

連星ブラックホールの進化と親銀河の応答

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

と書きましたが

親銀河の応答の話は
(たぶん) 岩澤君がするので (ポスター 7)

主に連星系の進化の話を

主ないいたいこと

- 等質量の巨大質量ブラックホール連星は恒星系との相互作用だけでは合体しない
- 質量比が非常に大きい時には恒星系との相互作用だけで合体できる
- 中間質量ブラックホールはその辺の球状星団の中にあるかも

概要

1. 大質量ブラックホール連星の進化
2. 中間質量ブラックホールの軌道進化
3. 中間質量ブラックホールを球状星団に探す
4. まとめ

大質量ブラックホール連星の進化

1. 何が問題か？
2. 2002 年ころまでの自分及び人の仕事
3. 2003 年くらいの計算
4. 結果
5. その後

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морいの) 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、真空でなくなる場所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

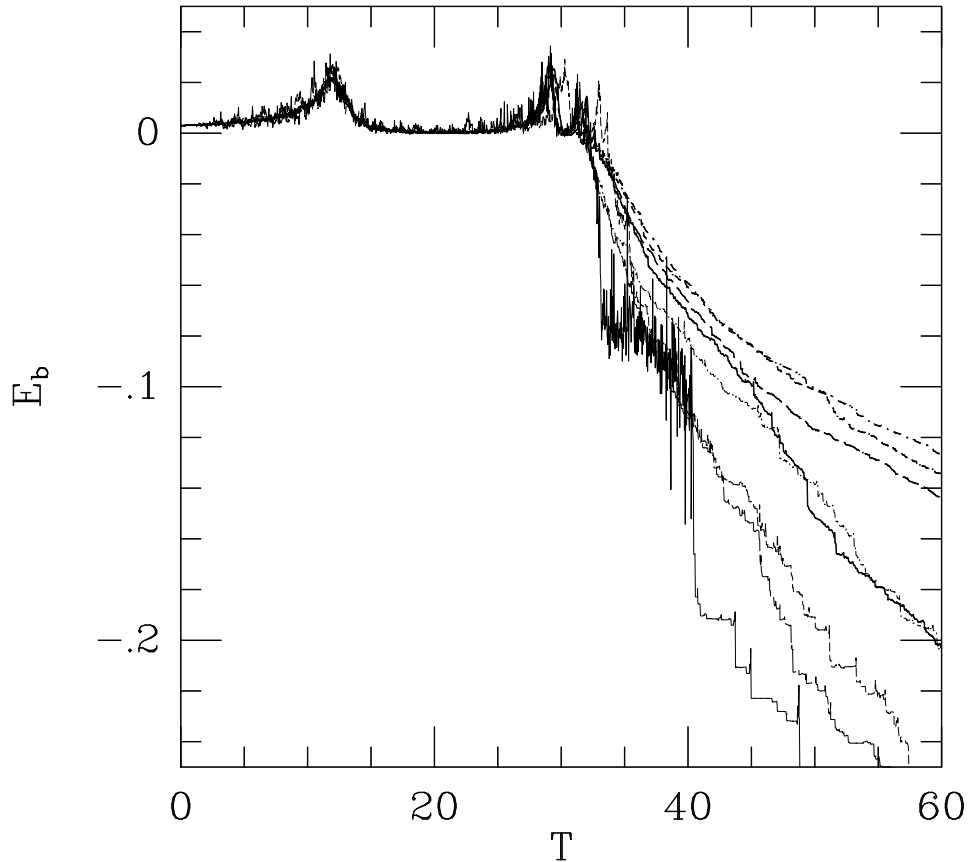
- Makino 1997
- Quinlan 1997
- Milosavljević & Merritt 2001
- Chatterjee, Hernquist & Loeb 2003

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

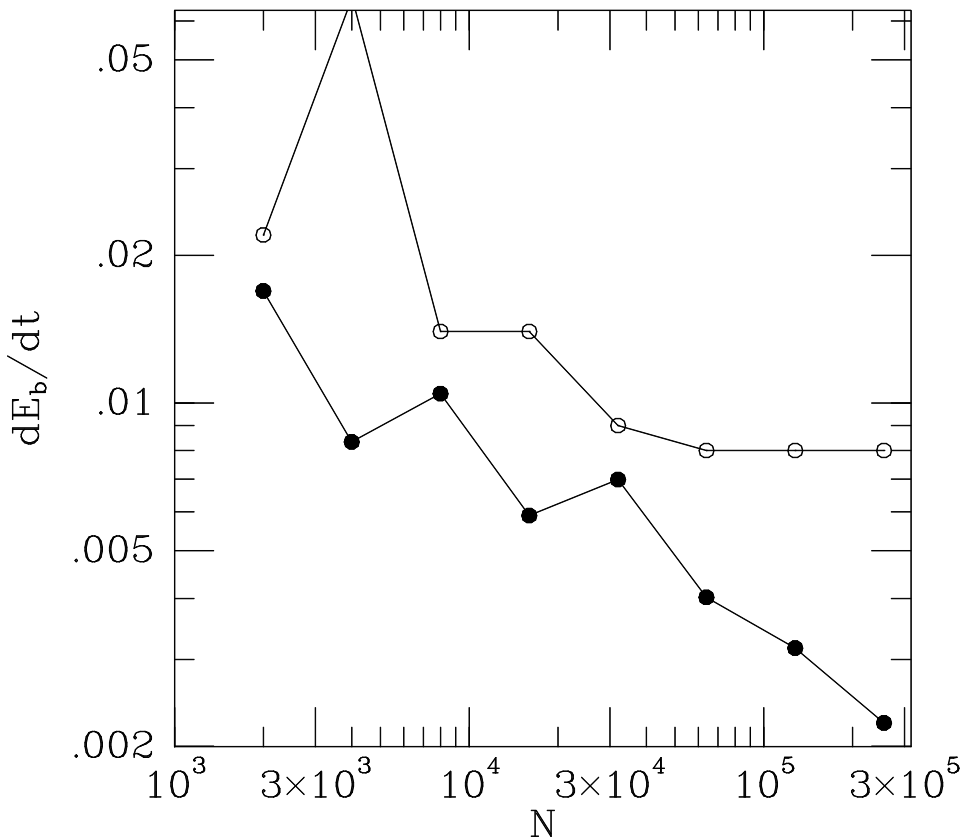
Binding energy



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

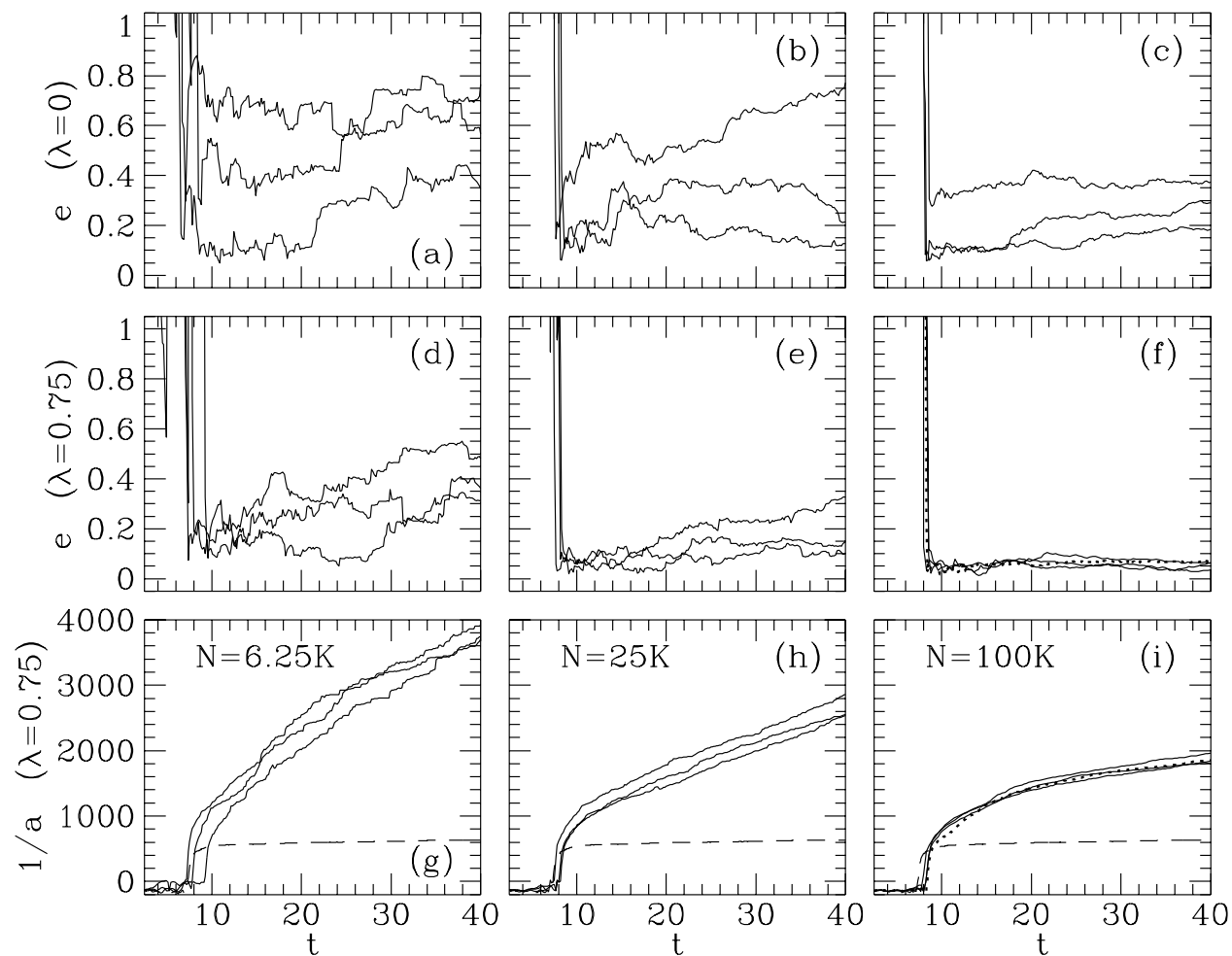
後になるとよる。傾き:
 $N^{-1/3}$ くらい

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

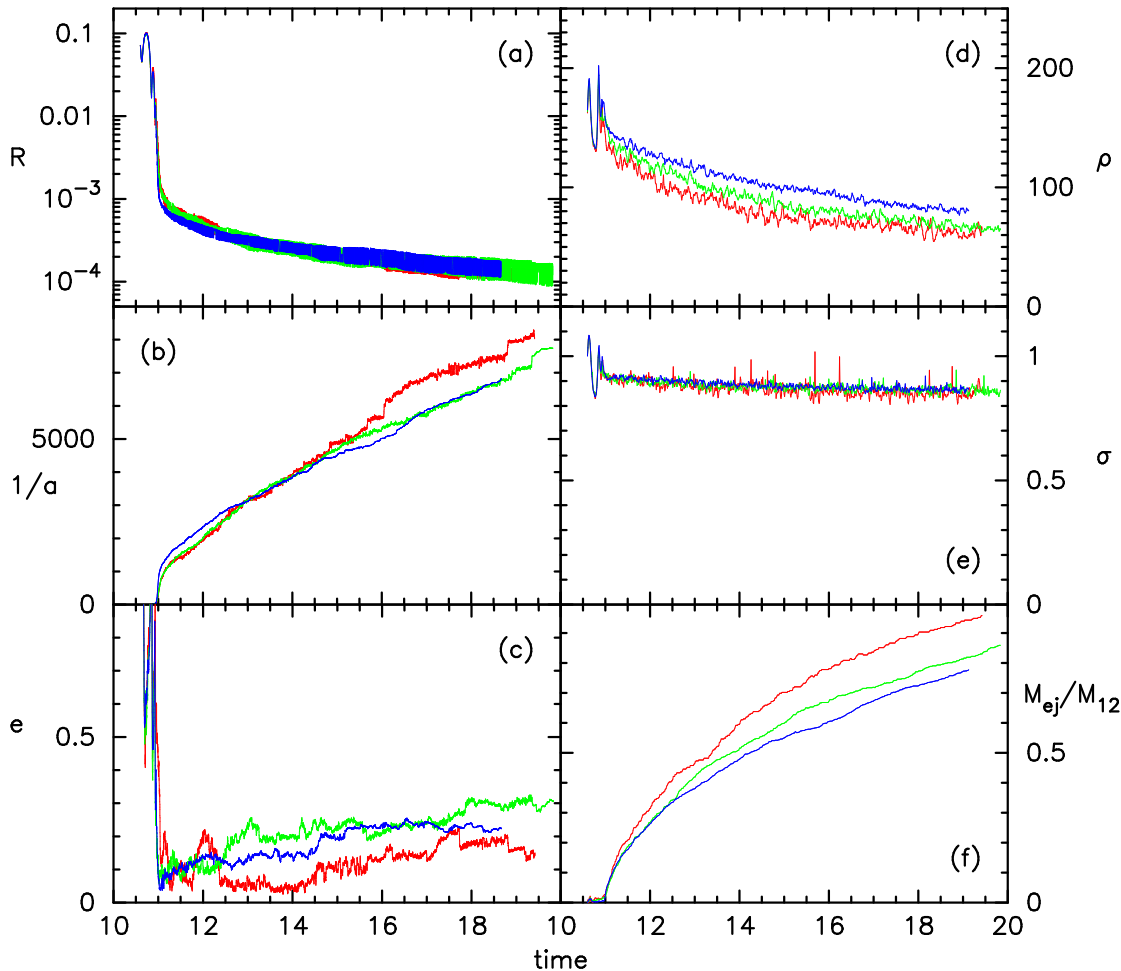


$N > 100K$ では粒子数によらない!?

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(といっても2003年の)計算

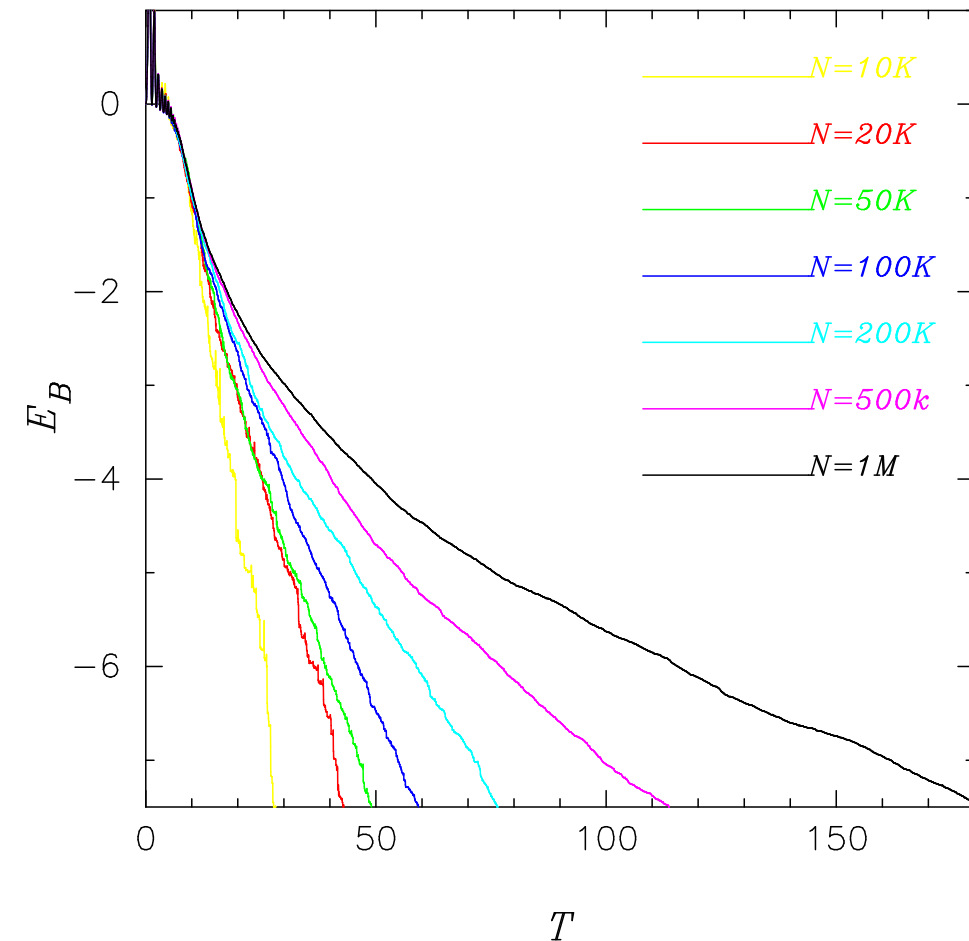
- なるべく単純な初期条件で
- なおかつできるだけ loss cone がしやすい条件で
- 信頼できる計算法で
- 大粒子、長時間計算をする

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 からの力のはホストで計算

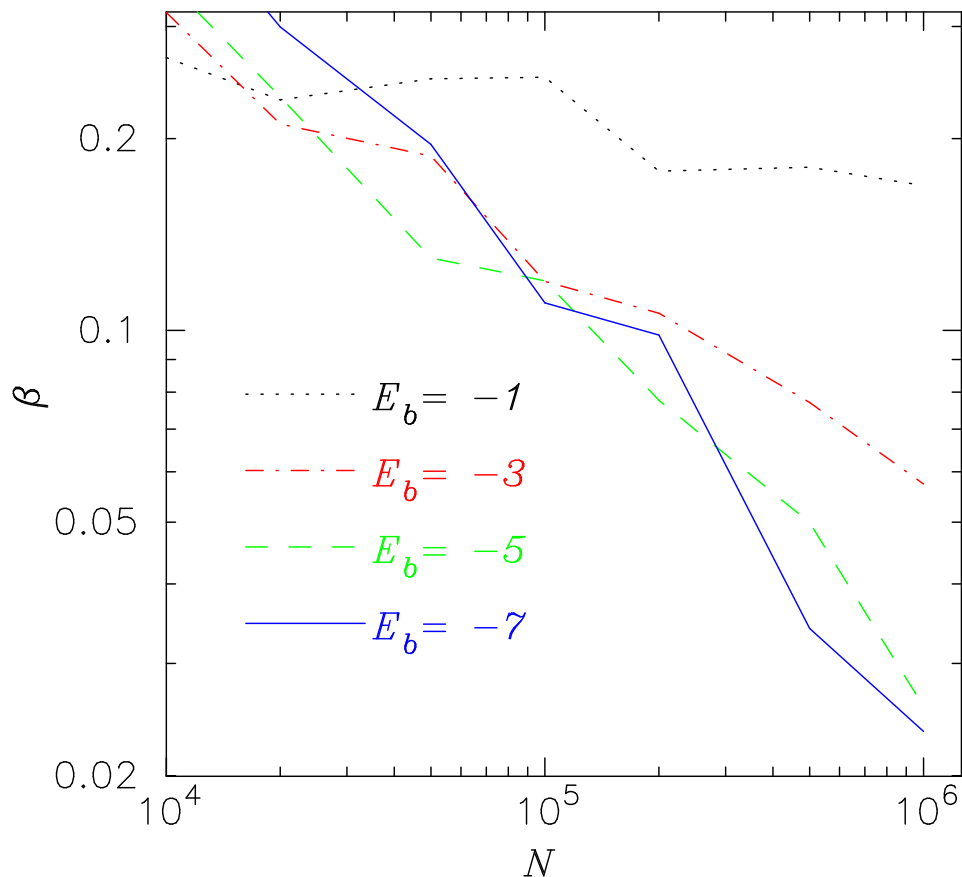
Binding energy



粒子数が多いほうが
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



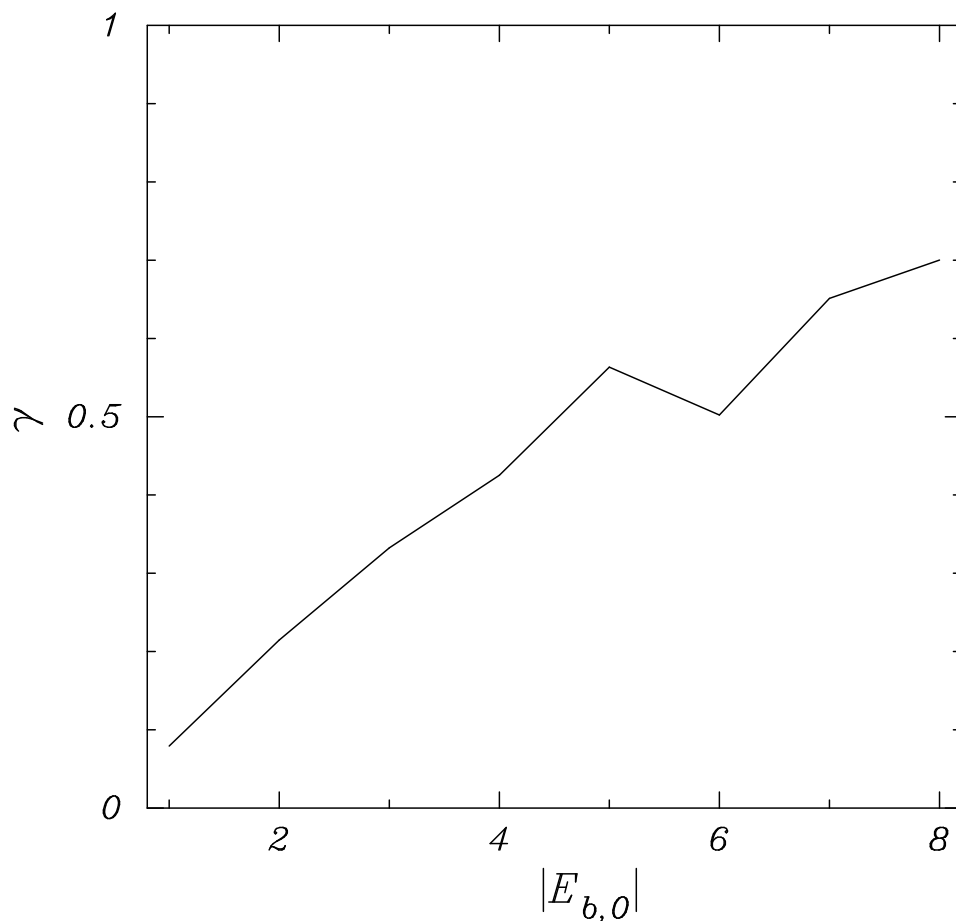
$$\beta = -\frac{dE_b}{dt}$$

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
のではないかな？

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「矛盾はしていない」

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、、、

2004年以降の進展

- Berczik, Merritt, and Spurzem 2005
 - 400K 粒子まで
 - N 依存性
 - $\sim N^{0.8}$ ($M_{bh} = 0.02$), $\sim N^{0.33??}$ ($M_{bh} = 0.005$)
 - 多分本当ではないと思う、、、
- Berczik, Merritt, Spurzem and Bischof 2006
 - 3軸不等だと stall しないという主張
 - 親銀河の密度プロファイル自体が違うので比較困難
- Iwasawa et al. 2006
 - 3体ならなんでも合体
 - 詳しくはポスターを

大質量ブラックホール連星のまとめ

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。

質量比の大きな連ブラックホール系の進化

問題意識

- 等質量のは合体しない
- 等質量は特殊ではないか？

実際の銀河の成長: minor merger のほうがもちろん多い
(1:10 とか)

IMBH がある?: 円盤銀河の中心とかで IMBH が SMBH
と合体? (1:1000 とか)

IMBH の軌道進化

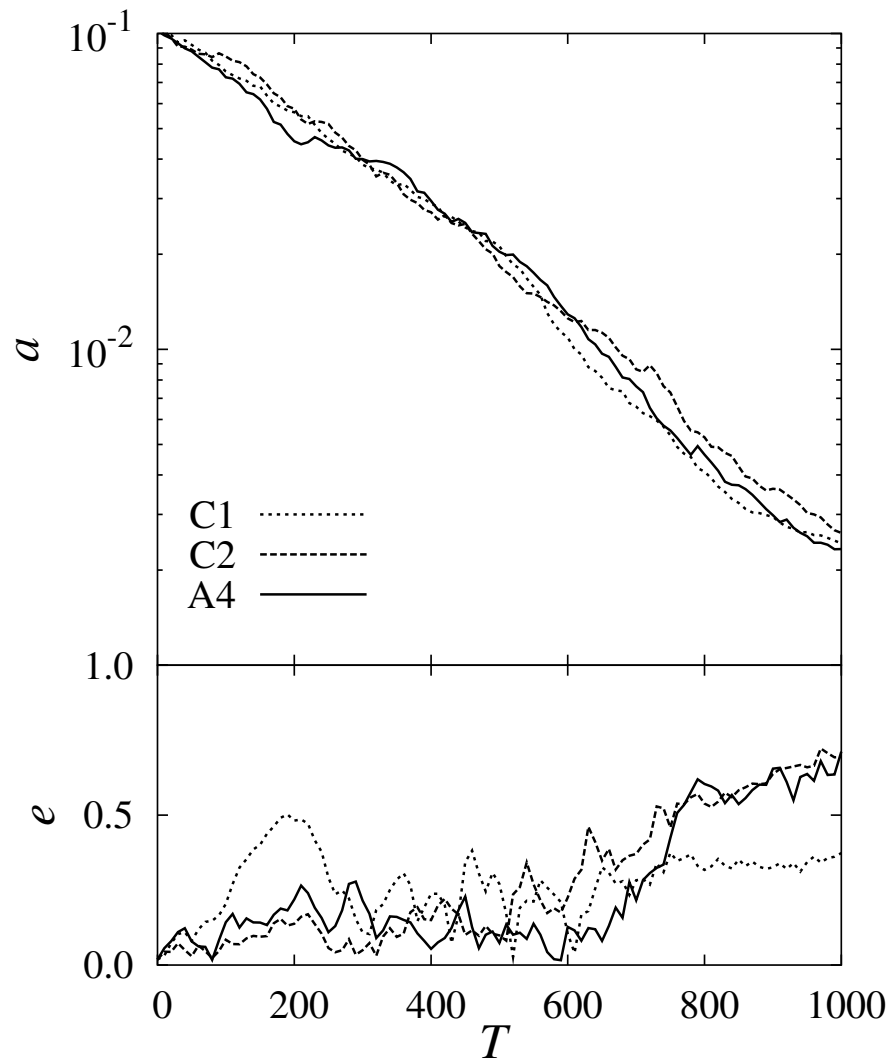
- IMBH は結構銀河中心近くでできる (かもしれない)
 - M82 X-1
 - IRS13E
 - NGC4472、、、球状星団の中？
- SMBH-SMBH と同じか違うか？

Matsubayashi et al 2007, ApJ, 656, 879 (Feb 20)

モデル計算

- ほぼ銀河中心みたいな Bahcall-Wolf カスプを作る
- SMBH $3 \times 10^6 M_{\odot}$
- IMBH $3 \times 10^3 M_{\odot}$
- 単位系: 長さ大体 1pc, 時間 4600 年
- 星の質量は最低なので $3M_{\odot}$

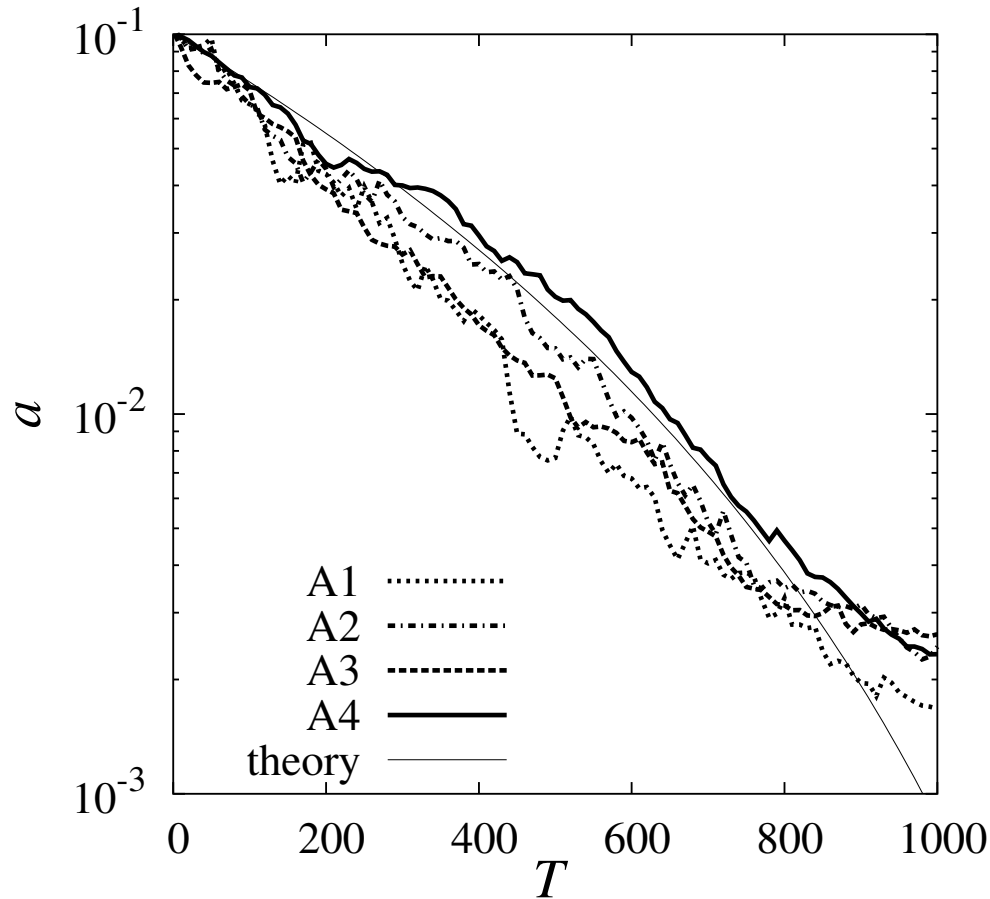
軌道進化



図は 4.6Myrs
最初 0.1pc くらいか
ら (IRS13E は
0.16pc)

落ちるけど遅くなる

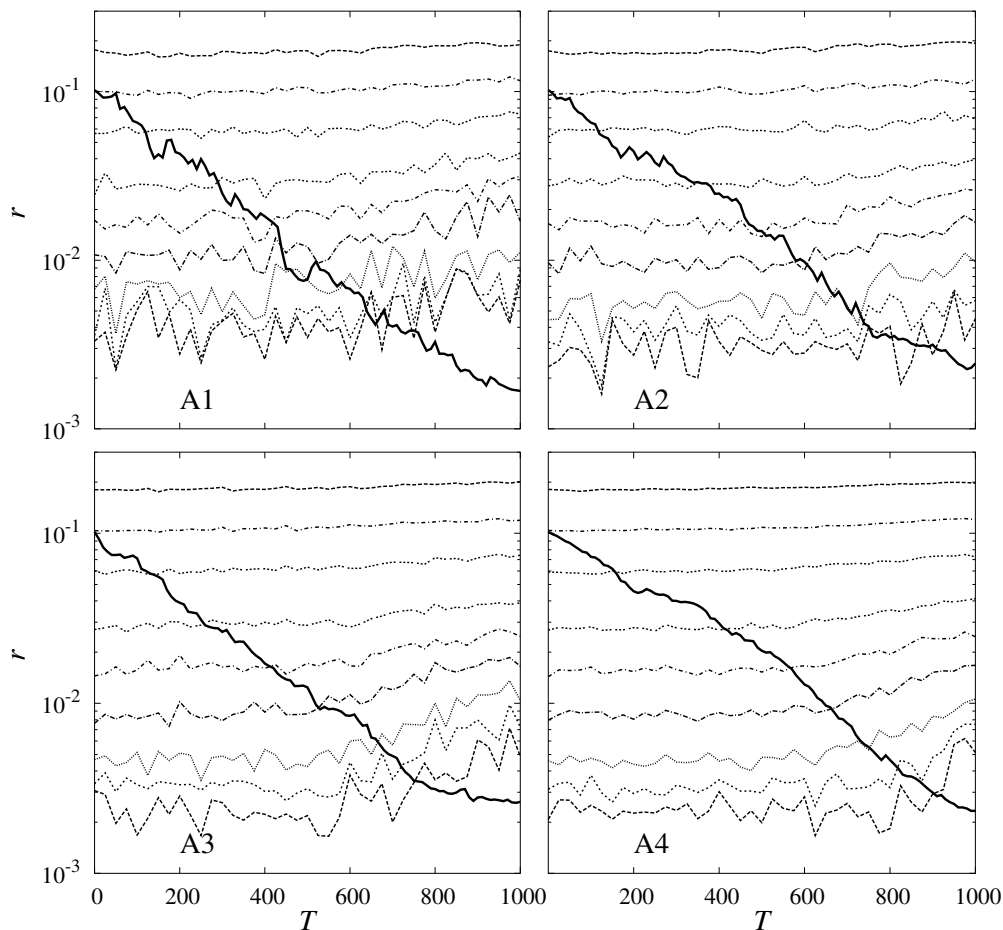
軌道進化。解析解との比較



A1-A4 は親銀河の
質量分解能の違い
あんまり質量分解能
に依存しないで

- 最初は解析解と一致
- 後のほうで遅くなる

軌道進化と質量分布の変化



沢山線があるのは
Mass shell の半径
IMBH が落ちてくると
内側のほうは広がる

周りに星が無くなる

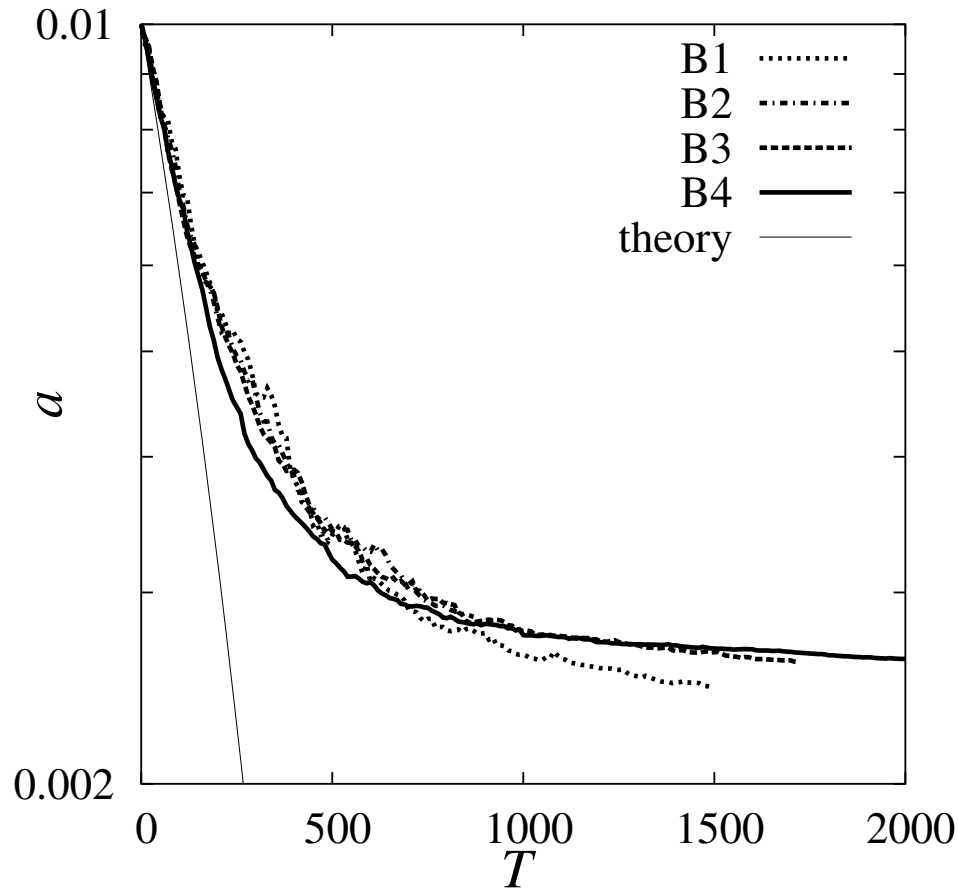


Loss-cone が空に



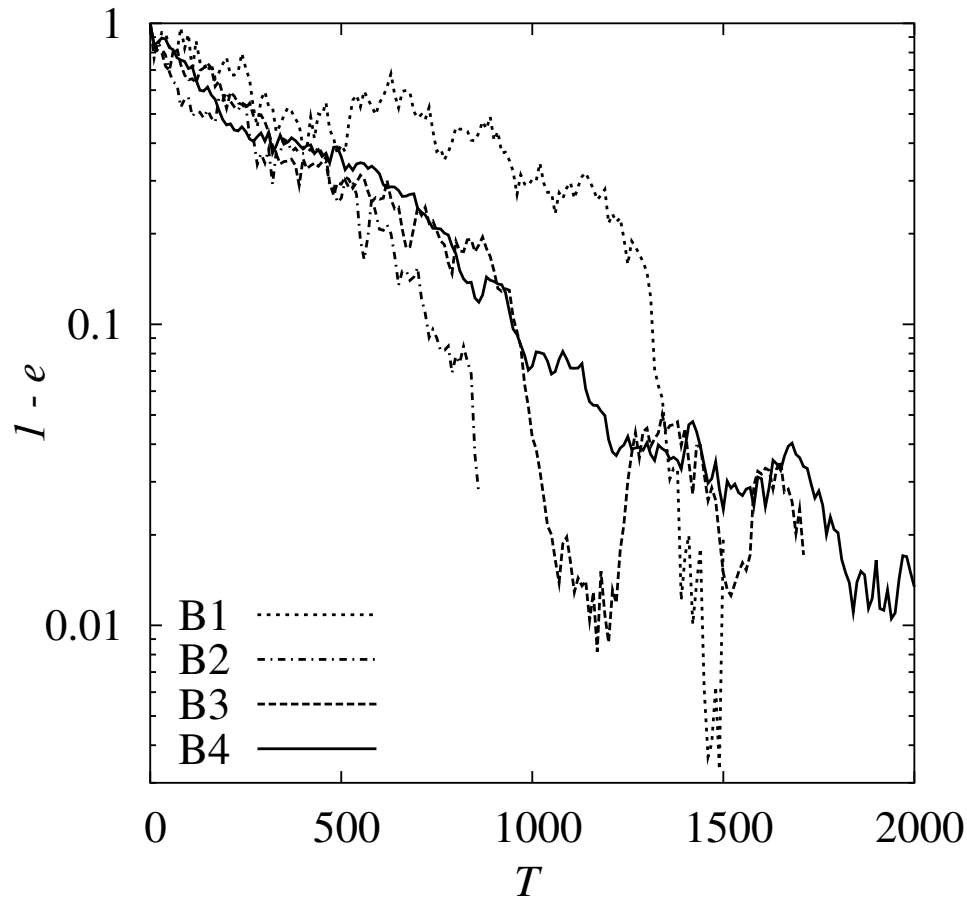
進化しなくなる

あとのほうだけ詳しく計算



始めから 0.01pc に
IMBH おく
field star の質量小
さくする
やっぱり、後のほうで
遅い

離心率

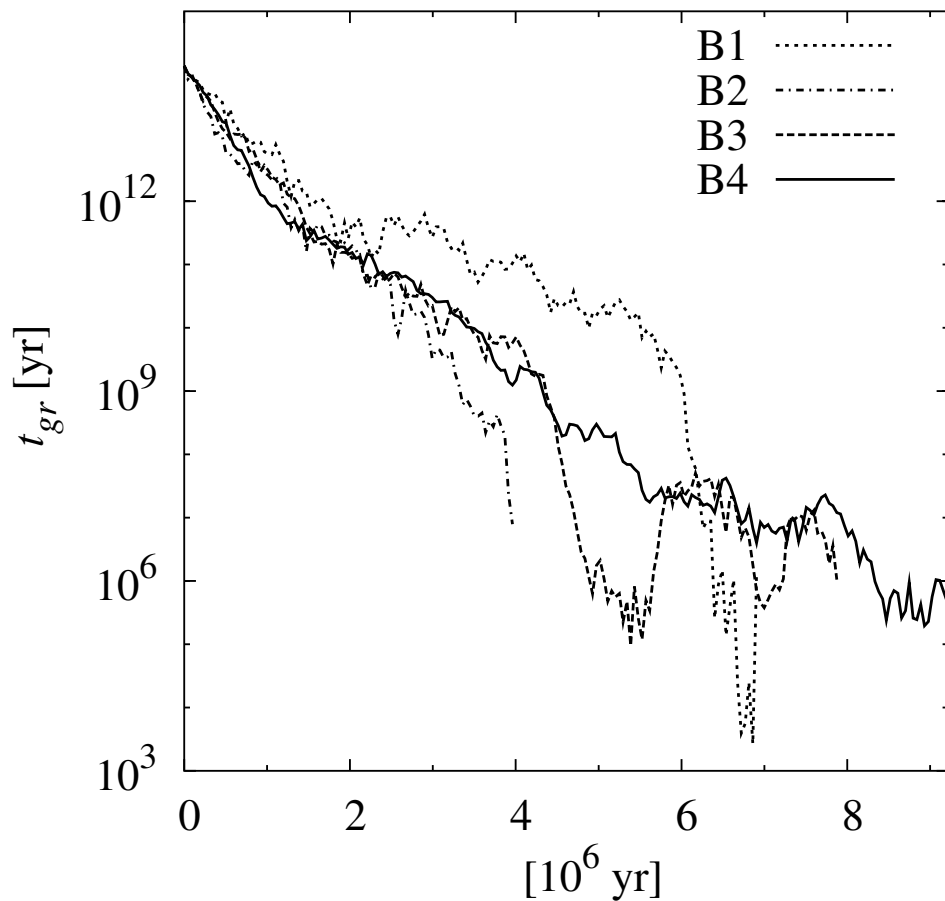


軌道半径が進化し
なくなると離心率
があがる

これはSMBH 連星
では起きなかった

昔 Fukushima et al
1992 が考えたこと？

重力波タイムスケール

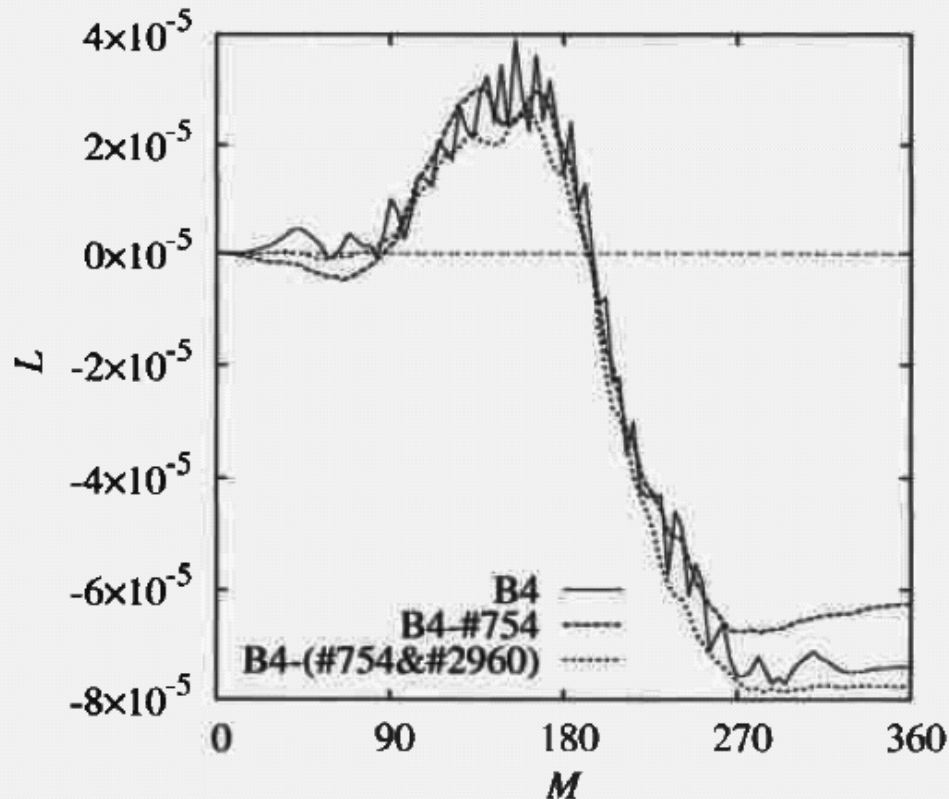


離心率があがるので
結構短くなる

合体するのは容易

何故離心率があがるのか？

IMBH の 1 周期での角運河量の変化 (多数軌道の平均)



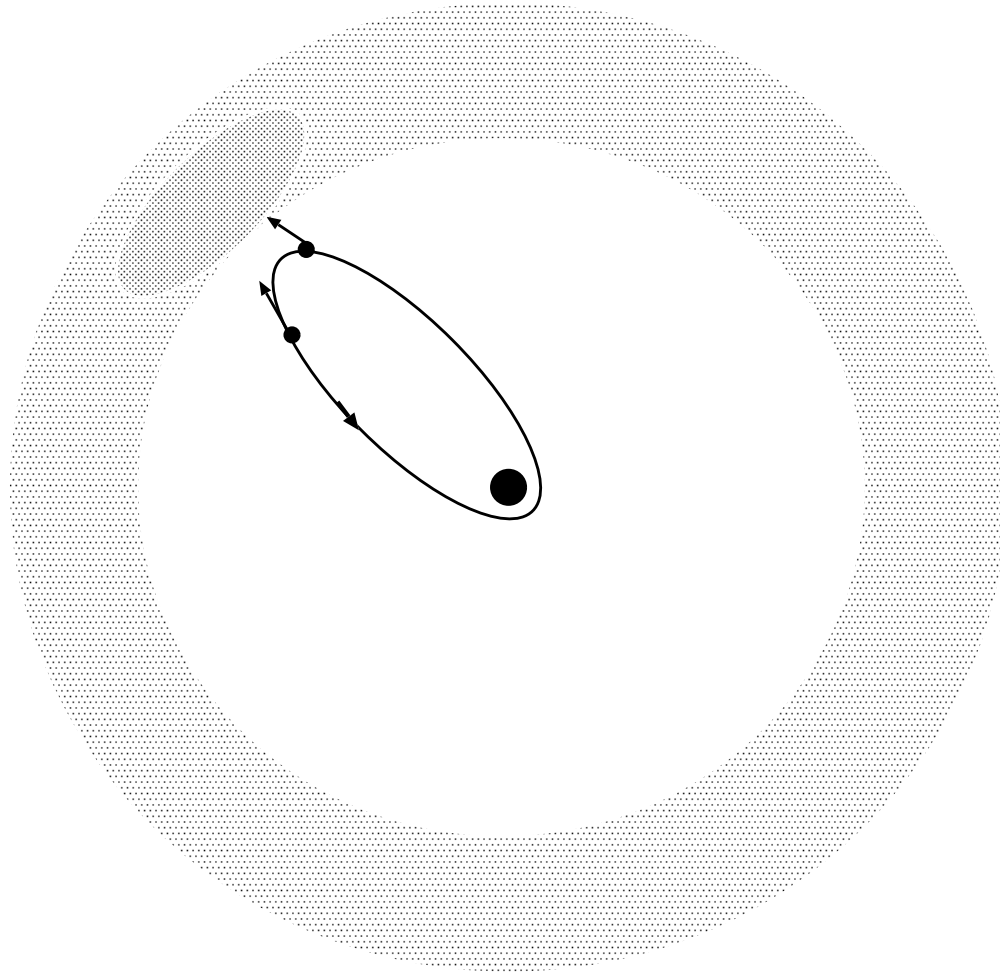
遠点に向かってちょっとあがる

遠点のちょっと手前から減り始める

そのまま近点に向かって減りつづける

遠点付近での力学的摩擦みたいなものが働いている

定性的な理解



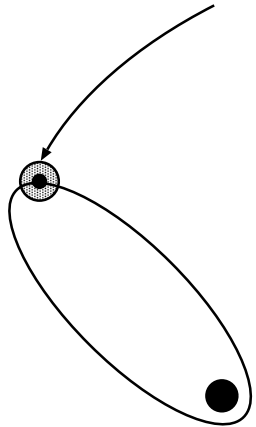
軌道の中には殆ど星
がない

遠点の外側には星が
分布

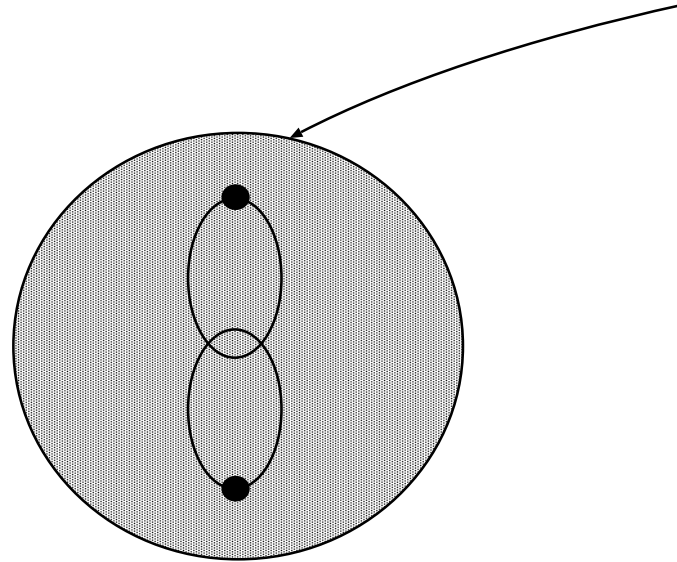
遠点に近付くとその
辺の星を引っ張る
遠点から戻る時には
星が近付いた分重力
強くなる

もうちょっとちゃんと
した定量的な検討が
必要

等質量の場合との違い



SMBH-IMBH



SMBH-SMBH

SMBH-SMBH の時: 軌道半径くらいまで近付いた星は相互作用

SMBH-IMBH: IMBH に近付いたものだけが相互作用

質量比がある連ブラックホールのまとめ

- SMBH-IMBH のような極端に質量比が大きい場合には、連ブラックホール系は周りの星をはじきとばした後に離心率が大きくなる
- これは、遠点でだけ相互作用する、ということによっているらしい

球状星団に IMBH はある？

教科書的回答： ないはず

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(PCC クラスタ) はないと思っていい。

球状星団に IMBH はある？(続き)

探していた場所は間違っていないか？

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:

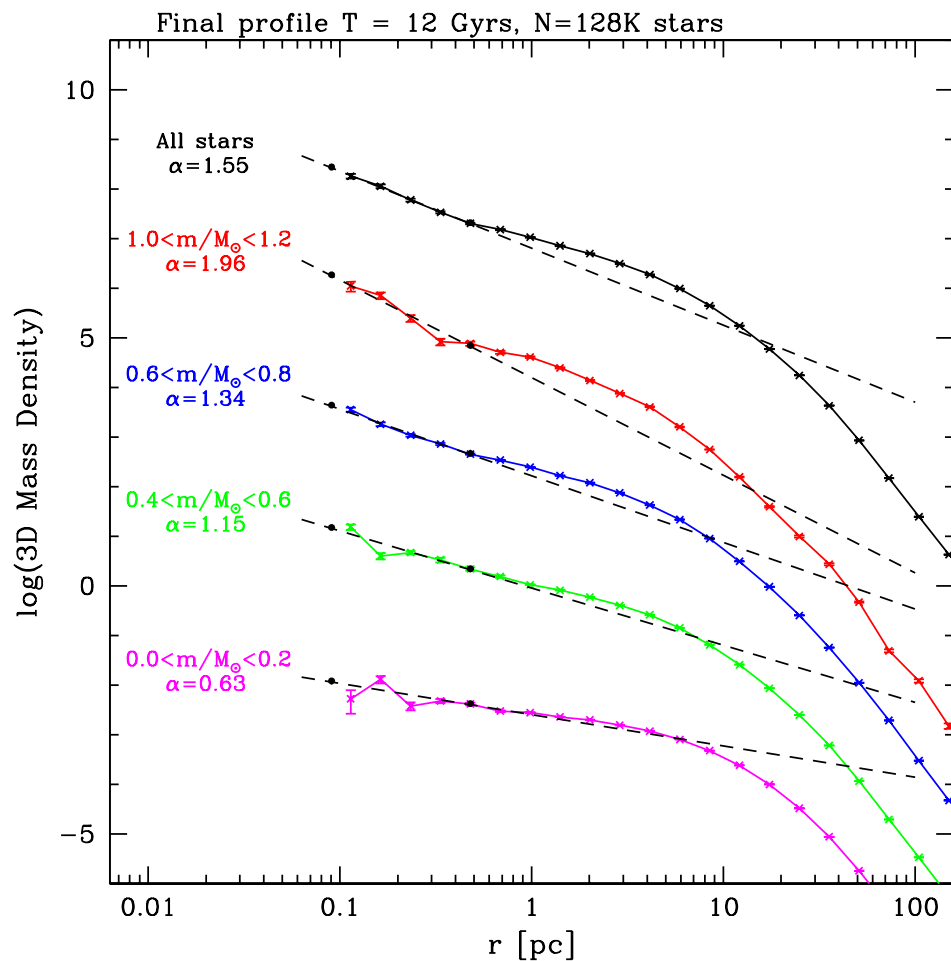
- -0.75 はあくまでも漸近的な傾き
- 全ての星が同じ質量と仮定

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)

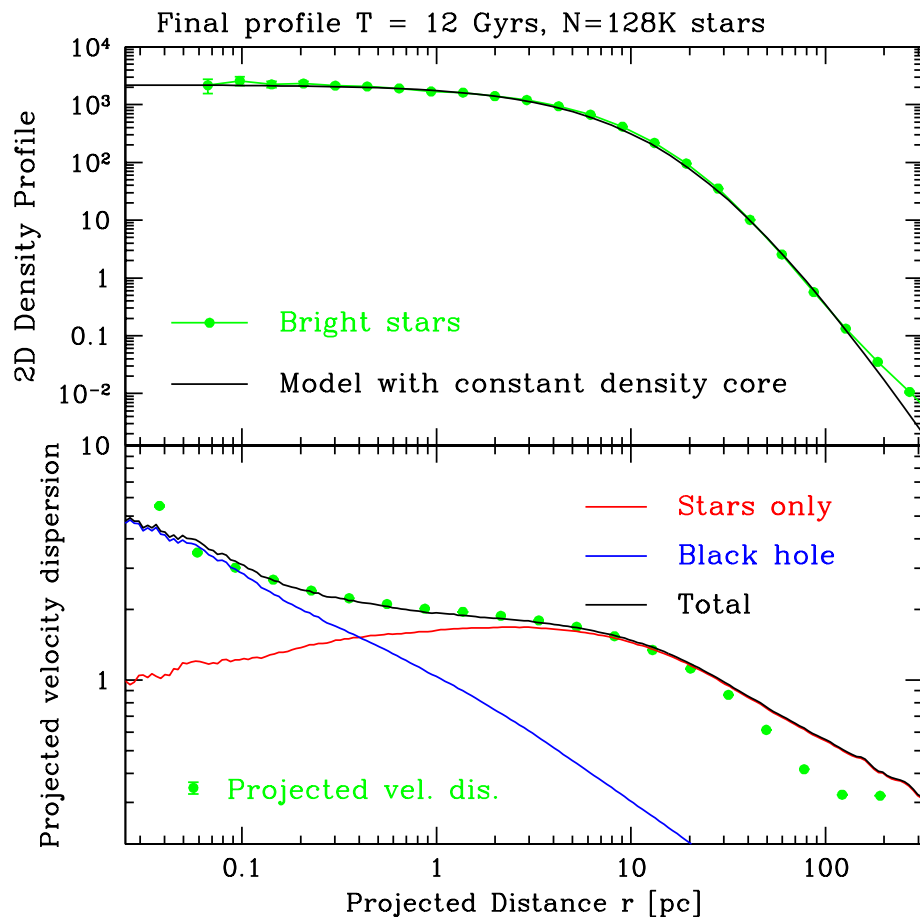
Baumgardt et al 2004 a, b, ApJ

3D 密度分布



- 軽い星はスロープ
浅い
- 最も重い星:
 ~ -2

投影

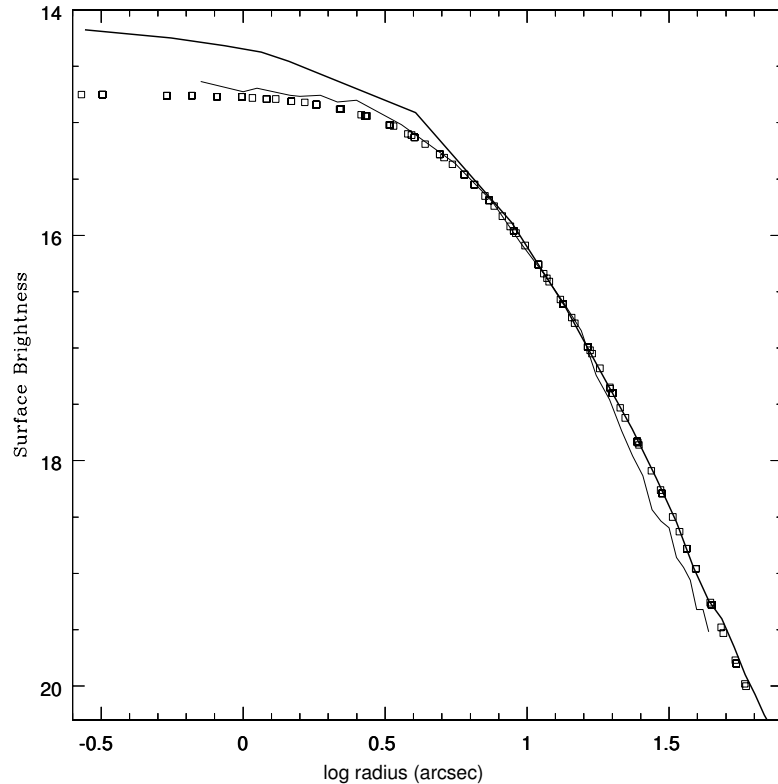


- どう見てもフラットなコアがある
- 速度分散は「コア」の中心近くで微妙に増加

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？

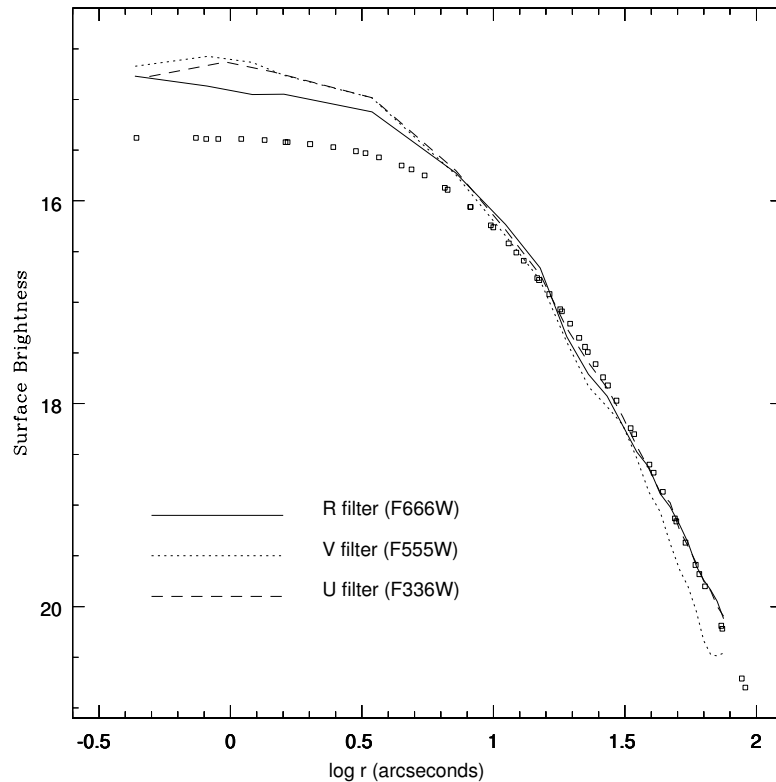
Noyola and Gebhardt (AJ, 2006)



HST WFPC2 での integrated light で書いた表面輝度分布

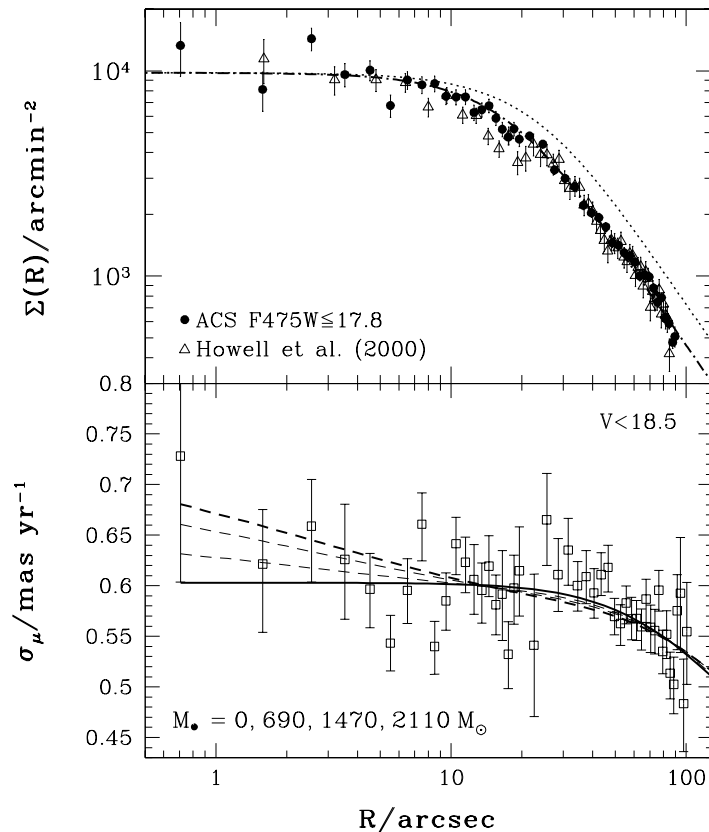
まだ controversial な結果
(主な理由: M15 のブラックホール
の発見をやった人である)

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

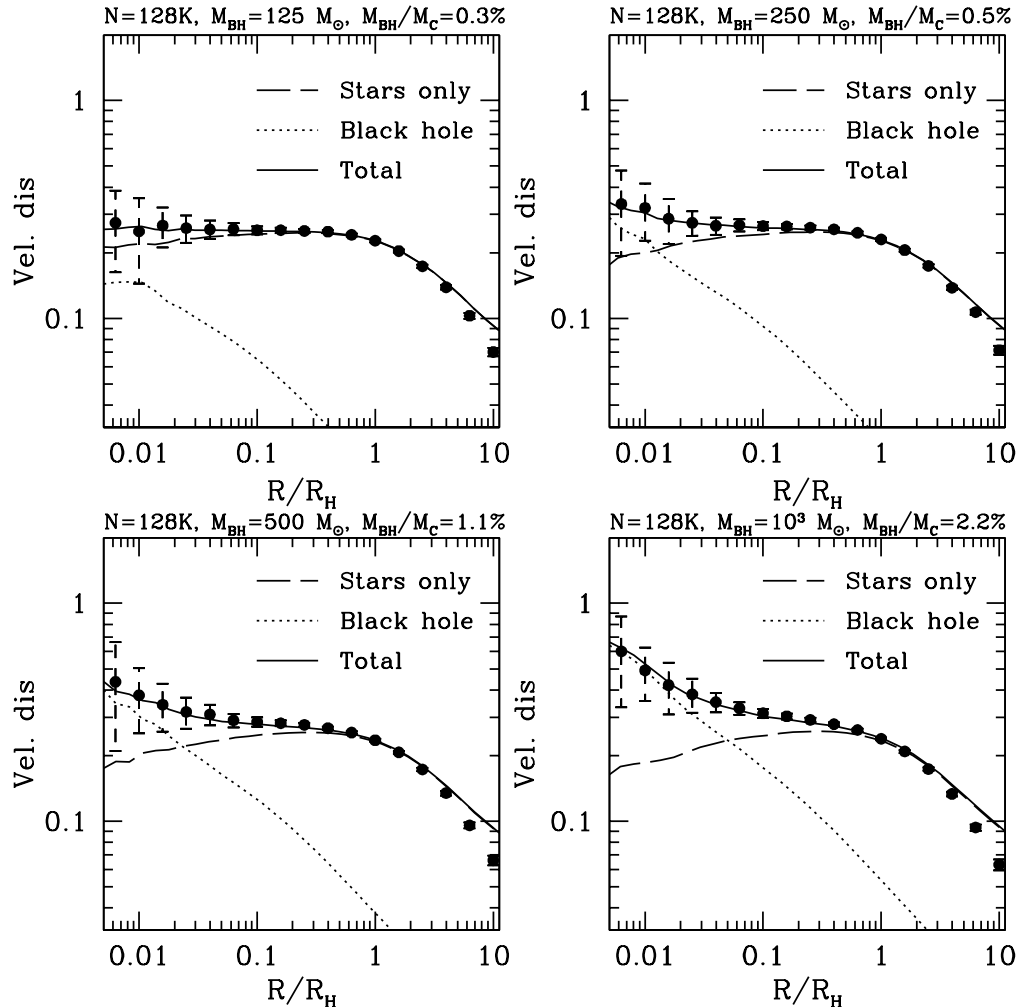
表面輝度

- 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

- 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あるかもしれない
- 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 1km/s くらい変わるはずなので、時間おけば判定できる

全体のまとめ

- 等質量の巨大質量ブラックホール連星は恒星系との相互作用だけでは合体しない
- 質量比が非常に大きい時には恒星系との相互作用だけで合体できる
- 中間質量ブラックホールはその辺の球状星団の中にあるかも
 - これは、個々の星の速度の変化から見つけれられるはず

おしまい