

# A 17-billion-solar mass black hole in a group galaxy with a diffuse core

Jens Thomas, Chung-Pei Ma, Nicholas J. McConnell, Jenny E. Greene, John P. Blakeslee & Ryan Janish

Nature, 2016

arXiv: <http://arxiv.org/abs/1604.01400v1>

obs-cos seminar 4/22 担当：菊田

Abstract:

Quasars are associated with and powered by the accretion of material onto massive black holes; the detection of highly luminous quasars with redshifts greater than  $z = 6$  suggests that black holes of up to ten billion solar masses already existed 13 billion years ago. Two possible present-day 'dormant' descendants of this population of 'active' black holes have been found in the galaxies NGC 3842 and NGC 4889 at the centres of the Leo and Coma galaxy clusters, which together form the central region of the Great Wall—the largest local structure of galaxies. The most luminous quasars, however, are not confined to such high-density regions of the early Universe; yet dormant black holes of this high mass have not yet been found outside of modern-day rich clusters. Here we report observations of the stellar velocity distribution in the galaxy NGC 1600—a relatively isolated elliptical galaxy near the centre of a galaxy group at a distance of 64 megaparsecs from Earth. We use orbit superposition models to determine that the black hole at the centre of NGC 1600 has a mass of 17 billion solar masses. The spatial distribution of stars near the centre of NGC 1600 is rather diffuse. We find that the region of depleted stellar density in the cores of massive elliptical galaxies extends over the same radius as the gravitational sphere of influence of the central black holes, and interpret this as the dynamical imprint of the black holes.

概要

- MASSIVE サーベイの一環として NGC1600 を観測し、面分光で個々の星の運動や K バンド全光度を求めた。
- 結果、**170 億太陽質量 ( $1.7 \times 10^{10} M_{\odot}$ )** の超巨大ブラックホール (SMBH) を銀河群の楕円銀河において発見した。
  - すでに知られていた  $10^{10} M_{\odot}$  クラスの SMBH はすべて Coma cluster などの銀河団の中心部で見つかったが、**NGC1600 は比較的小規模な銀河群に属している。**
- 大質量楕円銀河の面輝度プロファイルは普通の楕円銀河のように cusp 状ではなく、core 状 (中心部でフラットになる形) になることが知られているが、**core 部の大きさと SMBH との間に良い相関を発見**した。このことは、そのようなプロファイルが楕円銀河中の星と BH との相互作用により作られたことを示唆する。

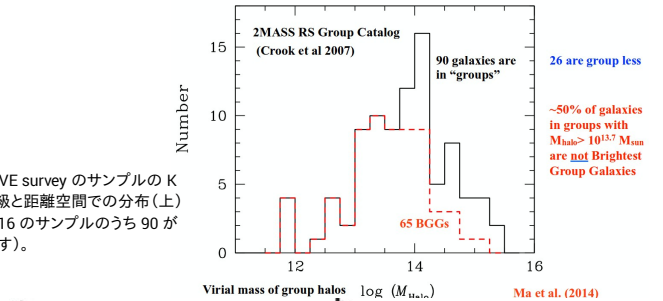
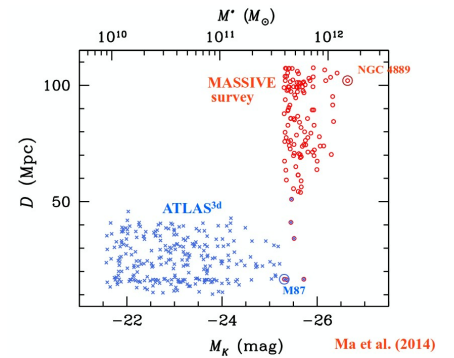
## 1. Introduction

- 楕円銀河はいろいろな意味で非常に興味深い天体である。
  - $z > 6$  の  $M_{\text{BH}} > 10^{10} M_{\odot}$  のクエーサー (e.g. Wu et al. 2015) の中心にいた SMBH が眠っているかも
  - $z \sim 2$  の massive SF galaxies や red nuggets の成れの果て?
  - IMF が特殊?
- このような謎の解決を目指し、116 個の早期型銀河を観測する MASSIVE サーベイが行われており (Ma et al. 2014)、本論文ではその一環として観測された NGC 1600 の非常に巨大な SMBH ( $M_{\text{BH}} = 1.7 \times 10^{10} M_{\odot}$ ) の発見を報告する
- 巨大楕円銀河のコア半径 ( $r_c$ , 後述) の大きさと BH の性質との相関の起源として BH-BH binary と星との相互作用を議論している。
- 今までに見つかったこの程度の質量の BH の host は銀河団中心などの非常に密な環境にいることが多かったが、今回のようにそれほど大きくない銀河群での発見は初。
- このことは、high- $z$  クエーサーが必ずしも密な環境にいるわけではないという最近の報告と合致している。

## 2. the MASSIVE survey

MASSIVE = The Mitchell spectrograph Assembly of Stars and Stuff with Integral-field spectroscopy in the Visible, oh, and we're looking at Early-type galaxies

- 108 Mpc 以内の 100 個ほどの非常に重い ( $M_* > 10^{11.5} M_\odot$ ,  $K < -25.3$ ) 早期型銀河 (ほぼ E、ちょっと S0) の volume-limited sample を多色測光、面分光などで調べるサーベイ (Ma et al. 2014)
- 早期型銀河とその中心のブラックホールの形成史の解明を目指す
- 銀河団中心から比較的孤立したもので様々な環境中のサンプル
- 1) Wide-field(107"x107") IFU(Mitchell IFU @ McDonald 2.7m)
- 2) Keck や Gemini の IFU+AO などでの高分解能分光
- 3) UKIRT, CFHT などでの K-band を含む多色測光の組み合わせから早期型銀河の形成史を探る。



## 3. Observation of NGC 1600

$$\begin{aligned} M_* &= 8.3 \times 10^{11} M_\odot \\ M_{\text{halo}} &= 1.5 \times 10^{14} M_\odot \\ D &= 64 \text{ Mpc } (1'' \sim 300 \text{ pc}) \end{aligned}$$

### ★ 分光

107"x107" の広い領域を Mitchell IFS で観測

+ 中心 5"x7" を GMOS IFS で観測 (ang. res. ~0.6")

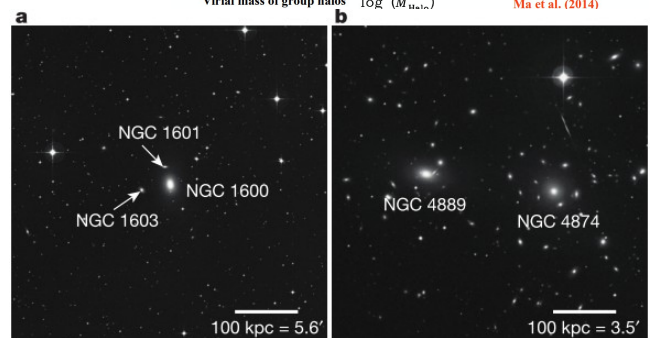
→ 86 箇所での星の視線速度を導出  
(Ca triplet 8480Å-8680Å などモデルフィット)  
中心 200pc 付近まで分解できた。

→ 回転成分ほぼなし (<30km/s)  
速度分散は外側で 260km/s、内側で最大 359km/s

### ★ 撮像

HST/NICMOS(F160W) と Kitt Peak National Observatory で観測

→ core-sersic fit、core radius  $r_b$  の導出 (後述→ 4)



**Figure 1 | Environment of NGC 1600 versus that of NGC 4889.** a, The central 500 kpc  $\times$  500 kpc of the NGC 1600 group of galaxies; this group has a total mass<sup>24,25</sup> of about  $1.5 \times 10^{14} M_\odot$  and an X-ray luminosity<sup>26</sup> of  $3 \times 10^{41} \text{ erg s}^{-1}$ . The two closest companion galaxies of NGC 1600 (NGC 1601 and NGC 1603) are nearly eight times fainter than NGC 1600. b, The innermost 500 kpc  $\times$  500 kpc of the Coma Cluster, which contains more than 1,000 known galaxies, and is at least ten times more massive<sup>27,28</sup> than the NGC 1600 group, and 1,000 times more X-ray-luminous<sup>29</sup>. NGC 4889 has twice the stellar mass of NGC 1600 and a nearly equally luminous neighbour galaxy (NGC 4874). Both images are from the Second Palomar Observatory Sky Survey (R-band; north is at the top, and east to the left).

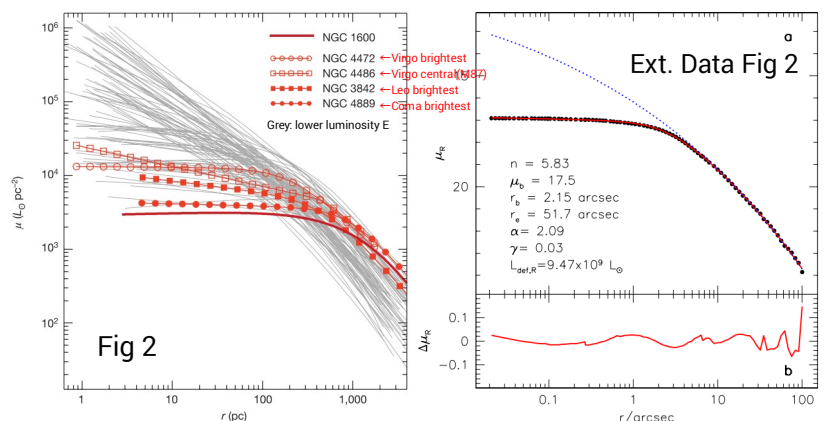
## 4. core-Sersic fit

- 普通の楕円銀河は Sersic profile でフィットされるが、非常に明るい楕円銀河は右図のような中心部でフラットになる ("cored") プロファイルをもつ (Faber et al. 1997; Kormendy et al. 2009)
- このようなプロファイルは core-Sersic profile でフィットされる:

$$I(R) = I' \left[ 1 + \left( \frac{R_b}{R} \right)^\alpha \right]^{-\gamma/\alpha} \exp \left\{ -b \left[ (R^\alpha + R_b^\alpha) / R_e^\alpha \right]^{1/(\alpha n)} \right\},$$

$r_b$  ("core radius") より外側では Sersic、内側ではパワーロー。

- 外側の Sersic を内挿して求められる星質量と実際の星質量の差から "light deficit" を定義する。この場合  $\Delta L_{\text{def}} = 9.47 \times 10^9 M_\odot$ 。
- このプロファイルのもっともらしい説明は、BH-BH と星の 3 体問題で星が BH-BH の角運動量を抜いて遠くまではじき飛ばされるといふもの (binary BH scouring, Ebisuzaki et al. 1991; Milosavljevic & Merritt 2001)。



## 5. $M_{\text{BH}}$ の導出

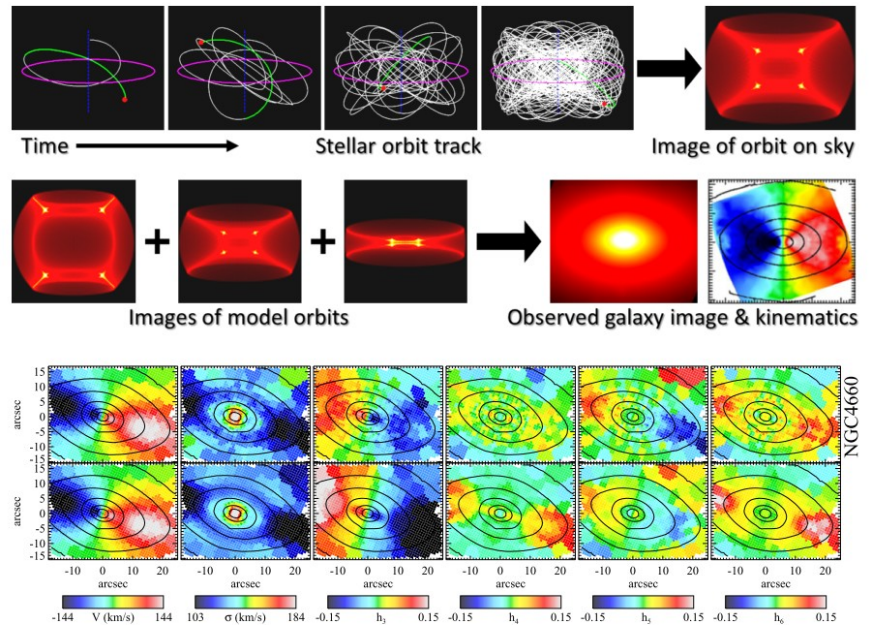
### ★orbit superposition model

- $M_{\text{BH}}$ ,  $M/L$ ,  $r_{\text{DM}}$ ,  $v_{\text{DM}}$  (ダークマターのコア半径と回転速度) を決めてそのポテンシャルのもとでの星の運動を数軌道分計算→さまざまな軌道の重ねあわせによって観測された視線速度のデータと輝度分布を再現

※ 楕円銀河がほぼ無衝突系とみなせること、および無衝突ボルツマン方程式の定常解は 1 つの軌道の分布関数の重ねあわせで書けることを使っている。

- それぞれのモデルパラメータに対し ~29000 ほどの軌道を計算し、それらを観測を再現するよう重み付けして足しあわせて 4 つのパラメータを求める
- $M_{\text{BH}} = (1.7 \pm 0.15) \times 10^{10} M_{\odot}$   
 $M^*/L = (4.0 \pm 0.15) M_{\odot}/L_{\odot}$   
 $\Delta M_{\text{def}} = 3.8 \times 10^{10} M_{\odot}$
- Merritt 2006 の数値計算結果によると、N 回の衝突で  $\Delta M_{\text{def}} = N \times 0.5 M_{\text{BH}}$  となる → 4 回衝突を経験?

※  $M/L$  は全半径で一定としており、分光からはそれに反する結果は得られていない。仮に面分光で分解できていない中心 200pc 以内に今のモデルで求められている分の 10 倍の質量が隠れているとしても(中心での  $M/L$  がひと桁高いとしても)  $M_{\text{BH}}$  は 1  $\sigma$  分小さくなるだけである。→ Ext. Data Fig 5

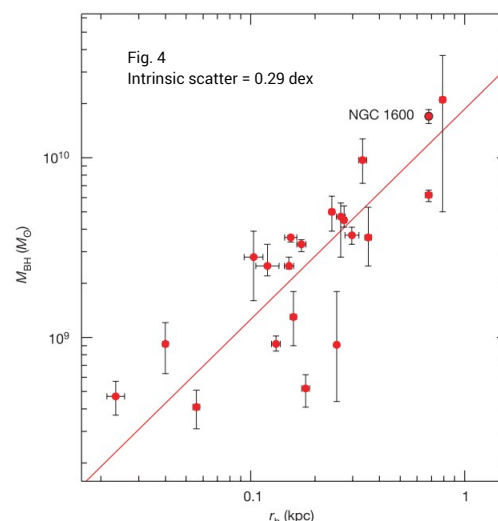
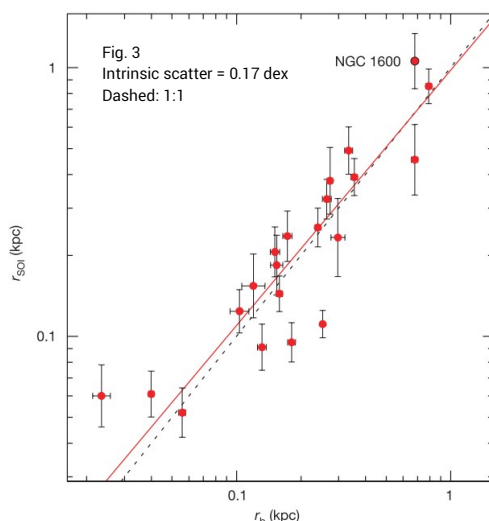
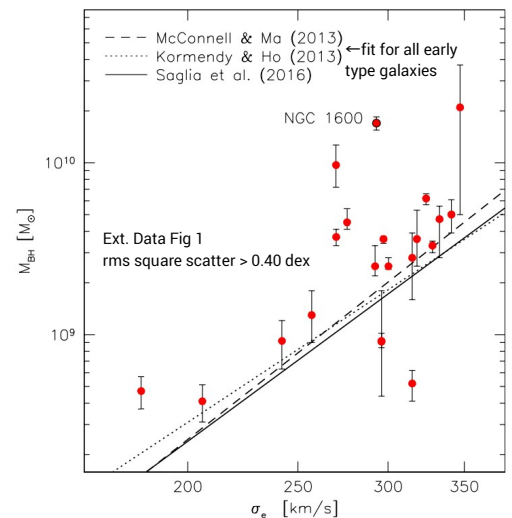


**Figure 3. Schwarzschild's orbit-superposition method.** *Top Row:* numerical integration of a single orbit in the adopted gravitational potential. After a sufficiently long time the density (of regular orbits) converges to a fixed distribution. *Middle Row:* the method finds the linear combination of thousands of orbits (three representative are shown here) which best fits the galaxy image and stellar kinematics. *Bottom two rows:* data (top) versus model (bottom) comparison. The model can fit the full stellar line-of-sight velocity distribution, here parametrized by the first six Gauss-Hermite moments (from Cappellari et al. 2007).

↑ From Cappellari M., 2015, IAU Symposium, 311, 20

## 6. $M-\sigma$ , $M-M_{\text{bulge}}$ 関係と新しい相関関係

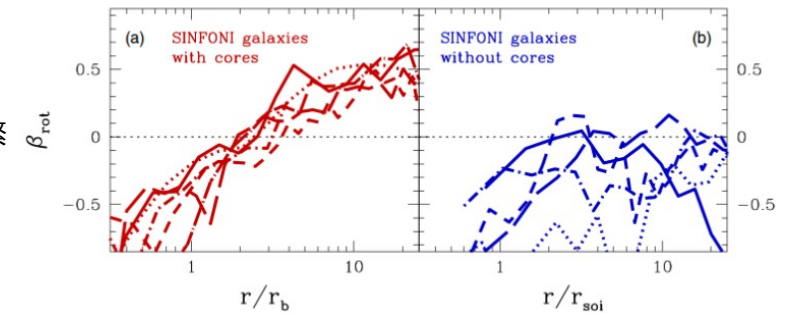
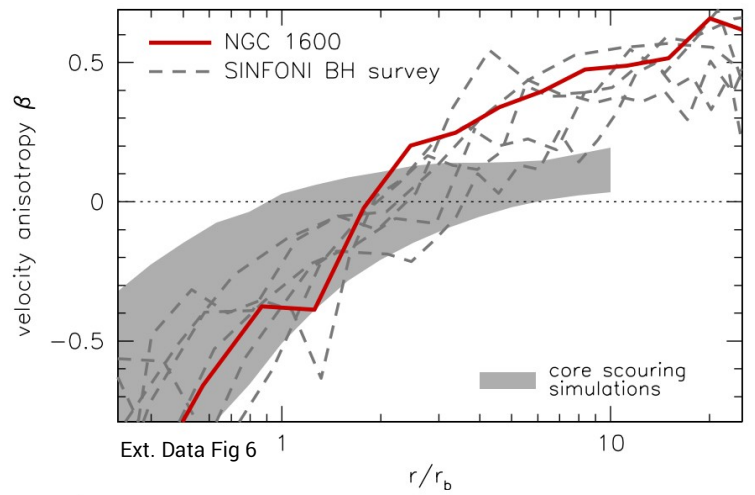
- cored Elliptical は  $M-\sigma$  の相関が他の銀河と比べて良くないことが知られている(右図、Ext. Data Fig 1)
- 実際 NGC 1600 は  $M-\sigma$  から予想される値の 10 倍大きな  $M_{\text{BH}}$  をもち、 $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$  で見ても 3-9 倍上にくる
- 距離  $r_{\text{sol}}$  (sphere of influence) を、その距離以内に含まれる星質量が  $M_{\text{BH}}$  と等しくなる距離、として定義する。この  $r_{\text{sol}}$  と  $r_b$  をプロットしてみるとほとんど 1:1 の関係に乗り (Fig 3)、また  $M_{\text{BH}}-r_b$  をプロットしてみると  $M-\sigma$  より良い相関を持つ (Fig 4) ことがわかった





## 7. Implications

- 様々な環境中の様々な cored Ellipticals において  $r_b$ - $r_{\text{soi}}$  および  $r_b$ - $M_{\text{BH}}$  の相関が見られたことは、core の成因が一様で、かつ BH と深く結びついていることを示唆する。
- BH-BH で星が飛んでいったという説 (binary BH scouring) は、core profile だけではなく星の運動の非等方性も自然に説明できる
  - 右図 (Ext. Data Fig 6) は横軸に半径、縦軸に星の運動速度の非一様性の指標  $\beta \equiv 1 - \sigma_t^2 / \sigma_r^2$  ( $\sigma_r^2$  は radial 方向速度分散、 $\sigma_t^2$  は tangential 方向速度分散) をとった図で、中心近くで  $\beta < 0$  となっていることは、中心付近ではほとんどの星が半径方向と直角方向に運動していることを意味する。これは、半径方向に運動する星は頻繁に BH と相互作用されて優先的にはじき飛ばされることで作られると考えられる



From Thomas et al. 2014, Fig.1

- この BH のシュバルツシルド半径は  $5 \times 10^{10} \text{ km} = 335 \text{ AU} = 5.3 \mu\text{as}$  である。M87 は  $M_{\text{BH}} = 3.3\text{--}6.2 \times 10^9 M_\odot$  と測定されているのでこちらは  $3.8\text{--}7.3 \mu\text{as}$  に相当する。これらは Sgr A\* の次に大きいので Event Horizon Telescope のよいターゲット。
- $10^{10} M_\odot$  クラスの BH は high-z ではクエーサーとして観測される。降着が止まった non-active な ("dormant" な) high-z quasar の子孫を探し、その進化を探求することは近傍の  $10^{10} M_\odot$  を越える SMBH を探す大きなモチベーションである。quasar は平均的には必ずしも特別に重いハローなどの特殊な環境にいるわけではない (Trainor & Steidel 2012, Fanidakis et al. 2013, Orsi et al. 2016 etc.) が、今回の BH はそのような平均的な環境にいるクエーサーの子孫なのかもしれない。
- NGC 1600 を含む銀河群の銀河群としての性質は、1 番目とそれ以下の光度の差が激しいことなどが挙げられる。このような性質が今回の BH の形成と関係があるかは謎だが、NGC 1600 が属すハローは Coma cluster クラスのハローと比べると 50 倍多くあるはずなので、このような BH が本当に珍しいのか、氷山の一角なのかが MASSIVE survey によって明らかになるだろう。