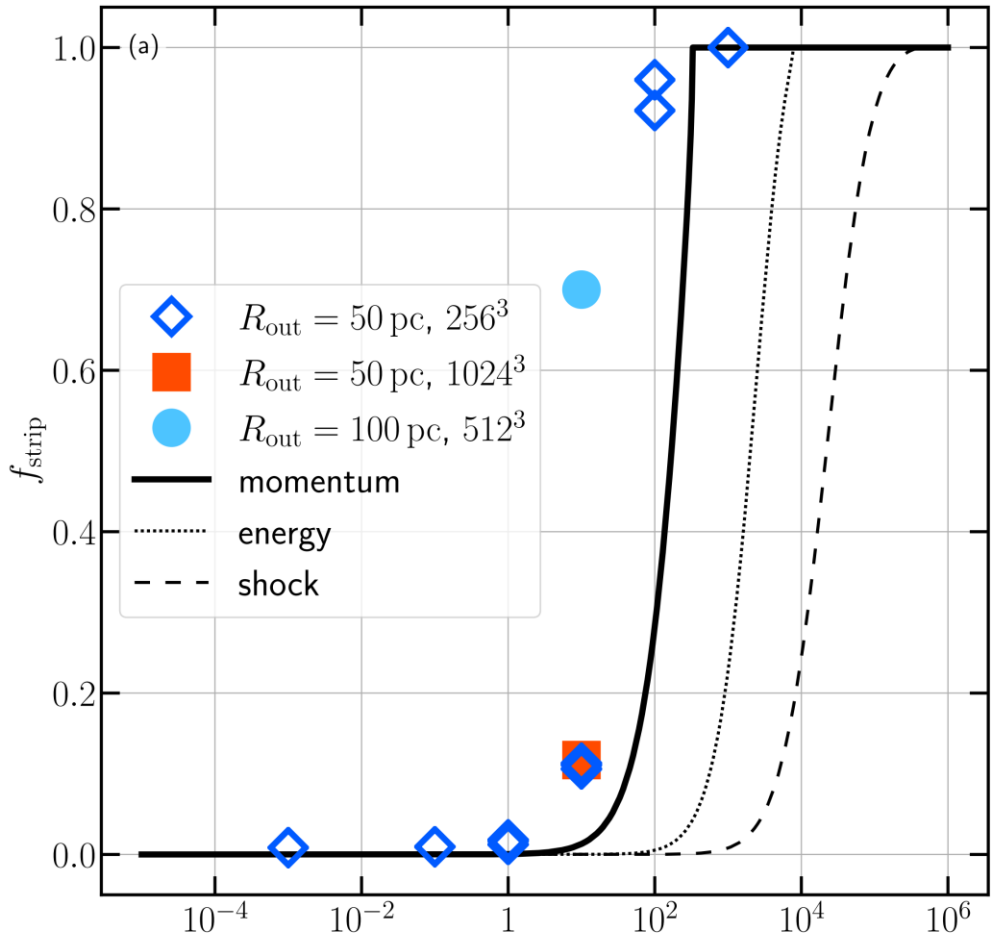
代表的な計算結果（静止画）



パラメータサーベイの結果

- ◇：通常解像度の計算
- ■：高解像度での計算
- ●：2倍トーラスサイズを大きくした計算
- 実線：運動量輸送による剥ぎ取り率の見積もり
- 衛星銀河ガスからの運動量輸送が重要
  - 数値計算結果は，解析的見積もりよりも多くのガスを剥ぎ取る
  - 柱密度比が重要なパラメータ

質量の剥ぎ取り率

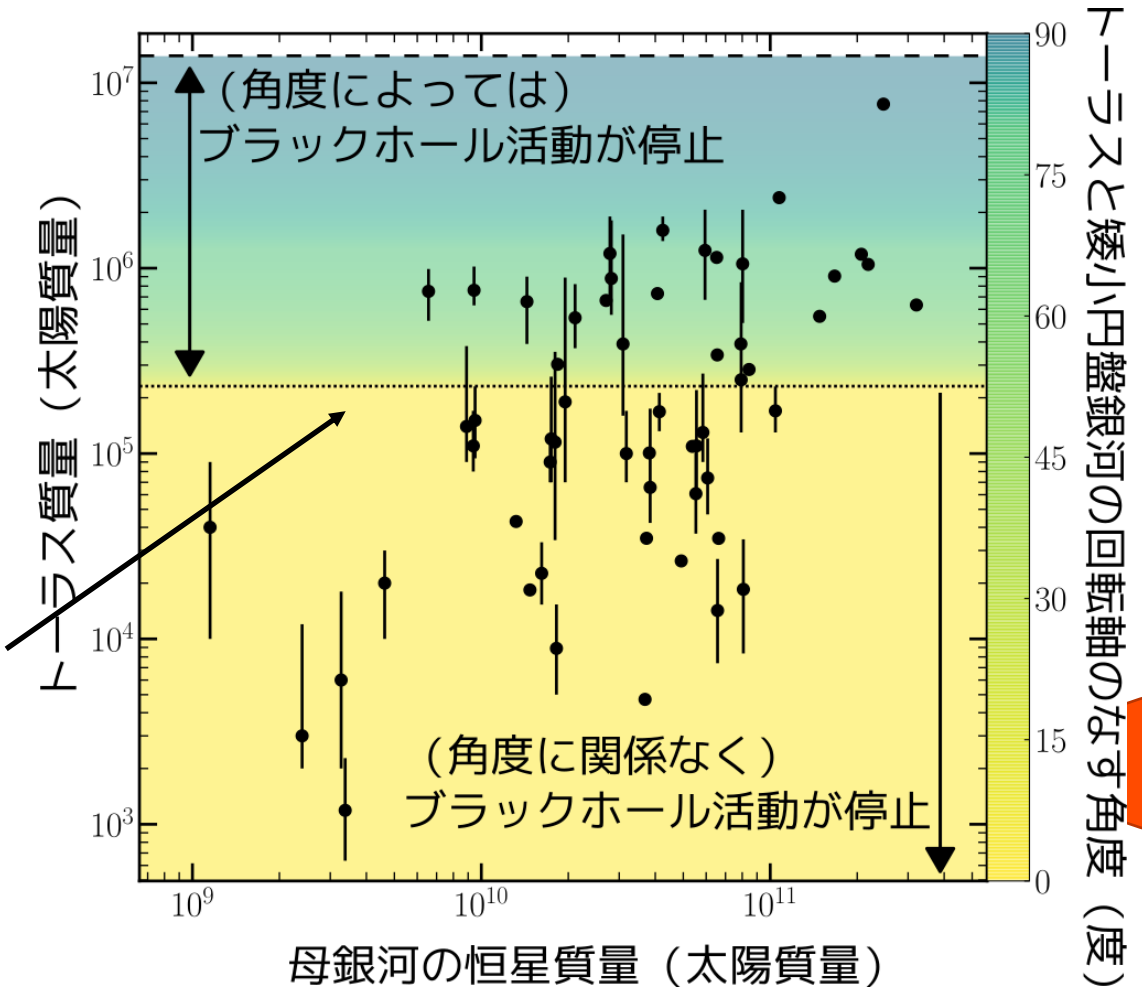


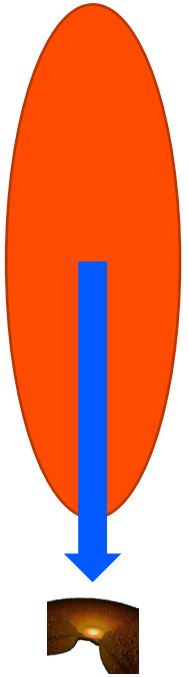
少ない ← 矮小銀河ガスの量 → 多い

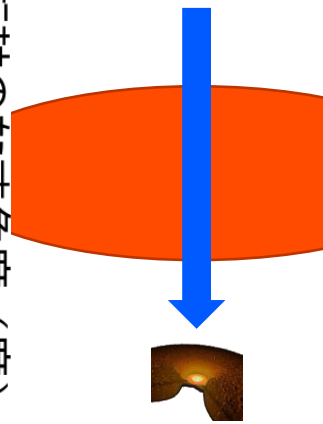
多い ← トーラスガスの量 → 少ない

アンドロメダ銀河以外でも起こるか？

- トーラス・ガスを取り去れるかは，トーラス質量で決まる
  - 正確には，柱密度で決まる
- 観測から見積もられているトーラス質量と剥ぎ取り条件を比較（右図）
  - 点：現在活発なブラックホールの観測データ
  - 動画で示した，剥ぎ取り成功例
  - 多くのトーラスが剥ぎ取り可能
  - 衛星銀河が落下してくる際の“角度”によっては，より大質量側のトーラスも剥ぎ取り可能

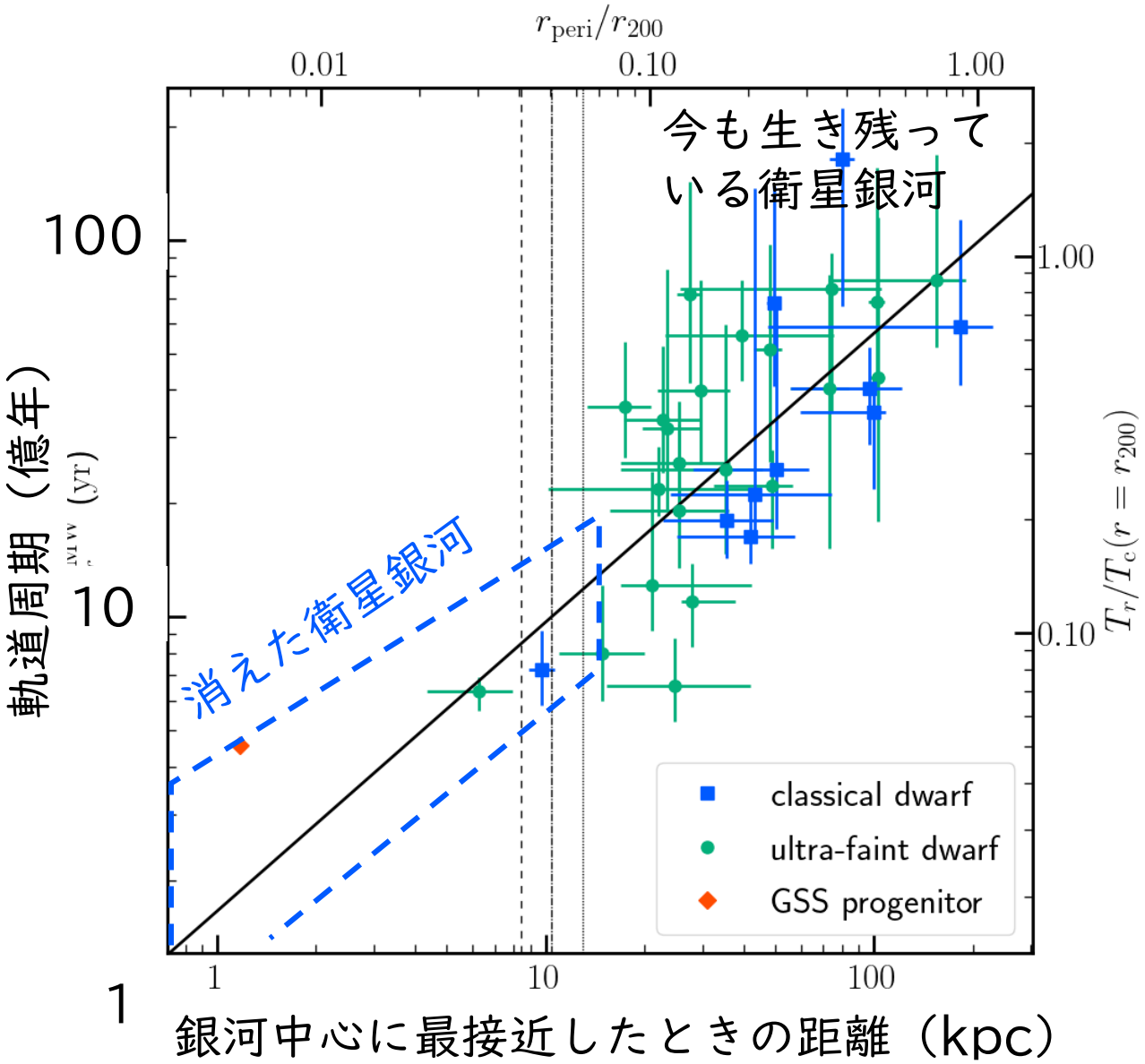


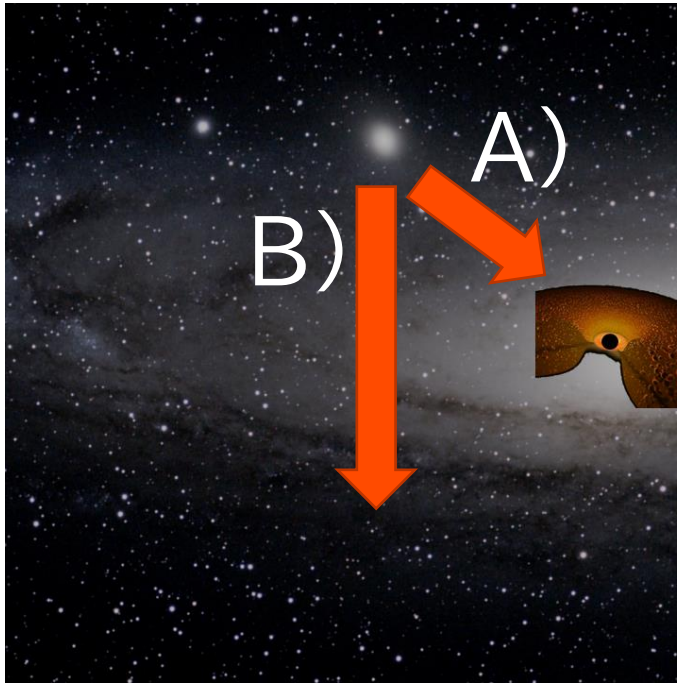




中心を射抜く銀河衝突の頻度は？

- 位置天文衛星Gaiaの観測データ（Gaia DR2）に基づく，現在の天の川銀河周辺の衛星銀河の軌道計算を実施
- 銀河の中心部に強い影響を与える銀河衝突は1億年に1回程度
  - 消えた（壊された）衛星銀河の個数（10個程度）と軌道周期（10億年）から推定
  - 宇宙論的構造形成シミュレーションからの推定とも一致
- 大質量ブラックホールが明るく輝ける期間が1億年程度という観測事実とも符合



まとめと展望

- 中心ブラックホールの活動性を活性化するのみと考えられてきた銀河衝突が，実は反対に活動性の停止にも寄与
- 衛星銀河の落下軌道が中心ブラックホールの運命を左右
  - A）銀河の中心領域に衝突する際：ブラックホールの活動性を停止
  - B）銀河の中心を離れて衝突する際：ブラックホール活動を活性化
- 近年の観測で見つかってきた，急激に中心ブラックホールの活動性を停止した兆候を示す天体群（fading AGN）の理解につながる？
- ブラックホール活動が停止している期間はどの程度か？
  - 解像度を維持し，銀河全体の進化を長時間に渡って計算する超大規模シミュレーションが必要
    ➔Wisteria/BDEC-01（2021年8月に正式運用開始）などの最新のスーパーコンピュータを駆使して挑戦