

ニュートリノの 非線形クラスタリング

京都大学 基礎物理学研究所

宇宙グループ M2

大石 直矢

共同研究者 樽家篤史 (京都大) 平松尚志 (京都大) 橋本一彦 (京都大)

第4回観測的宇宙論ワークショップ

2015年 11月18日



Introduction

近年の観測精度の向上 → 精密な宇宙論を展開することは重要 → ニュートリノ入りの宇宙論を考える

ニュートリノには質量がある

祝 2015年
ノーベル賞受賞

$$0.05eV \leq \Sigma m_\nu \leq 0.23eV$$

ニュートリノ振動の観測

G.Fogli et al. (2012)

宇宙論の観測

Planck (2015)



質量をもつニュートリノは大規模構造にも
少なからず影響を与える

ニュートリノを入れた大規模構造計算



摂動論について線形領域でのニュートリノを
流体近似として扱うことの妥当性はすでに議論されている

Shoji, Komatsu (2010)

しかし非線形領域まで流体近似を適応して良いかどうかは
未だ議論されていない

研究目的

非線形領域でのニュートリノを流体近似として扱うことの妥当性を明らかにしたい

研究手法

ニュートリノ密度プロファイル計算

- ① fullのVlasov方程式を解くことに対応するN-one-bodyシミュレーション(Ringwald, Wong 2004)を行う
- ② Vlasov方程式を近似した流体方程式(非線形項を含む)を解く

これら2つの計算結果を比較する

(今回は①の話をしめます ②はwork in progress)

① N-one-bodyアプローチ

CDMハロー

Ringwald, Wong (2004)



ニュートリノの同士の
相互作用は無視

ポテンシャルはCDMのみが作る
(ニュートリノの自己重力無視)

ニュートリノは質量をもつので
low-zで非相対論的粒子として
振舞う

CDMハローはNFWモデル

$$\rho_{\text{halo}}(r) = \frac{\rho_s}{\frac{r}{r_s} \left(1 + \frac{r}{r_s}\right)^2}$$

ニュートリノの個数密度計算

$$n(r) = \int f[r, v] d^3 v$$

初期状態 ($z=4$) の分布

フェルミディラック分布 $f_{FD}(p)$

終状態 ($z=0$) の分布

$f(r, v)$

$$p = m_\nu v$$

Liouvilleの定理より分布関数について、

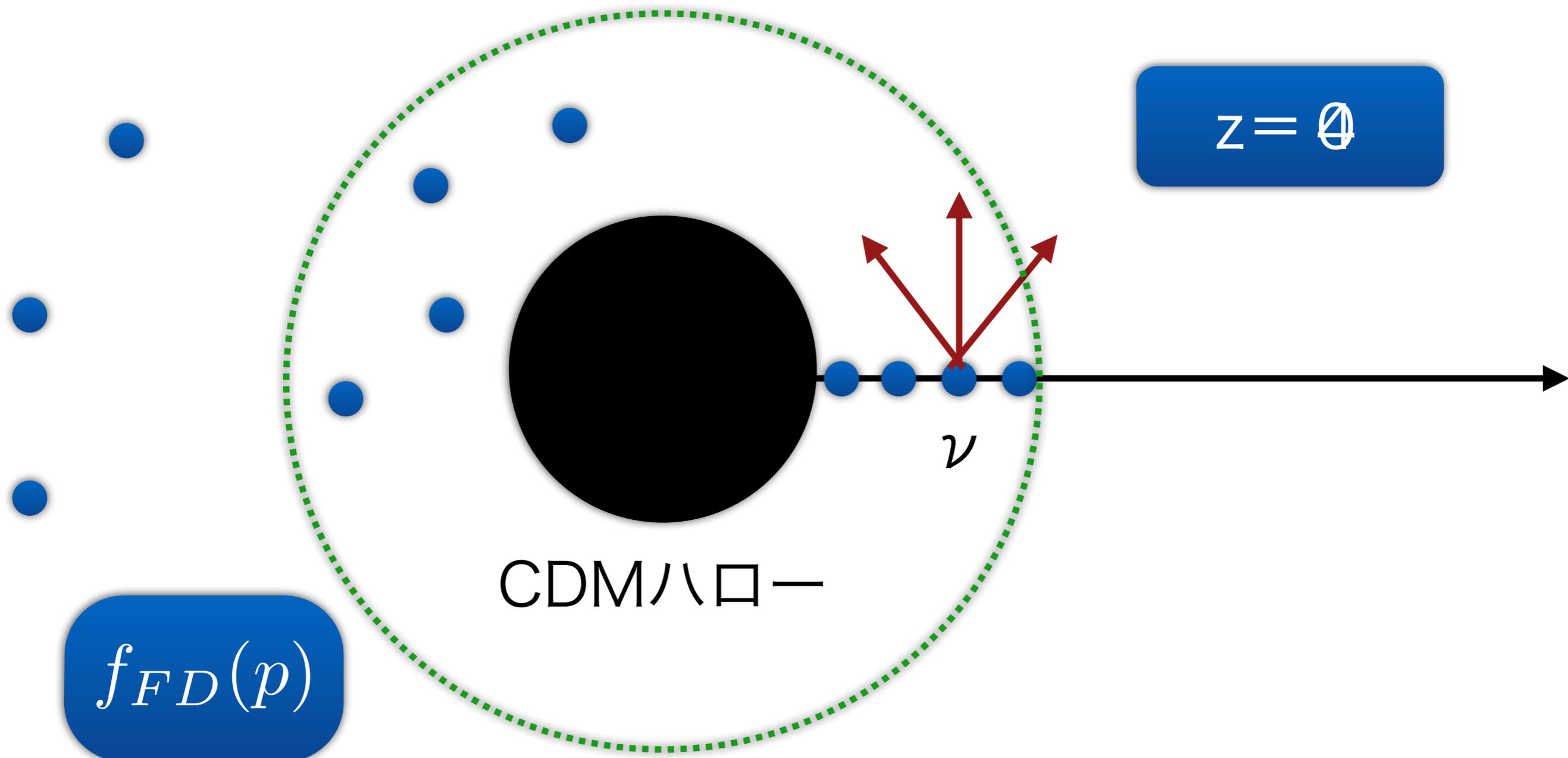
$$f[r_i(t_1), v_i(t_1), t_1] = f[r_i(t_2), v_i(t_2), t_2]$$

$z=0$ からニュートリノの軌道を時間に関して逆解き

- 運動方程式
- ポワソン方程式

逆解き法のメリット

終状態($z=0$)のニュートリノの位置をある半径の内側とすることで、最終的にCDMハロー周りにいないものを計算せずに済み計算コストが良くなる



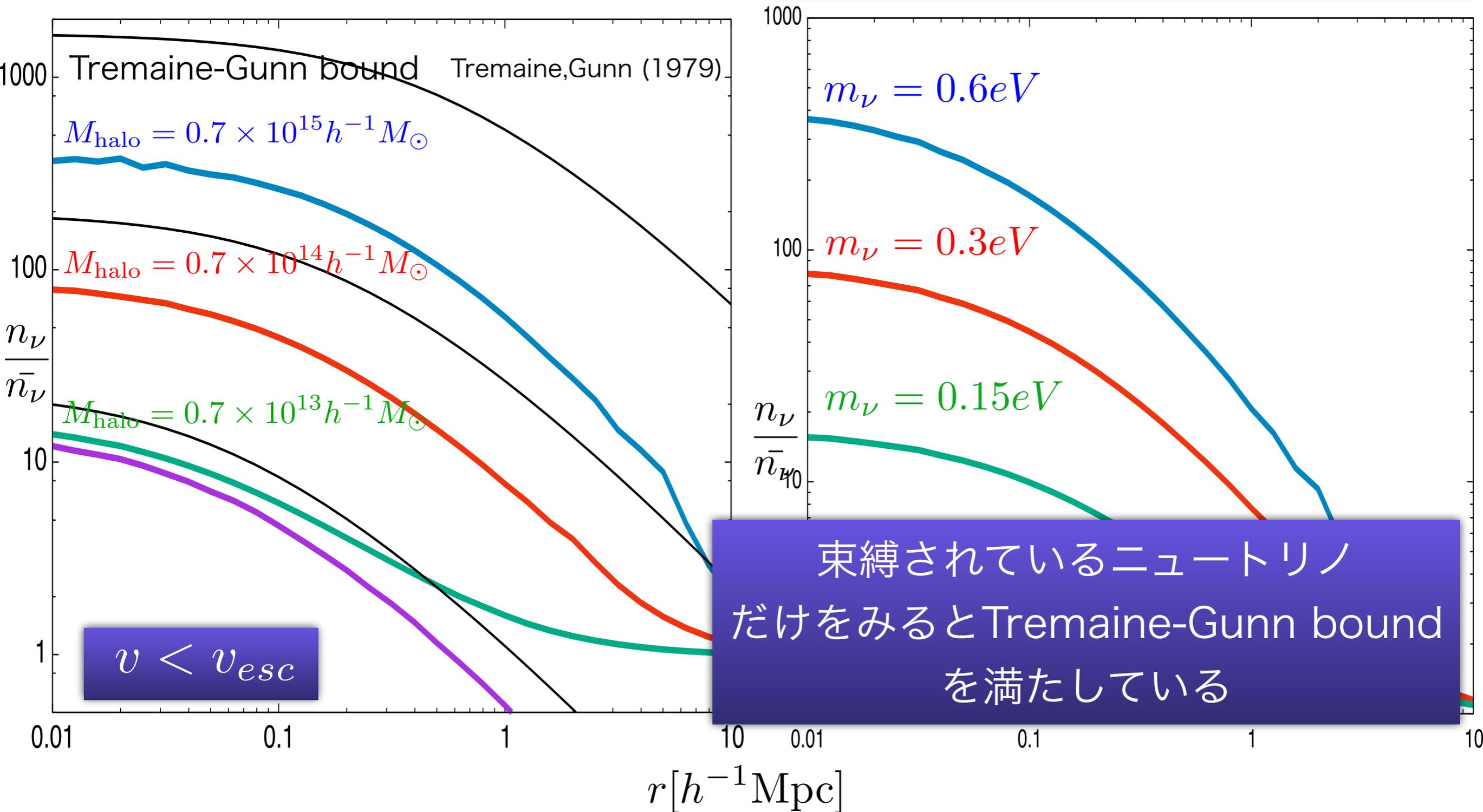
結果：密度分布の質量依存性

ニュートリノ質量固定

$$m_\nu = 0.3eV$$

CDMハロ一質量固定

$$M_{\text{halo}} = 0.7 \times 10^{14} h^{-1} M_\odot$$



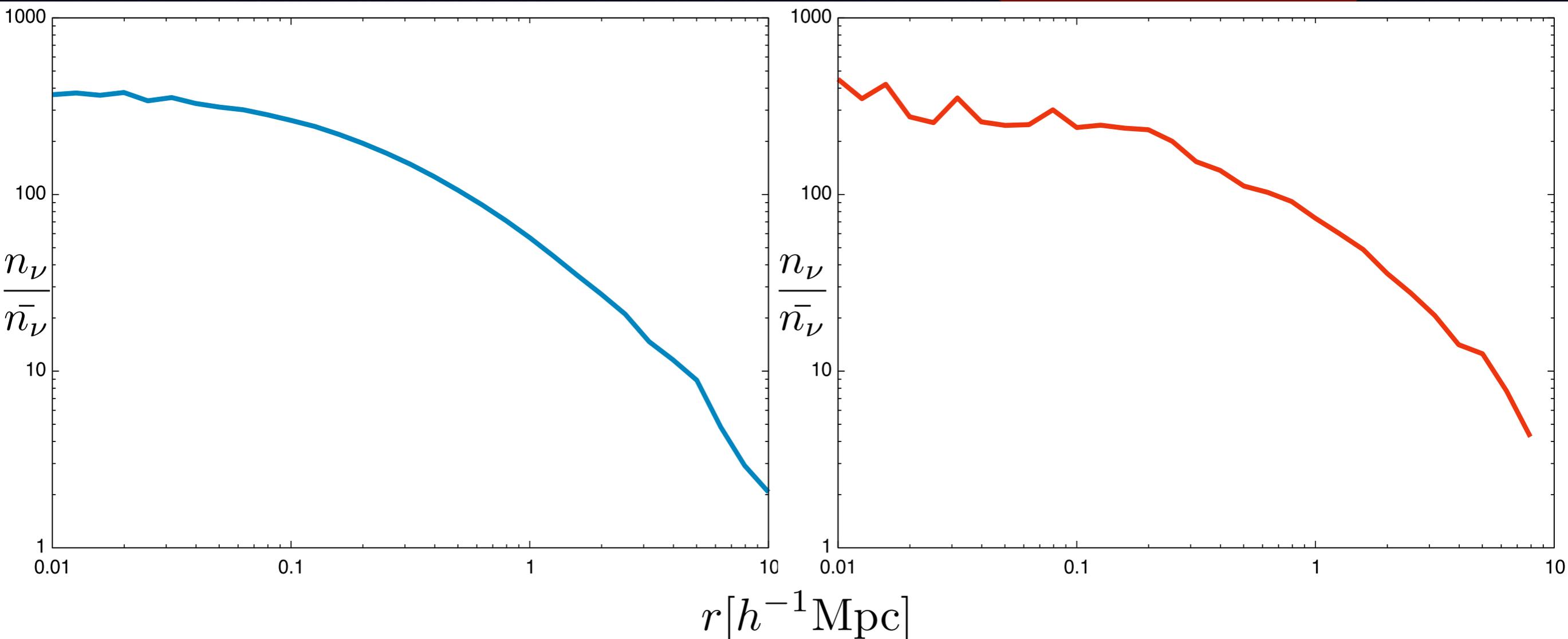
結果：逆解きの利点

$$m_\nu = 0.3\text{eV}$$

$$M_{\text{halo}} = 0.7 \times 10^{15} h^{-1} M_\odot$$

逆解き

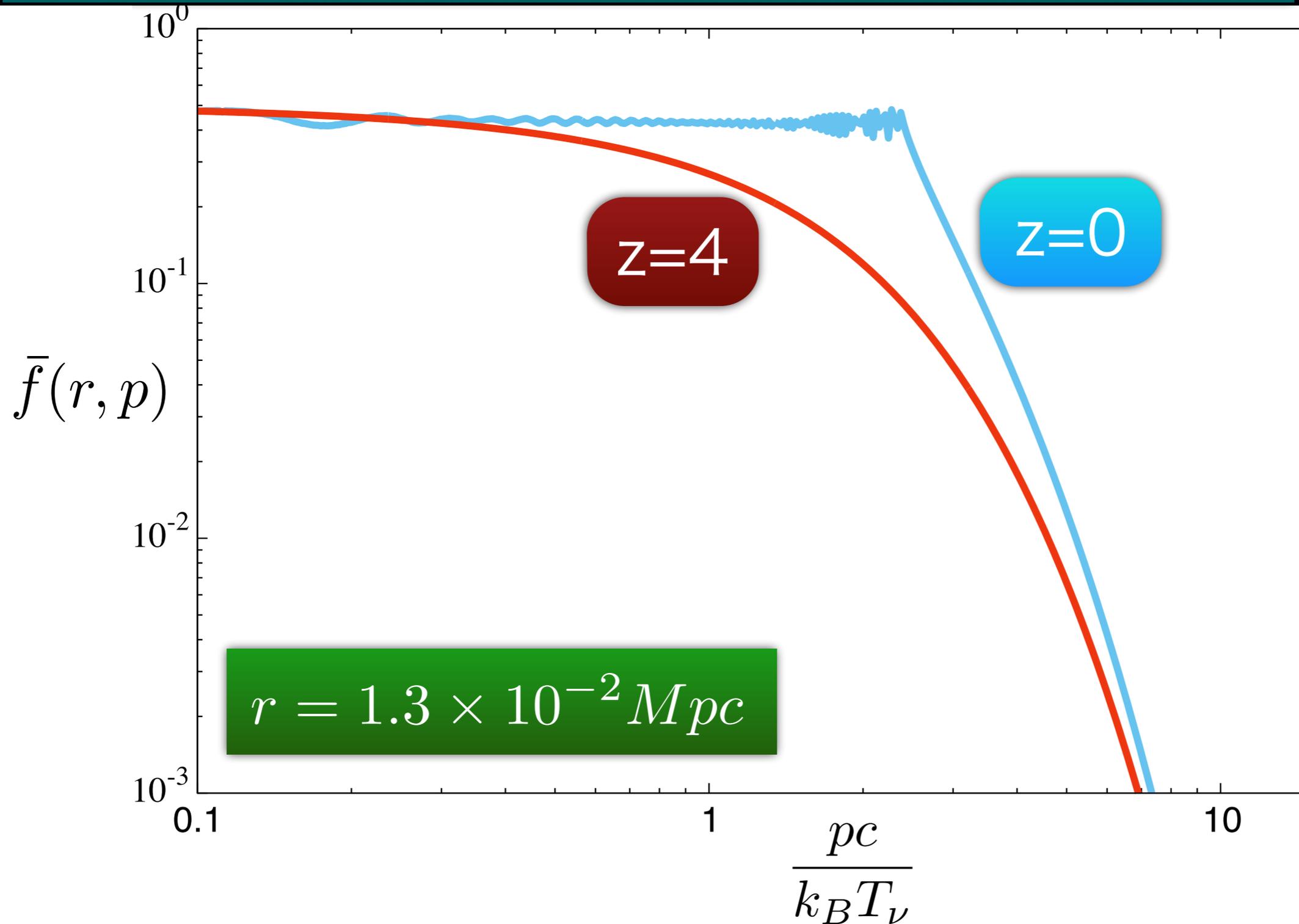
順解き



同じ計算コストでは、逆解きの方が有利！（収束しやすい）

結果：ニュートリノの運動量分布

$$m_\nu = 0.3\text{eV} \quad M_{\text{halo}} = 0.7 \times 10^{12} h^{-1} M_\odot$$



② 流体近似アプローチ (work in progress)

ニュートリノを流体としてVlasov方程式を近似

$$\frac{\partial \delta_\nu}{\partial t} + \frac{1}{a} \mathbf{v}_\nu \cdot \nabla \delta_\nu = -\frac{1}{a} (1 + \delta_\nu) \nabla \cdot \mathbf{v}_\nu$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}_\nu}{\partial t} + \frac{1}{a} (\mathbf{v}_\nu \cdot \nabla) \mathbf{v}_\nu = -\frac{\nabla \Phi}{a} - H \mathbf{v}_\nu - \frac{1}{a} c_s^2 \nabla \delta_\nu$$

$$\Delta \Phi = 4\pi G a^2 \bar{\rho}_m \delta_m$$

ニュートリノが非相対論的粒子であるという極限で

$$c_s^2 = \frac{5}{9} \sigma_\nu^2$$

Shoji, Komatsu (2010)

ポテンシャルはCDMが作るNFWプロファイルで決まる

まとめ

N-body シミュレーションを用いたニュートリノの数値計算

CDMハロー質量とニュートリノ質量の依存性

- 密度分布
- 運動量分布

今後の方針

流体近似を適用して計算したニュートリノの密度分布と比較して、非線形領域での流体近似の妥当性を調べたい

ご清聴ありがとうございました