



東京大学  
THE UNIVERSITY OF TOKYO



筑波大学  
University of Tsukuba



尾道市立大学  
Onomichi City University



# 冬眠するブラックホール ～銀河衝突がもたらす大質量ブラック ホールのエネルギー源の流失～

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)

# ブラックホール(BH: black hole)

- 強い重力のために何も脱出できない領域
  - (英語版Wikipediaの訳)
- 分類( $M_{\odot}$ は太陽の質量,  $M_{\odot} = 2 \times 10^{33}$  g)
  - 恒星質量ブラックホール( $M = \mathcal{O}(10 M_{\odot})$ )
  - 中間質量ブラックホール( $M \sim 10^3 - 10^5 M_{\odot}$ )
  - 大質量ブラックホール( $M \gtrsim 10^5 M_{\odot}$ )
  - 始原ブラックホール(ビッグバン直後に形成)

Event Horizon Telescope (EHT)  
collaboration et al. 2019

M87\* April 11, 2017

50  $\mu\text{as}$  : 月面に置いた百円  
硬貨4枚分程度



# ブラックホールの「大きさ」

- 高校物理の式を使っての導出(第二宇宙速度と同様の計算)
  - $\frac{E}{m} = \frac{v^2}{2} - \frac{GM}{r}$ ,  $E \leq 0$ ,  $v \leq c$
  - $\rightarrow r_{\text{Sch}} = \frac{2GM}{c^2}$  (Schwarzschild半径)
  - 一般相対論的には正しくない導出だが, 結果は一般相対論と一致
- 地球( $M_{\oplus} = 6.0 \times 10^{27}$  g):  $r_{\text{Sch}} = 0.9$  cm (ほぼ一円玉の大きさ)
- 太陽( $M_{\odot} = 2.0 \times 10^{33}$  g):  $r_{\text{Sch}} = 3$  km
- Sgr A\* ( $M = 4.1 \times 10^6 M_{\odot}$ ):  $r_{\text{Sch}} = 10^{12}$  cm  $\sim 17R_{\odot}$
- M87\* ( $M = 6.5 \times 10^9 M_{\odot}$ ):  $r_{\text{Sch}} = 2 \times 10^{15}$  cm  $\sim 130$  au

# 一般相対論的な式(見せるだけ)

- 測地線方程式(一般相対論版の運動方程式と思えば良い)

$$\frac{d^2 x^\alpha}{d\tau^2} + \Gamma^\alpha_{\mu\nu} \frac{dx^\mu}{d\tau} \frac{dx^\nu}{d\tau} = 0 \quad \Gamma^\alpha_{\mu\nu} = \frac{1}{2} g^{\alpha\mu} (g_{\mu\beta,\gamma} + g_{\mu\gamma,\beta} + g_{\beta\gamma,\mu})$$

- Einstein方程式(時空の構造を決める方程式, 宇宙定数込み)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

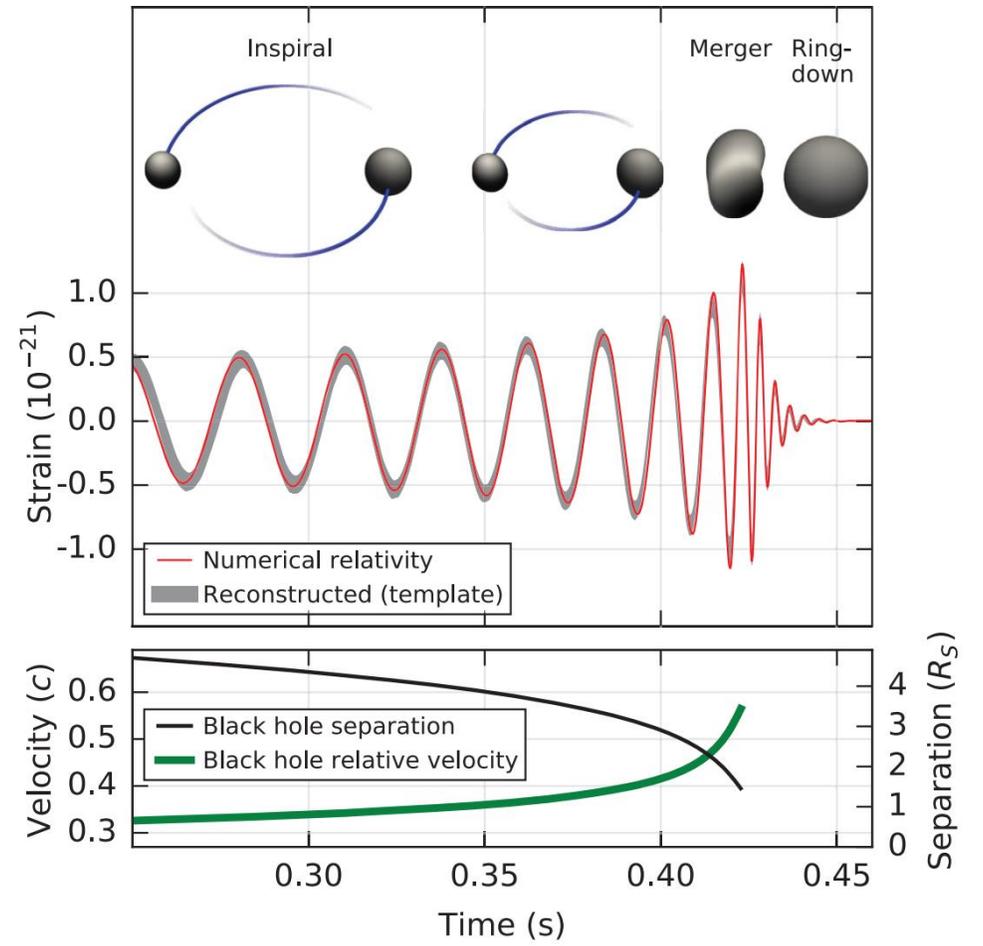
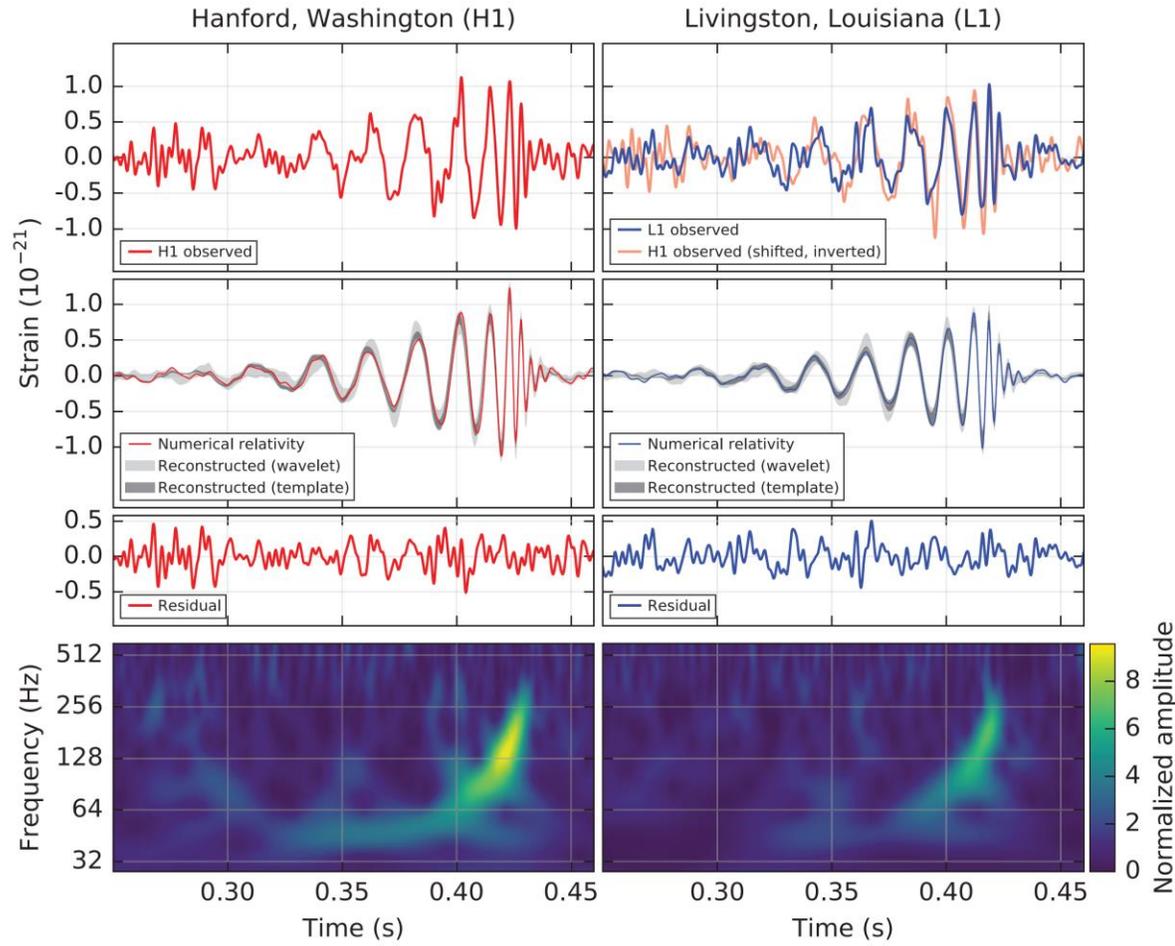
- Schwarzschild metric(シュワルツシルト計量)

- 一番簡単な非自明解(真空中に質点が1個だけ, 時間発展もなし)

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{r_{\text{Sch}}}{r}\right) dt^2 + \frac{dr^2}{1 - r_{\text{Sch}}/r} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2), \quad r_{\text{Sch}} = \frac{2GM}{c^2}$$

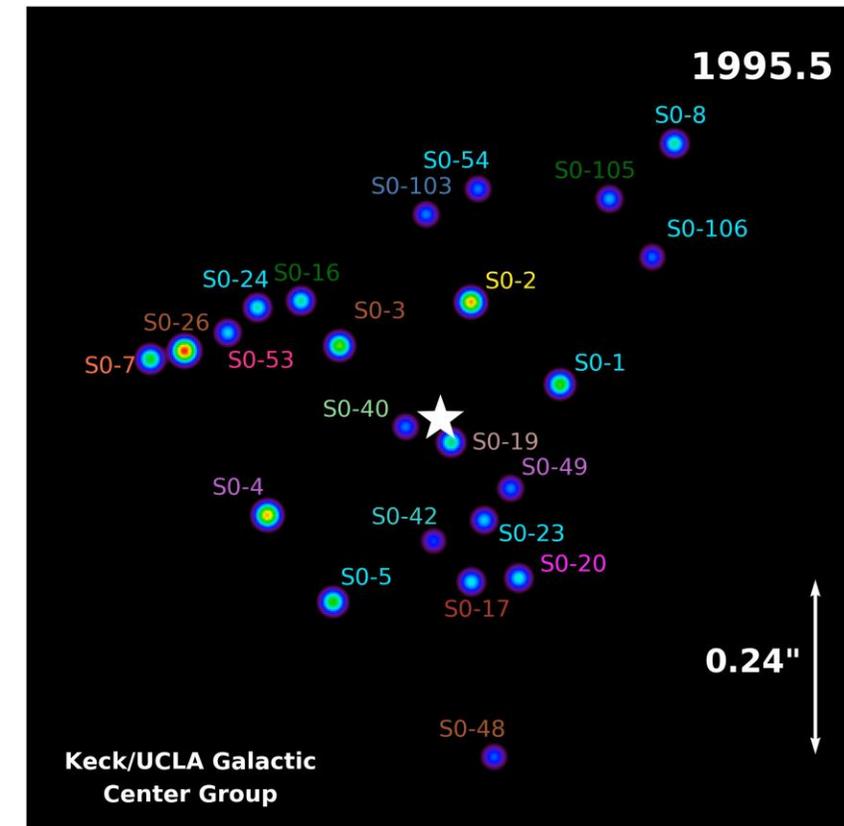
# GW150914 (Abbott et al. 2016)

- 2017年ノーベル物理学賞  
(Rainer Weiss, Barry Barish, Kip Thorne)



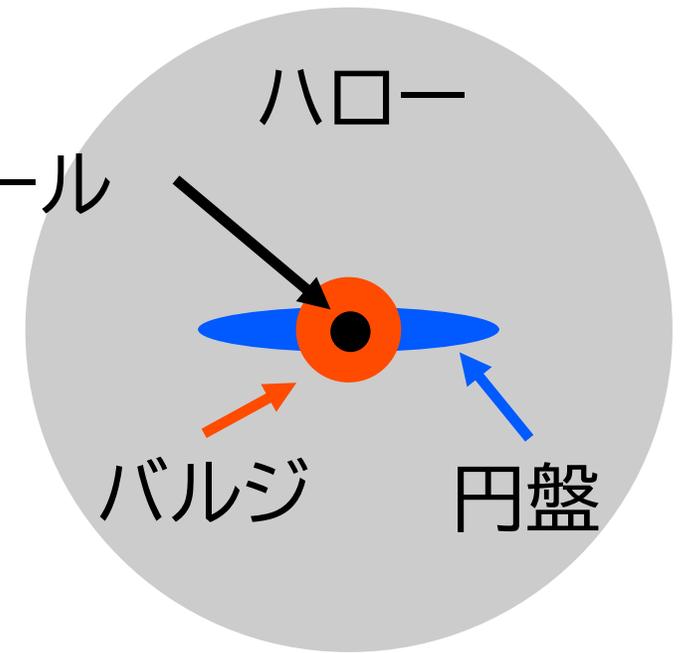
# 2020年ノーベル物理学賞

- Roger Penrose
  - ブラックホールの形成が一般相対論の強力な裏付けであることの発見
- Reinhard Genzel & Andrea M. Ghez
  - 天の川銀河中心に大質量コンパクト天体の発見
  - 持って回った言い方だが、「ブラックホール候補天体」を見つけた、という内容
    - 「候補」なのはNewton重力の範囲内であるため
- 中井さん, 三好さんに受賞して欲しかった..
  - NGC 4258 の水メーザー観測によって、より早い時期に「ブラックホール候補天体」を見つけていた

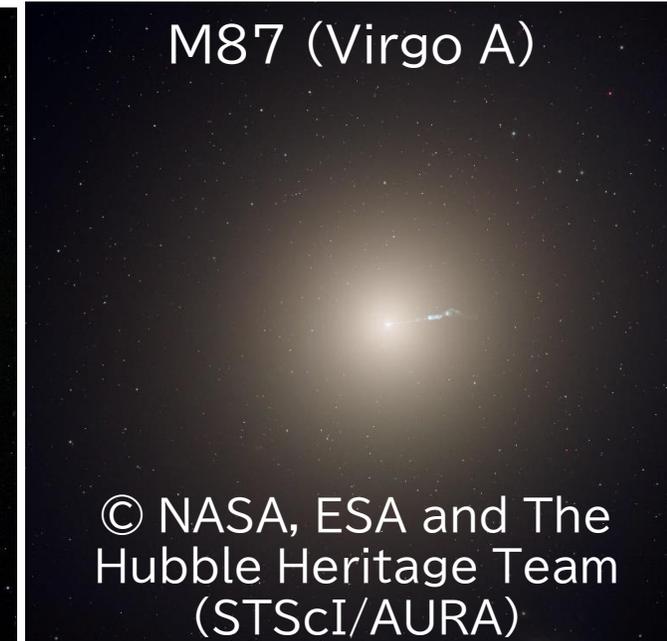


# 銀河

大質量ブラックホール

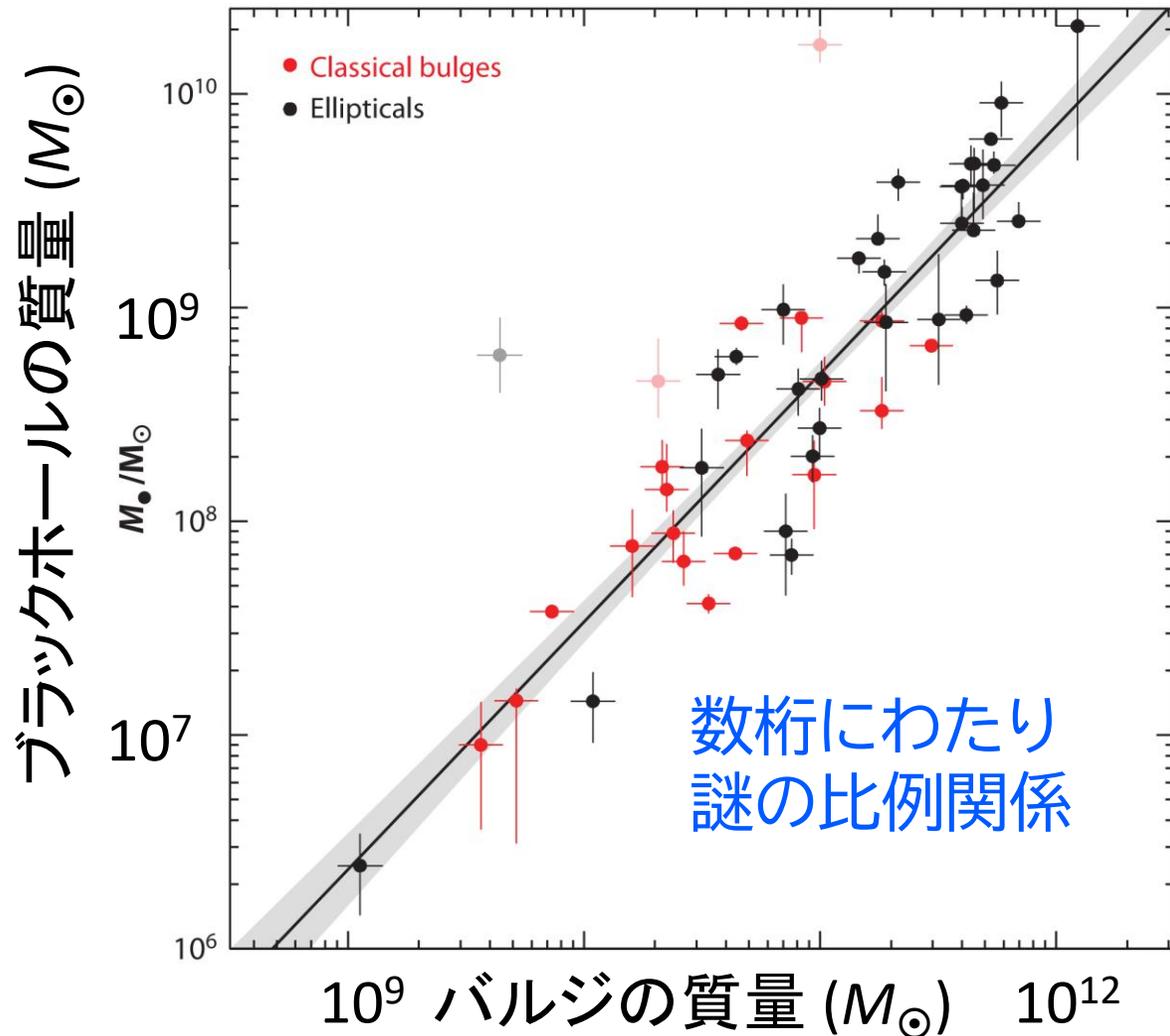


- 星, ガス, ダークマターからなる天体
  - 天の川銀河(銀河系), アンドロメダ銀河など
  - 質量:  $10^7-13 M_{\odot}$  ( $M_{\odot}$ は太陽の質量)
  - サイズ:  $10^3-6$ 光年
  - 中心に大質量ブラックホール



# 銀河と中心ブラックホールの関係

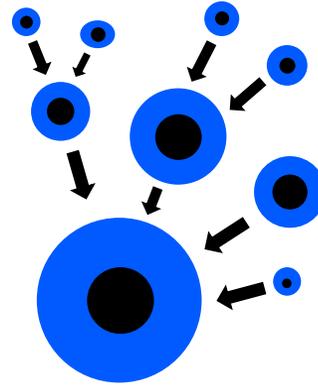
Kormendy & Ho (2013)



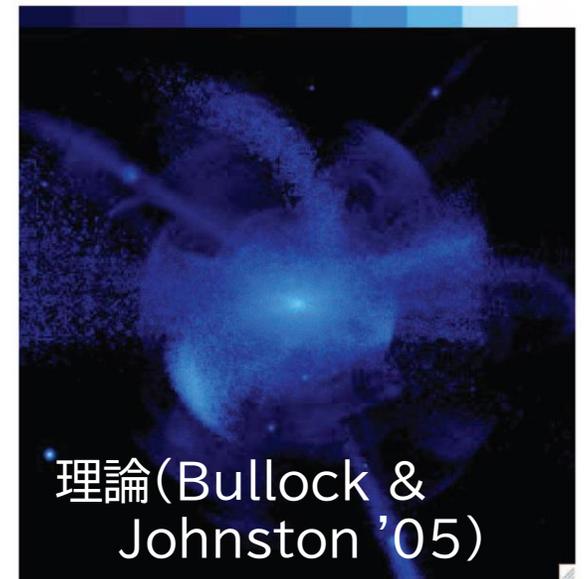
- 銀河の中心領域には大質量ブラックホール(MBH)が普遍的に存在
- ブラックホール質量がバルジ質量に比例(マゴリアン関係)
- 銀河とMBHの共進化:  
銀河とMBHが互いに影響を及ぼし  
あいながら成長してきた
- MBHの形成・成長過程はよく分かっていない
  - ガス降着による成長
  - 銀河衝突に伴うBH合体

# 標準的な銀河進化シナリオ

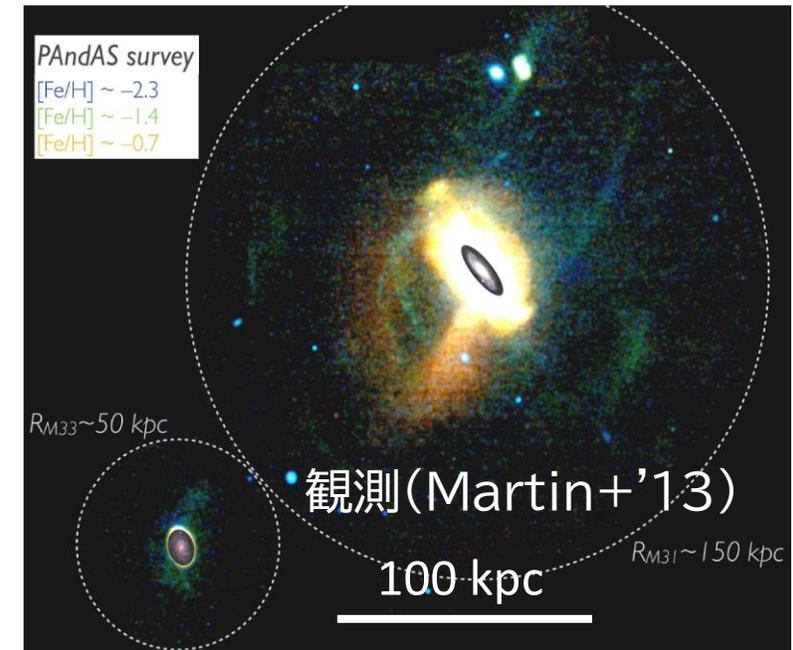
- 小さい構造から先にでき、互いに衝突・合体を繰り返して銀河や銀河団といった大きな構造へと成長



- 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

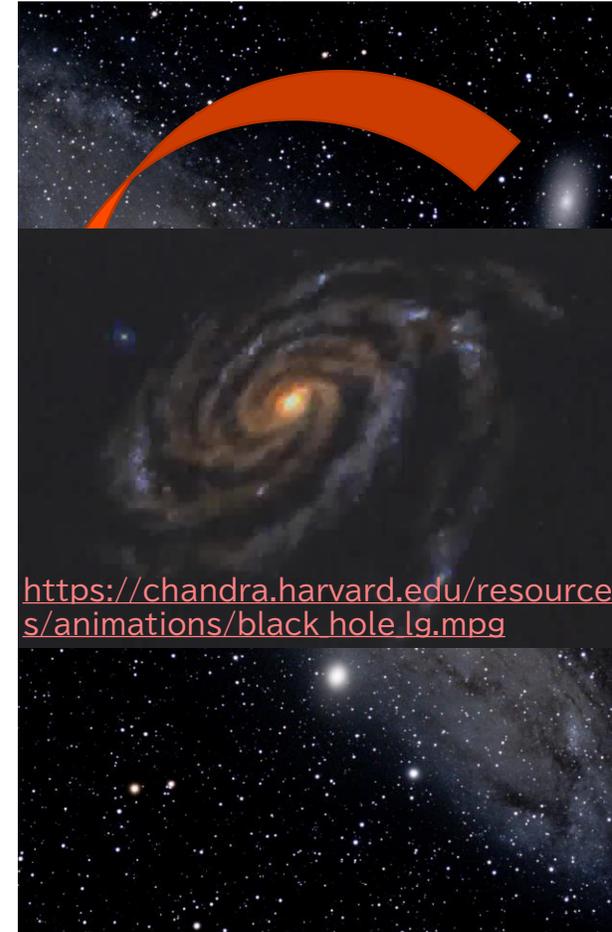


銀河の周りに残る衝突痕跡



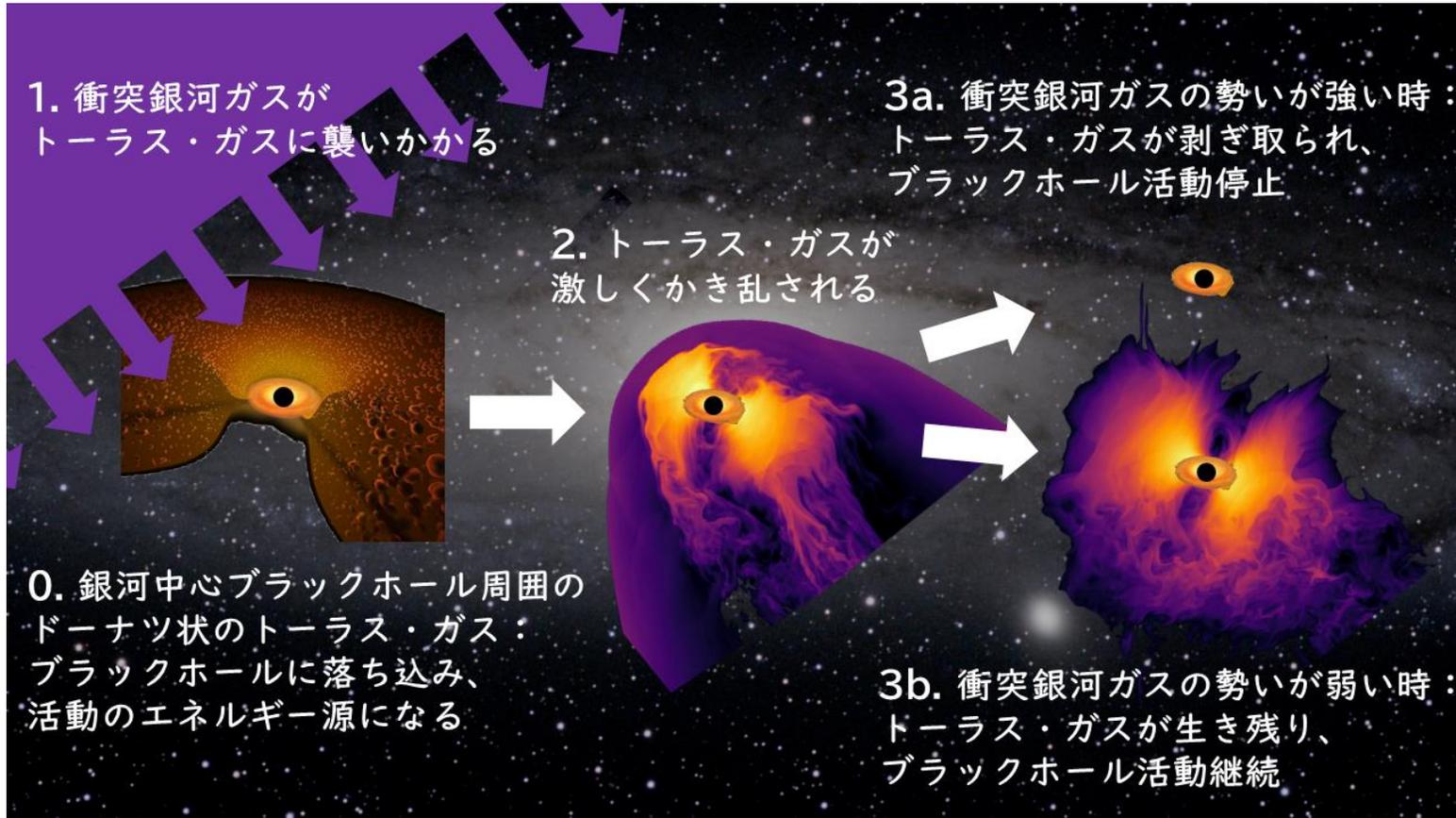
# 銀河中心ブラックホール活動

- 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



# 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

# 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)

- $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$

質量保存

- $\rho \left[ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = -\nabla p - \rho \nabla \Phi$

運動量保存

- 右辺第2項は重力項

- $\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{1}{2} \rho v^2 + \frac{p}{\gamma-1} \right) + \nabla \cdot \left[ \mathbf{v} \left( \frac{1}{2} \rho v^2 + \frac{\gamma p}{\gamma-1} \right) \right] = \rho \mathbf{v} \cdot (-\nabla \Phi) + G - \Lambda$

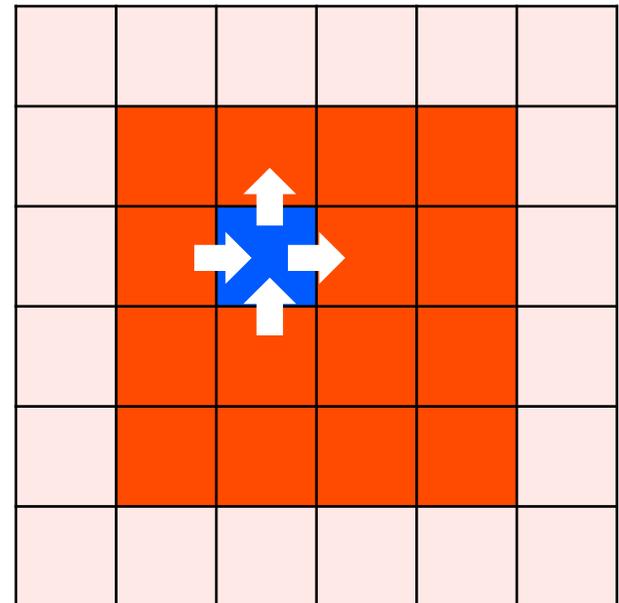
エネルギー保存

- 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

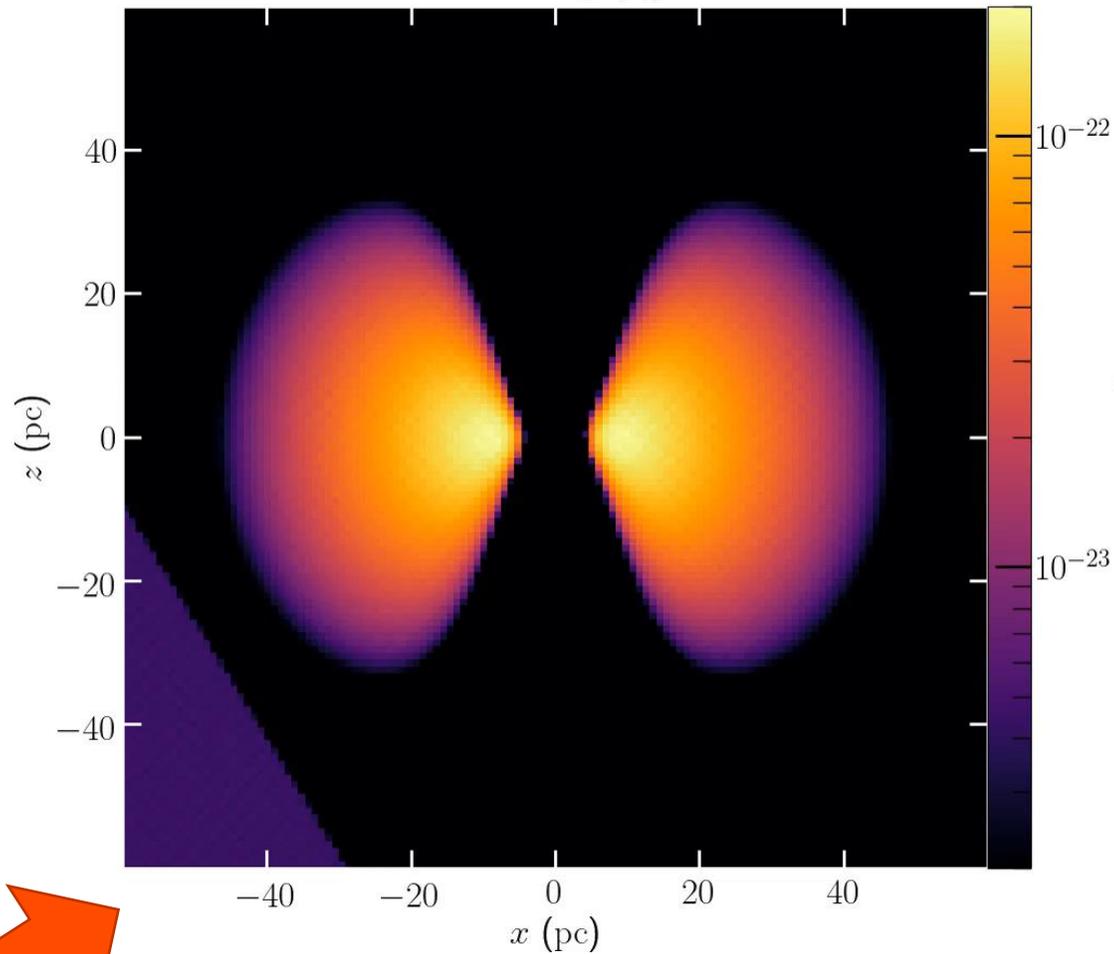
- 銀河の中心領域だけを切り出した高分解能計算
  - 3次元一様メッシュ
  - HLLC法, 空間2次精度(MUSCL)
  - 重力は外場として扱う
  - 断熱の計算
  - 衛星銀河ガスの流入を境界条件として表現
- 今回の研究で用いたスーパーコンピュータ
  - Oakforest-PACS(最先端共同HPC基盤施設)
  - T2K-Tsukuba(筑波大学計算科学研究センター)
  - FIRST(筑波大学計算科学研究センター)



# 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)

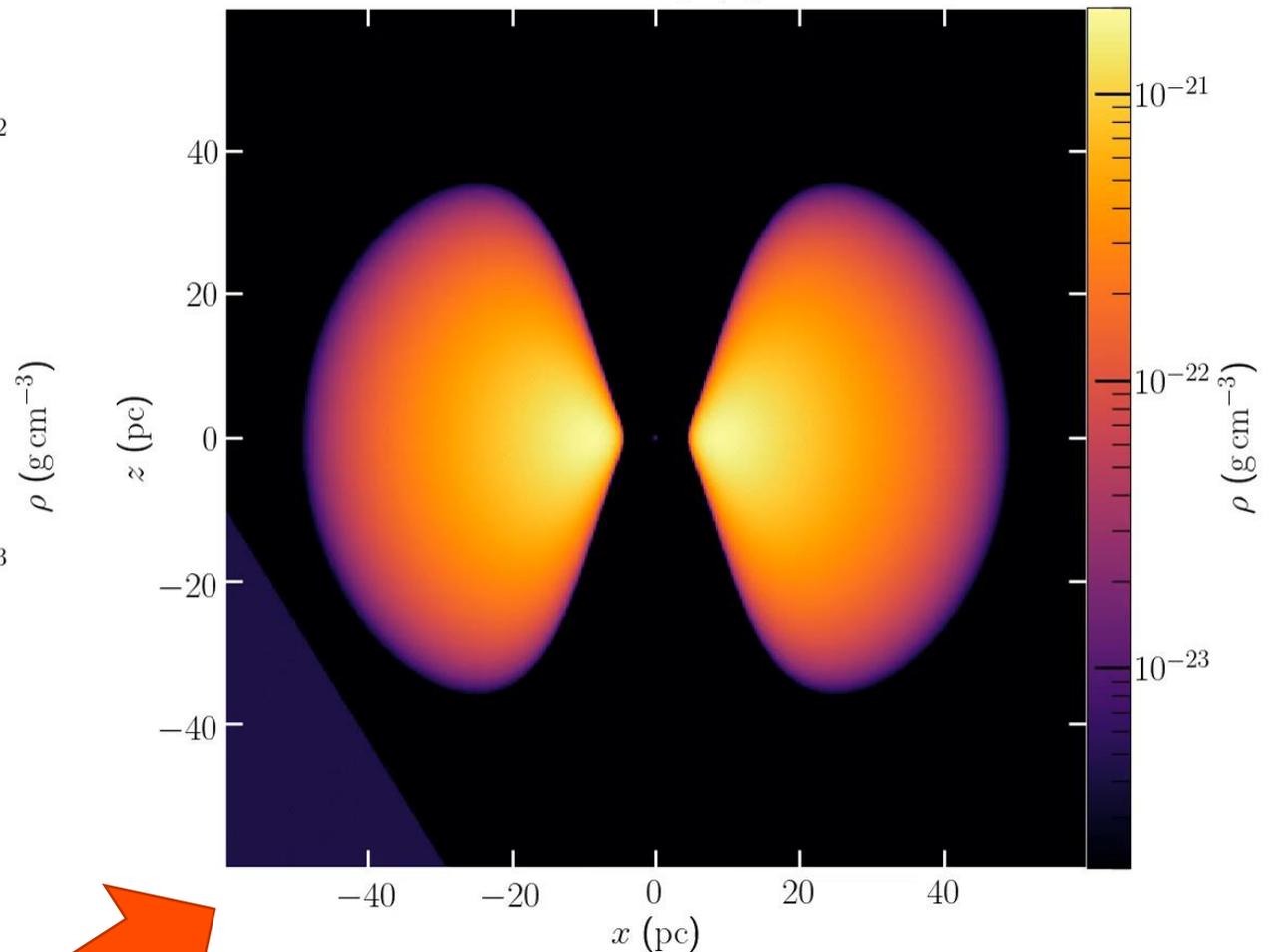
$t = 0.00$  (Myr)



落ちてくる衛星銀河

生き残る場合(高解像度)

$t = 0.00$  (Myr)

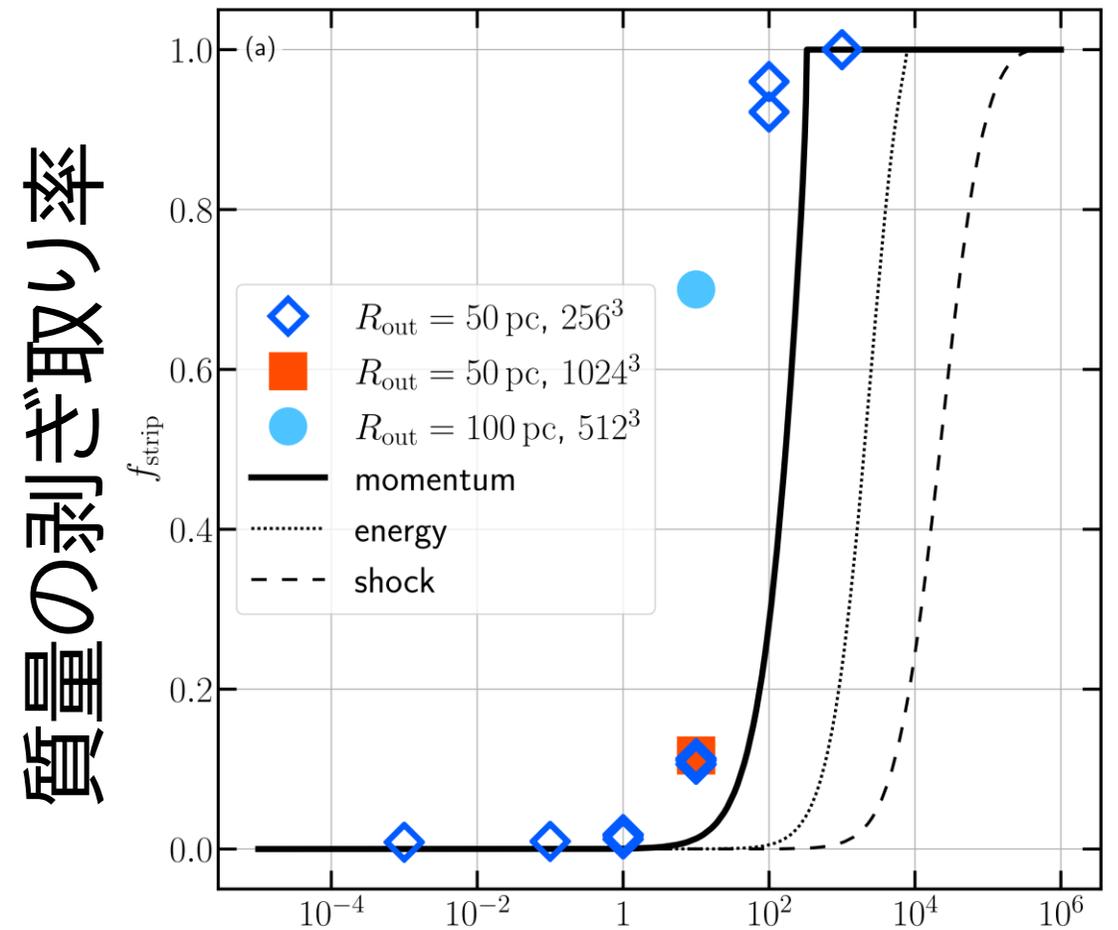


落ちてくる衛星銀河

# パラメータサーベイの結果

- $\diamond$ : 通常解像度の計算
- $\blacksquare$ : 高解像度での計算
- $\bullet$ : 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

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

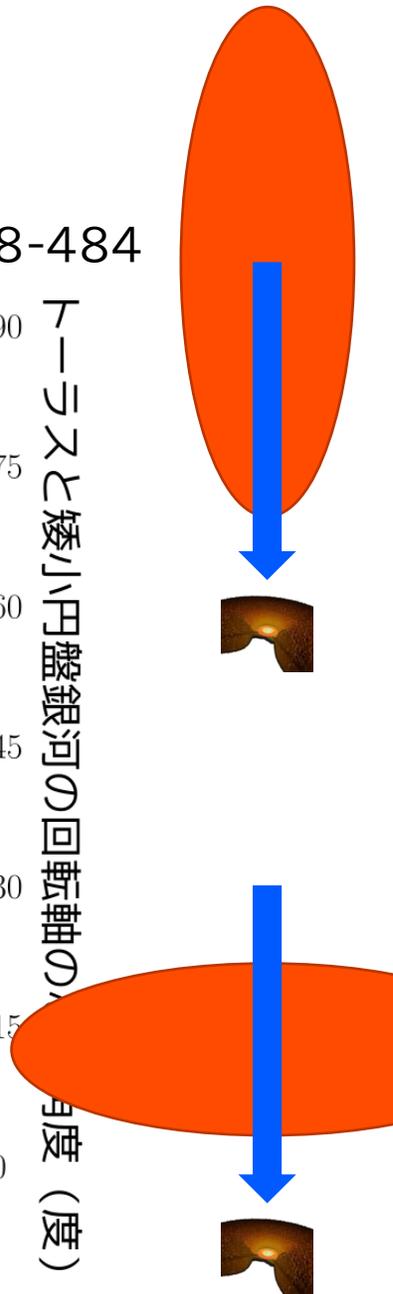
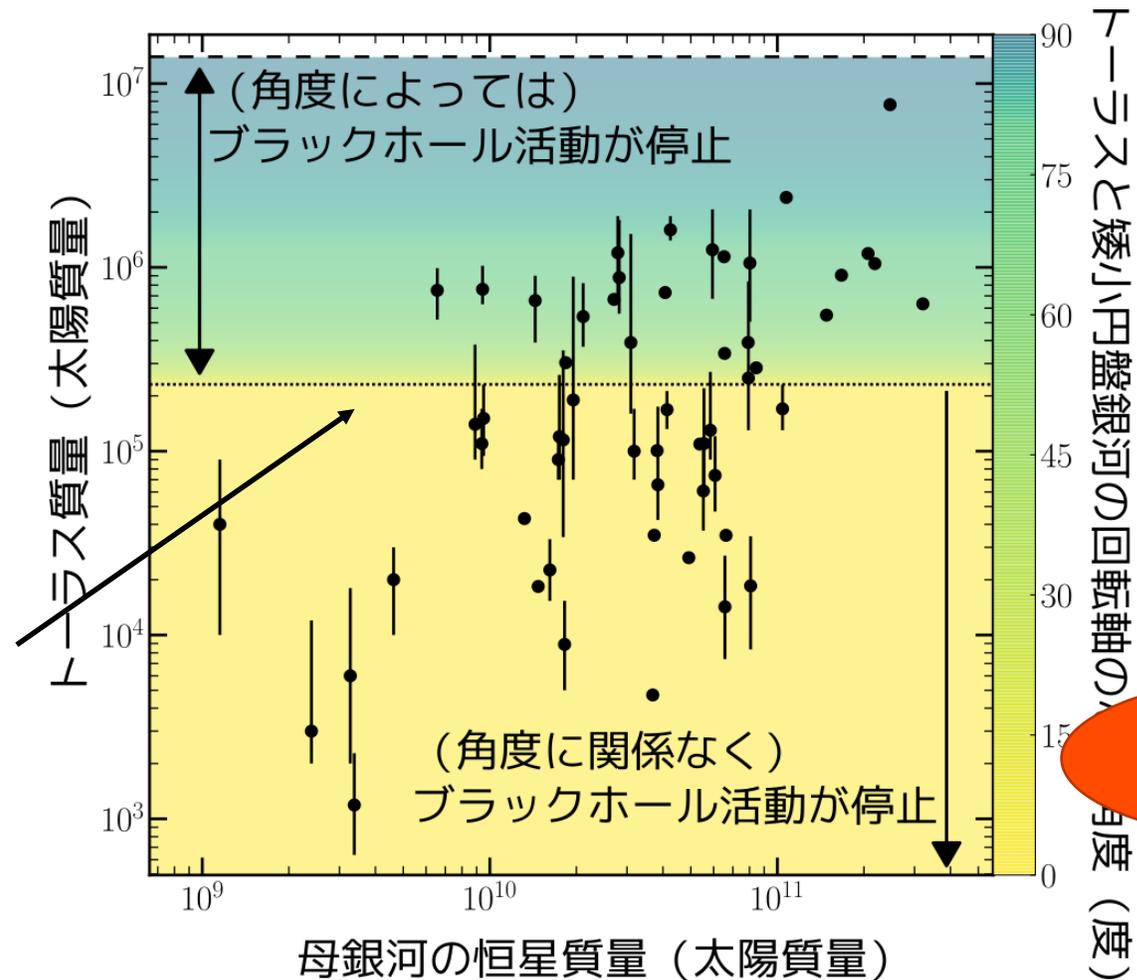


少ない ← 矮小銀河ガスの量 → 多い  
 多い ← トーラスガスの量 → 少ない

# 他の銀河ではどうなるか？

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

- 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



# 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などのスーパーコンピュータを駆使して挑戦

