高密度恒星系における中間質量ブラックホールの形成と成長

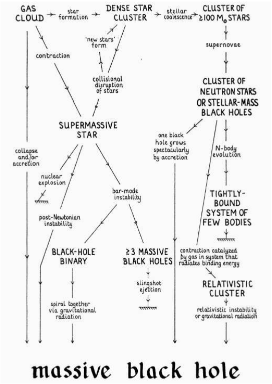
牧野淳一郎 (東大天文)

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

講演概要

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. 最近の発展
5. まとめ

はじめに:大質量ブラックホールの作り方


GAS CLOUD
star formation
DENSE STAR CLUSTER
stellar coalescence
CLUSTER OF ≥100 M☉ STARS
supernovae
contraction
'new stars' form
collisional disruption of stars
CLUSTER OF NEUTRON STARS OR STELLAR-MASS BLACK HOLES
SUPERMASSIVE STAR
one black hole grows spectacularly by accretion
N-body evolution
collapse and/or accretion
nuclear explosion
bar-mode instability
TIGHTLY-BOUND SYSTEM OF FEW BODIES
post-Newtonian instability
BLACK-HOLE BINARY
≥3 MASSIVE BLACK HOLES
contraction catalyzed by gas in system that radiates binding energy
slingshot ejection
RELATIVISTIC CLUSTER
spiral together via gravitational radiation
relativistic instability or gravitational radiation
massive black hole

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)。

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。

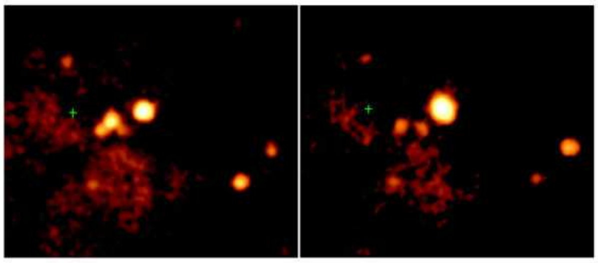
観測的なギャップ

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

中間は ???

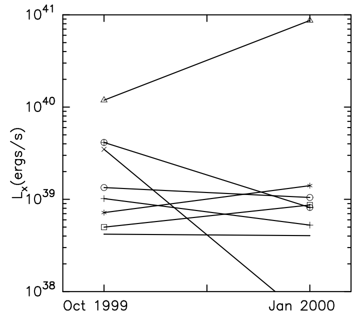
M82 の中間質量 BH 候補

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



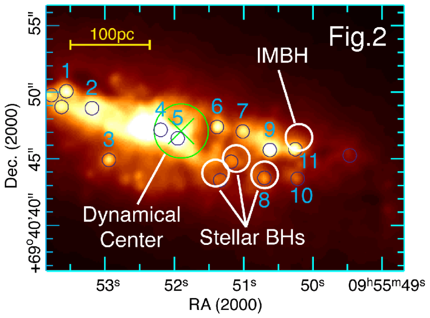
最大のソースが大きな時間変動

M82 IMBH (候補)の意味

- 最初の (でもって依然唯一の) 質量が >> 10, << 10^6 の BH 候補天体
- エディントン質量 $\sim 700M_\odot$ = 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

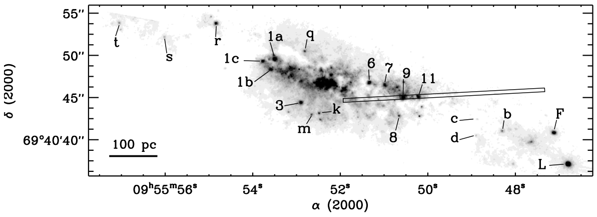
赤外 カウンターパート

M82 のすばるによる観測 (K’ band)


100pc
Fig.2
IMBH
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
Dynamical Center
Stellar BHs
55"
50"
45"
+69°40'40"
Dec. (2000)
53s
52s
51s
50s
09h55m49s
RA (2000)

赤外 カウンターパート(2)

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


55"
50"
45"
69°40'40"
δ (2000)
100 pc
t
s
r
1a
q
1c
1b
3
m
k
6
7
9
11
8
c
d
b
F
L
09h55m56s
54s
52s
50s
48s
α (2000)

スターバーストで最近出来た非常に若い星団。

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？
How IMBHs were formed?

- 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 ∼ 10Myrs.

M/L が割合低い
緩和時間非常に短い (< 10 Myrs)
Mass segregation? IMF がフラット?

一つの可能なシナリオ

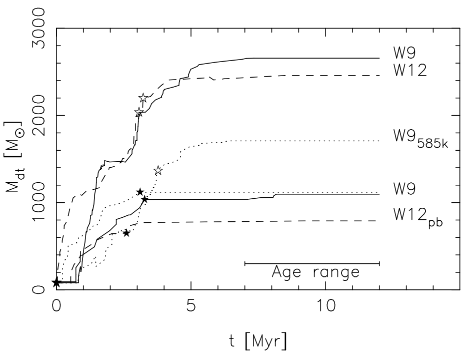
1. 星団の中心で星の暴走的な合体で大質量星ができる
2. この星のコラプスで IMBH (の種) ができる
3. この IMBH (の種) がさらに他の星と合体して成長

シミュレーション

Portegies Zwart et al., 某所に投稿中
初期条件

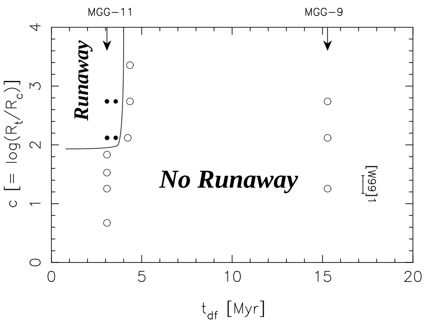
- King model with $W_0 = 7$-12
- Salpeter IMF (as suggested by McCrady et al)
- Star-by-star simulation for MGG-11 (MGG-9 is scaled)

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
(微妙に理屈にあってない、、、ふってないパラメータのため？)

暴走的合体

基本的には、ダイナイ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。

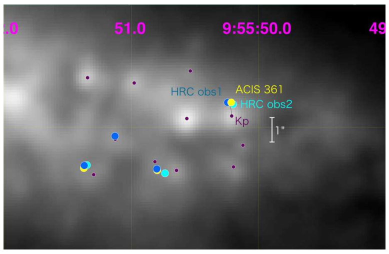
定量的な結果は主系列での質量放出やブラックホールになる質量の割合による。

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

> 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)

IMBH は本当に星団の中にあるのか？



鶴 (BH2003 talk)

2MASS のソースと Chandra のソースを重ねると、M82-X1 は MGG11 から 0″.6 ずれてる。

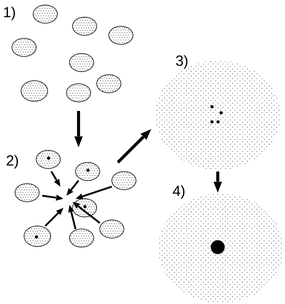
Radiation recoil で打ち出されたという可能性だってあるが、、、、

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 Growth timescale would be too large
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？

時間が足りないので最初の話だけ。

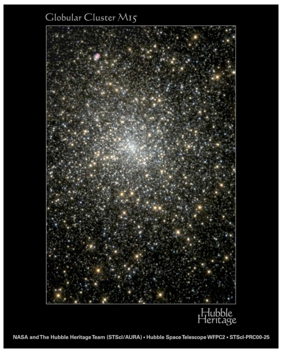
球状星団に IMBH がないのは何故？

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



NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA) • Hubble Space Telescope WFPC2 • STScI-PRC00-25

古典的 “Core Collapse” 星団。

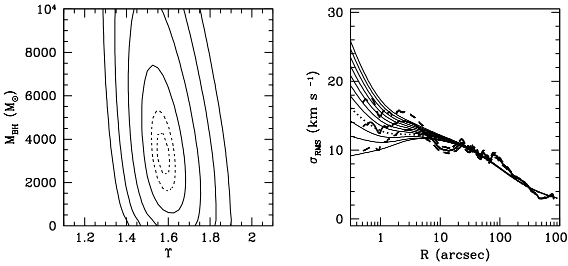
個々の星まで分解して star count で密度プロファイルが書ける。
コアはなく中心までカスプ。

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

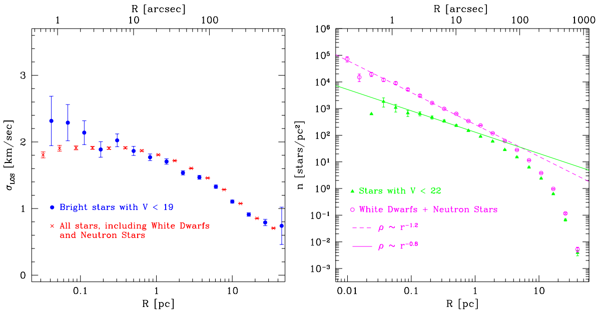
Gerssen et al. 2002



3000 $M_\odot$ black hole !?

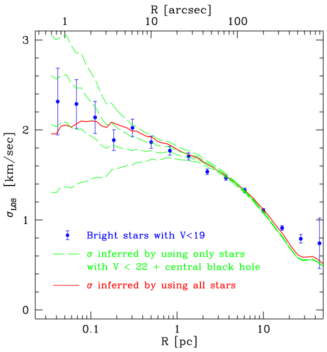
BH なしの進化モデル

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。

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？

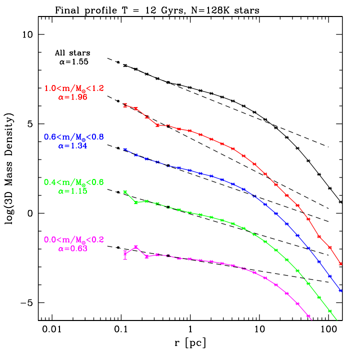
理論 (Bahcall and Wolf 1976)
rate): $\rho \propto r^{-7/4}$.
表面輝度のカスプの傾きは -0.75 のはず。

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

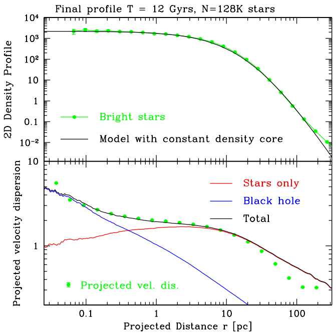
もっともらしい IMF と恒星進化モデルを入れて、 IMBH がある球状星団を進化させてみた。
($W_0 = 10$ King model)
Baumgardt et al, in preparation

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

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

But ... supercritical accretion???

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

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?