ブラックホールの恒星系力学
— 最近の進展

牧野淳一郎
東京大学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).

Talk Overview

1. 前置き
2. M82
   - 観測
   - 解釈
3. M15
   - 観測 — 見えないものを見る
   - モデリング — 見えないものを計算する
   - 解釈 — 両方を合わせる
4. G1
5. 大質量ブラックホール連星の進化

初めに — 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 $\sim 10M_\odot$ (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 ???

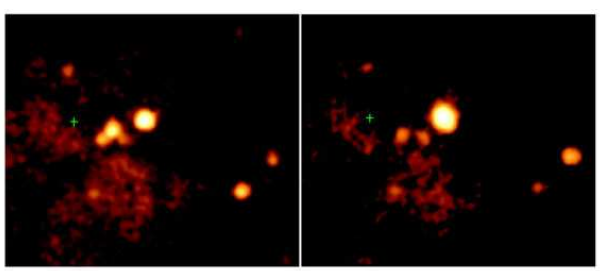
中間質量ブラックホール

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

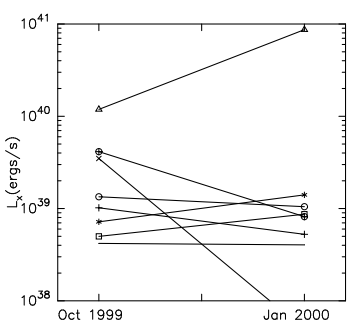
IMBH (candidate) in M82

Matsumoto *et al.* ApJL 547, L25



Multiple point sources with high variability.

Variability



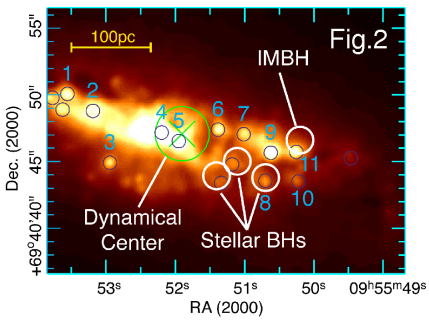
The strongest source shows significant variability.

Implication of M82 IMBH (candidate)

- First candidate BH with mass >> 10, but (most likely) << 10^6
- Eddington mass $\sim 700 M_\odot$ = First IMBH (intermediate-mass BH).
- Off-center: Some 200 pcs away from the dynamical center of M82
- Center of the expanding shell of molecular gas (Matsushita *et al.* ApJ 2000, 545, L107)

IR Counterpart

SUBARU IRCS view of the center of M82 (K' band)
still unpublished...



IMBHs in star clusters?

It seems clear that IMBHs coexist with young and compact clusters ($< 10 Myrs$), which experienced LOTS of SNe very recently ($\sim 1 Myrs$).

How were IMBHs formed?

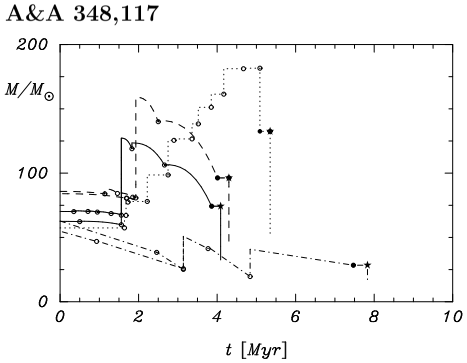
- May have been formed at the same time when the cluster formed.
- May have been formed after the cluster formed

A possible scenario

1. A massive star forms through runaway merging of stars in the center of the cluster.
2. IMBH forms through collapse of massive star.
3. IMBH further grows by accreting other stars.

Simulation of young cluster

N-body simulation by Portegies Zwart et al. 1999 A&A 348,117



Runaway merging

If the dynamical friction timescale of the most massive stars is short enough (less than their lifetime), runaway merging is inevitable.

The runaway star will end up as a fairly massive BH, like 100–200 $M_\odot$ or more.

Final outcome depends on main-sequence mass loss and evolution of supermassive stars itself...

BH growth after formation

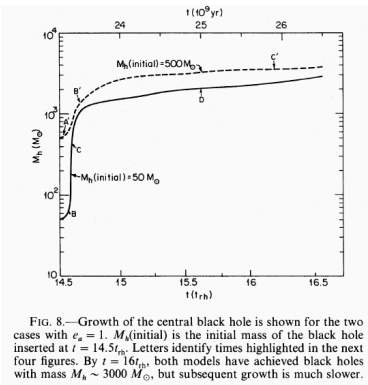


FIG. 8.—Growth of the central black hole is shown for the two cases with $e_a = 1$. M_h(initial) is the initial mass of the black hole inserted at $t = 14.5t_{rh}$. Letters identify times highlighted in the next four figures. By $t = 16t_{rh}$, both models have achieved black holes with mass $M_h \sim 3000\ M_\odot$, but subsequent growth is much slower.

Marchant and Shapiro 1980 ApJ 239, 685

Model cluster: globular cluster
$N = 10^5$
1-D MC code

Underestimates the growth rate?
Eddington limit?

Summary for IMBH theory

- Formation of IMBH through runaway merging and subsequent accretion of stars to the seed BH seems plausible.
  - Merging rate is high
  - accretion rate is also high
- This does not rule out other possibilities

At least, runaway merging *can* explain the existence of IMBH in the M82 compact cluster

M15 — 「観測」とその解釈

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」とその解釈

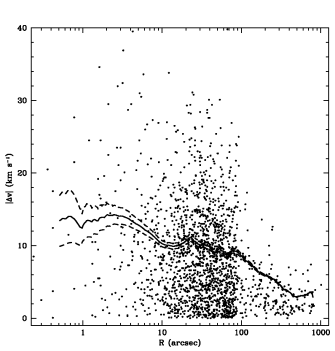
STScI Press release (Sept 18, 2002)

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。

本当ならすごい

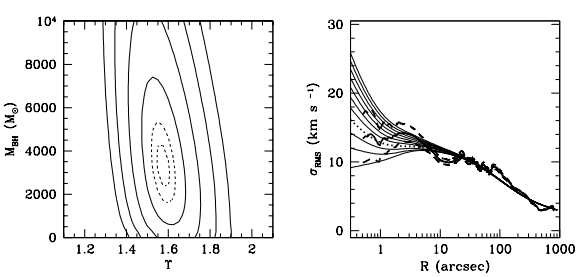
M15 — 観測



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

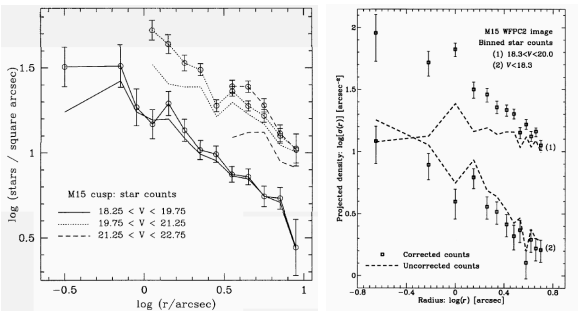


3000 $M_\odot$ black hole!

Gerssen et al. のやったこと

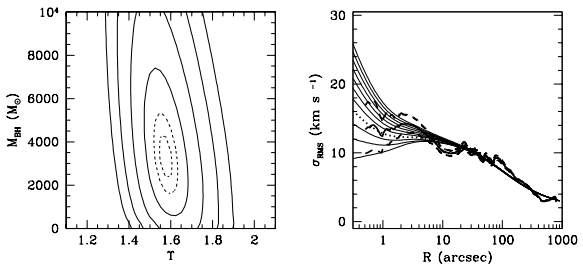
1. “ Mass follows Light” を仮定して、(見えるものの) 密度分布に何か定数 γ を掛けると (見えないものの) 質量分布が求められると信じる。
2. 質量分布から速度分布を求めてみる。
3. これは、定数をふってみても速度分布の観測結果とあわない
4. 中心にいろいろな質量のブラックホールを仮定して、速度分布を計算しなおす
5. χ^2 残差が最小になったところで、「ブラックホール発見!」

表面輝度



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

ブラックホールありモデルの速度分布



3000 $M_\odot$ black hole!

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 $M_\odot$)

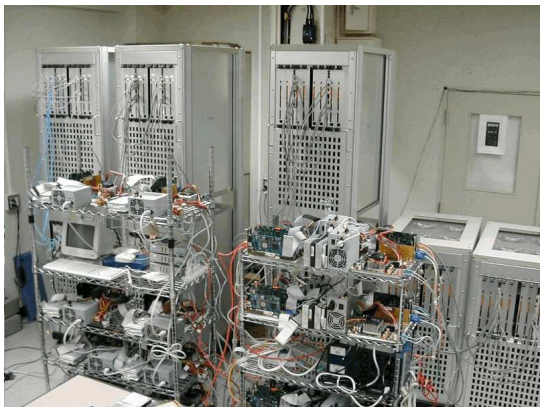
数値シミュレーションでもうちょっと細かくみてみる。

N-body simulation

Baumgardt and Makino (MNRAS 2003, 340, 227)

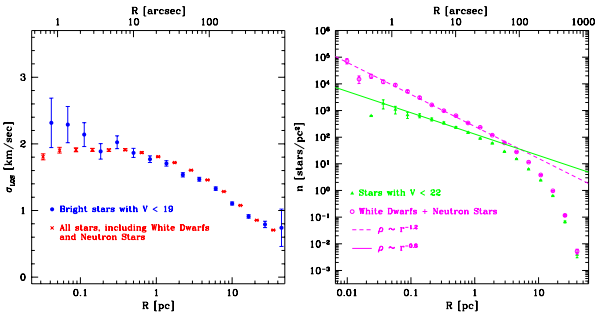
- N=128k (mass at core collapse $= 2 \times 10^4 M_\odot$ ($\sim$1/40 of M15)
- Kroupa (2001) IMF (15 $M_\odot$ cutoff)
- Hurley *et al.* (2000) Stellar evolution
- NBODY4 on GRAPE-6
- $W_o = 7$ King model at 8.5kpc from GC
- reached core collapse at 12.6 Gyrs
- 40 days on a 4-Tflops GRAPE-6.

GRAPE-6



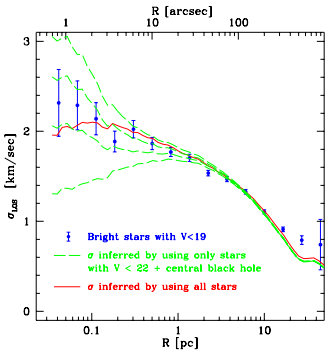
Results

Baumgardt et al., ApJ 2003, 582, L21.



Left: velocity dispersion; Right: Surface density.

And we "found" BH...



Inversion of surface number density of bright stars gives too small central velocity dispersion without central BH.

Black hole mass = $80M_\odot$.
If scaled to M15,
$\sim 3 \times 10^3 M_\odot$ (Gerssen *et al.*: $\sim 3 \times 10^3 M_\odot$)

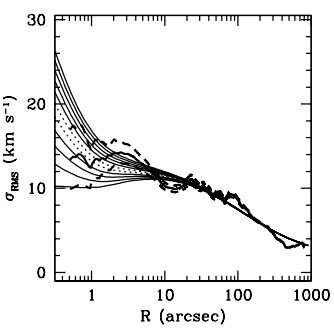
Why we "found" BH?

We "found" BH because we assumed constant M/L.

If we use the true M/L, of course we do not need BH.

But didn't Gerssen *et al.* try realistic M/L as well?

"Realistic" M/L

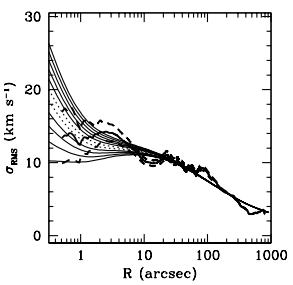


M/L profile from multi-mass Fokker-Planck calculation by Dull *et al.* (1997)

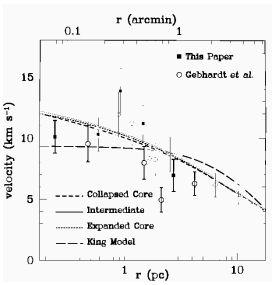
Very small change in the velocity profile. Large BH still necessary.

So why the difference?

Gerssen



Dull

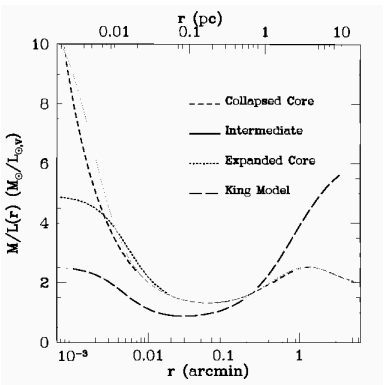


Using same M/L, they got very different velocity profiles.

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.

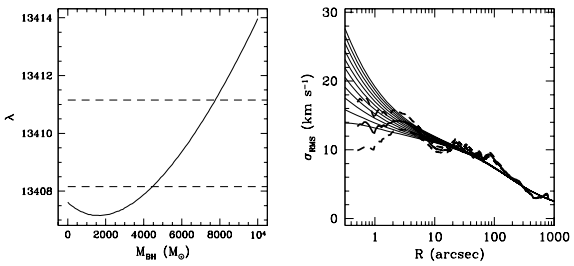
Dull M/L



should have read 'arcmin' instead of 'pc'

New plot

New plot (astro-ph/0210158):

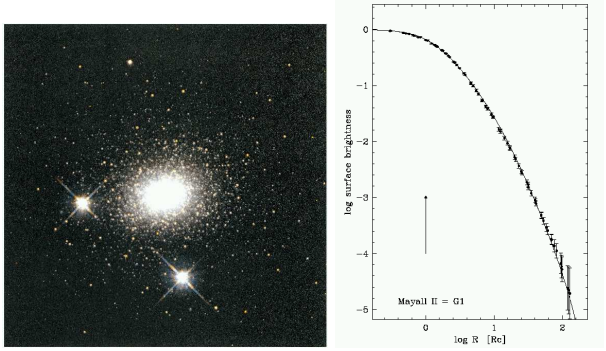


Black hole disappeared, or *"0.6 − σ detection"*.

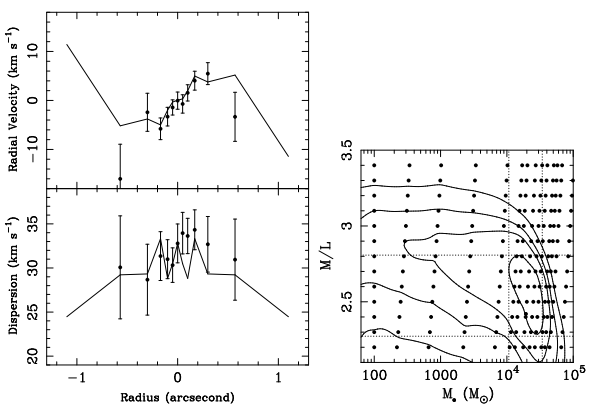
ここまでのまとめ

- 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。
- まあ、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。(あるとあわないとは断言できない)
- これはむしろ、我々の球状星団に対する標準的な理解は「かなり本当らしい」ということを観測結果が示唆していると解釈してもいいのではないだろうか？

G1 — Photometry



G1 — Spectroscopy



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?

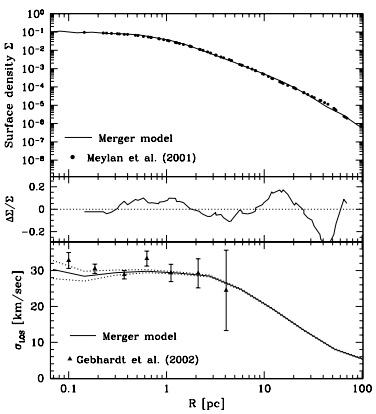
G1 の evolutionary model

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

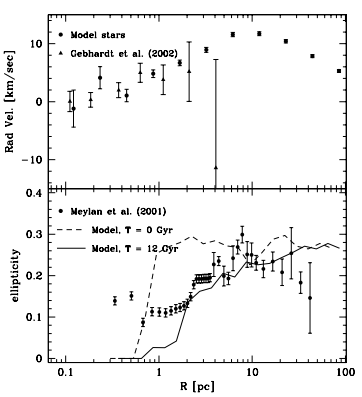
(runaway merging とかは起きない初期条件なので、ブラックホールはない)

結果 (1)



- 密度プロファイルは非常に良く合う
- 速度分散もエラーバーの範囲

結果 (2)



- 回転速度も妙に良く合う
- Ellipticity まで合う

つまり、、、

極めて標準的な

- まだ core collapse にいたっていない大きなコアを持つ。
- 合体時の 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

G1 のまとめ

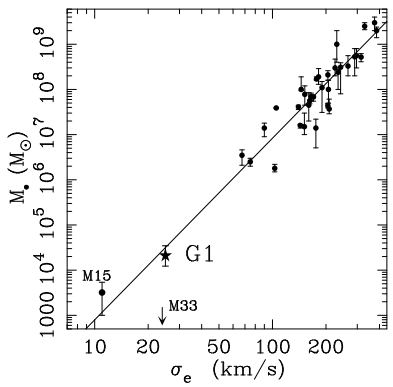
- G1 の構造は比較的素直な初期条件からの進化モデルで再現できる。
- 回転と密度分布を同時に説明する方法の一つは、連球状星団を初期条件とすること。
- 緩和時間が長いので、 M15 で起こったような stellar remnant の中心集中は起きない。
- Gebhardt et al. がブラックホールが必要と結論したのは、多分速度分散の高次のモーメントの解析に問題があるため。

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

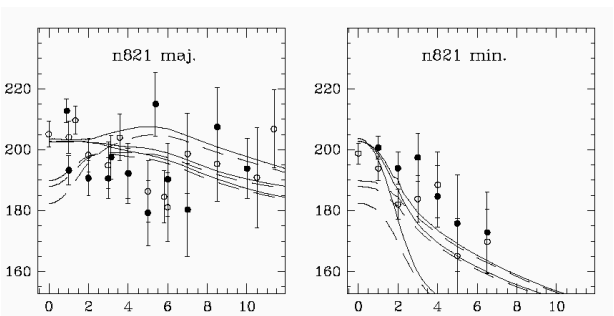
解析方法も同じ

???



典型的「BHあり楕円銀河」

NGC821 (From Magorrian et al 1998)



まとめ(1)

- 高密度で若い星団の中では、 dynamical friction で大質量星が星団コアに沈んで、そこで暴走的合体を起こすことで超大質量星から中間質量ブラックホールを形成できる (かもしれない)。
- このシナリオは、 M82 の中心近くに見つかった中間質量ブラックホールが、星団と重なった場所にあるという観測結果を自然に説明できる。

まとめ (2)

- 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。

大質量ブラックホール連星の進化

1. 何が問題か？
2. これまでの自分及び人の仕事
3. 新しい計算
4. 結果
5. 考察

何が問題か

- 楕円銀河は大抵大質量ブラックホールを中心に持つらしい (Nukers を信じるなら)
- 楕円銀河の中心部の構造 (輝度分布) は、「ブラックホールがある銀河同士の合体」と矛盾しない (銀河が合体してからブラックホールが成長したと考えると密度カスプが観測より深い必要がある)

つまり、大質量ブラックホールをもつ銀河同士が合体したと考えられる。
IMBH から MBH を作るにも合体が必要。
ブラックホール2つは合体できるか？

わかっている (つもりの) こと

- BH はできた銀河の中心に沈む (力学的摩擦のため)
- で、2 つが連星系になる

この辺は球状星団で重い星が中心に沈んで連星を作るのと変わらない
違い:

- ブラックホールは非常に重い = ブラックホールのランダム運動は小さい
- 周りの星の数が非常に多い = 緩和時間が長い

このため、角運動量の小さい、ブラックホールと相互作用できる星が使いつくされる可能性がある (loss cone depletion) そうなると進化が遅くなる (Begelman, Blandford and Rees 1980)

Loss cone depletion

もしもこれが起きると (周りの星との相互作用と重力波だけでは) 普通の大質量ブラックホール連星は宇宙年齢の間に合体しない。
合体するかどうか

- 合体を繰り返した時にブラックホールの質量が成長できるか
- LISA で観測できるか
- 合体しないとすれば何が起こるか

本当に depletion は起きるか？

理論的に自明というわけではない

Loss cone ができたらブラックホールの周りにはなにもない
↓
ランダム速度が小さくても、真空でなくなるところまで動いていかないか？

ちょっと別の話: 離心率が大きくなればなんとかならないか？

N体計算で調べる

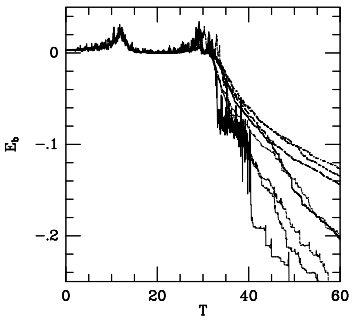
- Makino 1997
- Quinlan 1997
- Milosavljević & Merritt 2001
- Chatterjee, Hernquist & Loeb 2003

割合バラバラな結果、、、

Makino 1997

- King model ($W_o = 7$) 同士の合体
- 粒子数 2K — 256K
- $M_{BH} = M_{Gal}/32$
- GRAPE-4 での直接計算 (NBODY1)
- フィールド粒子同士は soft potential、BH が関係するものは $1/r$
- 重力波とかはなし

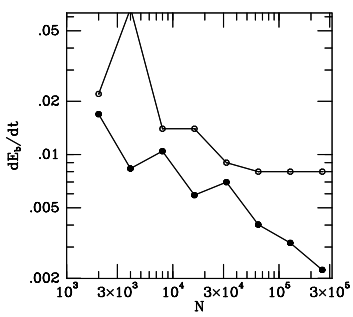
Binding energy



粒子数が大きいほうが進化が遅いのは確か

問題はどれくらい遅くなるか

エネルギーの変化率



上: エネルギーが $1/160$ から $1/80$ まで

下: エネルギーが $1/10$ から $1/5$ まで

最初のうちは粒子数によらない

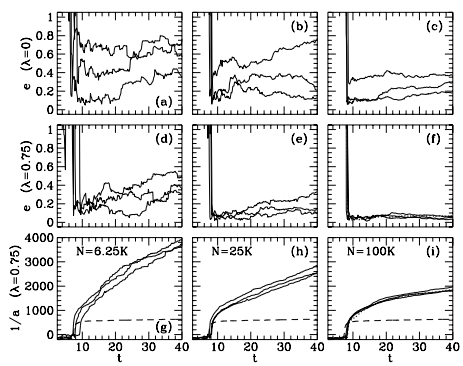
後になるとよる。傾き: $N^{-1/3}$ くらい

緩和時間の理屈に合わない

Quinlan 1997

- Plummer model 1 つでブラックホール2個置く
- 粒子数 6.25K — 200K
- $M_{BH} = M_{Gal}/100$
- SCF + direct
- フィールド粒子同士は SCF、BH が関係するものは 直接計算

結果

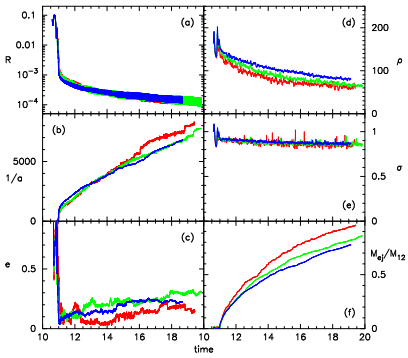


$N > 100$K では粒子数によらない!?

Milosavljević & Merritt 2001

- 中心まで $\rho \propto r^{-2}$ の銀河モデル作って合体させる
- 粒子数 8K — 32K
- $M_{BH} = M_{Gal}/32$
- Tree+direct
- ブラックホール連星ができる直前まで Tree、出来たら直接計算 (Sun Starfire 上の並列コード)

結果



粒子数によらない

但し、論文では「N が十分大きくなれば N によるはず」と主張 (実験的な根拠はない)

Chatterjee, Hernquist & Loeb 2003

- Quinlan 1997 と同じ方法
- 粒子数 400K まで
- M_{BH} はいろいろ

図を見ても分からないが、
$N > 200K$ で N に依存しなくなった
と論文には何故か書いてある

従来の結果のまとめ

なんだかよく分からない

- 人によって答が違う
- loss cone depletion の理論に合う結果は一つもない

何が悪かったか

んなことがわかってれば苦労はない

- 粒子数が足りない？
- 計算コードが怪しい？
- 初期条件の違い？

新しい計算

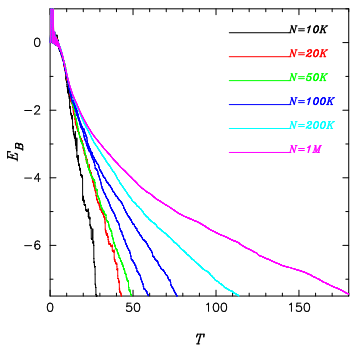
- なるべく単純な初期条件で
- なおかつできるだけ loss cone ができやすい条件で
- 信頼できる計算法で
- 大粒子、長時間計算をする

のが目標。

実際の計算

- King model ($W_o = 7$) 1 つでブラックホール2個置く
- 粒子数 2K — 1M
- $M_{BH} = M_{Gal}/100$
- 直接計算 on GRAPE-6
- フィールド粒子からの力は GRAPE-6、BH からの力ははホストで計算

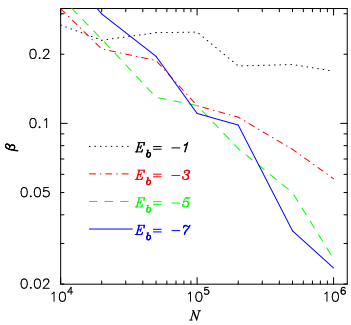
Binding energy



粒子数が大きいほうが進化が遅いのは確か

問題はどれくらい遅くなるか

エネルギーの変化率



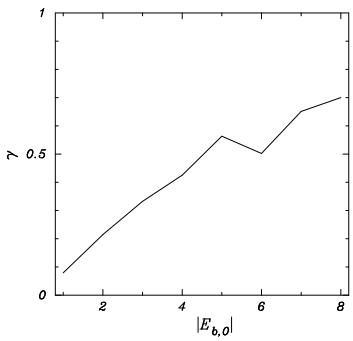
$$\beta = -\frac{dE_b}{dt}$$

最初のうちは粒子数によらない

後になるとよる。

エネルギーが大きくなるにつれて傾きが大きくなる???

傾きと結合エネルギー



エネルギーが大きくなるにつれて傾きはどんどん大きくなる。

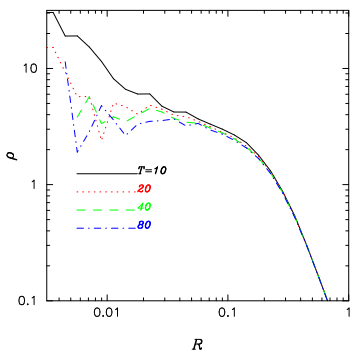
計算できた範囲では収束していない。

まあ、どうなるかといえば 1 にいかないとは言えないのではないか?

結果のまとめ

- Quinlan 1997 とほぼ同じ設定で計算した
- Makino 1997 と同じく、粒子数が大きくなるほど進化が遅くなる傾向は確認された
- 粒子数への依存性は、ブラックホール連星の結合エネルギーが大きくなるにつれて大きくなる
- Loss cone depletion と「矛盾はしてない」

loss cone はみえるか？ — 密度分布

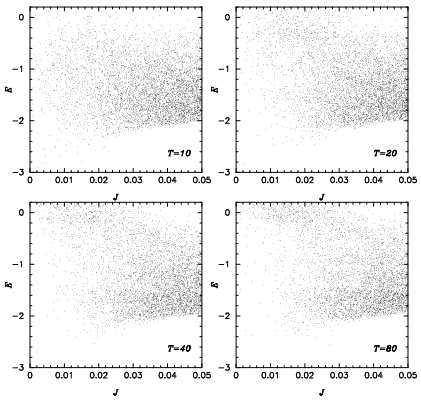


最初あった密度カスプが消えてはいる。

ブラックホールの近くで密度がさがってはいない

はて？

loss cone はみえるか？ — (E, J) 空間



$J < 0.01$ のところから粒子がなくなっている

J が小さくてエネルギー 0 に近いところには粒子がたまる

明らかに loss cone はできている。

従来の計算の問題は何だったか？

- Makino 1997
  - シミュレーション時間が短かかった
- Milosavljević & Merritt 2001
  - 粒子数もシミュレーション時間も足りなかった
- SCF+BH の計算
  - よく分からない、、、

まとめ

銀河中心での大質量ブラックホール連星の、周りの星との重力相互作用による軌道進化を、従来の計算より信頼できる計算コードで、大粒子で長時間積分した。
その結果

- まともな計算コードで
- 十分大きな粒子まで、十分長時間

計算すれば loss cone depletion は起きるということがわかった。
つまり:

大質量ブラックホール連星は星との相互作用だけでは重力波が効くところまで軌道が縮まない。

モデルの作り方 — Jeans equation

球状星団の星の分布関数は力学平衡、つまり無衝突ボルツマン方程式

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathrm{v} \cdot \nabla f - \nabla \Phi \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathrm{v}} = 0, \tag{1}$$

の定常解になっている。で、これに対して星団が球対称で、平均の流れがない (どこで積分しても平均速度は 0) と仮定すると

$$\frac{d(\nu \overline{v_r^2})}{dr} + \frac{\nu}{r}\left[2\overline{v_r^2} - \left(\overline{v_\theta^2} + \overline{v_\phi^2}\right)\right] = -\nu \frac{d\Phi}{dr} \tag{2}$$

但し、$\nu = \int f d^3\mathrm{v}$ (空間密度)

Jeans equation (等方)

速度分布が等方的とすれば、結局

$$\frac{1}{\nu}\frac{d(\nu \overline{v_r^2})}{dr} = -\frac{d\Phi}{dr} \tag{3}$$

すなわち

$$M(r) = -\frac{r\overline{v_r^2}}{G}\left(\frac{d\ln \nu}{d\ln r} + \frac{d\ln \overline{v_r^2}}{d\ln r}\right) \tag{4}$$

これは、ポテンシャルを作るものの質量密度と、そのなかで動いているものの密度、速度の間の関係を与える。

観測の解釈

いいかえると、Jeans 方程式を使うと

- (見えないものも含めた) 質量分布
- (見えるものの) 密度分布
- (見えるものの) 速度分布

のうち 2 つがわかればもうひとつがわかる。