

ブラックホール影の新種ターゲットの提案 -- 漂う巨大ブラックホール --

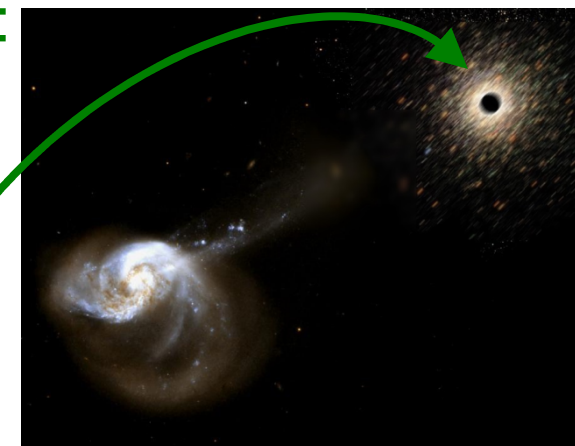
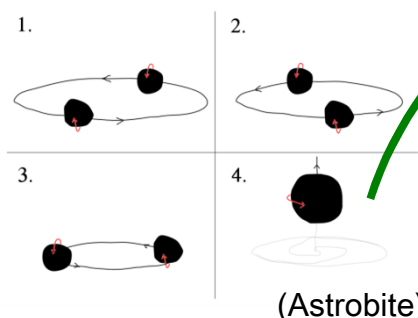
川口 俊宏 (国立天文台)

(1) 重力波放出反作用で飛び出たブラックホール:

Merritt, Schnittman & Komossa 2009

O'Leary & Loeb 2009

ブラックホールの合体
→ 重力波放出

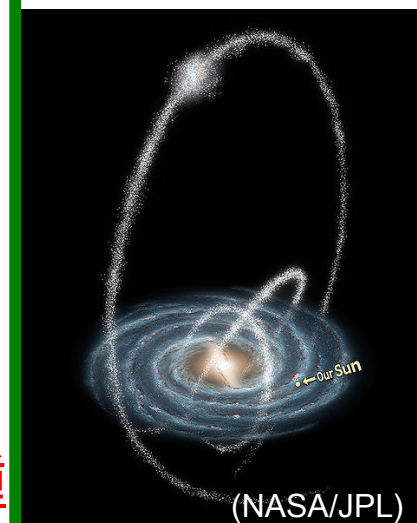


(2) 中心銀河に吸収合併される途中の 衛星銀河の中心ブラックホール:

Bellovary et al. 2010

Miki et al. 2014

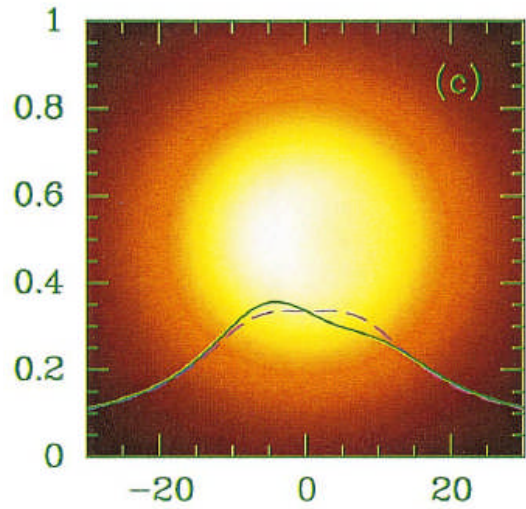
Kawaguchi, Saito Y., Miki, Mori, 2014



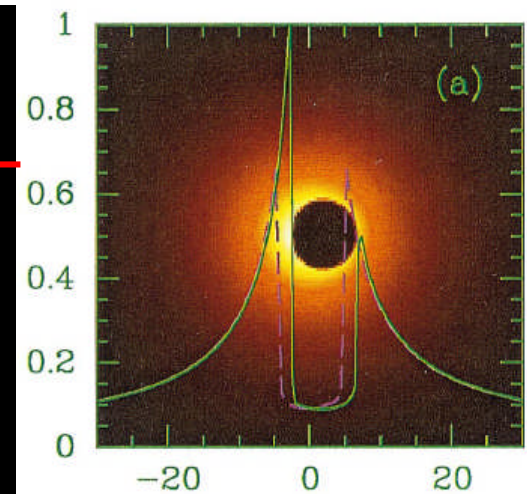
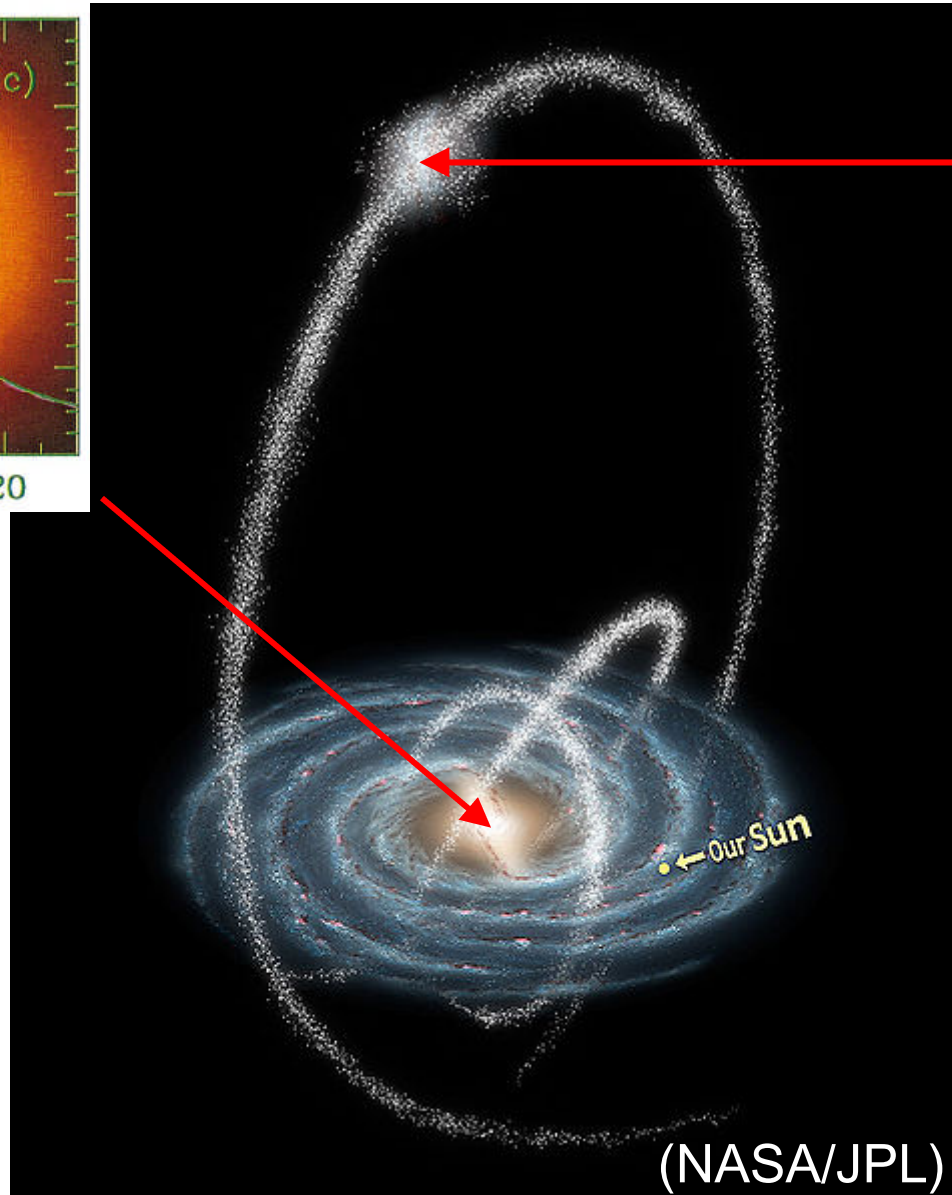
(3) 近傍宇宙での漂う巨大ブラックホール候補天体(3種)

まとめ: ブラックホール影の新種ターゲットの提案

漂う巨大ブラックホール: 星間散乱の邪魔(像のぼやけ)なく、ブラックホール影の撮像



星間散乱により像がぼやけてしまったブラックホールへのガス降着流 (Falcke +2000)

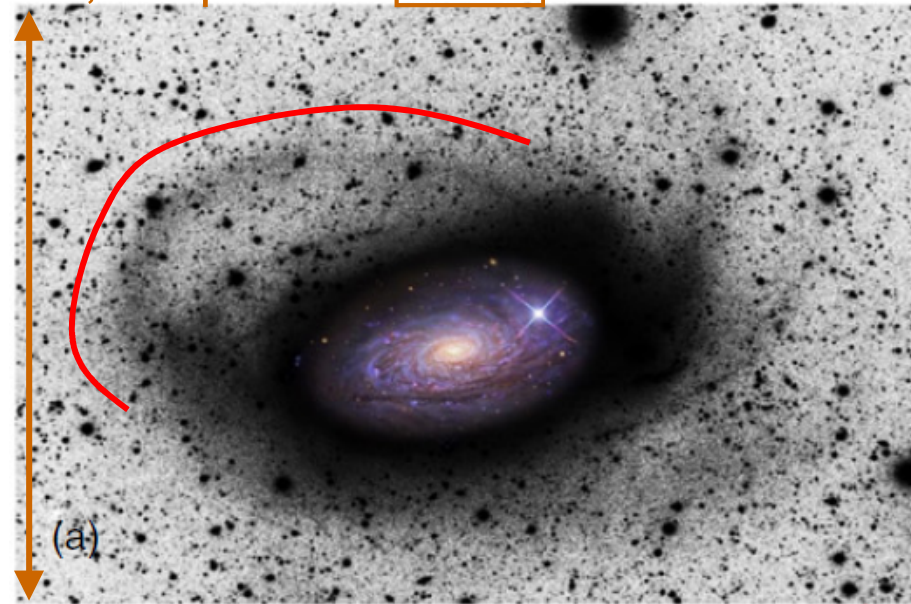


ブラックホールガス降着流の見かけ

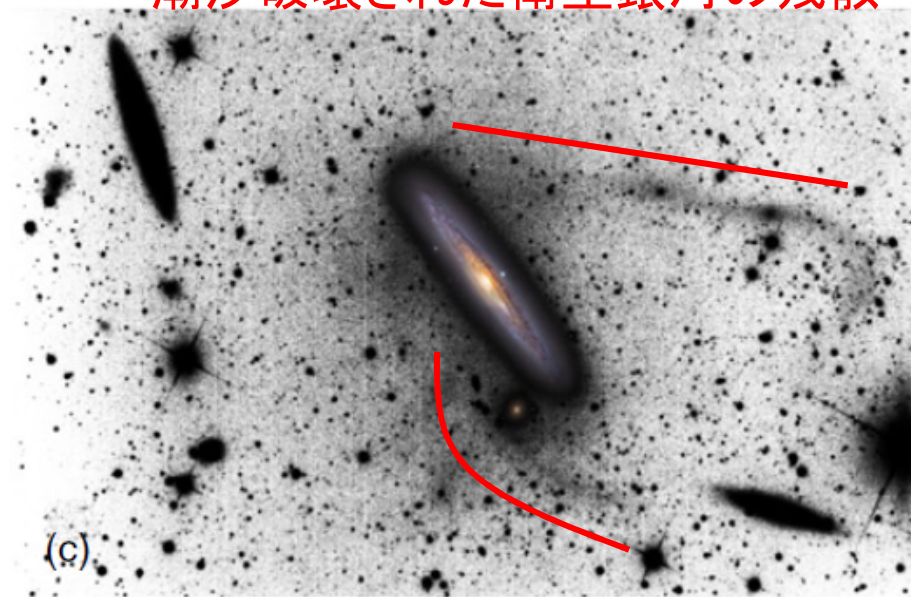
1. 銀河の進化: 近くの銀河と衝突・合体して成長

観測

27', 65kpc

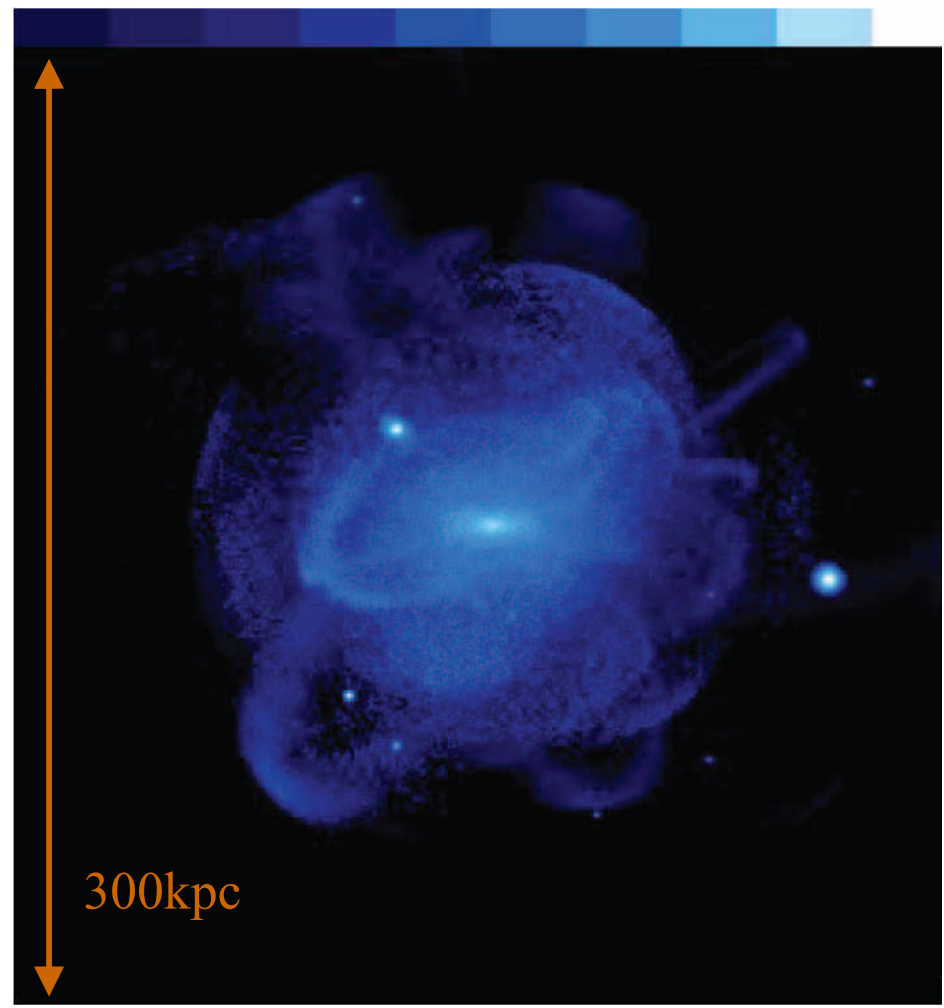


潮汐破壊された衛星銀河の残骸



理論

星密度分布の計算例: 衛星銀河残骸多数

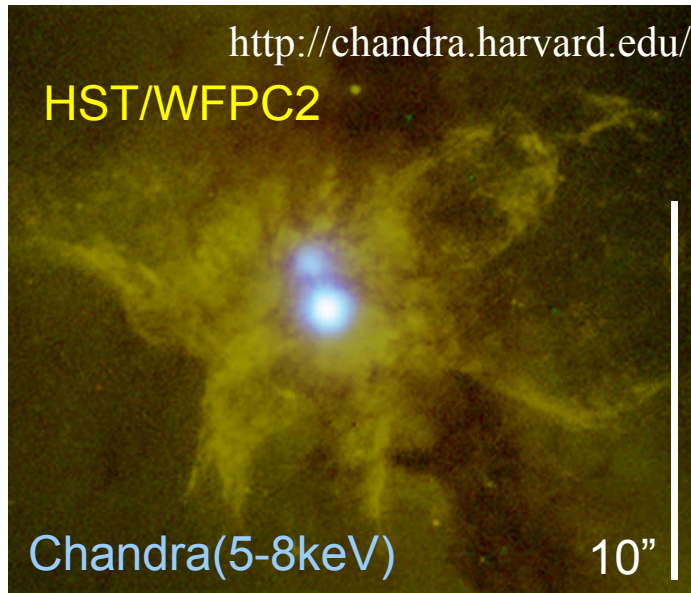


Bullock & Johnston 2005

Martinez-Delgado+2010

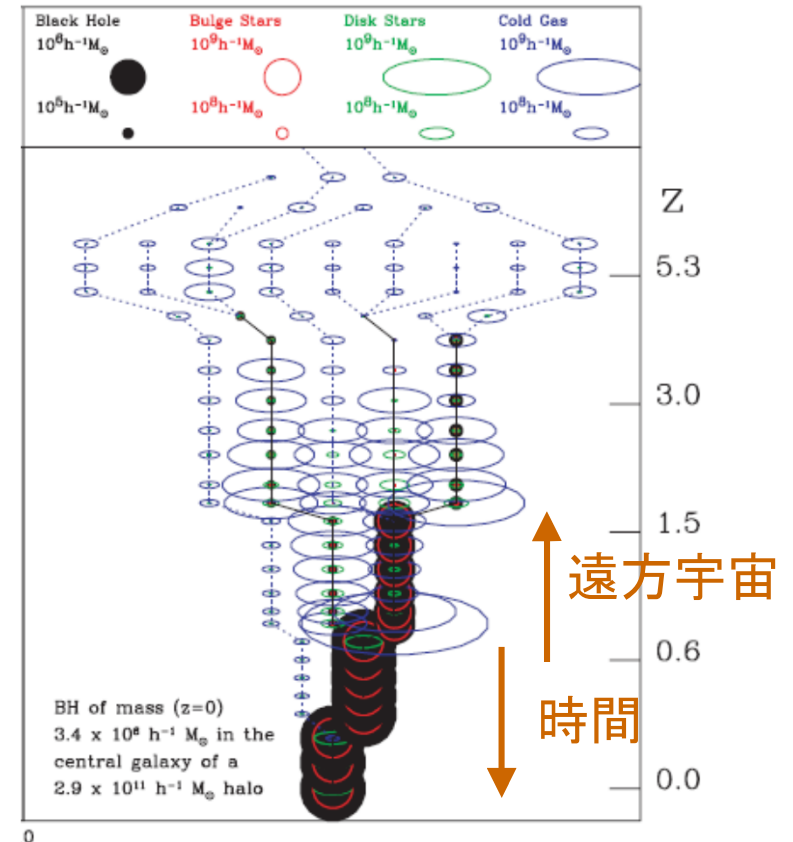
銀河の合体・成長と巨大BHの進化

- 衝突中の銀河同士の中心BHにガス降着が起きている例:
e.g., NGC6240 (Komossa+03)



- Jetコアの軌道運動 (Sudou+03),
Double BLR (Boroson+Bauer 09)

- 準解析的手法による構造形成のモデル計算例 (Malbon+07)

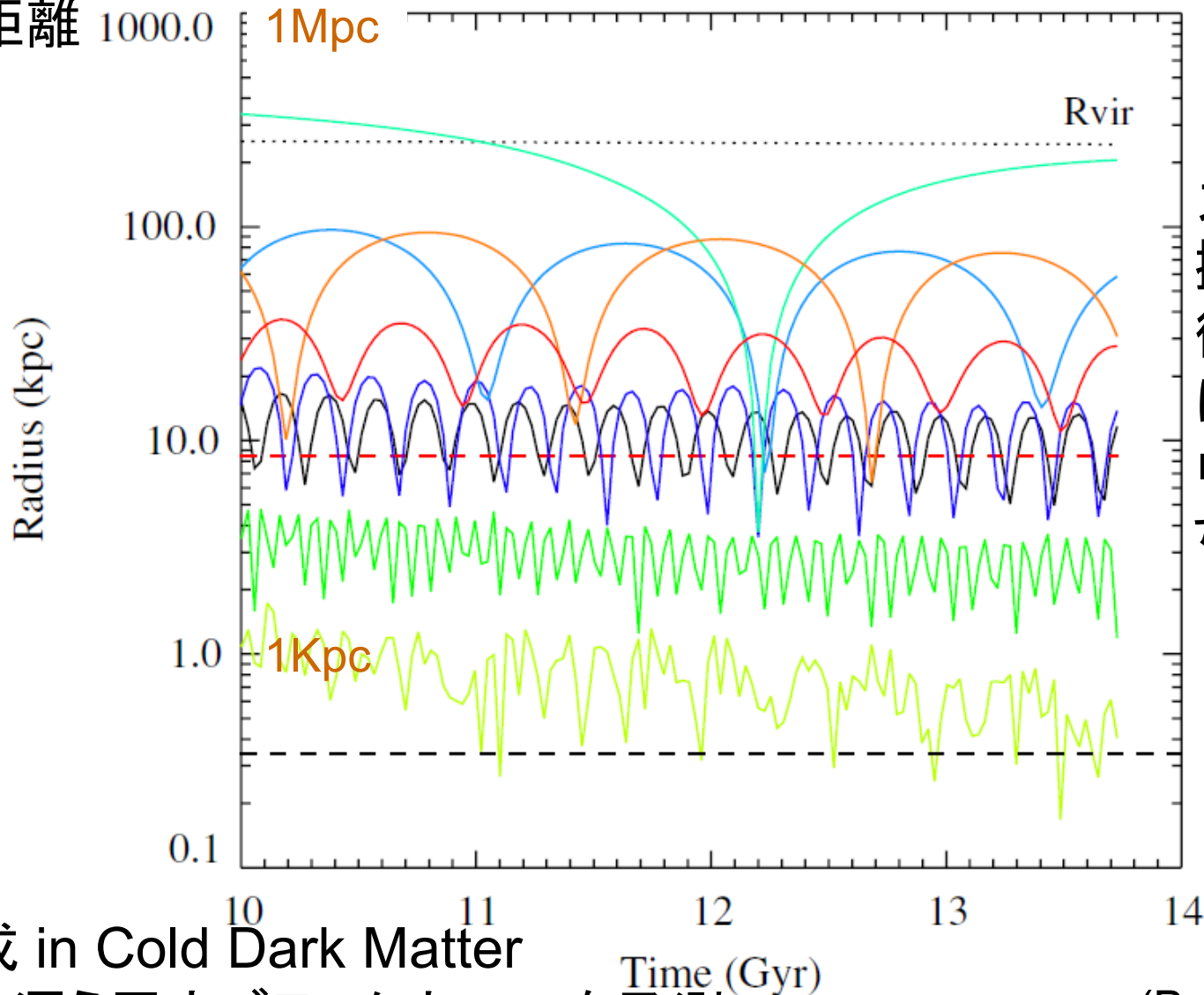


- 今日紹介するのは、元衛星銀河が壊れつつある段階での、
元衛星銀河の中心BHが親銀河のハローを漂っている話

銀河ハロー中を漂う衛星銀河の中心BH (1/2)

5/24

巨大ブラックホール (衛星銀河の元中心ブラックホール) の中心銀河からの距離



力学的摩擦により、衛星銀河は徐々に中心へ落ちていく

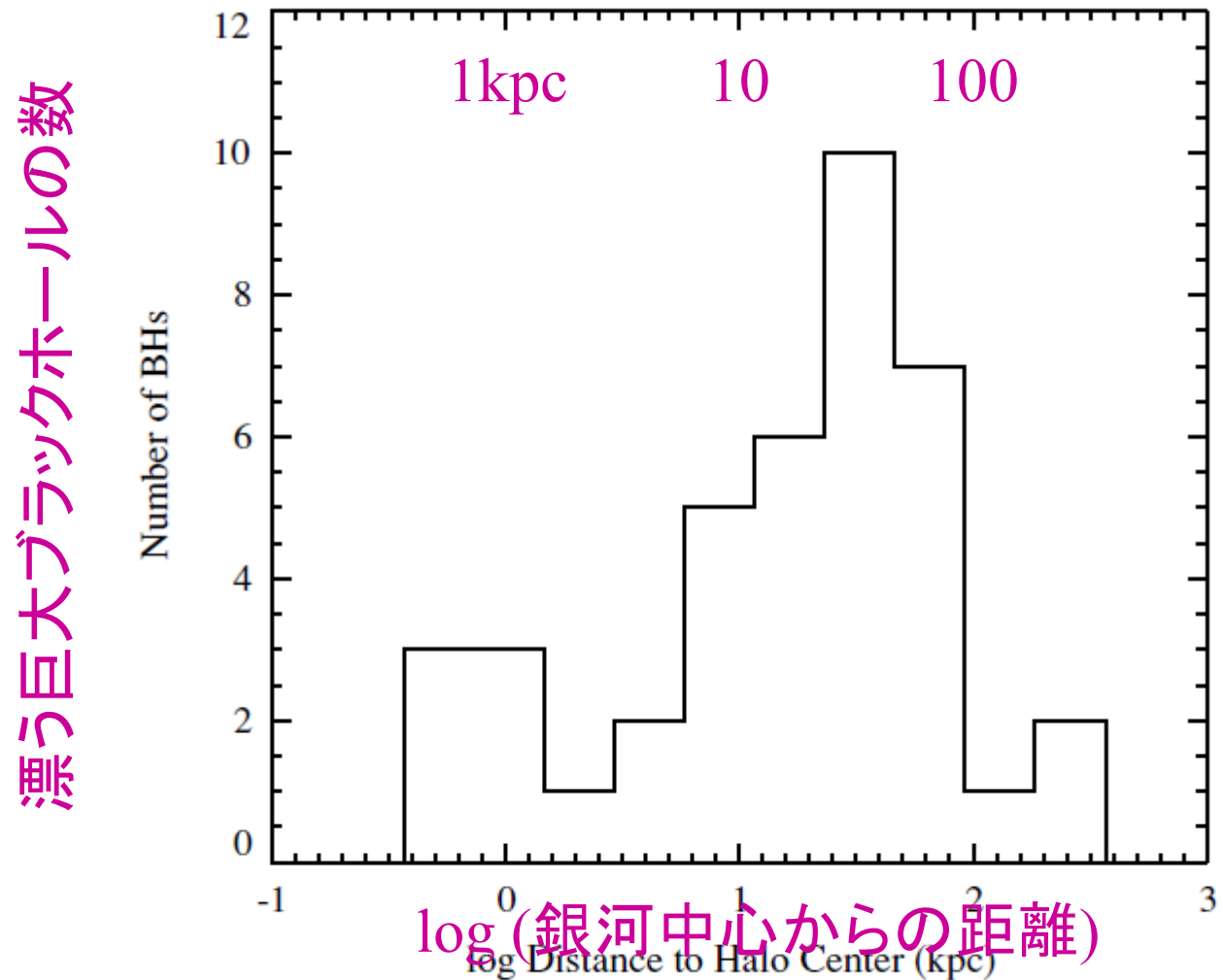
構造形成 in Cold Dark Matter

→ 多くの漂う巨大ブラックホールを予測

(Bellovary+10)

銀河ハロー中を漂う衛星銀河の中心BH (2/2)

- ◆ 天の川銀河に、5-15 個の漂うブラックホール (40個 in 4 runs)
- ◆ 銀河中心からの距離 ~ 10-100 kpc

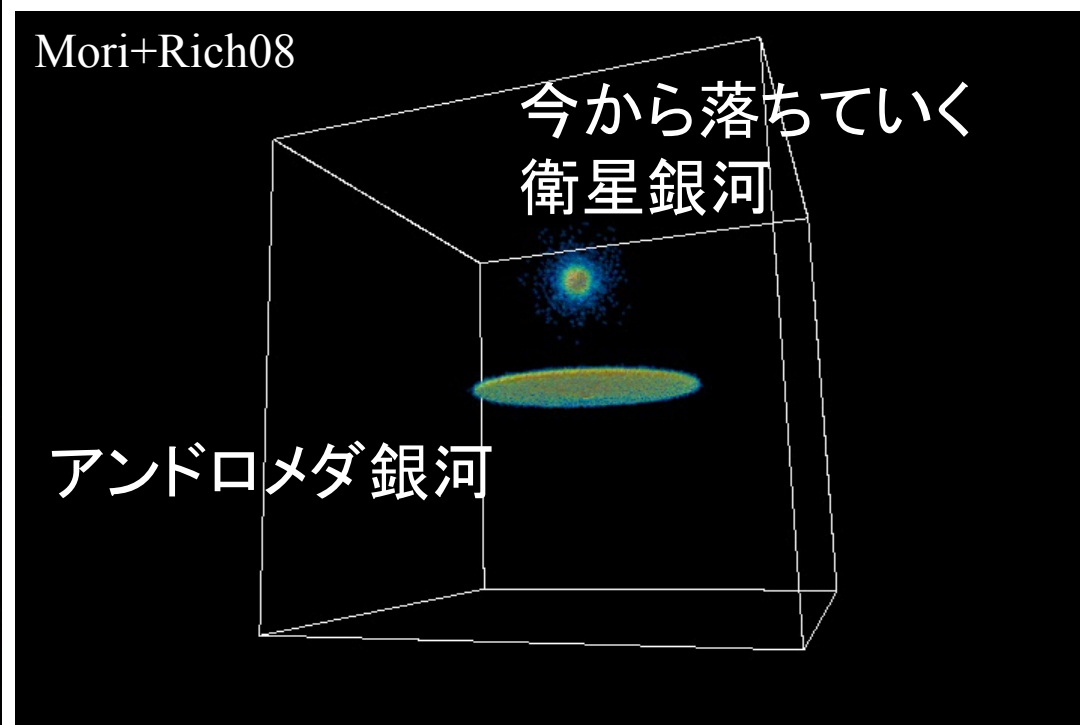
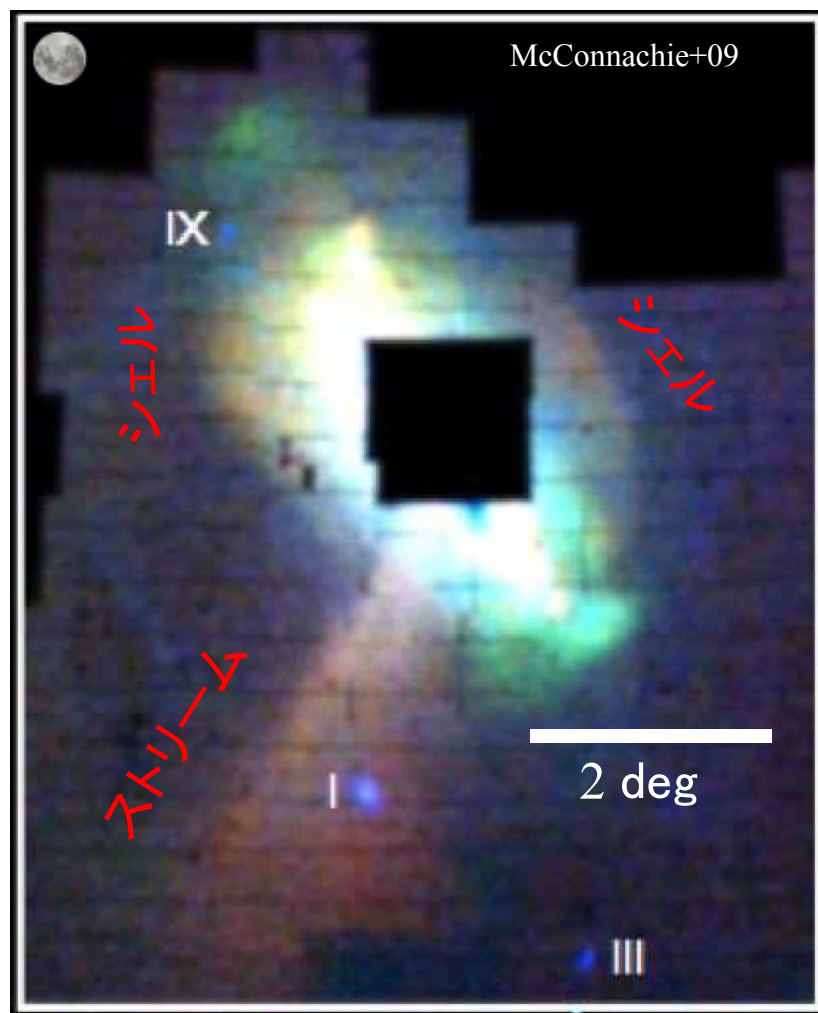


(Bellocary+10)

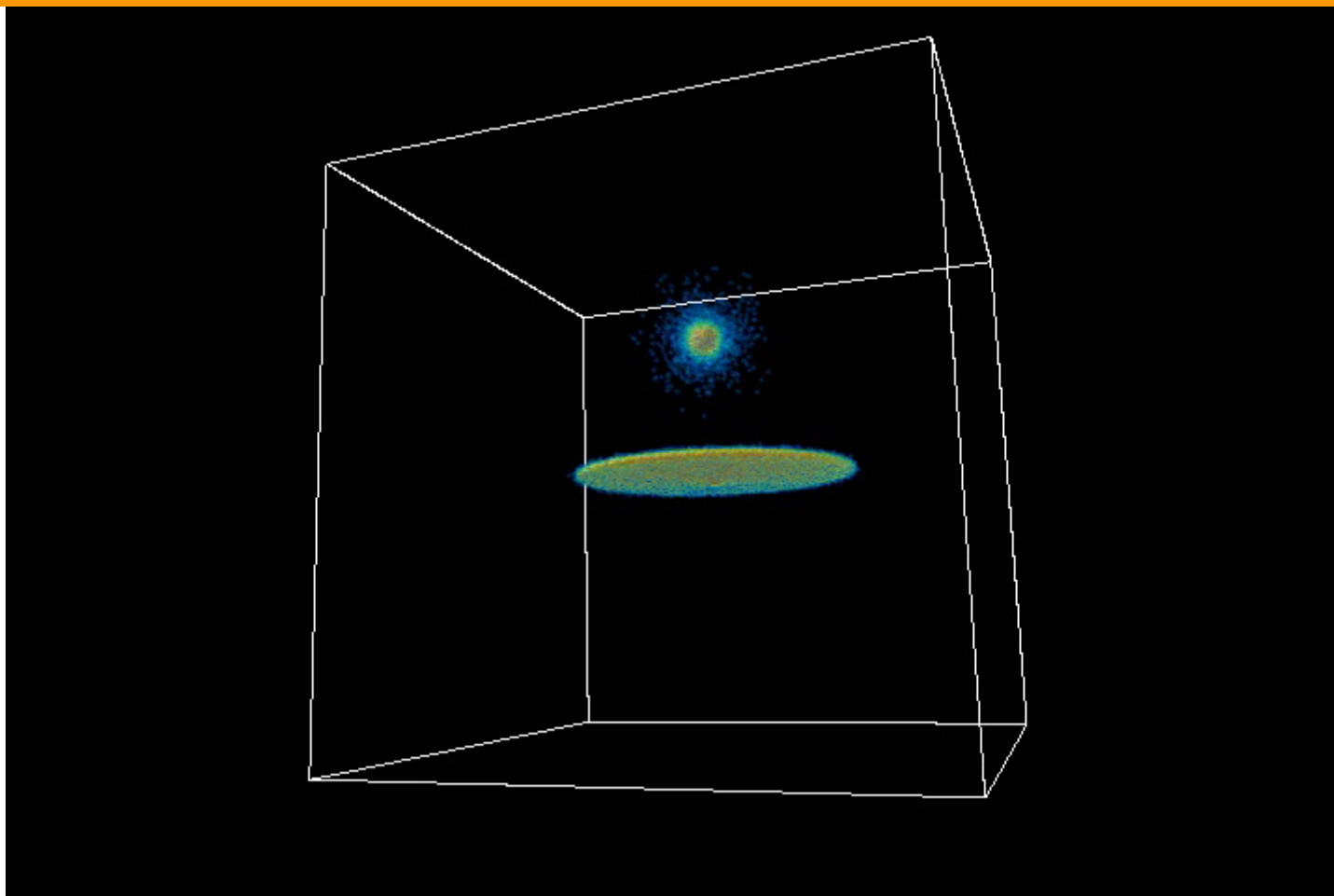
Figure 1. Top panel: distribution of BH radial distances to their halo centers for 40 BHs in four simulated galaxies.

M31 (アンドロメダ銀河) の銀河衝突

- ◎ 近い(隣の銀河)
- ◎ 星の分布・構造に、約10億年前に矮小銀河が衝突した痕跡
 - ⇒ 銀河衝突に伴う巨大ブラックホールの進化をさぐる最適な実験場



アンドロメダ銀河の銀河衝突: 数値シミュレーション



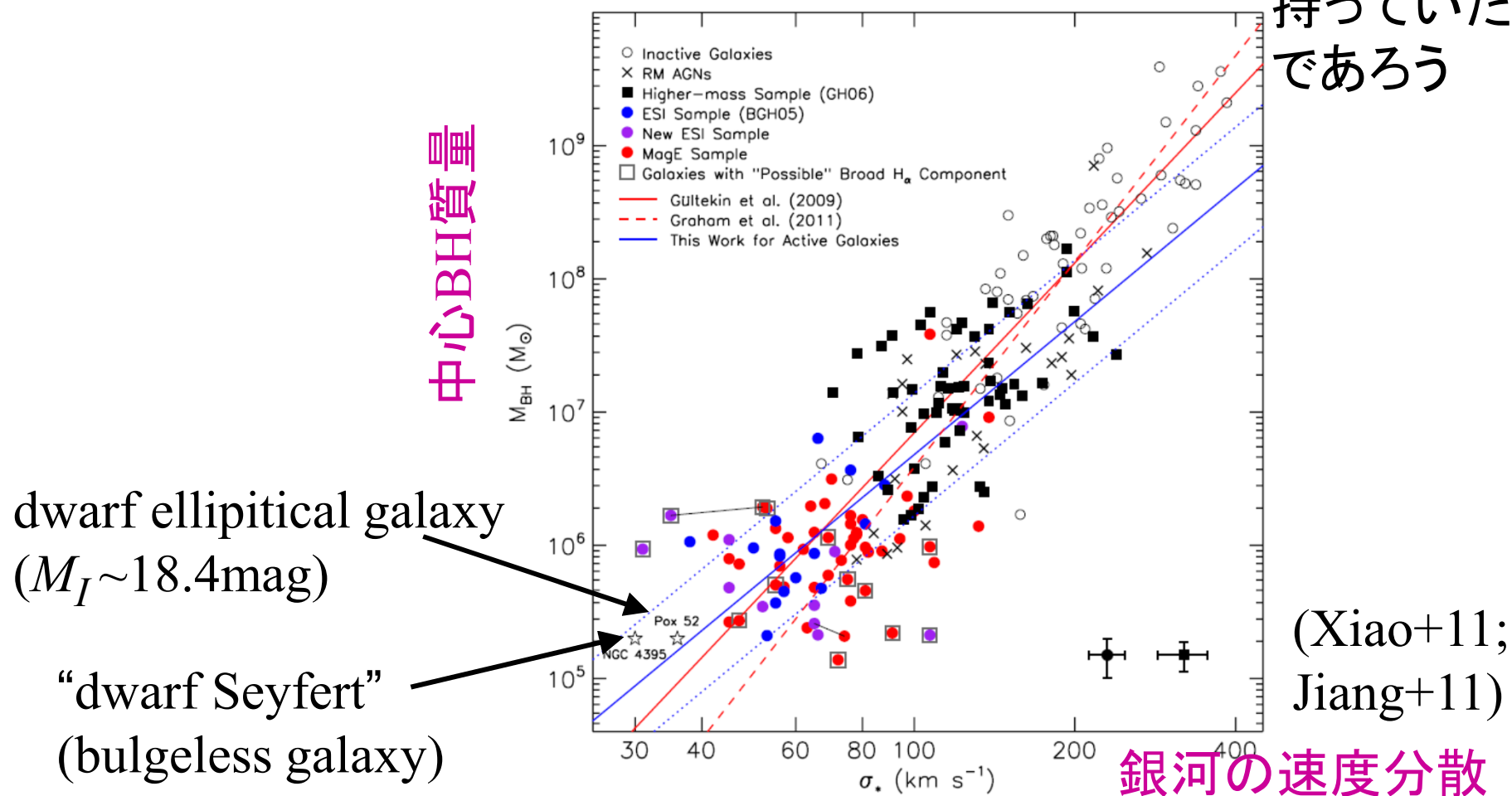
森 (筑波大学) 他

- 衛星銀河が壊され、粉々に吹き飛んでいく (\leq 脱出速度)
- いずれ落ちてきて、アンドロメダ銀河に吸収・合併(銀河の成長)
- 付随する巨大ブラックホールの成長を追う/探す

衝突した衛星銀河とその中心BH

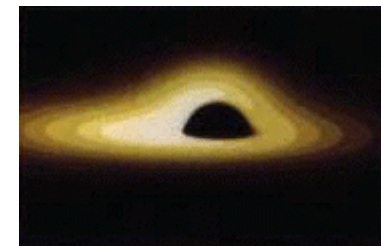
- 衛星銀河の質量上限: $5 \times 10^9 M_{\text{sun}}$ (Mori & Rich 08)
星質量下限: $5 \times 10^8 M_{\text{sun}}$ (Ibata+04)
- M- σ 関係 $\Rightarrow M_{\text{BH}} \sim 10^7 M_{\text{sun}}$ ($\times / \div 2$ の3種類計算)
- M- σ 関係の現在の下限: $M_{\text{BH}} \sim 10^5 M_{\text{sun}}$ \rightarrow 元衛星銀河も中心BH

持っていた
であろう



アンドロメダ銀河の銀河衝突: 衝突した衛星銀河の中心BHを探す

- 探して、もし本当に居れば、
 - 銀河衝突に伴って巨大BHが合体成長していく初期過程を理論・観測両面から捉える初めての例
 - 元衛星銀河の漂うBHはウヨウヨ。新しいBH種族の開拓
 - ブラックホールの撮像に良いターゲット



<http://quasar.cc.osaka-kyoiku.ac.jp/~fukue/>

ステップ1) 漂っているブラックホールの位置を、数値シミュレーションと観測の比較を通して、予測する。(Miki + 2014)

ステップ2) どの波長でどれぐらい明るいかわかる理論計算する。観測装置の性能と比較して、どの波長でどの装置で探するのが良いか決める。(Kawaguchi + 2014)

← 今ここ。

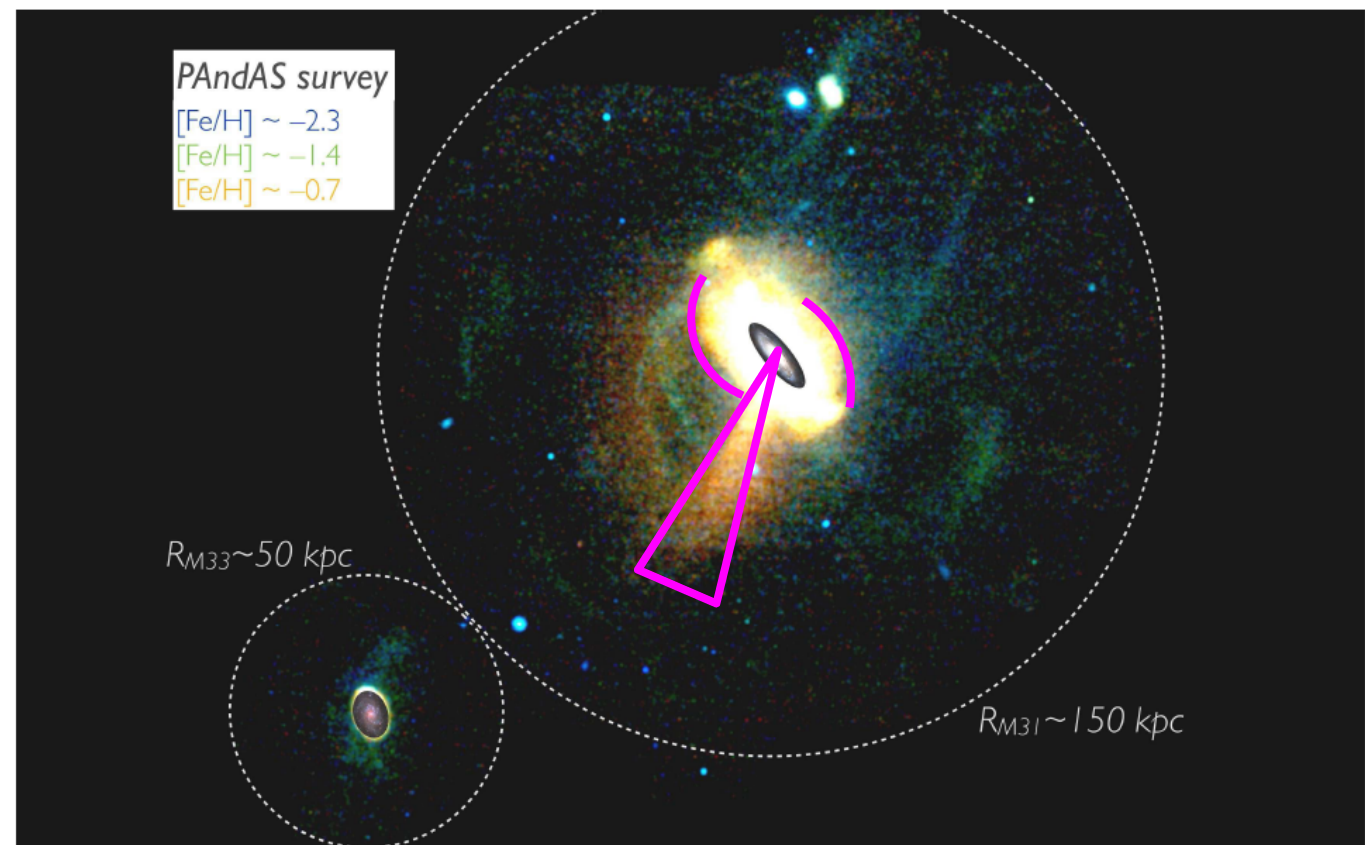
ステップ3) 観測を行い、見つける。

-- Step 1 方針 --

(Miki + 2014)

衛星銀河の衝突軌道を多数調査： 観測される巨大な星構造を再現

- * Giant stream: 位置
- * East and West shells: 位置, シャープな端
- * 光度比 among E, W shells and stream



Martin + (2013)

漂う巨大ブラックホールの位置予測

N体数値計算

1) 低分解能計算: 衛星銀河 = 65000 粒子
 ⇒ 5.7 million 軌道モデル中, 138 軌道が **観測される構造を再現**

2) 高分解能計算:

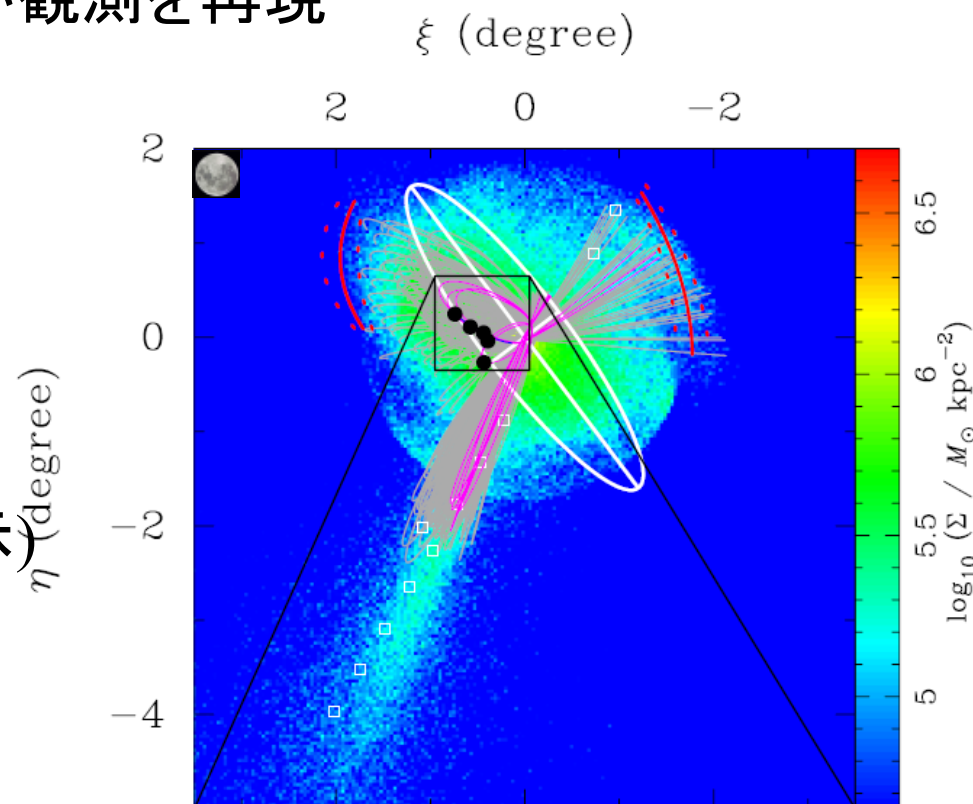
衛星銀河 = 520000 粒子 + 中心ブラックホール粒子
 ⇒ 138軌道中, **5 軌道**モデルが観測を再現

Color: 衛星銀河(残骸)の
 星密度分布

白線: アンドロメダ銀河の円盤部
 (アンドロメダ銀河の星は非表示)

赤線: shells

白四角: Giant stream



漂う巨大ブラックホールの位置予測

ξ (degree)

13/24

2 0 -2

Miki et al. 2014

Color: 衛星銀河(残骸)の
星密度分布

白線: アンドロメダ銀河の円盤部
(アンドロメダ銀河の星は非表示)

赤線: shells

白四角: Giant stream

Gray: 138 軌道モデル

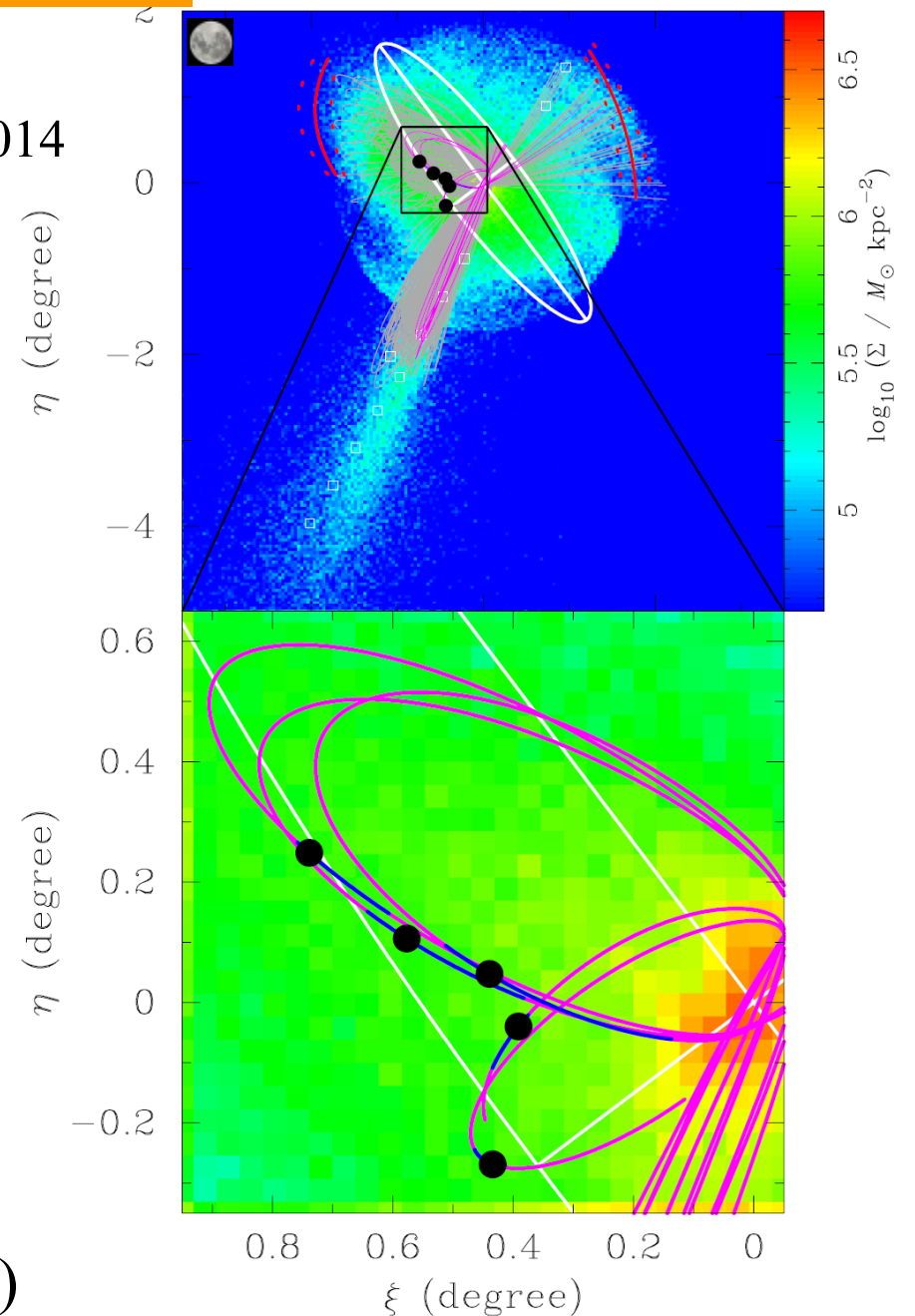
pink: 5 軌道モデル (best models)

青線: 一番良い時間帯

黒点: 中心ブラックホールの位置

→ この辺りが探すべき領域

(~ 0.6 度 x 0.7 度 \sim 満月)



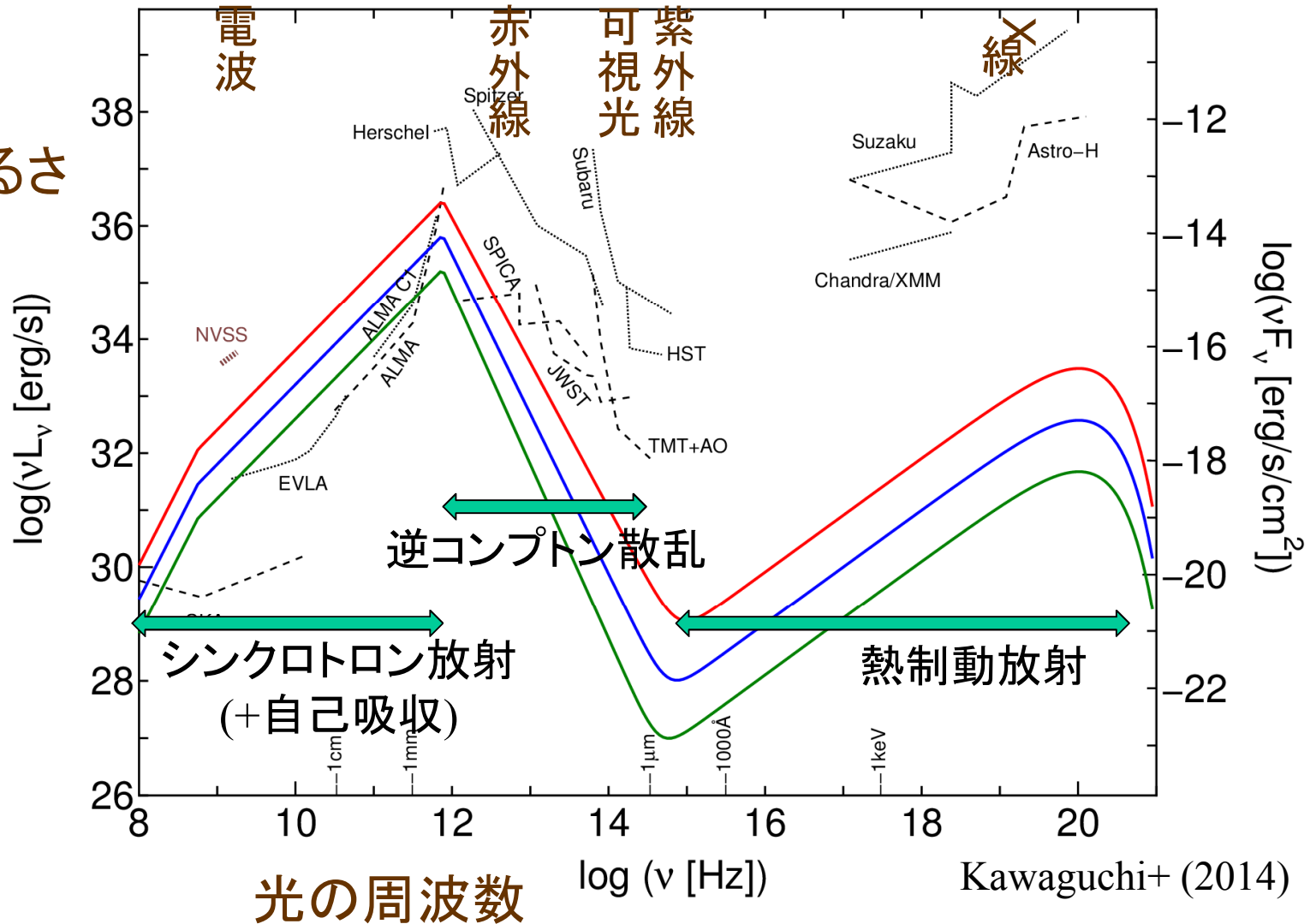
Step 2: 期待される放射スペクトル分布

- ◆ 星間ガスのHoyle-Lyttleton-Bondi降着を仮定
- ◆ ブラックホールへ落ちていく高温希薄ガス降着流からの放射モデル

赤青緑=漂う
巨大ブラック
ホールから
期待される
放射

$M_{BH} =$
 $2 \times 10^7,$
 $10^7,$
 $5 \times 10^6 M_{\text{太陽}}$

明るさ



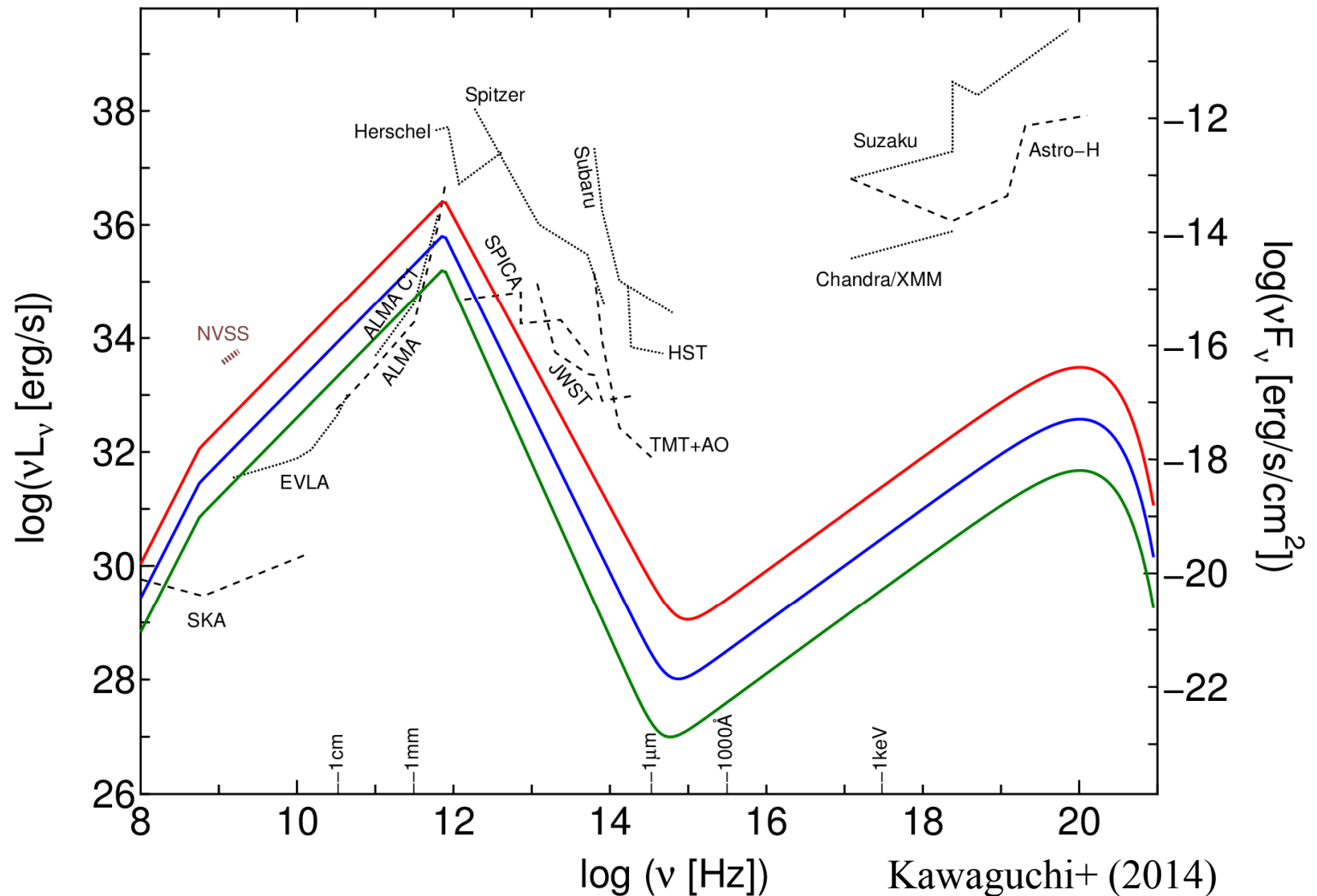
Step 2: 漂う巨大BHの放射予測と検出可能性

- 検出感度:
(10^4 秒, 10σ)

点線=

稼動中

波線=予定



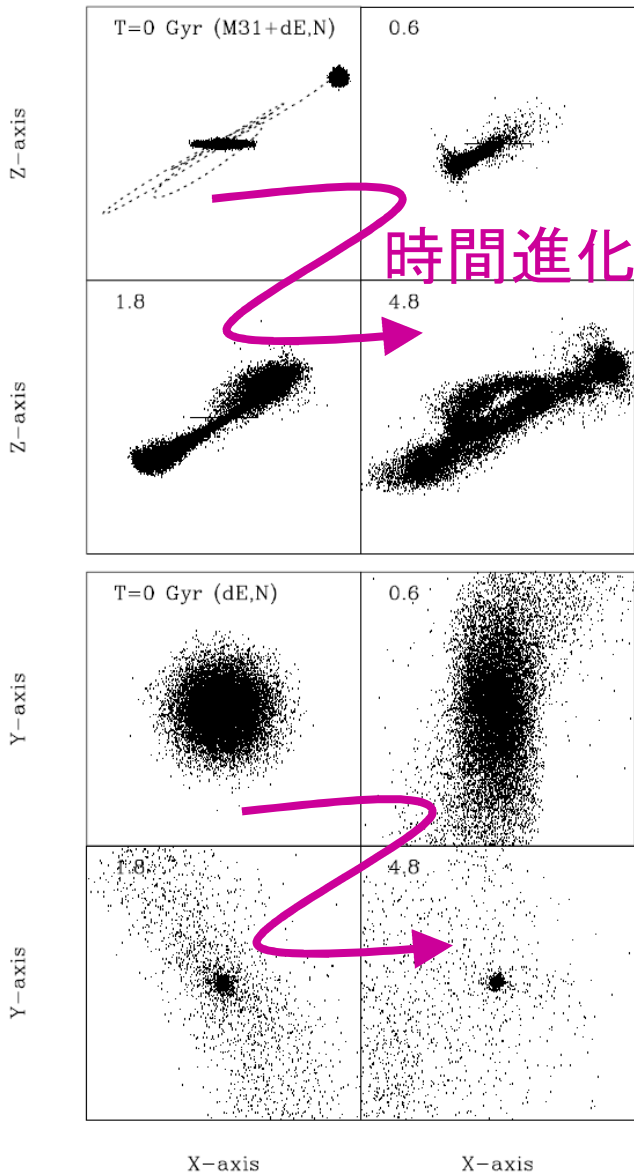
- 電波(EVLA, ALMA, SKA)で検出できる

本当に確認されれば、漂う(巨大)ブラックホールはウヨウヨ。

新しいブラックホール種族の開拓。

漂う巨大BHにまわりついでいる星の集団を/も探す

- 元衛星銀河の生き残り星団候補 (Annibali+ 12; Bekki+Freeman 03)



M31+衛星銀河の衝突

衛星銀河の残骸と疑われている星団例



(Annibali+ 12)

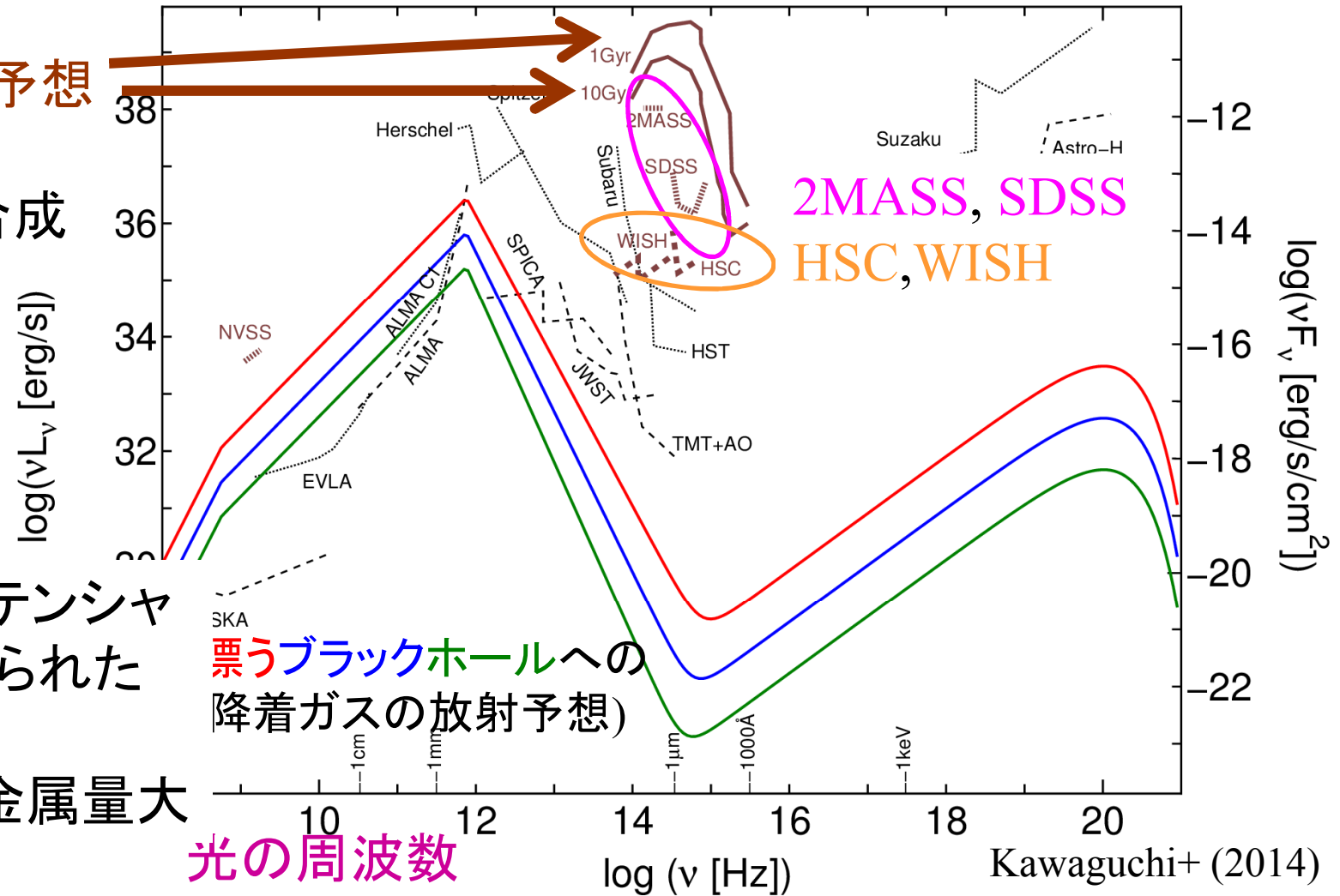
衛星銀河のみの拡大図

(Bekki+Chiba 04)

漂う巨大ブラックホールが引き連れる衛星銀河中心部

- 衛星銀河のうちどれだけ潮汐破壊に耐え残るか
 ← 軌道 (近心点距離 ~ 1kpc)
- 近心点でのHill半径(~70pc)に内包する星質量 ~ $0.1 M_{BH} \sim 10^6 M_{sun}$

- 放射分布予想
 (1, 10Gyr;
 星種族合成
 モデル)



- 銀河のポテンシャルの底で作られた星々
 → おそらく金属量大

漂うブラックホールへの降着ガスの放射予想)

(3) 近傍宇宙での漂う巨大ブラックホールの例1

18/24

3a) Ultra-Compact Dwarf Galaxy中の巨大ブラックホール (Seth+ 2014)

- ◆ Brightest ultracompact dwarf galaxy
- ◆ $L_V = 4 \times 10^7 L_{\text{sun}}$
- ◆ 有効半径=24pc
- ◆ projected distance (to M60) = 6.6kpc
- ◆ 面分光観測を実施
- ◆ 時間変動するX線源あり
with $L_X \sim 10^{38} \text{ erg/s}$
(\sim 非AGN銀河中心)

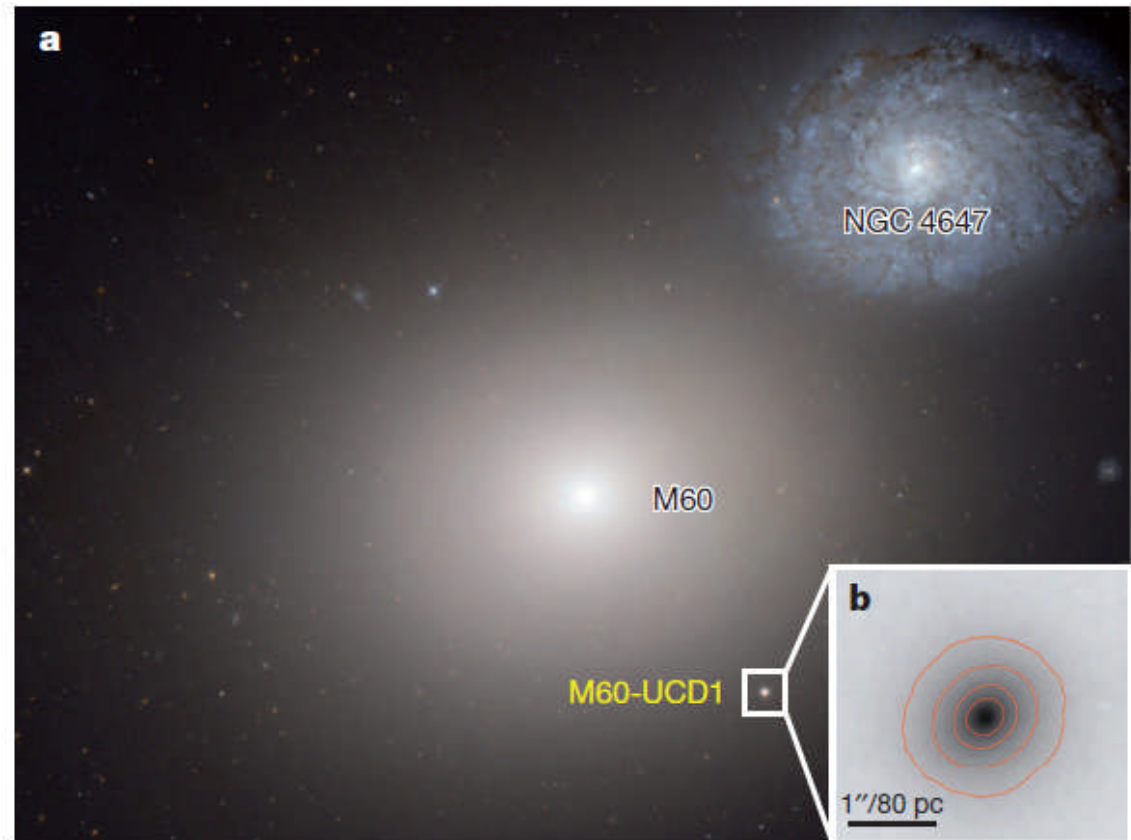


Figure 1 | Hubble Space Telescope image of the M60–NGC 4647 system. M60-UCD1 is the nearly point-like image in the bottom right of a (boxed). The discovery of a black hole in M60-UCD1 provides evidence that it is the tidally stripped nucleus of a once larger galaxy. We note that NGC 4647 is at approximately the same distance from Earth as M60 but the two galaxies are not yet strongly interacting. b, A zoomed version of the g-band image of M60-UCD1 with contours showing the surface brightness in intervals of one magnitude per square arcsecond. The image is from NASA/ESA.

(3) 近傍宇宙での漂う巨大ブラックホールの例1

3a) Ultra-Compact Dwarf Galaxy中の巨大ブラックホール (Seth+ 2014)

速度

速度分散

データ
モデル

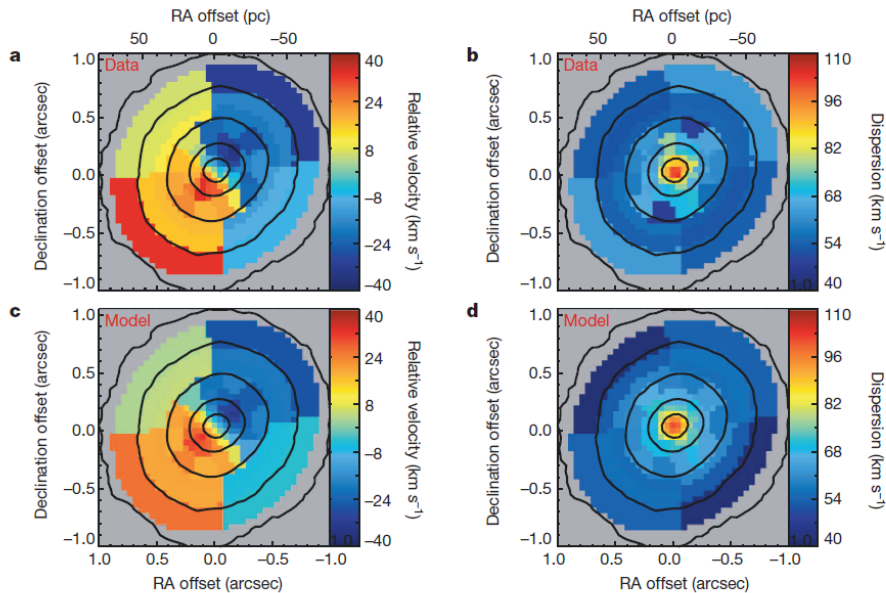
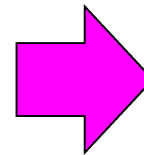


Figure 2 | Stellar kinematic maps of M60-UCD1 showing clear rotation and a dispersion peak. a and b show the measured radial velocities (bulk motions towards and away from us) and velocity dispersions (random motions) of the stars in M60-UCD1 with typical errors of 6 km s^{-1} . Black contours show isophotes in the K-band stellar continuum. Kinematics are determined in each

individual pixel near the centre, but at larger radii the data were binned to increase the signal-to-noise ratio and enable kinematic measurements. c and d show the best-fitting dynamical model; a black hole is required to replicate the central dispersion peak.



BH 質量

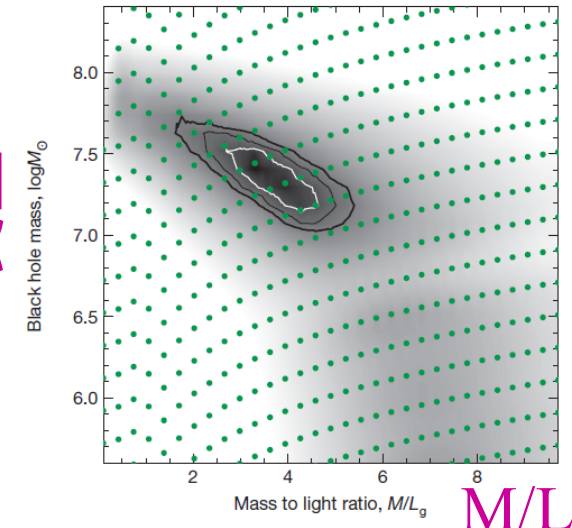


Figure 3 | Dynamical modelling results show the presence of a supermassive black hole. The figure shows goodness-of-fit contours for the dynamical models of M60-UCD1 with two parameters, the g-band mass-to-light ratio and the black hole mass. The contours indicate 1σ (white), 2σ , 3σ (black, thick) confidence levels for two degrees of freedom. Green dots indicate discrete values of the mass-to-light ratio and the black hole mass at which models were fitted to the data.

$V_{\text{回転}} \sim 40 \text{ km/s}$

$\sigma > 100 \text{ km/s}$ at peak
(巨大BHを示唆)

◆ $M_{\text{BH}} \sim 2 \times 10^7 \text{ Msun}$

◆ $M_{\text{星}} \sim 10^8 \text{ Msun}$
(通常、銀河中心は
1:700)

→ 以前は大きかった銀河が、潮汐力で星がはぎ取られた結果？

(3) 近傍宇宙での漂う巨大ブラックホールの例2

3b) 銀河団内の謎の電波 jet/lobe (Jamrozy et al. 2014)

R-band 画像 (DSS)

十印: 銀河団所属銀河
& 遠方に居る quasar

細コントア:
電波 (NVSS)

太コントア:
軟X線 (ROSAT)

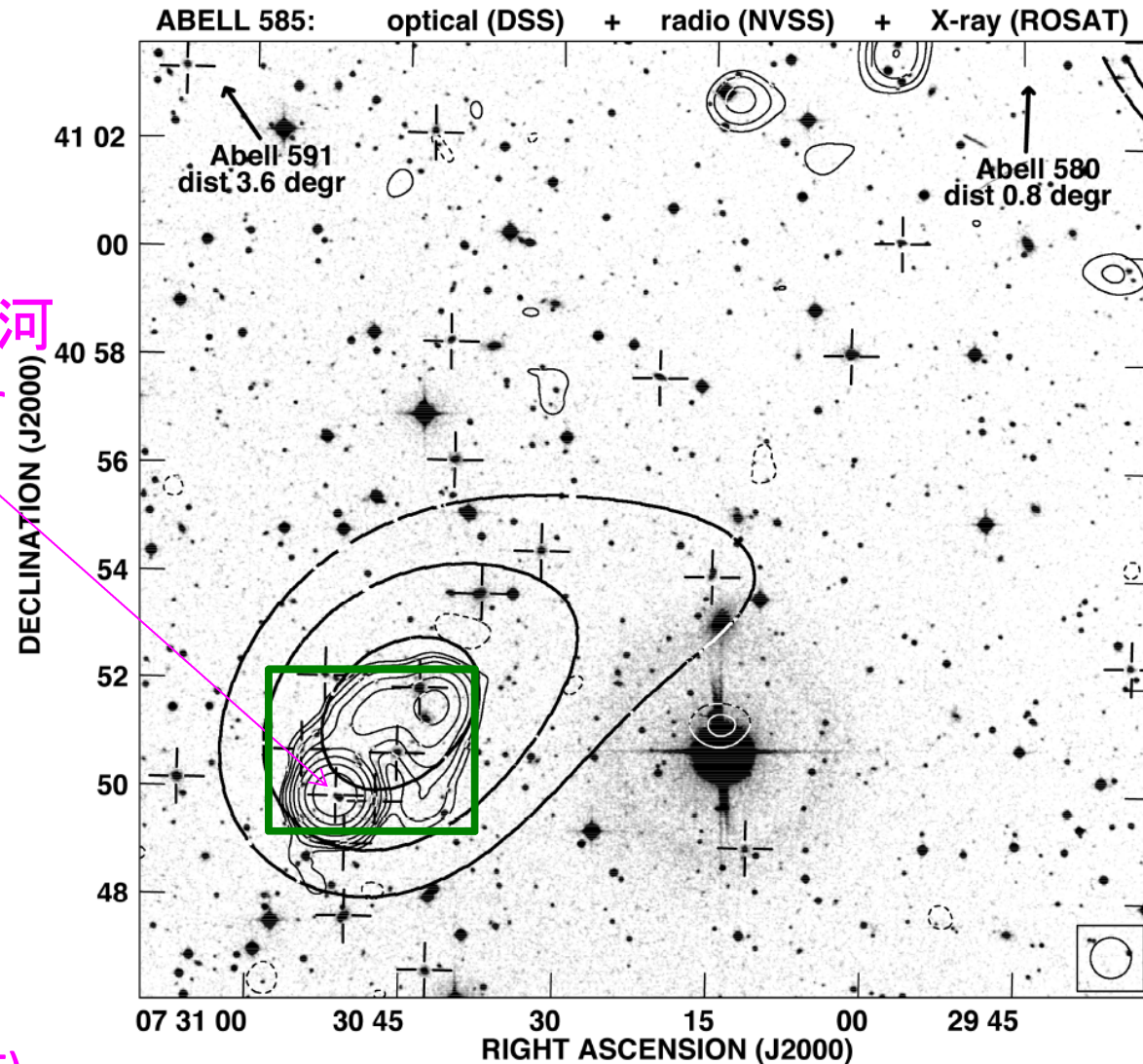


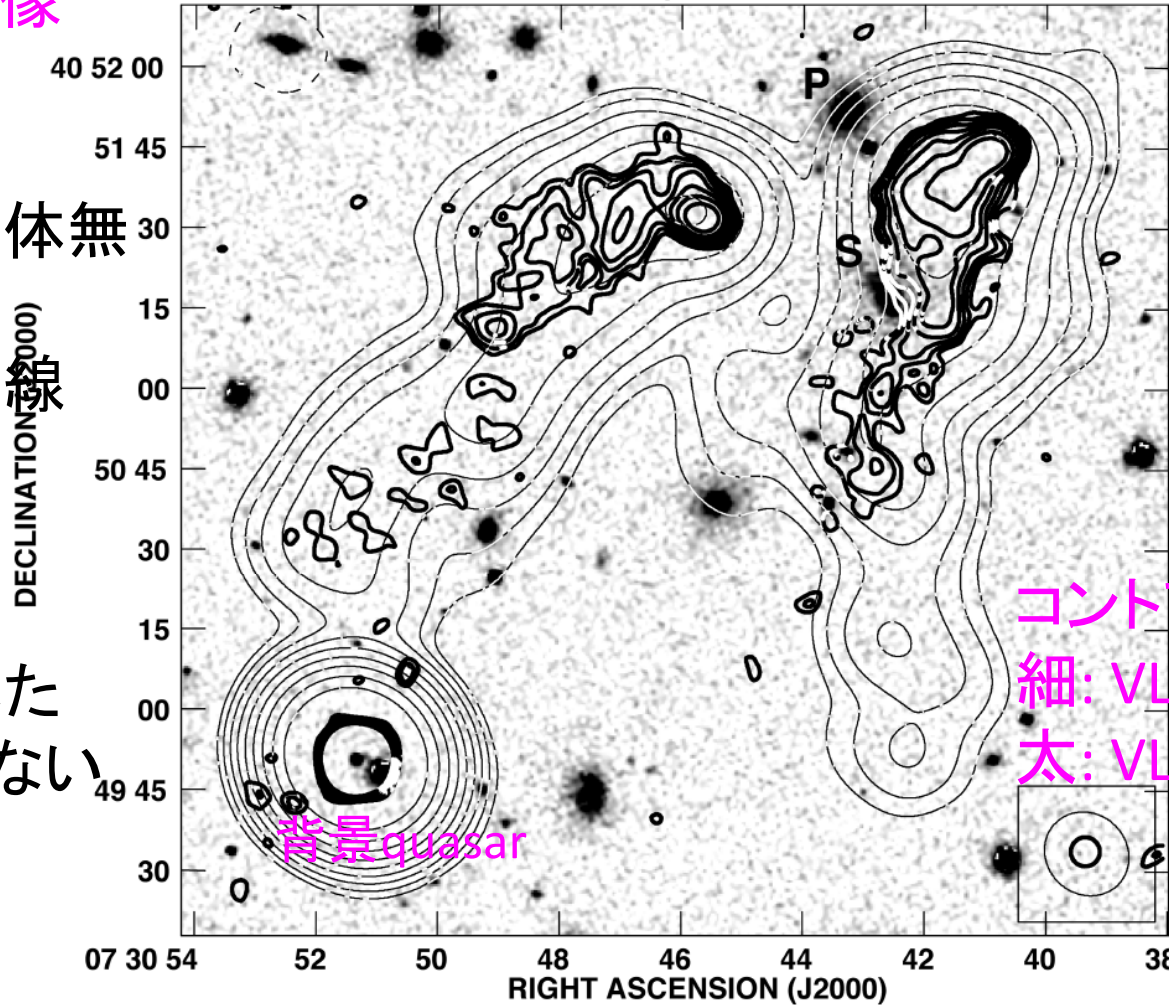
Figure 1. Multiband image of the central regions of the galaxy cluster Abell 585. Optical *R*-band image from the DSS is shown in grey-scale. The crosses mark the positions of the cluster member galaxies, as well as of the background quasar B3 0727+409. The two arrows indicate the directions to the nearest clusters Abell 580 and Abell 591, along with the corresponding angular distances. The thin contours represent the 1400 MHz radio emission measured in the NVSS survey. The contours are spaced by factors of $\sqrt{2}$ in brightness and plotted starting with $1.35 \text{ mJy beam}^{-1}$. The dashed contours represent the negative

3b) 銀河団中の謎の電波 jet/lobe (Jamrozy et al. 2014)

r-band 画像
(SDSS)

◆ 対応天体無
in
中間赤外線
(WISE)
可視光
(SDSS)
→ 埋もれた
AGNではない
P, S: 銀河団
所属銀河

ABELL 585: L-band radio + r-band optical



コントア = 電波画像
細: VLA C-array
太: VLA B-array
(FIRST)

Figure 2. L-band VLA images of the radio structures in Abell 585 overlaid on the r-band optical field from the SDSS (DR9). Thin contours correspond to the 1425 MHz VLA C-array map of the entire source (see Table 2 for details). The contour levels are spaced by a factor of 2, and the first contour is $0.18 \text{ mJy beam}^{-1}$. Thick contours represent the VLA B-array map from the FIRST survey. The contour levels are spaced by a factor of $\sqrt{2}$, and starting from $0.35 \text{ mJy beam}^{-1}$. The indices 'S' and 'P' denote the bright spiral galaxy and the particularly prominent elliptical galaxy discussed in the text (see Table 1). The sizes of the beams are given as ellipses in the bottom-right corner of the image.

→ (写っていない) 漂う巨大ブラックホールが打ち上げた jet/lobe ?
他に、同様の 7 例 (身元不明の jet/lobe 状)

(3) 近傍宇宙での漂う巨大ブラックホールの例3

22/24

とある横から観ている円盤銀河の、
銀河面上空に位置する。

(Farrell+2009,
Webb+2010,
Wiersema+2010)

多時刻X線スペクトル

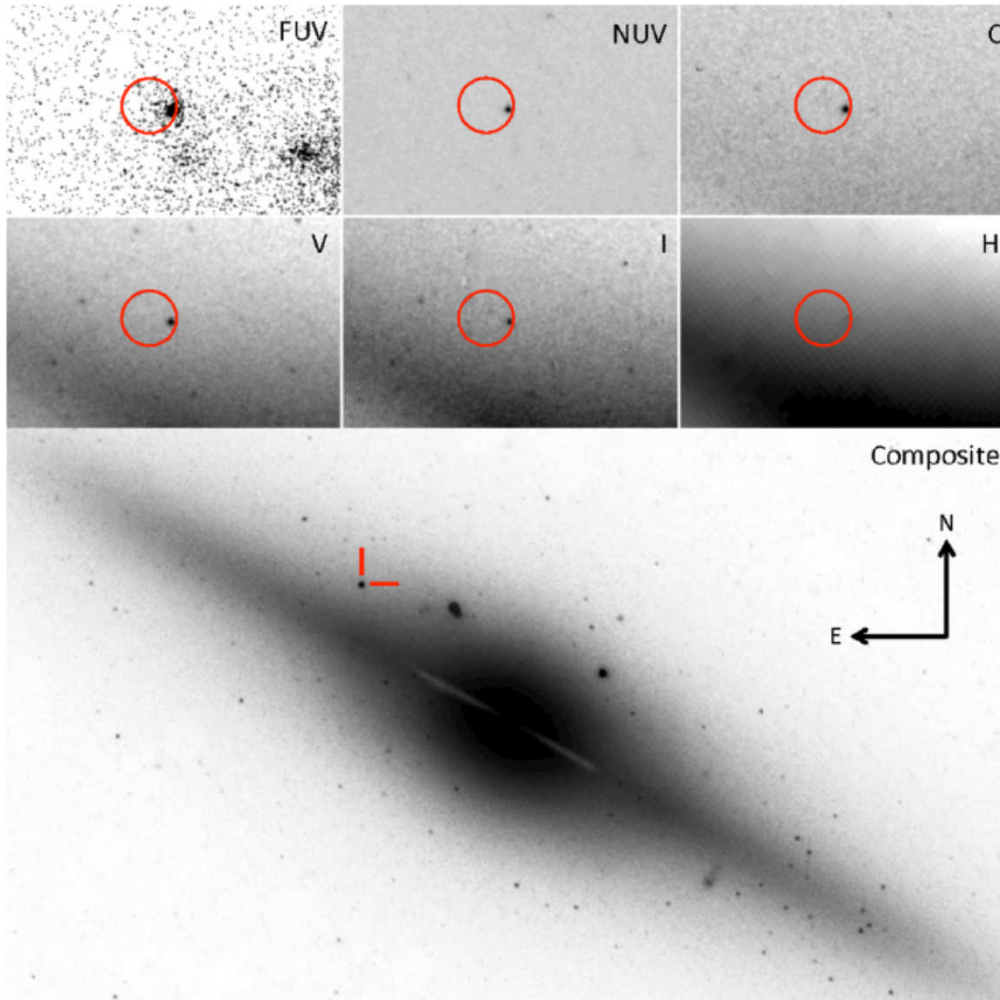
→ M_{BH}
~ $2 \times 10^4 M_{\text{太陽}}$
(Godet, Plazolles,
Kawaguchi +2012)

中間質量ブラックホールの最有力候補

Black Hole ESO 243-49 HLX-1
Hubble Space Telescope ■ Wide Field Camera 3

中間質量ブラックホール候補を取り巻く星団

紫外線--可視光--近赤外線 画像



● 中間質量ブラックホール候補の位置に、星団と考えられる天体が検出。

Age~10Myr,
 $M_{\text{星}} \sim 4 \times 10^6 M_{\text{sun}}$ の星団

● 壊されきらずに残った、元衛星銀河の中心部ではないか、と解釈。
 (Farrel+12)

ブラックホール影の新種ターゲットの提案 -- 漂う巨大ブラックホール --

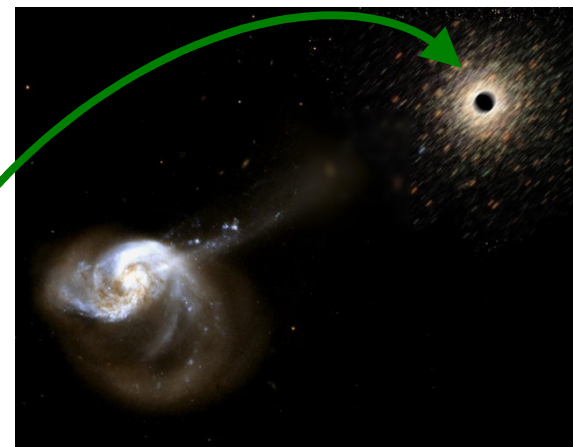
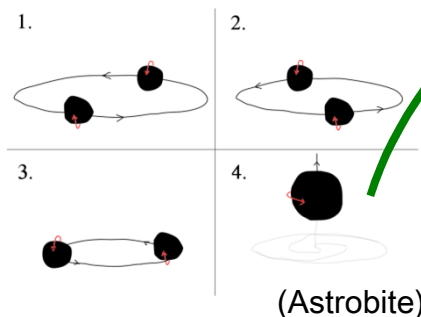
川口 俊宏 (国立天文台)

(1) 重力波放出反作用で飛び出たブラックホール:

Merritt, Schnittman & Komossa 2009

O'Leary & Loeb 2009

ブラックホールの合体
→ 重力波放出

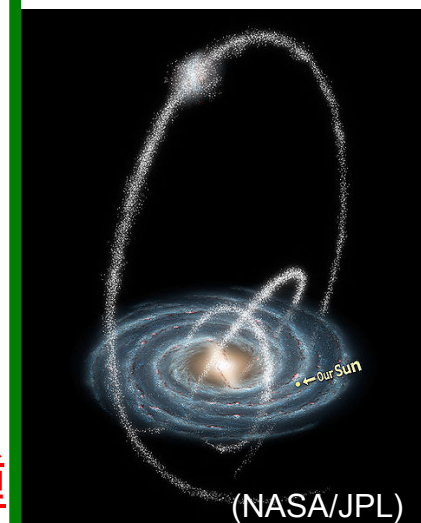


(2) 中心銀河に吸収合併される途中の 衛星銀河の中心ブラックホール:

Bellovary et al. 2010

Miki et al. 2014

Kawaguchi, Saito Y., Miki, Mori, 2014



(3) 近傍宇宙での漂う巨大ブラックホール候補天体(3種)