

# 銀河中心の恒星系力学

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

# 概要

## 1. 観測でわかっている (らしい) こと

- Central Cluster
- Stellar Disk(s)
- Star Cluster(s)

## 2. 理論モデルについて少し

- 星団の軌道進化と力学進化
- 中間質量ブラックホールの軌道進化

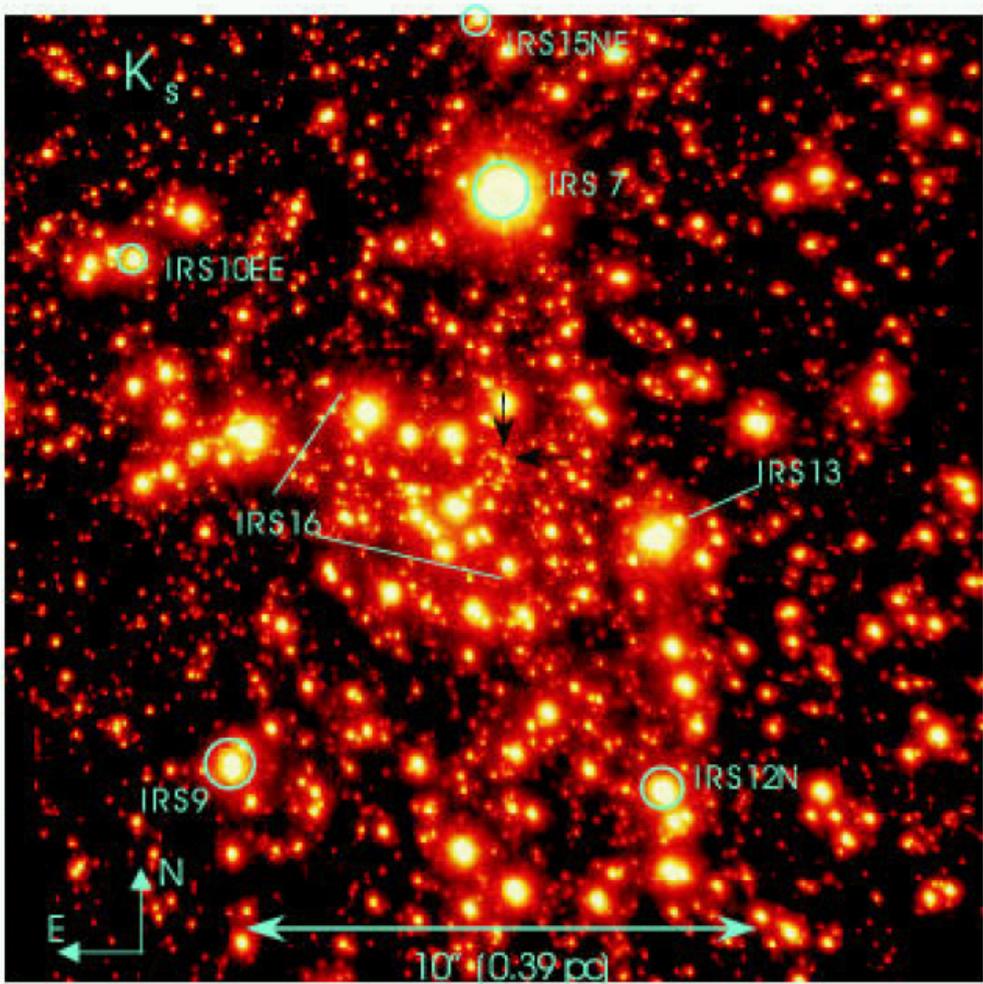
## 3. まとめ

# 観測でわかっている(らしい)こと

- Central Cluster
- Stellar Disk(s)
- Star Cluster(s)

# Central Cluster

Genzel et al 2003  
K-band  
shift-and-add im-  
age  
中心付近の黒い矢印  
の先が SgrA\*



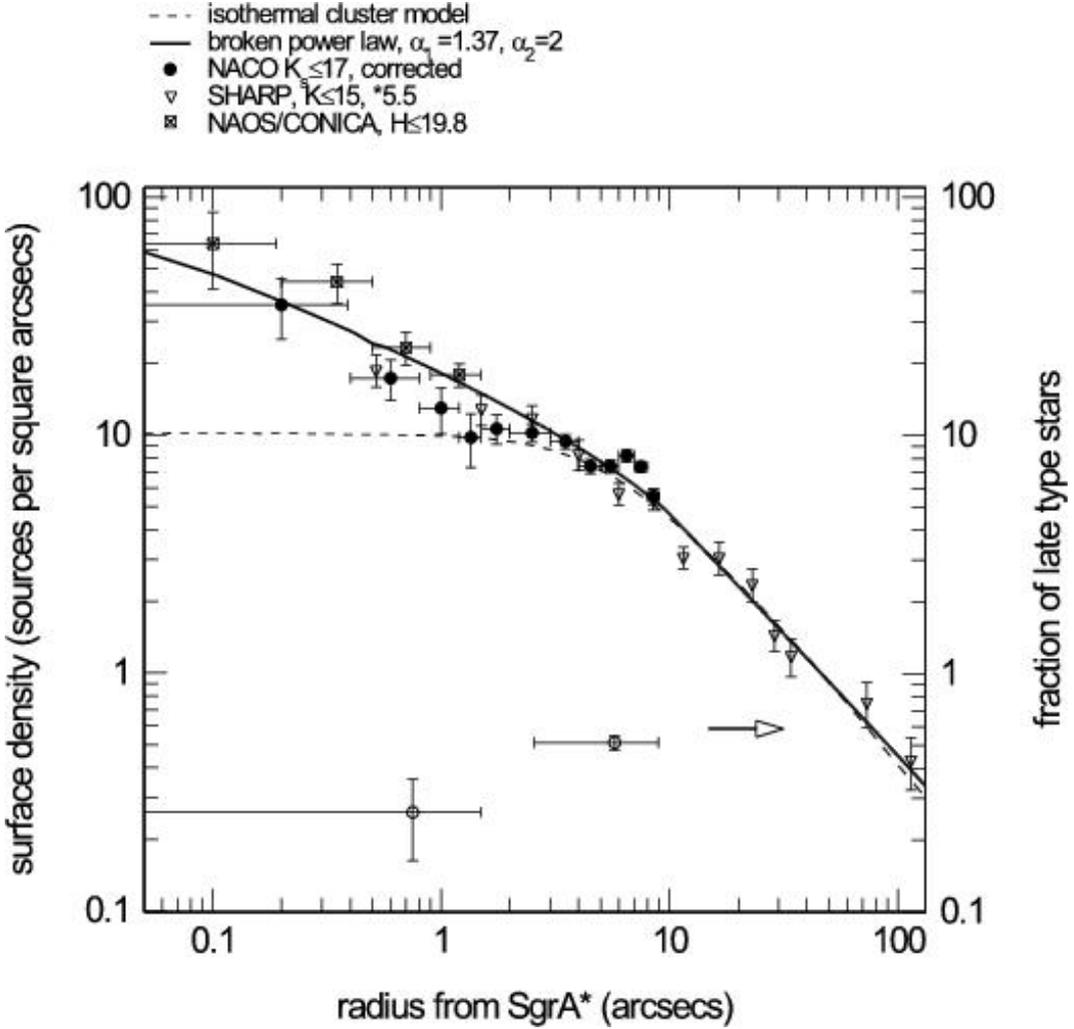
# Surface density

Genzel et al 2003

10" 以内の恒星の質量  $\sim 10^6 M_{\odot}$  (あんまり信用はできない)

若い星が結構多い。

0.5" 以内でも若い星がある。(S1, S2, S0-16 ...)



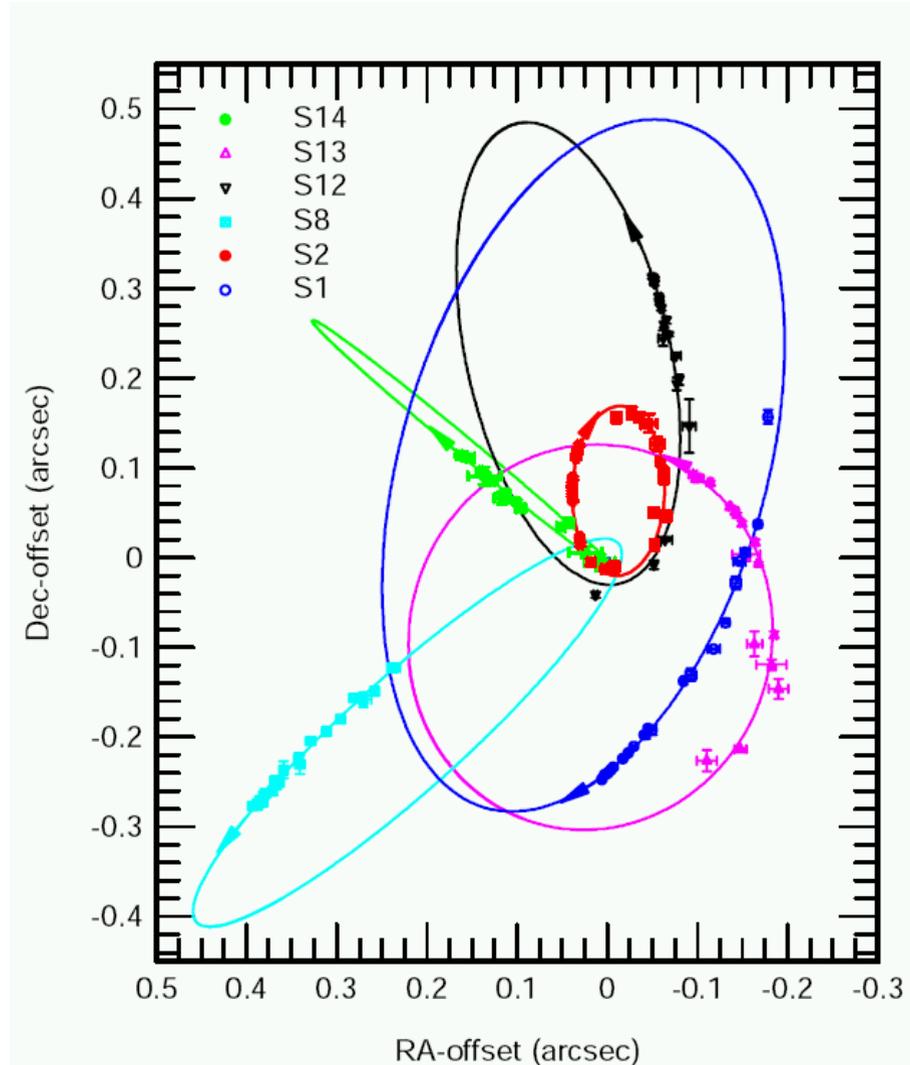
# いくつかの中心付近の星の軌道

Eisenhauer et al  
2005

星の分布は「等方的」  
少なくとも円盤的と  
はいいがたい

これらの星は結構若い  
( $10M_{\odot}$  以上)

もっと暗い星は普通の  
赤色巨星

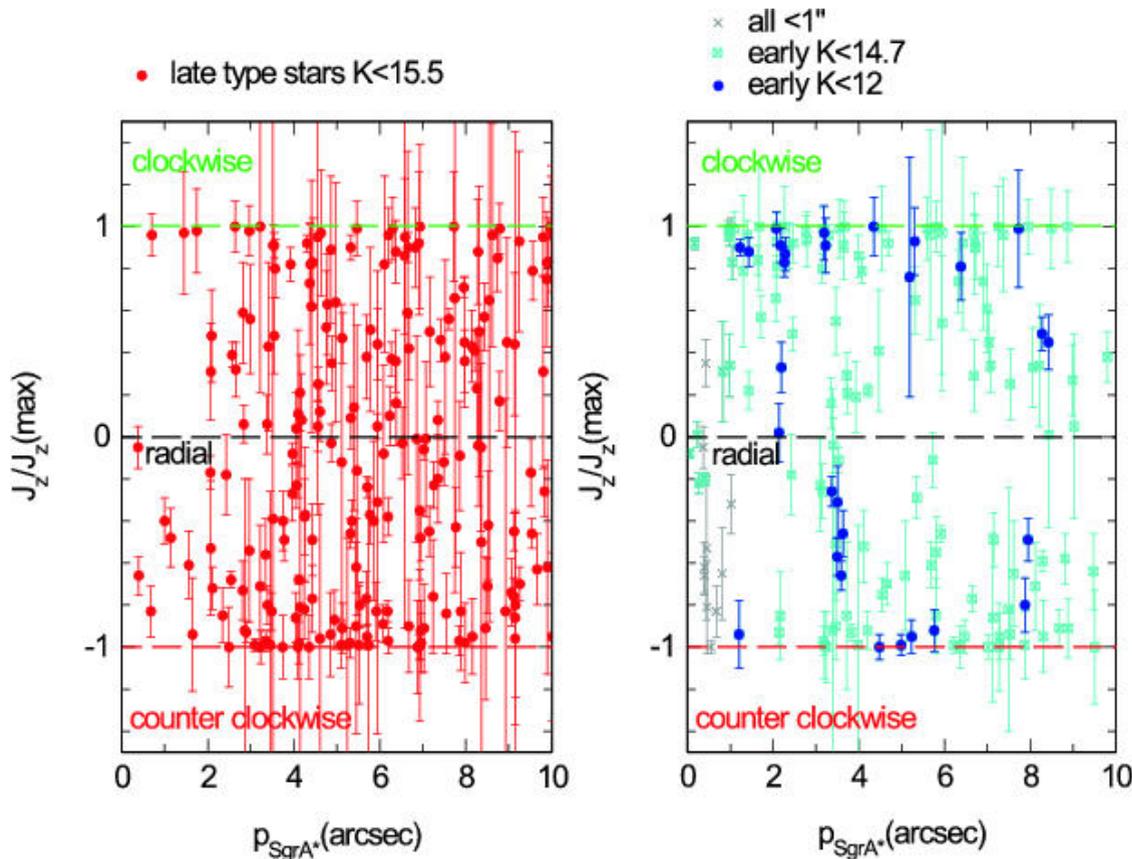


# 理論屋から見た課題

- 何故若い星がそこにあるのか
  - その場で作る？
  - 少し近くから緩和で運ぶ
  - 遠くからなんとかして運ぶ
- まだ見えない星はどんなふうか
- 中心ブラックホールの形成・成長との関係は？

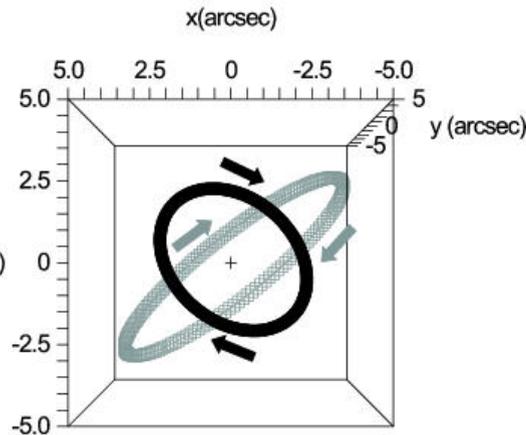
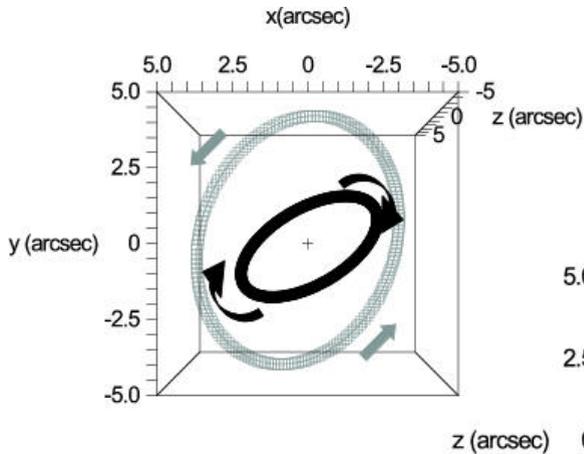
# Stellar Disk(s)

また Genzel et al 2003。中心からの距離と角運動量



特に明るい星は 等方的ではない。時計回りと半時計回りの2つのリング。

# 空間構造



Paumard et al  
2006 (図は Genzel  
et al 2003 から)  
傾いている。

どちらも星の年齢  
 $6 \pm 2 \text{ Myrs}$

そんなに薄いわけ  
ではない ( $e \sim 0.3$ )

なぜそんなものがそこにあるのか良くわからない。

# 理論屋から見た課題

- どうやってディスクを作るか
  - その場で作る (Nayakshin et al 2005)
  - 遠くから星団で運ぶ (Hansen & Milosavljević 2003)
- 中心部の星との関係
- Minispiral との関係 (?)

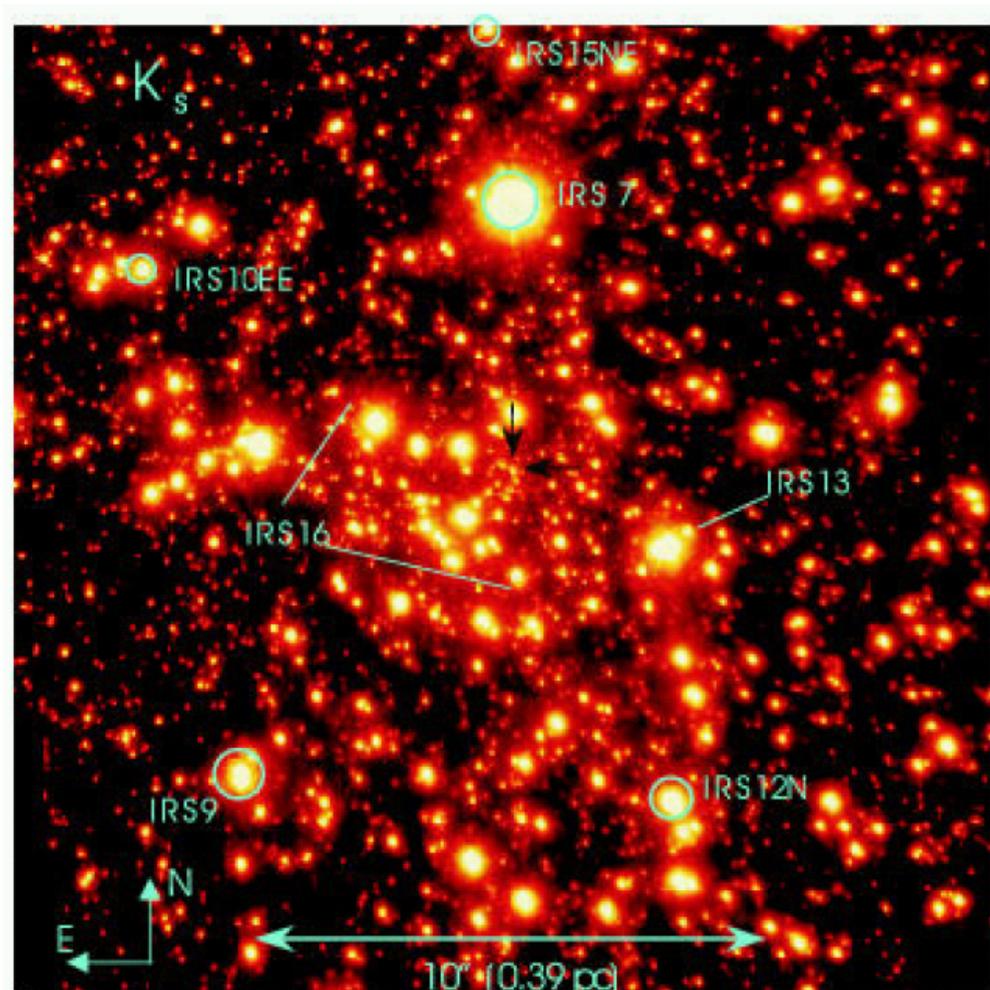
# Star Cluster(s)

IRS13E, 16SW は  
それぞれ星団らしい  
(?)

IRS13E: 反時計回り  
ディスク

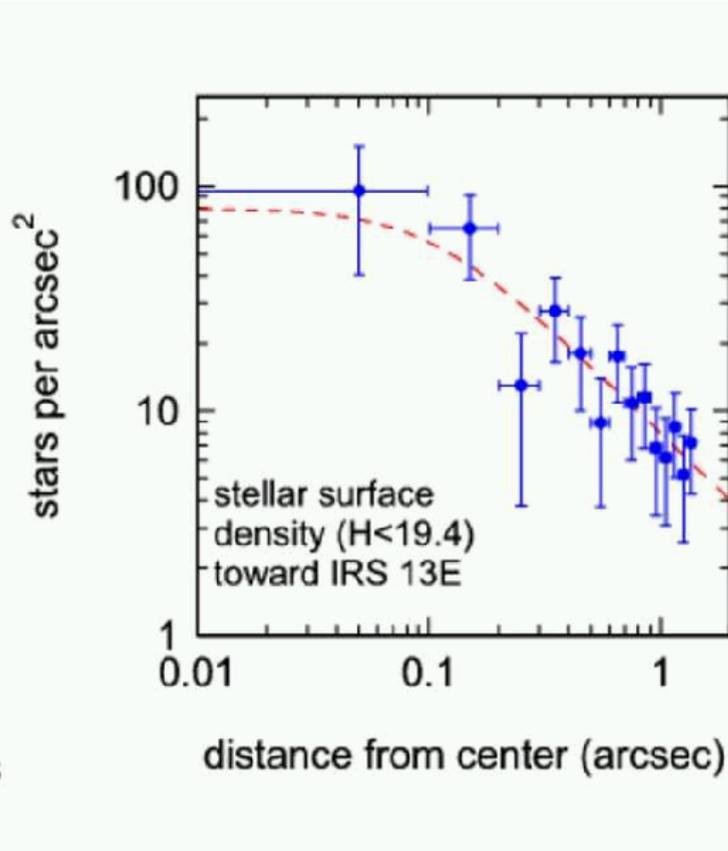
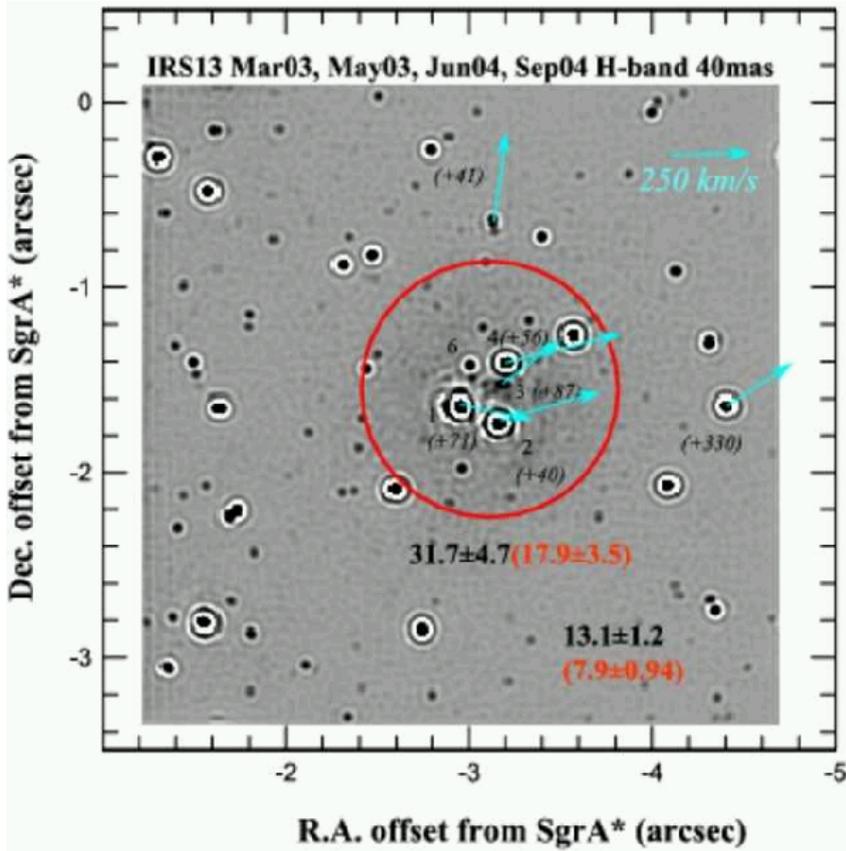
IRS16SW: 時計回  
りディスク

bound だとすると結  
構質量が必要  
→ IMBH???



# IRS13E は本当に星団か？

Paumard et al 2006 H-band 観測



見た目星団っぽい。

# 星団だとすると

コア半径 0.17''

潮汐半径 1'' 以上？

銀河中心までの距離 4'' くらい。

潮汐半径が 1'' とすると  $4 \times 10^4 M_{\odot}$  くらい必要。

これは Sgr A\* の速度と矛盾するかも。 Paumard et al ではこの問題は無視されている。

# 観測のまとめ

- 妙に若い星がある
- 0.3pc くらいより内側ではカスプのスロープ浅い
- 0.1pc くらいより外側では若い星はディスク状。ディスクは2つある。
- それぞれのディスクの中に星団のようなものもある。
- ディスクの星は結構年齢がそろっている

# 銀河中心の理論モデル

いろんなことを統一的に説明できるような理論モデルはあるか？

とはいえ、一度に全部、は無理なので、まずディスクを考える

提案されているモデル

- ガスディスクから作る
- 星団を落とす

# ガスディスクから作る

Milosavljević & Loeb 2004

Nayakshin and Sunyaev 2005

個人的にはあんまり本当とは思えない

- ほぼ同じ時期、ほぼ同じ場所に逆回転するガスディスクが2つというのはあまりに無理
- 星の「ディスク」がガス起源にしては速度分散が大きすぎる
- 星が重力相互作用でディスクを加熱する時間スケールは結構短い。速度で  $6\text{km/s}$  までに  $10^4$  年くらい。自己重力的になるほどディスクが薄くならない

# 星団を落とす

Hansen & Milosavljević 2003

Portegies Zwart et al. 2005

これも色々無理が、、、

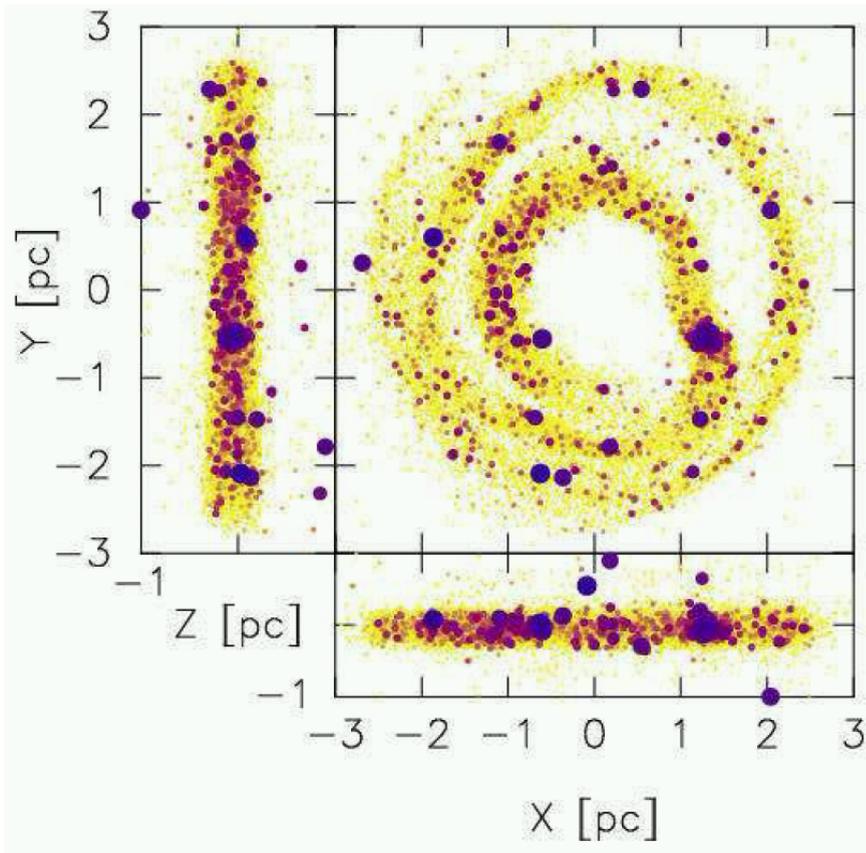
- よほど近くに星団があるか、ありえないほど重いかでないと力学的摩擦では落ちてこない

とはいえ利点もある。

- 若い星団はある。 Arches, Quintuplet
- IMBH があるとする、銀河中心近くまで若い星をもつてくのは可能
- 複数ディスクも問題ない。星団とディスクも同時に説明

# 星団を落としてできるもの

もちろんかなり厚いトーラス  
観測とは矛盾しない



Portegies Zwart et al 2005 これはちょっと外側すぎる例。

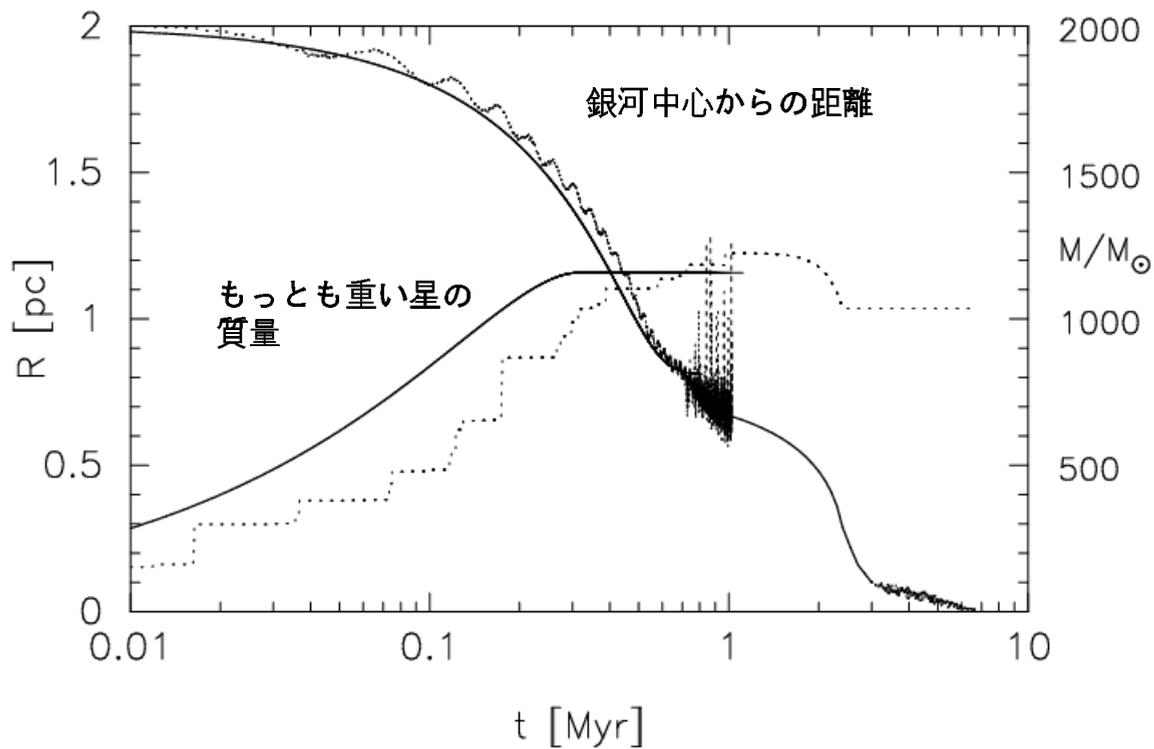
# N-body simulation の例

Portegies Zwart et al 2005

- 64K stars, Salpeter IMF (lower cutoff:  $0.2M_{\odot}$ )
- 2pc from GC, circular orbit
- Roche-lobe filling King model ( $W_c = 9$ )

これは、IRS13E みたいなものをつくらう、という話。

# 結果



破線: シミュレーション、実線: 解析的モデル

# つまり

- 2pc くらいに  $10^4 M_{\odot}$  くらいの星団ができれば数 Myrs で落とせる
- 5pc とか 10pc だとはるかに重い必要がある。

つまり: IRS13E みたいなものを作れなくはないが、結構不自然な初期条件が必要？

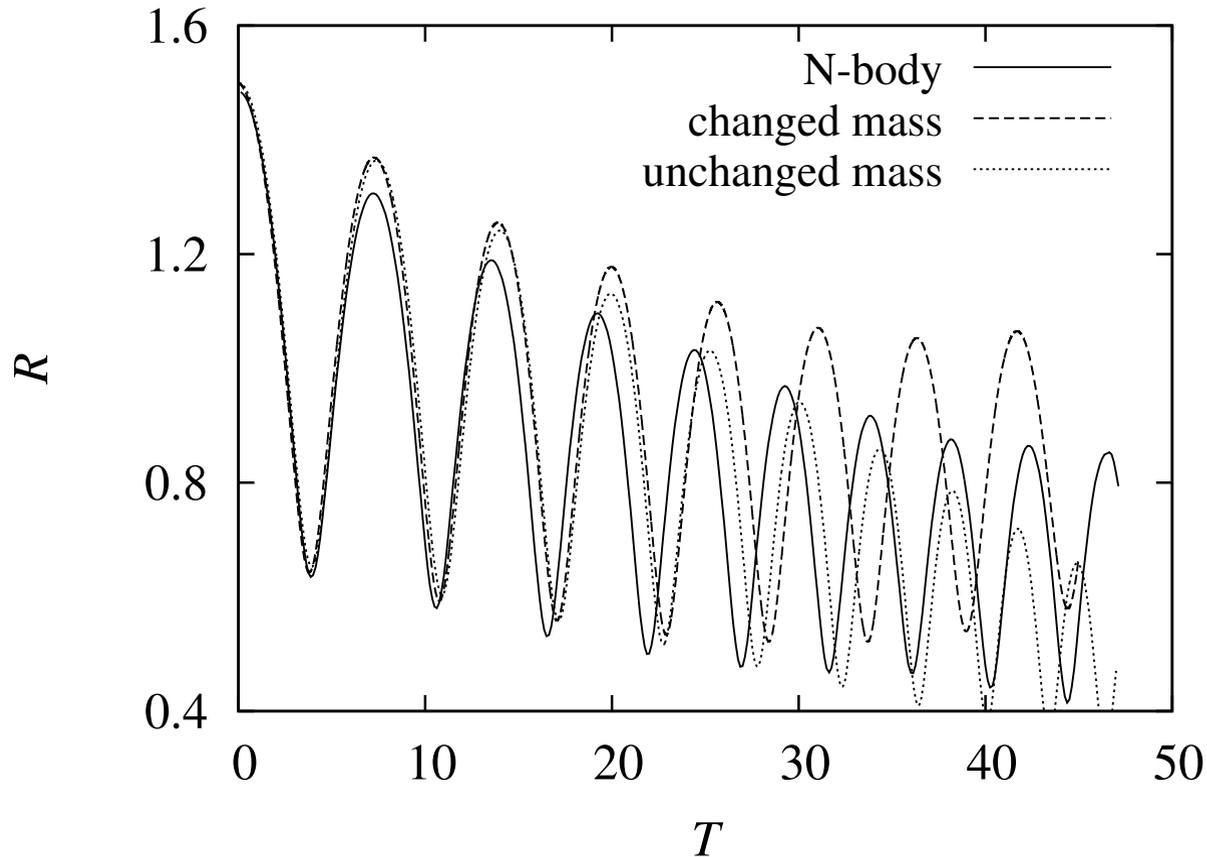
# N体計算は信用できるか？

実は色々疑問。

- 星団の軌道進化は力学的摩擦を手でいれている。
- 初期の軌道が円軌道というのは本当かどうかわからない。

# 星団の軌道進化

藤井他 2006: 衛星銀河の  $N$  体計算では、実は力学的摩擦を手でいれたのより速く落ちる。



# 速く落ちる理由

- 衛星銀河から逃げた星に角運動量を渡す
- 逃げた星もまだ衛星銀河本体近くにいると、その重力で力学的摩擦を大きくする

どちらも微妙な効果だが結構大きい。

# 円軌道？

若い星団がどうやってできたかは不明。

従って、どういう軌道を考えるべきかもあんまり根拠はない。

できた時にあまり軌道角運動量もってなければ速く落ちる。

星団のできかたと、ガスの運動との関係の理解が必要？

# ちゃんと星団として計算してみる

藤井他、来週の学会でする話

- 星団はちゃんと星の質量分布と進化とかちゃんといれて計算したい
- 親銀河は十分な粒子数を使いたい

星団は精度が高い直接計算で独立時間刻み

親銀河はツリーコード

全体としてつじつまがあった計算コードを作って計算したい。  
ヨーロッパで数グループが似たようなことに挑戦中。実は上手くいったところはない結構難しいらしい話。

計算スキームの話をちょっとだけ

# 独立時間刻み

重力多体問題: 原理的には単に大規模な常微分方程式の初期値問題

ナイーブに考えると、今まで議論してきたいろんな公式がライブラリであるので、それを使えば済みそうな気がする。それだけで済むならこの講義の半分はいらぬ。

済まない理由:

- 粒子によって非常に大きく軌道のタイムスケールが違ふことがある
- 連星とかそういったものができる

# 計算量への影響

単純な可変時間刻みでは計算量が大きくなる。

理由：  
タイムステップの分布がべき乗的なテイルをもつようになる。  
このため、粒子数が増えるに従って、タイムステップが短くなる。

# 対応

- 粒子毎に時間刻みをバラバラに変化させる。(独立時間刻み)
- 2体衝突、連星は座標変換して扱う。

# 独立時間刻みの原理

粒子毎にばらばらの時刻  $t_i$  と時間ステップ  $\Delta t_i$  を与える

1.  $t_i + \Delta t_i$  が最小の粒子を選ぶ。
2. その粒子の軌道を新しい時刻まで積分する。
3. その粒子の新しい時間刻みを決める。
4. ステップ 1 に戻る。

問題:ある粒子の時刻  $t_i + \Delta t_i$  で他の粒子の位置が必要

# 他の粒子の位置の計算

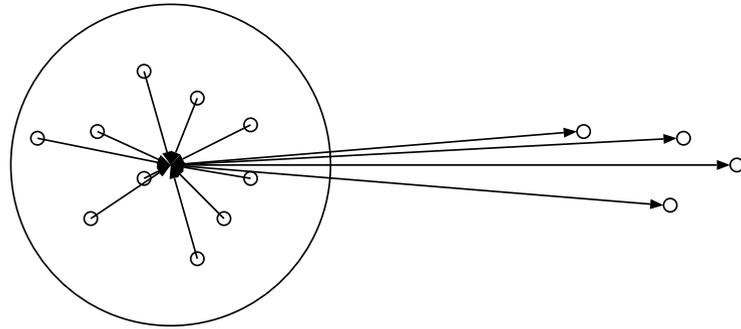
時間刻み可変の「予測子」を使えば問題ない  
つまり、

- 各粒子の時間積分公式としては、可変ステップの線形多段階法をPECモードで使う。
- ある粒子の新しい時刻での加速度を計算するには、他の粒子のその時刻での位置を予測子を使って予測する。

ということになる。

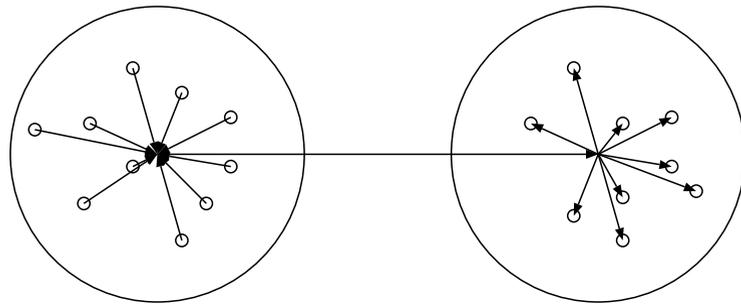
# ツリー法、FMMの基本的発想

遠くの粒子  
からの力は  
弱い



Tree

まとめて計  
算できな  
いか？



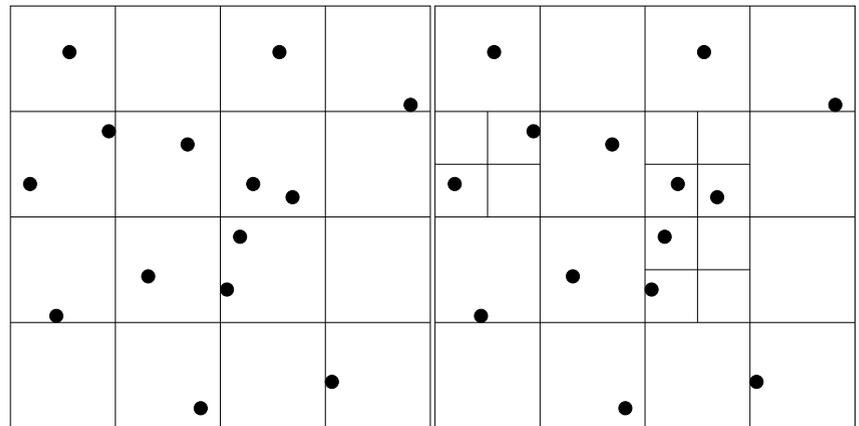
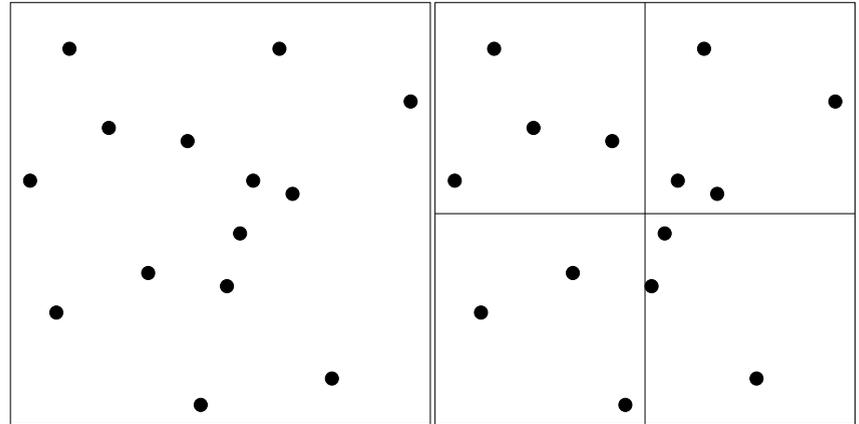
FMM

- ツリー：力を及ぼすほうだけをまとめて評価
- FMM：力を受けるほうもまとめて評価

# どうやってまとめるか？ — ツリー法の場合

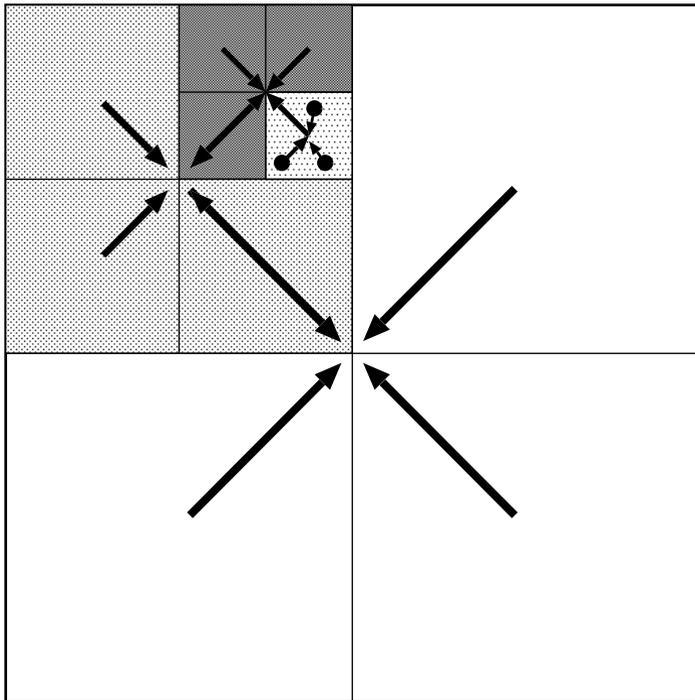
階層的なツリー構造を使う。

- まず、全体が入るセルを作る
- それを再帰的に 8 (2次元なら 4) 分割する
- 中の粒子がある数以下になったら止める (上の例では 1 個)



# 多重極展開の構成

まず、ツリーの各セルのなかの粒子がつくるポテンシャルの多重極展開を計算する。

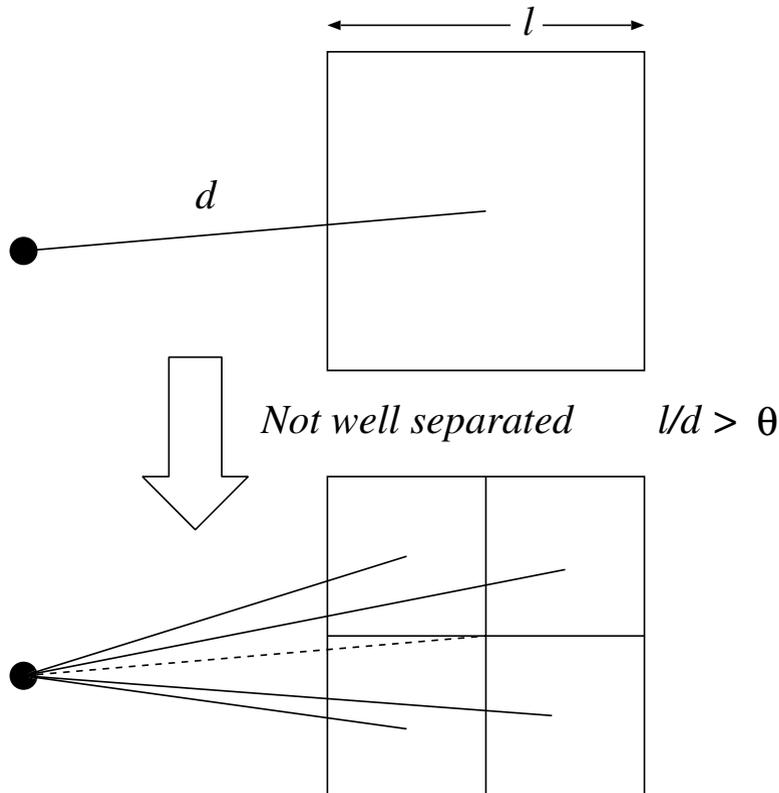


- 最下層のセル: そのなかの粒子が作るポテンシャルを多重極展開
- それ以外: 子セルの多重極展開の展開中心をシフトして加算

下から順に計算していけばよい。  
計算量は  $O(N)$ 。展開をシフトする式はかなり複雑。

# ツリー法での力の計算

再帰的な形に表現すると格好がいい。



- 十分に離れている: 重心(あるいは多重極展開)からの力
- そうでない: 子ノードからの力の合計

系全体からの力 = ルートからの力

# 独立時間刻みとツリーを組み合わせる

計算精度低くてよければ簡単。

星団内部は高精度で、とか思うとややこしい。

藤井さんが使った方法: 最近の惑星系計算で使われている MVS (混合変数シンプレクティック法) の考え方を拡張したもの。形式的には星団の内部自由度のハミルトニアンとそれ以外に分けて、それに MVS の考え方を使う。

# シンプレクティック公式の話

単純なシンプレクティック公式であるリープフロッグの基本的な考え:

$$H = T(p) + V(q) \quad (1)$$

に対して、 $p$  に対する以下の変換

$$p \leftarrow p - \Delta t \frac{\partial H}{\partial q} \quad (2)$$

と  $q$  に対する同様な変換がそれぞれシンプレクティックなので、それらを順番に適用したのもシンプレクティックになるというもの。

# 摂動ケプラー問題

摂動をうけたケプラー問題のハミルトニアン:

$$H = T(p) + V_1(q) + V_2(q) \quad (3)$$

惑星系なら  $V_1$  が太陽からの重力で、 $V_2$  は自分以外の惑星からの寄与。

このとき

$$H_1 = T(p) + V_1(q) \quad (4)$$

の解はそれ自体シンプレクティックであり、また  $V_2$  だけを考えて

$$p \leftarrow p - \Delta t \frac{\partial V_2}{\partial q} \quad (5)$$

というマッピングもシンプレクティックである。従って、この2つを組み合わせて積分公式をつくることができる。

# 解釈

リープフロッグ:  $x \leftarrow x + \Delta t v$  と直線で動かす

MVS: ポテンシャル  $V_1$  に沿って動かす

ケプラー問題は解析的に解けるので、このようなやり方で太陽中心の軌道を極めて高精度に積分できる。

# 星団の軌道進化への拡張

親銀河の粒子: 普通に時間刻み一定のツリーコード。

星団の粒子:

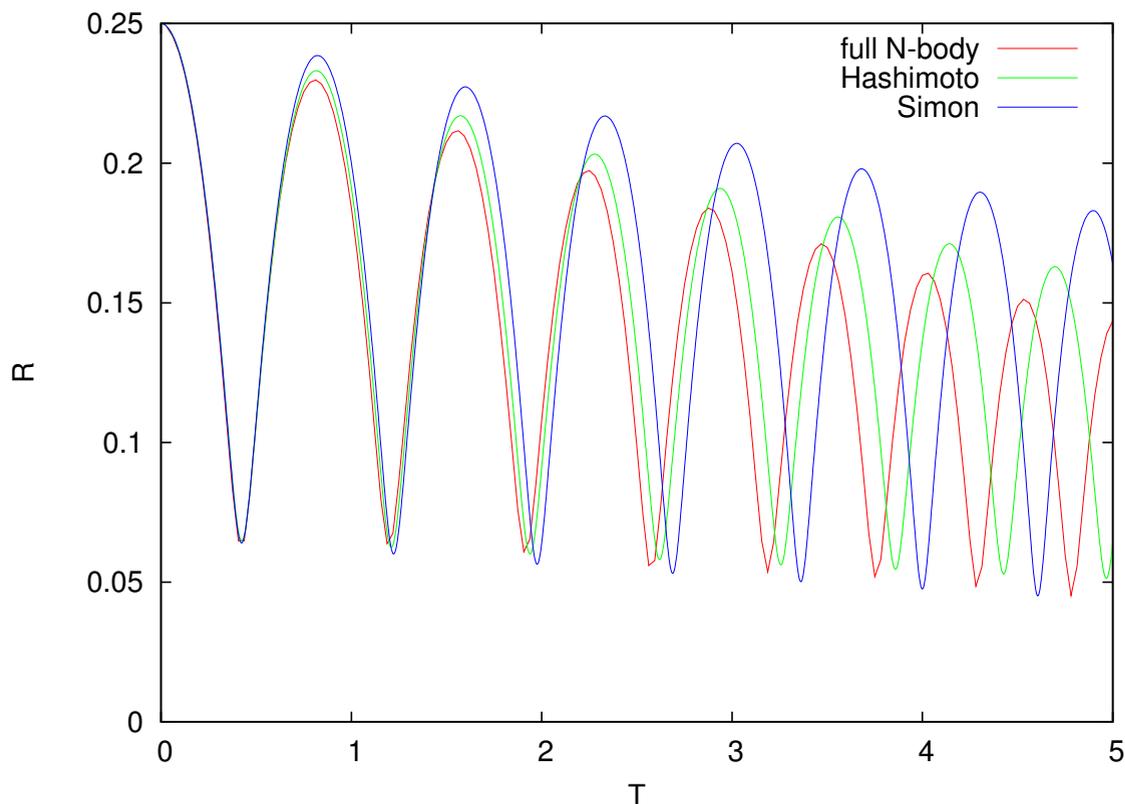
親銀河の粒子からの力は上のツリーコードでそのまま計算。

時間刻み一定、軌道積分公式はリーブフロッグ。つまり、上の時間間隔で速度を普通に更新。

星団内部は独立時間刻み。但し、最大時間刻みが上のツリーコードの時間刻みにそろえるようにする。

やってみたら結構上手くいった。

# 計算結果の例



R:0.25 が 5pc 程度。線が沢山あるのは、今回の計算と、力学的摩擦を手でいれた計算2つ。

微妙な違いかもしれないけどフル  $N$  体のほうが速く落ちる。

# IMBH の軌道進化

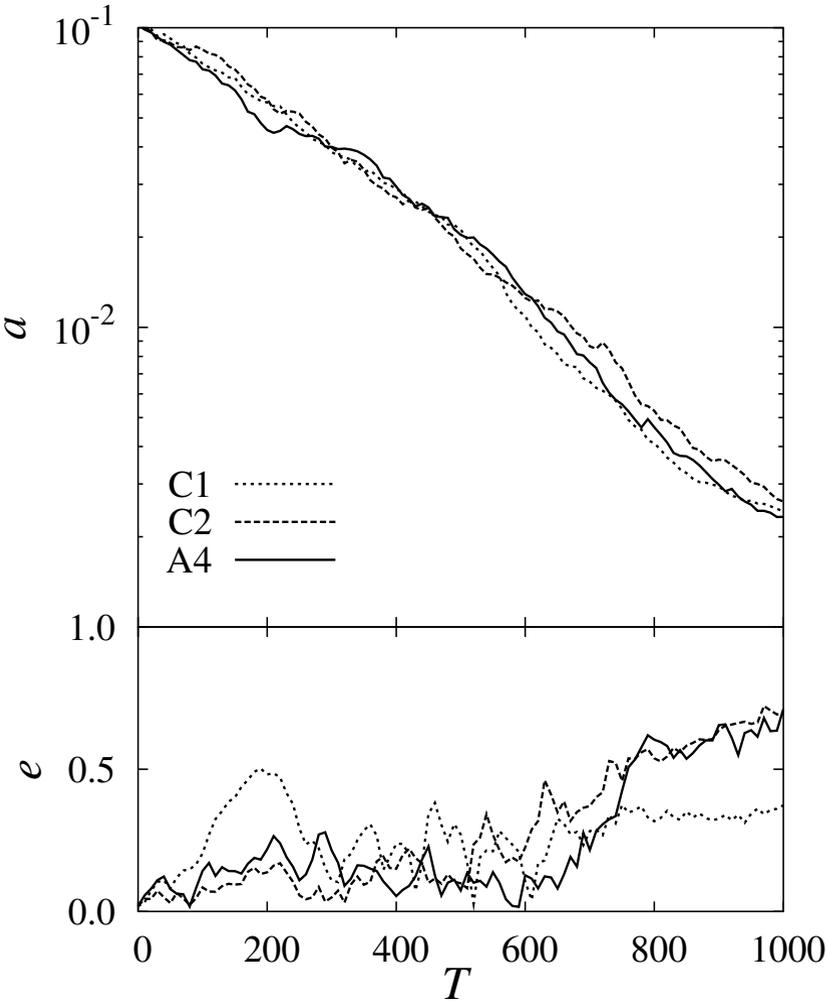
- SMBH と IMBH は合体するか？
- IRS13E (が IMBH だとして) の運命
- SMBH 同士は2体では合体しないけど、、、

Matsubayashi et al 2005 (ほぼアクセプト)

# モデル計算

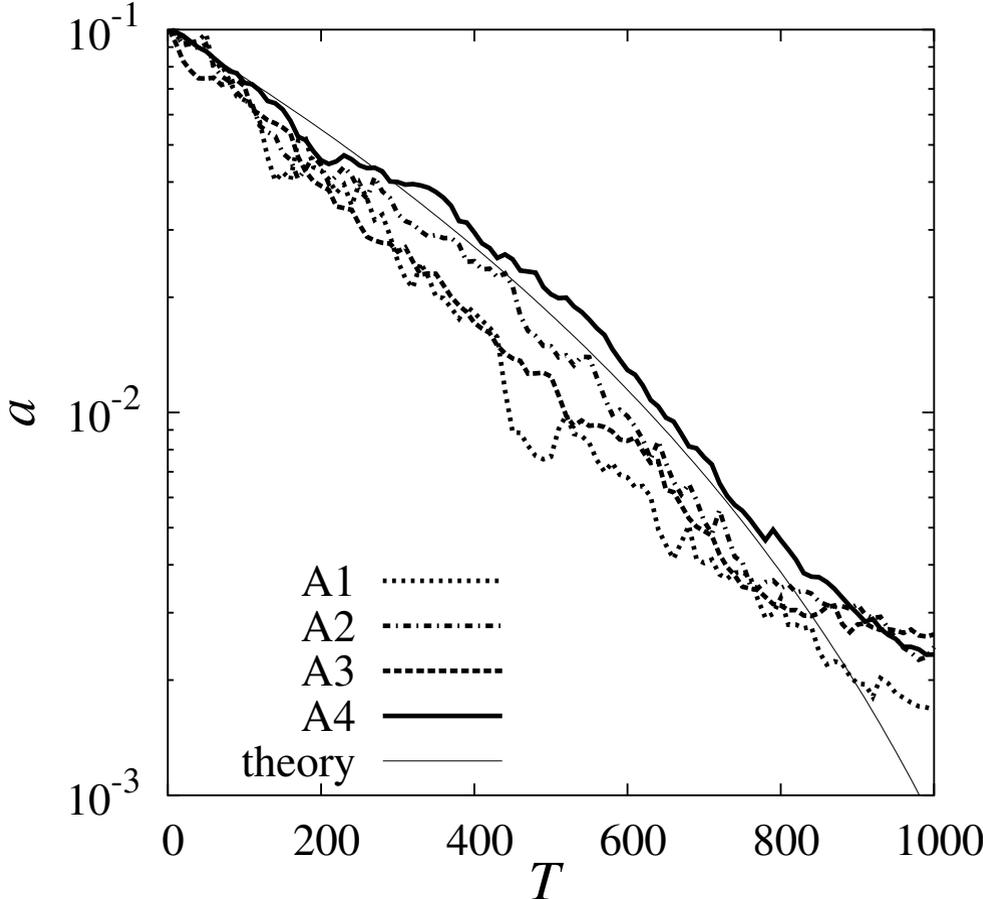
- ほぼ銀河中心みたいな Bahcall-Wolf カスプを作る
- SMBH  $3 \times 10^6 M_{\odot}$
- IMBH  $3 \times 10^3 M_{\odot}$
- 単位系: 長さ大体 1pc, 時間 4600 年
- 星の質量は最低なので  $3M_{\odot}$

# 軌道進化



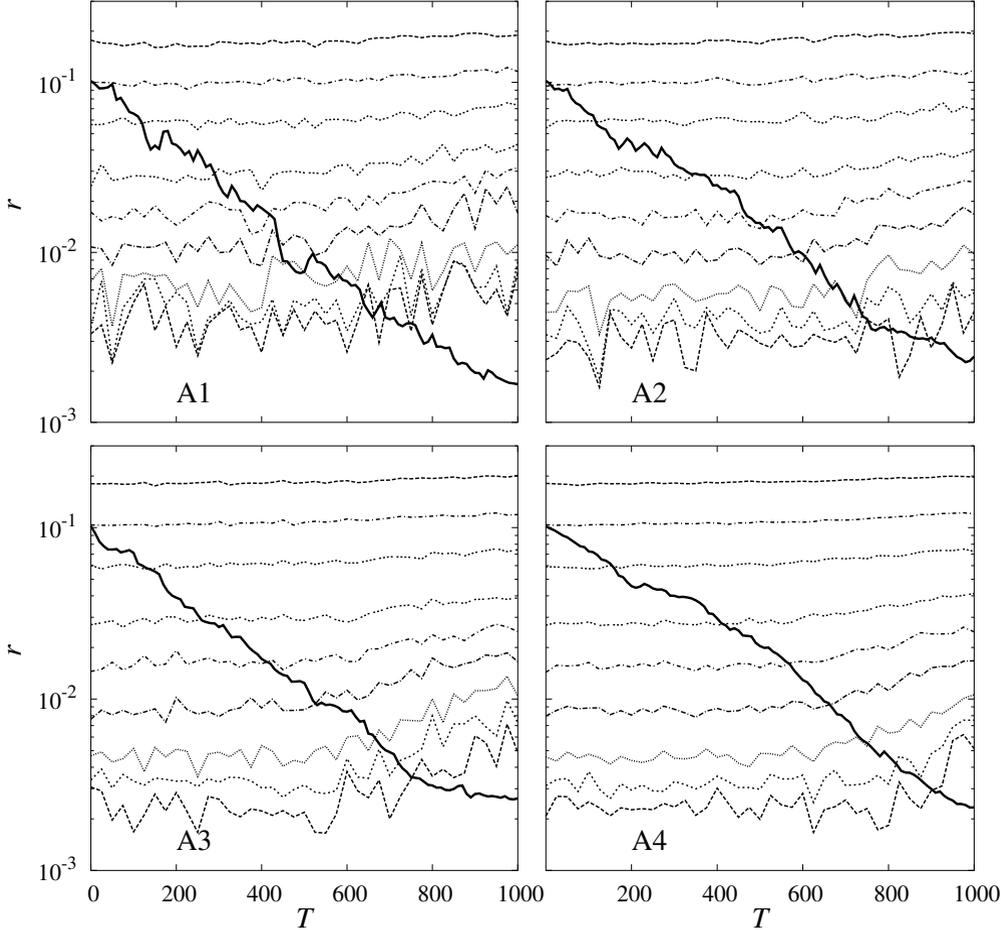
落ちるけど遅くなる

# 軌道進化。解析解との比較



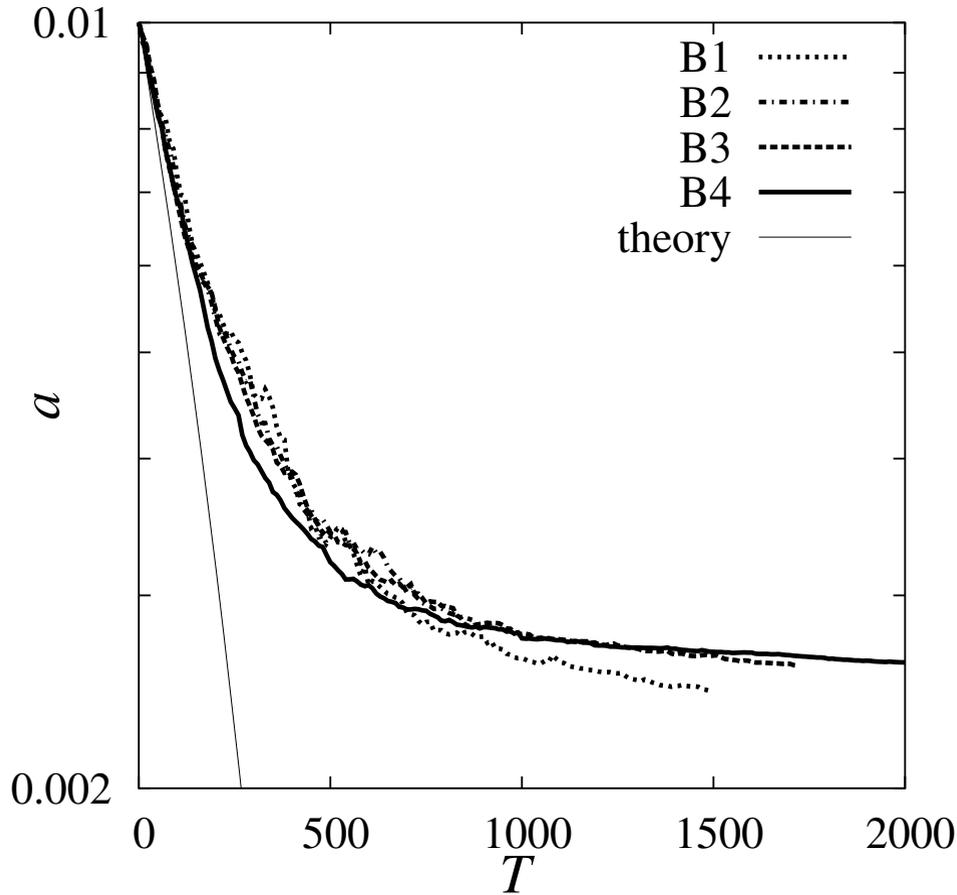
後のほうで遅くなる

# 軌道進化。質量分布の変換



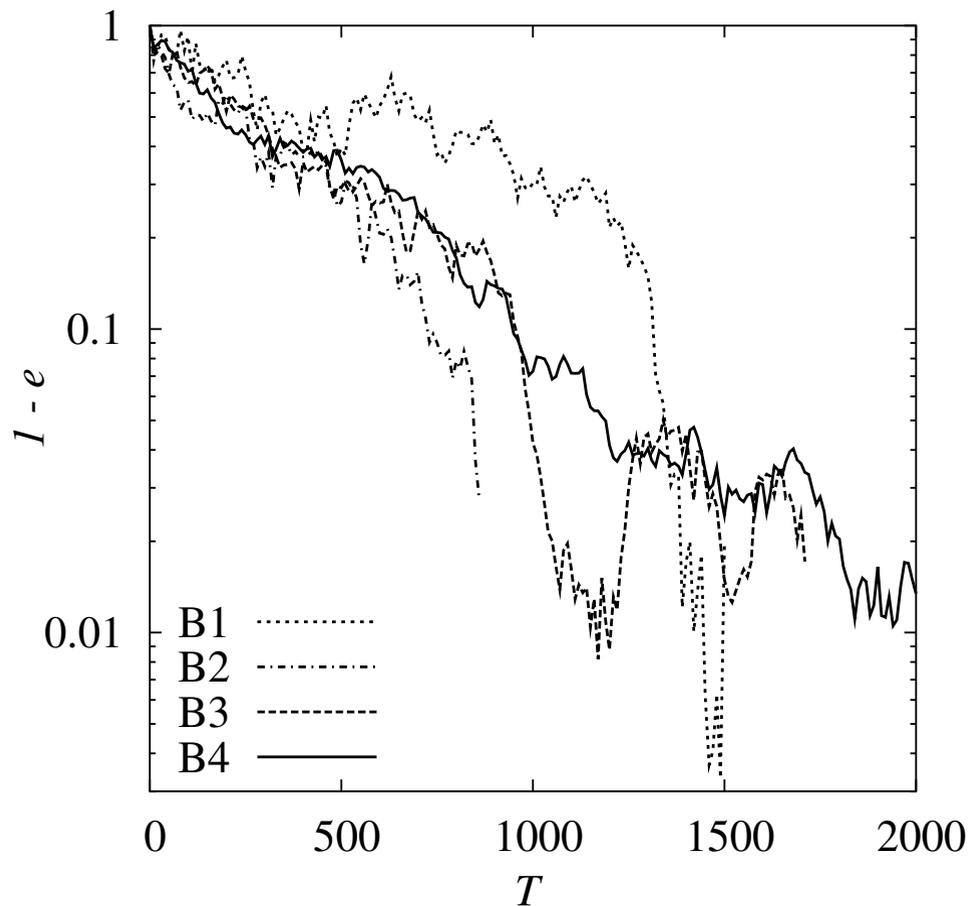
内側のほうは広がる  
要するに、周りに星  
が無くなる  
Loss-cone depletion  
進化しなくなる

# 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

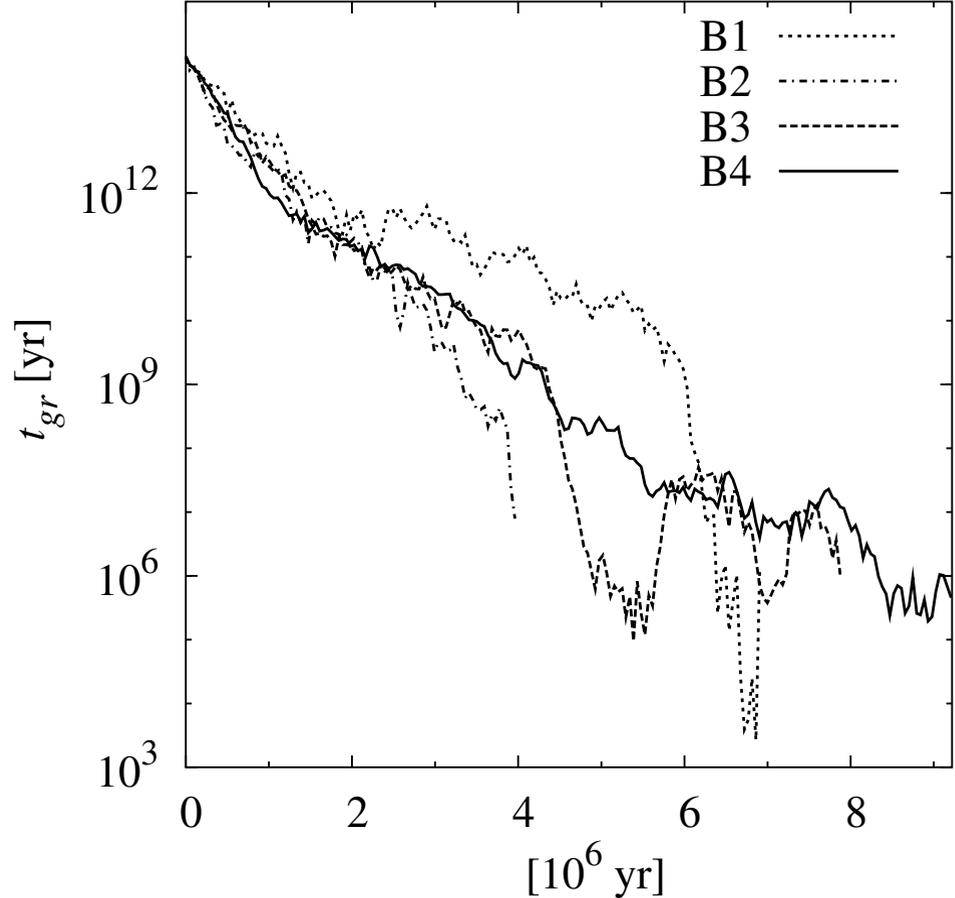


軌道半径が進化しなくなると離心率があがる

これはSMBH 連星では起きない

Fukushige et al 1992 で考えたこと？

# 重力波タイムスケール



結構短くなる

# まとめ

- 最近の観測の進歩により、銀河中心の恒星系がどうやってできたかは良くわからなくなった。
- 特に若い星の起源、ディスクになっている理由についてはあまりよい理論モデルがない。
- ある程度遠くでできた星団が力学的摩擦で落ちてきた、というモデルは色々良い性質を持つが、軌道進化のタイムスケール等問題もある。
- でも、若い星がその場でガス円盤からできた、というのよりは問題が少なそうな気がする。

# おまけ

シミュレーションはどんなことができるか？

GRAPE-6 での直接計算

SMBH-IMBH-回りの星、という系を完全に star-by-star  
でシミュレーションする (松林他 2006)

GRAPE-DR and/or direct+tree ハイブリッド

銀河中心 10pc くらいなら star-by-star ベースでできる。

2体緩和による進化をちゃんといれて今見えてない暗い星の  
分布を理論的に予言できる？

# おまけ 2

銀河中心:理論屋には夢のような領域

- 星の軌道が見える
- 軌道の変化もみえそう。緩和過程

どんなものを観測して欲しいか？

- とにかく暗い星まで見る
- 3次元的な速度

# おまけ 2

銀河中心:理論屋には夢のような領域

- 星の軌道が見える
- 軌道の変化もみえそう。緩和過程

どんなものを観測して欲しいか？

- とにかく暗い星まで見る
- 3次元的な速度

## 21世紀は精密アストロメトリの時代