大質量星団中での中間質量ブラックホールの形成と成長

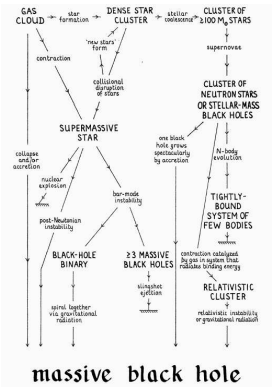
牧野淳一郎 (東大天文)

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

概要

1. はじめに:大質量ブラックホールの作り方
2. M82 の IMBH 候補
3. 合体シナリオ
4. 他のモデル？
5. 他の IMBH 候補
6. 普通の球状星団に IMBH はあるか？
7. まとめ

はじめに:大質量ブラックホールの作り方



Classic View (Rees 1984)

本質的には 2通り

- 単一の超大質量星
- コンパクト星の高密度クラスターの熱的な進化

どちらも簡単ではない...

単一の超大質量星の問題

そんなのができるか？

- 一様・球対称からのコラプス
- 小さいスケールの密度ゆらぎがない
- 潮汐場もない

とかいう極めて理想的な条件ならば、単一ガス雲が単一ブラックホールになるかもしれない。

高密度クラスターの熱的な進化の問題

熱力学的な進化 (重力熱力学的崩壊)
→ 非常に小さいコアになる (大質量ブラックホールはできない)。
(例えば 杉本他 1981)

何故かはじめから相対論的なクラスタがあれば話は違うが、、、

- コンパクト星同士の合体は滅多におこらない
- バイナリは3体相互作用で系から打ち出される

というわけで merger 自体が稀

理論はともかく

観測的にギャップがあるのが問題: やはり完全に空中楼閣を作るのは (よほど物理が単純でないと) 難しい。

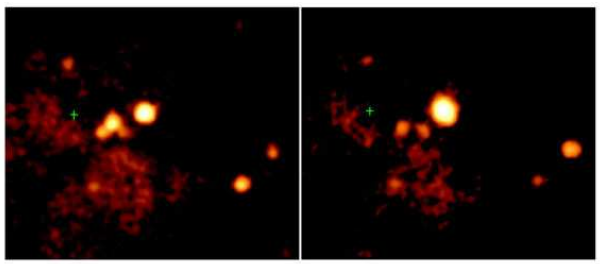
観測的なギャップ

- 恒星質量 BH $\sim 10 M_\odot$
- 超大質量 BH $> 10^6 M_\odot$

中間は ???

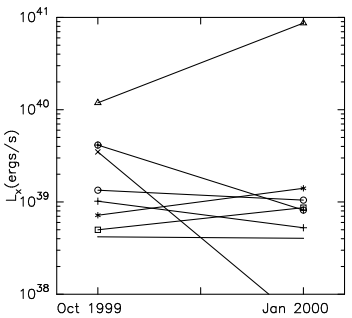
M82 の中間質量 BH 候補

Matsumoto *et al.* ApJL 547, L25



大きな時間変動を示す複数のソース

時間変動



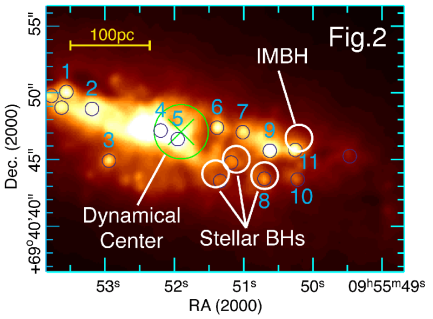
最大のソースが大きな時間変動

M82 IMBH (候補) の意味

- 最初の 質量が $>> 10$, $<< 10^6$ のBH候補天体
- エディントン質量 $\sim 700 M_\odot$ = 最初の IMBH (intermediate-mass BH).
- M82 の中心から 200 pcs くらい離れている: 銀河中心の BH そのものではない

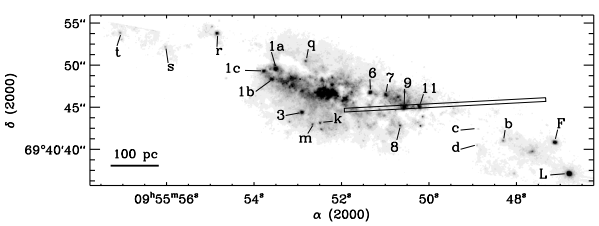
赤外 カウンターパート

M82 のすばるによる観測 (K' band)



赤外 カウンターパート (2)

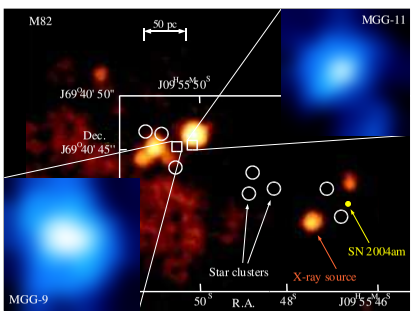
HST NICMOS/Keck NIRSPEC
McCrady et al. (astro-ph/0306373)



スターバーストで最近出来た非常に若い星団。

赤外 カウンターパート (3)

位置の比較



まあ重なっている。

IMBH は星団の中にある？

(理論家の目には) IMBH は若くてコンパクトな星団の中にあるというのは「明らか」。

では、 IMBH はどうやってできたか？

- 星団と同時に出来た？(あんまりありそうにない)
- 星団の中で作られた。

ホスト星団の力学的な特徴

McCrady et al. 2003 (astro-ph/0306373)
Cluster #11 (MGG-11)

- $\sigma_r = 11.4 \pm 0.8$km/s
- half-light radius 1.2 ± 0.17pc
- kinetic mass $3.5 \pm 0.7 \times 10^5 M_\odot$
- Age $\sim$ 10Myrs.

M/L が割合低い (Salpeter で合わせると lower cutoff が $1M_\odot$)
緩和時間非常に短い ($<$ 10 Myrs)

一つの可能なシナリオ

1. 星団の中心で星の暴走的な合体で大質量星ができる
2. この星のコラプスで IMBH (の種) ができる
3. この IMBH (の種) がさらに他の星と合体して成長

シミュレーション

Portegies Zwart et al., Nature, 2004/4/15 号
初期条件

- King model with $W_0 = 7$-12
- Salpeter IMF (as suggested by McCrady et al)
- Star-by-star simulation for MGG-11 (MGG-9 is scaled)

あんまりサイエンスではない話

いかにしてこの論文が Nature に載るにいたったか？

1. まず Simon が 1 ページくらいの概要を L. Sage に送った。
2. Sage からは「つまらんからいらない」みたいな返事が来た。
3. Simon が Sage に電話して談判した。
4. 何故か「ではレフェリーに回すから論文送って」という話になった。

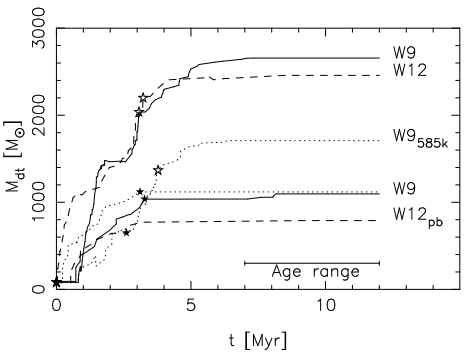
あんまりサイエンスではない話

いかにしてこの論文が Nature に載るにいたったか？

1. まず Simon が 1 ページくらいの概要を L. Sage に送った。
2. Sage からは「つまらんからいらない」みたいな返事が来た。
3. Simon が Sage に電話して談判した。
4. 何故か「ではレフェリーに回すから論文送って」という話になった。

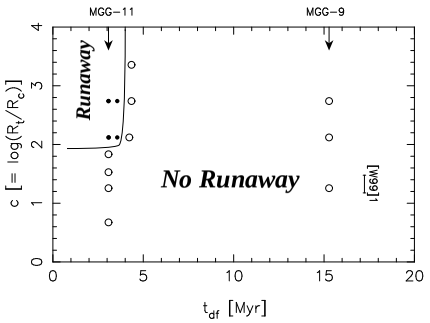
オランダ人は馬鹿にできない

結果



$W_0 \geq 8$ なら暴走的合体 (MGG-11 では)
MGG-9 (緩和時間長い) では暴走的合体はおきない

結果のまとめ



緩和時間が短く、かつ初期に小さいコアを持つ必要がある

暴走的合体

基本的には、ダイナミカルフリクションの時間スケールが大質量星の寿命より短いなら暴走的合体はほぼ必然的に起きる。

暴走的合体を起こした星は (多分) そこそこ大きな BH、例えば100–1000 $M_\odot$ になるであろう。

定量的な結果は超大質量主系列星のモデル、半径、質量放出やブラックホールになる質量の割合による。

IMBH 形成についてのまとめ

- 暴走的な合体による IMBH の形成は、理論/数値実験の結果を見る限りありそう。
- 暴走的な合体が起きる条件は星団の緩和時間が短く高密度なコアを持つこと

暴走的合体は、少なくとも、M82　の星団の中にある IMBH 候補を説明する極めてもっともらしくモデルではある。(他になんかあるわけでもない)

他の形成モデルにはどんなものが？

- Taniguchi et al (PASJ 2000)
- Miller and Hamilton (MN 2002)
- Mouri and Taniguchi (ApJL 2002)
- (Kawakatsu et al 200X?)

Taniguchi et al.

1. スターバーストでは大質量星が多数できた
2. これらが超新星爆発から中性子星/恒星質量ブラックホールに
3. それらがなんとかして合体

IMBH が「星団の中」にあるということがわかる前に提案されたモデル。
難点:

- 何故合体するかわからない。論文で見積もられているのは dynamical time だけ。

Miller and Hamilton

1. 星団の中でなんかシード BH は出来て中心にある ($50M_\odot$ くらい)
2. これが dynamical friction で中心に沈んできた恒星質量ブラックホールと合体。

- 古い球状星団にブラックホールがある (かどうかの話は後でしますが) という「観測」を説明するモデル。
- 星団の速度分散、中心密度を仮定した適当な見積もり。
- $10^3 M_\odot$ になるまでに少なくとも宇宙年齢くらいかかる。
- Baumgardt et al 2004: 上の見積もりは甘い。宇宙年齢ではできない。
- Mouri and Taniguchi も同様に甘い見積もり。

他の IMBH 候補

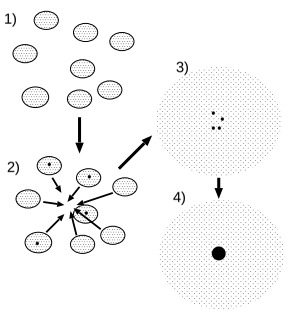
- NGC 2276 (Davis and Mushotzky, ApJ 604, 653, 2004)
  - $L \sim 1.1 \times 10^{41}$ erg/s
  - SED は MCD とはあわない (ULX に一般的な傾向)
- NGC 4559 (Cropper et al MN 349, 39, 2004)
  - $L > 2.1 \times 10^{40}$(X7), $L > 1.3 \times 10^{40}$(X10)
  - SED は MCD でもいい？
- ULX のほとんどは若い星団の中/近くにある (Zezas et al ApJ 577, 710, 2002, Kaaret et al MN 348, L28, 2004)

IMBH と SMBH の関係

1. 無関係？
2. 同じようにできた？
   - SMBH の成長時間長すぎる
3. SMBH を IMBH から作る?
   - タイムスケールの問題を解決できる (かも)

Merger シナリオ

Ebisuzaki et al. 2001 ApJ 562, 19L



1. スターバーストで大量に星団を作る
2. いくつかの星団では IMBH ができる。多くの星団はダイナミカルフリクションで中心に沈む。
3. 星団は潮汐破壊。 IMBH は中心に残る。
4. 複数の IMBH は星や他の IMBH との相互作用で連星になり、重力波で合体するところまでハードになる。

理論的問題

- IMBH はできる？ — 「問題なし」
- 球状星団に IMBH がないのは何故？(本当にない?) — Baumgardt et al., Portegies Zwart et al.
- 親星団は IMBH を銀河中心に持ち込めるか？
- IMBH 同士は合体できるか？

今日は球状星団の話だけ。

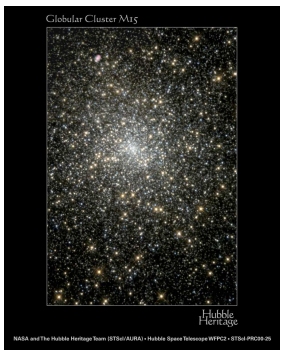
球状星団に IMBH がないのは何故？

教科書的回答:

1. 球状星団の緩和時間は長い $\sim 10^9$ yrs.
2. コアも多分初期に小さくない

本当に? M15 と G1 は？

M15



古典的 “Core Collapse” 星団。

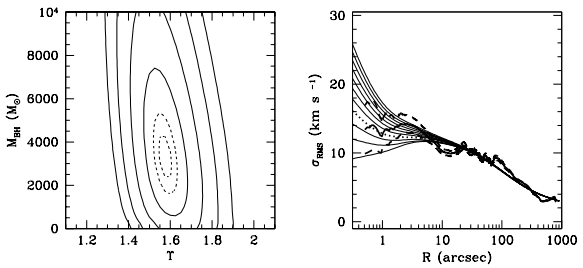
個々の星まで分解して　star count で密度プロファイルが書ける。
コアはなく中心までカスプ。

カスプの傾き ~ -0.8,

中心 BH　と 重力熱力学的崩壊のどちらとも「矛盾しない」。

IMBH ありの力学モデル

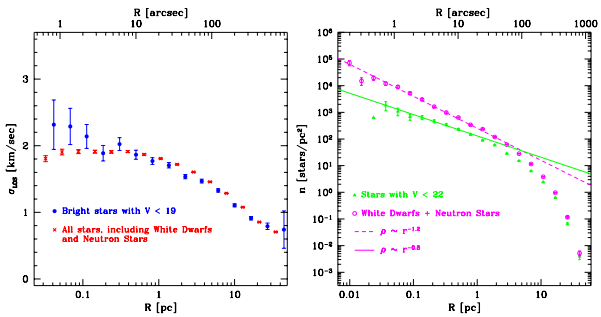
Gerssen et al. 2002



3000 $M_\odot$ black hole !?

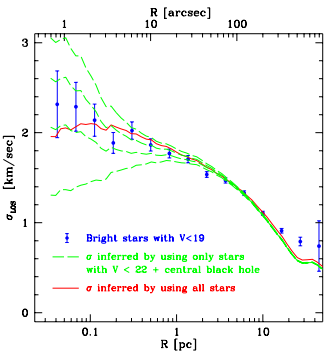
BH なしの進化モデル

N 体計算 Baumgardt et al.(ApJ 2003, 582, L21)



左: 速度分散 右:表面輝度

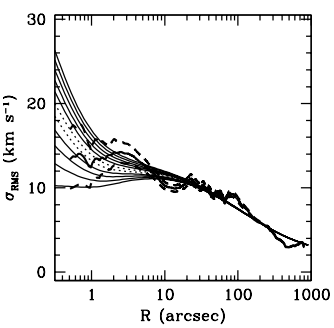
我々のモデルに「ブラックホール発見」



我々のシミュレーション結果を観測と同じ方法で解析すると「ブラックホールがある」という結論になる

mass segregation によって中心に集まった中性子星と重い白色矮星が「ダークマス」として振舞う。

「現実的な」 M/L

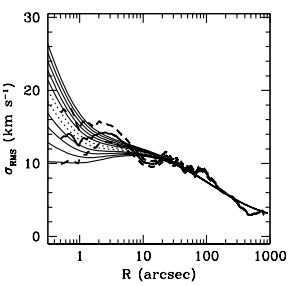


Dull *et al.* (1997) の multi-mass Fokker-Planck 計算による M/L プロファイル

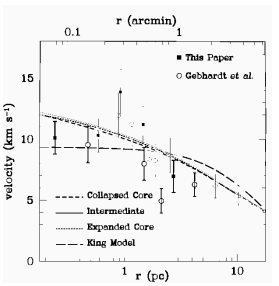
速度プロファイルはあんまり変わらない
依然大きなブラックホールが必要

何故結果が違うのか？

Gerssen



Dull



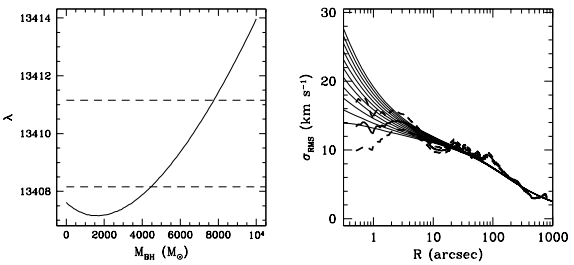
「同じ」 M/L で、 Dull 他 と Gerssen 他 は全く違った速度プロファイルを出した。

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.

New plot

New plot (astro-ph/0210158):



ブラックホール消滅、あるいは *"1-σ で存在"*.

球状星団に IMBH はあるのか？

M15 には「極めてありそうにない」。標準的なモデルで完璧に説明できる。

(詳しい話はしませんが)
G1 はもっとありそうにない (Baumgardt et al. ApJL, 2003, 589, L25)

球状星団に IMBH はあるのか？(続き)

探していた場所は間違ってないか？
そもそも BH のある球状星団はどんなふうに見えるのか？

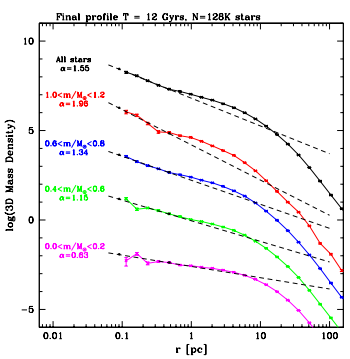
理論 (Bahcall and Wolf 1976): $\rho \propto r^{-7/4}$.
表面輝度のカスプの傾きは -0.75 のはず。

注意:

- -0.75 はあくまでも漸近的な傾き
- 全ての星が同じ質量と仮定

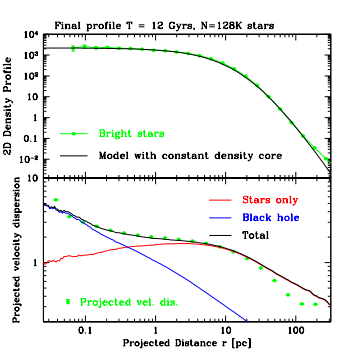
もっともらしい IMF と恒星進化モデルを入れて、 IMBH がある球状星団を進化させてみた。
($W_0 = 10$ King model)
Baumgardt et al 2004 a, b, ApJ accepted.

3D 密度分布



- 軽い星はスロープ浅い
- 最も重い星:
  ~ -2 ($-7/4$ じゃない!)

投影



- どう見てもフラットなコアがある
- 速度分散は「コア」の中心近くで微妙に増加

IMBH があるのは一見普通にコアがある球状星団のほうと思われる

まとめ

- M82 に発見された IMBH 候補は、恒星質量ブラックホールと大質量ブラックホールをつなぐ「ミッシング・リンク」である (可能性が高い)。
- 我々は、星団内での大質量星の合体で IMBH を形成し、銀河中心での IMBH の合体で SMBH を形成する 2 段階シナリオを提案する。
- 数値シミュレーションでは IMBH が形成するかどうかは星団の初期の構造に強くよるが、 観測と合う自然なパラメータで IMBH ができる。
- 球状星団 M15, G1 の観測結果は BH なしの進化モデルで良く説明できる。
- 仮に球状星団に BH があるとすれば、 M15 のような PCC クラスタではなく一見普通に見えるものの中心に隠れている。精密な分光観測で発見できる可能性がある。

Continuous accretion?

In principle, a $10M_\odot$ BH can grow to 10^8 in 10^9 yrs or so, assuming $10\times$ Eddington rate ($\eta \sim 0.1$)

Not impossible, but hard to explain QSOs at $z \geq 5$.

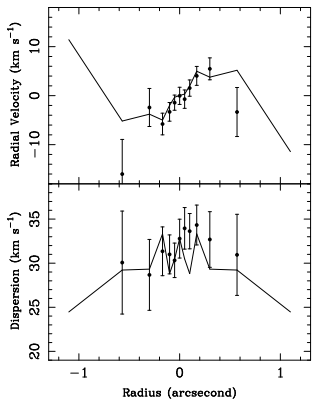
But ... supercritical accretion???

What is G1?

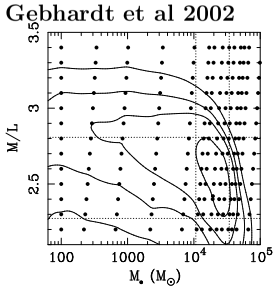
Meylan et al (2001)

- The most massive GC in Local Group
- resolved core
- Well fitted by a multi-mass King model
- Very long relaxation time ($> 40Gyrs$)

G1 — Spectroscopy



Gebhardt et al 2002



What is G1?

Meylan et al (2001)

- The most massive GC in Local Group
- resolved core
- Well fitted by a multi-mass King model
- Very long relaxation time ($> 40Gyrs$)

In other words,

- Looks relaxed though relaxation time is very long
- Has BH and resolved core?

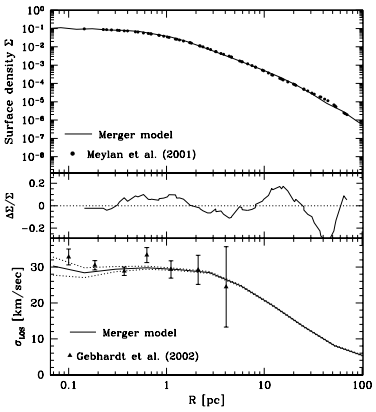
Evolutionary model of G1

Baumgardt et al. (ApJL 2003, 589, 25)

- Start from a binary globular cluster (to add rotation)
- Search for the initial model which gives good r_c and r_e (King, $\psi_0 = 6.5$)
- Compare velocity profile etc. with observation.

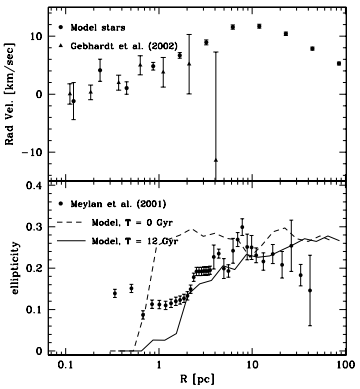
(No BH formed since runaway merging did not take place)

Result (1)



- Excellent fit for luminosity profile
- Good fit for velocity dispersion (observational error bar is large)

Result (2)



- Rotation velocity fits very well.
- Even ellipticity is good.

Summary for G1 model calculation

A pretty standard model cluster with

- large core before collapse
- r^{-4}-like halo formed by merging
- no BH

reproduces *all* available observational data.

Mass: $M_C = (8 \pm 1) \times 10^6\ M_\odot$.
roughly half of the multi-mass King fitting
No mass segregation in halo (different from multi-mass King model)

Summary for G1

- The kinematical structure of G1 can be reproduced by a simple evolutionary model, without any need for BH.
- Rotation, ellipticity and luminosity profile are consistent with a merger origin.
- M/L does not increase inward.

Why was BH needed for G1?

K. Gebhardt (private communication)

see also: http://www.space.com/scienceastronomy/blackhole_trick_030120.html

- velocity dispersion is consistent with No BH.
- Higher order moments suggest BH.

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

H4 does not decrease outward — error in data reduction?