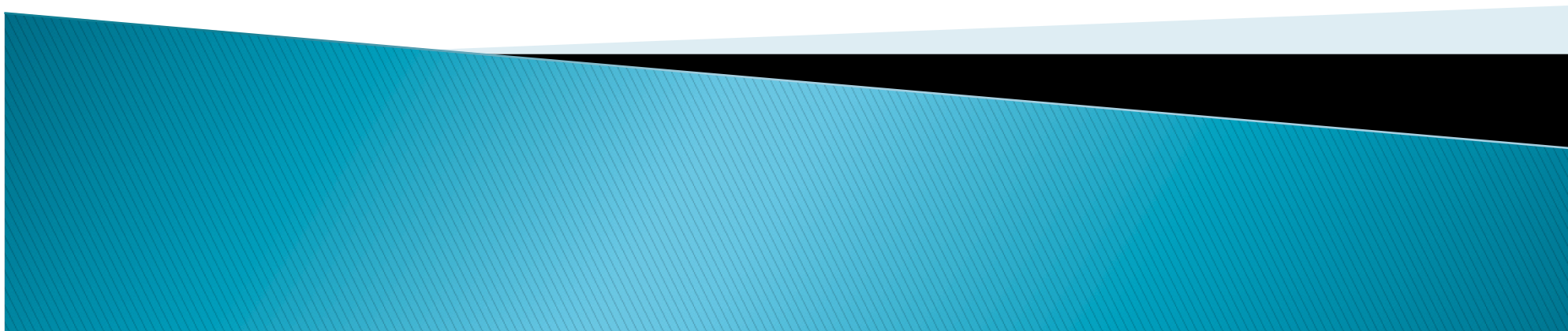


Dry minor merger による 早期型銀河のサイズ進化

大木平、羽部朝男 (北海道大学)



早期型銀河とそのサイズ的重要性

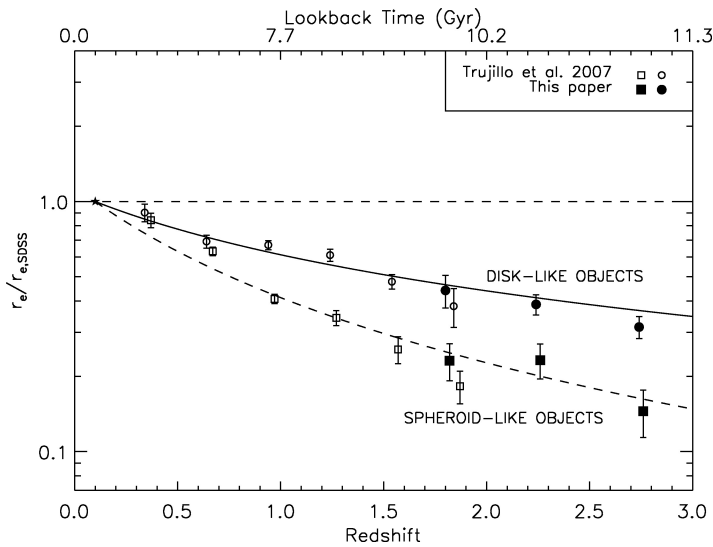
- ▶ 早期型銀河 (Early-type galaxies, ETGs) の 2 つの形成シナリオ
 - Monolithic scenario
 - Intense starburst + passive evolution で銀河のスペクトルを良く再現する
 - Old stellar population を自然に説明
 - Merger scenario
 - 階層的構造形成シナリオに良く合う
 - シミュレーションによって、楕円銀河の photometric, kinematic property を再現できる
- ▶ High-z の ETGs のサイズは ETGs 形成過程 解明の手がかり
 - Monolithic scenario ではサイズを増加させない
 - サイズが小さければ、old stellar population を保ちつつサイズを増加させるメカニズムが必要



NGC 5128 (CFHT)

早期型銀河のサイズ進化の観測的証拠

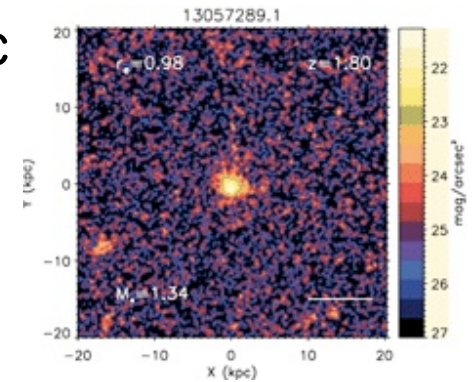
Buitrago+ 08



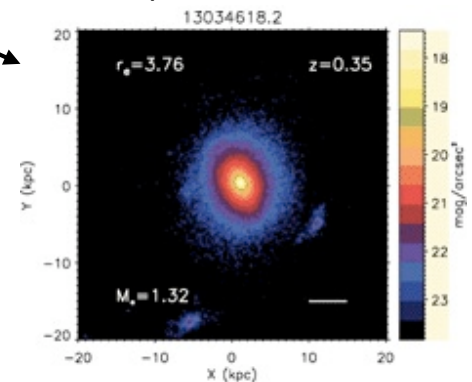
同程度の星質量
 $\sim 1.3 \times 10^{11} M_{\text{sun}}$ の
 早期型銀河の比較。

$z=1.8$
 $R_e=0.98\text{kpc}$

Trujillo+ 07



$z=0.35$
 $R_e=3.76\text{kpc}$



SDSSの観測 (Shen+2003)からの近傍ETGsの stellar mass-size relation と比較するとはるかにサイズが小さい

$$R_e = 4.16 \left(\frac{M_*}{10^{11} M_{\text{sun}}} \right)^{0.56} \text{ kpc} \quad \text{Shen+2003}$$

- 早期型銀河の star formation history と mass assembly history に違い
- 星形成を伴わない merger, dry(ガス無し) merger によってサイズ進化を起こしている可能性がある

Dry merger simulation の先行研究 とETGsのサイズ進化

- ▶ Dry minor merger のETGsへの影響、特にサイズ進化への影響については、あまり調べられていない
- ▶ Nipoti+ 2009
 - Minor mergers のセットアップを単純化している — 5 or 10個の satellite galaxies を main galaxy に同時にaccrete させる
 - Main galaxy と satellite galaxy の密度が同じケースのみ
 - → 階層的構造形成においては、minor merger は継続的に起こるはず

Dry merger の効果をより様々なケースで調べる必要がある

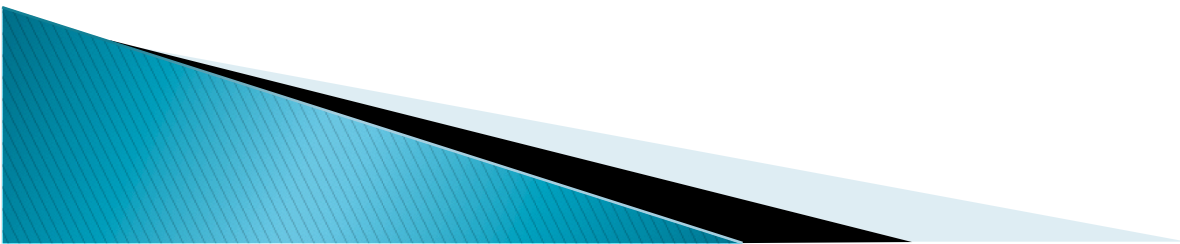


本研究の概要

N体シミュレーションによるサイズ進化シナリオの検証

- ▶ high- z の compact massive galaxy をターゲットとして、dry major/minor merger を行った。
- ▶ satellites galaxy のコンパクトさ(密度)を変えて minor merger simulation を行った
- ▶ 継続的な minor merger を行い、satellitesが同時に accrete してくる場合と結果を比較した。
- ▶ 注目する物理量
 - Merger remnant のサイズ、速度分散、密度

N体シミュレーション



Model galaxies

- ▶ Stellar system と DM ハローは2成分 Hernquist profile で再現

$$\text{Hernquist profile : } \rho(r) = \frac{M_* a}{2\pi r(r+a)^3}, \quad \Phi(r) = -\frac{GM_*}{r+a}$$

- ▶ Stellar system

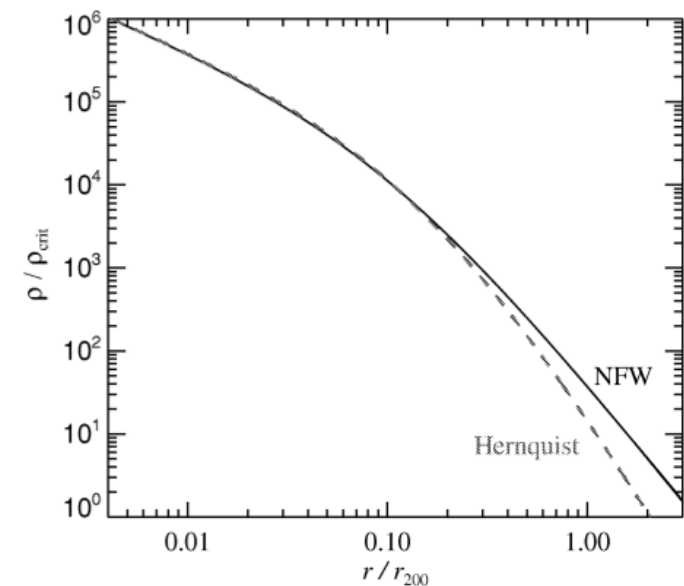
- high- z の compact massive ETGs を想定し、有効半径 $R_e=1$ kpc, stellar mass $M_*=10^{11}M_{\text{sun}}$ とした。

- ▶ DM ハロー

- 中心部で NFW profile と一致するように scale radius を設定 (Springel+2005)。

$$a = \frac{r_{\text{vir}}}{c} \sqrt{2[\ln(1+c) - c/1+c]}$$

- ビリアル半径は、球対称collapseモデルから、 $z=2$ で $10^{12} M_{\text{sun}}$ のハローとして計算
- concentration は、 $c=c(z, M_{\text{vir}})$: Bullock +2001 fitting formula から計算



Initial Conditions

- ▶ 球対称、等方を仮定
- ▶ 密度プロファイルと分布関数から、粒子位置・速度分布を consistent に再現
- ▶ 2成分 Hernquist profile の分布関数には、Ciotti 1996 の解析公式を使用

各component の分布関数:

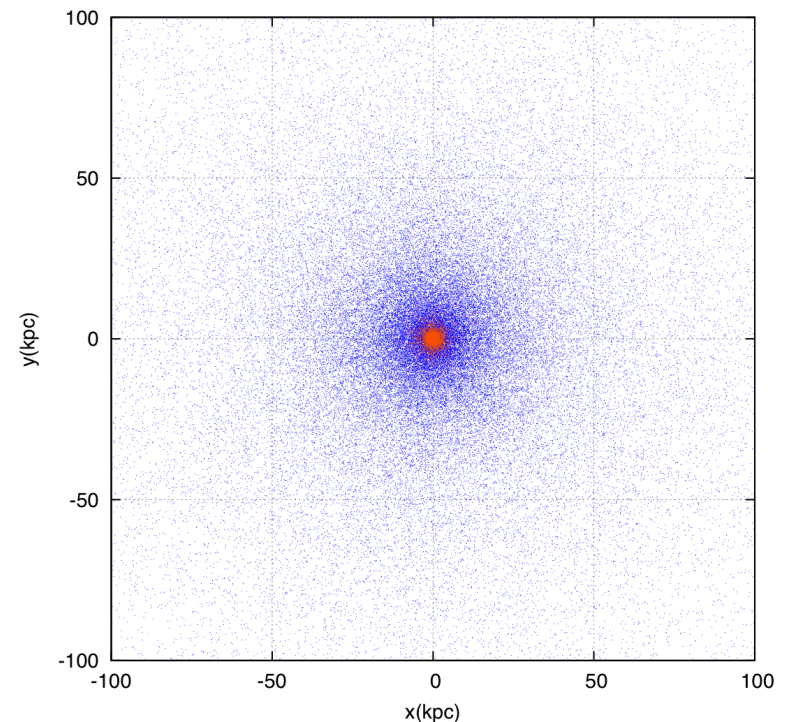
$$f_i(E) = \frac{1}{8\pi^2} \int_0^E \frac{d^2 \rho_i}{d\Psi_{tot}} \frac{d\Psi_{tot}}{\sqrt{E - \Psi_{tot}}}$$

ここで等方より $Q = E - \frac{L^2}{2r_a^2} = E$

$$\tilde{Q} = q \left(1 + \frac{\mu}{1 + bq} \right), \quad 0 \leq q \leq 1$$

q : reference component の無次元ポテンシャル

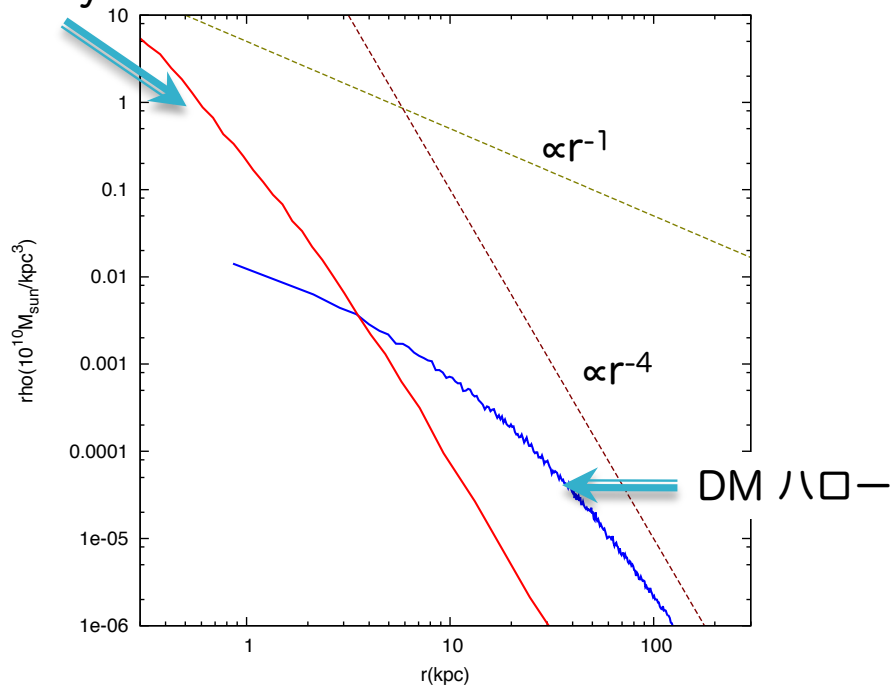
$$f(Q) = \frac{f_N}{\sqrt{8\pi^2}} \left(\frac{d\tilde{Q}}{dl} \right)^{-1} \times \frac{d}{dl} \left[\tilde{F}_i^\pm(l) \right], \quad l^2 \equiv 1 + bq$$



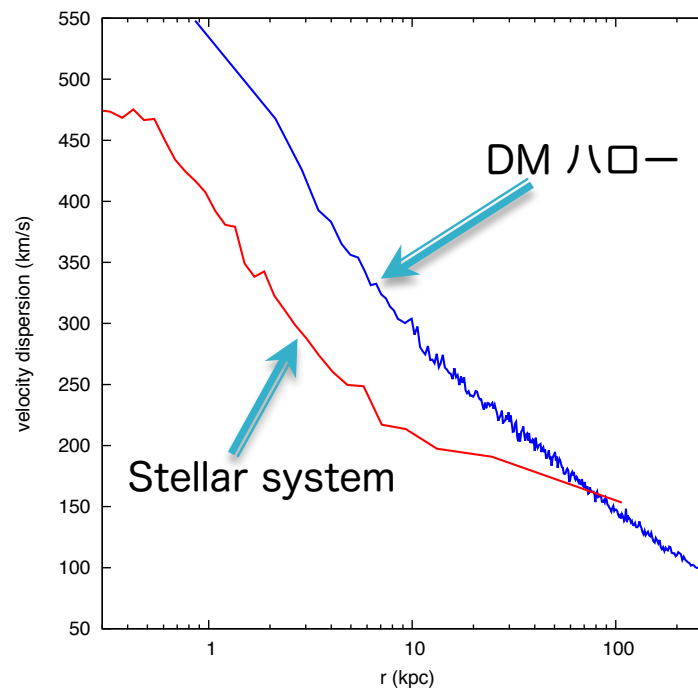
初期状態 (1 Gyr後)

密度プロファイル

Stellar system

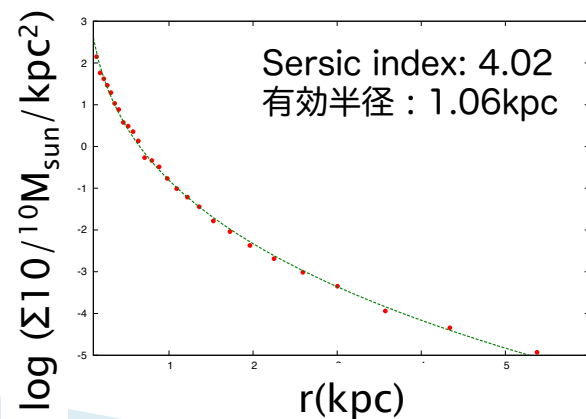


速度分散プロファイル



Stellar system は、 $\geq 0.2 \text{kpc}$ の領域で $\sim 3 \text{Gyr}$ の間、構造は変化しないことを確認

表面密度プロファイル



Model galaxies

compact massive ETG

Main galaxy: M1	Dark matter halo	Stellar bulge
mass	$10^{12} M_{\text{sun}}$	$10^{11} M_{\text{sun}}$
Scale radius	31.2 kpc	0.551 kpc
Virial radius	105 kpc	–
Effective radius	–	1 kpc

compact less massive ETG

satellite galaxy: S1	Dark matter halo	Stellar bulge
mass	$10^{11} M_{\text{sun}}$	$10^{10} M_{\text{sun}}$
Scale radius	12.0 kpc	0.256 kpc
Virial radius	48.8 kpc	–
Effective radius	–	0.464 kpc

diffuse less massive ETG

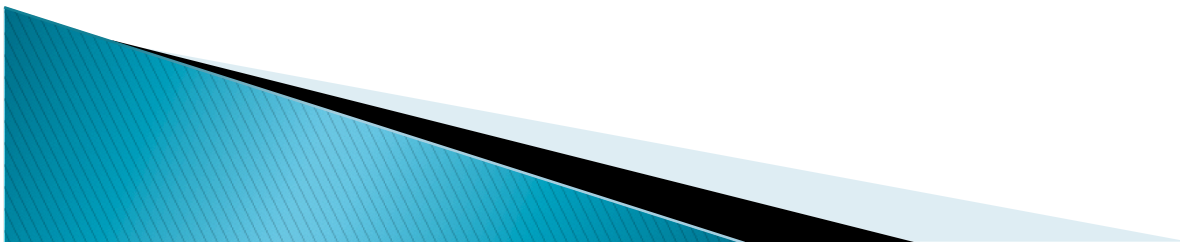
satellite galaxy: S2	Dark matter halo	Stellar bulge
mass	$10^{11} M_{\text{sun}}$	$10^{10} M_{\text{sun}}$
Scale radius	13.3 kpc	0.631 kpc
Virial radius	120 kpc	–
Effective radius	–	1.15 kpc

Simulation code & parameters

- ▶ シミュレーションコード:
GADGET-2 (Springel 2005)
—Parallel tree, N-body simulation code
- ▶ 計算機: Cray XT4 @ 国立天文台

- ▶ 粒子数、ソフトニング

	DM粒子数	星粒子数	ソフトニング
Galaxy M1	10^5 体	10^4 体	0.05 kpc
Galaxy S1	10^4 体	10^3 体	0.05 kpc
Galaxy S2	10^4 体	10^3 体	0.05 kpc



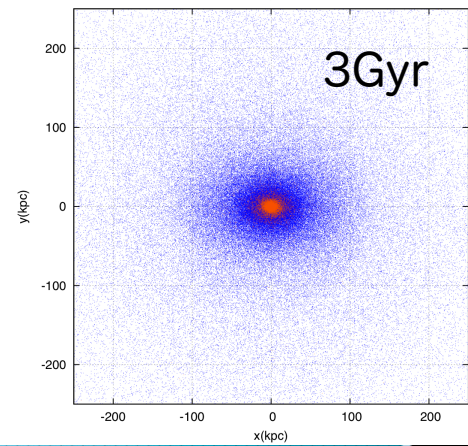
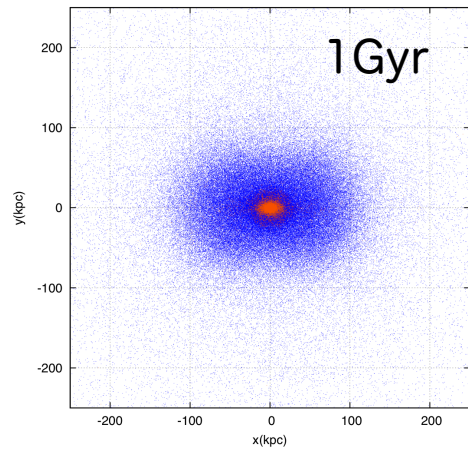
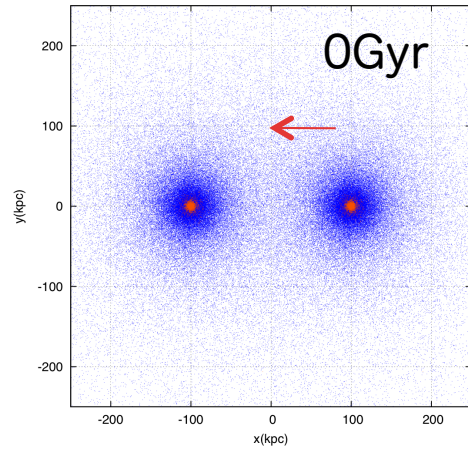
Dry major/minor merger simulation A-E

	merger	Main galaxy	Satellite galaxy	
シミュレーション A	Major	M1	M1	
B	10 minor	M1	S1	0.2Gyr毎にaccrete
C	10 minor	M1	S2	0.2Gyr毎にaccrete
D	Synchronized minor	M1	S1	10個を同時にaccrete
E	Synchronized minor	M1	S1	10個を同時にaccrete

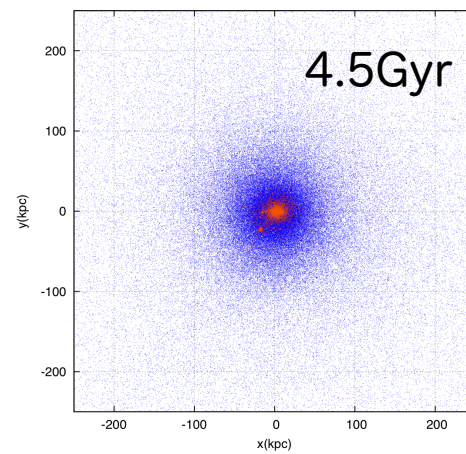
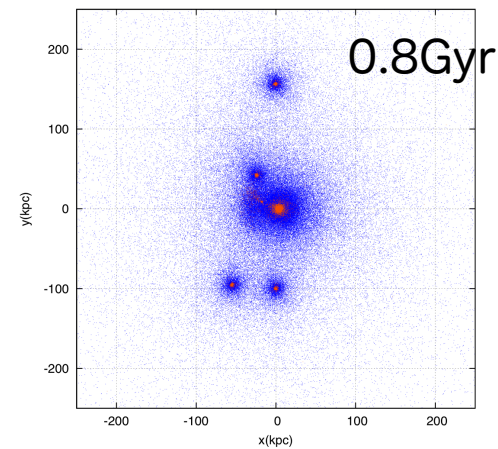
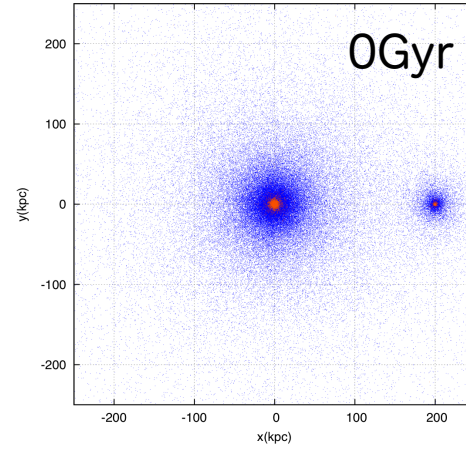
- ▶ 全てのmerger はradial orbit (正面衝突) とした
- ▶ 相対速度 : $\sim 200\text{km/s}$ (parabolic orbit)
- ▶ 初期の中心間距離 : 200kpc

結果

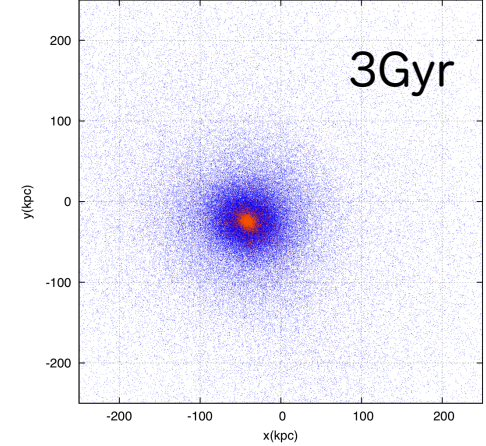
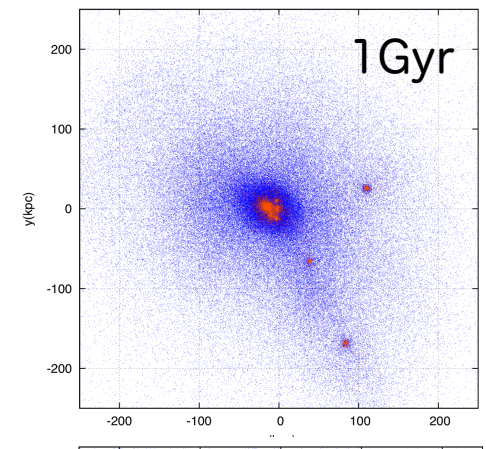
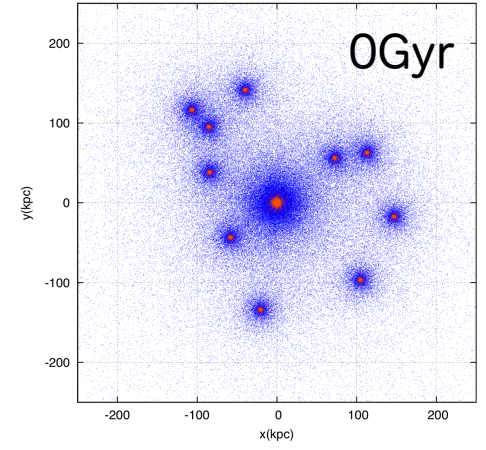
シミュレーション A
Major merger



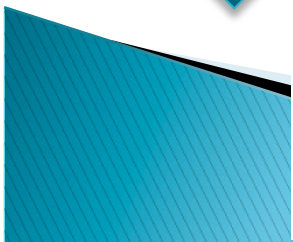
シミュレーション B
継続的 minor mergers



シミュレーション E
同時 minor mergers



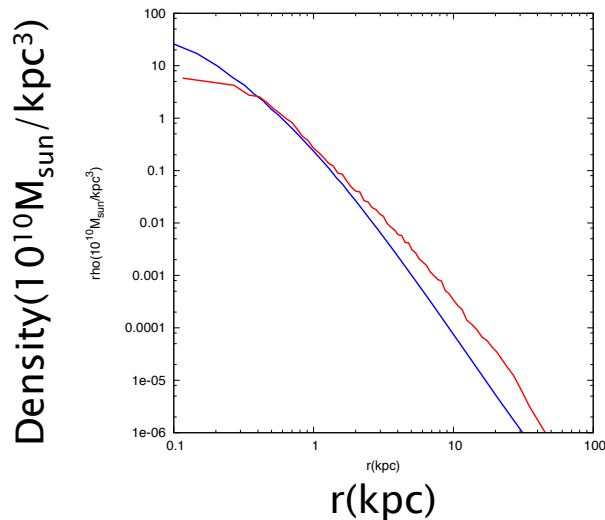
時間



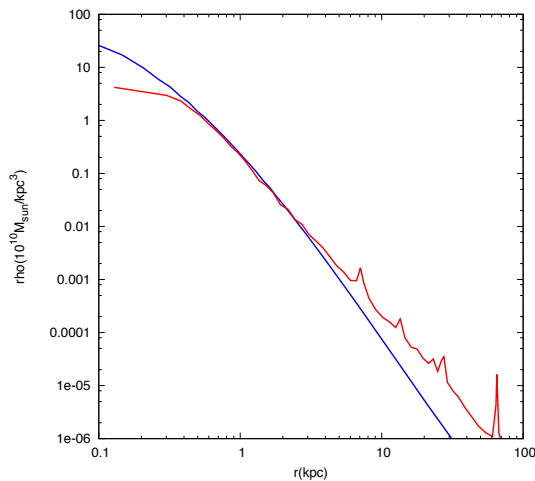
結果1 -stellar system の密度プロファイルの変化-

密度プロファイルの変化

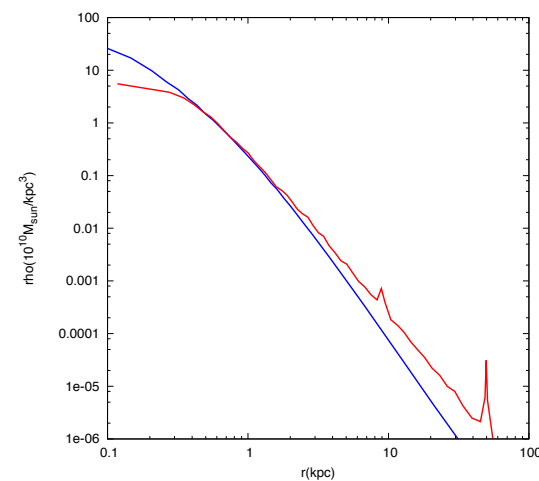
シミュレーション A



シミュレーション B

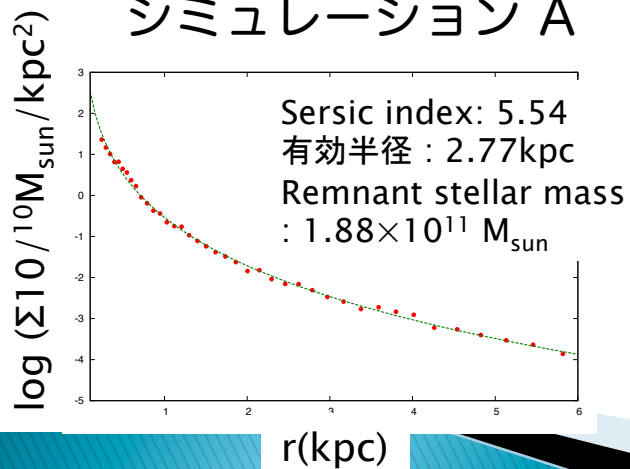


シミュレーション D

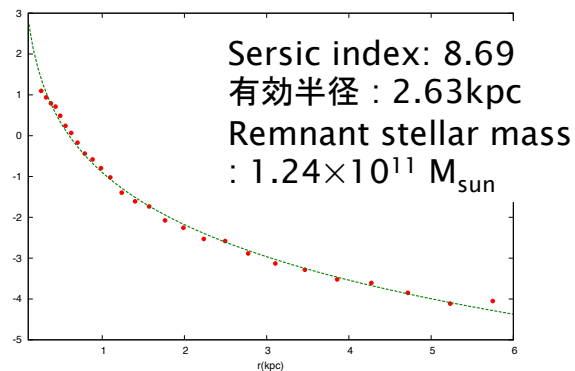


表面密度プロファイルのフィッティング

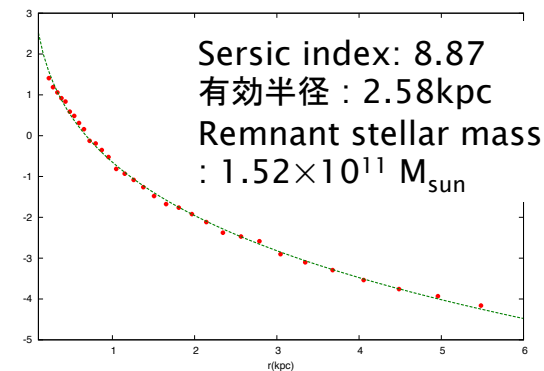
シミュレーション A



シミュレーション B



シミュレーション D



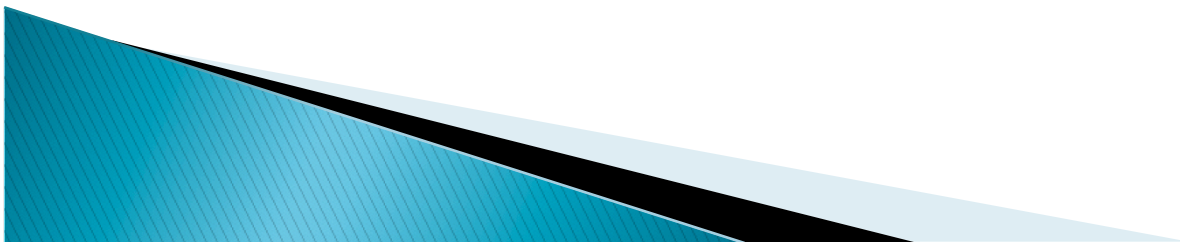
解析 - 有効半径 R_e , 速度分散 σ_e

Sersic profile
$$I_m(R) = I_e \exp\left\{-b_m \left[\left(\frac{R}{R_e}\right)^{1/m} - 1\right]\right\}$$

- 半径 [0.2, ~10] kpc の表面密度 $\Sigma(R)$ でフィッティング
- 3方向(x,y,z axis) にprojection したのについて Sersic profile でフィッティングして R_e を求めて平均値をとる

Surface density weighted velocity dispersion
$$\sigma_e^2 \equiv \frac{\int_{2\varepsilon}^{R_e} \sigma_{los}^2(R) I(R) R dR}{\int_{2\varepsilon}^{R_e} I(R) R dR}$$

- 有効半径 R_e まで、表面密度 $\Sigma(R)$ で重みづけして平均
- 3方向(x,y,z axis) にprojection したのについて σ_e を求めて平均値をとる

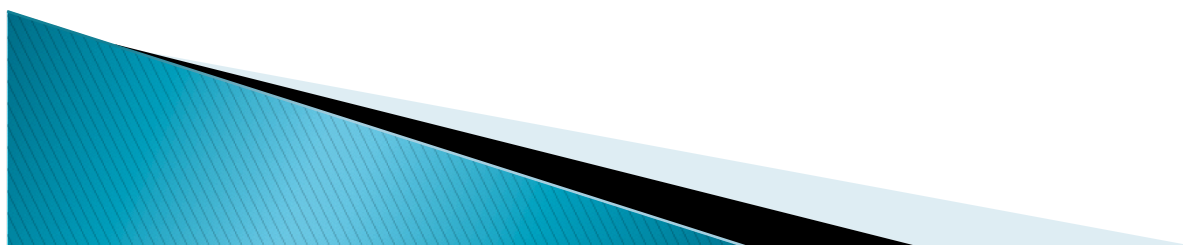


結果のまとめ

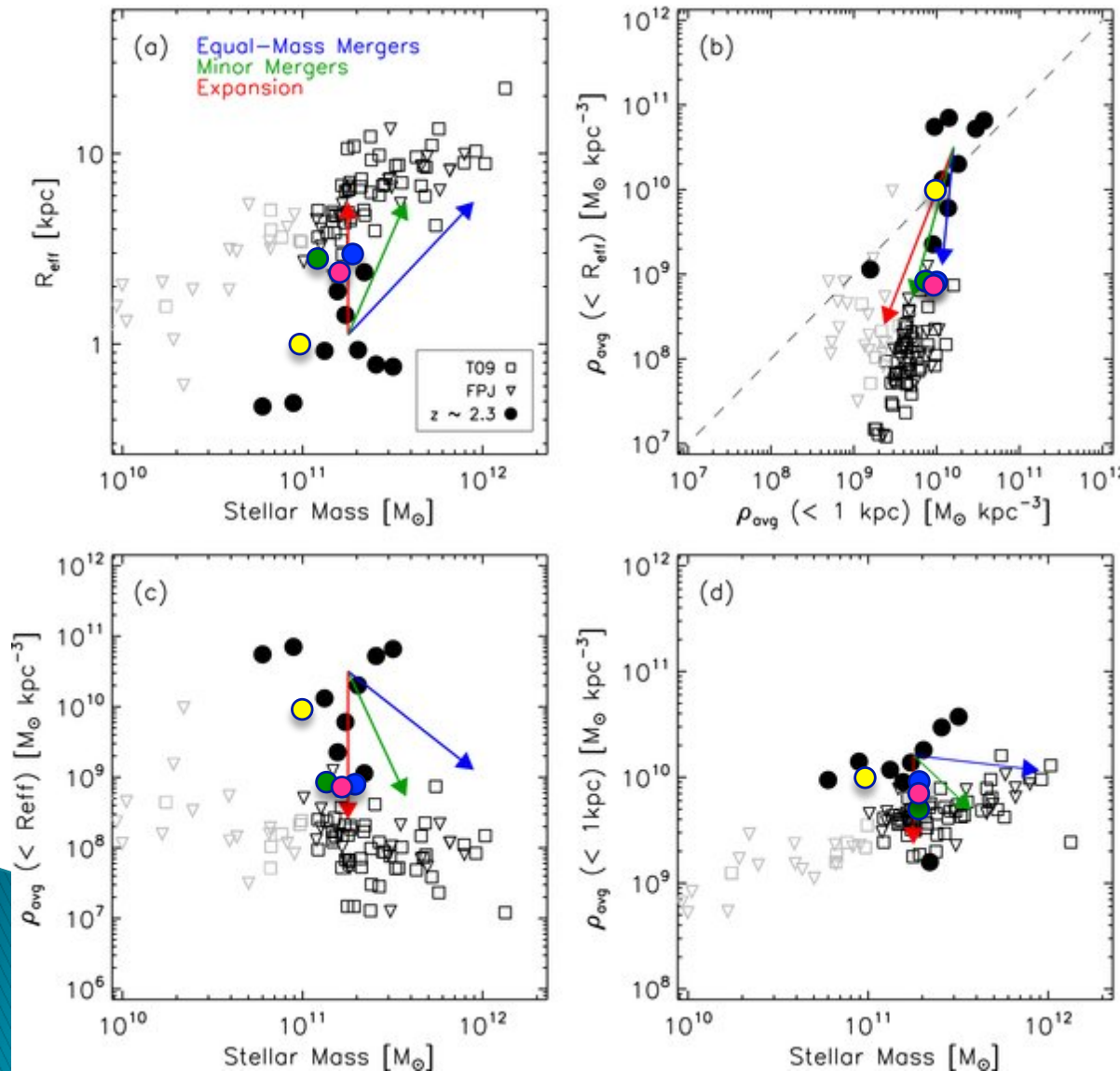
$$I_m(R) = I_e \exp\left\{-b_m \left[\left(\frac{R}{R_e}\right)^{1/m} - 1\right]\right\}$$

$$\sigma_e^2 \equiv \frac{\int_{2\varepsilon}^{R_e} \sigma_{los}^2(R) I(R) R dR}{\int_{2\varepsilon}^{R_e} I(R) R dR}$$

	Stellar mass (M_{sun})	R_{vir} (kpc)	$r_{*,\text{half}}$ (kpc)	R_e (kpc)	$\rho(<1 \text{ kpc})$ ($10^{10} M_{\text{sun}} \text{ kpc}^{-3}$)	$\rho(<R_e)$ ($10^{10} M_{\text{sun}} \text{ kpc}^{-3}$)	σ_e (km/s)
Initial	1.0×10^{11}	105kpc	1.42	1.07	0.993	0.856	237
A	1.88×10^{11}	388kpc	3.76	2.77	0.903	0.0934	229
B	1.24×10^{11}	396kpc	3.61	2.63	0.710	0.0990	198
C	1.28×10^{11}	495kpc	3.60	2.67	0.791	0.119	204
D	1.52×10^{11}	365kpc	3.42	2.58	0.825	0.0921	217
E	1.59×10^{11}	420kpc	4.84	3.52	0.918	0.0398	224



観測との比較1 -サイズ、密度- -Bezanson+2009-



- ▶ 黒：high-z の早期型銀河(観測)
- ▶ 白：近傍銀河(観測)
- ▶ 黄：初期条件(シミュレーション)
- ▶ 青：A (major merger)
- ▶ 緑：B (10 minor merger)
- ▶ ピンク：D (同時minor merger)

Stellar mass-size の変化の 近似式

シミュレーション A $R_e \propto M_*^{1.51}$

シミュレーション B $R_e \propto M_*^{4.18}$

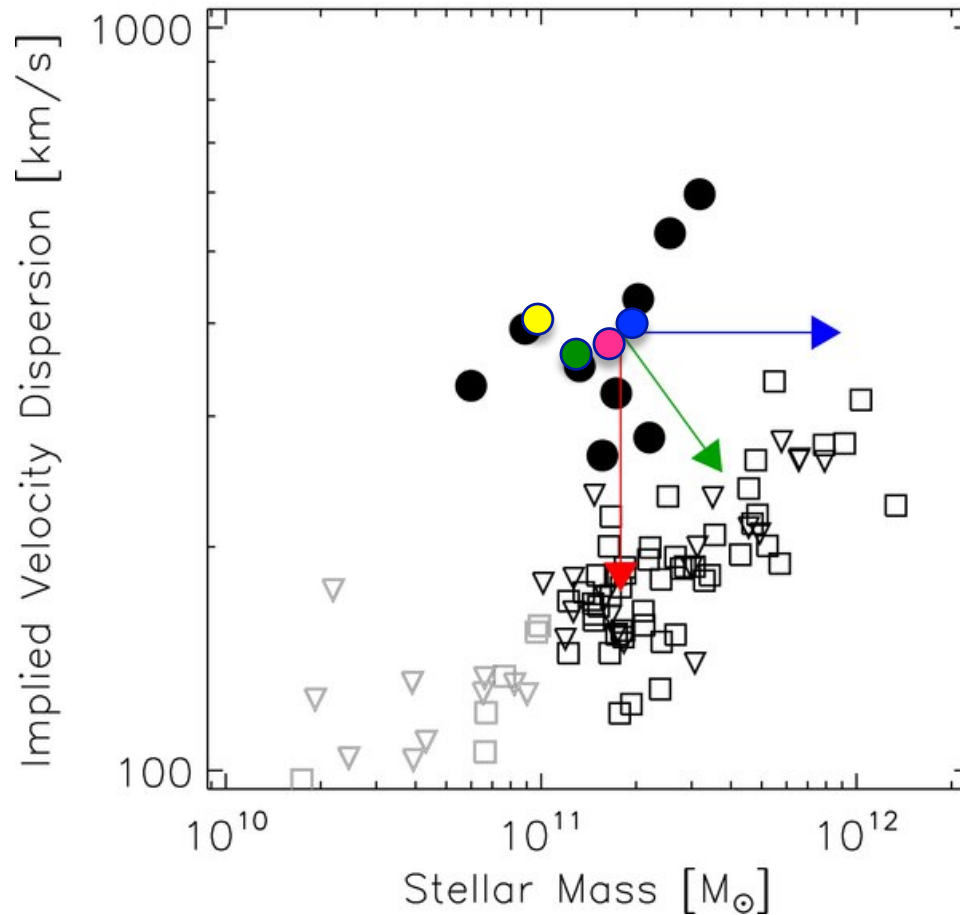
シミュレーション C $R_e \propto M_*^{3.70}$

シミュレーション D $R_e \propto M_*^{2.10}$

シミュレーション E $R_e \propto M_*^{2.57}$

観測との比較2 -速度分散-

-Bezanson+2009-



- ▶ 黒：high-z の早期型銀河(観測)
- ▶ 白：近傍銀河(観測)
- ▶ 黄：初期条件(シミュレーション)
- ▶ 青：A (major merger)
- ▶ 緑：B (10 minor merger)
- ▶ ピンク：D (同時minor merger)

Velocity dispersion-stellar mass の変化の近似式

$$\text{シミュレーション A } \sigma_e \propto M_*^{-0.05}$$

$$\text{シミュレーション B } \sigma_e \propto M_*^{-0.84}$$

$$\text{シミュレーション C } \sigma_e \propto M_*^{-0.61}$$

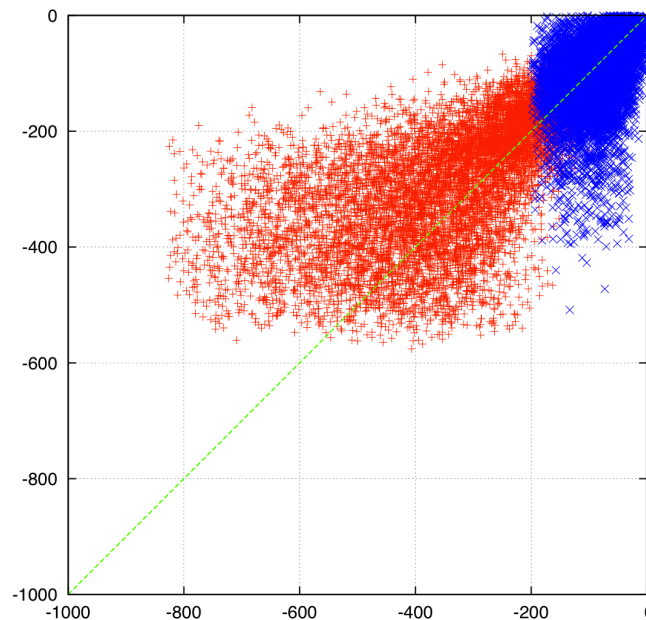
$$\text{シミュレーション D } \sigma_e \propto M_*^{-0.21}$$

$$\text{シミュレーション E } \sigma_e \propto M_*^{-0.12}$$

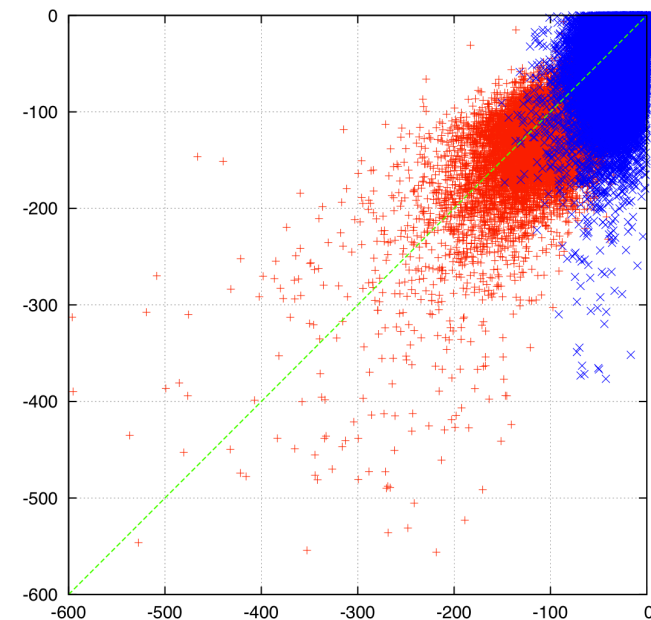
星粒子,DM粒子のエネルギー変化

シミュレーション B (minor merger)

赤: main galaxy の星粒子
青: satellite galaxies の星粒子
緑: エネルギー 一定の線



赤: main galaxy のDM粒子
青: satellite galaxies のDM粒子
緑: エネルギー 一定の線



縦軸：
各粒子の終了時
エネルギー

横軸： 各粒子の初期エネルギー

- ▶ Satellite galaxies によって持ち込まれたエネルギーは、main galaxy の stellar system に輸送される。
- ▶ Main galaxy の星粒子は、minor merger によりエネルギーを獲得する

Summary

- ▶ Dry major/minor merger におけるETGsのサイズ増加効率、速度分散減少効率を求めた。
- ▶ Minor merger では、satellite の運動エネルギーが main galaxy の stellar system に輸送され、サイズの増加、速度分散の減少を引き起こす
- ▶ 継続的な dry minor merger はサイズの増加をより効果的に引き起こすが、理由は今後、要解析
- ▶ Sersic index の増加は問題

Future works

- ▶ Model galaxy の性質、軌道パラメータを変えて計算
- ▶ 粒子数を増やした計算
- ▶ 宇宙論的枠組みのもとでどの程度有効なプロセスかを検証