

〜〜〜 神戸大学CPS 2023/09/05〜〜〜  
シミュレーション天文学のこれまでとこれから

銀河中心部におけるブラックホール近傍でおこる共鳴緩和

船渡陽子（東京大学）

*Y.Funato, H. Kitakubo, & J.Makino, in prep.*

# Abstract

- S2星の軌道の観測により SgrA\*(SMBH) やS2星の軌道より内側にある質量、一般相対論的近心点移動の推定が報告されている (Abuter+ 2020)。
- 理論的には、銀河中心のようなSMBHを含む高密度星系では共鳴緩和 (**resonant relaxation**、**RR**) と呼ばれる力学的な緩和がおこると予想されている。RRは角運動量空間における緩和であり、銀河中心でRRがおこっているとS2星の軌道に影響を与える。
- 我々は銀河中心のSMBHとそれを含む星系の進化のN体計算を行った。その結果、たしかに**RRがおこる**ことを確認した。これによる軌道の変化は今後の近点通過の観測 (TMT等) で発見できるかもしれない。できるとSMBH質量やGRパラメータの推定に影響を与える可能性がある。

# Contents

1. Introduction

2. Model

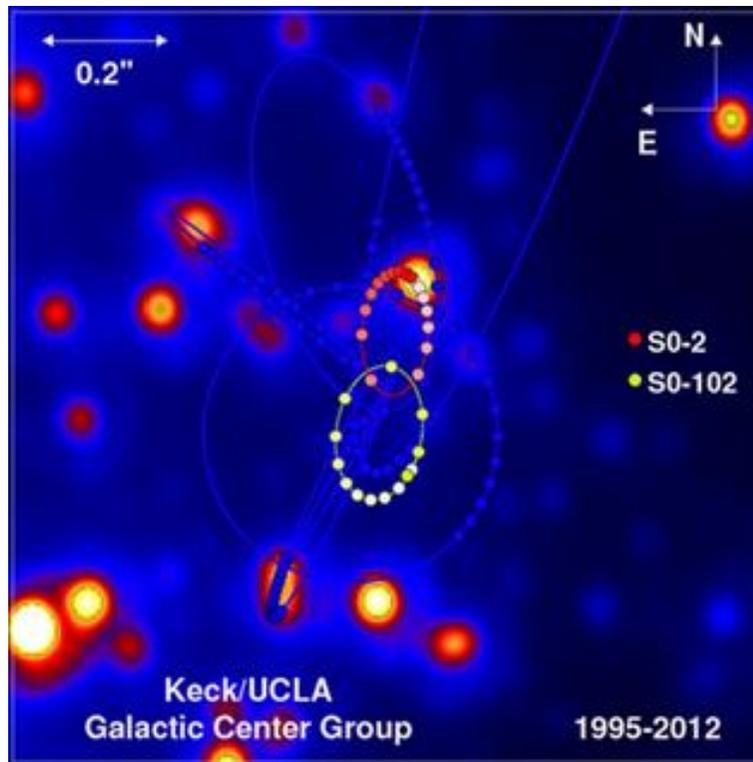
3. Result

4. Discussion

# 1. Introduction

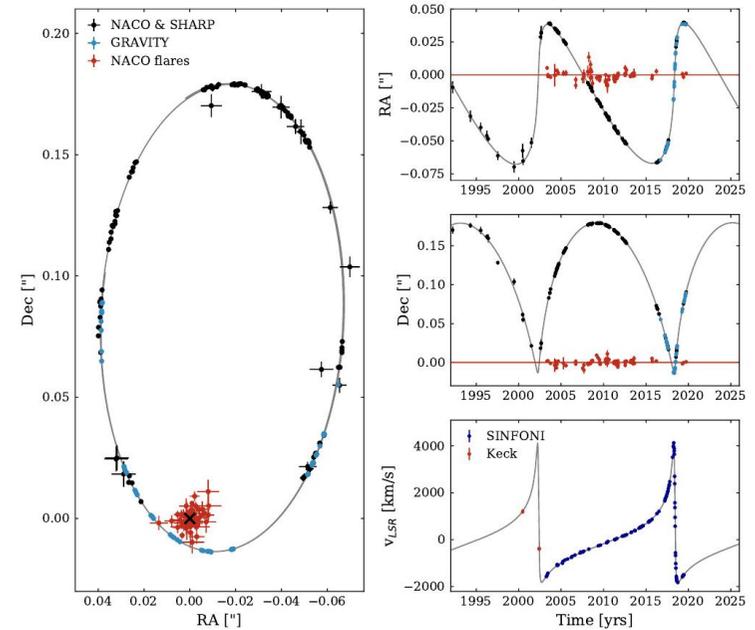
## Center of the Galaxy and Orbit of S2 star

Galactic Center



(c) Andrea Ghez

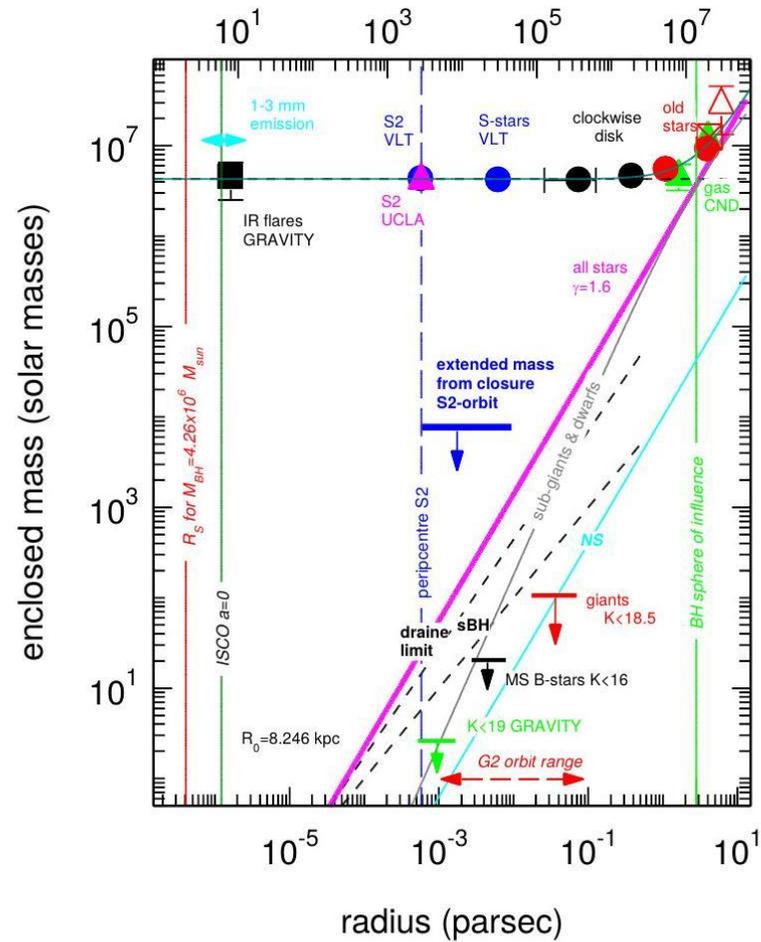
Orbit of S2



GRAVITY Colab. 2020 A&A

$$\Delta\omega = 0.003 \text{ [rad]}$$

# Stars around SMBH (Abuter+ 2020)



**Fig. D.1.** Constraints on the enclosed mass in the central 10 pc of the Galaxy.

## Resonant Relaxation (RR)

- theoretically predicted by Rauch & Tremaine 1996
  - 角運動量空間における緩和
  - 2体緩和とは異なる
  - 中心天体の重力が支配的で他の星はケプラー軌道に近い場合
    - \* 主星 + 惑星・微惑星・胚系
    - \* SMBHがいる銀河中心星系のような場所

## 2体緩和との比較

*two-body relaxation :*

- $t_{rel} \sim N^1 t_{orb}$
- $\sqrt{\langle |\Delta E|^2 \rangle} \sim t^{1/2}$

*RR :*

- $t_{rr} \sim \frac{m_{BH}}{m_*} t_{orb}$
- $\sqrt{\langle |\Delta E|^2 \rangle} \sim 0$
- $\sqrt{\langle |\Delta L|^2 \rangle} \sim t$

*consequently*

$$- \sqrt{\langle |\Delta \phi|^2 \rangle} \sim t$$

$\langle \rangle$  ... average of particles

## 先行研究

- $N \sim 100$  : N体シミュレーション
  - Rauch & Tremaine (1996)
  - Eilon+ (2009) :  $N = 200$
- $N \geq 1000$ : 近似的方法
  - Magnan+ 2022
  - Hamers, Portegies Zwart, Merritt, 2014

# GPLUM



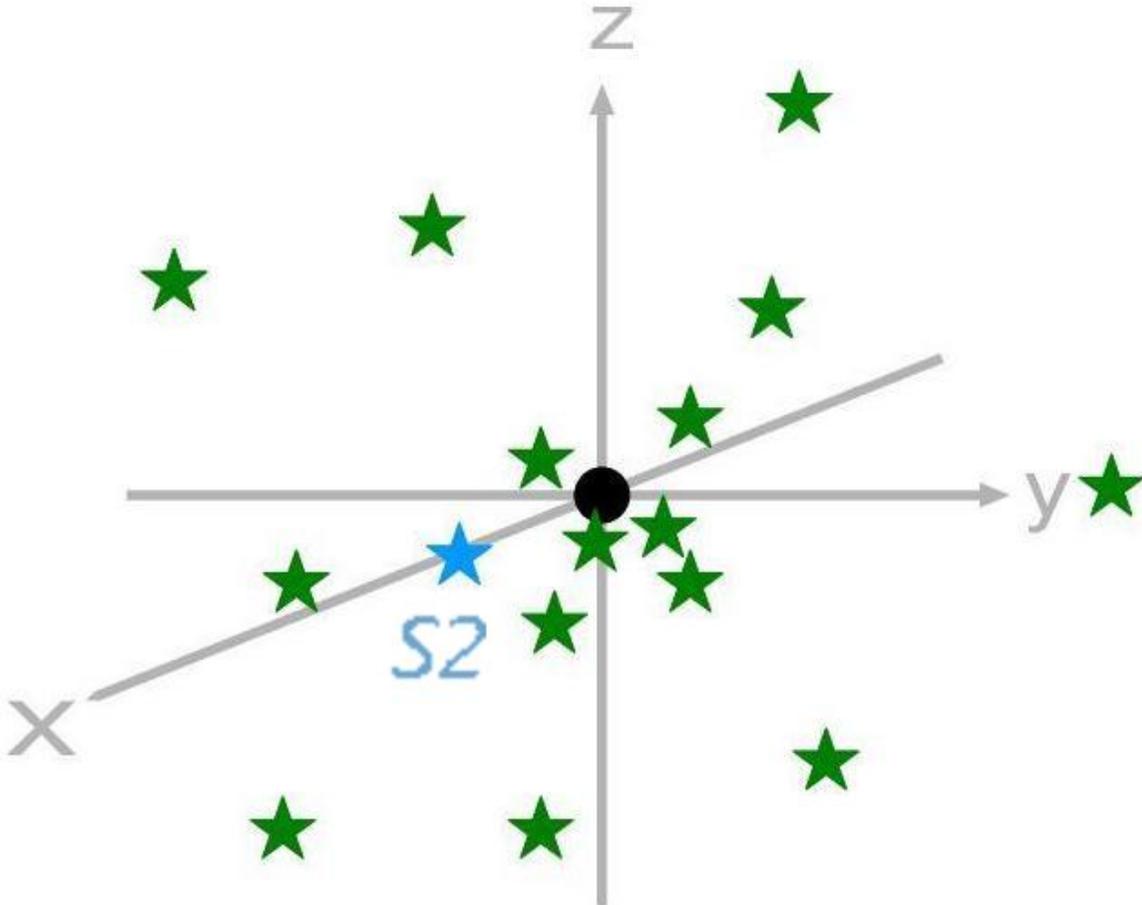
(*Y.Ishigaki, J.Kominami, J.Makino,  
M.Fujimoto, M.Iwasawa, 2020*)

- 中心に massive な天体 (例: 太陽、SMBH)
- $P^3T$  法 (*S.Oshino, Y.Funato, J.Makino, 2011*)
- 並列計算 **FDPS** (*M.Iwasawa, A.Tanikawa, N.Hosono, K.Nitadori,  
T.Muranushi, J.Makino, 2019*)

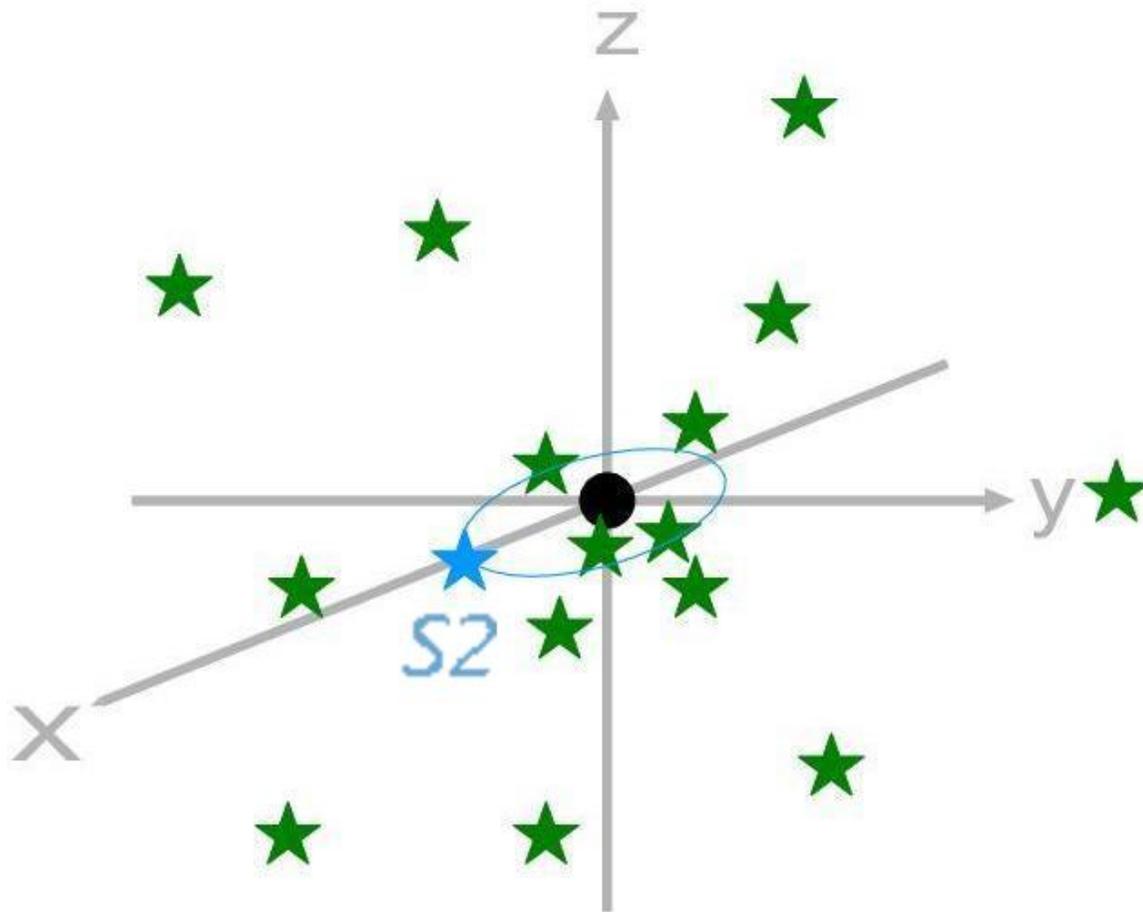
= > 銀河中心の現実的な計算が可能に

## 2. Model

# 2. Model



## 2. Model

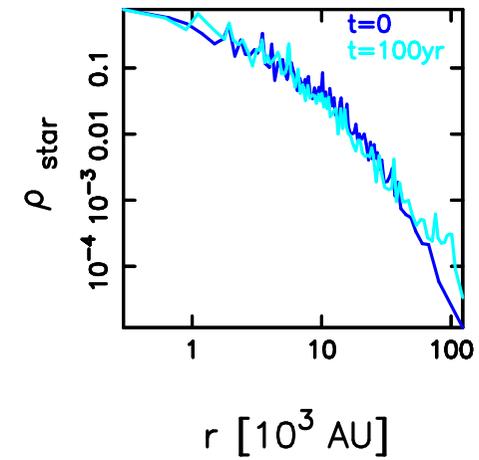


*density profile*

(T.Matsubayashi,

J.Makino,

T.Ebisuzaki, 2007)

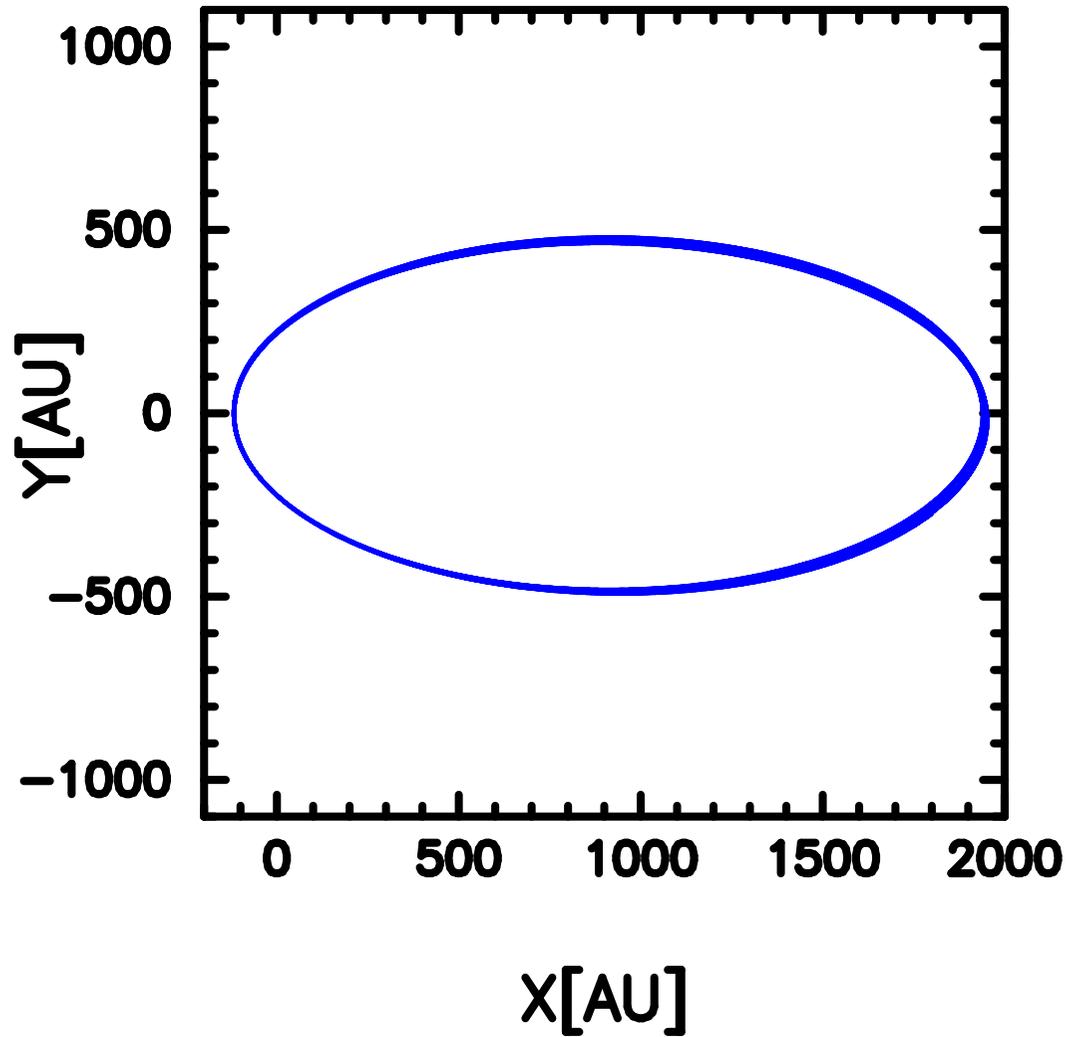


## *Model parameters :*

- $M_{\text{SMBH}}$  : **fix**
- largeness of cluster : **fix**
- $M_{\text{cluster}}$ : **changing**
  - max: observational upper limit (Abuter+ 2020)
  - min: theoretical prediction (Alexander+ 2009)
- **N** : **changing** (i.e.mass ratio :  $M_{\text{SMBH}} : M_{\text{star}}$ )
- **20** different seed run/model

*Numerical Method :* **GPLUM**

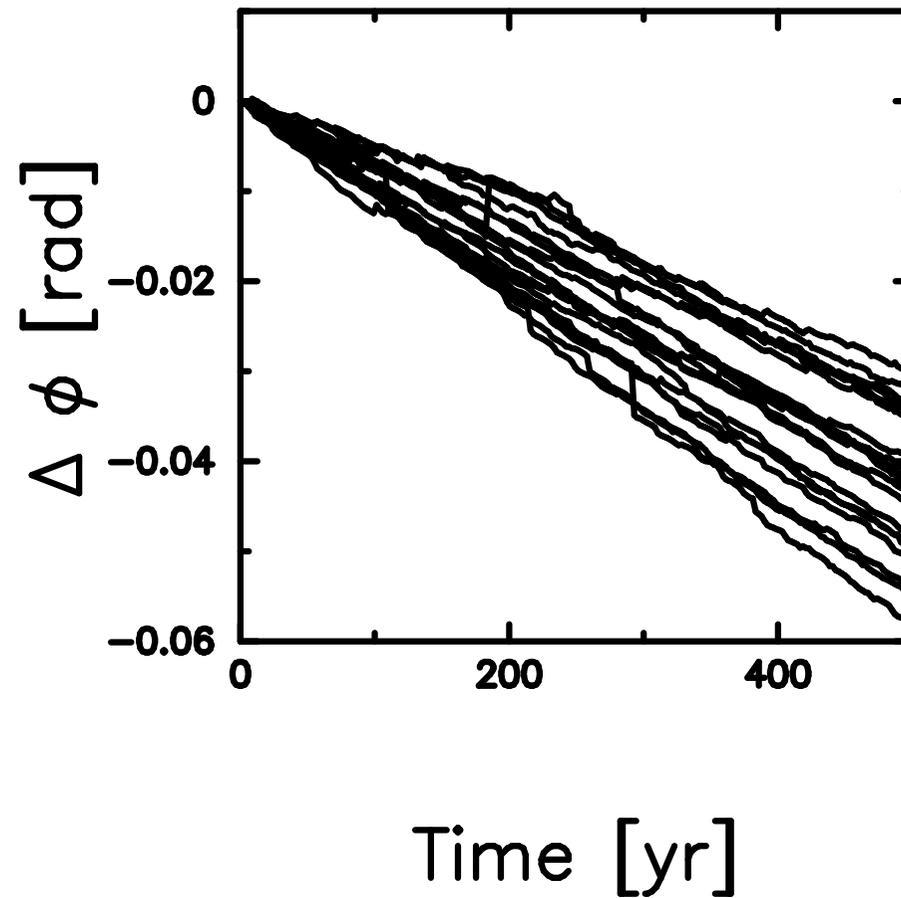
### 3. Result



*example of orbit  
projected on x-y*

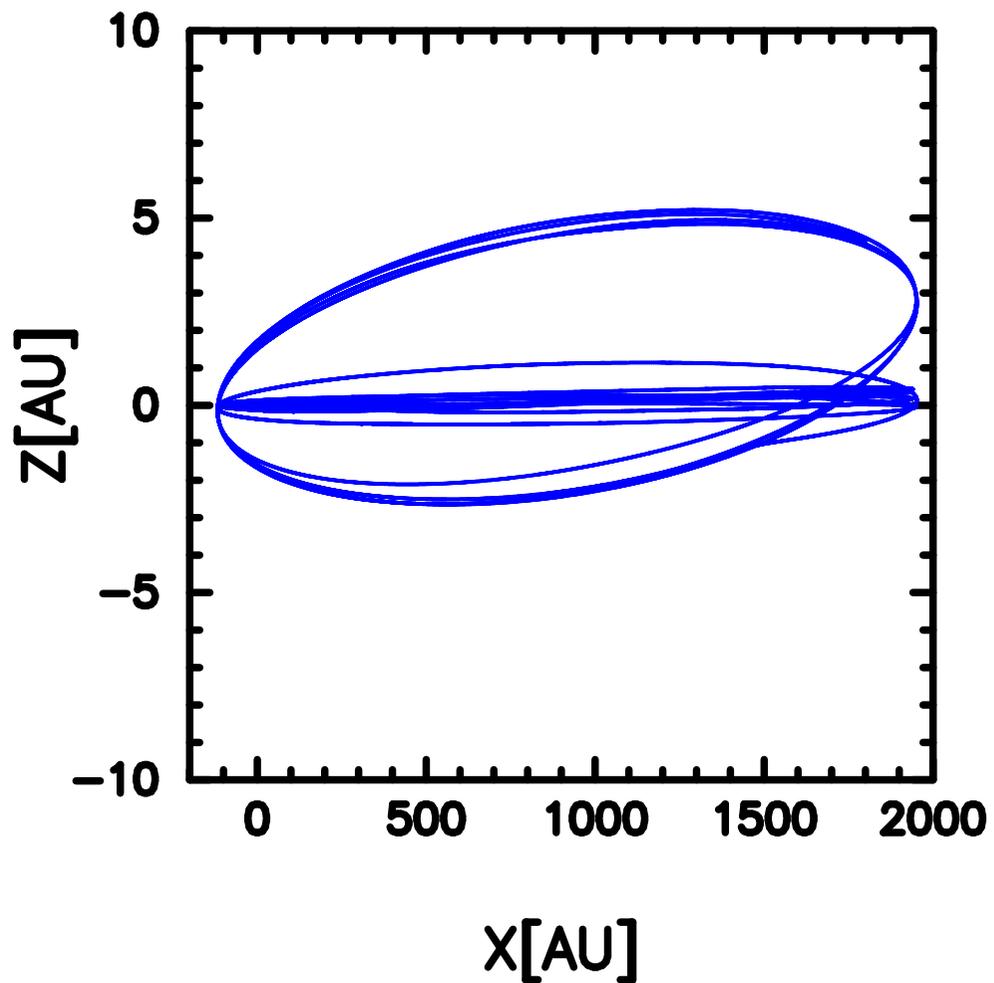
## $x - y$ 面上の近点移動

*(Most massive cluster case, i.e. upper limit from observation)*

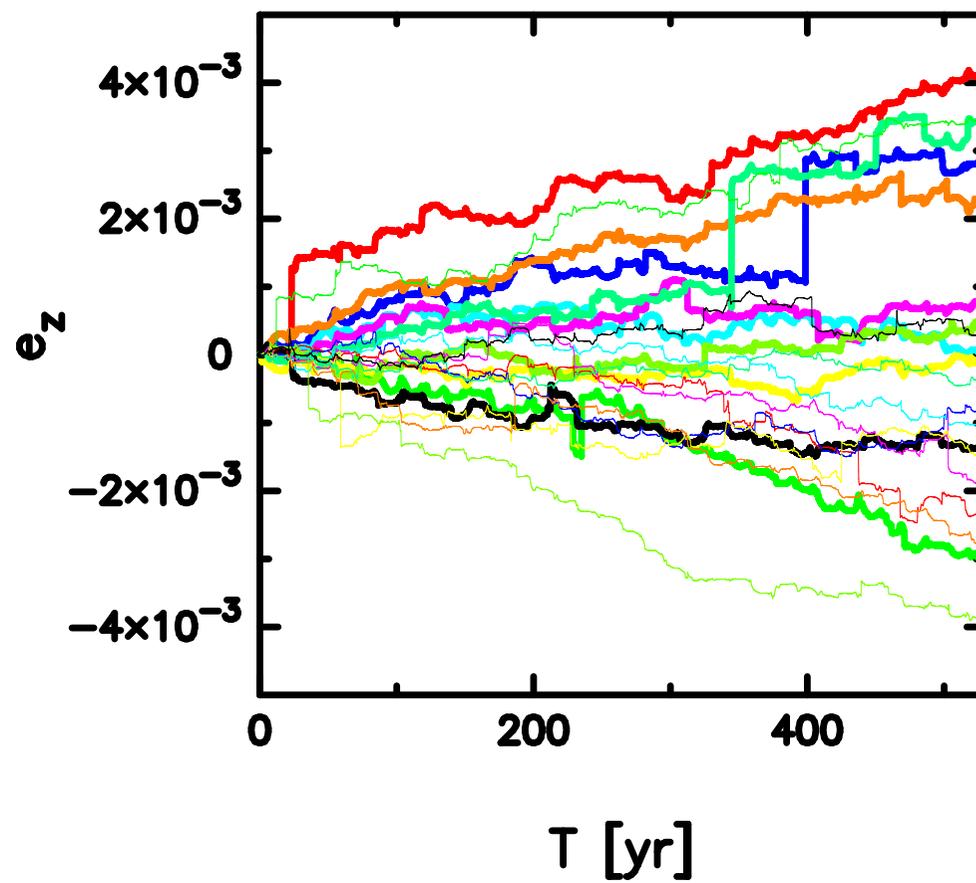


*z evolution: examples*

*X-Z*

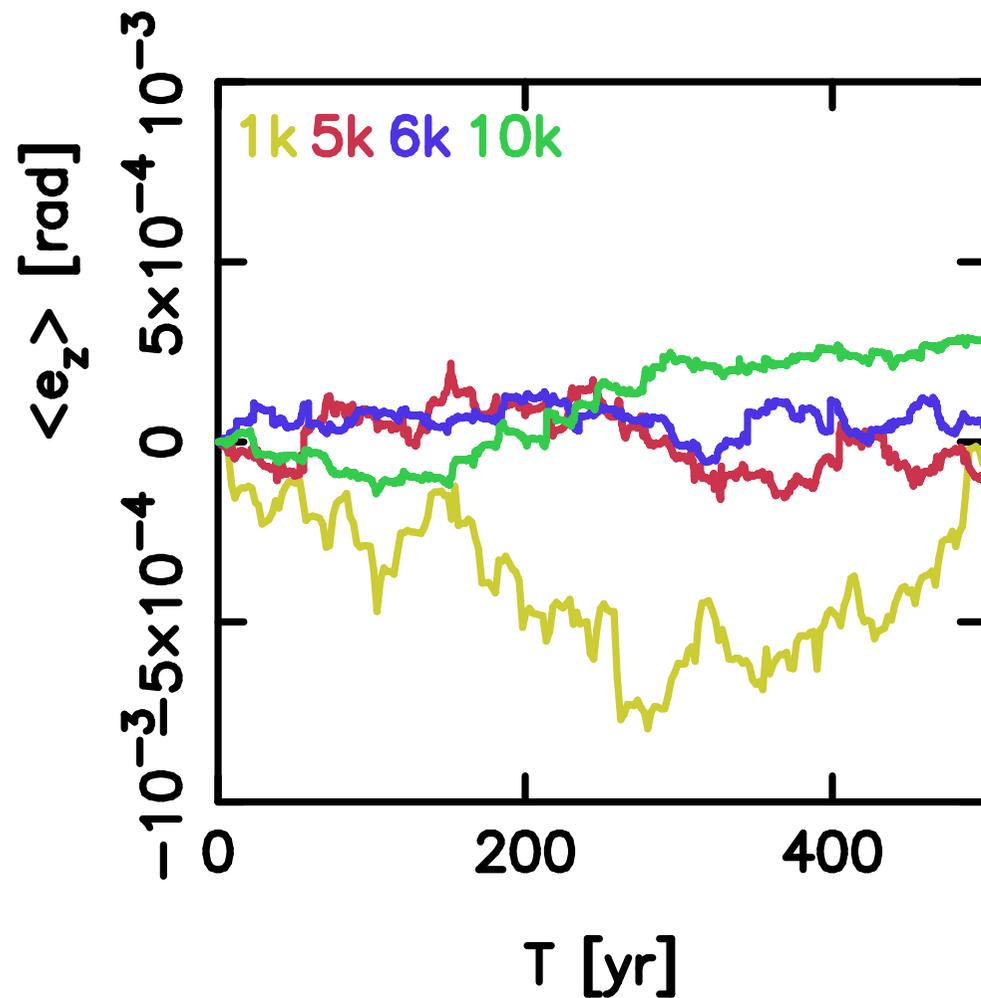


*t-e<sub>z</sub>: inc. evolution*



# time evolution of $e_z \doteq \textit{inclination}$

1. mean of  $e_z$ :  $(1/n_{\text{run}}) \sum^{\text{nrun}} e_z$

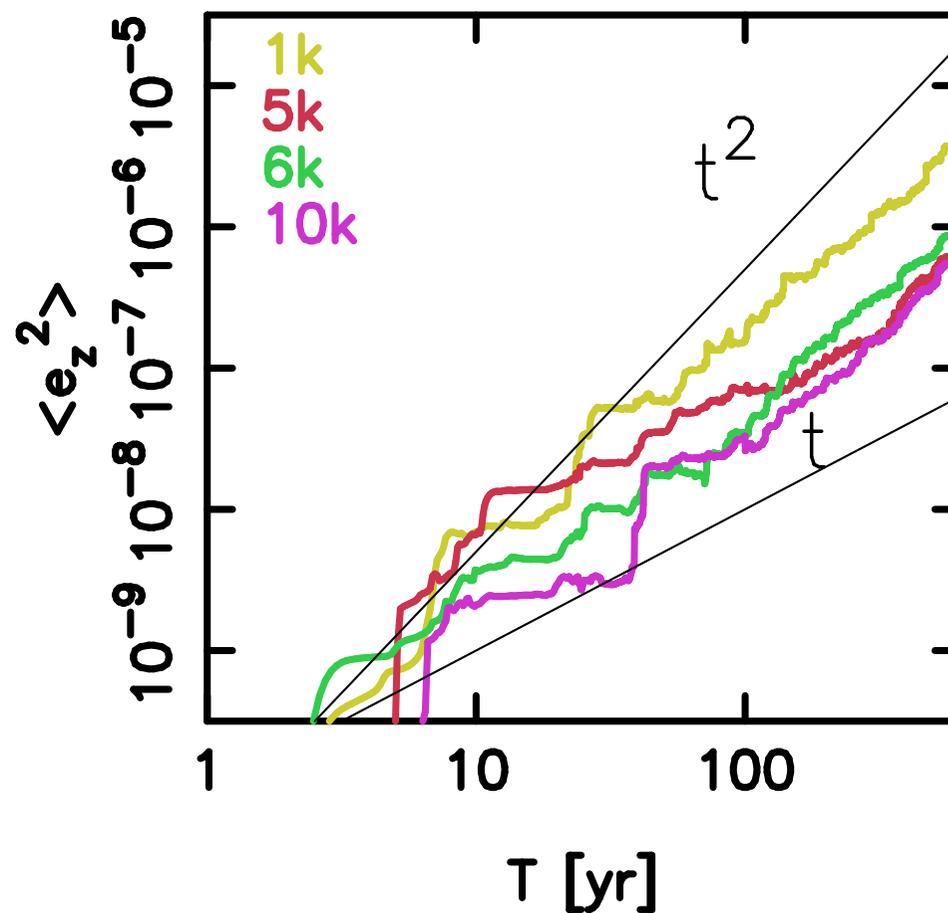
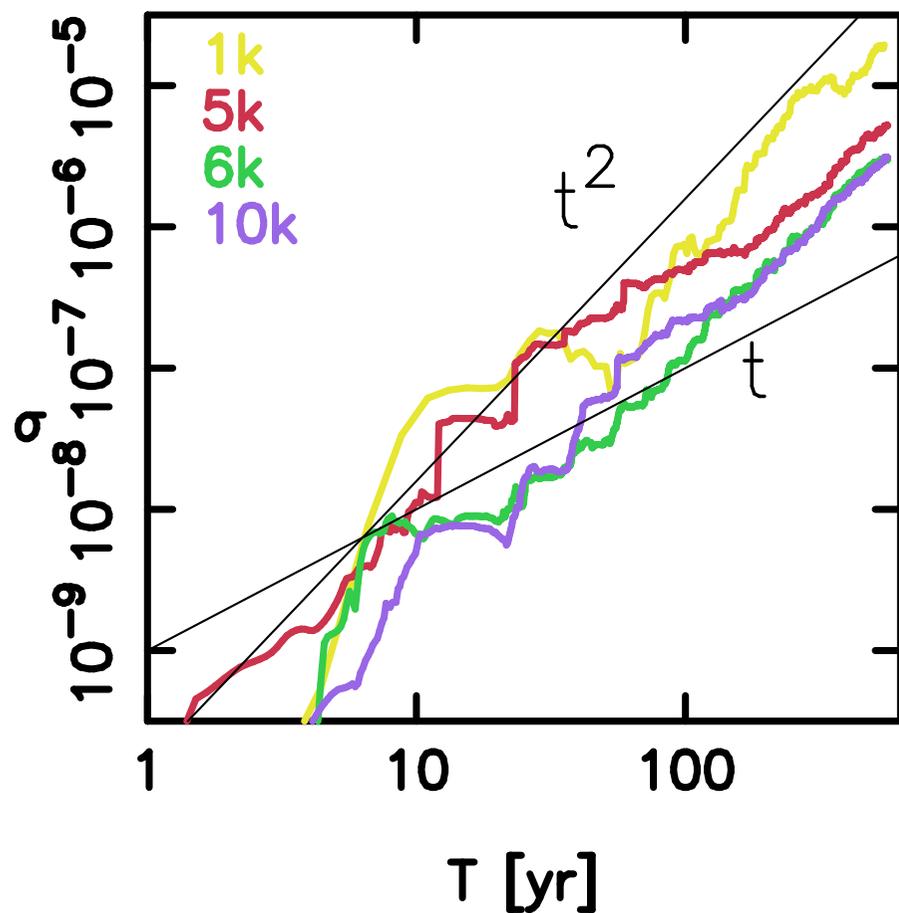


# time evolution of $e_z \equiv \textit{inclination}$

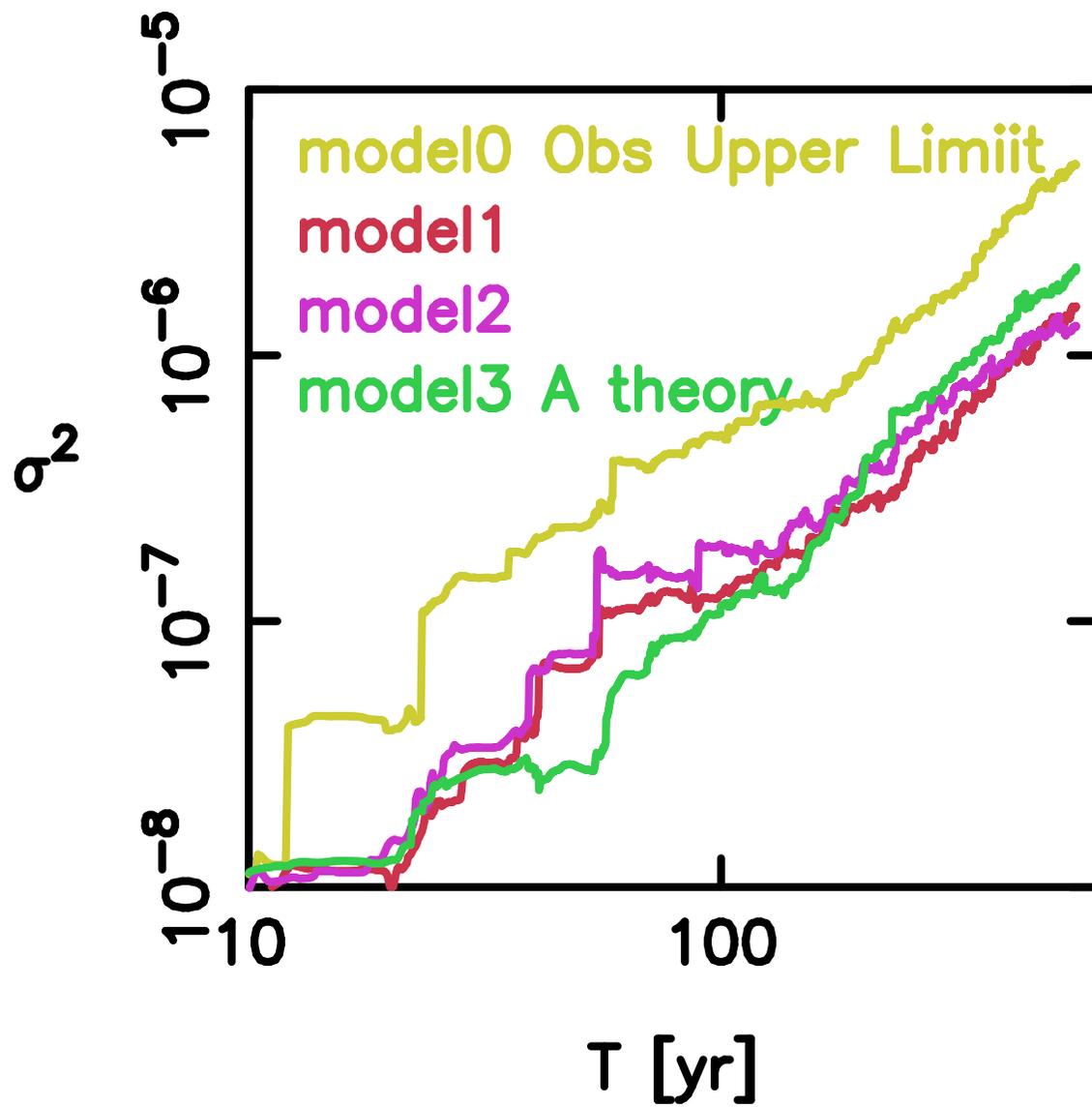
2. variance of  $e_z$ :  $\sigma^2 \equiv (1/n_{\text{run}}) \sum^{\text{nrun}} e_z^2$

max  $M_{\text{cluster}}$

min  $M_{\text{cluster}}$

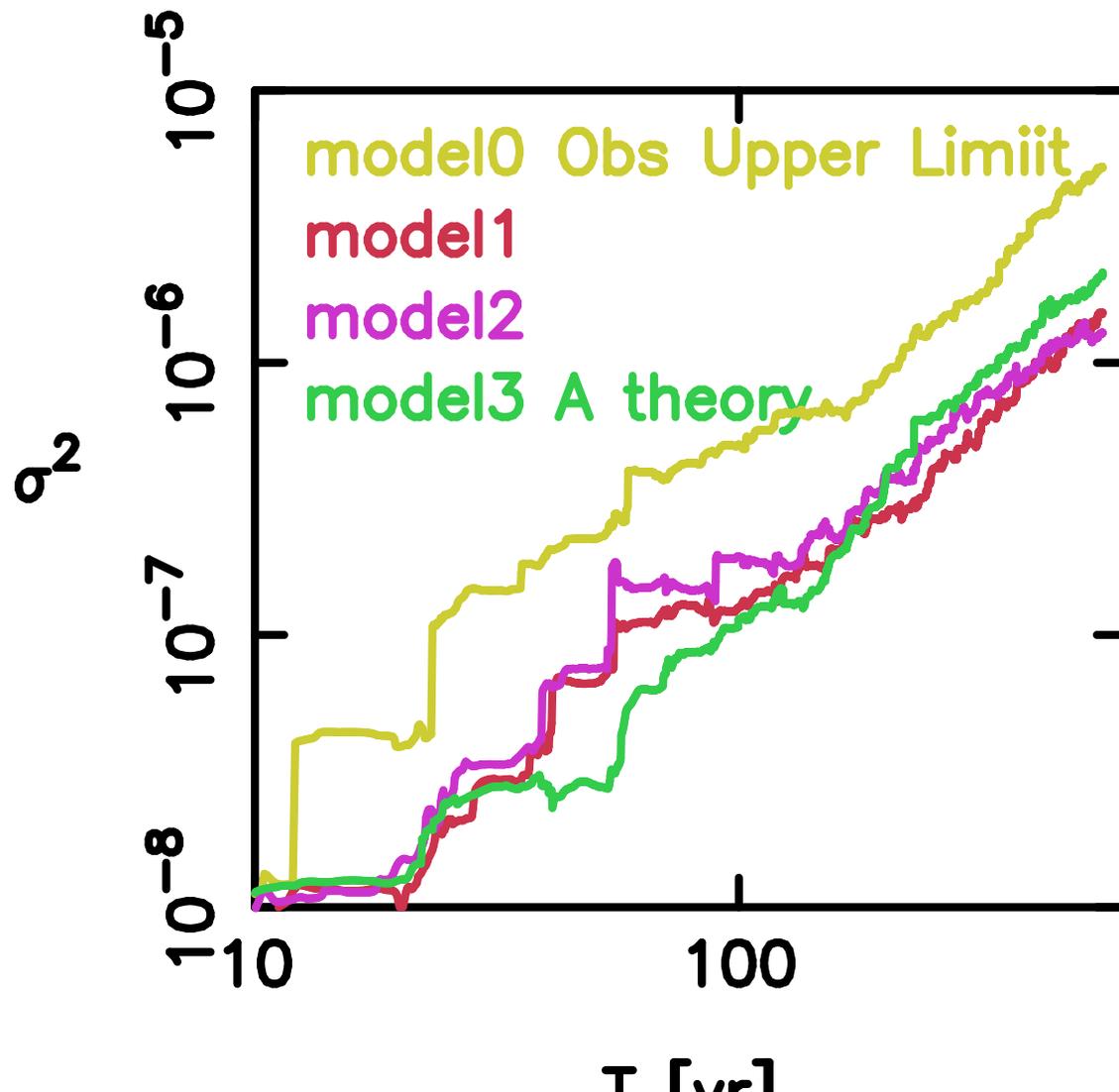


$$M_{SMBH}/m_* = \text{const}$$



$$M_{SMBH}/m_* = \mathbf{const}$$

$$\sim \frac{m_*}{M_{SMBH}} M_{cluster} \quad (1)$$



smooth mass distribution 分の貢献を引いた x-y 面での近日点の位置も同じ程度、つまり  $\sim 10^{-4\sim 5}$  [rad]/P 回転する

## 計算結果のまとめ

- 銀河中心で S2 のような星の近日点は動く。この動きかたは RR によるものと考えられる
- 動く大きさは  $\sim 10^{-?}$  [rad] である。これはありうる動きの大きさには幅があるが、GR 効果による precession と比べ無視できないほど大きくなりうる

## 4. Discussion

### 近点角のケプラー軌道からのずれ

- 3次元的に起こる
- ずれの振る舞いから、これはRRによるものと考えられる
- $\Delta\omega \sim 10^{-5\sim-4}$  par orbit ( $\Delta\omega_{GR} = 0.003$ )
- S starsの軌道の*i*の時間変化に現れる
- 時間をかけられれば( $\sim 10^2$ 年)良いが、もう少し早く発見したい
- 今までの観測では難しいが今後の観測(TMT等)で検出できるかも。
- 軌道が観測される星の数が増えるとRRの効果を見積もることができ、各物理量やGRパラメータの推定の精度向上につながる(何周か観測できればなお良し)