大質量ブラックホール連星の進化

牧野淳一郎
東京大学理学系研究科天文学教室

今日の予定

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。
ブラックホール2つには何が起きるか？

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

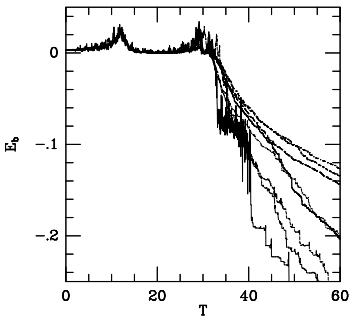
- Makino 1997
- Quinlan 1997
- Milosavljević & Merritt 2001
- Chatterjee, Hernquist, L. & Loeb 2003

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

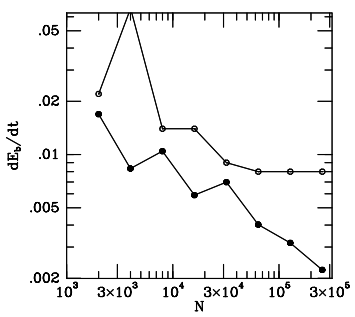
Binding energy



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

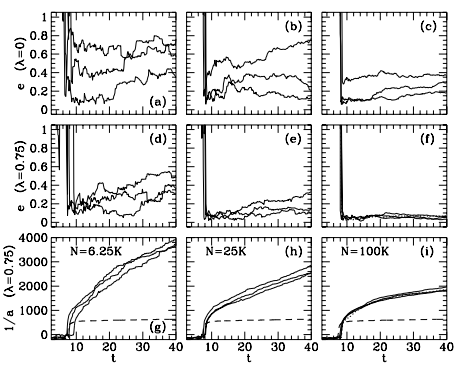
後になるとよる。傾き: $N^{-1/3}$ くらい

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

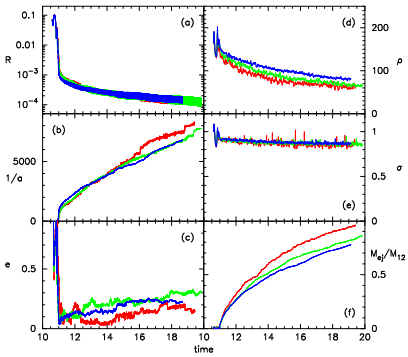


$N > 100$K では粒子数によらない!?

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, L. & 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

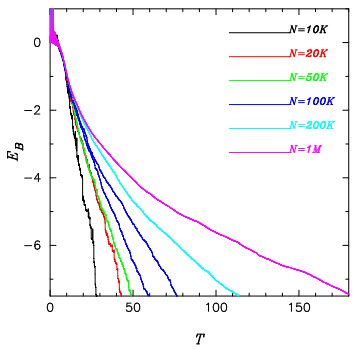
- なるべく単純な初期条件で
- なおかつできるだけ loss cone ができやすい条件で
- 信頼できる計算法で
- 大粒子、長時間計算をする

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

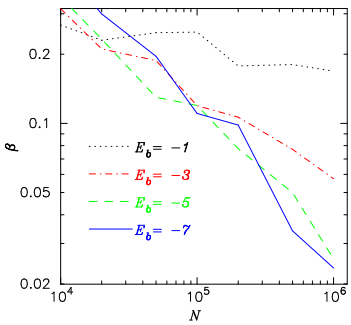
Binding energy



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

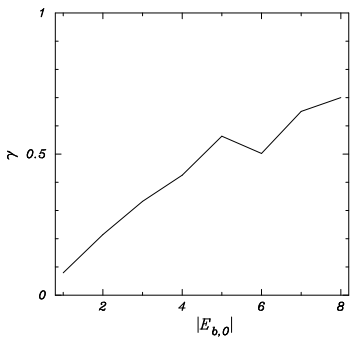


最初のうちは粒子数によらない

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。

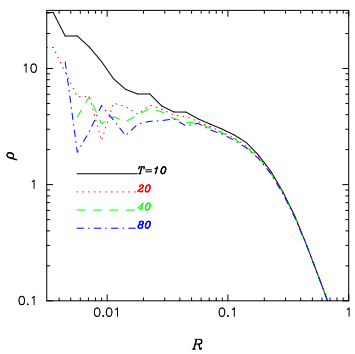
計算できた範囲では収束していない。

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

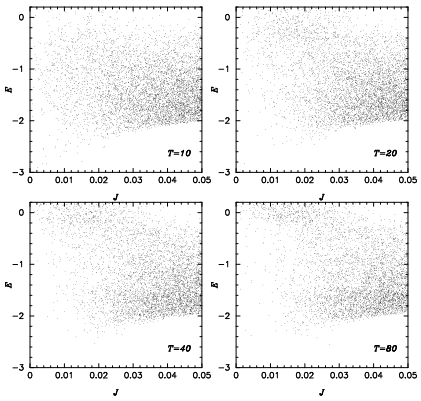


最初あった密度カスプが消えてはいる。

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。