球状星団中心にブラックホールはあるのか？ — 最近の理論と観測の進展

牧野淳一郎
国立天文台
理論研究部/天文シミュレーションプロジェクト

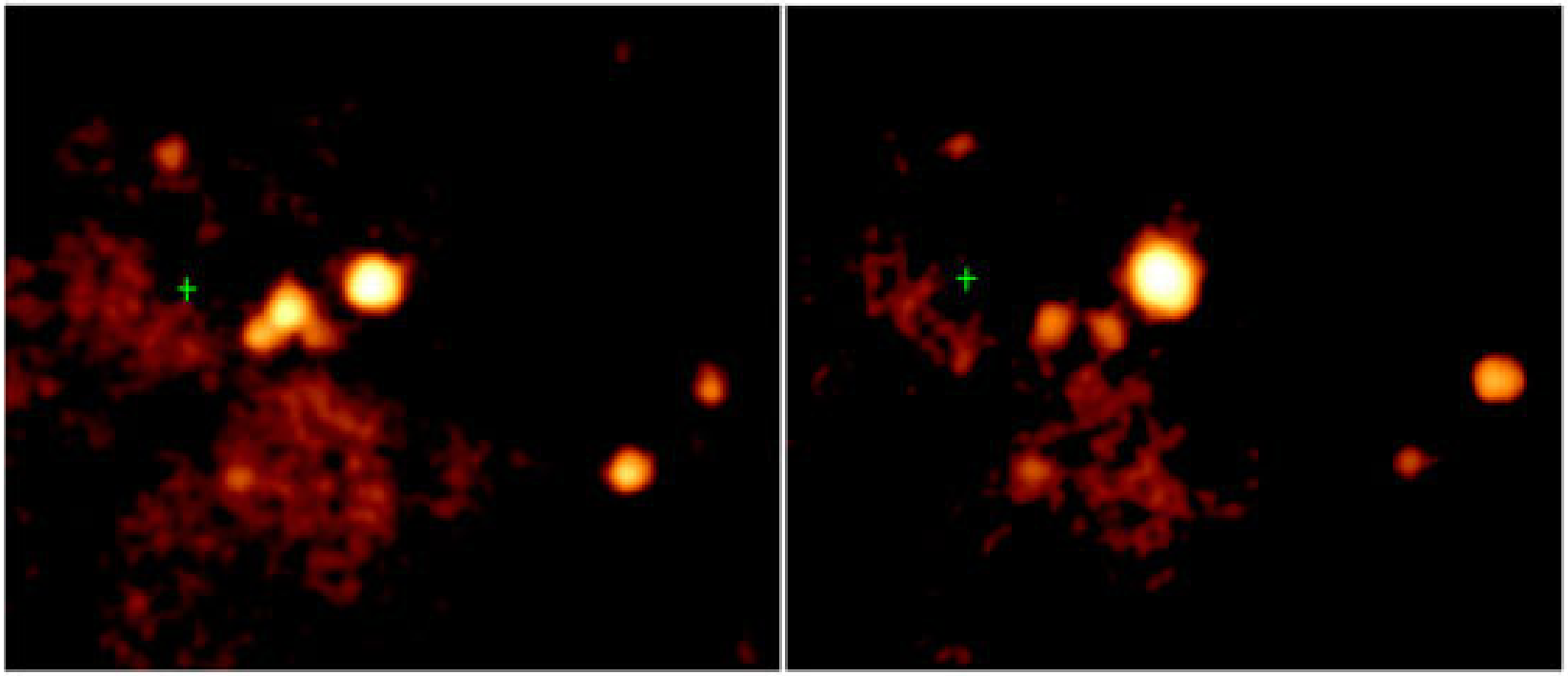
In collaboration with:
Holger Baumgardt(Bonn), Toshikazu Ebisuzaki(RIKEN), Yoko Funato(U. Tokyo), Tatsushi Matsubayashi (NTT), Masaki Iwasawa(U. Tokyo), Simon Portegies Zwart(UvA), Piet Hut(IAS), Steve McMillan(Drexel)

概要

- 中間質量ブラックホールと合体シナリオ
  - M82 の IMBH 候補
  - 合体シナリオ
  - 他のモデル？
- 普通の球状星団に IMBH はあるか？
  - 観測とシミュレーション — M15 の場合
  - ブラックホールをもつ球状星団の理論モデル
  - 観測できるか？
- まとめ

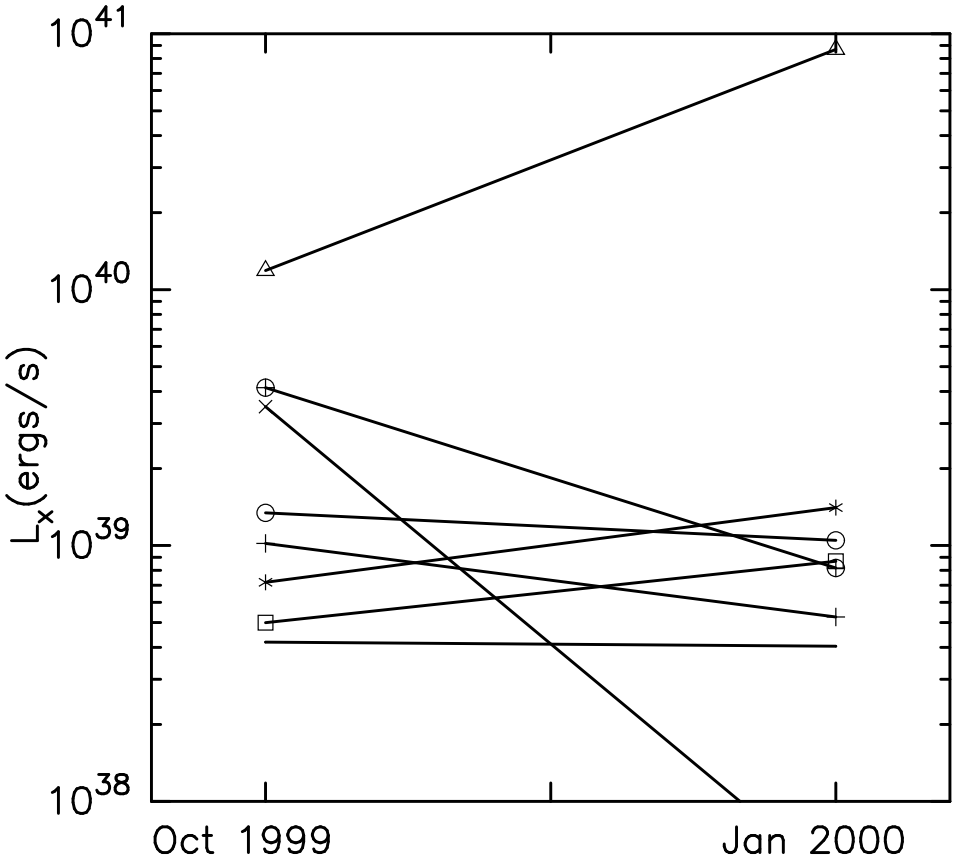
M82 の中間質量 BH 候補

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



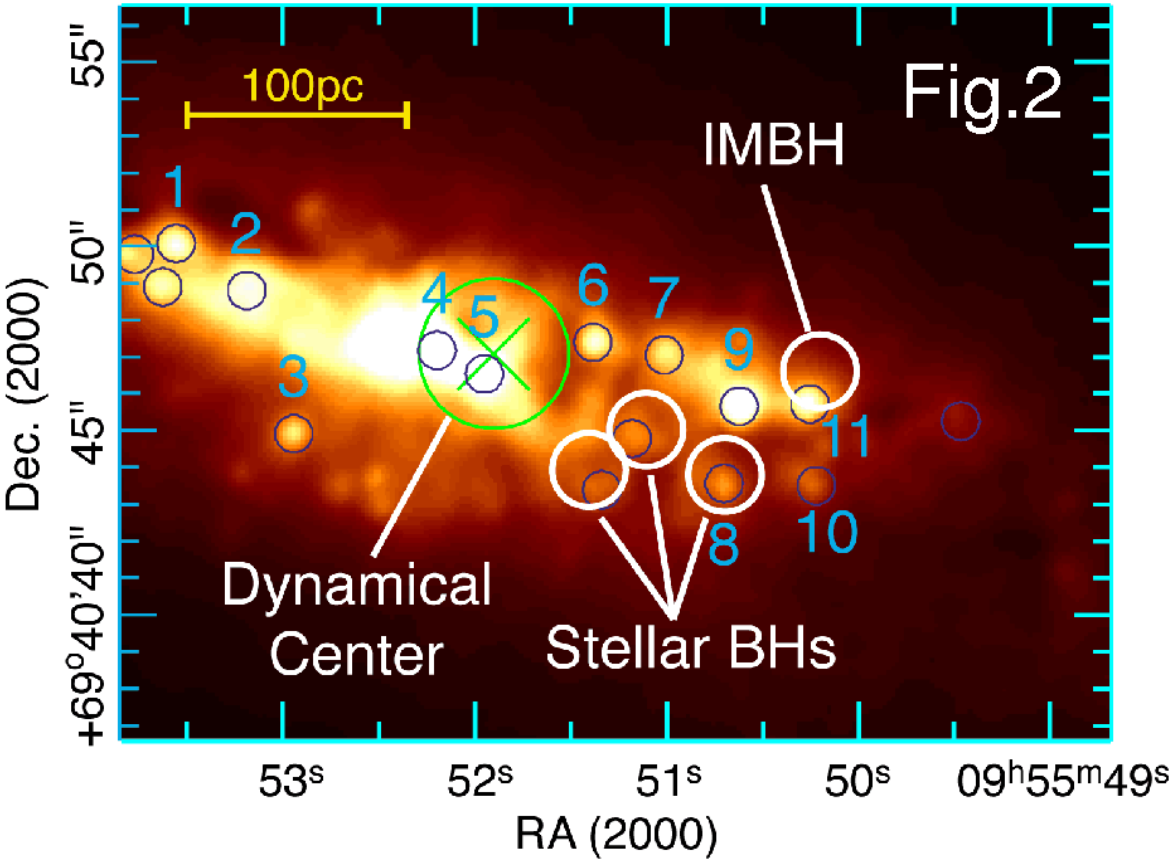
最大のソースが大きな時間変動

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

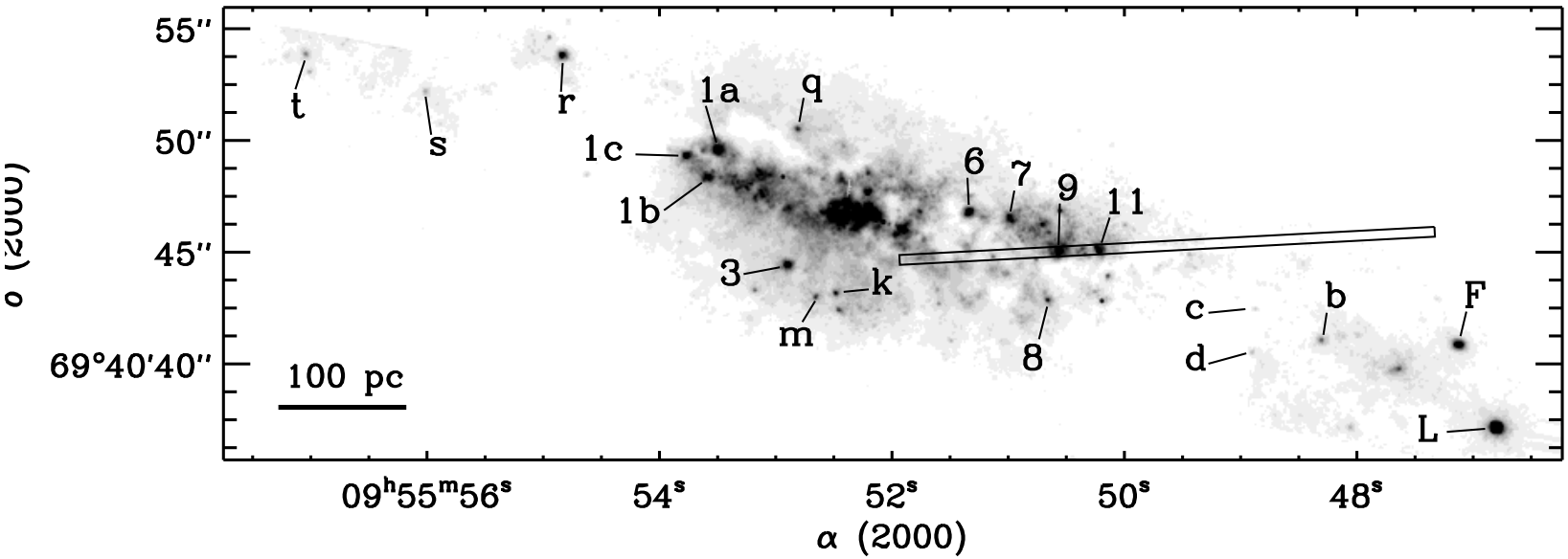
赤外 カウンターパート

M82 のすばるによる観測 (K' band)



赤外 カウンターパート(2)

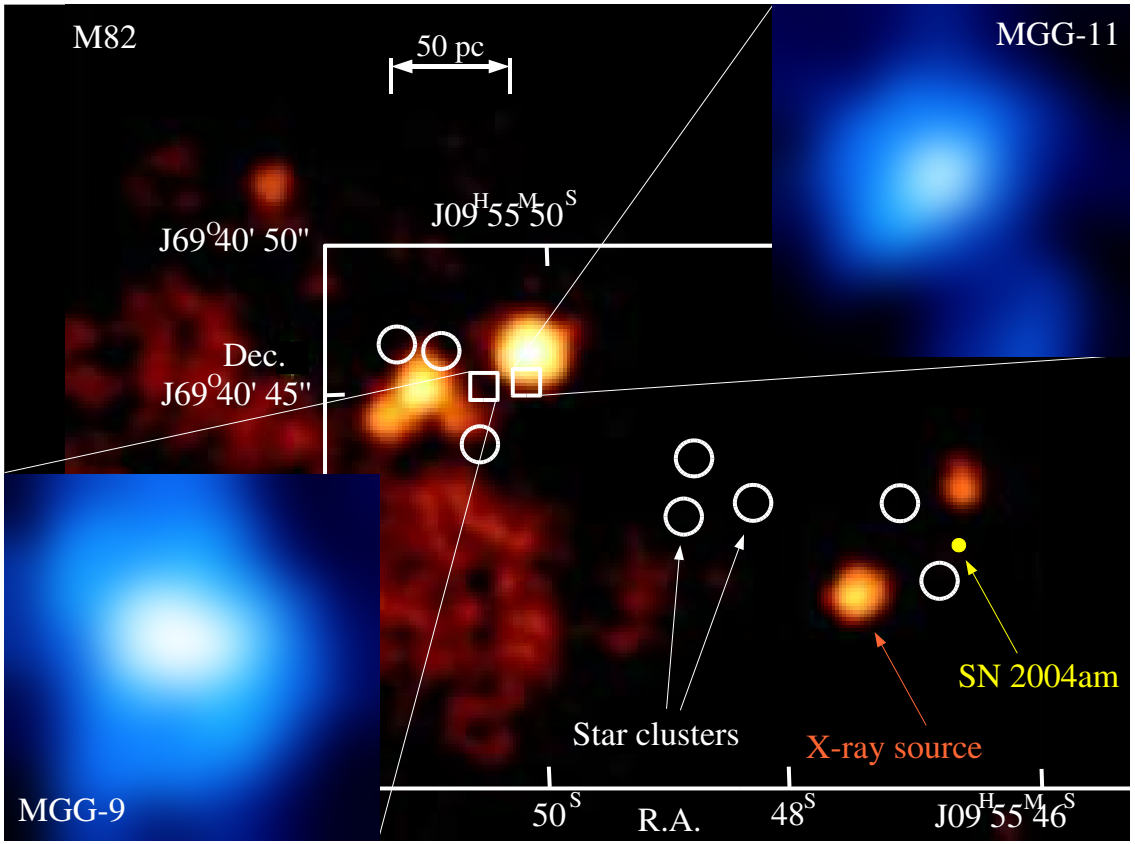
HST NICMOS/Keck NIRSPEC
McCrady et al. (astro-ph/0306373)



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)
BH がないMGG9 は緩和時間4倍くらい長い

一つの可能なシナリオ

1. 熱力学的な緩和 (力学的摩擦) により大質量星が中心に沈む
2. 星団の中心で星の暴走的な合体で大質量星ができる
3. この星のコラプスで IMBH (の種) ができる
4. 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 $W_0 = 7\text{-}12$
- Salpeter IMF (as suggested by McCrady et al)
- Star-by-star simulation for MGG-11 (MGG-9 is scaled)
- 星の進化は Eggleton et al. によるテーブル。
- $50M_\odot$ 以上は、、、「外挿」、一部の計算では石井・加藤による半径を利用。
- 星同士は接触したら合体、適当な mixing を仮定。

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。

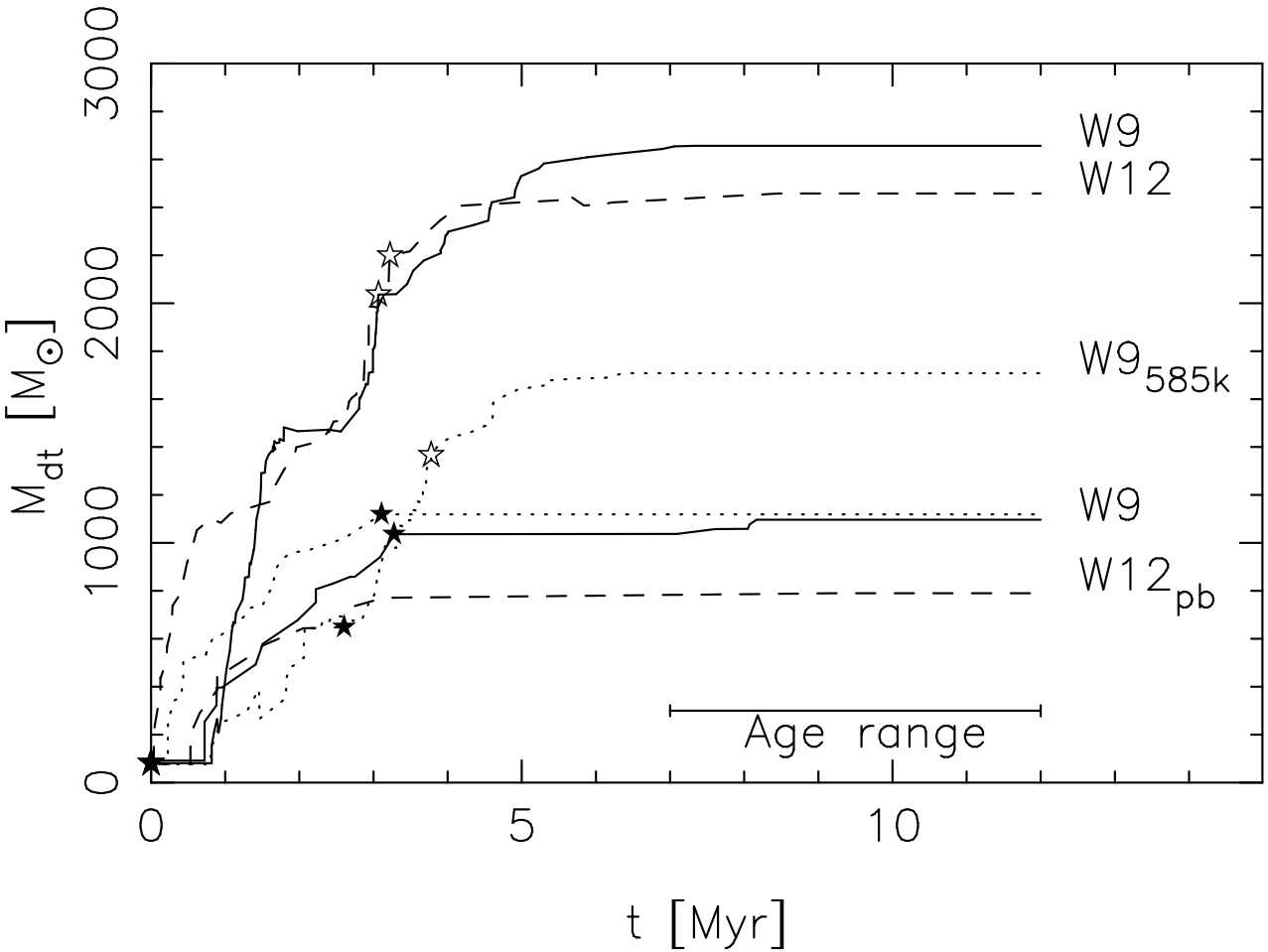
あんまりサイエンスではない話

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

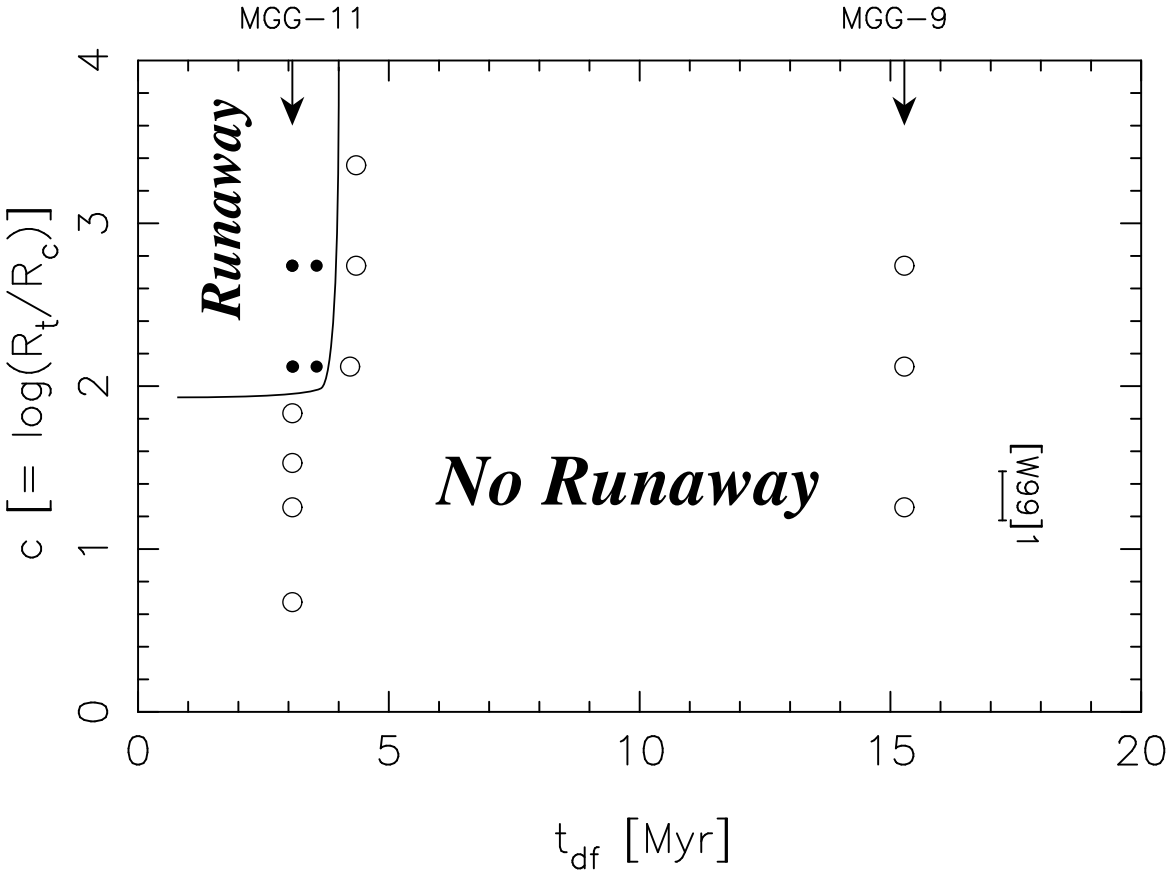
結果



$W_0 \geq 8$ 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

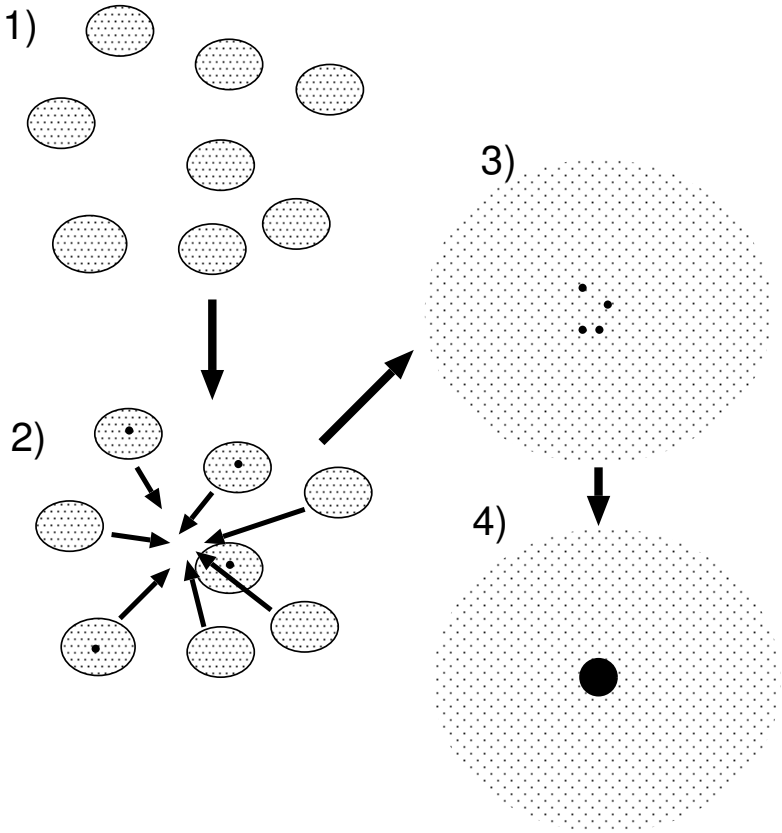
- なんかあるらしい (昨日研究会で紹介あったはず、、、)

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。

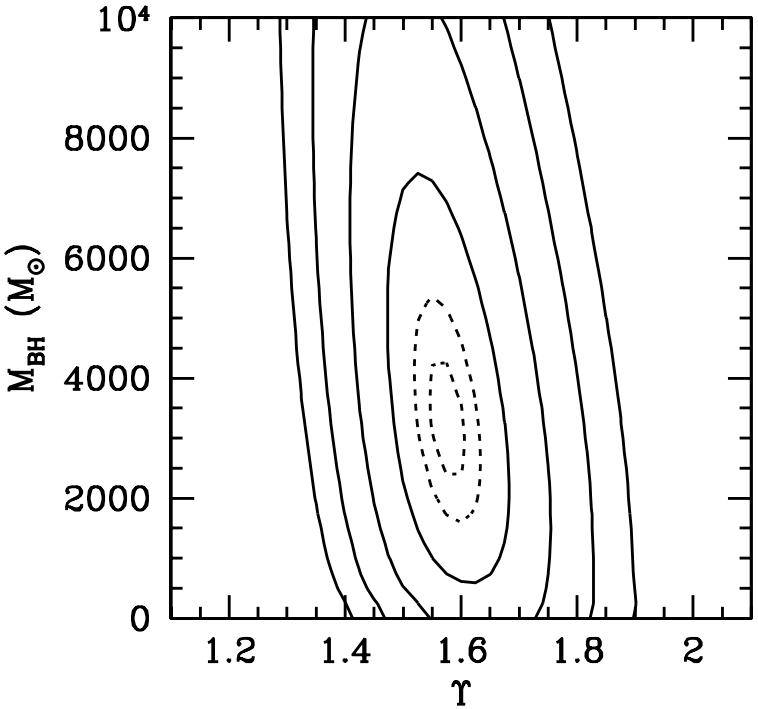
個々の星まで分解して star count で密度プロファイルが書ける。
コアはなく中心までカスプ。

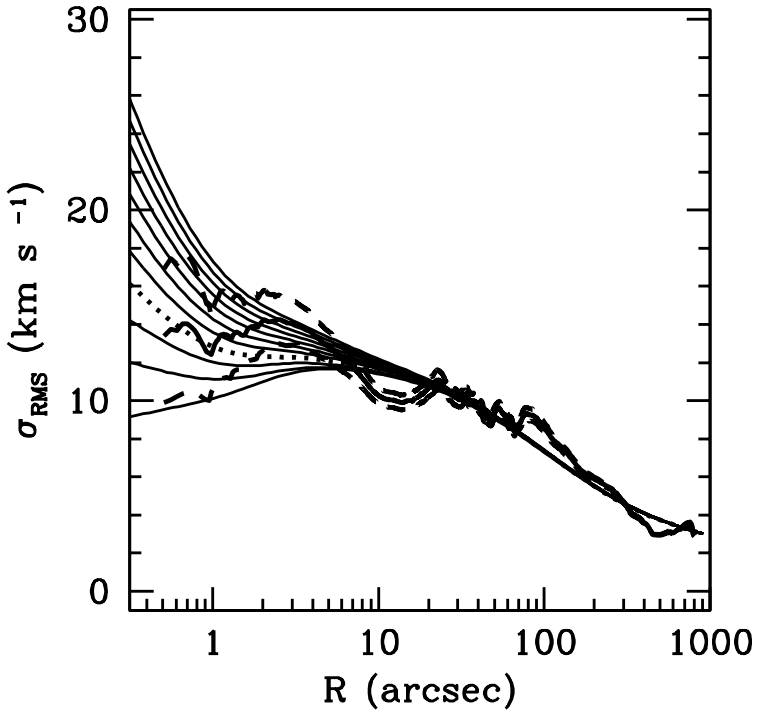
カスプの傾き ~ -0.8,

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

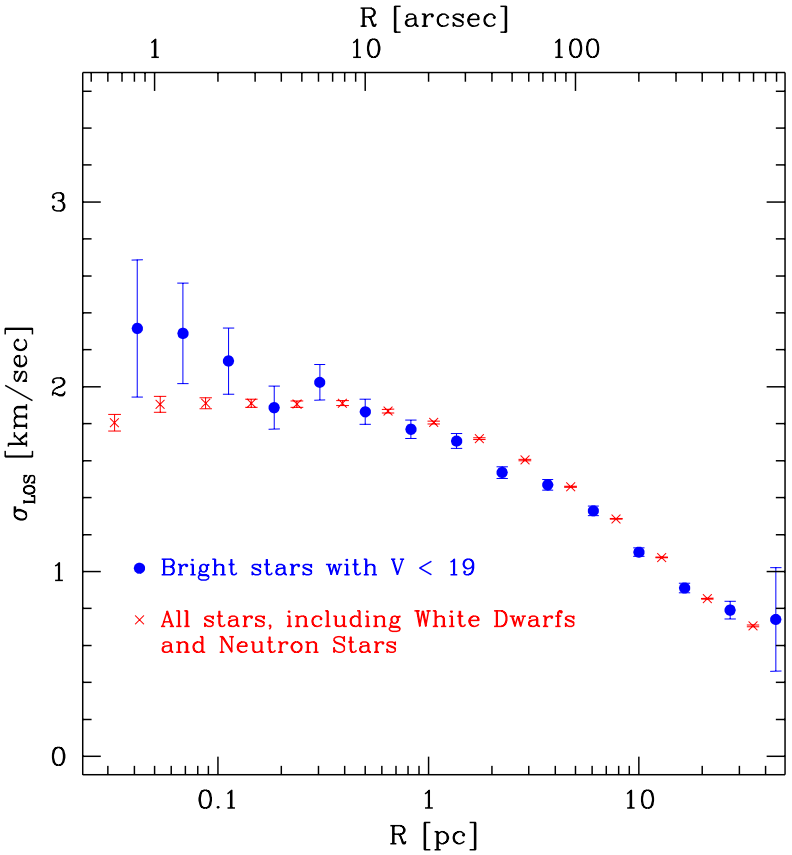


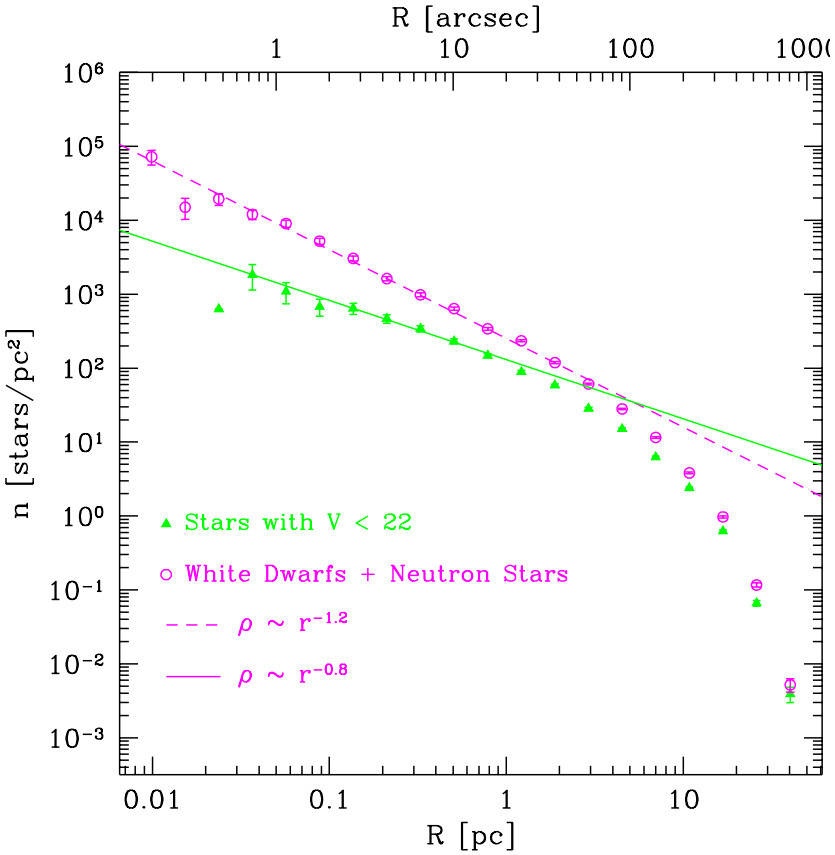


3000 $M_\odot$ black hole !?

BH なしの進化モデル

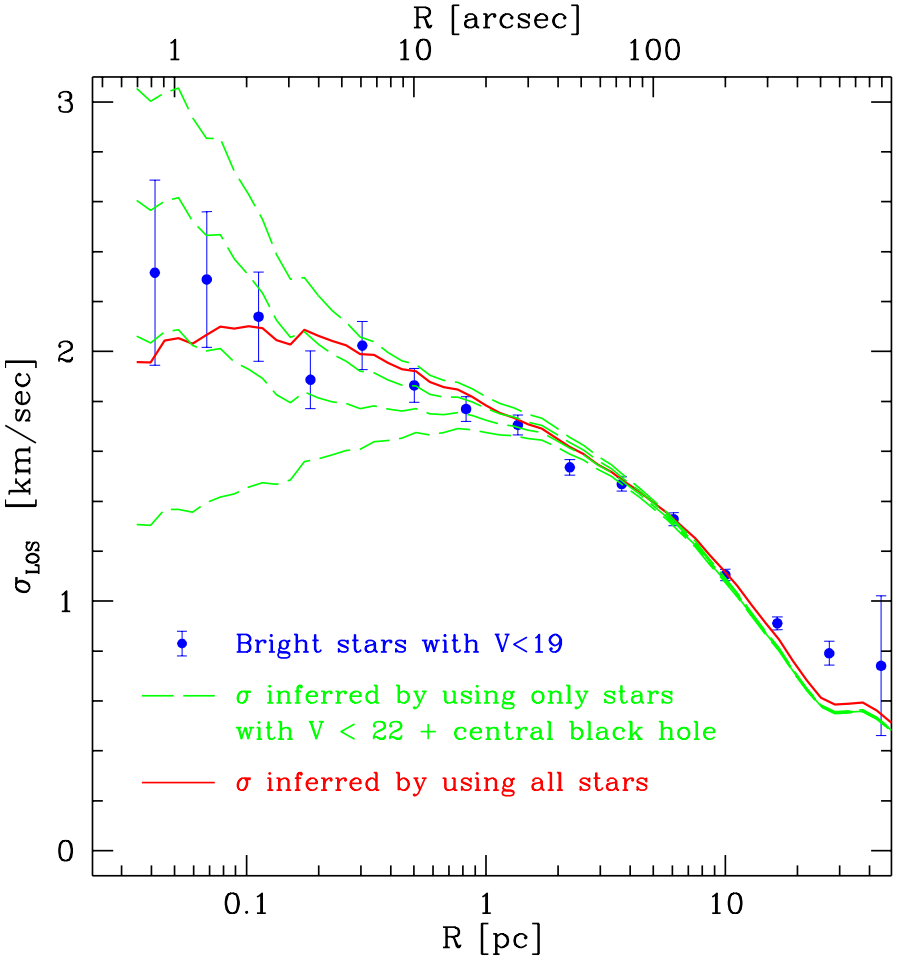
N体計算 Baumgardt et al.(ApJ 2003, 582, L21)





左: 速度分散 右:表面輝度

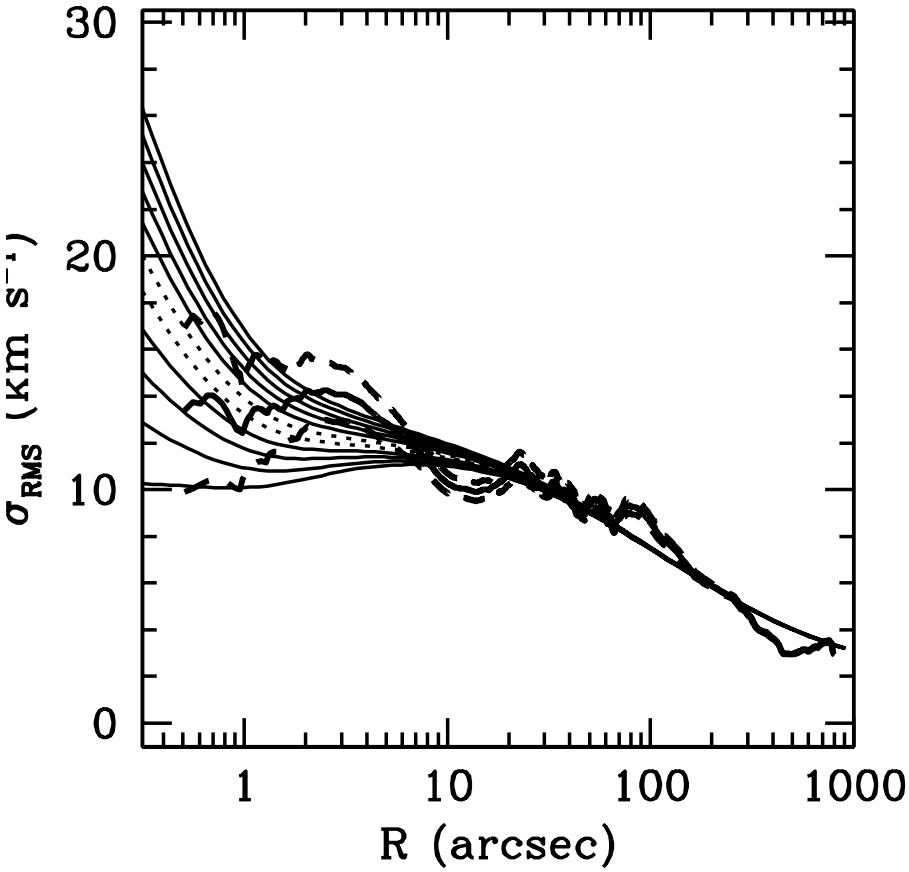
我々のモデルに「ブラックホール発見」



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

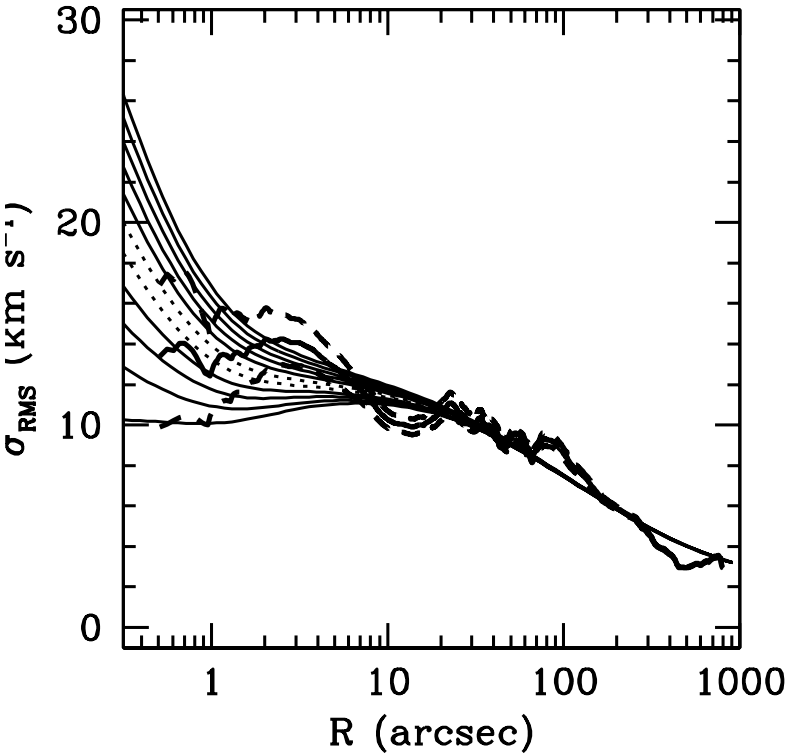


Dull *et al.* (1997) の multi-mass Fokker-Planck 計算による M/L プロファイル

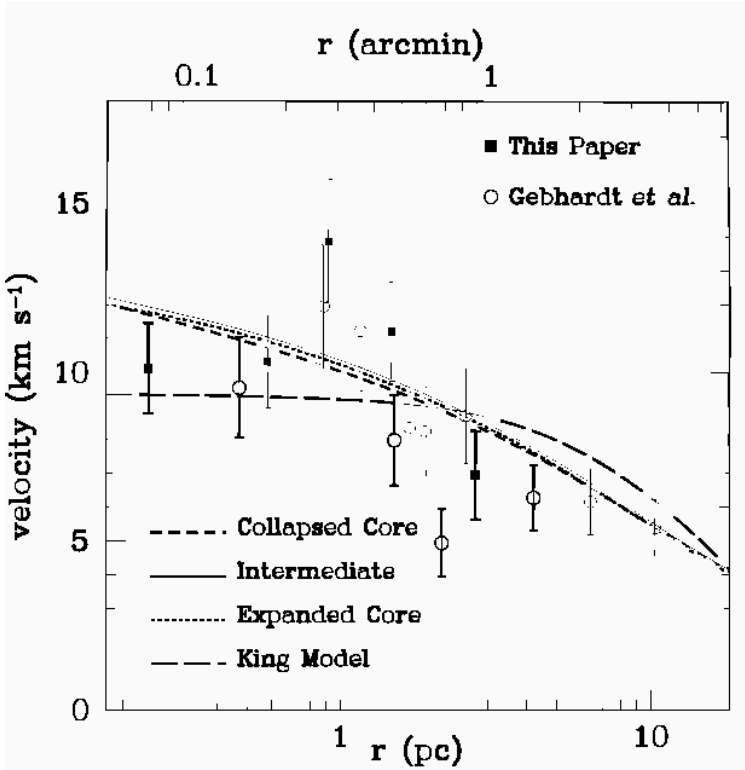
速度プロファイルはあんまり変わらない
依然大きなブラックホールが必要

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 :

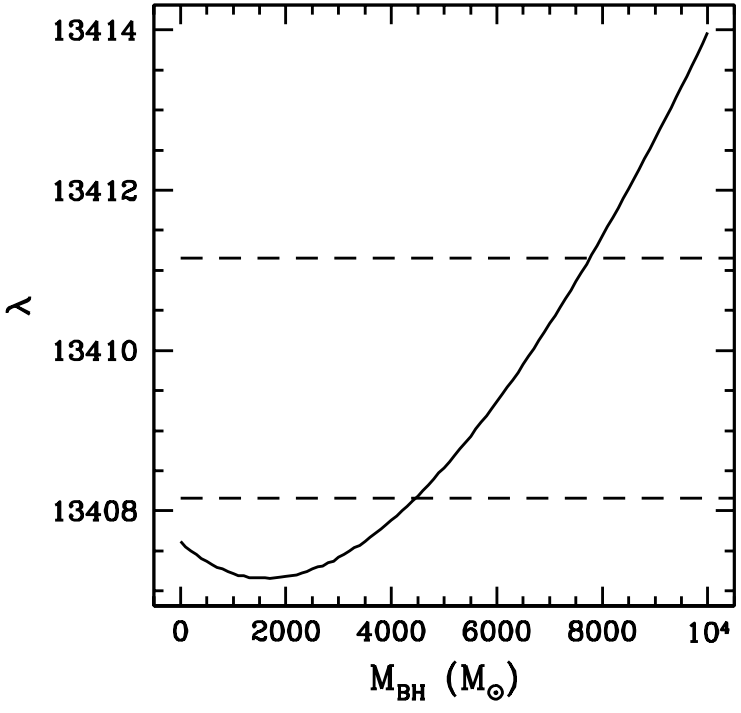
Gerssen et al. astro-ph/0210158 (Oct 8, 2002).

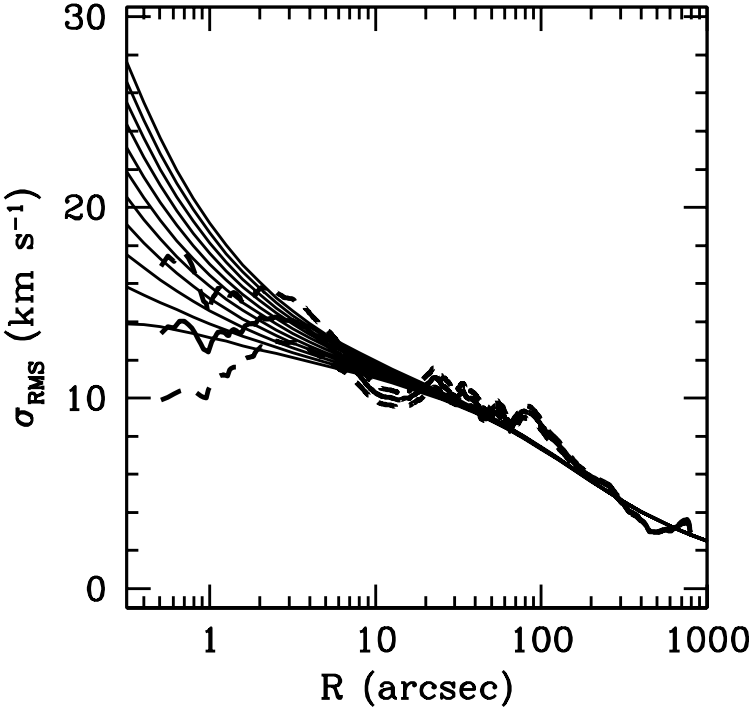
...

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。

つまり: 昔からブラックホールがあるかも、と思っていた、密度カスプがある球状星団は多分捜すべき場所ではない。

どこかを捜すべきか？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？

ブラックホールがある球状星団はどう見えるのか？

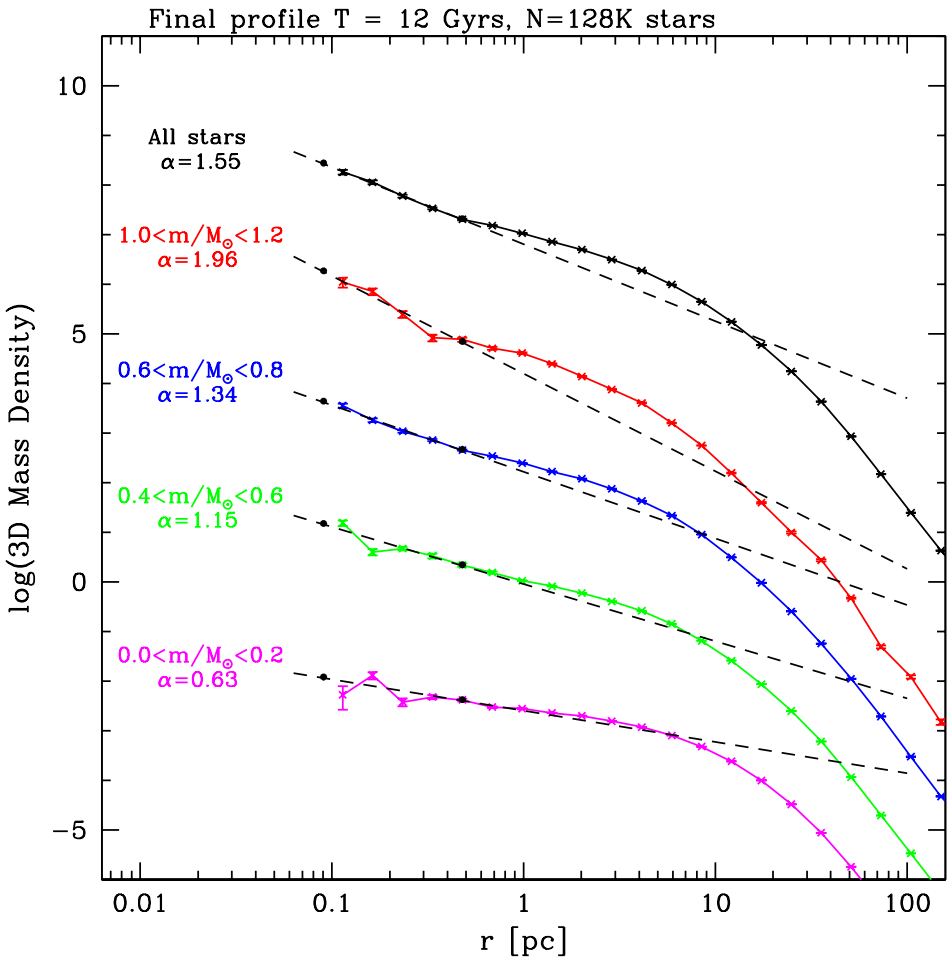
理論 (Bahcall and Wolf 1976): $\rho \propto r^{-7/4}$.
表面輝度のカスプの傾きは -0.75 のはず。

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

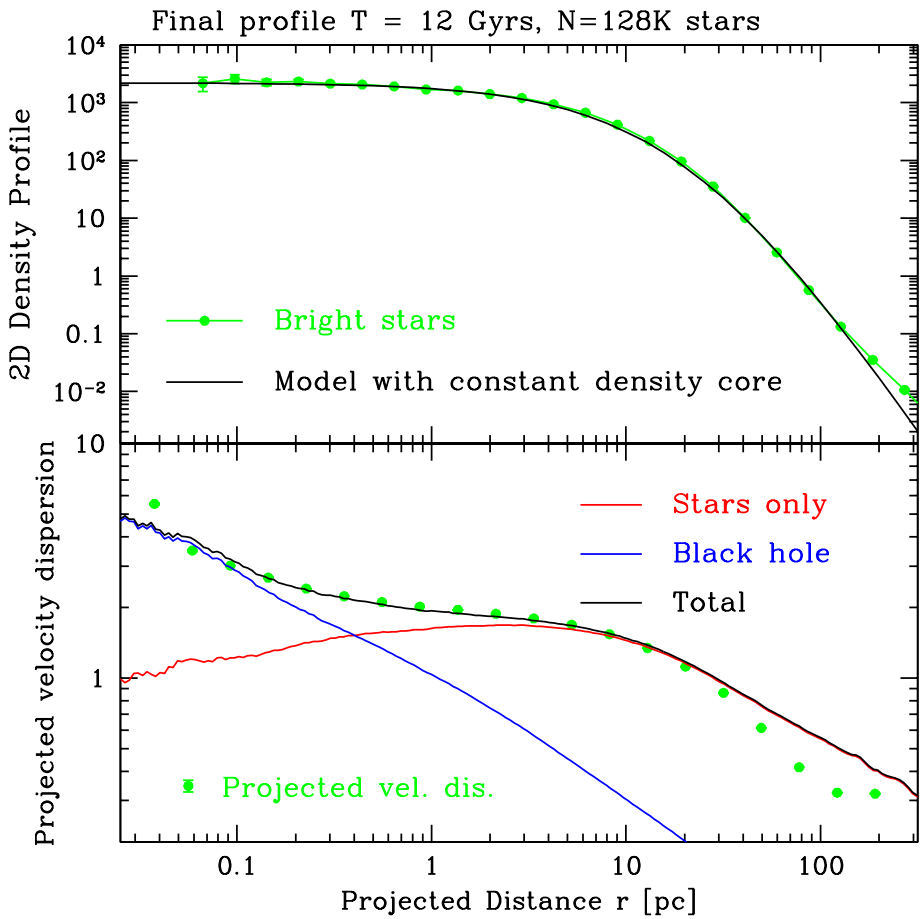
3D 密度分布



- 軽い星はスロープ浅い
- 最も重い星: ~ -2

理論的にはまあ不思議なところはない。重い星はほぼ Bahcall-Wolf。

投影

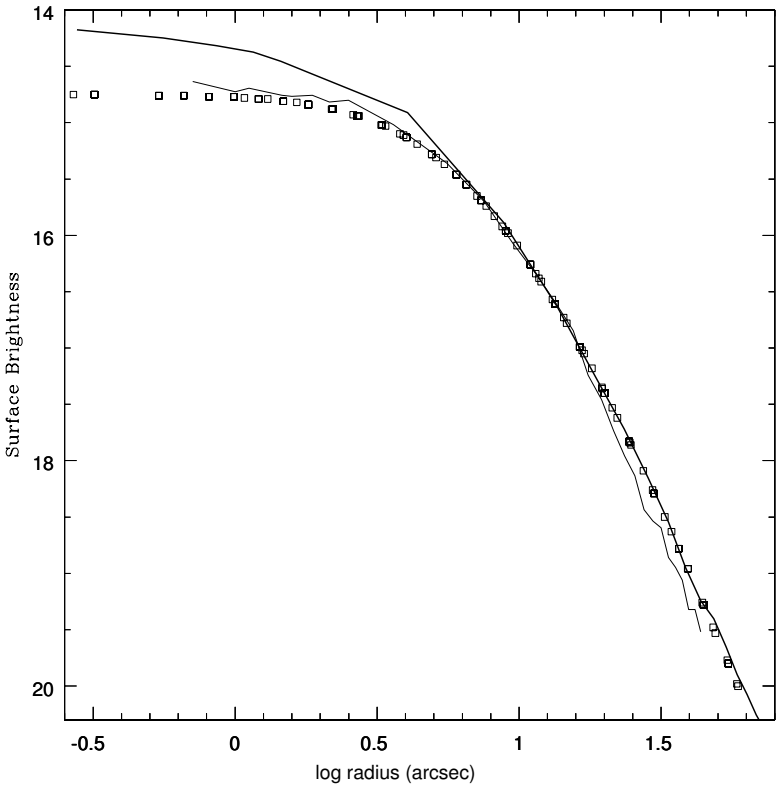


- どう見てもフラットなコアがある
- 速度分散は「コア」の中心近くで微妙に増加

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

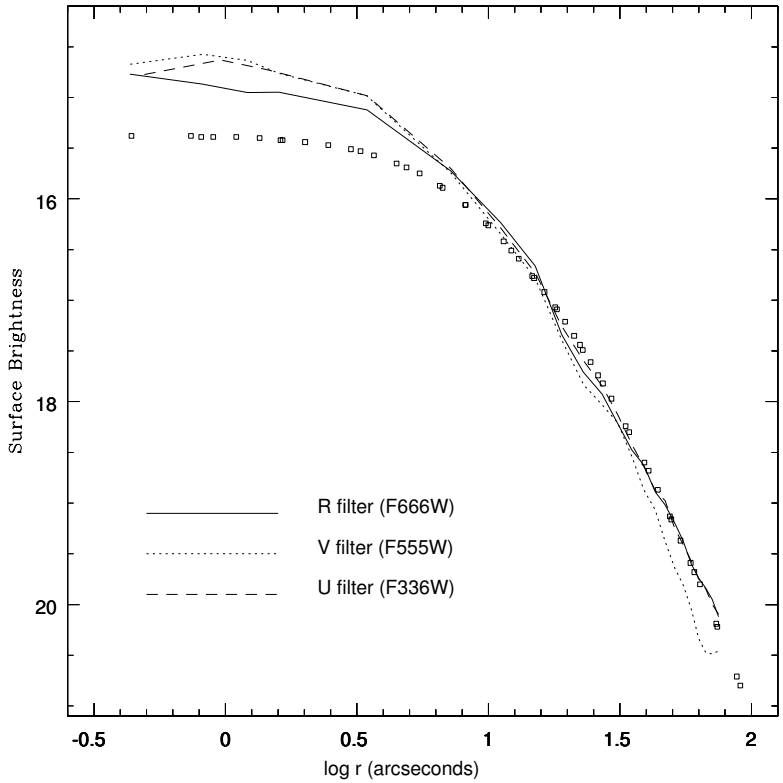
さて、観測は？

Noyola and Gebhardt (AJ, 2006)



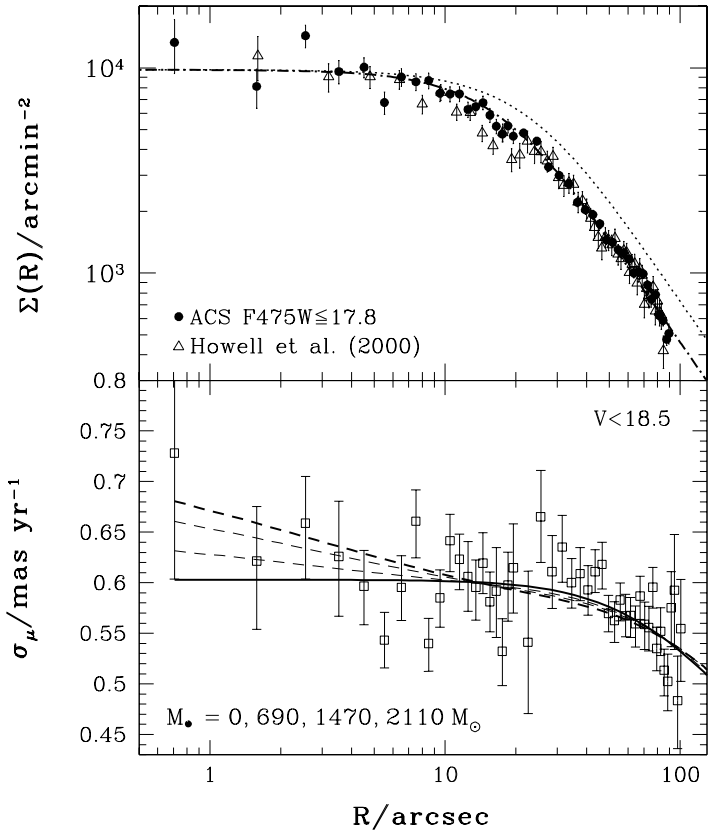
HST WFPC2 での integrated light で書いた表面輝度分布
まだ controversial な結果
(主な理由: M15 のブラックホールの発見をやった人である)

さて、観測は？(2)



主張は、 HST WFPC2でちゃんと見ると地上観測よりコアが小さく、しかも完全にフラットではないというもの。
本当に本当ならブラックホールがあるのかもしれない。

固有運動からブラックホールを見つける？



astro-ph/0607597
McLaughlin et al.
47 Tuc
HST で固有運動決定
コアの内側で速度分散は上がっているような気もする
しかし、統計が悪くて誤差の範囲

観測の問題点

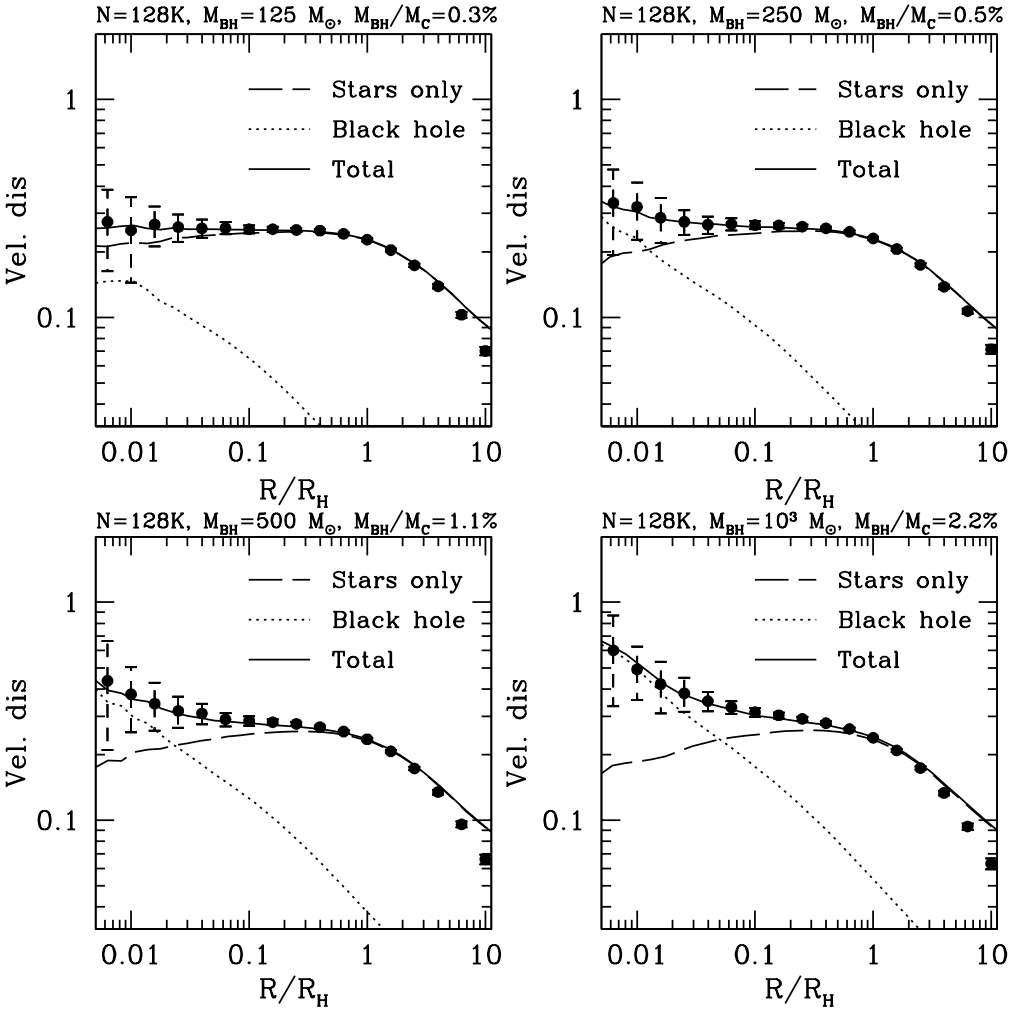
表面輝度

- 信用できない
- そもそも信用できたとしても BH の証拠としては弱い

速度分散

- 星の数が足りない

シミュレーションでは



Baumgardt et al 2005

IMBH ありの球状星団の速度構造

元々エラーバーの内側くらいしか速度分散は上がらない。

観測で見るのも結構無理

他の方法は？

速度が無理なら速度変化は？
47 Tuc の距離: 5kpc
1 秒角 (5000AU) 以内に数十個星がある。
0.3 秒角 (1500AU) でも 10 個くらい。

この辺の星はどんな運動をしているか？
IMBH 質量が $3000M_\odot$ とすると、、、
軌道長半径 1500 AU :
軌道速度 45km/s、軌道周期 1000 年
大体年に 300m/s くらい速度が変わる。
例えば AO+IRCS で 1-2 年おけば観測可能。

まとめ

- 中間質量ブラックホールは大質量で若く高密度な星団でできているっぽい。
- 球状星団は、昔からブラックホールがあるかもと思っていた、中心カスプがあるものには多分ブラックホールはない。
- 逆に、最近の理論モデルだと、「普通の」球状星団の中心にブラックホールがあるかもしれない
- 但し、これは速度分布 (視線速度でも固有運動でも) では、見える星の数が足りないので判定困難
- 速度は数年で $1\mathrm{km/s}$ くらい変わるはずなので、時間おけば判定できる

おしまい