星団中でのブラックホールの形成と成長

牧野淳一郎
東京大学大学院理学系研究科天文学教室

In collaboration with... Holger Baumgardt, Yoko Funato(U. Tokyo), Toshikazu Ebisuzaki(RIKEN), Hironori Matsumoto, Takeshi Go Tsuru(Kyoto U.), Simon Portegies Zwart(UvA), Piet Hut(IAS), Steve McMillan(Drexel), Satoki Matsushita(CfA), Ryohei Kawabe(NAOJ).

というつもりでしたが

球状星団、楕円銀河中心のブラックホール (候補) の (周りの) 光学観測とその解釈

牧野淳一郎
東京大学大学院理学系研究科天文学教室

In collaboration with... Holger Baumgardt, Yoko Funato(U. Tokyo), Piet Hut(IAS), Simon Portegies Zwart(UvA), Steve McMillan(Drexel).

この話は次の講演者に任せることにして

Talk Overview

1. 前置き
2. M15
3. G1
4. 楕円銀河？
5. まとめ

結論: M15, G1 はほぼ確実に間違い、楕円銀河の相当部分は怪しい

前置き — 2種類のブラックホール (BH)

「知られている」ブラックホールのギャップ

- 恒星質量 ブラックホール $\sim 10 M_\odot$ (太陽質量)
  - 大質量星の重力崩壊 (II型超新星) でできる
  - X 線での観測が主な根拠
- 巨大ブラックホール $> 10^6 M_\odot$
  - 円盤銀河 — 楕円銀河の中心に存在
  - クェーサー、活動銀河核の「セントラルエンジン」
  - 観測的根拠は多様

その中間は ???

中間質量ブラックホール

Intermediate-mass blackhole を発見した!!!
という報告

- **700 $M_\odot$ in M82**
  Matsumoto *et al.* ApJL 547, L25, Chandra
- **4000 $M_\odot$ in M15?**
  Gerssen *et al.* AJ 124, 3270, HST
- **$2 \times 10^4 M_\odot$ in G1?**
  Gebhardt *et al.* ApJ 578, L41, HST

今日の話は M15 と G1

M15 — Claims

STScI Press release (Sept 18, 2002)

Van Der Marel led a team that uncovered a black hole in the center of the globular star cluster M15, 32,000 light-years away in the constellation Pegasus. His collaborator Joris Gerssen, also of the Space Telescope Science Institute, pinned down the black hole's mass at 4,000 times that of our Sun.

Previously, X-ray observations ..... have identified ultra-bright X-ray sources that could also be interpreted as intermediate-mass black holes in star-forming galaxies. However, alternative interpretations for these X-ray sources continue to exist. By contrast, Hubble's measurements are based on the velocities of stars .....which yield a direct measurement of the black hole masses.

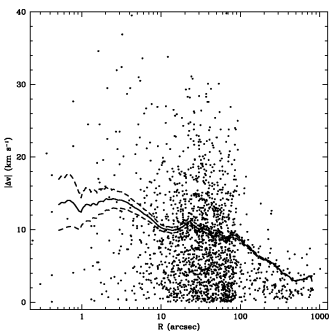
M15 — 適当な訳

宇宙望遠鏡科学研究所プレスリリース (2002/9/18)
STScI Press release (Sept 18, 2002)

宇宙望遠鏡科学研究所のファン・デア・マレル博士が率いるチームは、ペガサス座の方向、*3*万 *2*千光年の彼方にある球状星団 *M15* にブラックホールを発見しました。彼の協力者で、やはり宇宙望遠鏡科学研究所のゲルセンは、ブラックホールの質量が太陽の *4000*倍だということを突き止めました。

これまで、 *X*線での観測で .... 星形成銀河に非常に明るい *X* 線源が見つかっていました。これは中間質量ブラックホールとも解釈できるものでしたが、他の解釈もできるものでした。これに対し、ハッブル (宇宙望遠鏡) による測定は、個々の星の速度に基づくもので、直接ブラックホールの質量を与えるものです。

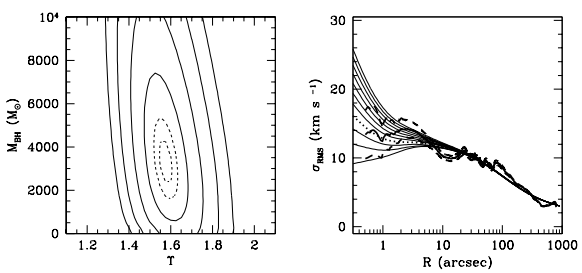
M15 — 観測



RMS velocity profile by Gerssen *et al.* (astro-ph/02090315).

HST STIS, CFHT and other data combined.

何故ブラックホールがあると主張するか? — モデル

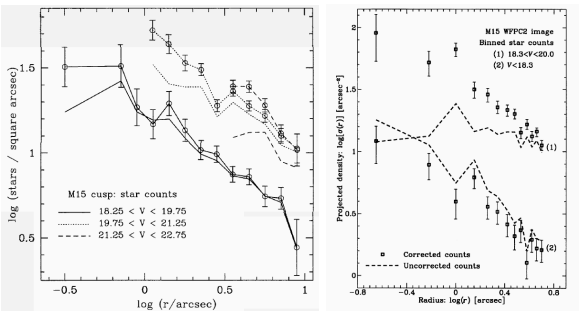


3000 $M_\odot$ black hole!

Gerssen et al. のやったこと

1. " Mass follows Light" を仮定して、(見えるものの) 密度分布に何か定数 γ を掛けると (見えないものの) 質量分布が求められると信じる。
2. 質量分布から速度分布を求めてみる。
3. これは、定数をふってみても速度分布の観測結果とあわない
4. 中心にいろいろな質量のブラックホールを仮定して、速度分布を計算しなおす
5. χ^2 残差が最小になったところで、「ブラックホール発見!」

表面輝度



Left: Sosin & King 1997, Right: Guhathakurta *et al.* 1996.

何故ブラックホール?

実際に観測された速度分散は、中心5秒角の範囲で (わずかではあるが) 中心にいくに従って増加

中心5秒角内の表面輝度はスロープ -0.8 のべき (カスプ)

↓

質量と光が比例してれば、速度分散も弱いべきではあるが中心に向かって下がるはず

なので、ブラックホールがある

明らかな問題:
質量と光は比例するのか?
速度分散は等方的なのか?

質量と光の関係

常識的な理解: 球状星団では質量と光の関係は「単純ではない」

球状星団の年齢: 熱力学的な緩和時間よりずっと長い
重い星は、エネルギーを失って中心に集まることができる

この時、十分に進化が進むと中心部はほとんど重い星だけになり、そこの分布はべき乗 $\rho \sim r^{-2.23}$ になる。

球状星団のもっとも重い星: 中性子星 (1.4 $M_\odot$)、重い白色矮星 (見えない)
観測している星: 赤色巨星 (0.8 $M_\odot$)

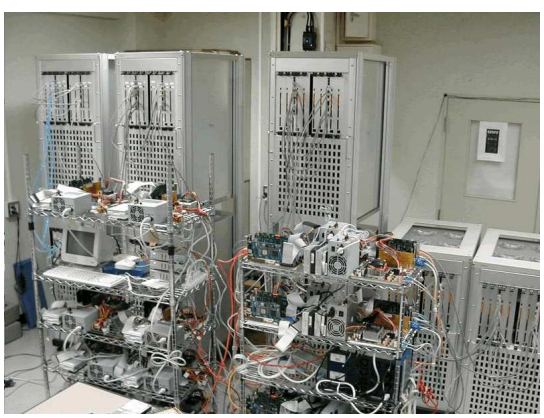
数値シミュレーションでもうちょっと細かくみてみる。

N-body simulation

Baumgardt and Makino (MNRAS accepted)

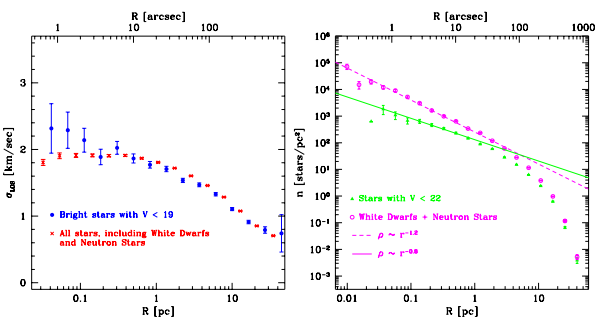
- N=128k (mass at core collapse $= 2 \times 10^4 M_\odot$ ($\sim$1/40 of M15)
- Kroupa (2001) IMF (15 $M_\odot$ cutoff)
- Hurley *et al.* (2000) Stellar evolution
- NBODY4 on GRAPE-6
- $W_o = 7$ King model at 8.5kpc from GC
- reached core collapse at 12.6 Gyrs
- 40 days on a 4-Tflops GRAPE-6.

GRAPE-6



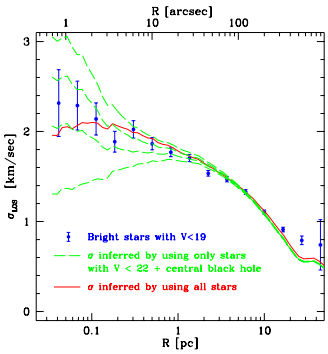
Results

ApJL 582, L24



左: 速度分散; 右: 表面輝度

And we “found” BH...



表面輝度から速度分散を求めてみるとブラックホールなしでは中心で低すぎる。

Black hole mass $= 80M_\odot$.
M15 にスケールすると
$\sim 3 \times 10^3 M_\odot$ (Gerssen *et al.*: $\sim 3 \times 10^3 M_\odot$)

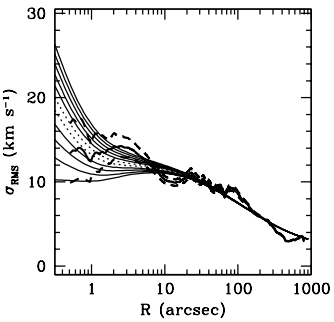
何故 BH が「発見」されたか?

M/L 一定を仮定したから。

本当の M/L を使えばもちろん BH はいらない。

Gerssen *et al.* も realistic M/L でやってなかったか？

“Realistic” M/L

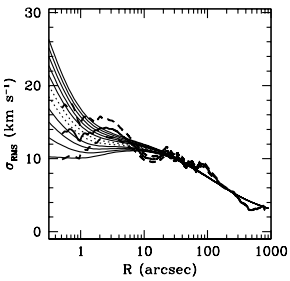


Dull *et al.* (1997) の Fokker-Planck calculation でもとまった M/L profile

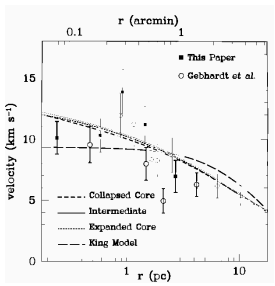
速度分散プロファイルは M/L 一定のとほとんど同じ。
BH はやっぱり必要。

何故違いが?

Gerssen



Dull

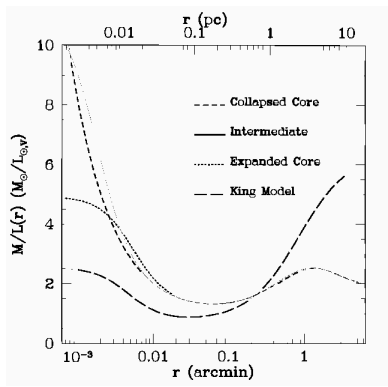


同じ M/L プロファイルを使っているのに、速度分散プロファイルは全然違う。

Addendum :

Gerssen et al. astro-ph/0210158 (Oct 8, 2002).
...
After the completion of our paper, the authors of the D97 paper discovered an unfortunate error in their Figures 9 and 12. The labeling along the abscissa of these figures is incorrect due to a coding error in supermongo plotting routines (H. Cohn and B. Murphy, private communication, 2002). The units along the top axis should have read ‘arcmin’ instead of ‘pc’, and the labeling in arcmin along the bottom axis is incorrect. The net result is that the radial scale of these figures in the D97 paper is too compressed by a factor 2.82.

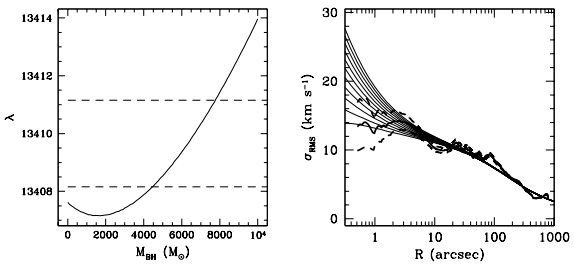
Dull M/L



should have read ‘arcmin’ instead of ‘pc’

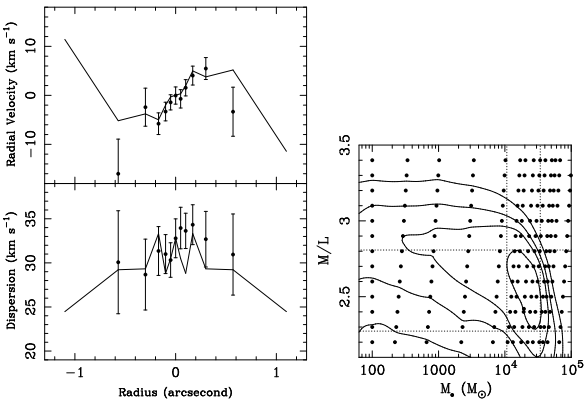
New plot

New plot (astro-ph/0210158):



Black hole disappeared, or *"$0.6-\sigma$ detection"*.

G1



G1 の特徴

Meylan et al (2001)

- (近傍で) 最大の球状星団 $(1.5 \times 10^7 M_\odot)$
- resolved core を持つ
- Multimass King model で合う
- 緩和時間が非常に長い $(> 40 Gyrs)$

G1 の特徴

Meylan et al (2001)

- (近傍で) 最大の球状星団 $(1.5 \times 10^7 M_\odot)$
- resolved core を持つ
- Multimass King model で合う
- 緩和時間が非常に長い $(> 40 Gyrs)$

つまり、、、、

- 緩和時間が長いのに緩和しているように見える
- コアがあるのにブラックホールがある？

G1 の特徴

Meylan et al (2001)

- (近傍で) 最大の球状星団 $(1.5 \times 10^7 M_\odot)$
- resolved core を持つ
- Multimass King model で合う
- 緩和時間が非常に長い $(> 40 Gyrs)$

つまり、、、、

- 緩和時間が長いのに緩和しているように見える
- コアがあるのにブラックホールがある？

なんかおかしいんではないか?

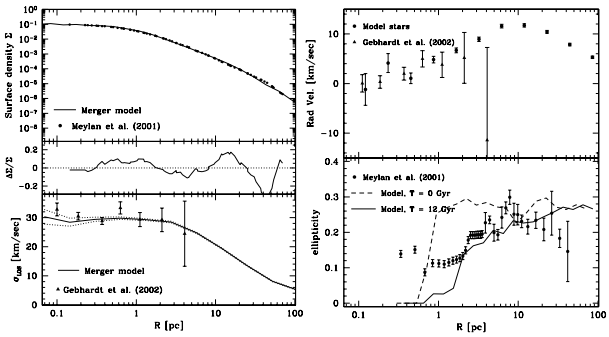
G1 の evolutionary model

Baumgardt et al. (astro-ph/0301469)

- Binary globular cluster からの進化
- コア半径、有効半径が観測に合う初期条件を捜す (結果的に King, $\psi_0 = 6.5$)
- 速度プロファイル等を観測と比べてみる

(runaway merging とかは起きない初期条件なので、ブラックホールはない)

結果



つまり、、、

極めて標準的な

- 大きなコアを持ち、 violent relaxation 由来の r^{-4} 的ハローを持つ
- ブラックホールはない

モデルで、実際上「すべて」の観測データに合う。

質量: $M_C = (8 \pm 1) \times 10^6\ M_\odot$.
(ハローが緩和していないので M/L が小さい)

G1 にブラックホールがあると思ったのは一体何故？

K. Gebhardt (private communication)

- 速度分散プロファイルは確かに BH なしと矛盾しない
- 高次のモーメントがある

Radius(")	H3	dH3	H4	dH4
0.00	-0.009	0.020	-0.046	0.018
0.05	-0.035	0.019	-0.051	0.013
0.10	0.026	0.013	-0.052	0.007
0.17	-0.025	0.024	-0.039	0.019
0.30	-0.017	0.025	-0.046	0.019
0.57	0.003	0.034	-0.055	0.017
1.10	0.022	0.056	-0.034	0.063

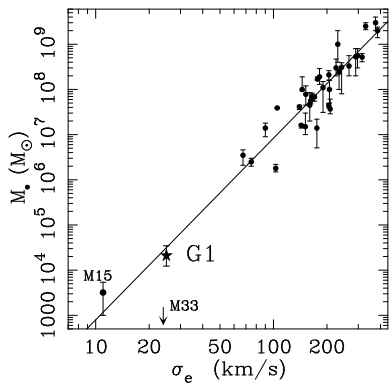
多分高次のモーメントは幻覚

楕円銀河は大丈夫？

Magorrian et al. (1998) のデータの相当数: G1 と同程度の有意性

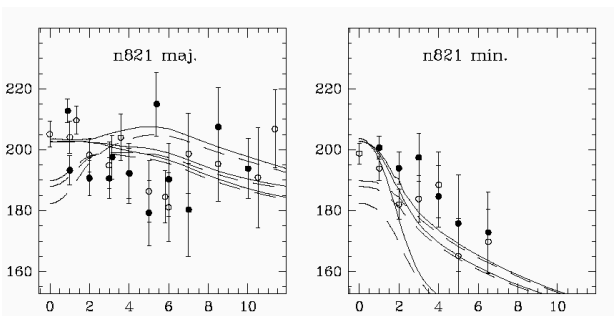
解析方法も同じ

???



典型的「BHあり楕円銀河」

NGC821 (From Magorrian et al 1998)



まとめ

- 球状星団 M15 の中心にブラックホールが見つかったという報告は基本的には計算間違いによるものであった。
- その傍証として、標準的な初期条件から普通に N 体シミュレーションした結果で、ブラックホールなしで観測された密度分布と速度分布の定性的な特徴は再現できる。(BH があるとあわないとは断言できない)
- G1 も間違いの可能性高い。但し、こちらはモデルのどこに問題があったかはまだ完全にはわかってない。
- G1 が怪しいとすると楕円銀河の相当数も怪しい。