

バリオン-ダークマター間の超音速 相対運動を含む暗黒時代の構造形成

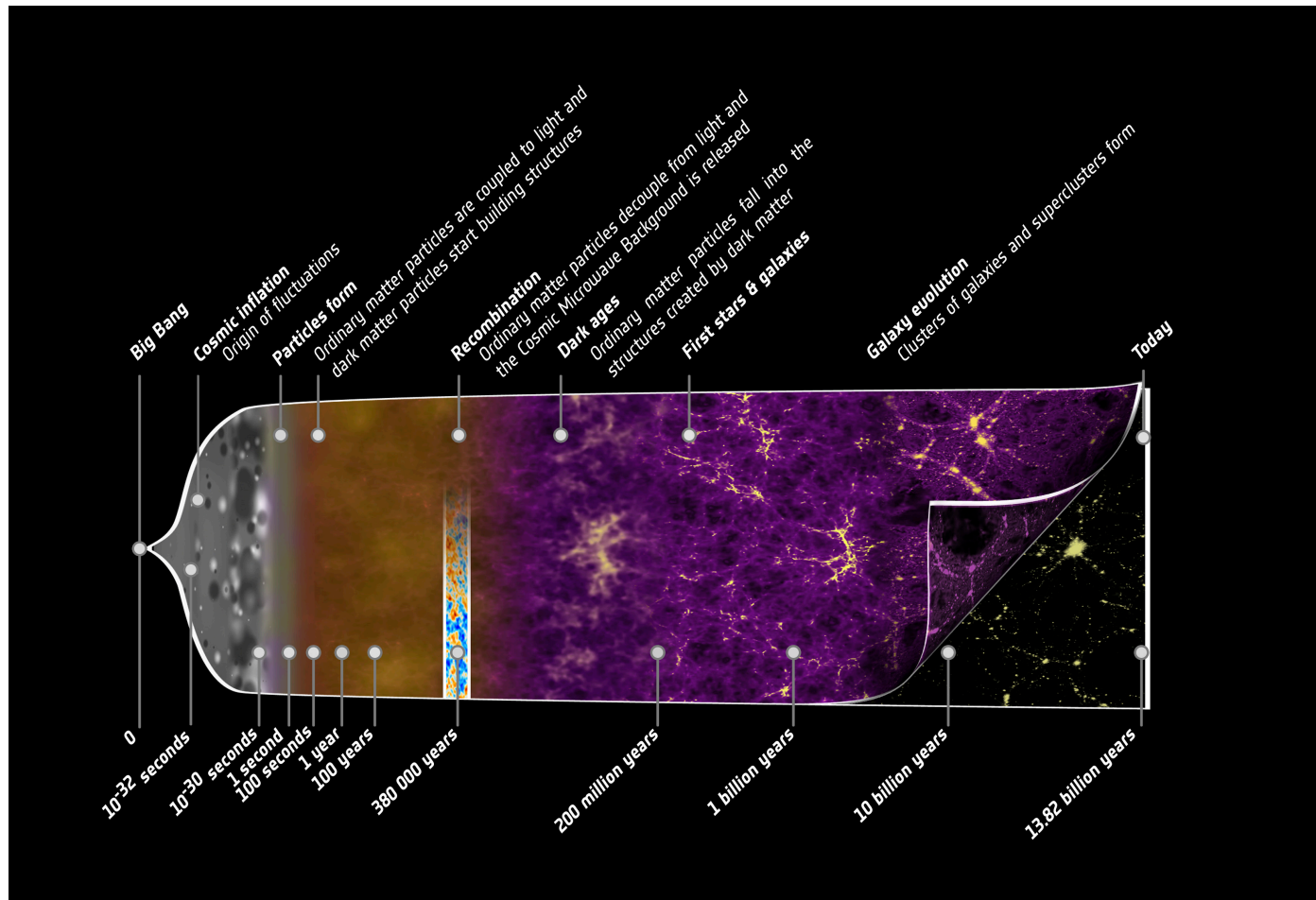
浅羽信介

名古屋大学

銀河進化と遠方宇宙@アーデンホテル阿蘇

2017.1.9

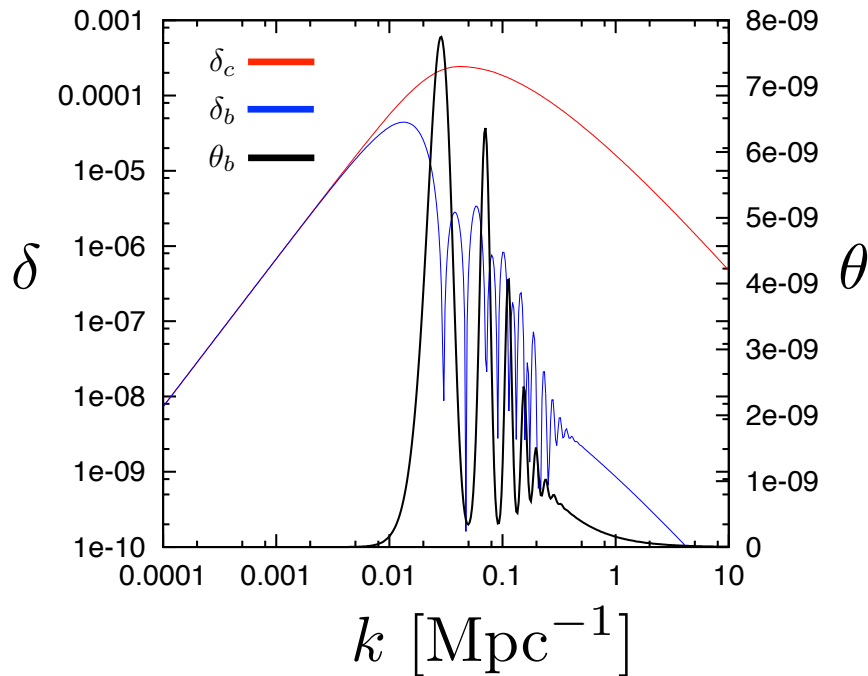
History of the universe



Supersonic streaming motion

D. Tseliakhovich & C. Hirata (2010)

パワースペクトル(z=1000)



バリオンとDMの相対速度は

$$\langle v_{bc}^2 \rangle^{1/2} \sim 30 \text{ km/s}$$

マッハ数=5

Effective Jeans Scale

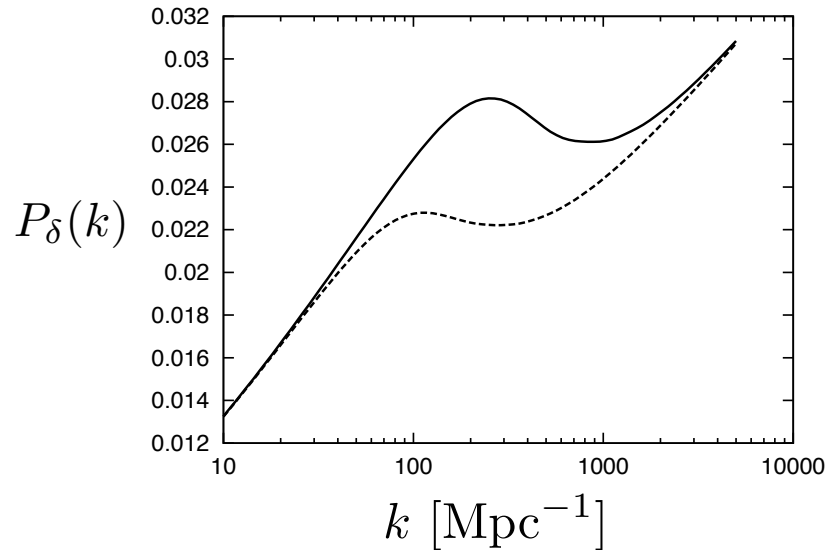
$$k_{vbc} \equiv \frac{aH}{\langle v_{bc}^2 \rangle^{1/2}} \Big|_{\text{dec}} \sim 40 \text{ Mpc}^{-1}$$

$$\rightarrow M_{bc} \sim 10^7 M_{\odot}/h$$

$$\frac{d^2 \delta_b}{dt^2} = -2H \frac{d\delta_b}{dt} + \frac{3H^2}{2} (\Omega_c \delta_c + \Omega_b \delta_b) + \boxed{2\mu v_{bc} \frac{k}{a} \frac{d\delta_b}{dt}} - (c_s^2 + \boxed{\mu^2 v_{bc}^2}) \frac{k^2}{a^2} \delta_b$$

Supersonic streaming motion

D. Tseliakhovich & C. Hirata (2010)



物質のパワースペクトル @ z=40
 実線: v_{bc} なし 破線: v_{bc} あり ($\mu=1$)

バリオンとDMの相対速度は

$$\langle v_{bc}^2 \rangle^{1/2} \sim 30 \text{ km/s}$$

マッハ数=5

Effective Jeans Scale

$$k_{vbc} \equiv \frac{aH}{\langle v_{bc}^2 \rangle^{1/2}} \Big|_{\text{dec}} \sim 40 \text{ Mpc}^{-1}$$

$$\rightarrow M_{bc} \sim 10^7 M_{\odot}/h$$

$$\frac{d^2 \delta_b}{dt^2} = -2H \frac{d\delta_b}{dt} + \frac{3H^2}{2} (\Omega_c \delta_c + \Omega_b \delta_b) + \boxed{2\mu v_{bc} \frac{k}{a} \frac{d\delta_b}{dt}} - (c_s^2 + \boxed{\mu^2 v_{bc}^2}) \frac{k^2}{a^2} \delta_b$$

風が吹けば学者が儲かる

- First Starの数や性質
- Globular Cluster Naoz & Narayan (2014), Popa et al. (2015)
- 初期磁場生成 Naoz & Narayan (2013)
- 再電離と21cm McQuinn & O'Leary (2012)
- BAOと銀河バイアス Yoo et al. (2012)
- Missing Satellites Problem
- $\sigma_8 - \Omega_m$ 問題

Supersonic Streaming Motionは必ずある

風が吹けば学者が儲かる

- First Starの数や性質
- Globular Cluster Naoz & Narayan (2014), Popa et al. (2015)
- 初期磁場生成 Naoz & Narayan (2013)
- 再電離と21cm McQuinn & O'Leary (2012)
- BAOと銀河バイアス Yoo et al. (2012)
- Missing Satellites Problem

問題

球対称崩壊モデルに相対速度を加えることで構造形成に与える影響を詳細に理解したい。

21cmのシグナルなどを見積もるときに使える準解析モデルを作りたい。

Initial Condition

ダークマターの初期条件

- 一様密度の背景粒子+一様密度球の密度揺らぎ
- 初期速度は球殻内の質量が時間によらず一定になるよう ($dM/dt = 0$) に与える。

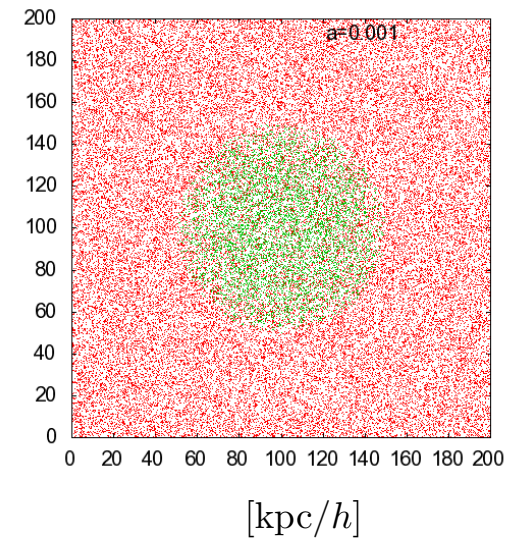
$$\Rightarrow v_i = H x_i \delta_i / 3(1 + \delta_i)$$

- 設定: $n_b = 3 \times 10^6$, $\Omega_b/\Omega_M = 1/6$, $M_c = 4 \times 10^7 M_\odot/h$
- バリオンの初期時刻での密度揺らぎは無視し、相対速度のみを与える。

$$\Rightarrow \delta_b = 0, \vec{v}_b = (v_{bc}, 0, 0)$$

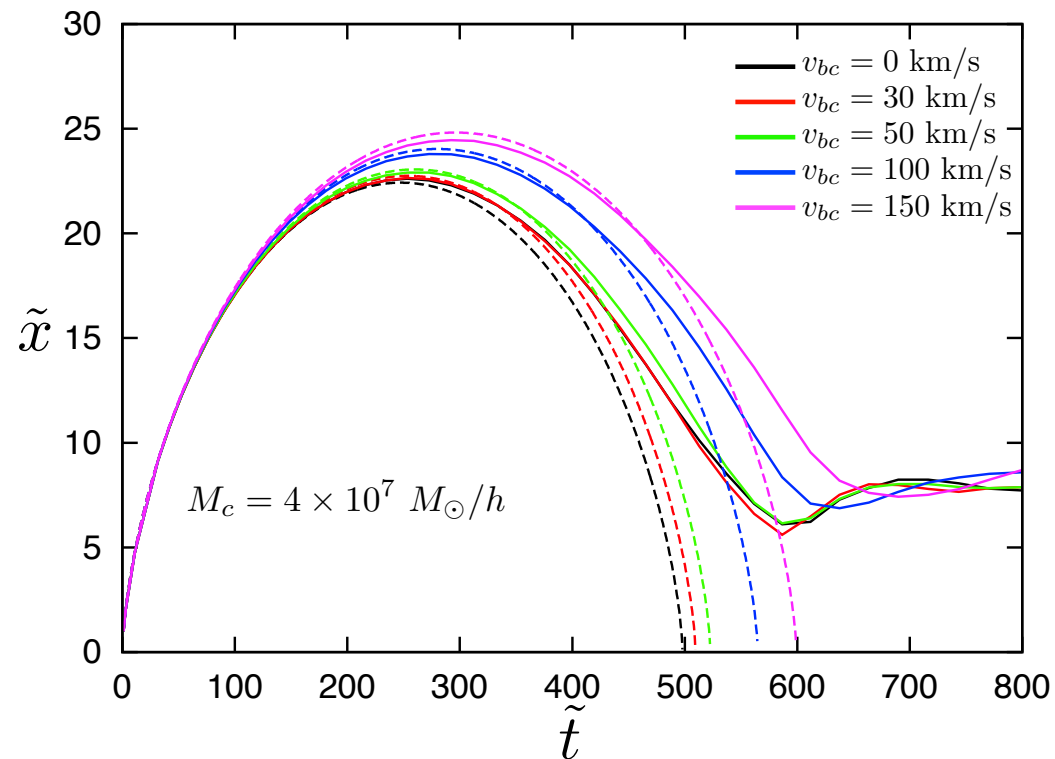
- パラメーター ($M_c, v_{bc}, \delta_{c,i}$)
- 初期時刻: $z_i = 1000$
- N体シミュレーションコード: Gadget-2

Springel et al. (2001)



Spherical collapse with relative motion

球殻の半径の時間発展



Semi-analytical model (破線)

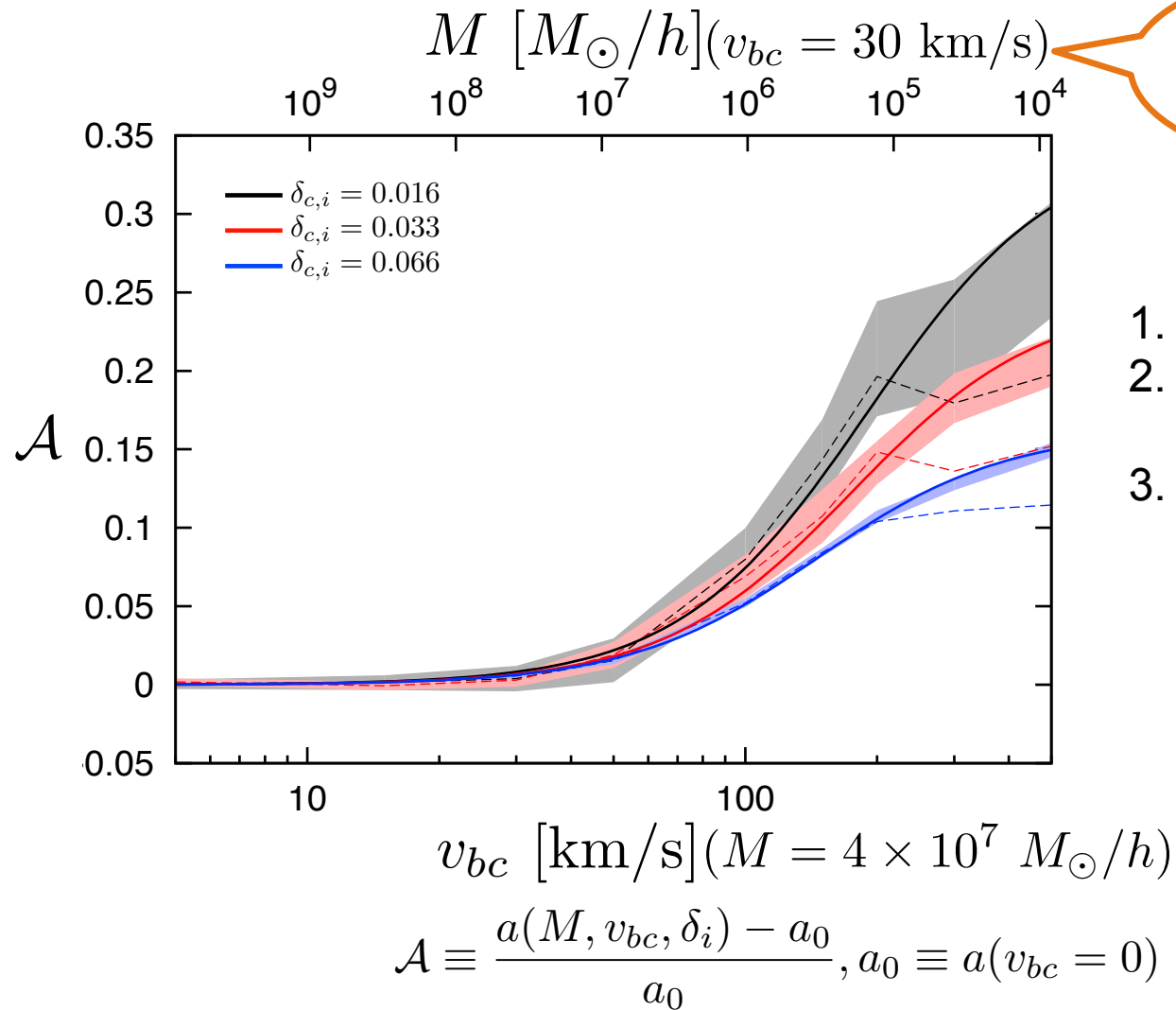
$$\frac{d^2 x_c}{dt^2} = -\frac{G(M_{ci} + M_b)}{x_c^2},$$

$$M_{ci} = \frac{4\pi}{3} \bar{\rho}_{ci} x_{ci}^3 (1 + \delta_{ci}),$$

$$M_b = \frac{4\pi}{3} \bar{\rho}_b x_c^3 (1 + \delta_b).$$

シミュレーションから

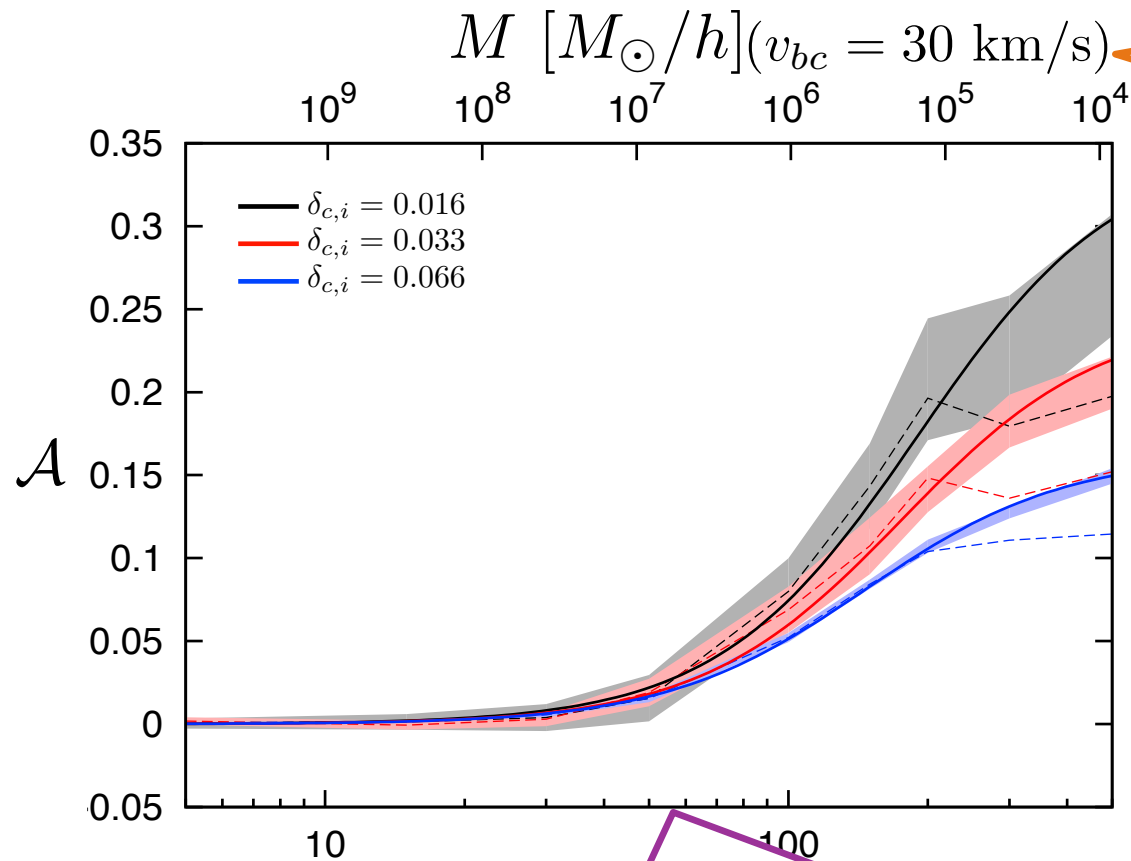
Result with relative velocity



相対速度の影響は
 $kv_{bc} \sim v_{bc}/M^{1/3}$
 で決まる。

1. δ_i が小さい。
2. Collapseするまでが長い。
3. 相対速度の影響を受ける時間が長い。

Result with relative velocity



相対速度の影響は
 $kv_{bc} \sim v_{bc}/M^{1/3}$
 で決まる。

1. δ_i が小さい。
2. Collapseするまでが長い。
3. 相対速度の影響を受ける時間が長い。

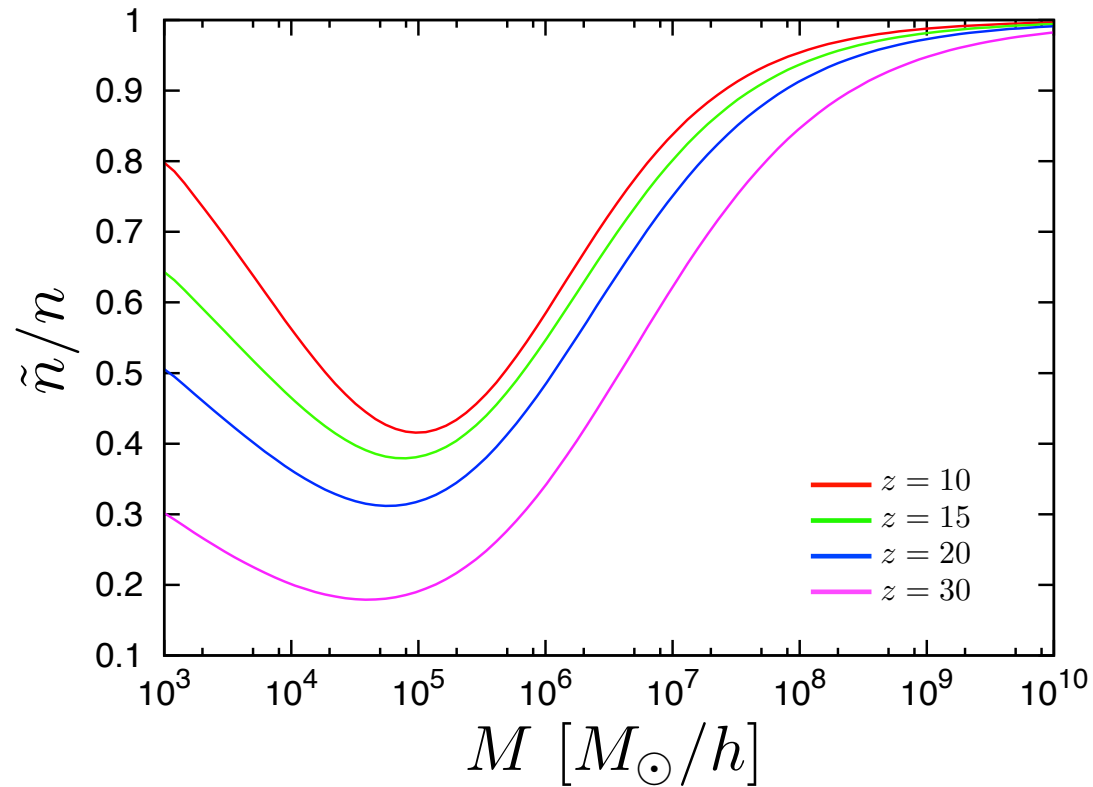
$$v_{\text{cir}} = \sqrt{\frac{GM}{x_i}} \simeq 57 \text{ km/s} \quad \longleftrightarrow \quad v_{bc} = \frac{aH}{k}$$

Mass function

Press-Schechter formalism $\tilde{\delta}_{\text{crit}}(M, v_{bc}, \delta_i) = \delta_{\text{crit}} [1 + \mathcal{A}(M, v_{bc}, \delta_i)]$

$$\tilde{n}(M) = \int dv_{bc} f(v_{bc}) \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\bar{\rho}(z)}{M} \frac{\tilde{\delta}_{\text{crit}}}{\sigma(M)} \left[\frac{d \ln \tilde{\delta}_{\text{crit}}}{dM} - \frac{d \ln \sigma(M)}{dM} \right] \exp \left[-\frac{\tilde{\delta}_{\text{crit}}^2}{2\sigma^2(M)} \right].$$

$P(v_{bc})$: マクスウェル-ボルツマン分布



Cosmological simulation

$$(\Omega_M, \Omega_b, h) = (0.307, 0.048, 0.677)$$

$$L_{\text{Box}} = 1000 [h/\text{kpc}]$$

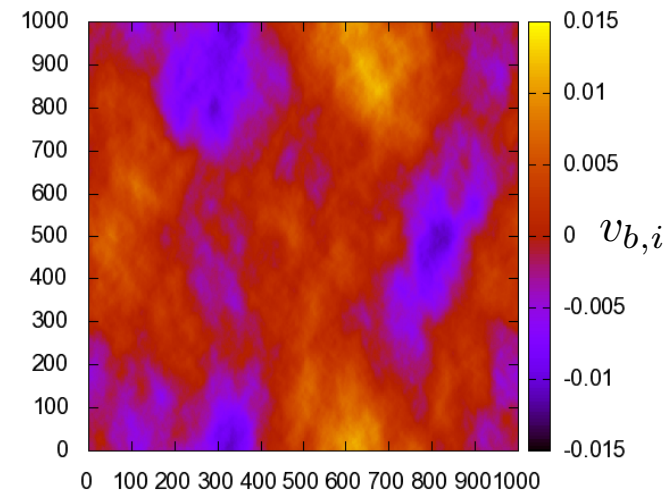
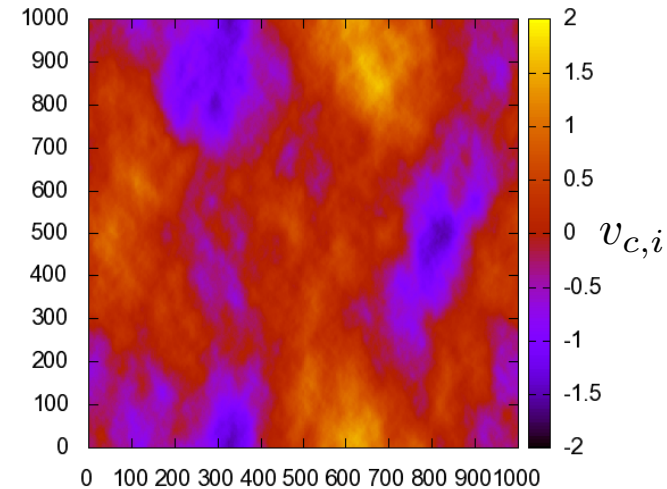
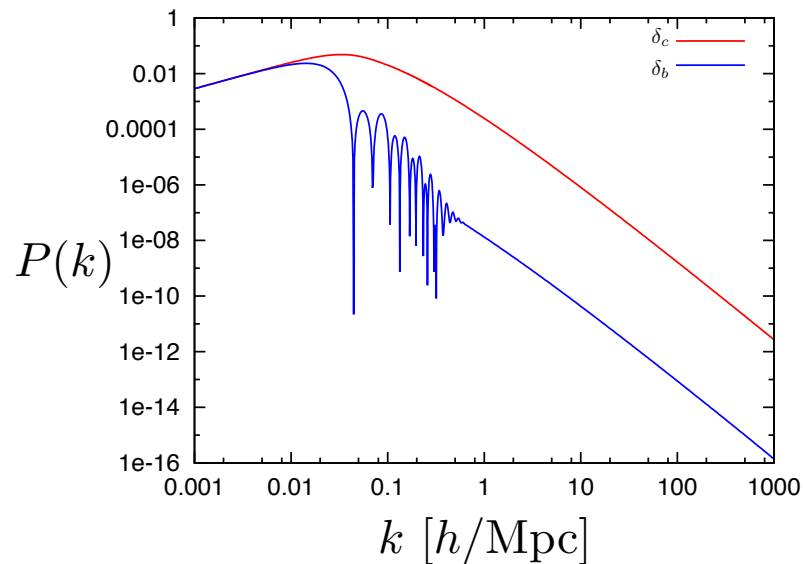
$$N_p = 2 \times 512^3$$

$$m_b = 100 [M_\odot/h]$$

$$m_c = 535 [M_\odot/h]$$

$$z_i = 1000$$

$$v_{bc} = 30 \text{ km/s}$$



$v \propto \delta$ である。相対速度の影響は δ に焼き直すと10%程度。バリオンの初期揺らぎは影響しない。

Cosmological simulation

$$(\Omega_M, \Omega_b, h) = (0.307, 0.048, 0.677)$$

$$L_{\text{Box}} = 1000 [h/\text{kpc}]$$

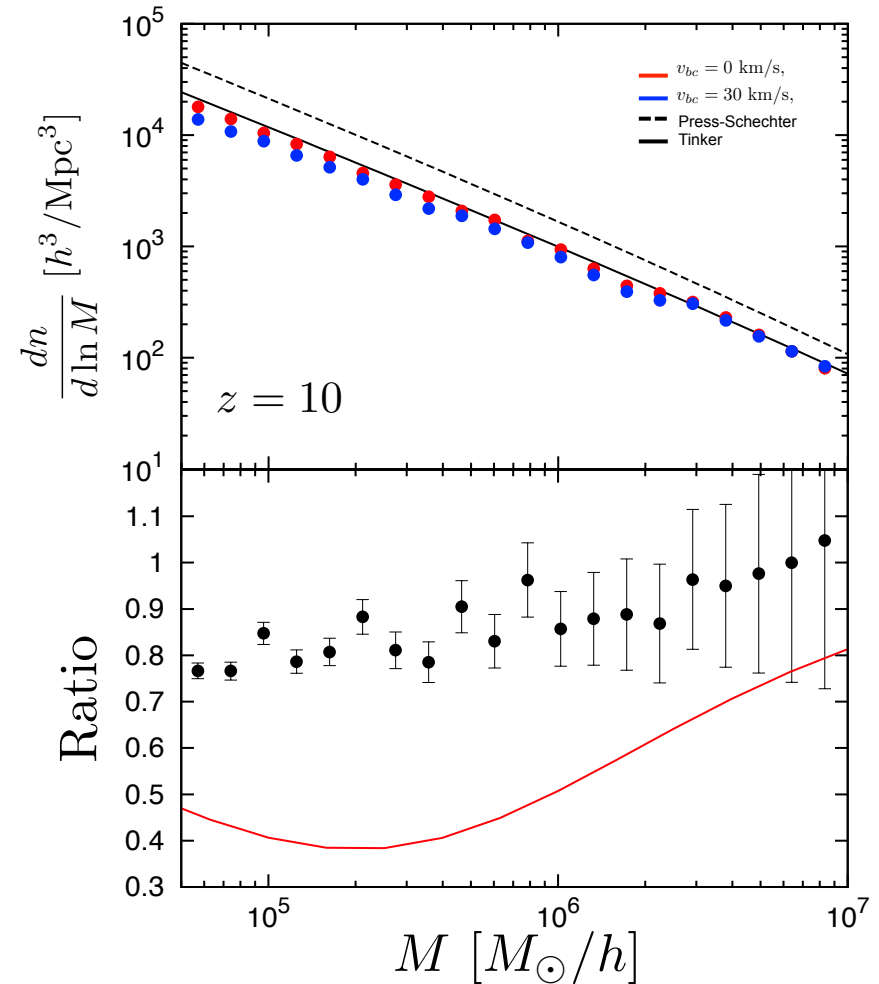
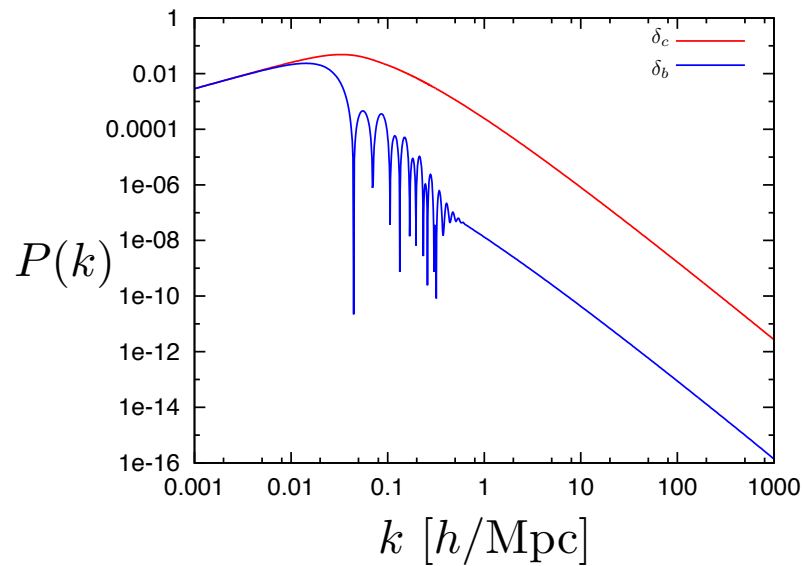
$$N_p = 2 \times 512^3$$

$$m_b = 100 [M_\odot/h]$$

$$m_c = 535 [M_\odot/h]$$

$$z_i = 1000$$

$$v_{bc} = 30 \text{ km/s}$$



ハローはFOF法により特定した。

Environmental effect K. Ahn (2016)

$$\frac{\partial \delta_c}{\partial t} = - (1 + \Delta_c) \theta_c - \Theta_c \delta_c,$$

$$\frac{\partial \theta_c}{\partial t} = - \frac{3}{2} H^2 (f_c \delta_c + f_b \delta_b) - 2H \theta_c,$$

$$\frac{\partial \delta_b}{\partial t} = - i a^{-1} \mathbf{V}_{bc} \cdot \mathbf{k} \delta_b - (1 + \Delta_b) \theta_b - \Theta_b \delta_b,$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_b}{\partial t} = & - i a^{-1} \mathbf{V}_{bc} \cdot \mathbf{k} \theta_b - \frac{3}{2} H^2 (f_c \delta_c + f_b \delta_b) - 2H \theta_b \\ & + a^{-2} \frac{k_B \bar{T}}{\mu m_H} k^2 \{ (1 + \Delta_b) \delta_T + (1 + \Delta_T) \delta_b \}, \end{aligned}$$

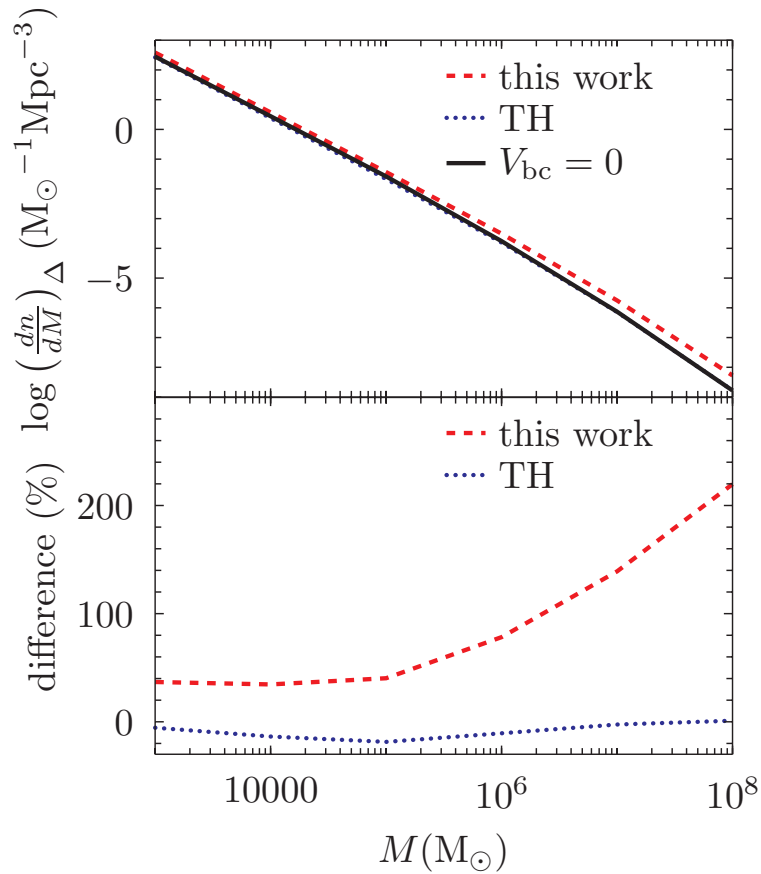
$$\begin{aligned} \frac{\partial \delta_T}{\partial t} = & \frac{2}{3} \left\{ \frac{\partial \delta_b}{\partial t} + \frac{\partial \Delta_b}{\partial t} (\delta_T - \delta_b) + \frac{\partial \delta_b}{\partial t} (\Delta_T - \Delta_b) \right\} \\ & - \frac{x_e(t)}{t_\gamma} a^{-4} \frac{\bar{T}_\gamma}{\bar{T}} \delta_T \end{aligned}$$

$\Delta_i, \Theta_i, V_{bc}$ は実空間の各パッチのLarge-Scale Modeの揺らぎ

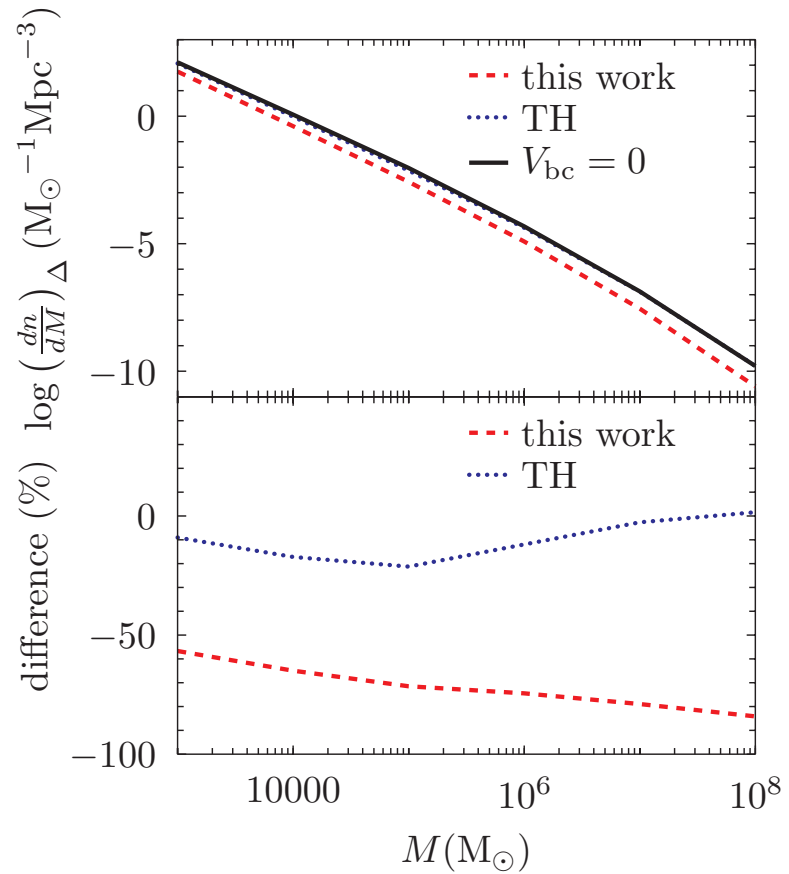
Environmental effect

K. Ahn (2016)

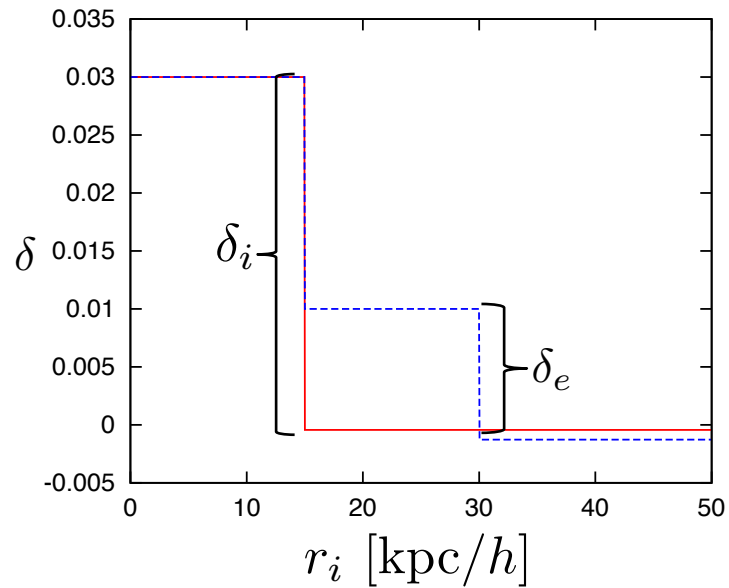
$$z=19, \Delta_c(a_i) = 0.0054$$



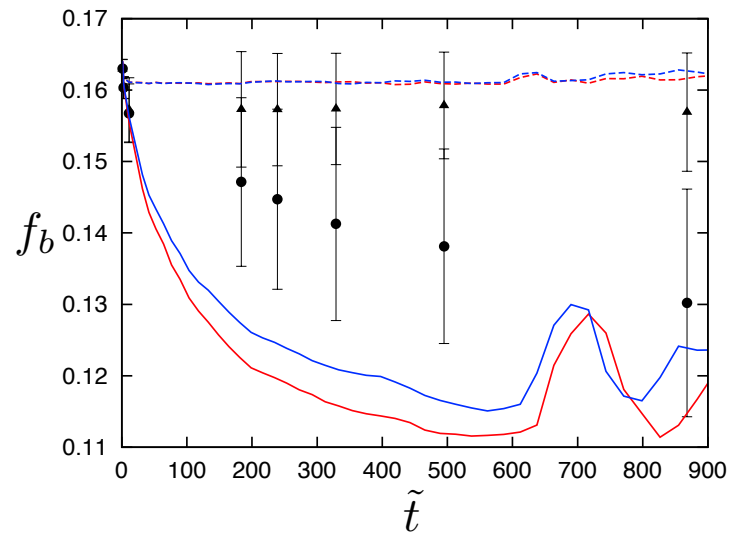
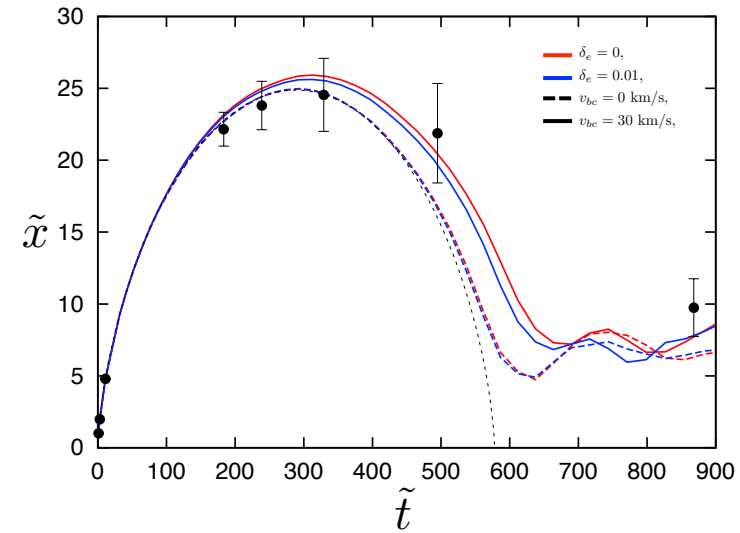
$$z=19, \Delta_c(a_i) = -0.0054$$



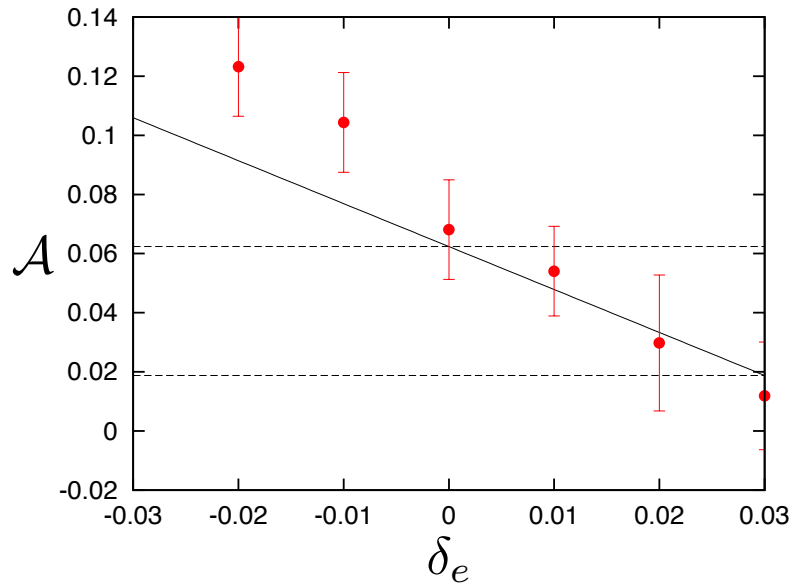
Environmental effect



δ_e を変化させることによって、
周りの密度の影響を見積もる。

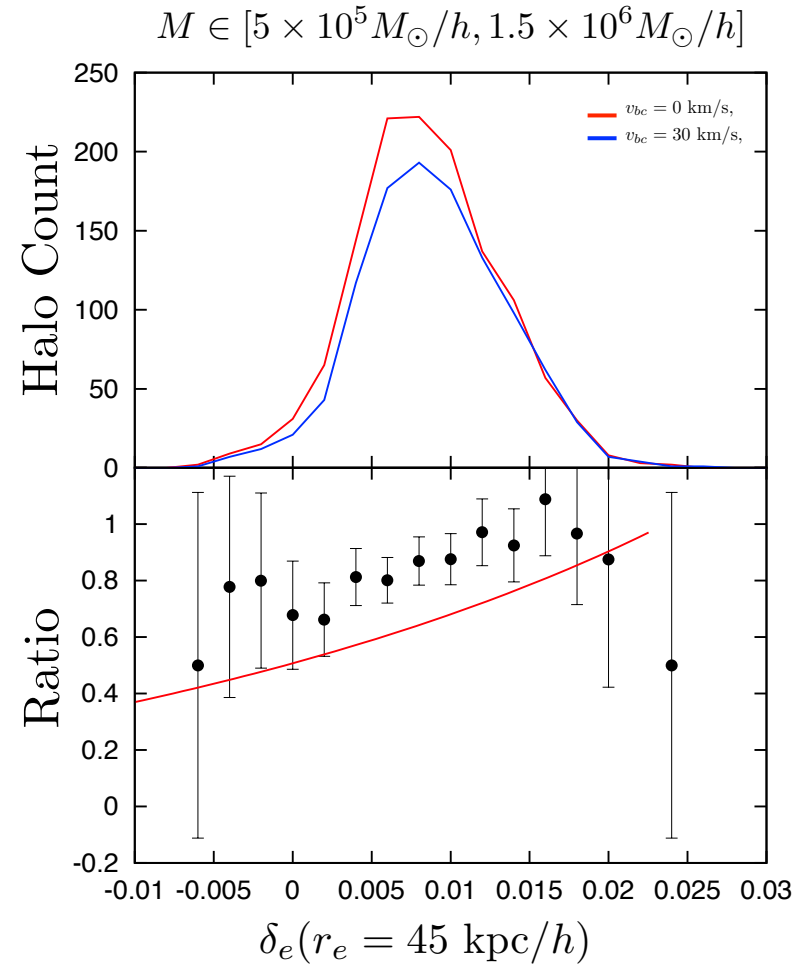


Environmental effect

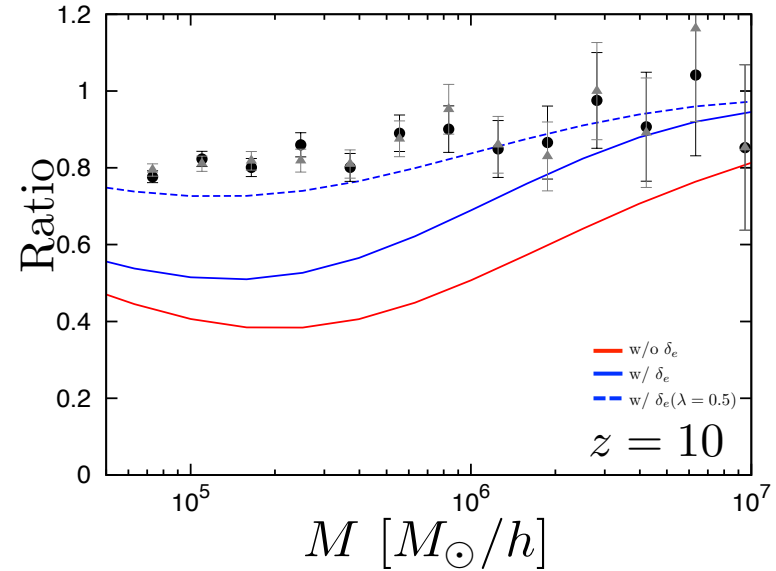
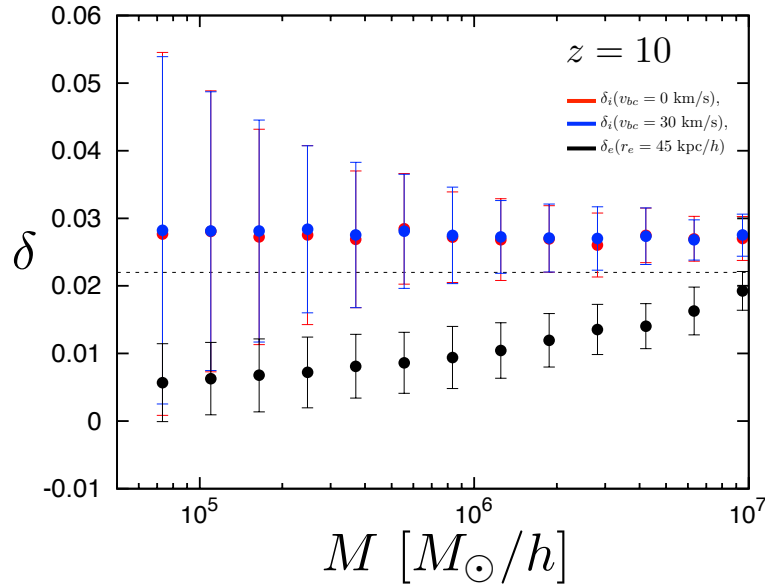


$$\tilde{\mathcal{A}}(M_i, v_{bc}, \delta_i, M_e, \delta_e) = (\mathcal{A}_e - \mathcal{A}_i) \frac{\delta_e}{\delta_i} + \mathcal{A}_i,$$

$$\mathcal{A}_i = \mathcal{A}(M_i, v_{bc}, \delta_i), \quad \mathcal{A}_e = \mathcal{A}(M_e, v_{bc}, \delta_i)$$



Mass function



$$\tilde{n}(M_c, v_{bc}, z) = \int d\delta_e g(\delta_e; M_c, M_e, z) \sqrt{\frac{2}{\pi} \frac{\bar{\rho}(z)}{M_c} \frac{\tilde{\delta}_{\text{crit}}}{\sigma(M_c, z)}}$$

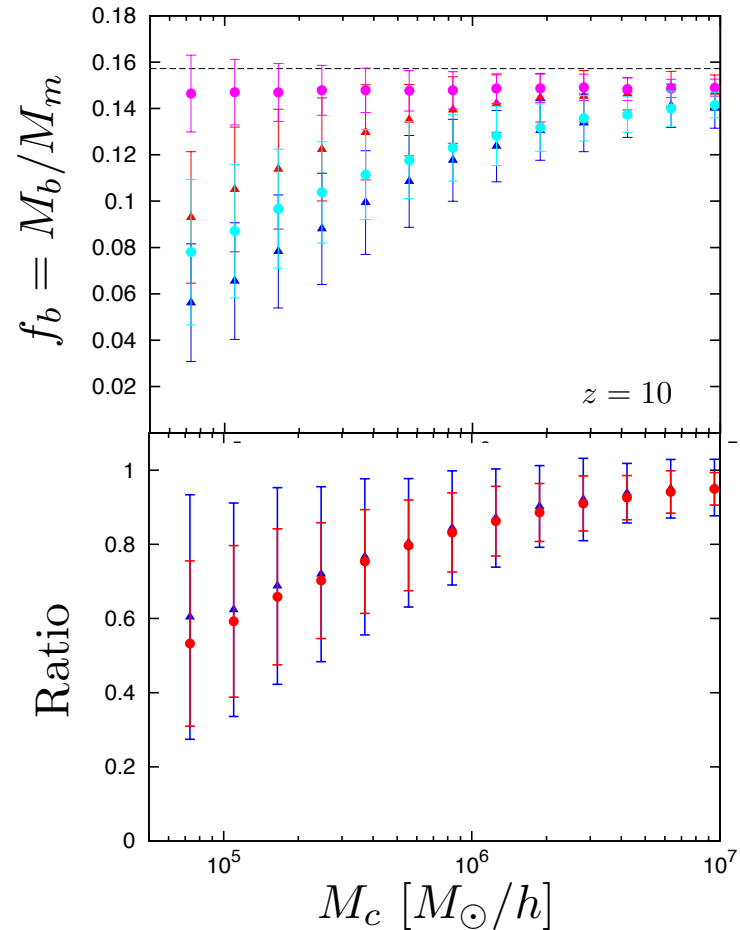
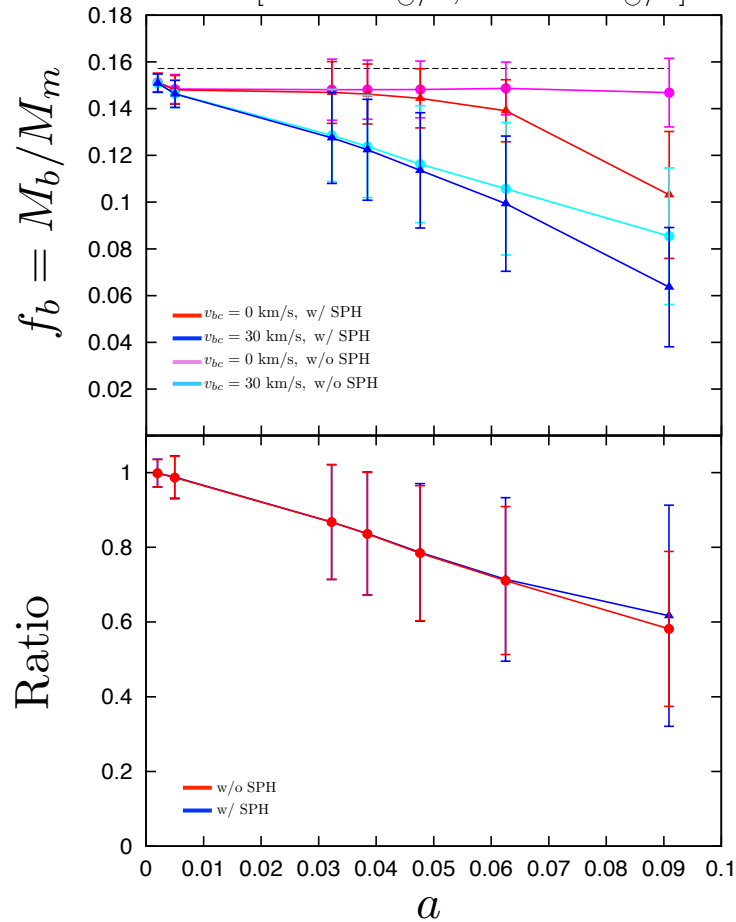
$$\times \left[\frac{d \ln \tilde{\delta}_{\text{crit}}}{dM_c} - \frac{d \ln \sigma(M_c, z)}{dM_c} \right] \exp \left[-\frac{\tilde{\delta}_{\text{crit}}^2}{2\sigma^2(M_c, z)} \right].$$

$g(\delta_e; M_c, M_e, z)$ は M_c が潰れる場所を中心にはかった δ_e の条件付き確率

$$\tilde{\delta}_{\text{crit}}(M_c, v_{bc}, \delta_{c,i}, M_e, \delta_e) = \delta_{\text{crit}} [1 + \lambda \tilde{\mathcal{A}}(M_c, v_{bc}, \delta_{c,i}, M_e, \delta_e)],$$

SPH simulation

$M \in [8 \times 10^4 M_\odot/h, 1.2 \times 10^5 M_\odot/h]$



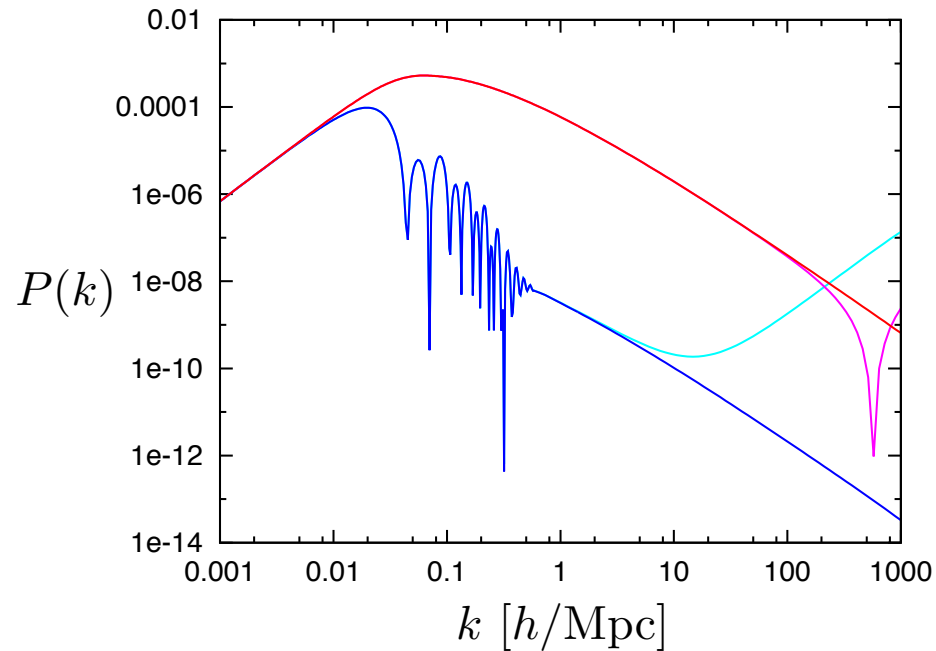
Turnaround time($a=0.05$)まで, f_b の減少は相対速度の効果。以降は圧力が効いてくる。Halo abundanceの変化は重力のみを計算したもので問題ない。
 \therefore 圧力が効くようなハローではTurnaround timeのとき $\delta_c \gg \delta_b$.

Appendix

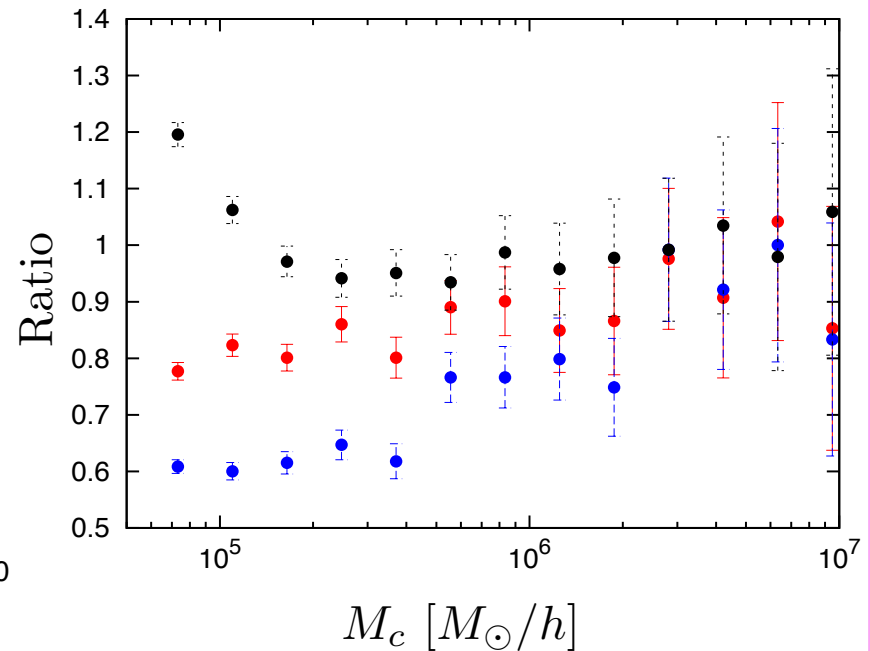
Supersonic streaming motionがあると小スケールのバリオンの初期パワースペクトルを測定できるかも

$$\delta_b \rightarrow \delta_b + \delta_{\text{ad}}/\Omega_b$$

$$\delta_c \rightarrow \delta_c - \delta_{\text{ad}}/\Omega_c$$



黒: (w/o v_{bc} , w/o $\bar{\delta}_{\text{ad}}$) and (w/o v_{bc} , w/ $\bar{\delta}_{\text{ad}}$)
 赤: (w/o v_{bc} , w/o $\bar{\delta}_{\text{ad}}$) and (w/ v_{bc} , w/o $\bar{\delta}_{\text{ad}}$)
 青: (w/o v_{bc} , w/ $\bar{\delta}_{\text{ad}}$) and (w/ v_{bc} , w/ $\bar{\delta}_{\text{ad}}$)



Summary

- Supersonic streaming motionは暗黒時代での、初代星が形成されるようなスケールで影響があり、その後の銀河形成やEoRに重要である。
- 球対称崩壊モデルを拡張することで、ハロー形成に与える影響を調べた。
- Supersonic streaming motionはハロー中のバリオンの質量割合を減少させることで形成時刻を遅らせる。
- その影響はハローができる環境にも大きく依存することがわかった。

Future Prospects

- Supersonic streaming motionがハロー合体やハロー分裂に与える影響。
- ハローの速度分散や固有速度があった場合。