

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）

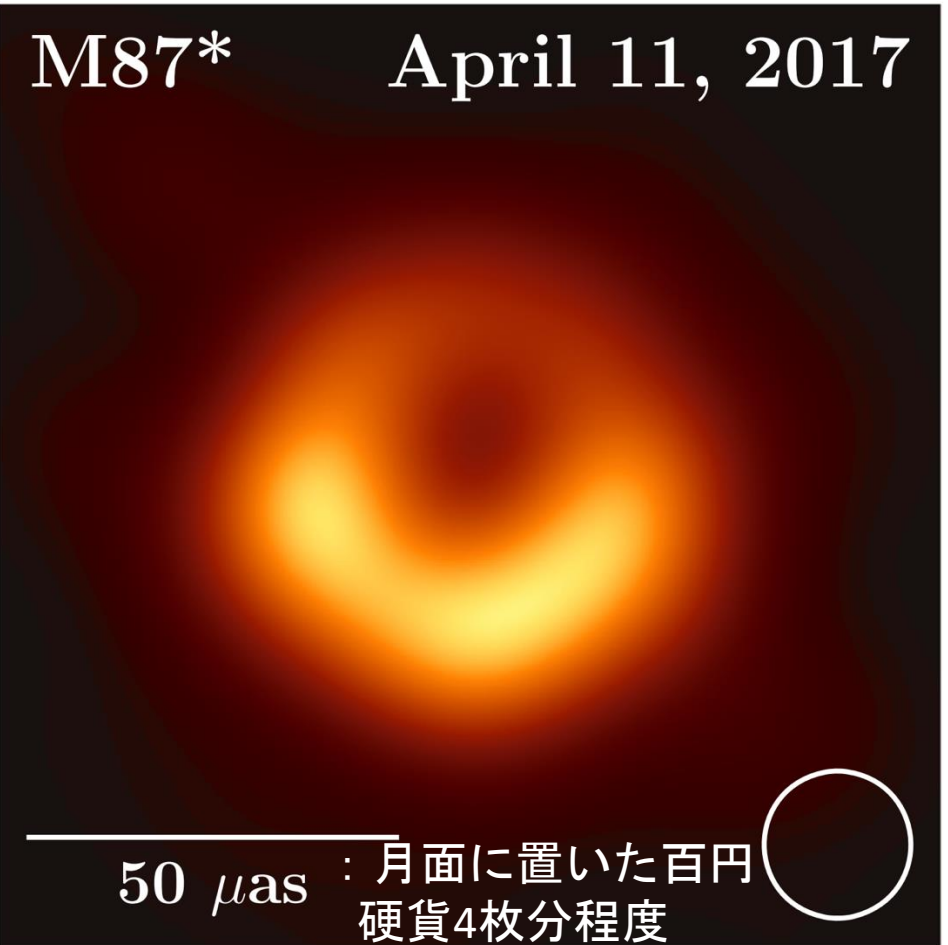
共同研究者： 森正夫（筑波大学）， 川口俊宏（尾道市立大学／国立天文台）

東京大学柏キャンパス一般公開2024

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, $M_{\odot} = 2 \times 10^{33} \text{ g}$)
 - 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



ブラックホールの「大きさ」

- 高校物理の式を使っでの導出（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（ $M_{\oplus} = 6.0 \times 10^{27} \text{ g}$ ）： $r_{\text{Sch}} = 0.9 \text{ cm}$ （ほぼ一円玉の大きさ）
- 太陽（ $M_{\odot} = 2.0 \times 10^{33} \text{ g}$ ）： $r_{\text{Sch}} = 3 \text{ km}$
- Sgr A*（ $M = 4.1 \times 10^6 M_{\odot}$ ）： $r_{\text{Sch}} = 10^{12} \text{ cm} \sim 17 R_{\odot}$
- M87*（ $M = 6.5 \times 10^9 M_{\odot}$ ）： $r_{\text{Sch}} = 2 \times 10^{15} \text{ cm} \sim 130 \text{ au}$

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）

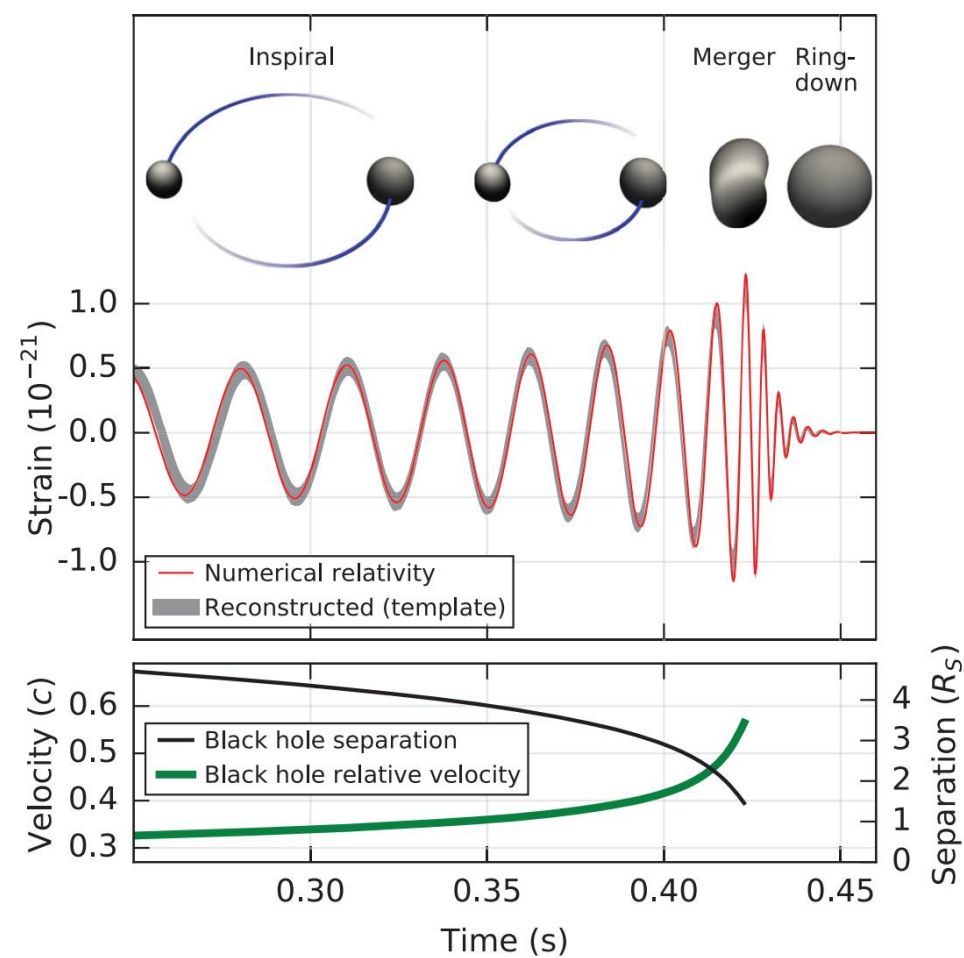
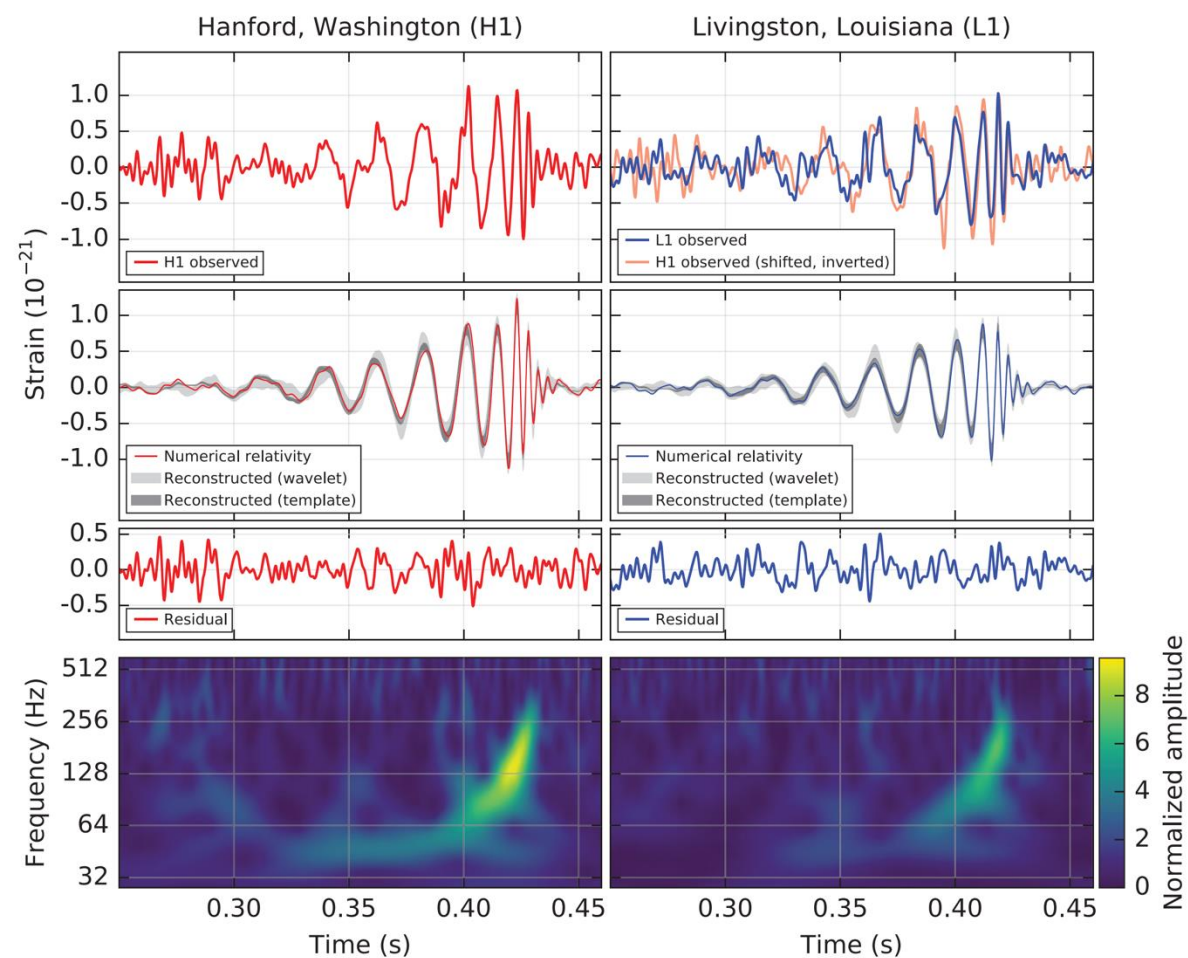
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

- 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）

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

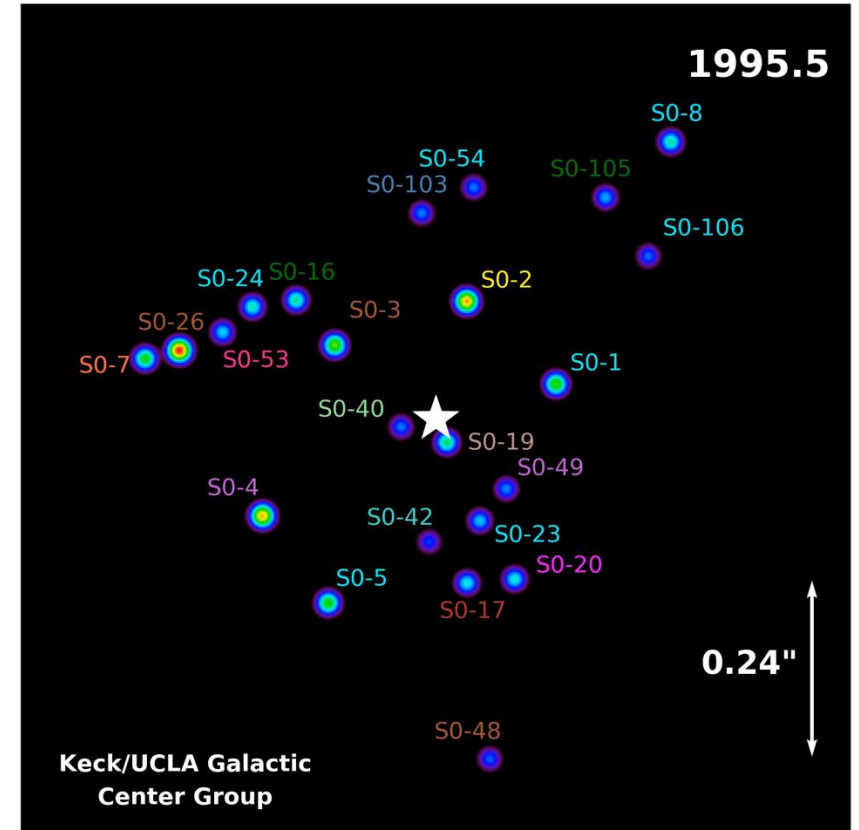
GW150914 (Abbott et al. 2016)

- 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

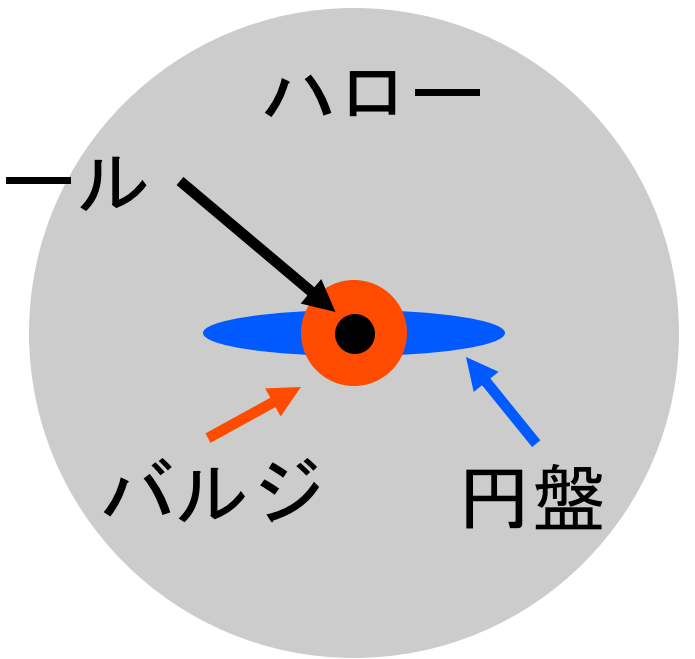
- Roger Penrose
 - ブラックホールの形成が一般相対論の強力な裏付けであることの発見
- Reinhard Genzel & Andrea M. Ghez
 - 天の川銀河中心に大質量コンパクト天体の発見
 - 持って回った言い方だが、「ブラックホール候補天体」を見つけた、という内容
 - 「候補」なのはNewton重力の範囲内であるため
- 中井さん、三好さんに受賞して欲しかった..
 - NGC 4258 の水メーザー観測によって、より早い時期に「ブラックホール候補天体」を見つけていた



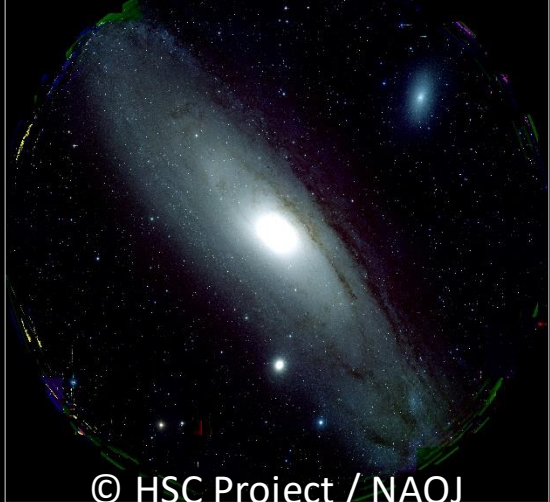
銀河

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: $10^7 - 10^{13} M_{\odot}$ ($M_{\odot}$ は太陽の質量)
 - サイズ: $10^3 - 10^6$ 光年
 - 中心に大質量ブラックホール



アンドロメダ銀河 (M31)



© HSC Project / NAOJ



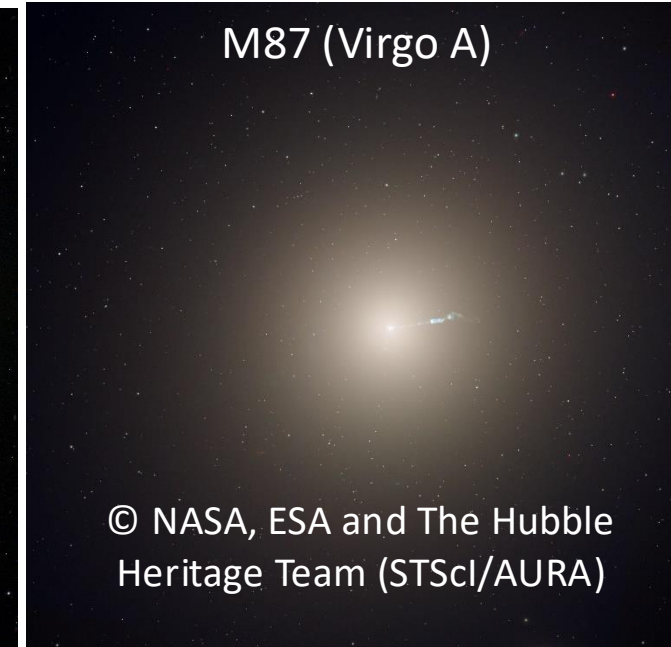
The Andromeda Galaxy (M31)

ソングレロ銀河 (M104, NGC 4594)



© NASA and The Hubble Heritage Team
(STScI/AURA)

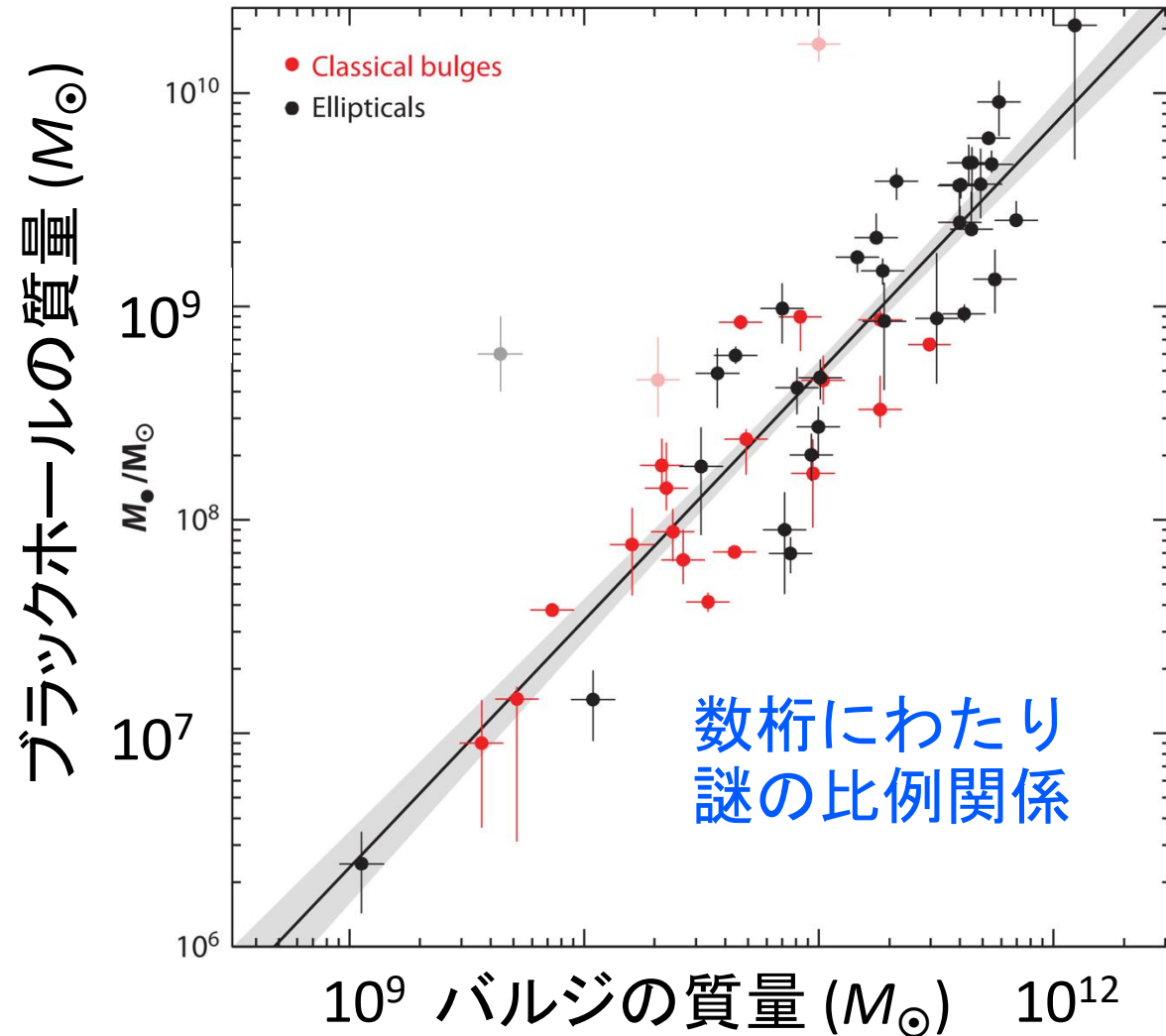
M87 (Virgo A)



© NASA, ESA and The Hubble
Heritage Team (STScI/AURA)

銀河と中心ブラックホールの関係

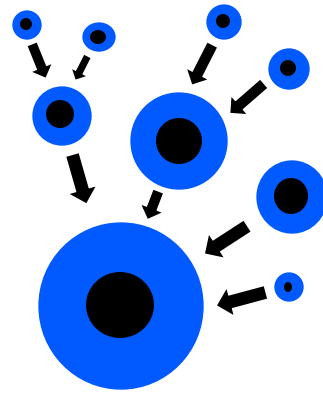
Kormendy & Ho (2013)



- 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

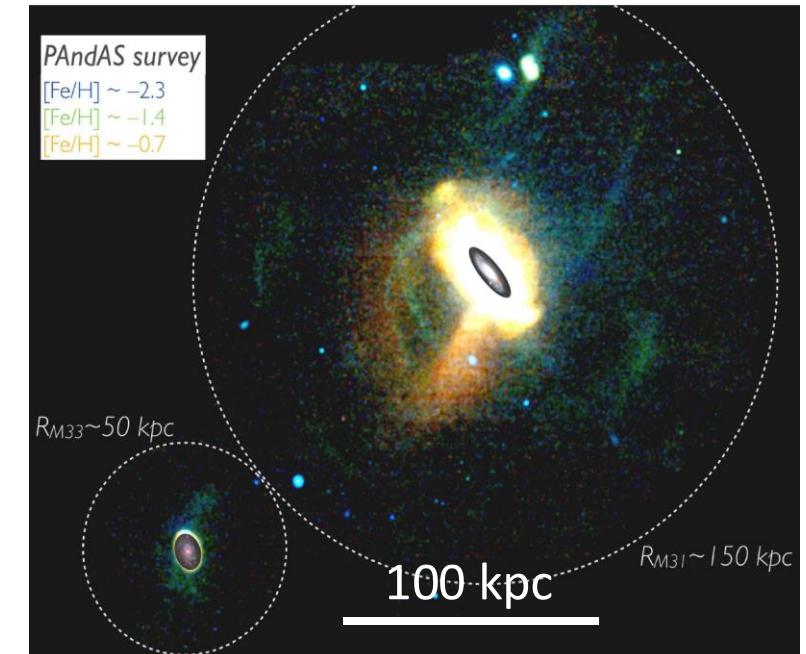
標準的な銀河進化シナリオ

- 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



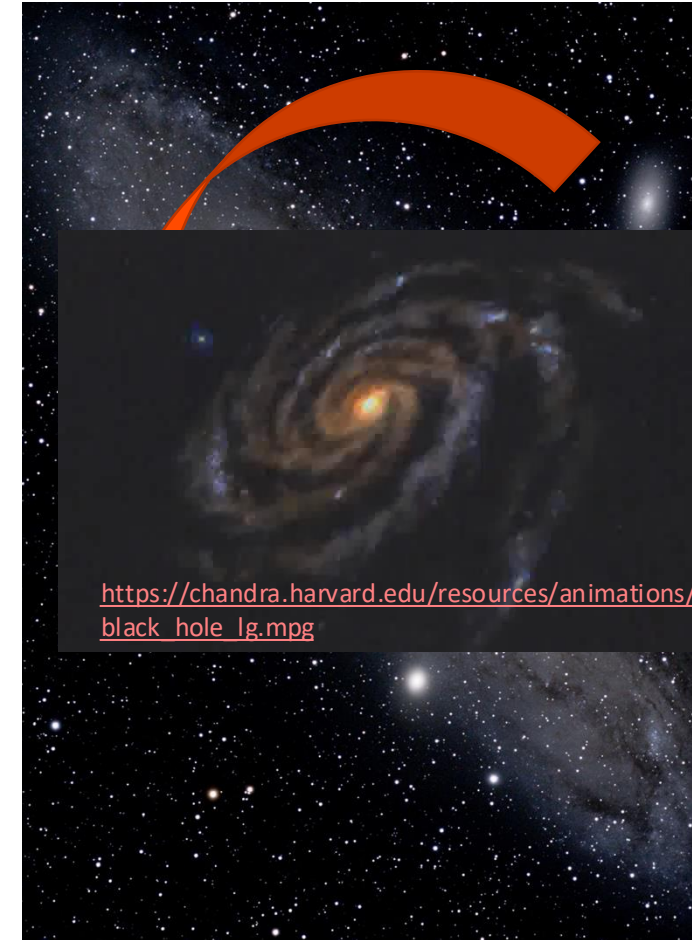
銀河の周りに残る衝突痕跡

- 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



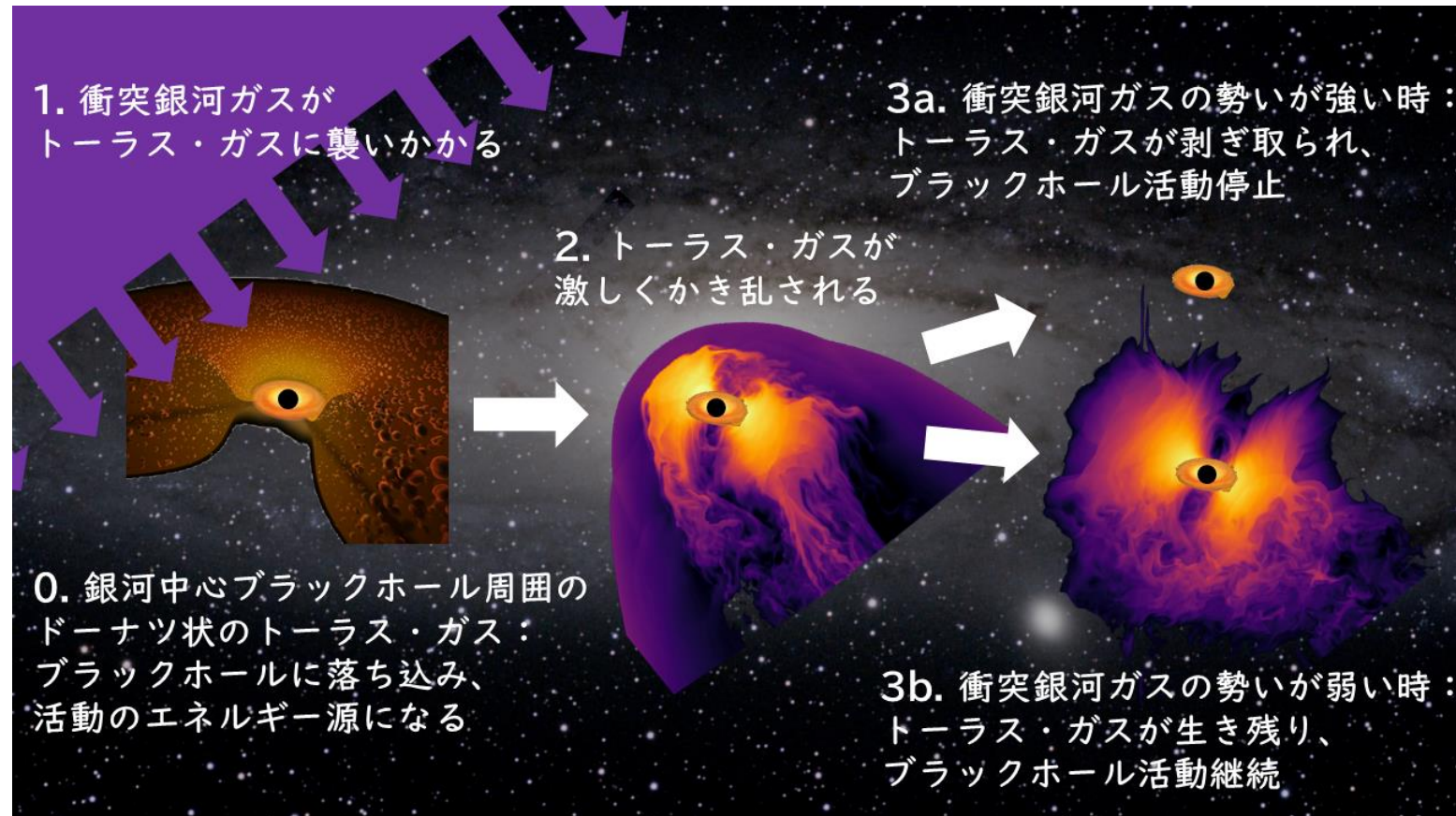
銀河中心ブラックホール活動

- 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



銀河衝突はブラックホール活動を停止できるか？

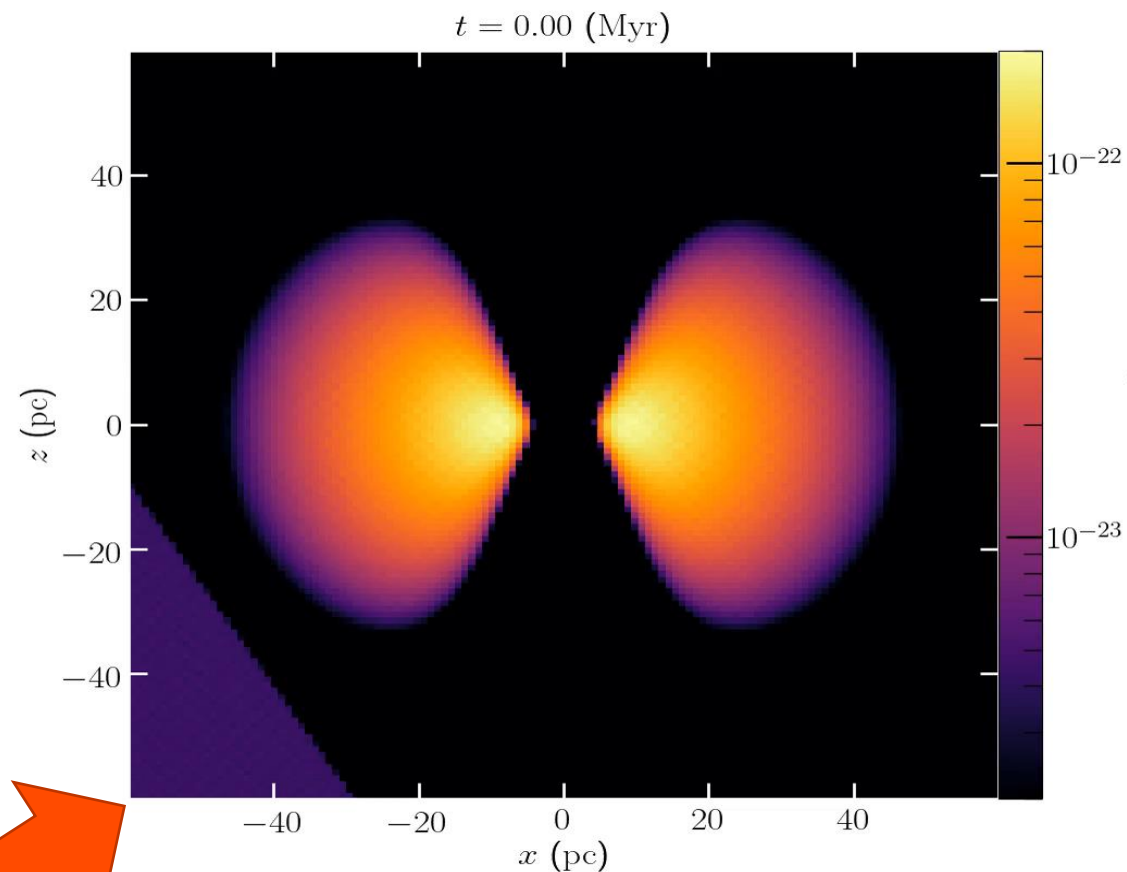
- 銀河衝突によって中心ブラックホールへのガス供給源を取り去れるか？
 - 可能ならば、やがて中心ブラックホールはガス欠状態に陥る
 - これまでの“常識”とは逆に、銀河衝突がブラックホール活動を消火
 - 相打ちに、落ちていった衛星銀河は破壊されて粉々に



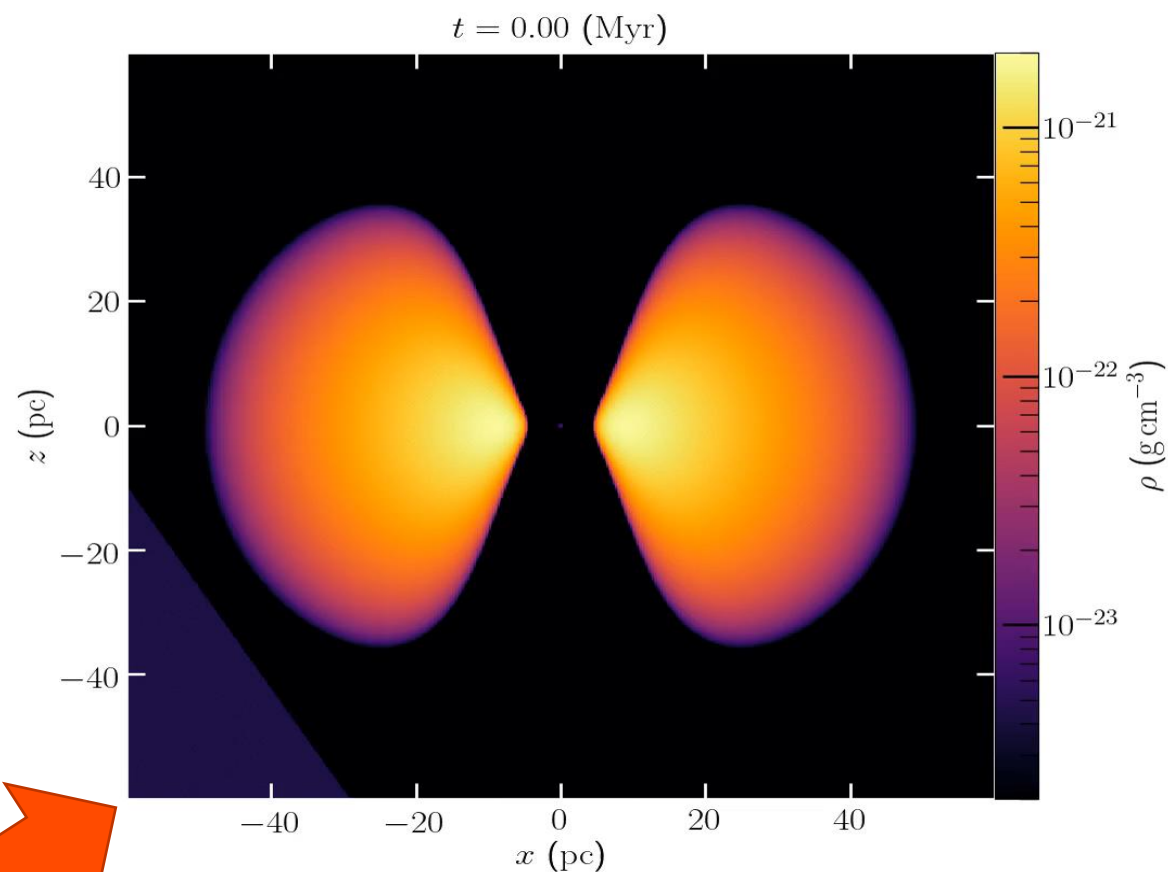
代表的な計算結果（ムービー）

はぎ取られる場合（通常解像度）

生き残る場合（高解像度）



落ちてくる衛星銀河

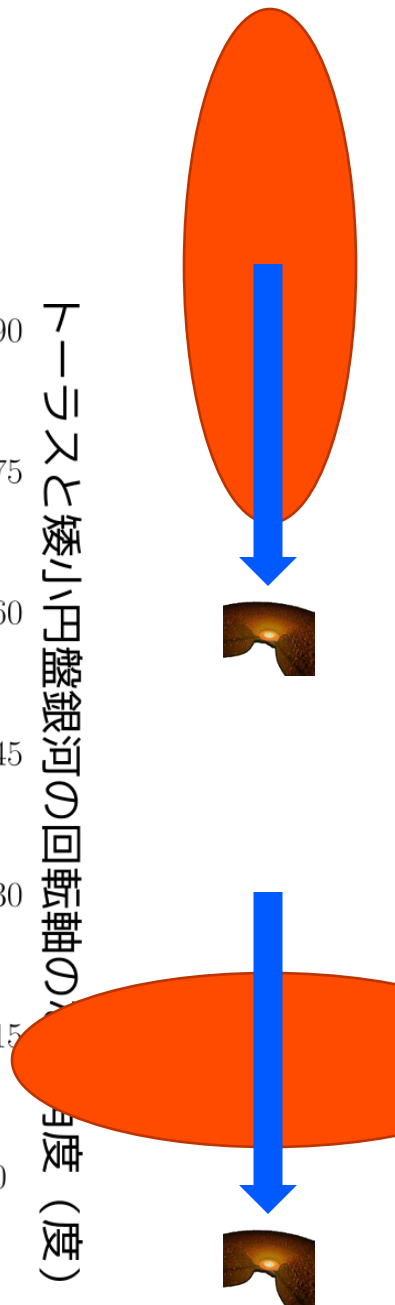
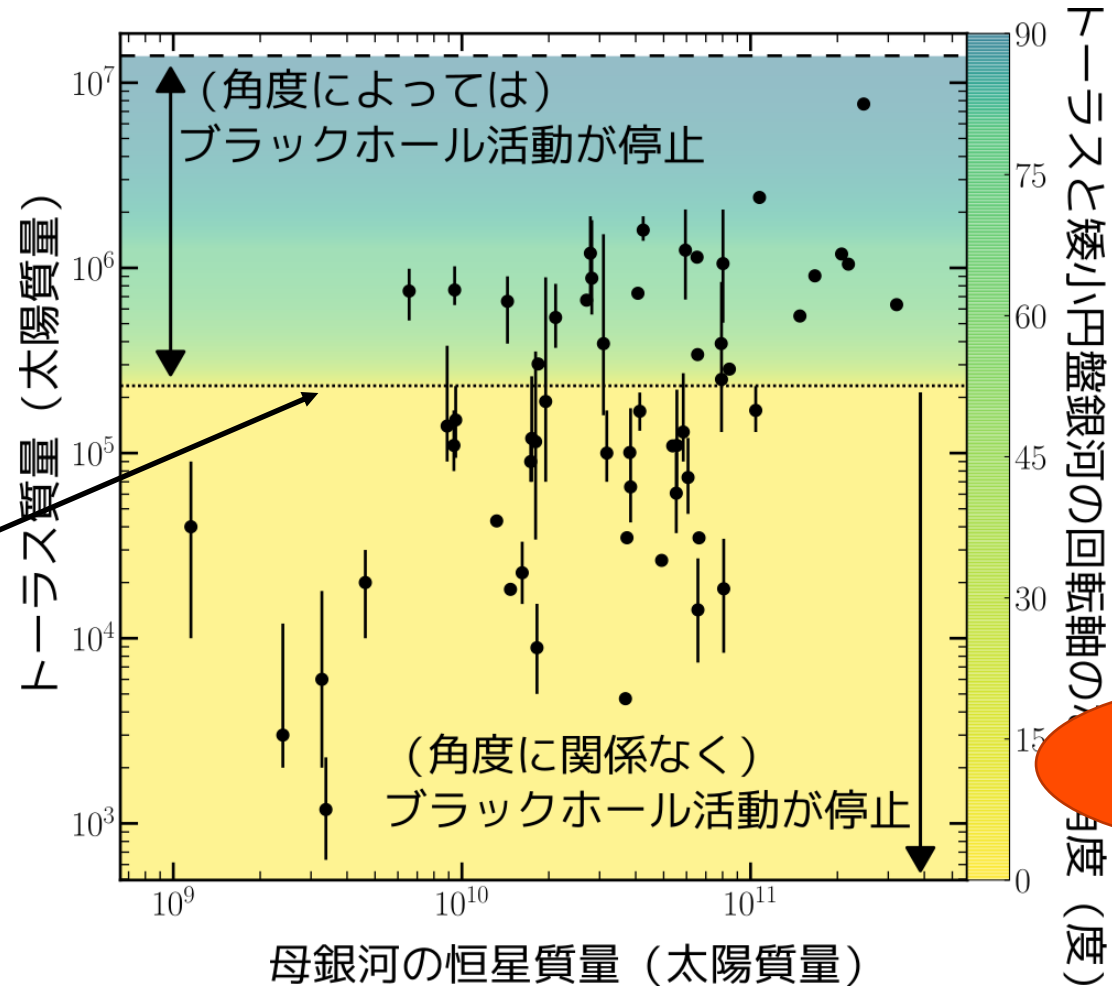


落ちてくる衛星銀河

アンドロメダ銀河以外の銀河ではどうなる？

- トーラス・ガスを取り去れるかは、トーラス質量で決まる
 - より正確には、柱密度が重要
- 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

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



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

