

中間質量および大質量ブラックホールの形成と重力波

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. 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
3. 大質量及び中間質量ブラックホールの合体からの重力波
4. まとめ

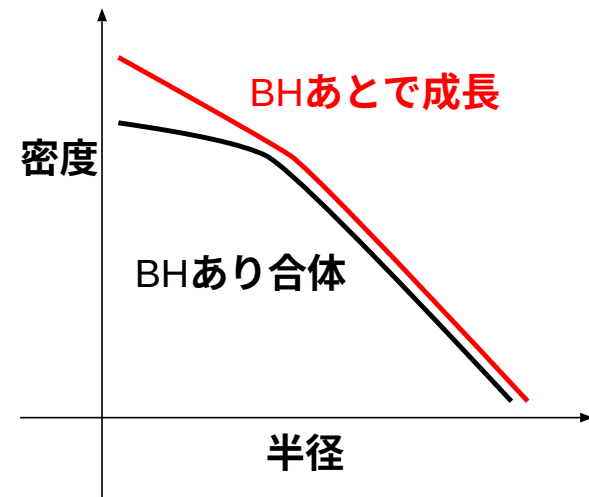
大質量ブラックホール連星の進化

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

アニメーション

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



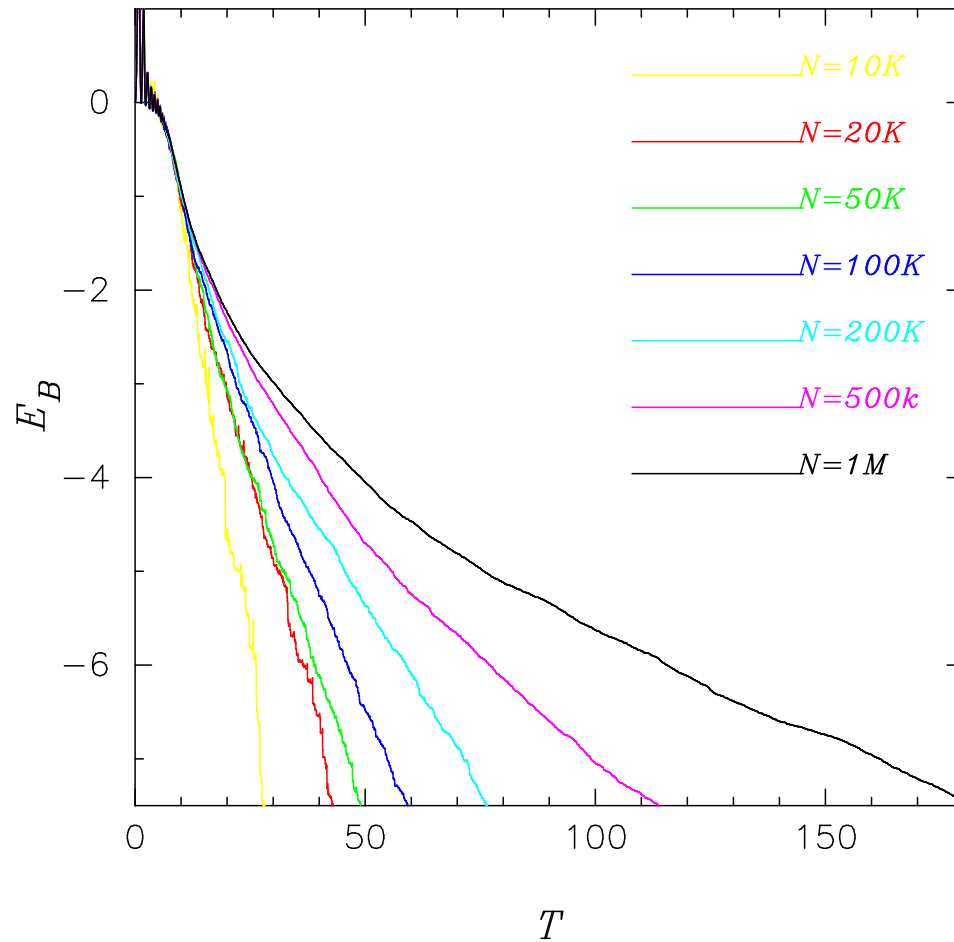
ランダム速度が小さくても、真空でなくなるところまで動いていかないか？

N 体計算で調べる

最近 (といっても6年前) の牧野の計算 (Makino and Funato 2004)

- 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

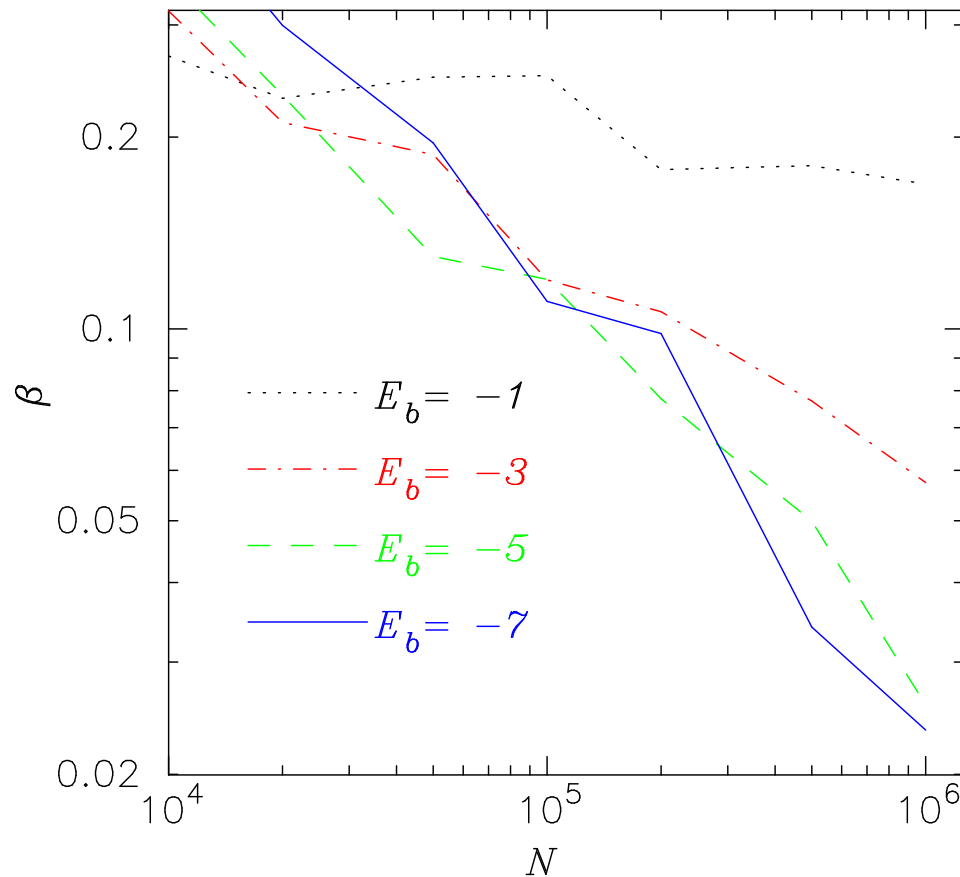
Binding energy



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



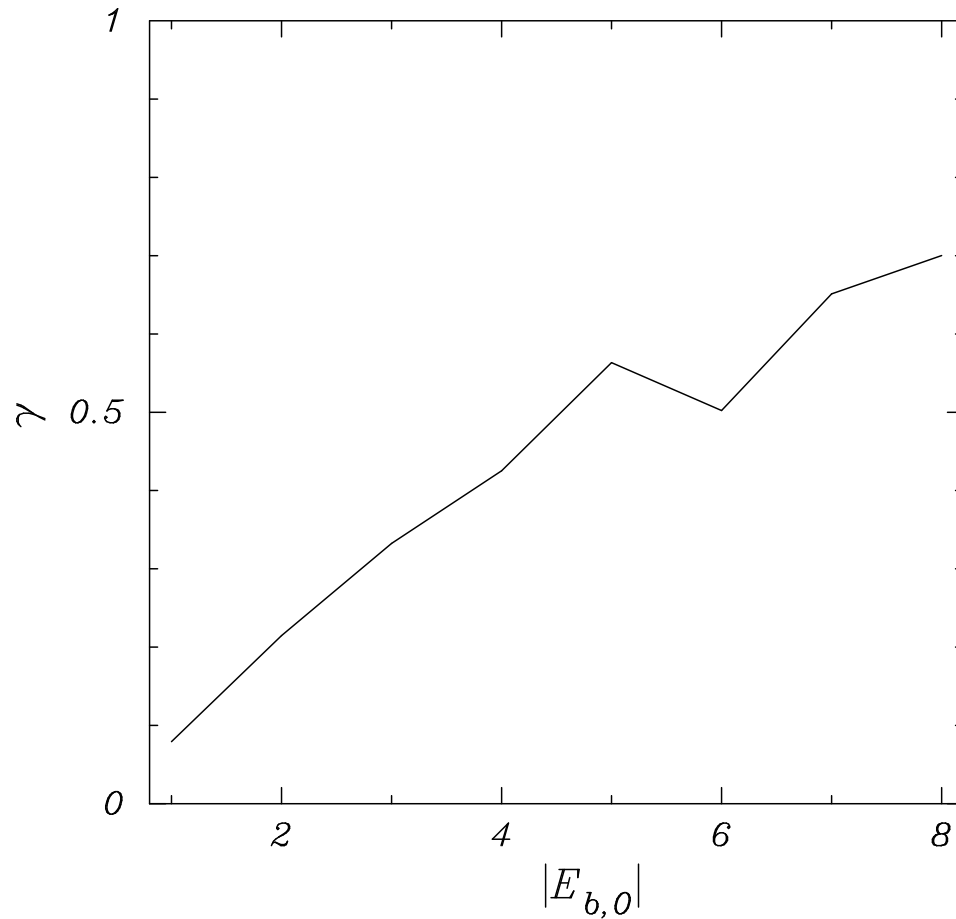
$$\beta = -\frac{dE_b}{dt}$$

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

- 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」

2004年以降の進展

- 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
 - * 古在機構
 - * 3体相互作用
- 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？

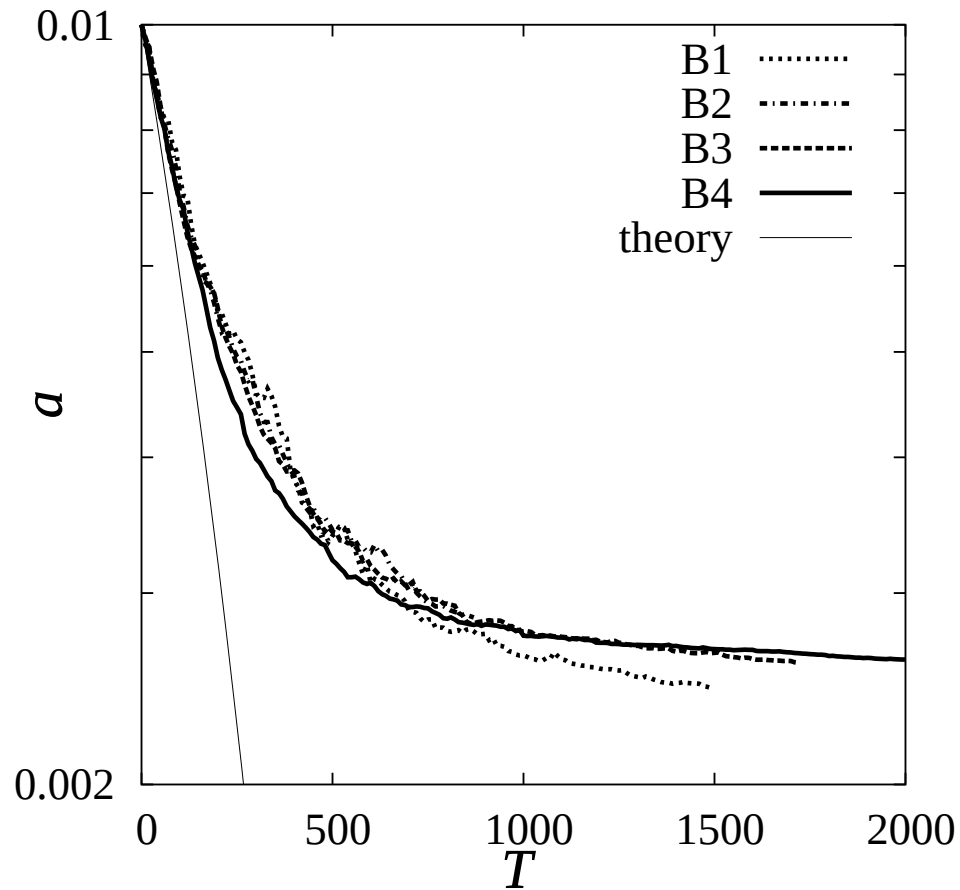
実際の銀河の成長: minor merger のほうがもちろん多い
(1:10 とか)

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

モデル計算

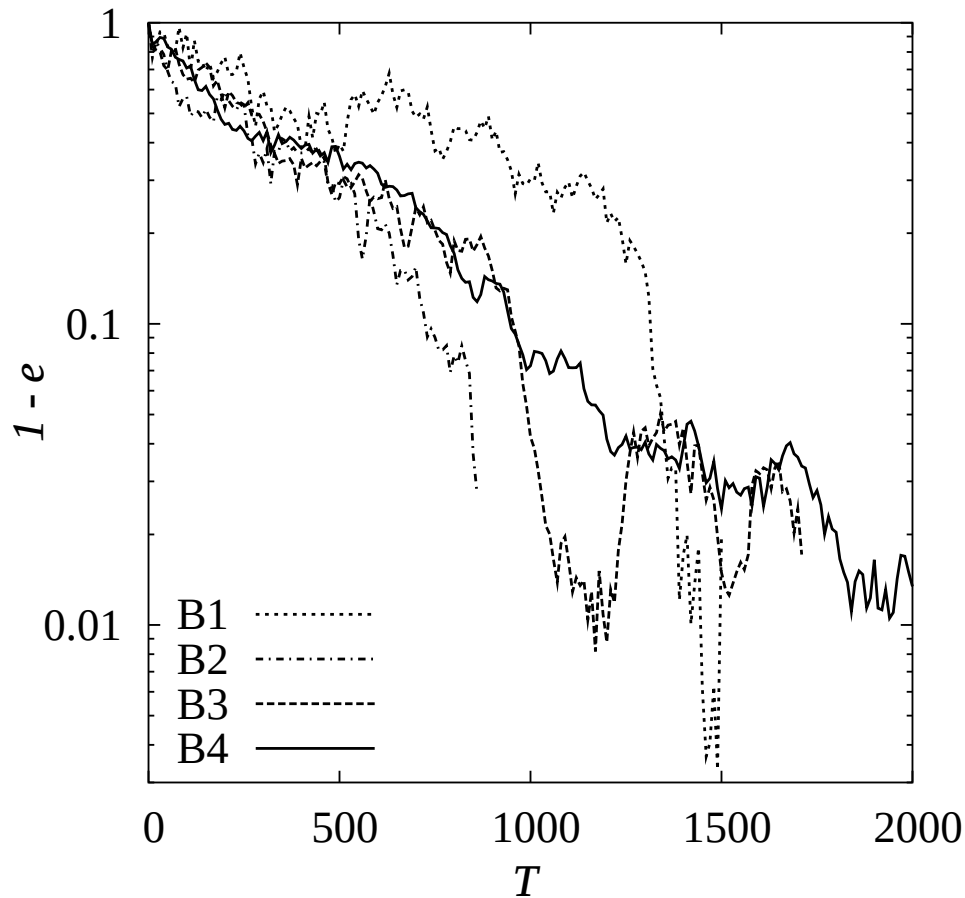
- ほぼ銀河中心みたいな Bahcall-Wolf カスプを作る
- SMBH $3 \times 10^6 M_{\odot}$
- IMBH $3 \times 10^3 M_{\odot}$
- 単位系: 長さ大体 1pc, 時間 4600 年
- 星の質量は最低ので $3M_{\odot}$

軌道進化



初めから 0.01pc に
IMBH おく
後のほうで遅くなる
(loss cone depletion)

離心率

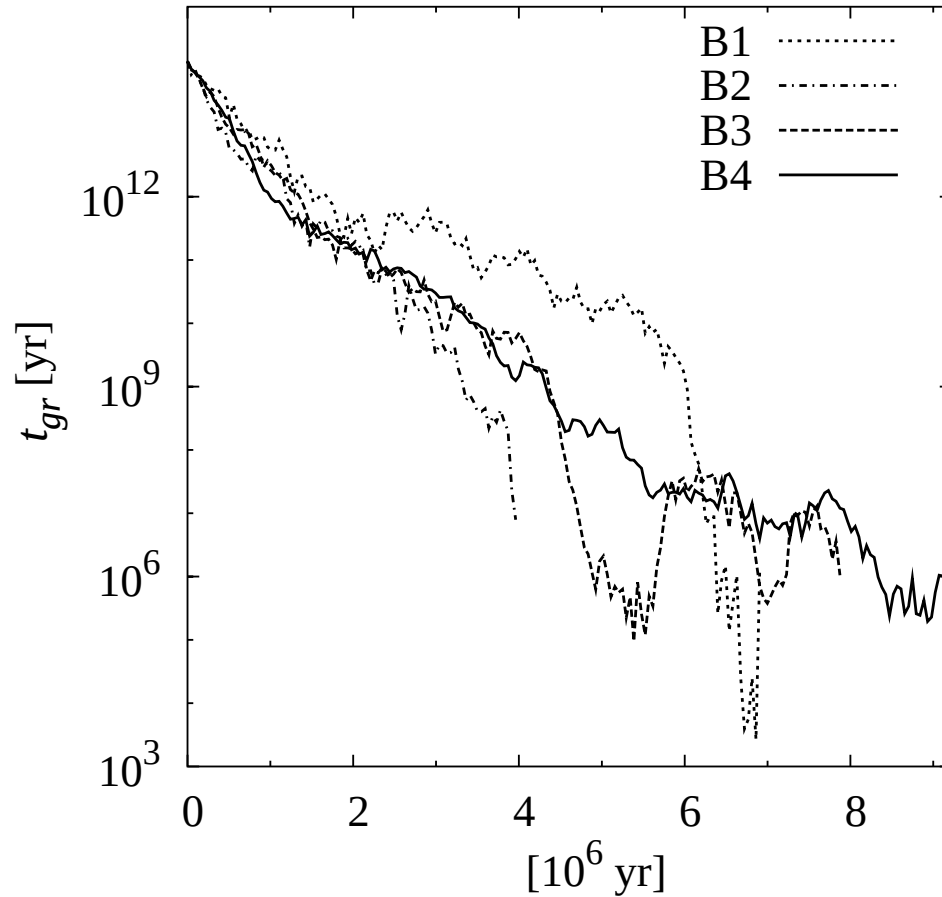


離心率はどんどん
あがる

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, Valtonen et al 2008)

質量比がある連ブラックホールのまとめ

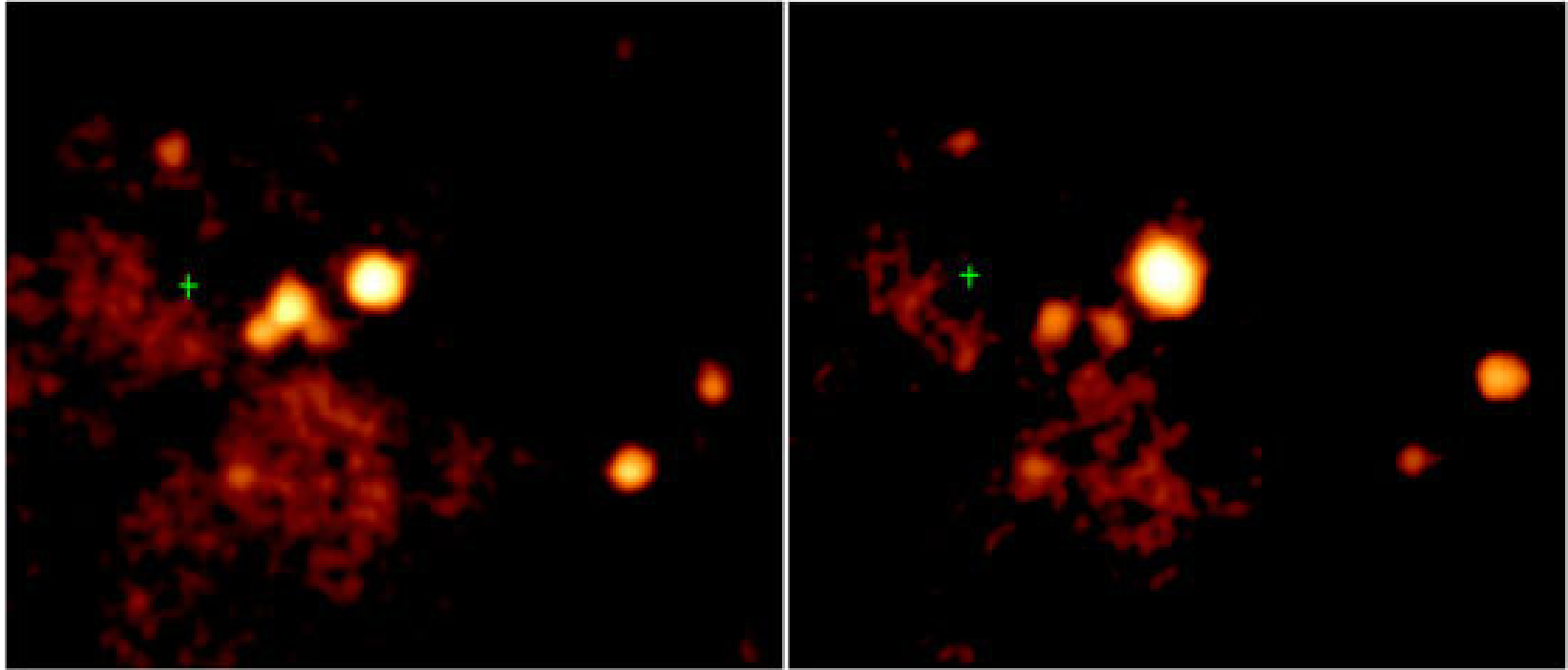
- SMBH-IMBH のような極端に質量比が大きい場合には、連ブラックホール系は周りの星をはじきとばした後に離心率が大きくなる
- これは、周りの星の角運動量が保存しないこと、順方向の軌道の星が相互作用しやすいことによる。

中間質量ブラックホール

- DECIGO の周波数にちょうどいい
- あるのか？
- どうやっできるのか？
 - Pop III から直接
 - 星団内で合体で

M82 の中間質量 BH 候補

Matsumoto *et al.* ApJL 547, L25



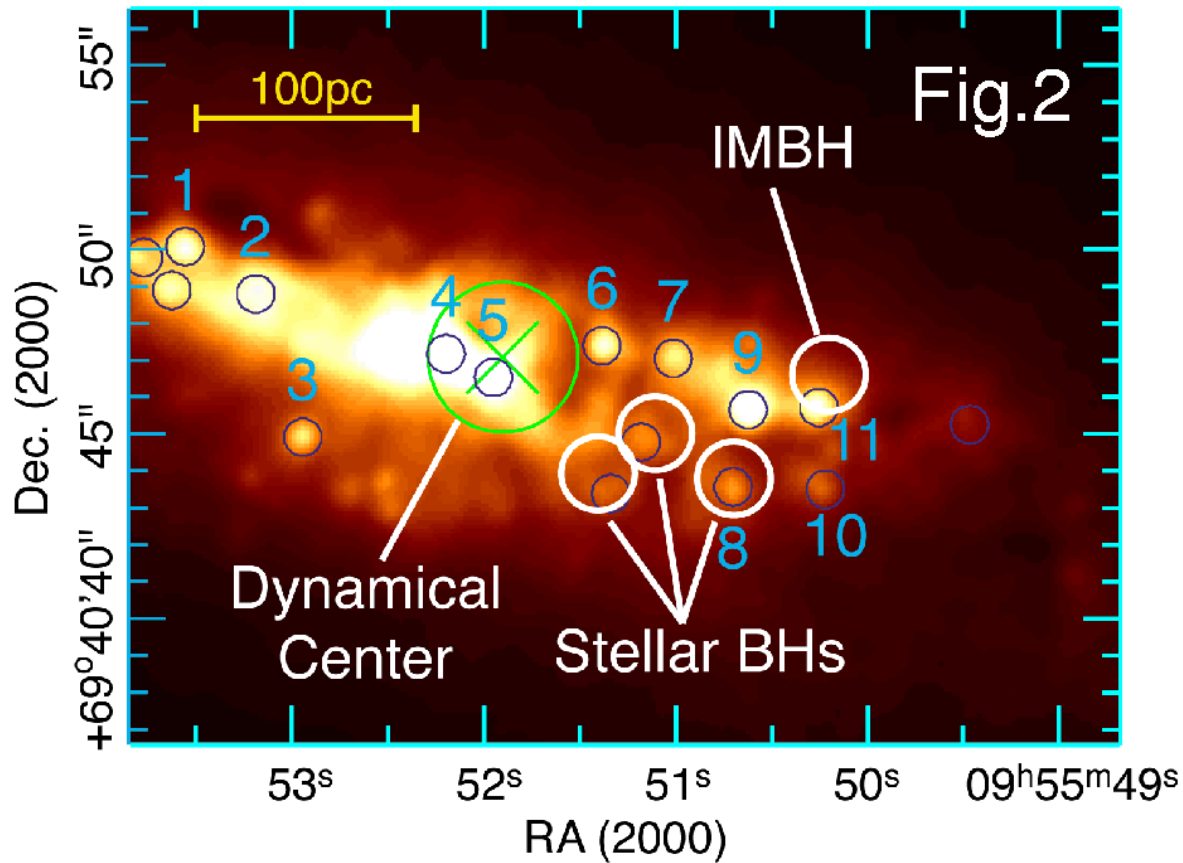
大きな時間変動を示す複数のソース

M82 IMBH (候補) の意味

- **最初の** 質量が $\gg 10, \ll 10^6$ 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

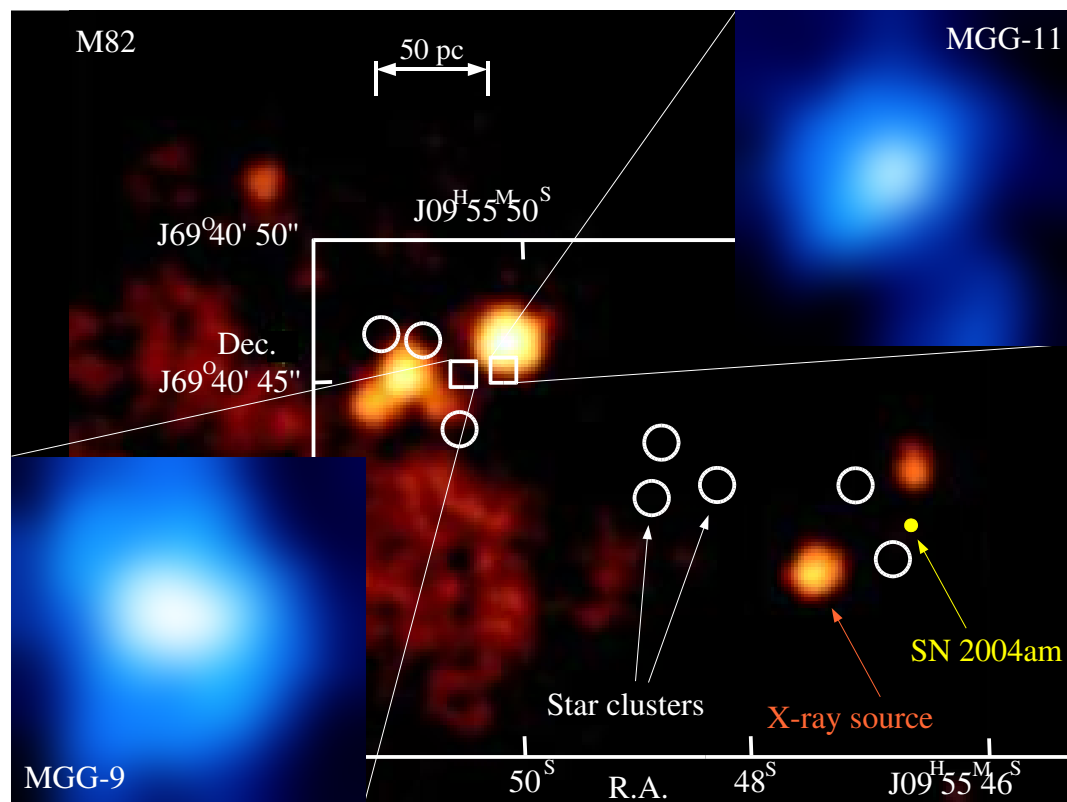
赤外 カウンターパート

M82 のすばるによる観測 (K' band)



赤外 カウンターパート (2)

位置の比較



まあ重なっている。

IMBH は星団の中にある？

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。

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

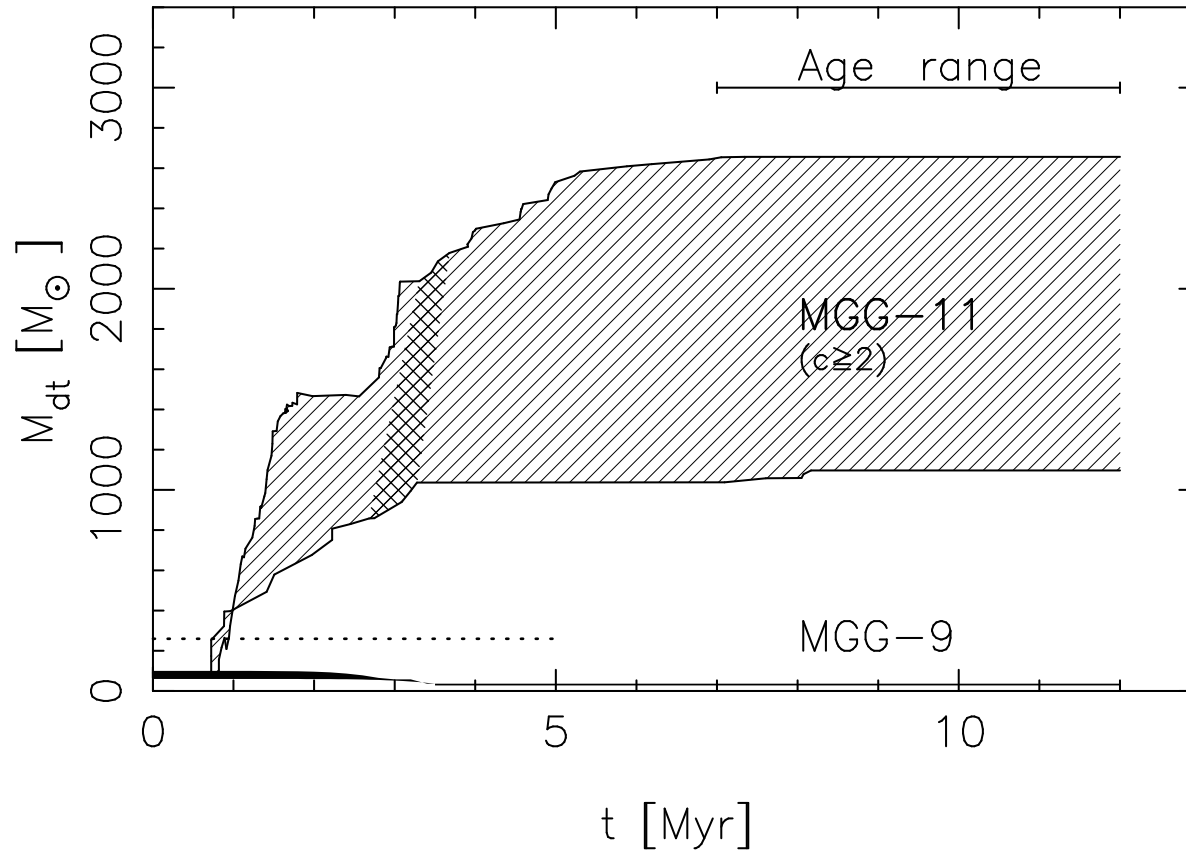
シミュレーション

Portegies Zwart et al., Nature, 2004

初期条件

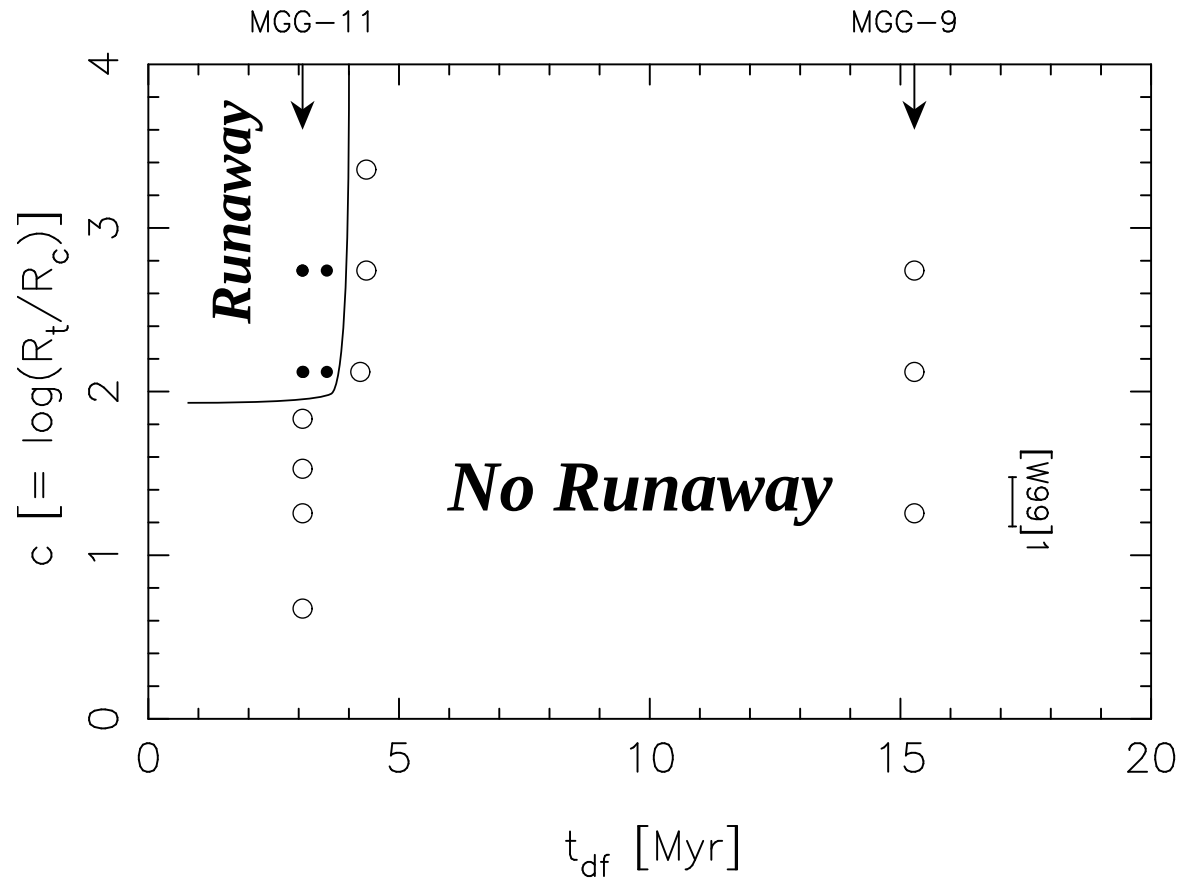
- King model with $W_0 = 7-12$
- Salpeter IMF (as suggested by McCrady et al)
- Star-by-star simulation for MGG-11 (MGG-9 is scaled)

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

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 $100\text{--}1000 M_{\odot}$ 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。

他の IMBH 候補

- NGC 2276 (Davis and Mushotzky, ApJ 604, 653, 2004)
 - $L \sim 1.1 \times 10^{41}$ erg/s
 - SED は MCD とはあわない (ULX に一般的な傾向)
- NGC 4559 (Cropper et al MN 349, 39, 2004)
 - $L > 2.1 \times 10^{40}$ (X7), $L > 1.3 \times 10^{40}$ (X10)
 - SED は MCD でもいい？
- ULX のほとんどは若い星団の中/近くにある (Zezas et al ApJ 577, 710, 2002, Kaaret et al MN 348, L28, 2004)
- 球状星団の中心？
- IRS13E?

Caveat — IMBH って本当にあるの？

Caveat — IMBH って本当にあるの？

- ある! — えび×××さん

Caveat — IMBH って本当にあるの？

- ある! — えび×××さん
- ない! — えび××さん

TOHO LASERDISC
TLL 2200



Caveat — IMBH って本当にあるの？

- ある! — えび×××さん
- ない! — えび××さん

理論家は色々なことをいう

Caveat — IMBH って本当にあるの？

- ある! — えび×××さん
- ない! — えび××さん

理論家は色々なことをいう

結局、

重力波でみないと確かなことはわからないのではないか？

IMBH や SMBH の合体からの重力波

- SMBH 合体

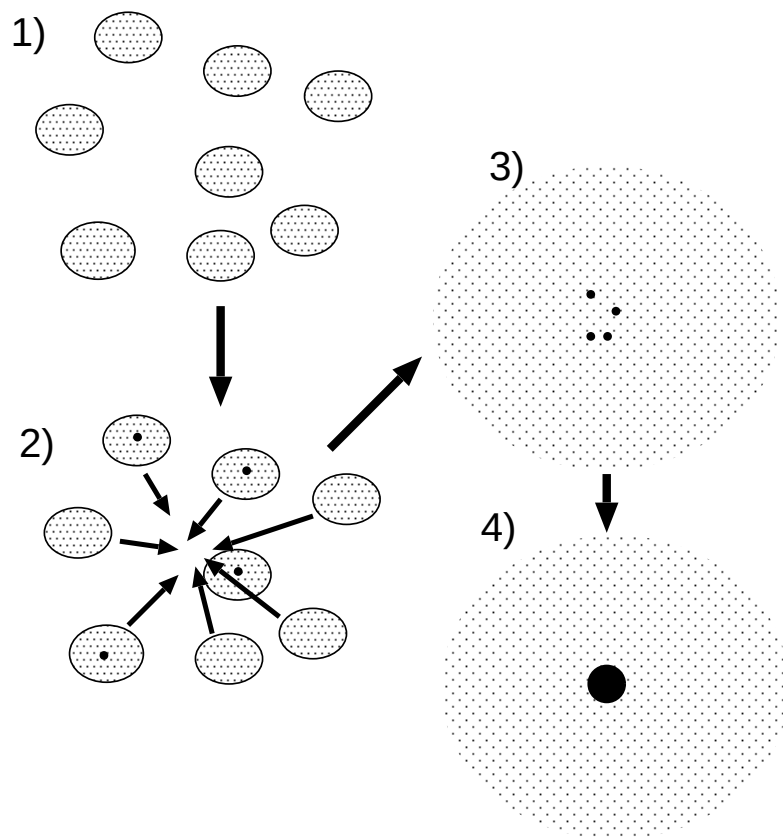
- 必ずある (多くの銀河中心には SMBH あり、銀河合体は起こる)
- 必ずわかる ($h \sim 10^{-15}$ @ 4Gpc)
- イベントレートはそんなに高くないかも、、、

- IMBH 合体

- あるなら沢山あるかもしれない。
- DECIGO なら必ずわかる ($h \sim 10^{-21}$ @ 4Gpc)
- イベントレートは大質量の場合の 3-4 桁高いかもしれない

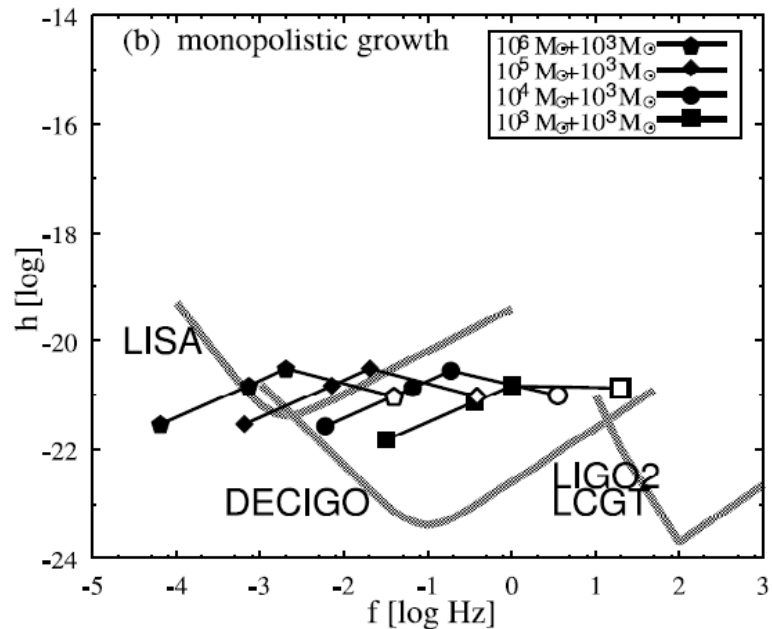
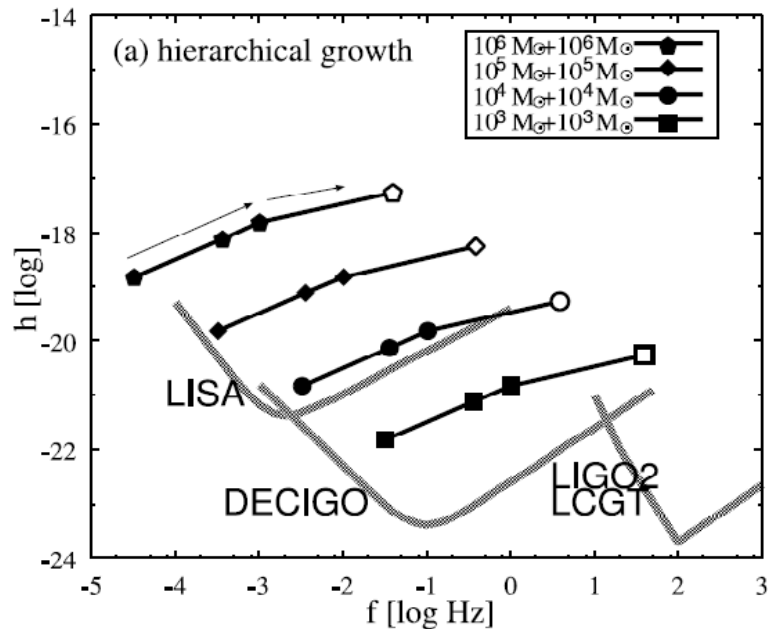
IMBH Merger シナリオ

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。

合体からの重力波



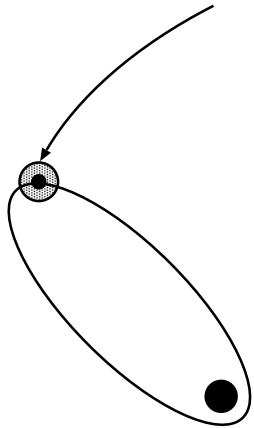
Matsubayashi et al 2004 (右と左のどちらか間違ってるような気がする)

イベントレート $\sim 100/\text{年}$

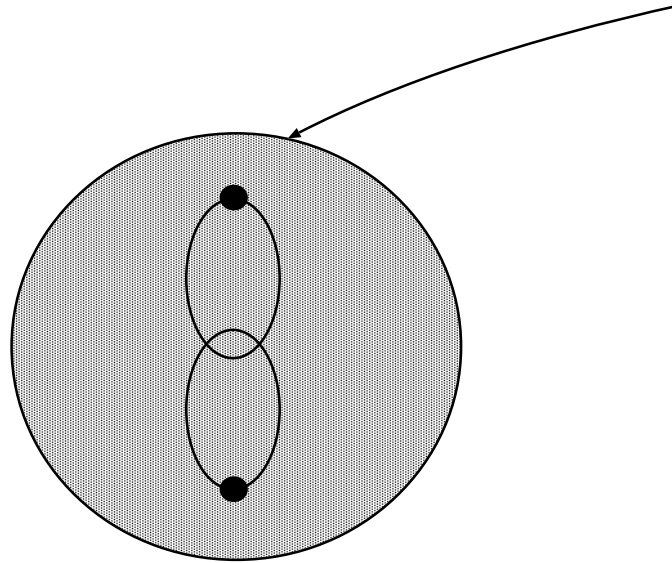
まとめ

- 大質量ブラックホール連星は、ある程度質量比があれば恒星との相互作用だけで重力波を出して合体するところまで離心率があがる。
- 大質量—中間質量ブラックホール連星でも同じ。
- 中間質量ブラックホールがあるなら、高いイベントレートで DECIGO なら受かる。

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