

連星ブラックホールの進化 — 恒星系として

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



Center for Computational Astrophysics

概要

1. 楕円銀河の「合体説」とブラックホール連星
2. 大質量ブラックホール連星の進化
3. まとめ

楕円銀河の「合体説」

- (大きな) 楕円銀河は、円盤銀河同士の合体、あるいは小さな楕円銀河同士の合体でできた、というもの。
- 例えば Toomre and Toomre (1972)
- いわゆる「Monolithic collapse model」と対立
- 歴史的背景
 - ビッグバンは確立
 - CDM が主流になる前。初期ゆらぎについては諸説あったころ

合体説への反論（いまだある？）

- 星の年齢が若い？
- Downsizing ？ 大きいのは昔にできている？

とかいうのの他に

- 合体ではできない構造である

という議論。

楕円銀河の構造

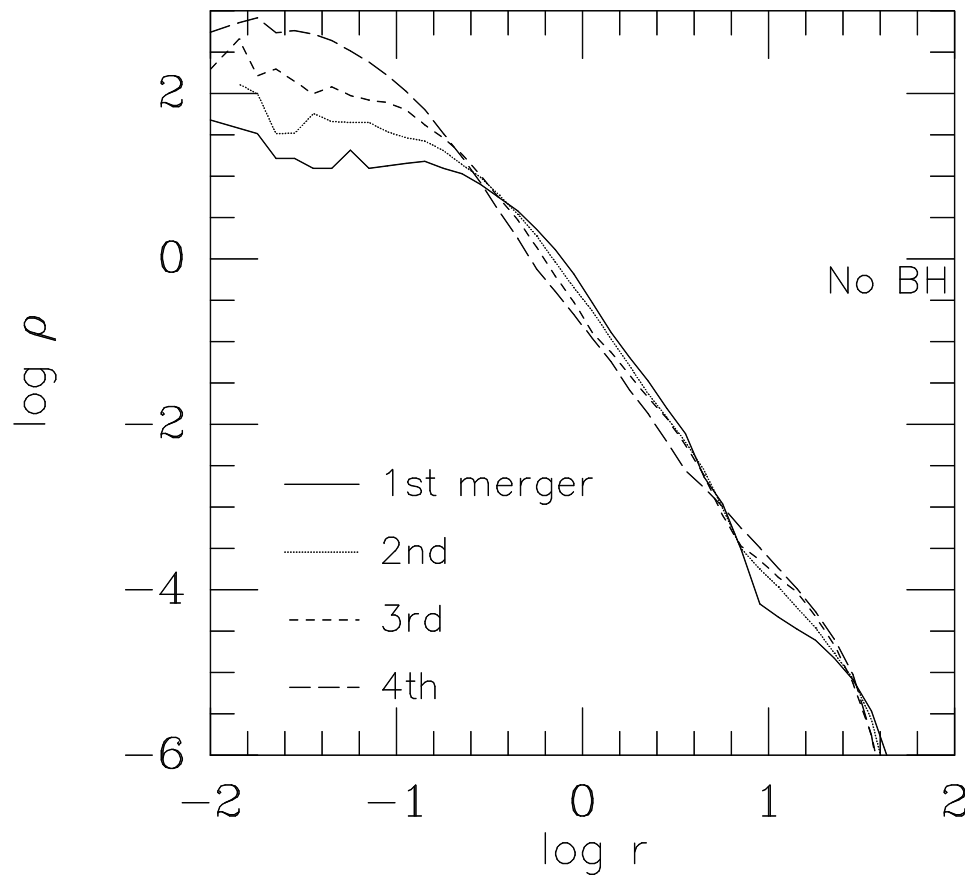
1970-80年代の理解

- 楕円銀河は密度一様なコアをもつ
- コアの大きさは有効半径にほぼ比例

この理解は HST での観測によって全く変わるが、それについてはちょっと後で。

シミュレーションの例

(これは Makino and Ebisuzaki 1996 から)



同じ銀河同士を合体させる。
合体させたものをまた合体させる。
半径は大体2倍になるので、それを同じになるようにスケールして図にする。

スケールすると、コア半径が大体毎回半分
つまり、実サイズではコア半径は一定

全然観測的な構造とあわない

当時の雰囲気

(80年代後半になっても、、、)

Merger とか口にすると怖いおじさんにいじめられる。

我々がこの話に出したきっかけ

- 1990 ころ
- GRAPE-1 ができた。
- 計算精度ないけどなんかできないか？
- 銀河合体の計算 (White 1978 くらいしかなかった) を大粒子数でやり直してみよう
- やって見たら、、、やはりコア半径は相対的に小さくなる。駄目じゃん。

ブラックホール連星

「中心ブラックホールでコアを大きくできないか」と戎崎さんが言い出した。

当時の状況では結構非常識なアイデア

- ブラックホールは重力源: コアどころかカスプを作るのでは？
- ブラックホール周りの恒星系の理論モデルはカスプ作るものしかなかった
 - 断熱成長: -1.5
 - 2体緩和 $-7/4$

「連星」の役割

我々(というか戎崎さん)の頭にあった「連星」のイメージ

- 球状星団の中心での連星: エネルギー源となってコアを膨張させる
- コアサイズはエネルギー投入の大きさ (粒子数が小さいと大きい) で決まる

巨大ブラックホールがあると、楕円銀河は実は非常に粒子数の小さい球状星団みたいになってコアが大きいのでは？

都合の良いところ

- 合体で銀河とブラックホールが同時に成長する
 - コア半径:有効半径の比が一定
 - BH 質量:銀河質量の比も一定

都合の良いところ

- 合体で銀河とブラックホールが同時に成長する
 - コア半径:有効半径の比が一定
 - BH 質量:銀河質量の比も一定

ブラックホールと銀河の共進化

都合の良いところ

- 合体で銀河とブラックホールが同時に成長する
 - コア半径:有効半径の比が一定
 - BH 質量:銀河質量の比も一定

ブラックホールと銀河の共進化

(なんて言葉はなかったけど)

都合の悪いところ

というか、明らかに別のメカニズムなところ:

- 円盤銀河の中心ブラックホール

- スロープが -2 的なカスプが中心近くまで
- まあ、ブラックホール以外の質量がブラックホールとコンパラなところの質量分布は本当は全然わかってない。BH 質量が小さいから見えないだけかも。

- QSO, AGN 活動自体

- ガスが落ちてブラックホールが成長しつつあるのは間違いない

巨大ブラックホール成長の全体像

- 円盤銀河

- なんか知らないけどガスが落ちるとかで成長するんでは？
- AGN とかあるし。AGN の後は S0 銀河にかわって
るかも？

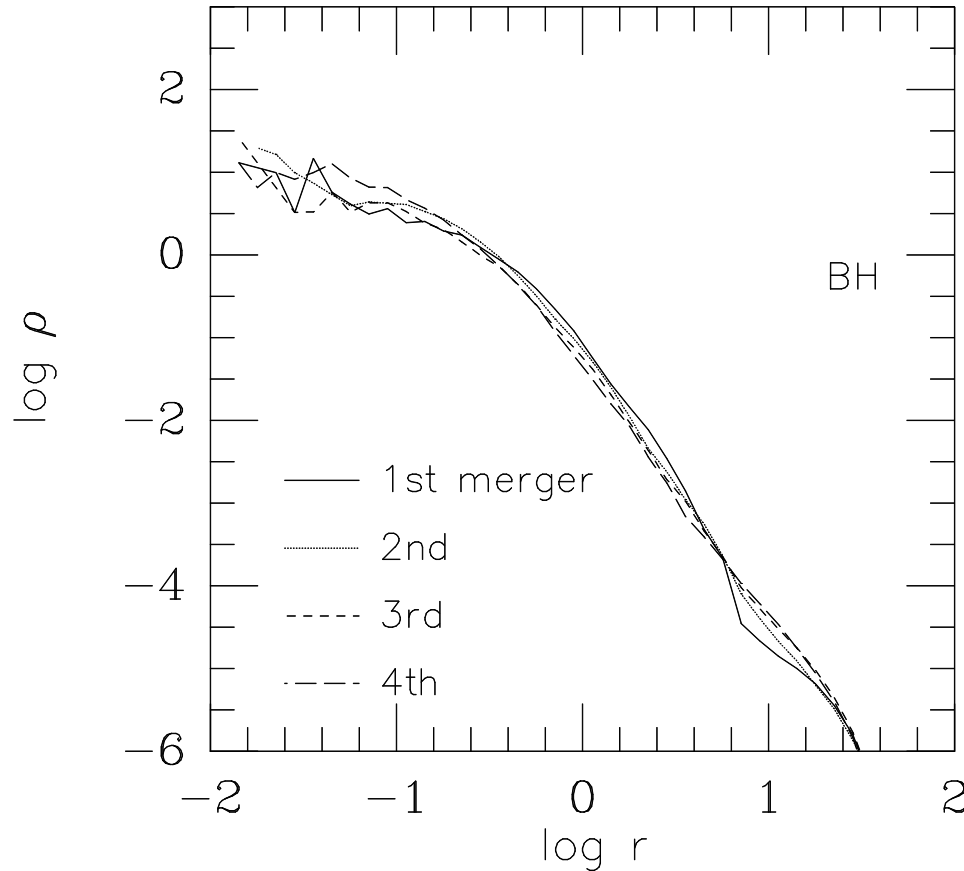
- 楕円銀河

- 銀河が合体するとブラックホールも合体

ということで、シミュレーションもしてみた (Ebisuzaki, Makino and Okumura 1991)

シミュレーションの例

(これは Makino and Ebisuzaki 1996 から)



ブラックホールいれて、同じ銀河同士を合体させる。
合体させたものをまた合体させる。
半径は大体2倍になるので、それを同じになるようにスケールして図にする。

スケールしたコア半径が一定
実サイズではコア半径は有効半径に比例
大変具合がよろしい。

「コア」は本当にコアか、という話

HST による Virgo Cluster の楕円銀河等の観測 (Gebhardt, K., et al., 1996, AJ, 112, 105, Faber, S. M., et al., 1997, AJ, 114, 1771) から、中心「カusp」のスロープと、回転速度と速度分散の比をプロット。

明るい楕円銀河はスロープが -1 よりも浅く、回転が小さい

暗い楕円銀河がスロープが -2 近くであり回転が卓越している

浅いカスプの分布関数

(Nakano and Makino 1999)

ブラックホールが銀河中心で成長したのではなく、合体で外から落ちてくるとか、連星になって周りの星をはじきとばす



星のエネルギー分布に下限ができる



エネルギーに対応するケプラー半径の内側では、密度分布が
 $\rho \sim r^{-0.5}$ になる

Binney & Tremaine (2nd ed) で引用されてたような気が。

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म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

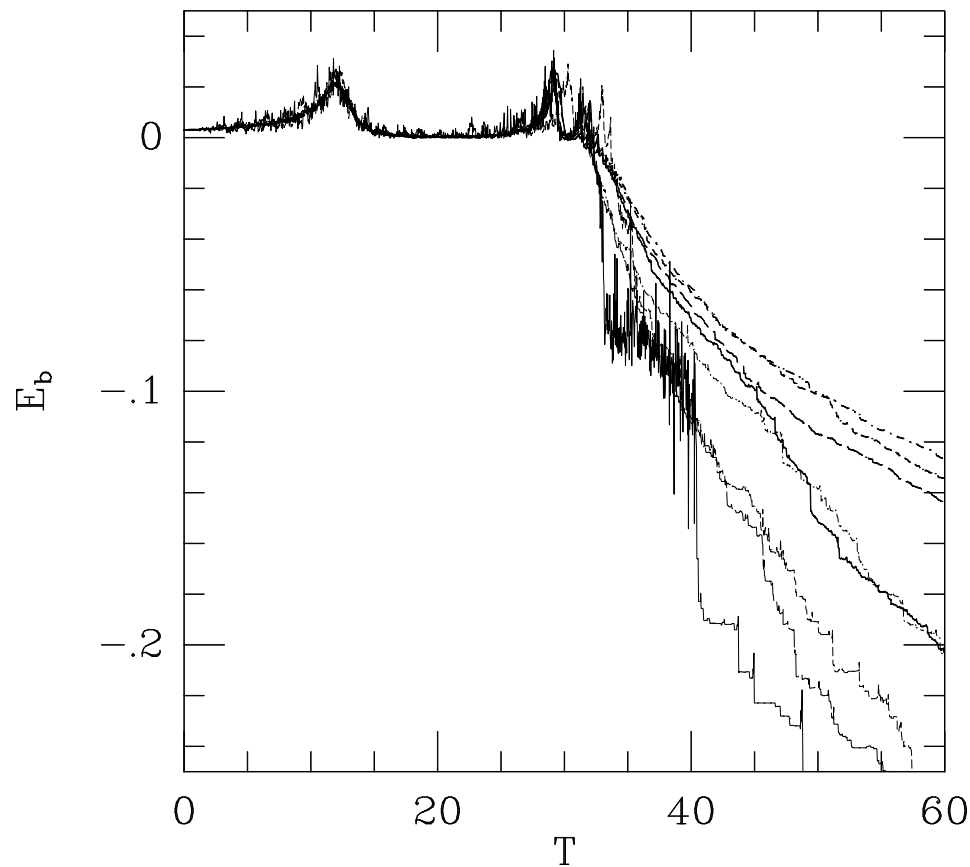
- Makino 1997
- Quinlan 1997
- Milosavljević & Merritt 2001
- Chatterjee, Hernquist & Loeb 2003

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

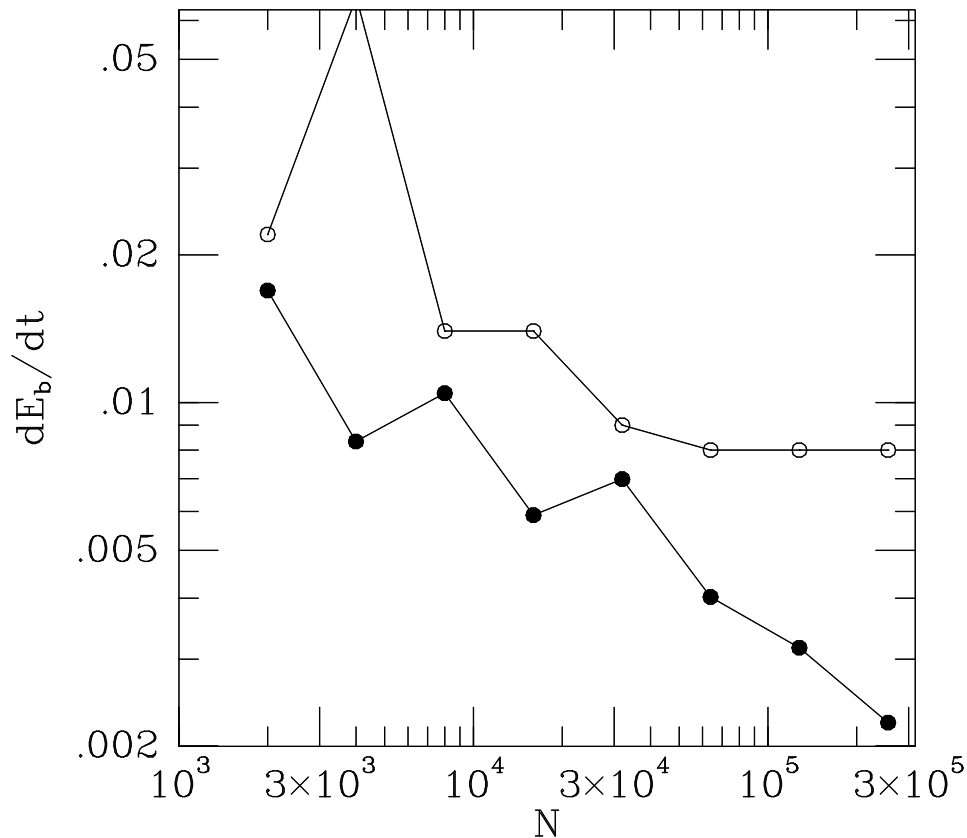
Binding energy



**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



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

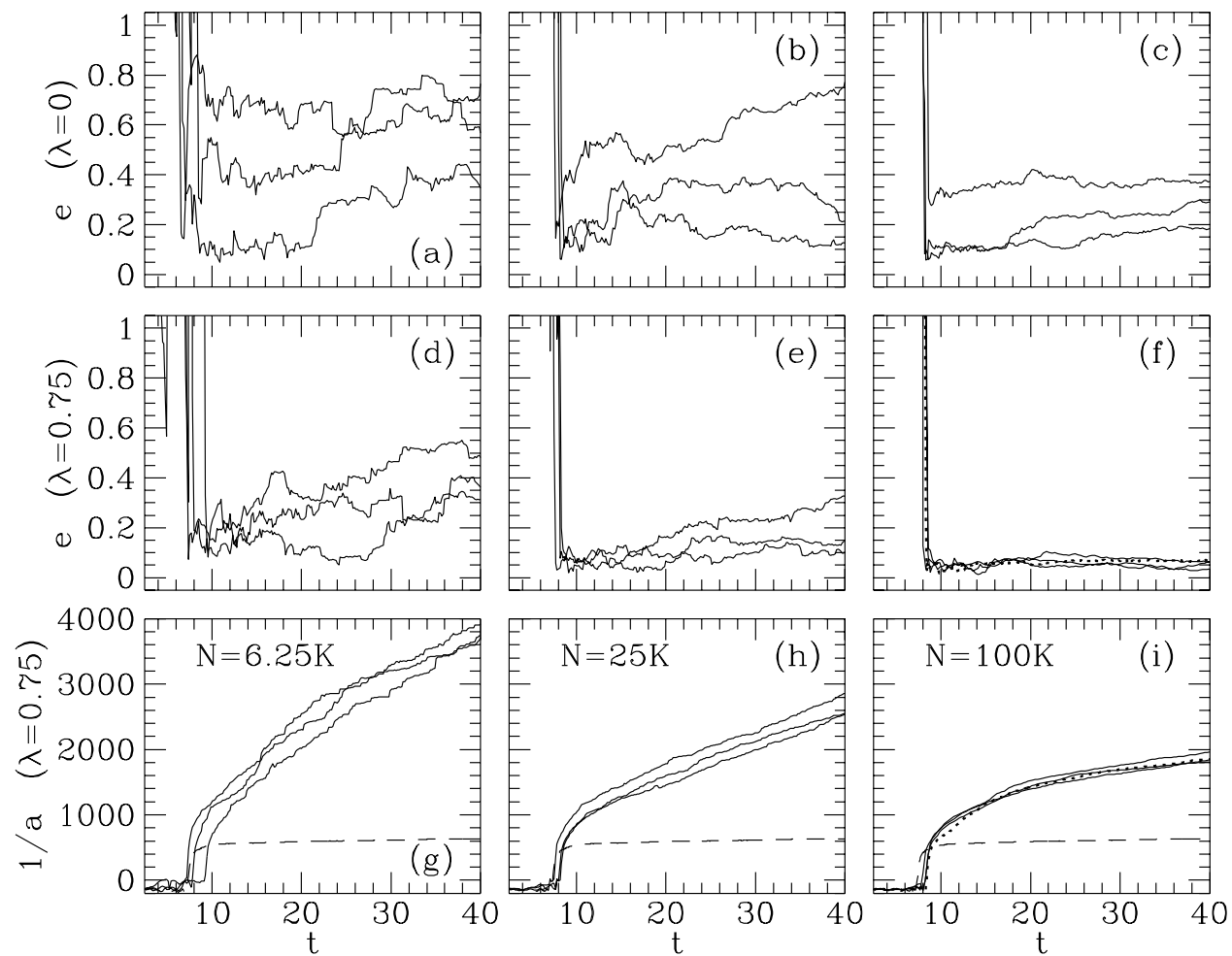
後になるとよる。傾き:
 $N^{-1/3}$ くらい

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

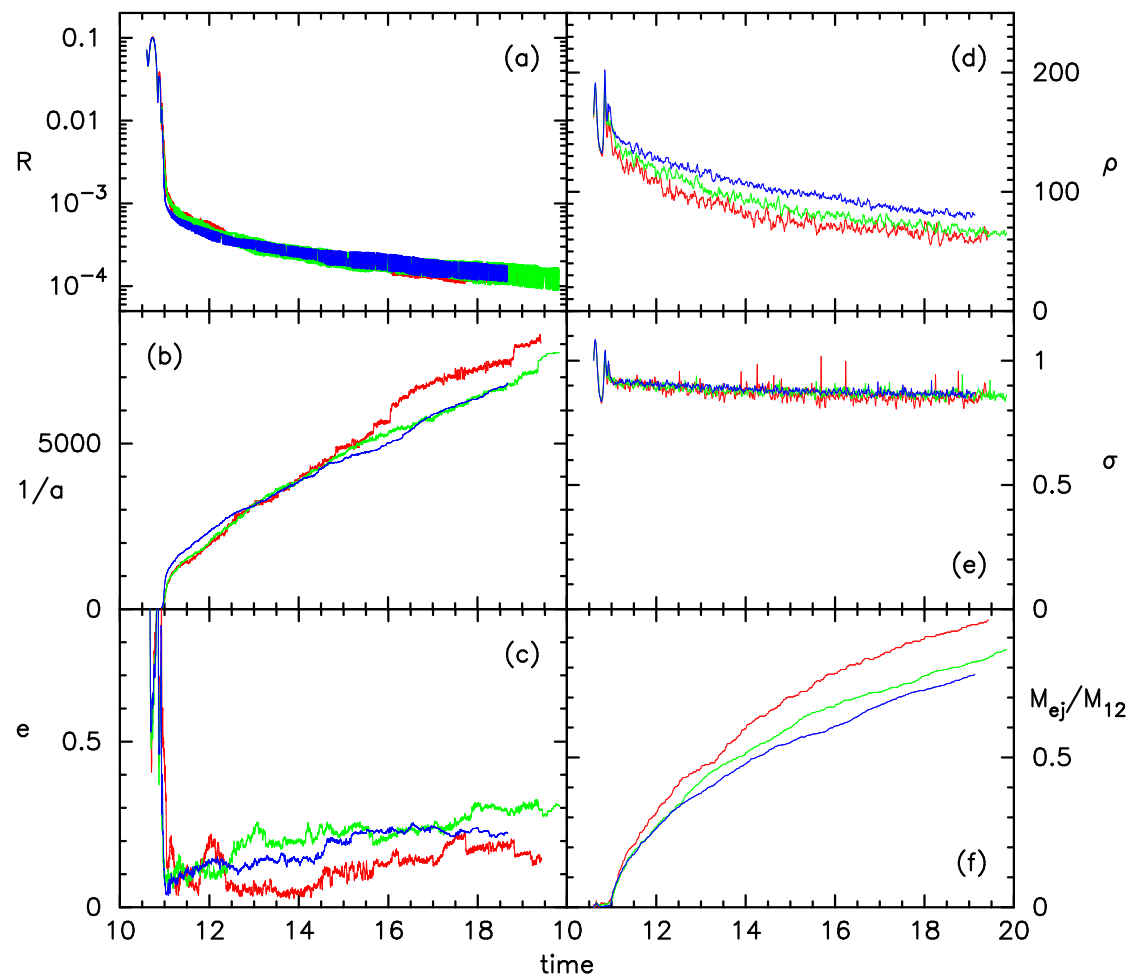


$N > 100K$ では粒子数によらない!?

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

2003年以前の結果のまとめ

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

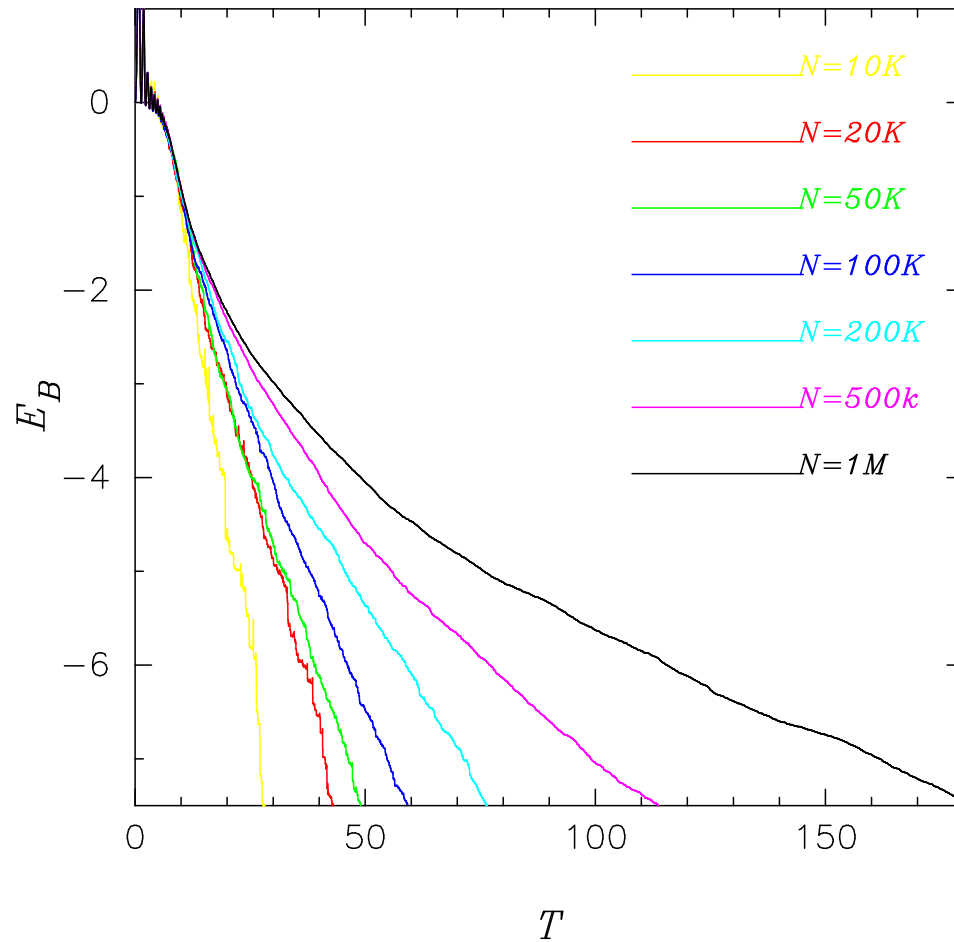
- なるべく単純な初期条件で
- なおかつできるだけ loss cone ができやすい条件で
- 信頼できる計算法で
- 大粒子、長時間計算をする

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

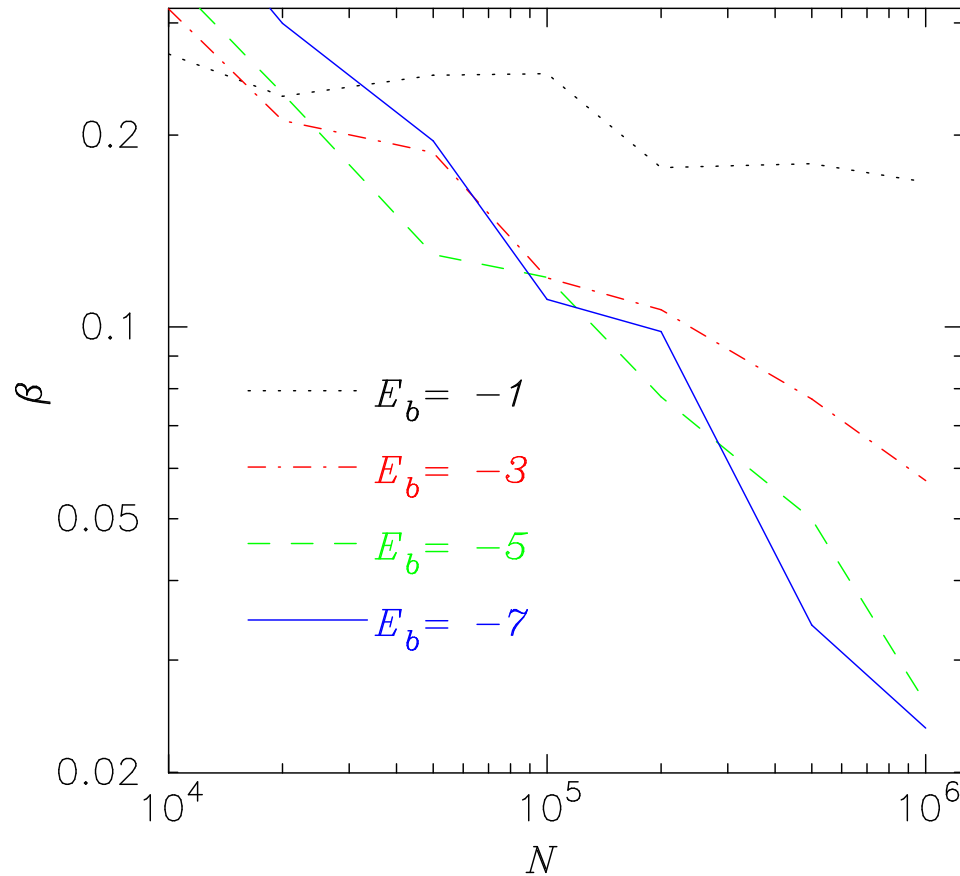
Binding energy



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



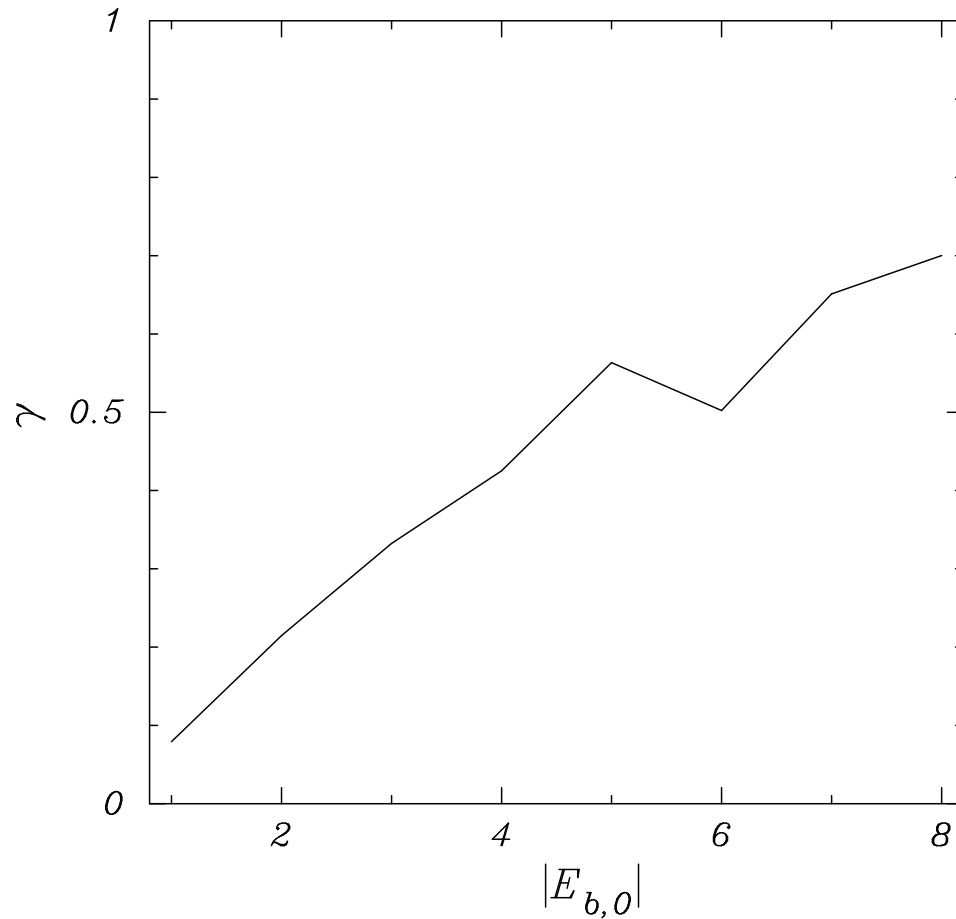
$$\beta = -\frac{dE_b}{dt}$$

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. 2007
 - 3体ならなんでも合体
- Matsubayashi et al. 2007, 安 (2008, 修士論文)、岩澤 (2009, 博士論文)
 - 質量比がある程度あれば合体

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

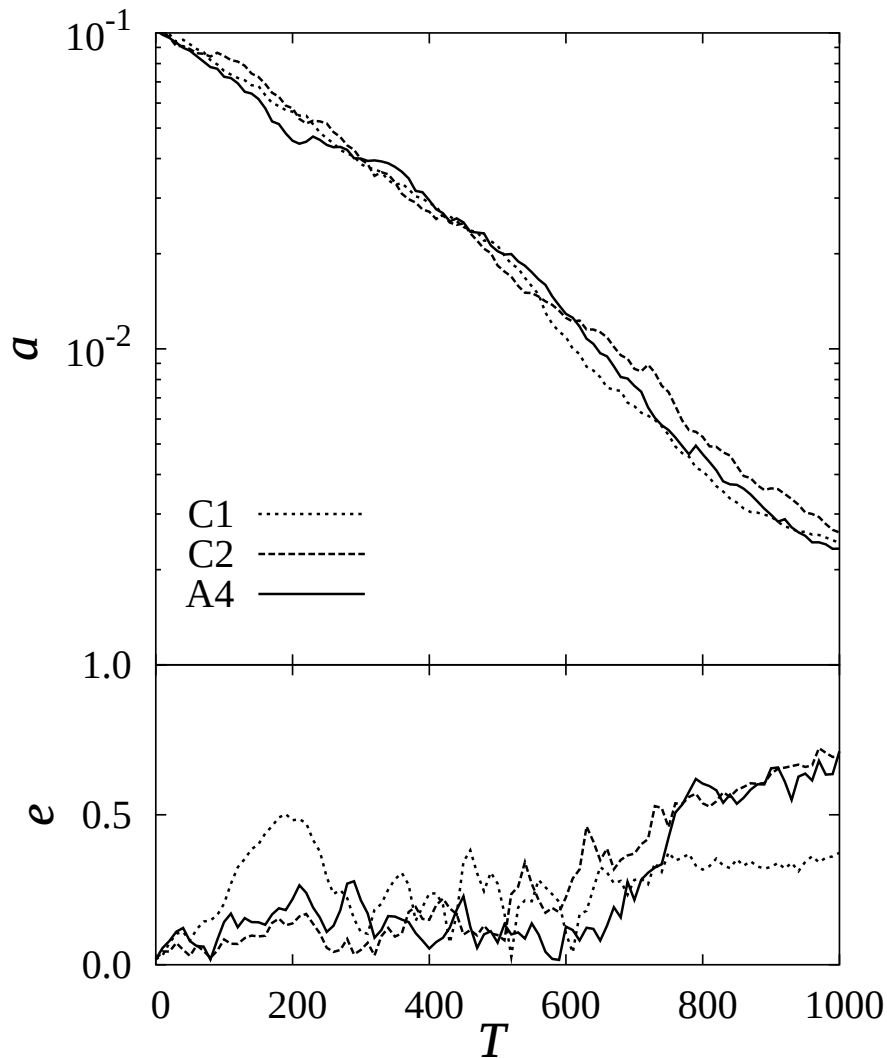
- IMBH は結構銀河中心近くでできる (かもしれない)
 - M82 X-1
 - IRS13E
 - NGC4472、、、球状星団の中？
- SMBH-SMBH と同じか違うか？

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 $3M_{\odot}$

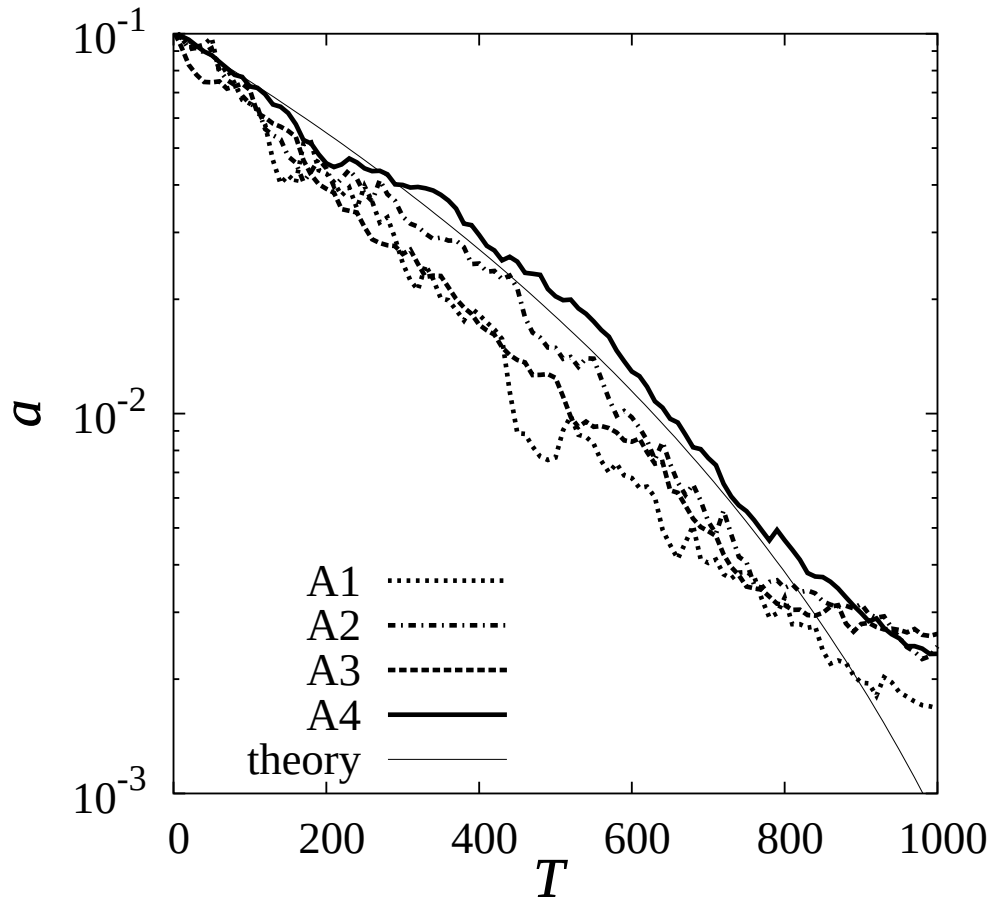
軌道進化



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

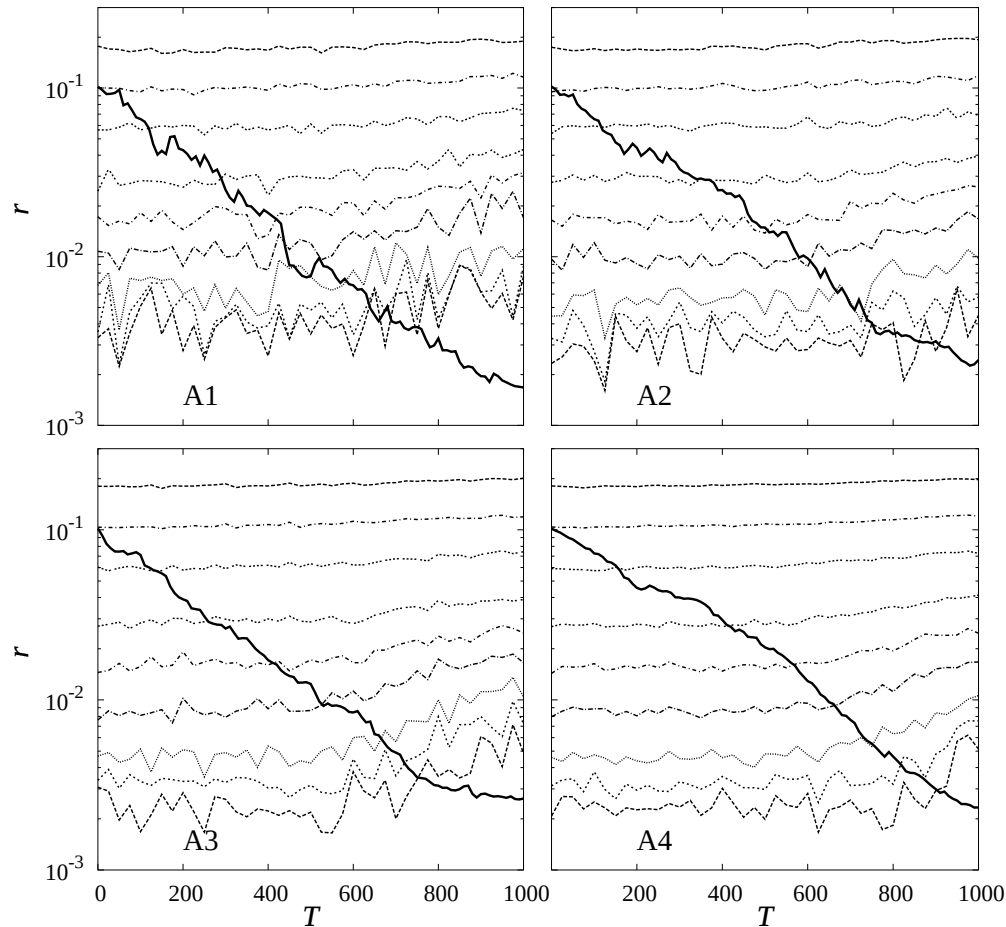
軌道進化。解析解との比較



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

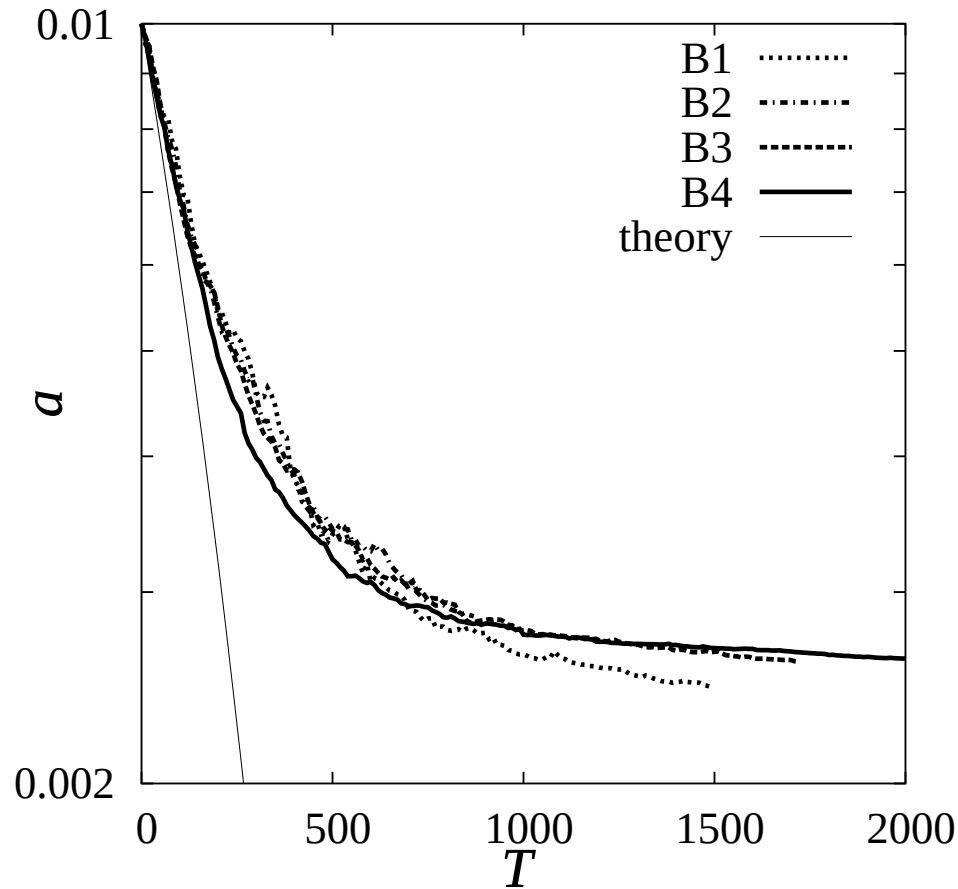


Loss-cone が空に



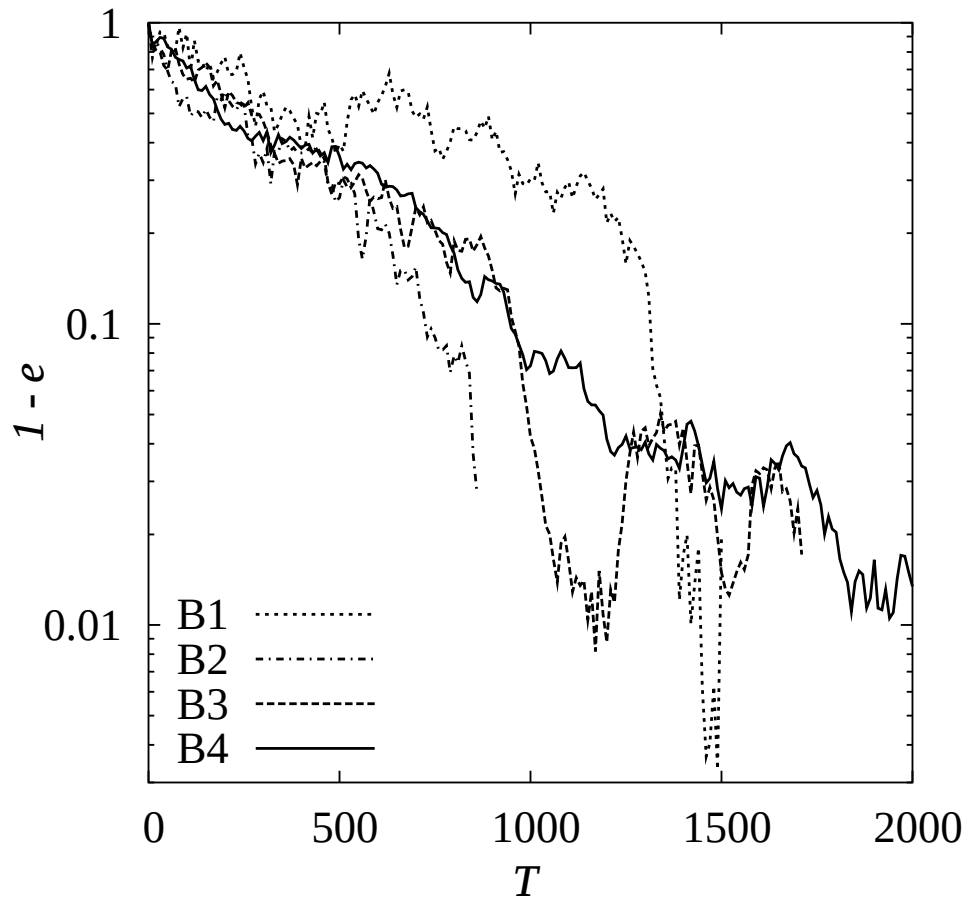
進化しなくなる

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

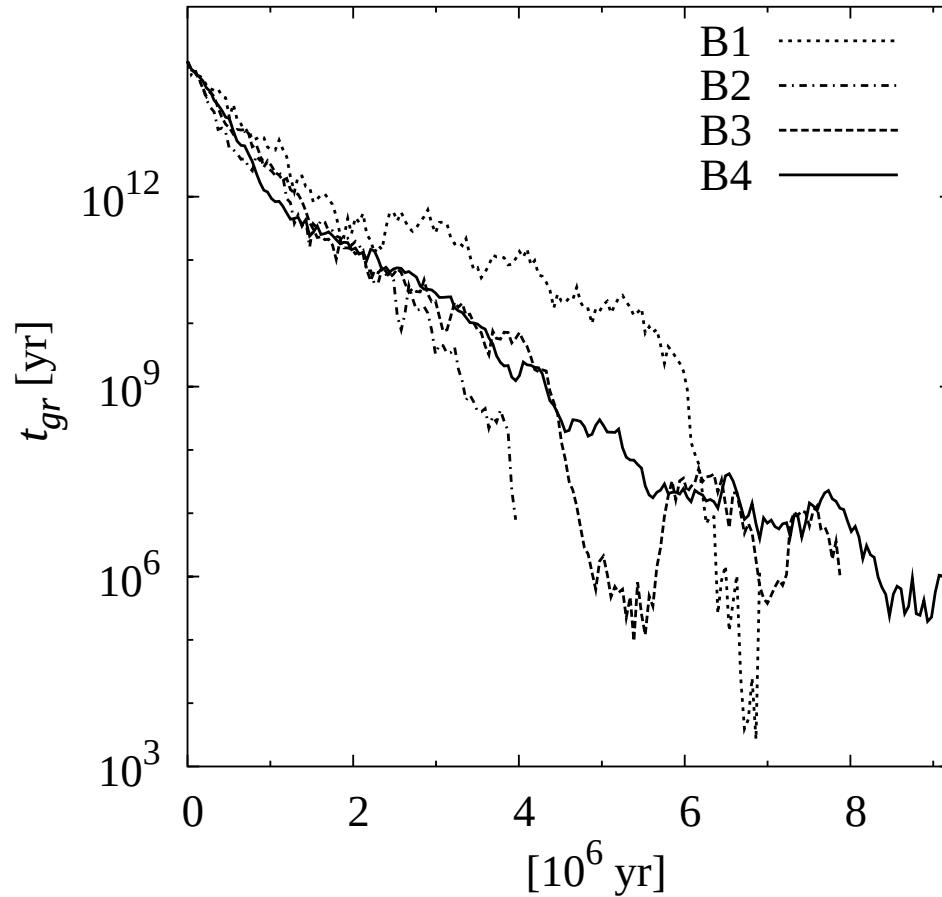


軌道半径が進化し
なくなると離心率
があがる

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

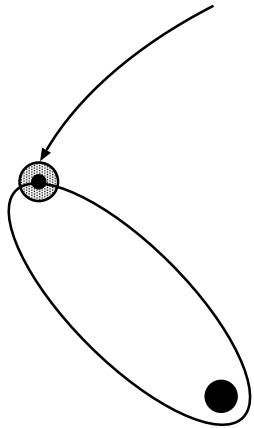
何故離心率があがるのか？

(岩澤博士論文、2009)

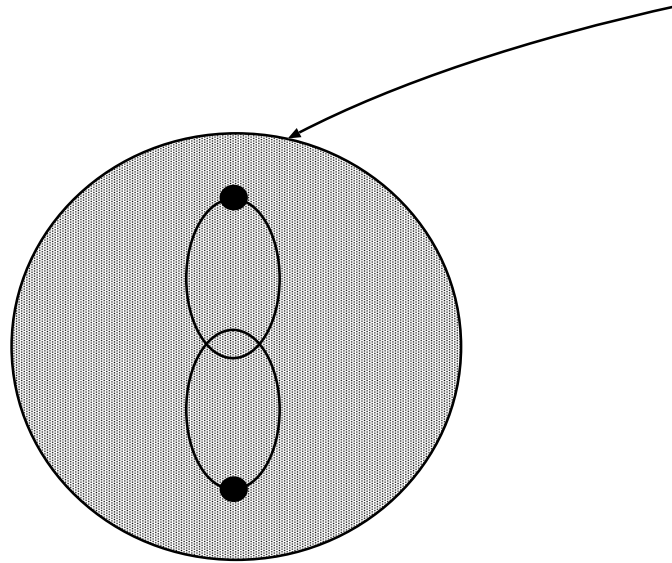
- ブラックホール連星周りのポテンシャルは、ケプラー＋永年摂動
- 軌道に多少でも離心率があると、摂動ポテンシャルは非軸対称
- 周りの星の軌道角運動量 (L_z も) 保存しなくなり、連星系に近づく (ものもある)
- 連星と同じ向きに回りながら近づいたものが、選択的に小さいほうのBH と近接相互作用、eject される
- これは角運動量をもらうので、連星の離心率が上がる。

観測的にも離心率が高いものはある？ (OJ287)

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

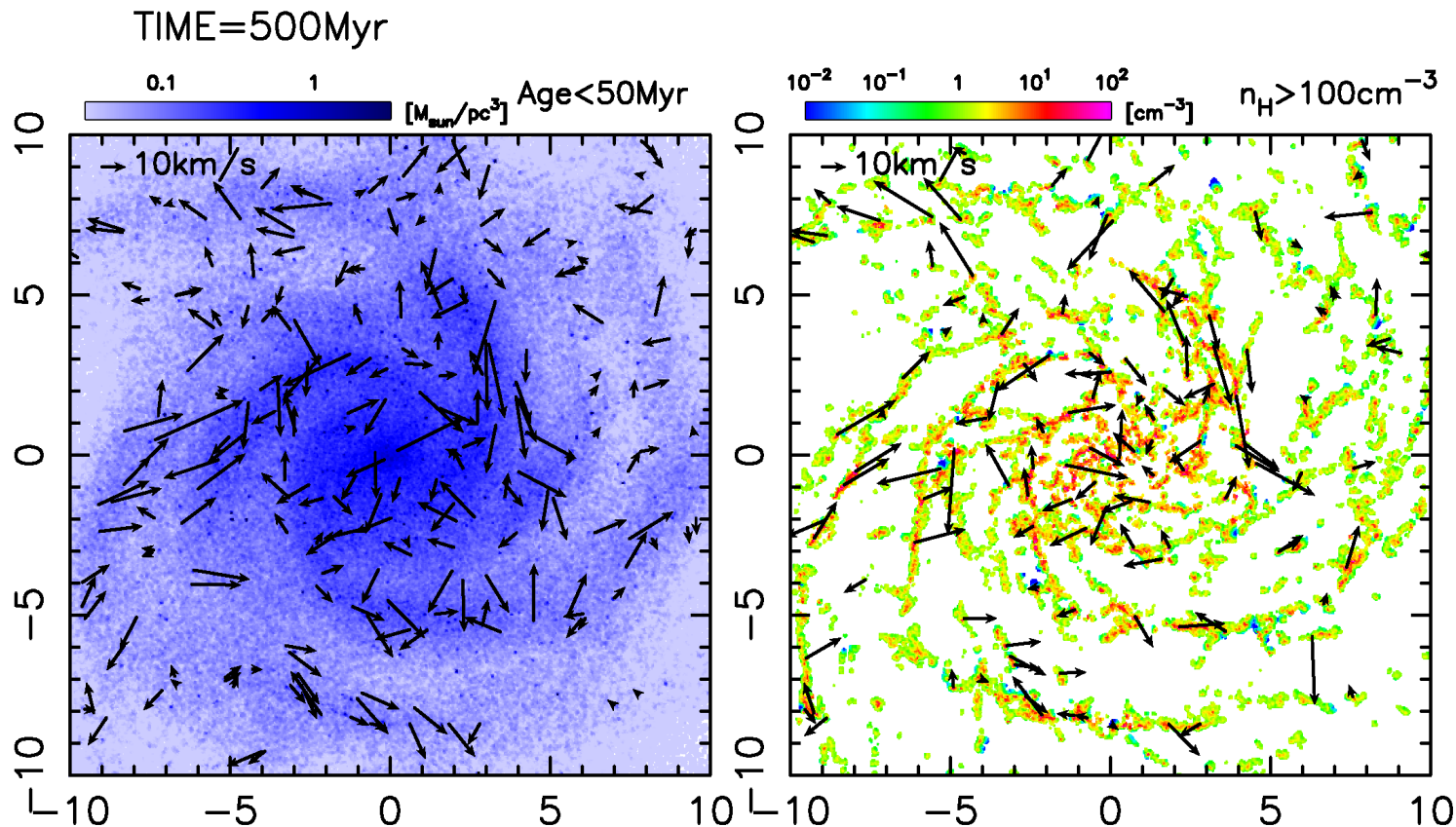
- SMBH-IMBH のような極端に質量比が大きい場合には、連ブラックホール系は周りの星をはじきとばした後に離心率が大きくなる
- これは、周りの星の角運動量が保存しないこと、順方向の軌道の星が相互作用しやすいことによる。

まとめ

- ブラックホール等質量、銀河が球対称という、理想化された単純な系では BBR によって予言された Loss cone depletion が確かに起きて、連星は恒星系との相互作用だけでは重力波が効いて合体するところまでいかない。
- しかし、以下のような現実的な効果を考えると結構なんでも合体するようである。
 - 親銀河の非軸対称性
 - 連星の質量比
 - 連星になった初期の離心率 (?)

おまけ:銀河円盤シミュレーション

外場ダークハロー中での星+ガス円盤の進化 (アニメーション 1 2)
スパイラル構造と特異速度場 (馬場、斎藤他、2009)



左:星の密度、若い星の円運動からのずれ
右: 低温ガスの密度、円運動からのずれ

VLBI による銀河系円盤観測

- やたら円運動からのずれが大きい
(典型的に 30km/s 程度)
- 傾向としては銀河中心向き、回転と逆向き
- 場所によって同じアームでも向きがバラバラ

我々のシミュレーションでは自然に説明できる

