SgrA* 近くの恒星系力学

牧野淳一郎

東京工業大学理工学研究科

理学研究流動機構

『銀河系中心ブラックホール 2013』研究会 2012/11/8

概要

1. 観測でわかっている (らしい) こと
   - Central Cluster
   - Stellar Disk(s)
   - Stellar Disk の輝度関数
2. 理論モデルについて少し
   - その場形成モデル
   - 星団落下モデル
3. 中心カスプと降着円盤
4. まとめ

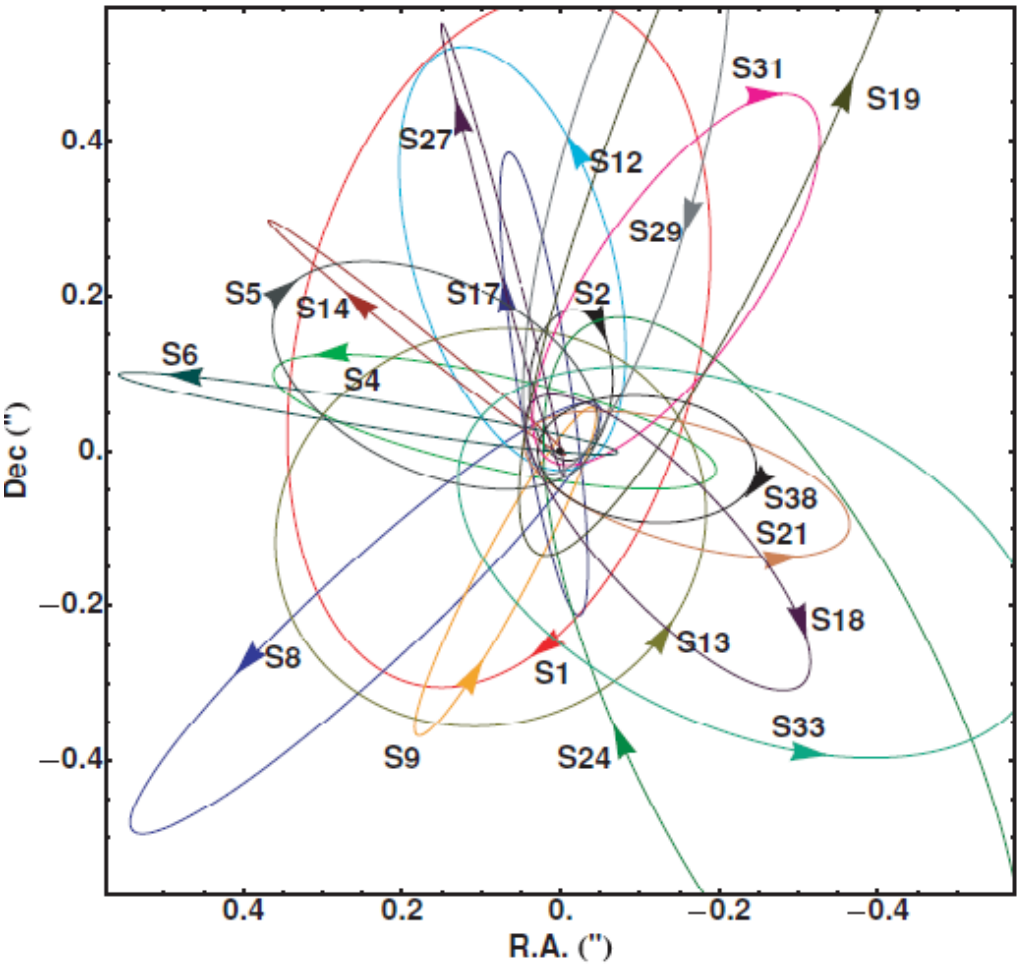
観測でわかっている(らしい)こと

- Central Cluster
- Stellar Disk(s)
- Stellar Disk の輝度関数

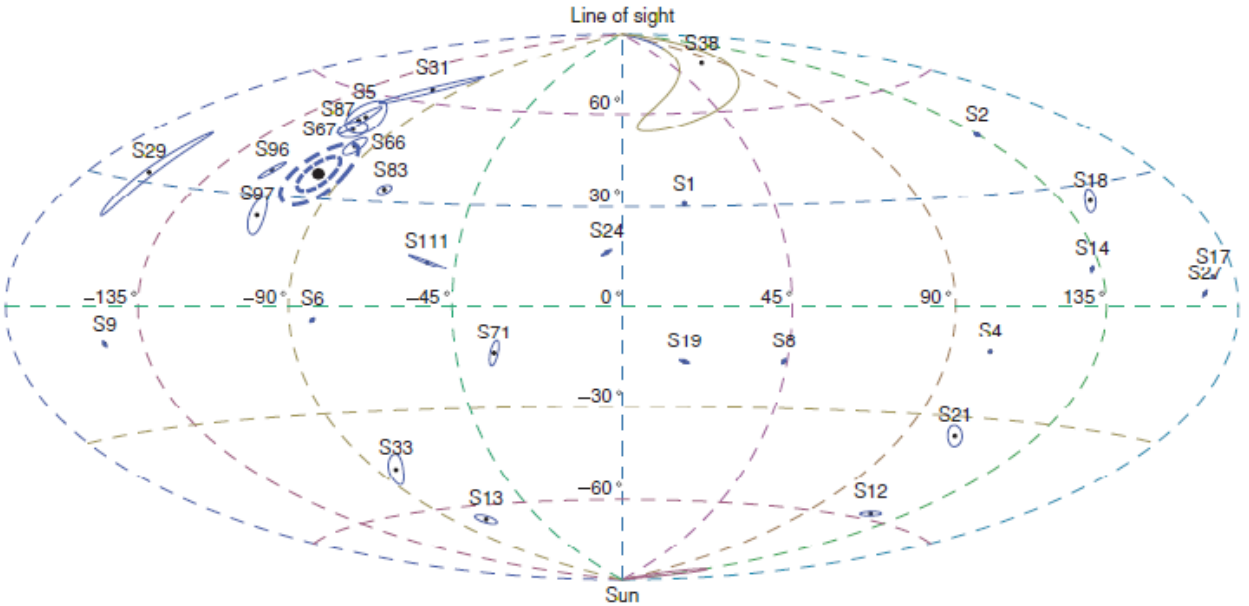
Central Stars

Gillessen et al. 2009

26 個の星について軌道決定できた。



軌道面(というか軸)の分布



66, 67 83, 87, 96, 97 は前から時計回りディスクの一部と言われていたもの。(5, 31 は？)

軌道要素

	a(”)	e
(5	0.25	0.85)
66	1.21	0.18
67	1.1	0.37
83	2.79	0.66
87	1.26	0.42
96	1.55	0.13
97	2.19	0.30

確かに円盤っぽい。

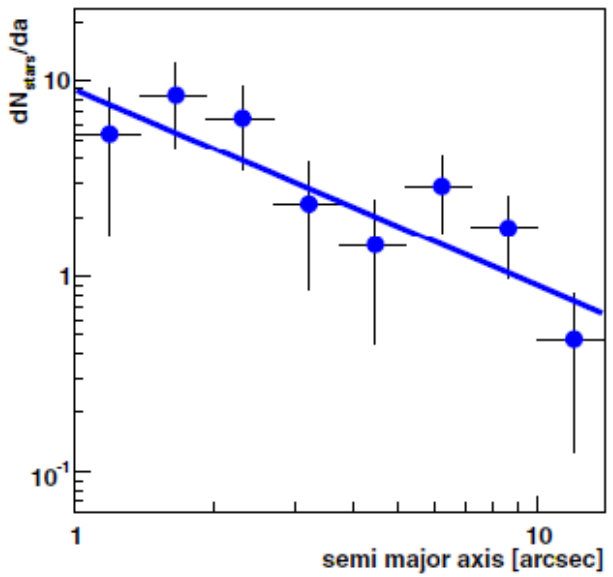
離心率小さい

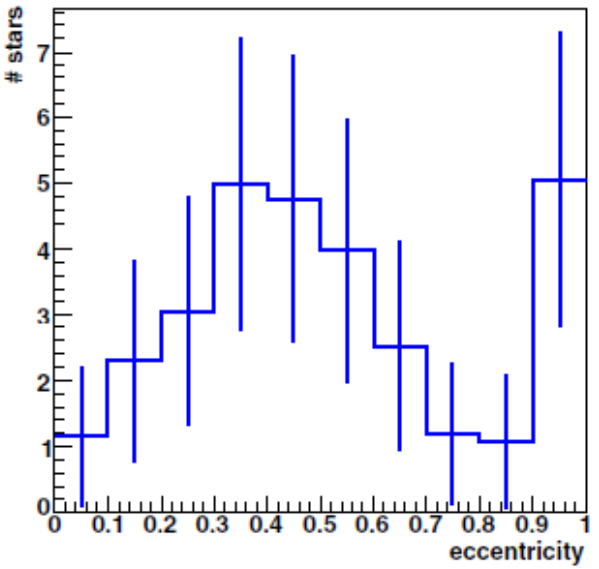
他のサンプルの分布: $n(e) \sim e^{2.6}$,

$n(a) \sim a^{0.9}$

半径 0.1pc (1-3”) くらい

もうちょっと外側まで見ると

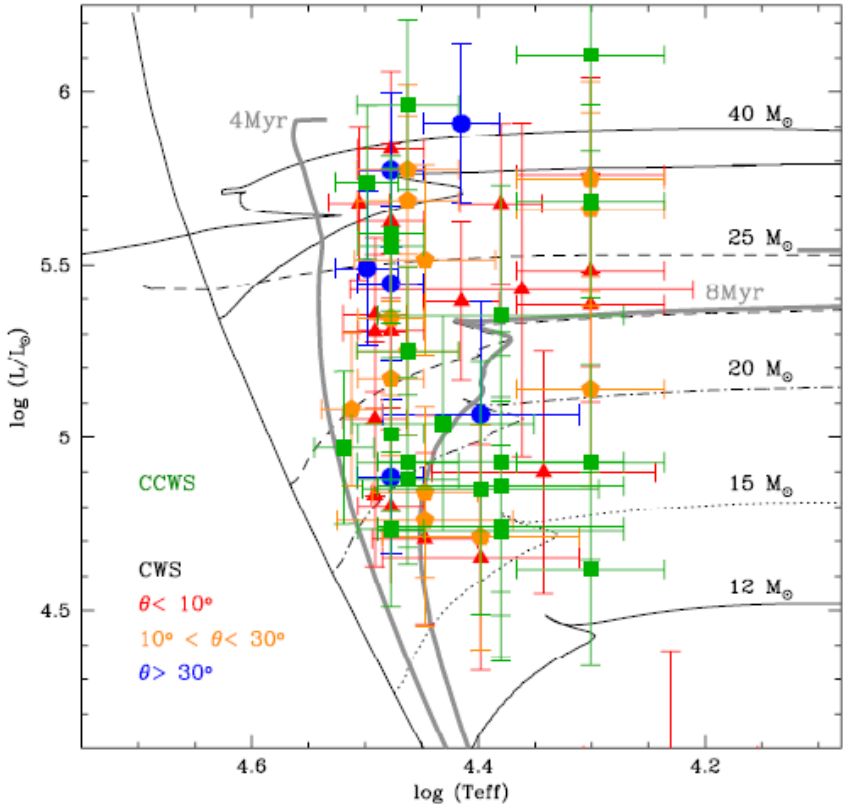




Bartko etal 2009

少なくとも 10 arcsec くらいまではある。

年齢



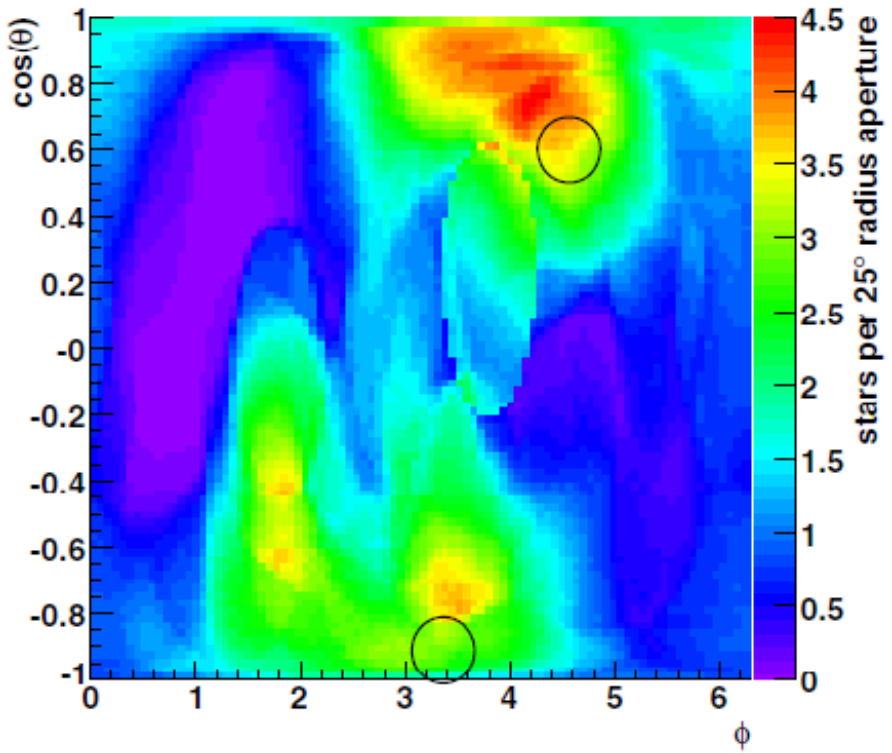
Bartko etal 2009

どれもこれも 4-8Myrs、というのと「矛盾はしない」

緑:逆回転。

赤:順回転、回転軸が近い

逆回転ディスク？



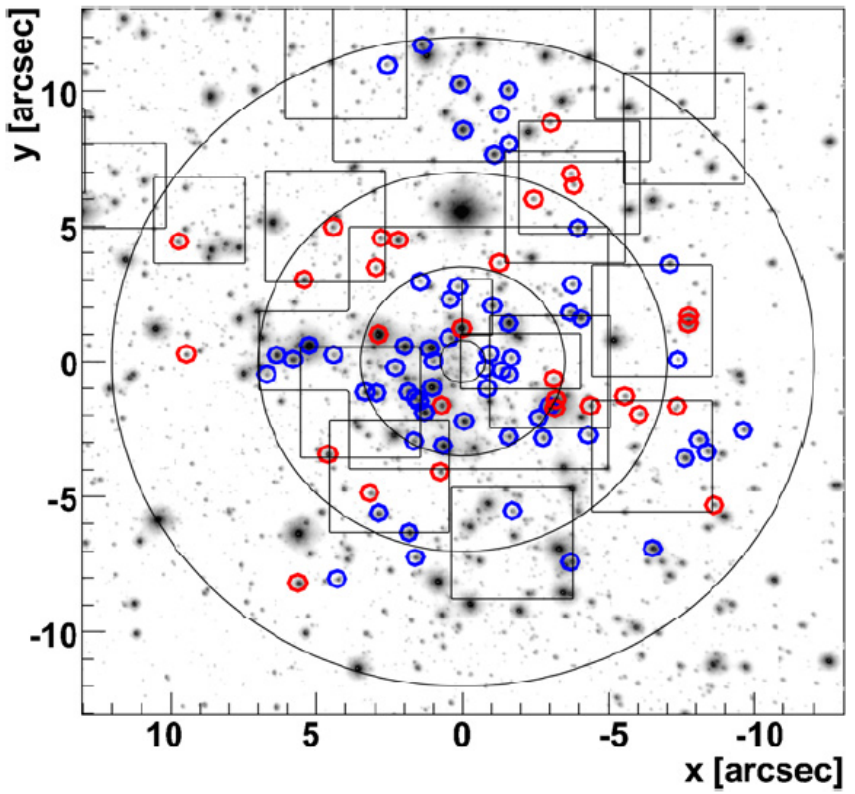
Bartko etal 2009

角運動量の２次元分布

上のが順回転

下にもなんかある？

星自体の分布



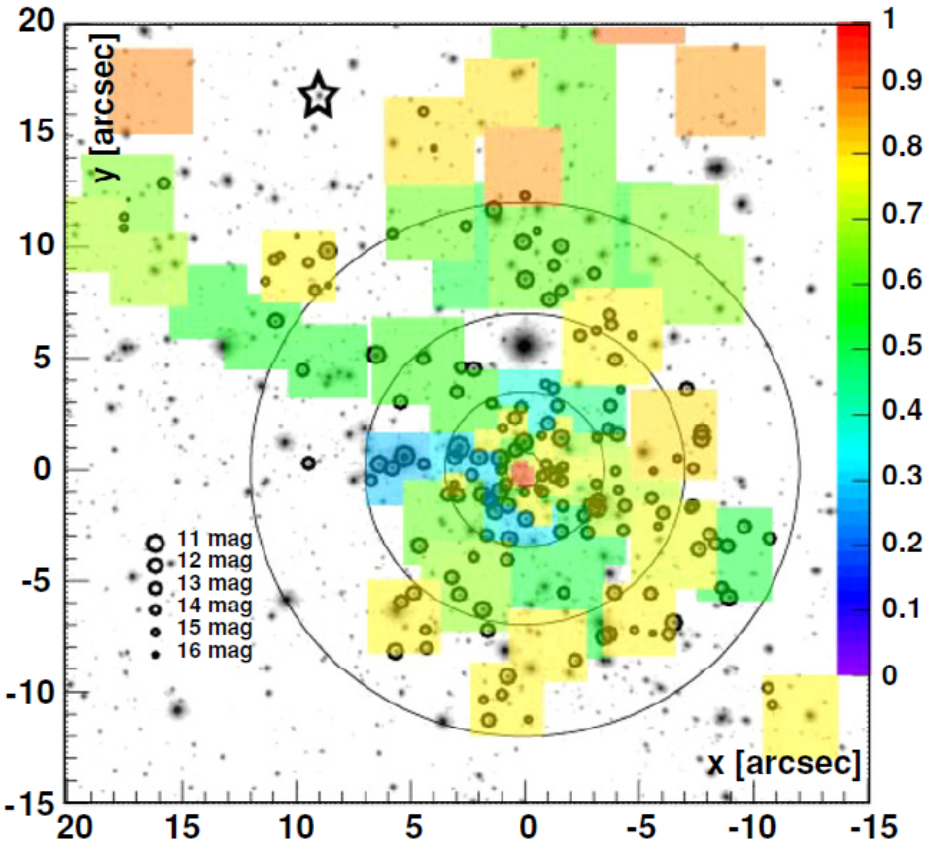
Bartko etal 2009

青:順回転

赤:逆回転

青はまあディスクと言われたらそう思わないこともないけど、、、

もうちょっと外側まで頑張ってみる

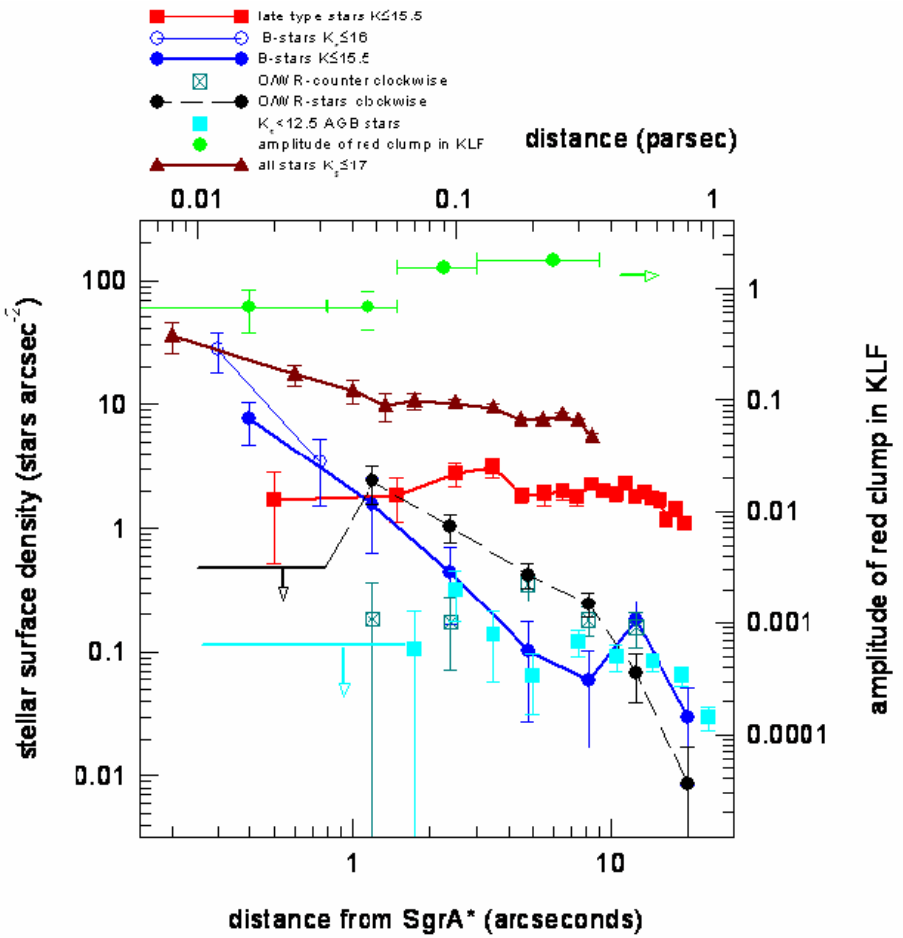


色付き四角が観測したところ (色は completeness)

これから謎な補正をして質量分布を求める。

(角度方向で分布一様と仮定して補正してはいかんと思うけど、、、)

星のタイプ毎に半径方向分布を見ると

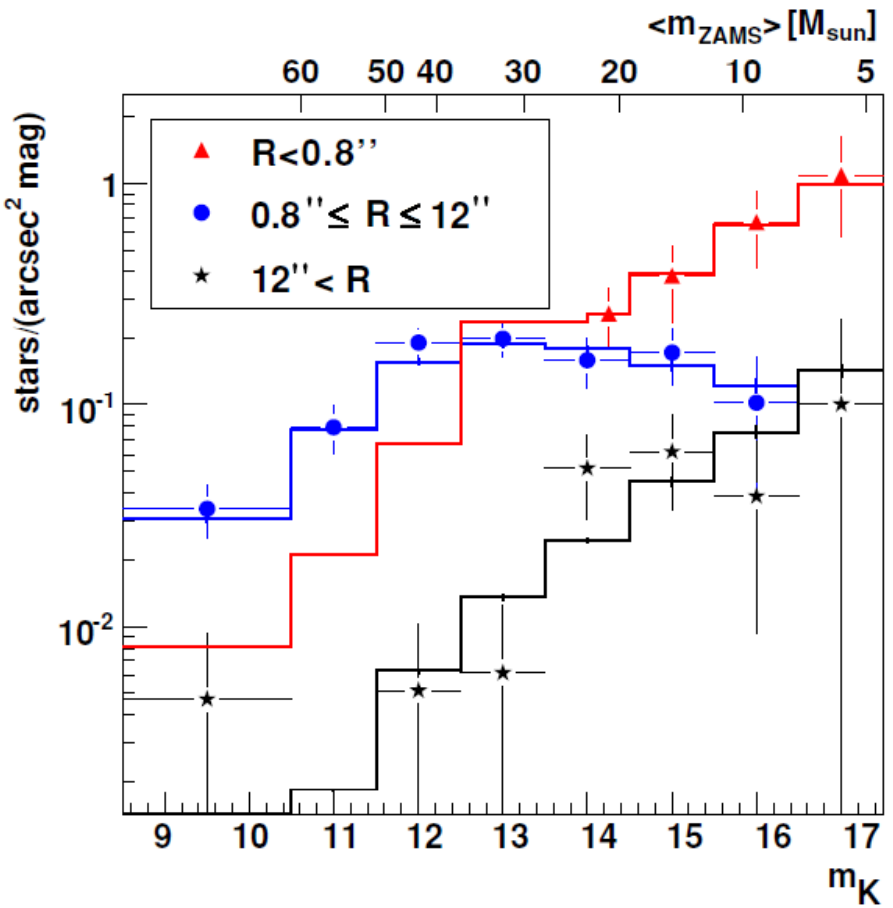


Genzel etal 2010

明るい星は中心に集まってるように見える。

B 型星の表面輝度スロープ: -1.5 くらい。

半径毎の輝度分布にする



(シンボルだけが観測、ヒストグラムはモデル)

1-10” あたりは異様にフラットな輝度分布

もっと内側 (S-stars の領域) はそうでもない

外側も普通

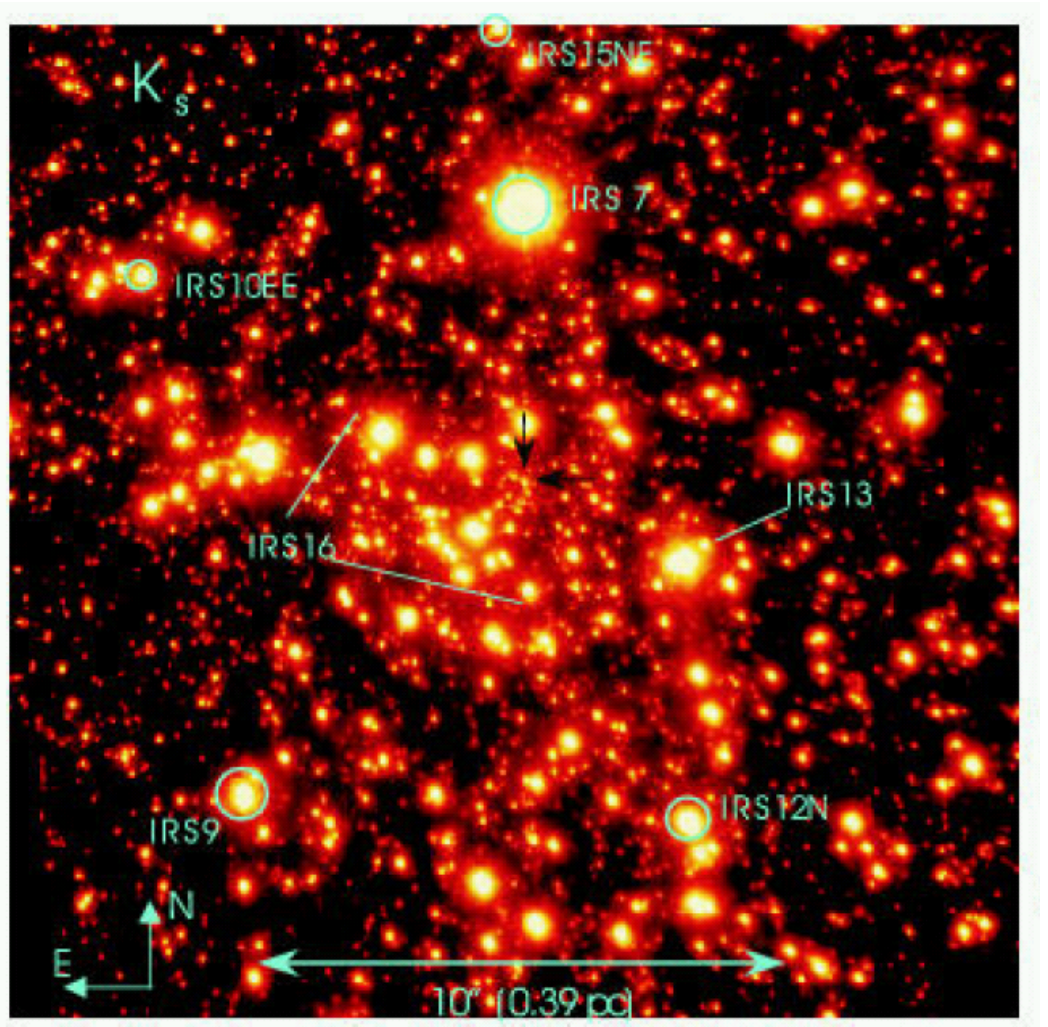
Star Cluster(s)

IRS13E, 16SW はそれぞれ星団らしい (?)

IRS13E: 反時計回りディスク

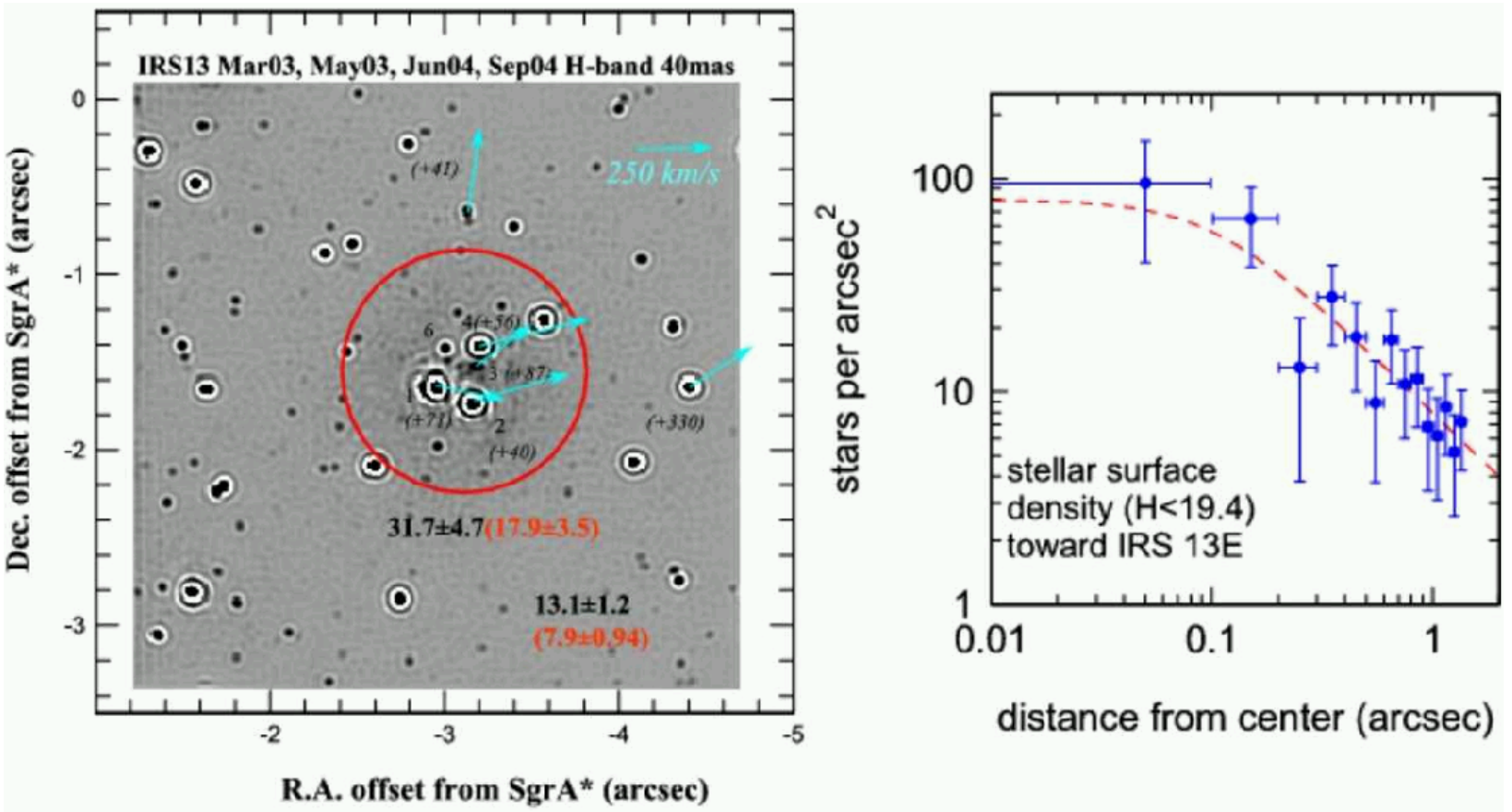
IRS16SW: 時計回りディスク

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。但し、いくつかは星ではないかも？

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。
速度分散 $80\mathrm{km/s}$ くらい。

中間質量ブラックホールがあるとすると $10^4 M_\odot$ 以上でちょっと大きすぎるかも。

まとめると

- 1-10” くらいの星は主にディスク成分
- これらは年齢 4-8 Myrs
- 極端に top-heavy な質量関数を持つ
- B 型星 は S-stars から 15” くらいまで等方分布？

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 & Milosavljevíc 2003)
- 質量関数をどう説明するか？
- S-stars との関係？
- 等方な B 型星？
- ブラックホール成長・ガス供給と関係あるか？

ガスディスクから作る

Milosavljevíc & Loeb 2004

Nayakshin and Sunyaev 2005

Hobbs and Nayakshin 2009

Mapelli et al 2012

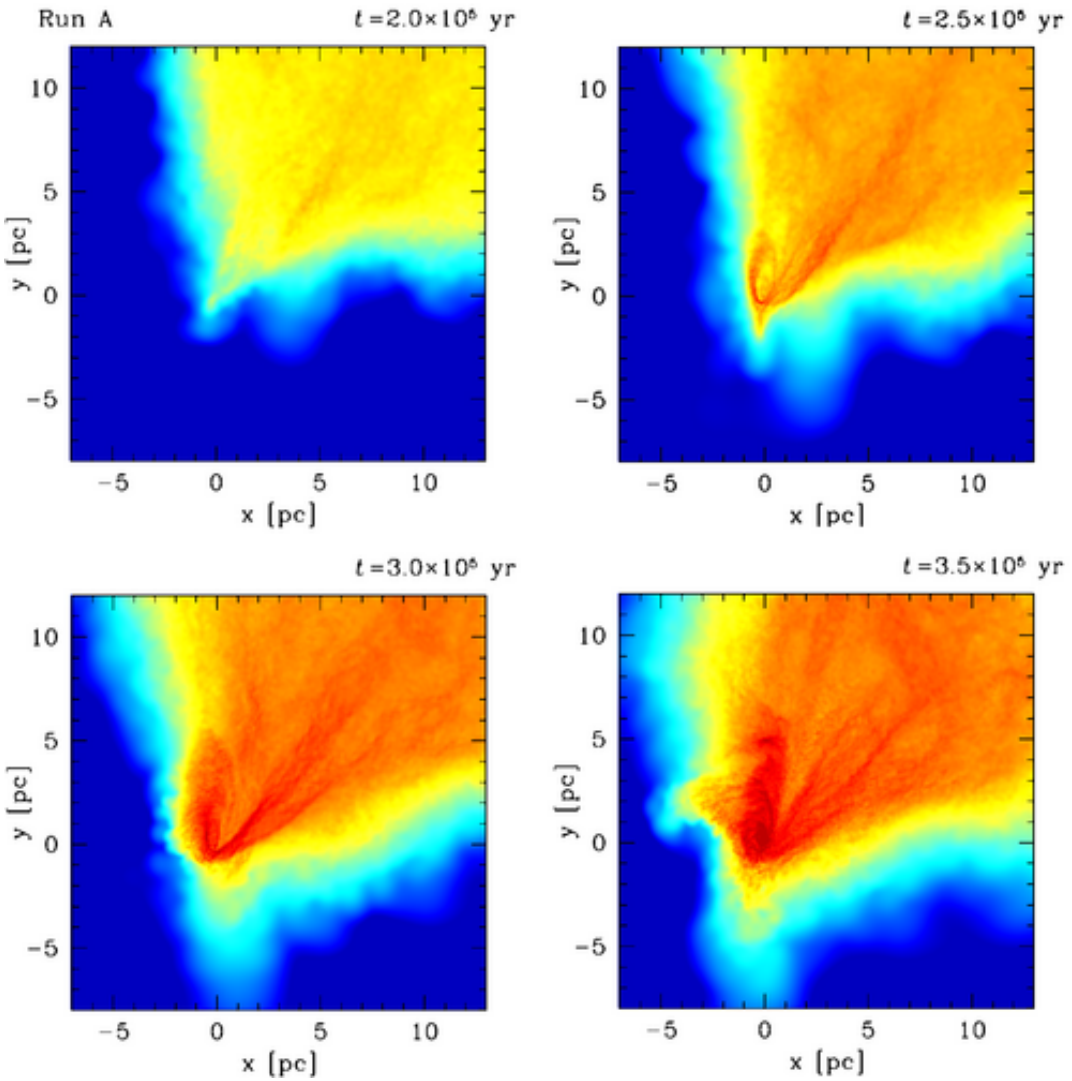
色々アクロバティックな仮定をすればなんでも説明できる

- IMF: こういうところではそういうのができる (仮定)
- 離心率結構大きい: クラウド同士の衝突でそういうディスクが一気にできた
- クラウド同士の衝突だとディスク 2 つとかも説明できるらしい

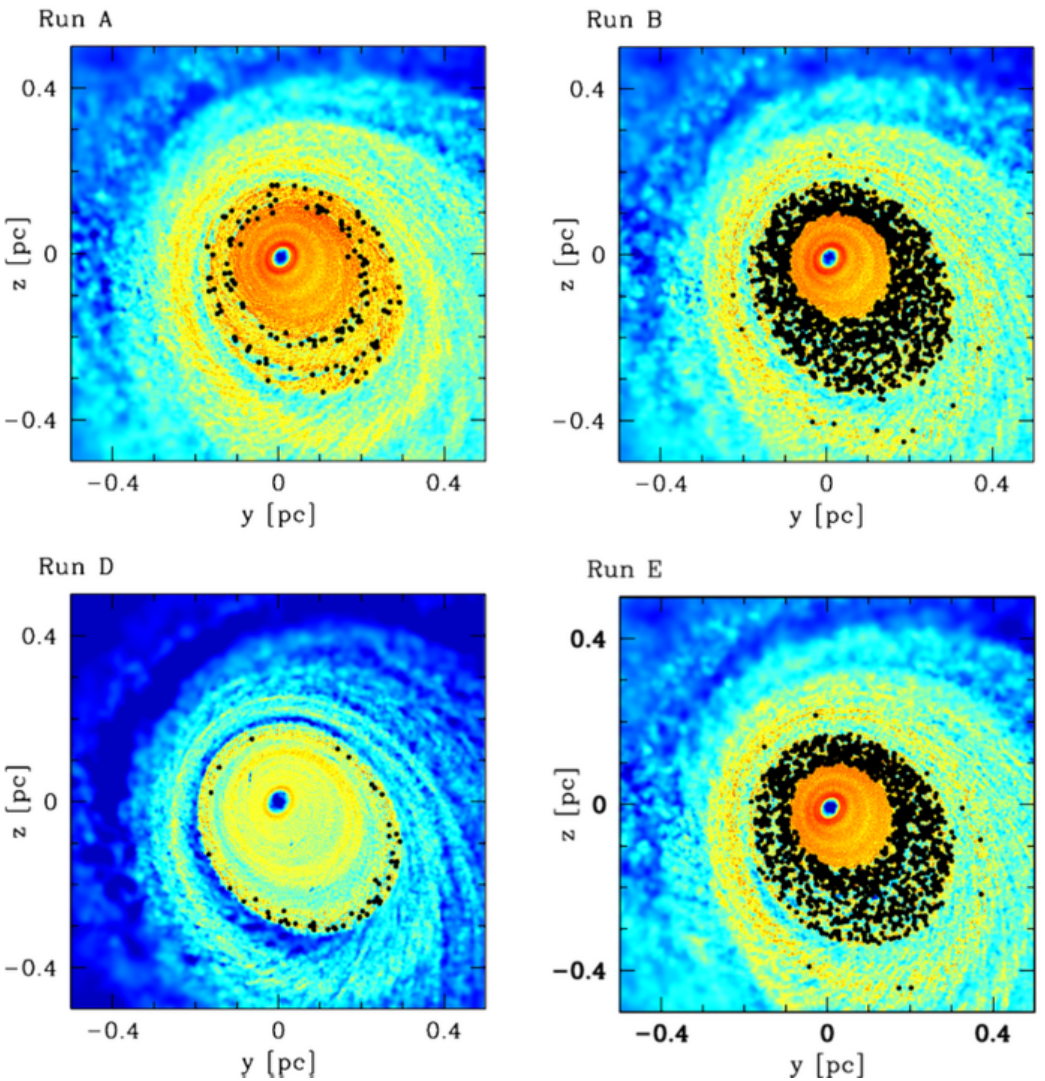
Mapelli et al 2012

- 半径 15pc のガスを 25pc から放物軌道で Sgr A* に落とす。近点 0.01pc
- ガスは 100K 等温か、Cooling 入り。
- 質量は大体 $10^5 M_\odot$

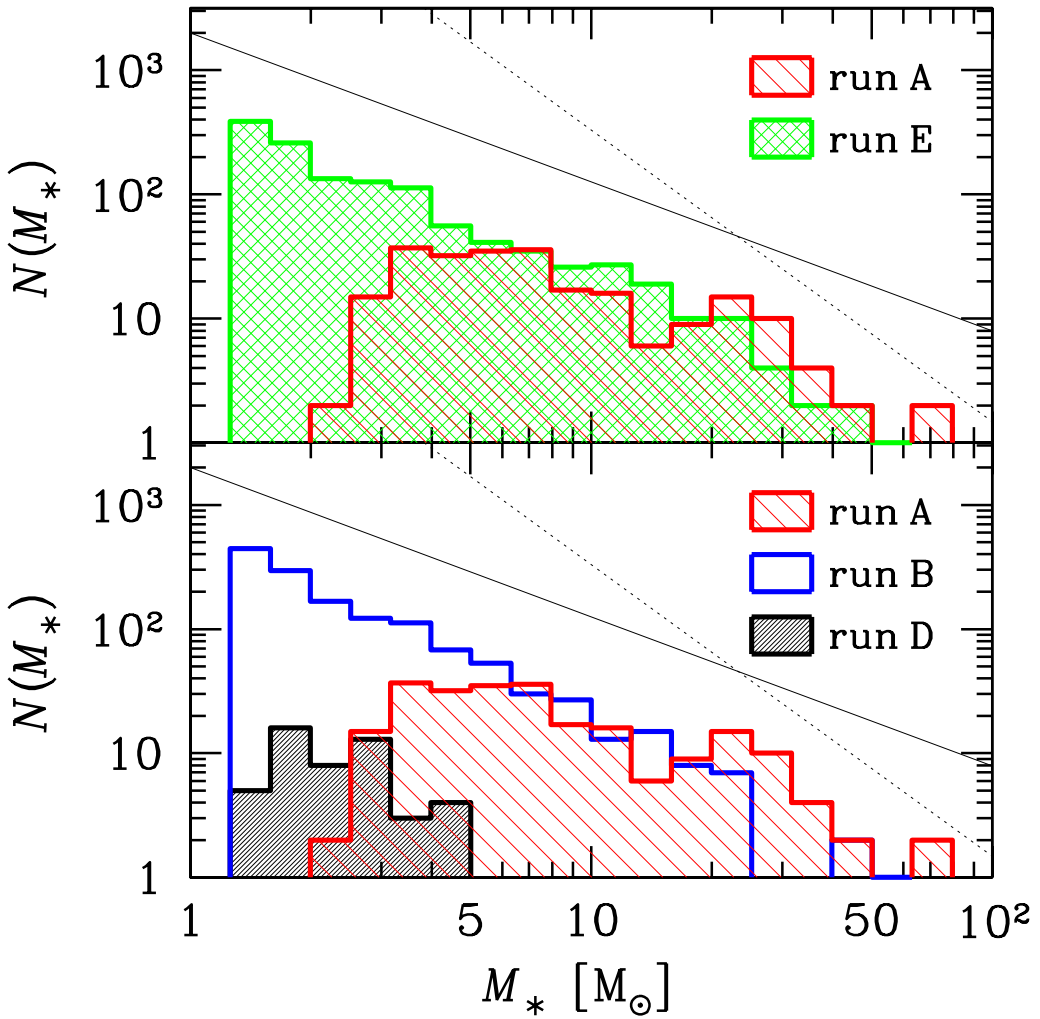
Mapelli et al 2012 ガス運動



Mapelli et al 2012 結果



Mapelli et al 2012 MF

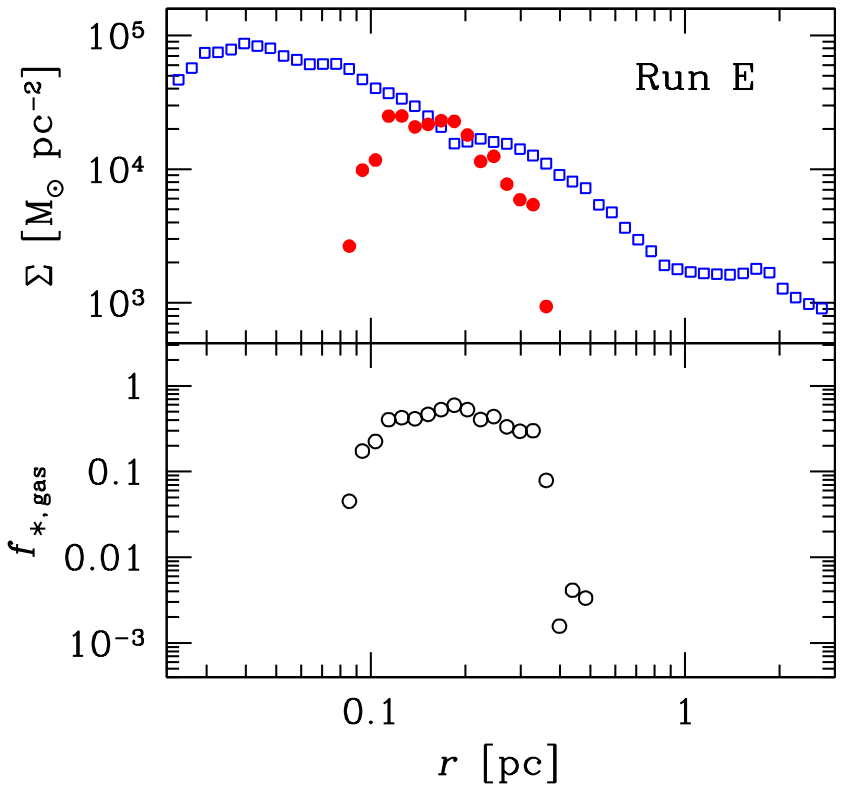


A: 500K

D: 質量小さい

E: Cooling 入り

Mapelli et al 2012 radial prifile



ガスの分布は中心近くまで上がる

できた星は0.1-0.2pc に集中

観測とはこれはあってない

惑星系としてみると不安定なので、この分布が観測されるわけではないが、、、

まとめると

- 巨大ガス雲が非常に小さな角運動量で Sgr A* に落ちれば観測されているリング状の星分布をつくれるかもしれない
- 空間構造は全然あわないが、できてからの力学進化でなんとかなるかも ??

でも、、、

色々無理はある。

- そんなうまいこと 0 に近い角運動量で落ちることができるか？
  - ガス雲の衝突で角運動量失うという理屈はあるが、それではその場で星団ができそう
- MF を観測と合わせるには何故か 500K とかあんまり根拠のない仮定がいる
- 面密度が $10\mathrm{g/cm^2}$ くらい: Optically thick? ($\tau > 10^3$?)

星団を落とす

Hansen & Milosavljevíc 2003

Portegies Zwart et al. 2005

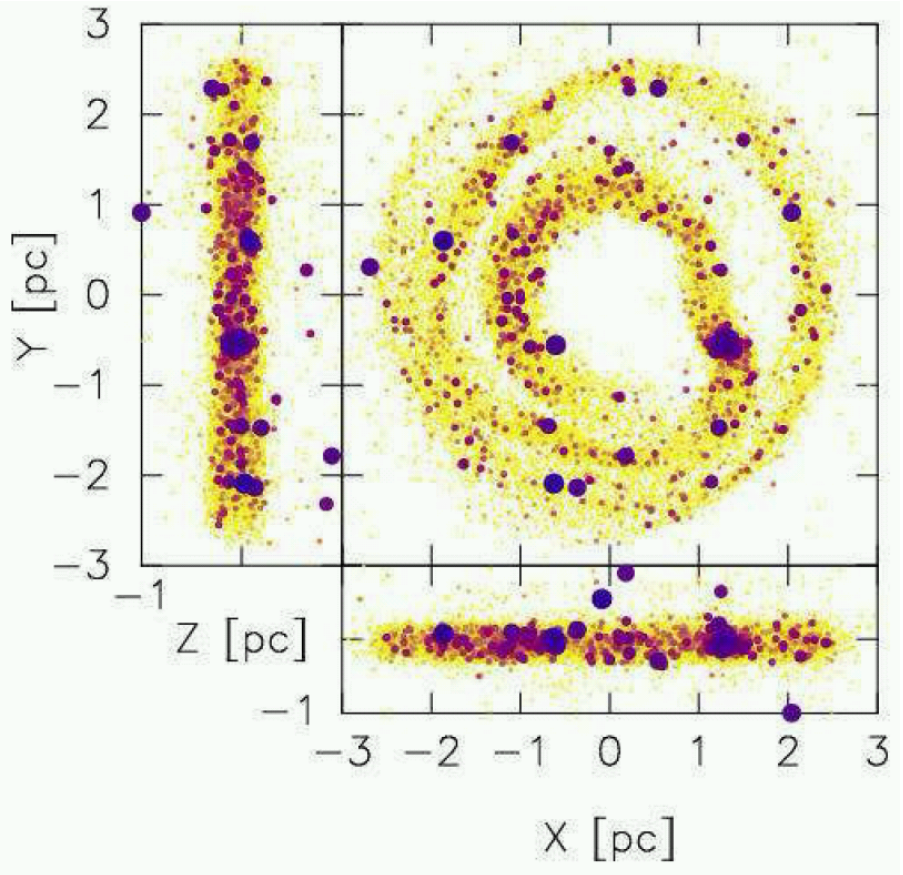
これも色々無理が、、、

- 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 があるとすると、銀河中心近くまで若い星をもってくのは可能
- 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。

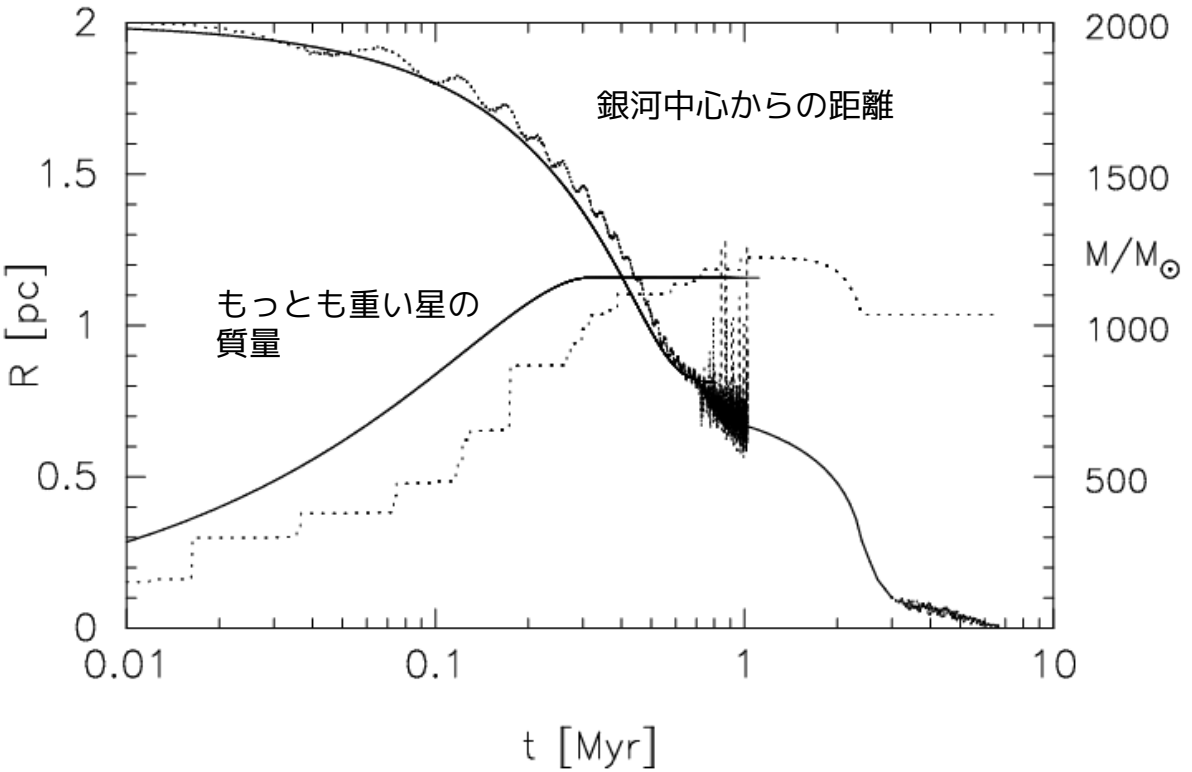
N-body simulation の例

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ろう、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？
- ($10^5 M_\odot$ のクラウドが落ちるのとどっちが不自然かという気もする)

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じゃない** (Arches **の観測**)

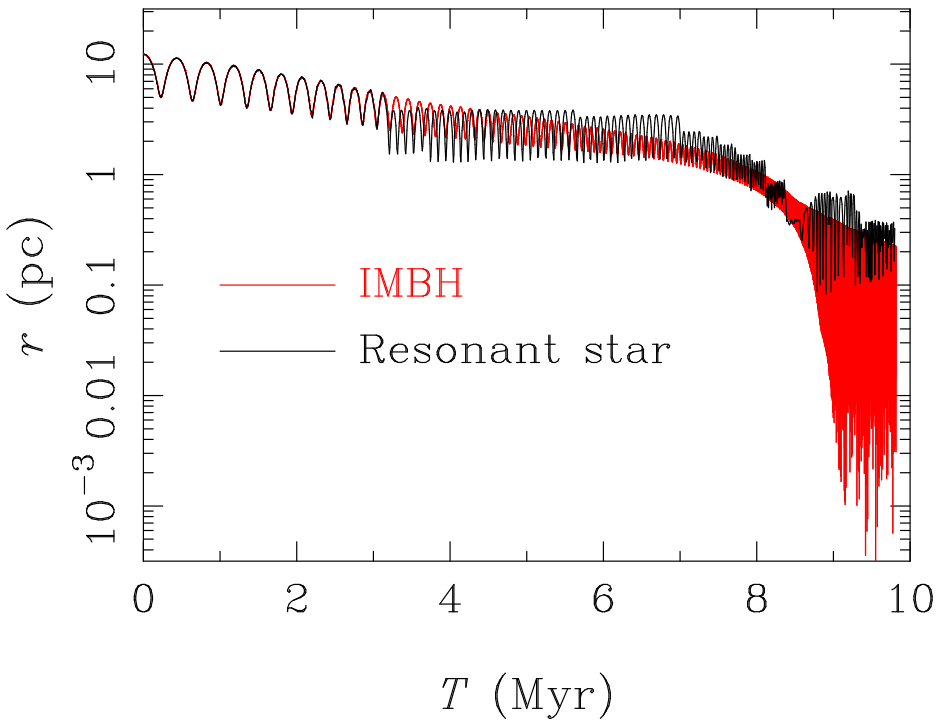
「まるごと」の星団進化計算

- 中心ブラックホールと親銀河の星分布
- 星団の個々の星の軌道、星同士の合体、質量放出、IMBH への進化

をフルに N 体で表現して計算した (Fujii et al 2010)

- ツリー法と直接計算のハイブリッドの新しい計算方法を開発
- 国立天文台の Cray XT4 上で並列化

星団と IMBH の軌道進化



3Myrs くらいで星団は殆ど潮汐破壊

それでも 8Myrs くらいで 1 pc 以内まで落ちてくる

潮汐破壊で星団から「逃げた」星が、BH と 1:1 共鳴にはいって近くまで運ばれるのが結構ある。

ちなみに

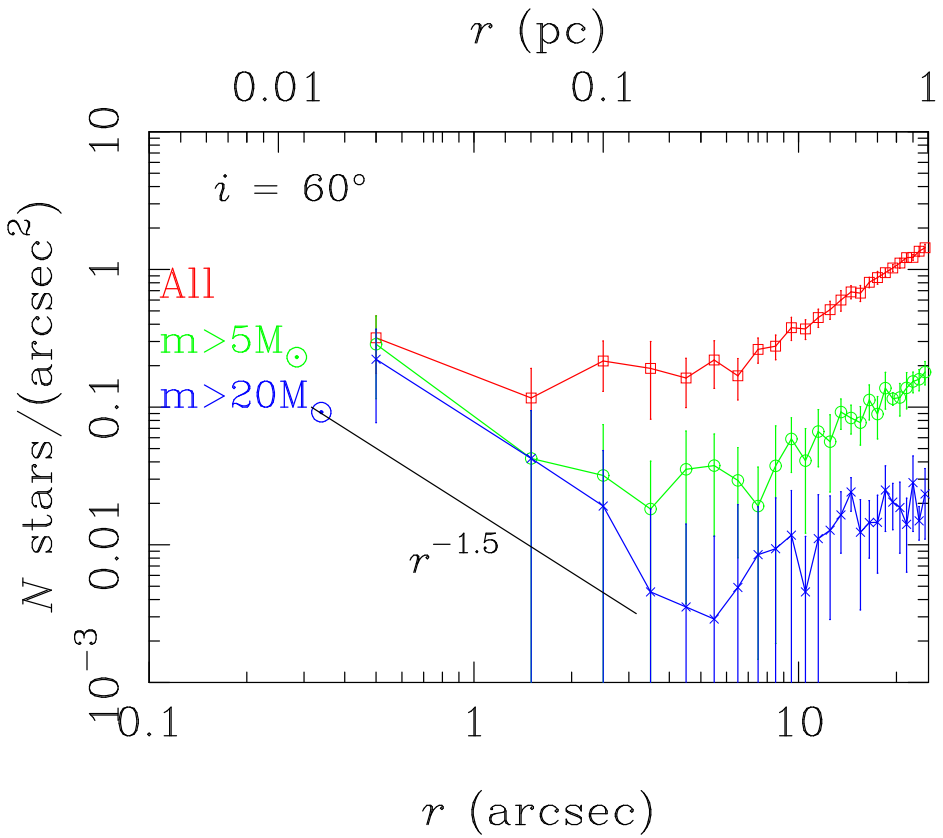
最終段階で IMBH の離心率が非常に大きくなるのは計算間違いではなくて正しい結果。

メカニズムは Iwasawa et al. (2010) が解明

古在機構と IMBH-SMBH バイナリと他の星の近接相互作用の組合せ

大質量連星ブラックホールは合体できる

半径方向分布

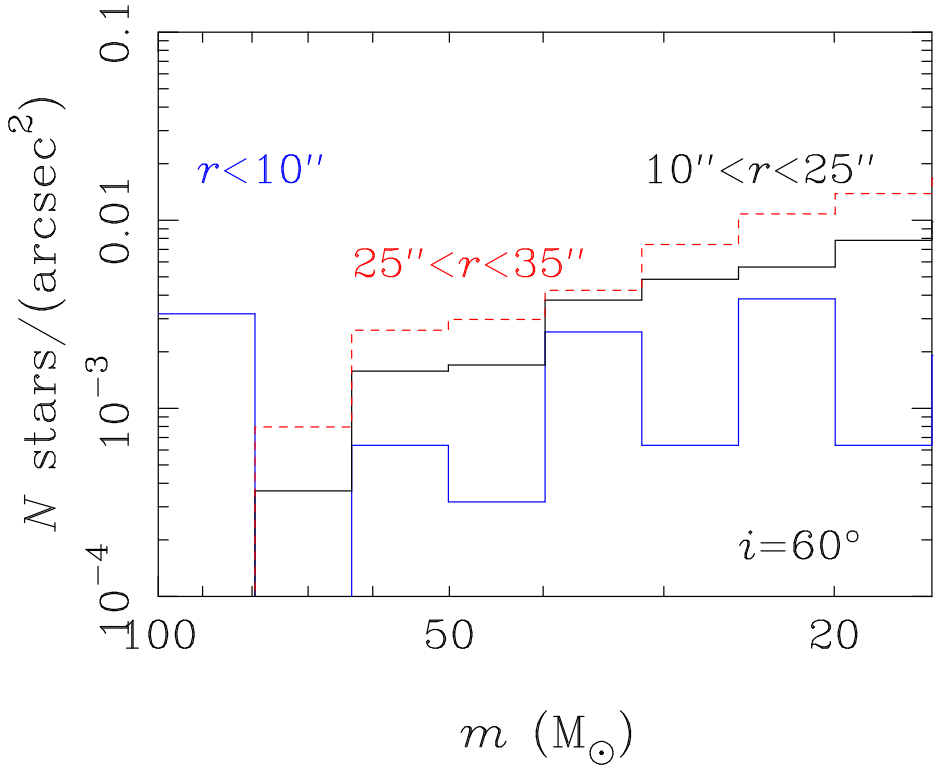


ディスクを見込む角度は一応観測されている順回転ディスクと合わせた。

5” くらいから内側に重い星集中

但し、外側に沢山あるのは観測とは矛盾 (?)

質量関数



10” から内側はフラット

一応観測を再現しているような気もする

IMBH なんかあるのか？

- IRS13E の3つの massive stars が重力的にバウンドしているのはリアルっぽい (Fritz et al. 2010)
- IMBH があるとすると $2 \times 10^4 M_\odot$
  (この質量推定は間違ってる気がする。多分過大。)
- 本当かどうかは？
- X 線光度は 10^{33}erg/s

G2 と降着円盤

- 理論モデル、シミュレーションは RIAF ディスクを仮定
- $n = 930\mathrm{cm}^{-3}$, $T = 1.2 \times 10^8\mathrm{K}$ at $1.4 \times 10^4 R_s = 1200 AU$
- 観測:基本には「Chandra の分解能よりちょっと大きい何か。1” くらい。10^{33}erg/s」

「本当の」恒星分布

- 見える星: 0.3pc くらいから内側はフラットコアに見える？
- 1pc で stellar mass $10^6 M_\odot$ とすると、緩和時間 4×10^8 年。
- Bahcall-Wolf カスプ ($\rho \propto r^{-7/4}$) が成長する時間はある。
- 衝突時間: 太陽質量、1pc では 10^{13} 年 (focusing 無視)。$r^{-9/4}$ で上がるので 0.1pc より内側では宇宙年齢より短い (主系列星はなくてもいい)
- 白色矮星なら 100-1000AU あたりで collision 効く。

中性子星・白色矮星カスプの力学進化

- 銀河中心スケールではあんまりそういう研究はない
- 球状星団スケールだと中間質量ブラックホールがあれば中心カスプは中性子星、白色矮星
- 銀河中心では速度分散が大きいので、白色矮星同士、白色矮星-中性子星の潮汐捕獲が起きる。一杯連星ができてもいい。
- できた時の分布は 中心集中するが、1000AU くらいの内側は他の星との相互作用で破壊される
- 10000 AU だとパーセントオーダーの連星ができていい。1000 個くらい ???

まとめ

- 銀河中心から 1-10” あたりのディスク構造は本当にあるっぽい
- 年齢は 4-8Myrs。極端に top-heavy な質量関数
- 起源は、その場形成も星団落とすのも色々問題あり。
- あんまり色々なことを整合的に説明できるモデルはない
- S-stars はそんなに top-heavy ではない。別起源が必要
- 見える星の密度が上がらない中心 0.3pc 以内でも、白色矮星や中性子星のカスプはあるはず。
- そうすると、潮汐捕獲連星もあっていい。X 線のいくらかはそこからきてるのではないか？