

宇宙大規模構造形成における ニュートリノの影響

筑波大学 計算科学研究センター
吉川耕司

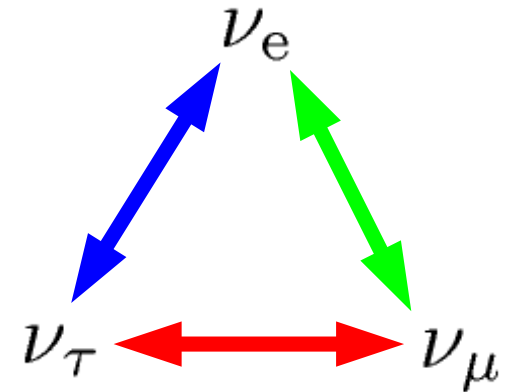
CfCA ユーザーズミーティング

2015年1月20日

Neutrino

▶ 中性のレプトンで、弱い相互作用に関わる素粒子

- 電子ニュートリノ ν_e
- タウニュートリノ ν_τ
- ミューニュートリノ ν_μ



Dirac粒子 ($\nu \neq \bar{\nu}$) なのかMajorana粒子 ($\nu = \bar{\nu}$) なのかは良く分かってない。

▶ 素粒子理論の標準模型ではDirac粒子で質量が0ということになっている

- 左巻きニュートリノしか観測されない
- 実は、Majorana粒子で非常に重い右巻きニュートリノと左巻きニュートリノがある可能性

▶ ニュートリノ振動の発見により質量が0でないことが明らかに

Super-KAMIOKANDE, SNO, T2K, OPERAなど

重力相互作用を通じて宇宙大規模構造に影響を及ぼしうる

ニュートリノの質量階層構造

▶ ニュートリノ振動実験でわかること

質量固有状態の質量 m_1 m_2 m_3

$$m_2^2 - m_1^2 = 7.9_{-0.8}^{+1.0} \times 10^{-5} \text{eV}^2$$

$$|m_3^2 - m_1^2| = 2.2_{-0.8}^{+1.1} \times 10^{-3} \text{eV}^2$$

$$\sin^2 \theta_{12} = 0.30_{-0.06}^{+0.10}$$

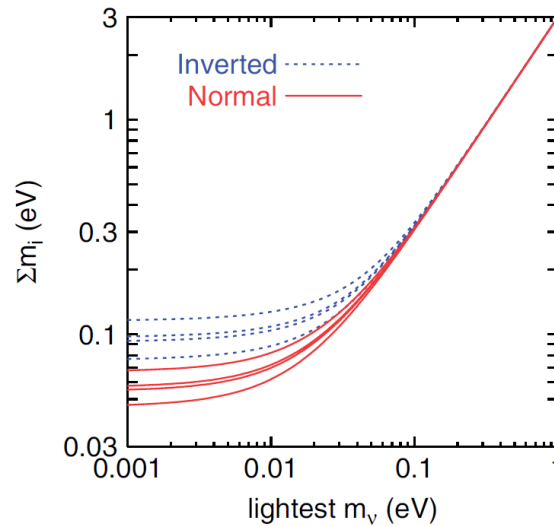
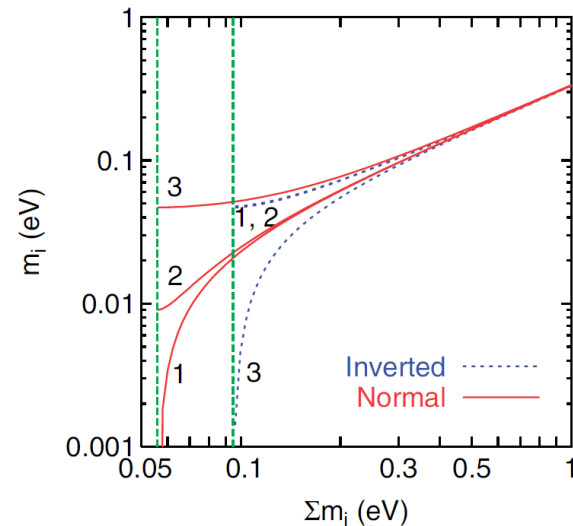
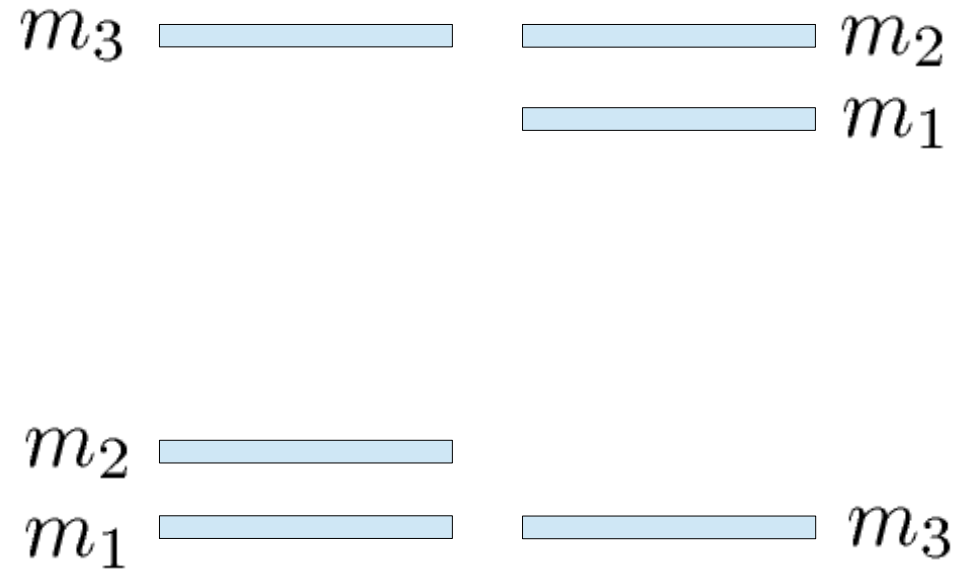
$$\sin^2 \theta_{23} = 0.50_{-0.16}^{+0.18}$$

$$\sin^2 \theta_{13} < 0.043$$

質量

normal

inverted



これまでの実験によるニュートリノ質量への制限

$$0.05 \text{eV} \leq \sum_i m_{\nu,i} \leq 6.0 \text{eV}$$

CMBの観測からは 1eV以下という制限

質量階層構造はSUSYの研究にきわめて重要

ニュートリノの構造形成への力学的影響

- ▶ ニュートリノの質量を無視した場合のダークマター密度揺らぎの線形成長

$$\ddot{\delta}_{\text{dm}} + 2H\dot{\delta}_{\text{dm}} = 4\pi G\bar{\rho}\delta_{\text{dm}} \quad \longrightarrow \quad \delta_{\text{dm}} \propto D_+(t)$$

- ▶ ニュートリノ存在下でのダークマター密度揺らぎの線形成長

- **無衝突減衰（ランダウ減衰）**により密度揺らぎの成長が抑制

$$\text{neutrino mass fraction} \quad f_\nu = \frac{\rho_\nu}{\rho_{\text{dm}} + \rho_{\text{b}} + \rho_\nu} = 0.084 \frac{\sum m_\nu}{1\text{eV}}$$

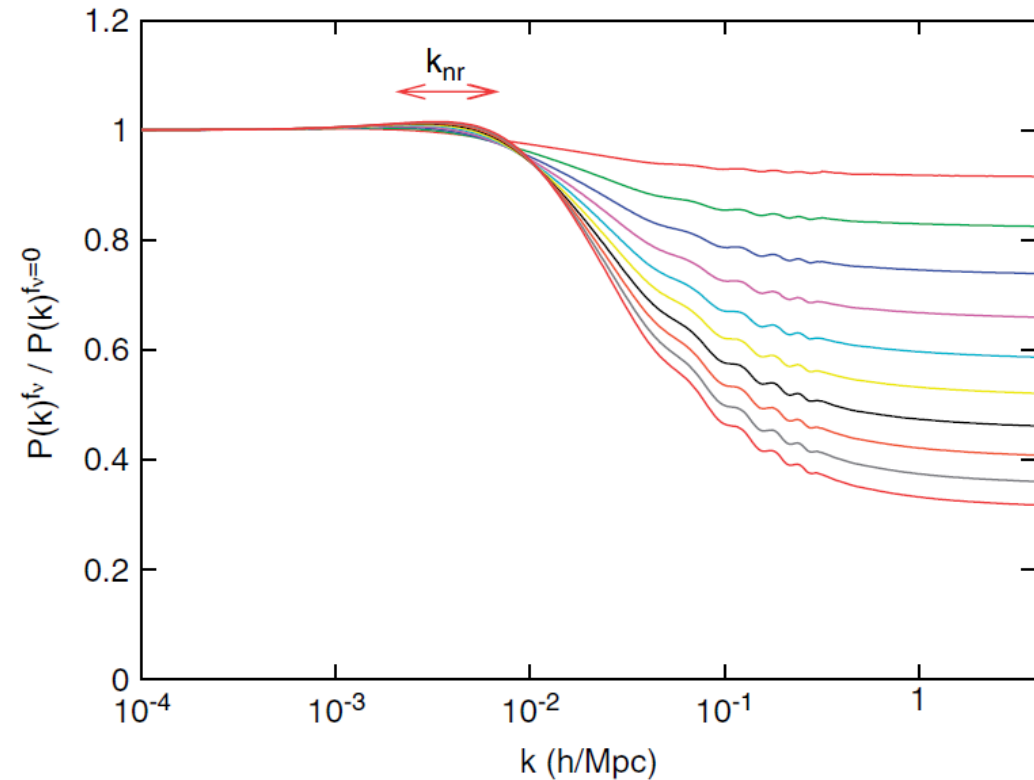
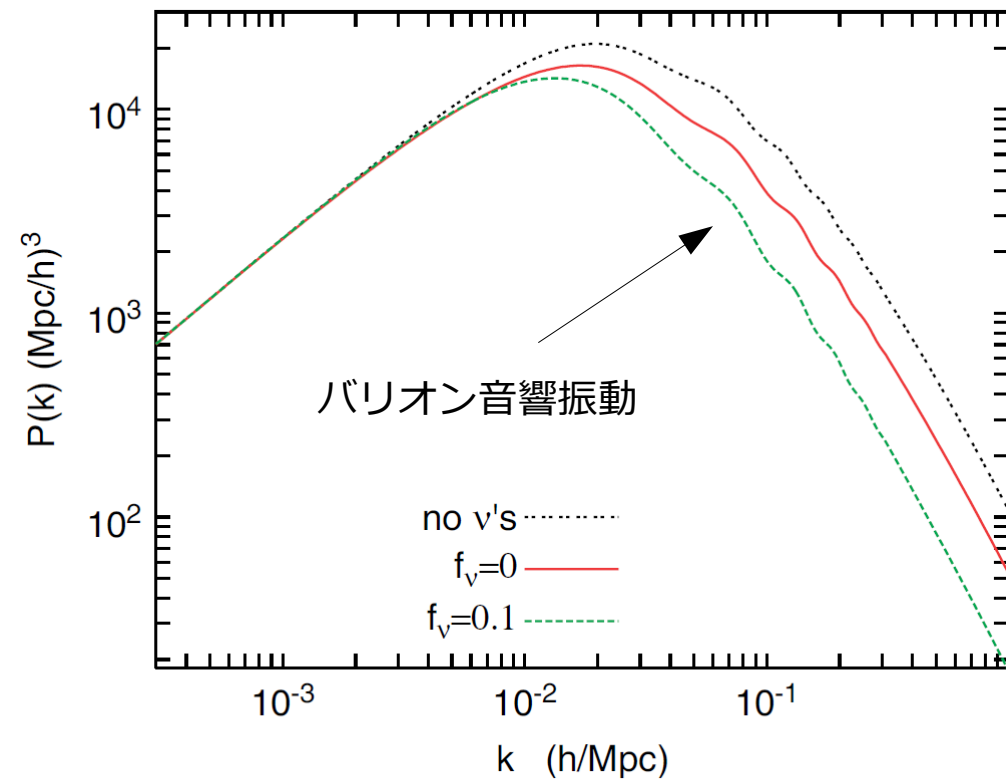
$$\ddot{\delta}_{\text{dm}} + 2H\dot{\delta}_{\text{dm}} = 4\pi G\bar{\rho}(1 - f_\nu)\delta_{\text{dm}}$$

$$\longrightarrow \quad \delta_{\text{dm}} \propto D_+(t)^{\left(1 - \frac{3}{5}f_\nu\right)}$$

密度揺らぎのパワースペクトル

$$\frac{P(k, f_\nu)}{P(k, f_\nu = 0)} = [1 - \Omega_\nu/\Omega_{\text{m}}]^2 \langle \delta_{\text{dm}}^2 \rangle \simeq 1 - 8f_\nu$$

ニュートリノの構造形成への力学的影響



▶ ニュートリノの質量によって減衰の度合いが異なる

➡ 銀河の広域サーベイによってニュートリノ質量を測定可能

▶ 注目すべきスケールはバリオン音響振動のスケールよりも大きい

▶ バリオン音響振動の精密観測を目指す銀河サーベイでニュートリノの質量を測定可能

研究の目的

▶ ニュートリノが宇宙大規模構造形成に及ぼす影響を調べる。

- ニュートリノの**無衝突減衰**の効果

- ニュートリノとCDMの速度差の影響

Zhu, H-M. et al. (2013)

- ダークマターハローの形成過程への影響

Ichiki & Takada (2012)

▶ ニュートリノのダイナミクスを数値シミュレーションする新しい手法

➡ **Vlasov-Poissonシミュレーション**

ニュートリノによる無衝突減衰の効果をより正確に調べることが可能

Vlasov-Poisson Simulation

- ▶ Vlasov-Poisson equations for collisionless self-gravitating systems

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{x}} - \nabla \phi \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{v}} = 0$$

$$\nabla^2 \phi = 4\pi G \rho = 4\pi G \int f d^3 \vec{v}$$

- ▶ 6次元位相空間での数値シミュレーションはYoshikawa, Yoshida & Umemura (2013)で初めて実現。
- ▶ 6次元位相空間をメモリに展開するため膨大なメモリが必要
- ▶ メッシュ数はそんなに沢山は使えない。 空間分解能は良くない。



Yoshikawa, Yoshida, Umemura (2013)

LSS Formation with CDM and neutrinos

▶ CDMとニュートリノの二成分系での宇宙大規模構造形成

- CDMもニュートリノもN体シミュレーションで計算

Brandbyge et al. (2008), Bird et al. (2012)

ニュートリノの速度分散をthermal velocityとして粒子にrandomに与える

計算結果に非常に大きなショットノイズ

- CDMはN体シミュレーション、ニュートリノは線形理論で与える

Brandbyge & Hannestad (2009), Viel et al (2010)

ニュートリノの運動のback reactionが考慮されない。

- CDMはN体シミュレーション、ニュートリノはVlasov-Poissonシミュレーションで計算

無衝突減衰の効果を正確に計算可能

空間分解能はよくない

↔ ニュートリノの分布自体がdiffuseなので空間分解能は重要ではない

Large-Scale Structure Formation with CDM+neutrino

- ▶ N体シミュレーションとVlasov-Poissonシミュレーションのハイブリッド
- ▶ CDMの運動はN体シミュレーション
- ▶ ニュートリノの運動はVlasov-Poissonシミュレーション

$$\frac{d^2 \vec{x}_i}{dt^2} + 2H \frac{d\vec{x}_i}{dt} = -\frac{1}{a^2} \nabla \phi \quad \leftarrow \text{CDM}$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\vec{v}}{a} \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{x}} - \left[H\vec{v} + \frac{\nabla \phi}{a} \right] \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{v}} = 0 \quad \leftarrow \text{neutrino}$$

$$\nabla^2 \phi = 4\pi G \bar{\rho} a^2 (f_{\text{cdm}} \delta_{\text{cdm}} + f_{\nu} \delta_{\nu})$$

CDM + neutrino Simulation

▶ N体シミュレーションはParticle-Mesh法

- N体シミュレーションのダークマター粒子数はVlasov-Poissonシミュレーションの空間メッシュ数と同じか8倍。

← 初期条件のrandom-gaussian fieldを計算する際の都合による

今回は $N = 256^3$

- 初期条件は初期宇宙のボルツマンコード“CAMB”で計算したCDM・バリオン・ニュートリノのtransfer functionを用いて作成

▶ Vlasov-Poissonシミュレーション

空間メッシュ : 128^3

運動量メッシュ : 64^3

→ 主に64ノード並列で計算

▶ 宇宙論モデル

Planck 2013モデル

$L = 2000 h^{-1} \text{ Mpc}$

Formulation in Comoving Frame

- ▶ comoving frame での正準変数を用いた Vlasov-Poisson equation

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\vec{p}}{a^2} \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{x}} - \nabla \phi \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{p}} = 0 \quad \vec{p} = a^2 \dot{\vec{x}}$$

$$\nabla^2 \phi = 4\pi G a^2 \bar{\rho} \delta = 4\pi G a^2 \bar{\rho} \left[\int f d^3 \vec{p} - 1 \right]$$

宇宙膨張に伴って分布関数の運動量空間での広がりが急速に拡大

- ▶ 数値シミュレーションに適した Vlasov-Poisson equation

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\vec{v}}{a} \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{x}} - \left[H\vec{v} + \frac{\nabla \phi}{a} \right] \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{v}} = 0$$

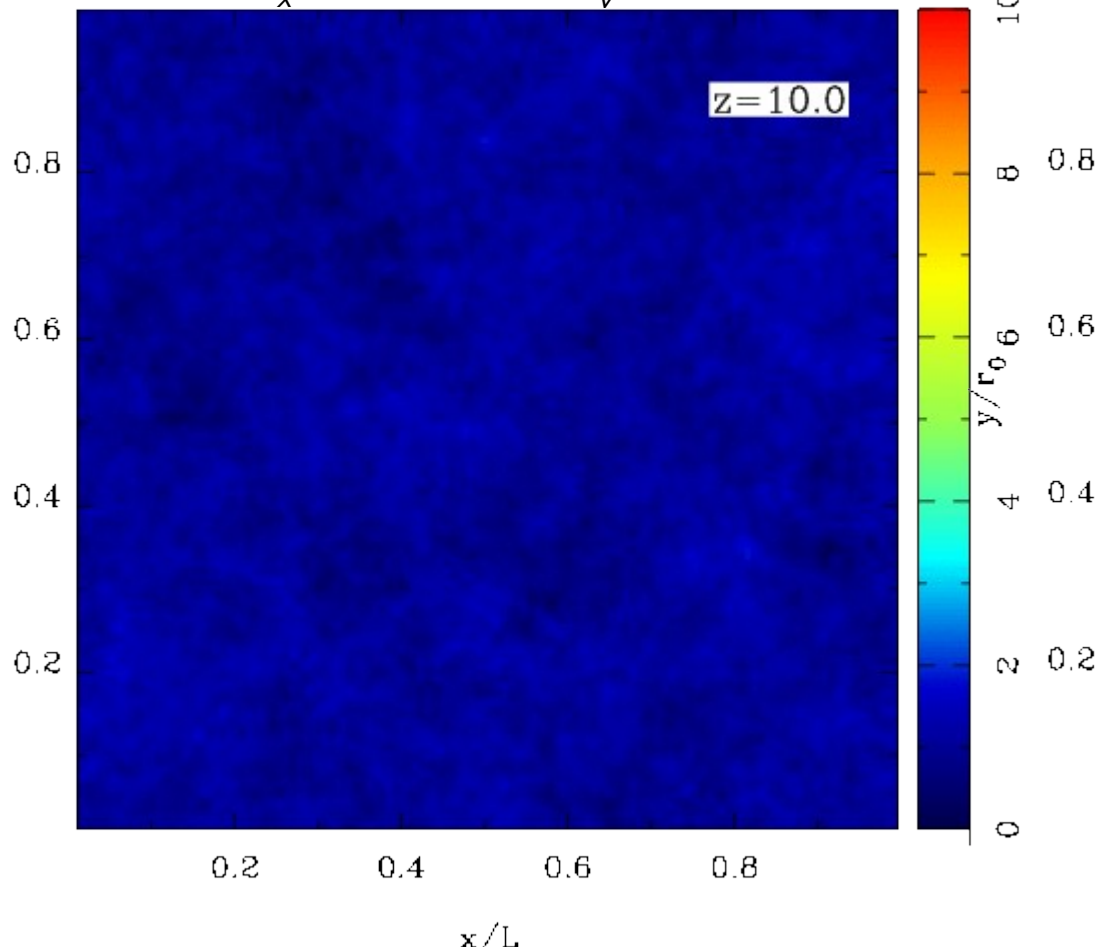
- 正準運動量のかわりに特異速度 $v = a\dot{x}$ をもちいた定式化
- stable clustering property: $v_r = -Hr$

CDM Simulation

- ▶ Formation of LSS in a Λ CDM universe with WMAP-9 yr cosmological model in $L_{\text{box}} = 120 h^{-1}$ Mpc volume

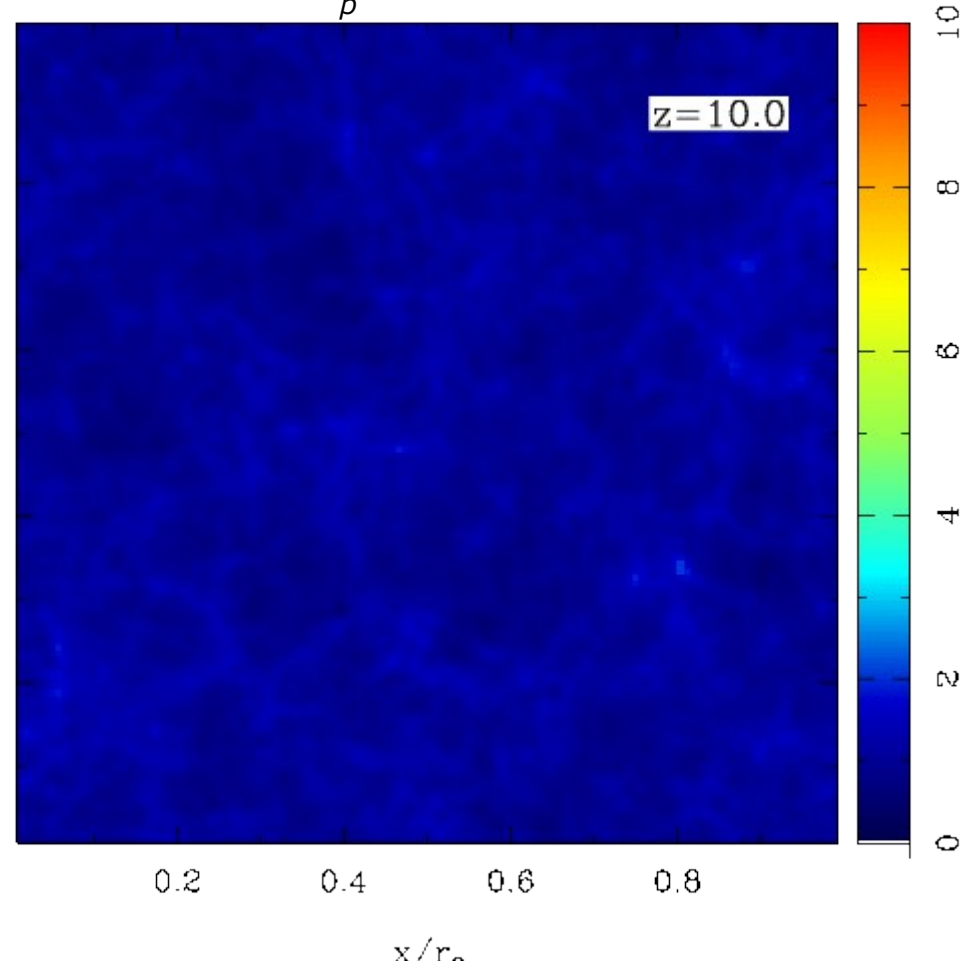
Vlasov-Poisson simulation

$N_x = 128^3$ $N_v = 64^3$

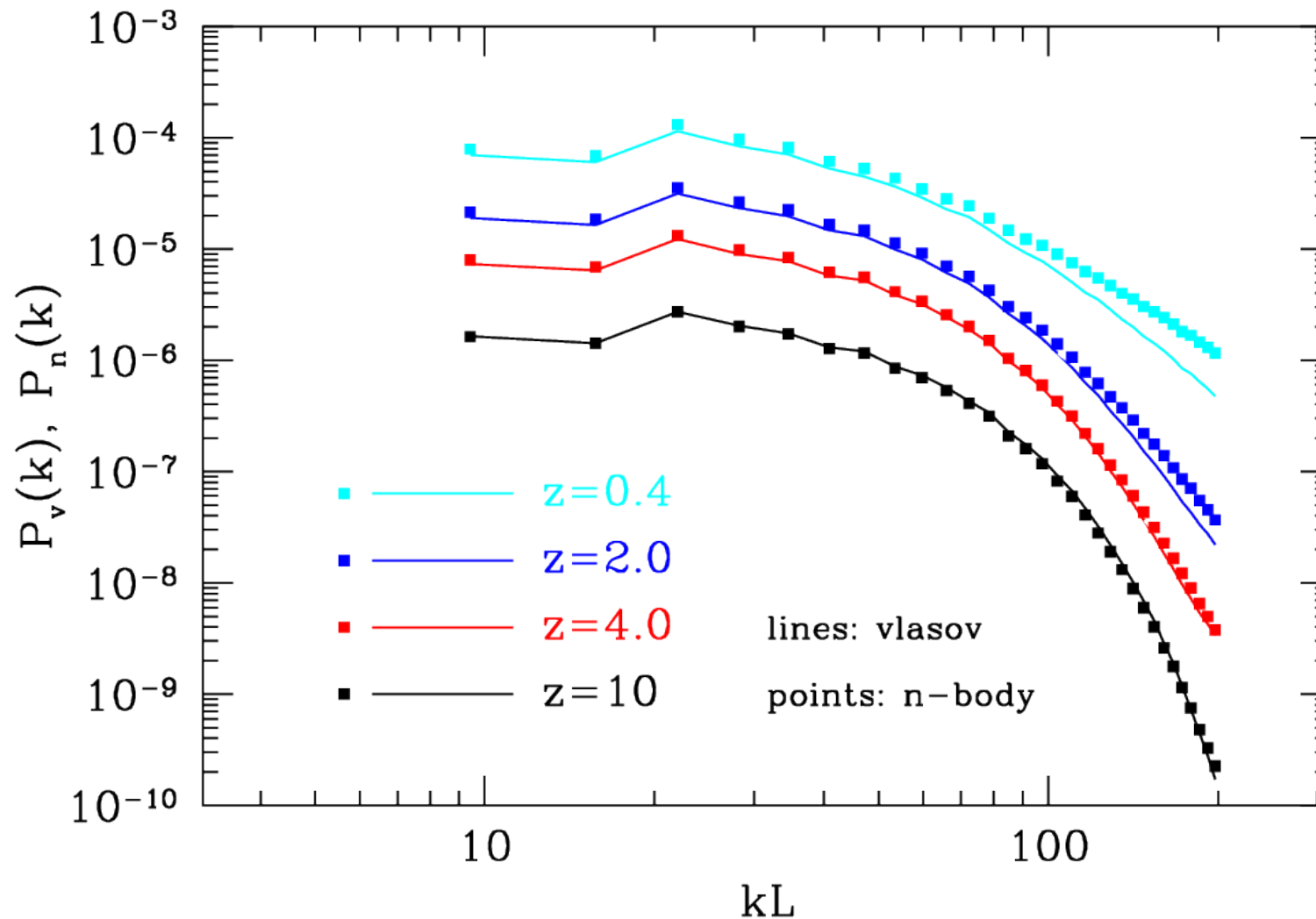


N-body simulation

$N_p = 128^3$



Power Spectrum



▶ N体シミュレーションとVlasov-Poissonシミュレーションでよい一致。

▶ small scaleでの差はVlasovシミュレーションでのdiffusionによると考えられる。

Runs with and w/o neutrinos

▶ neutrinoの質量の違いによる宇宙論モデルの比較

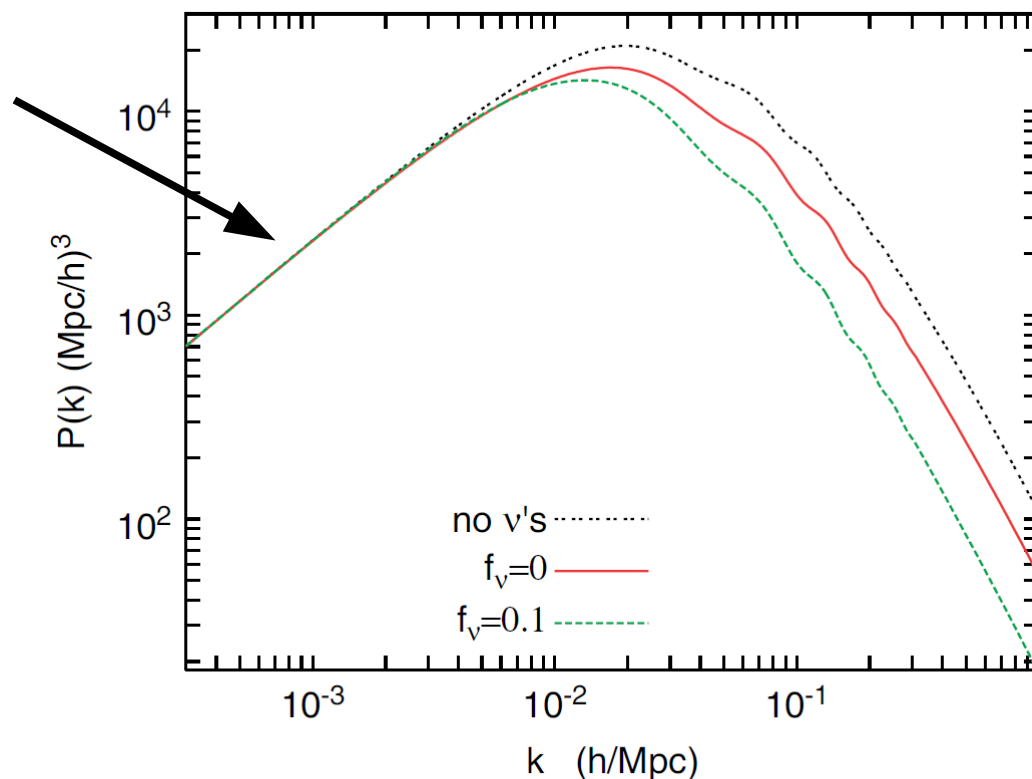
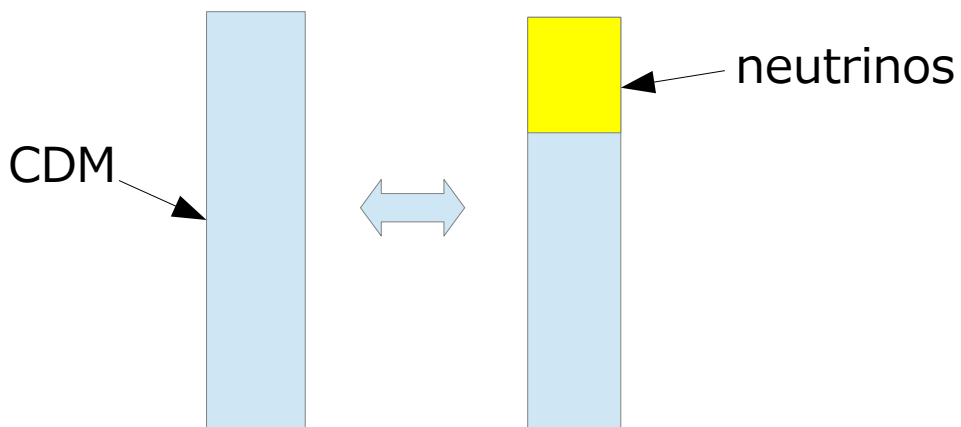
▶ Ω_m をそろえて、CDMとニュートリノの内訳を変えて比較

dynamical な効果を見やすい

▶ パワースペクトルの長波長側をそろえて、neutrino mass fraction を変えて比較

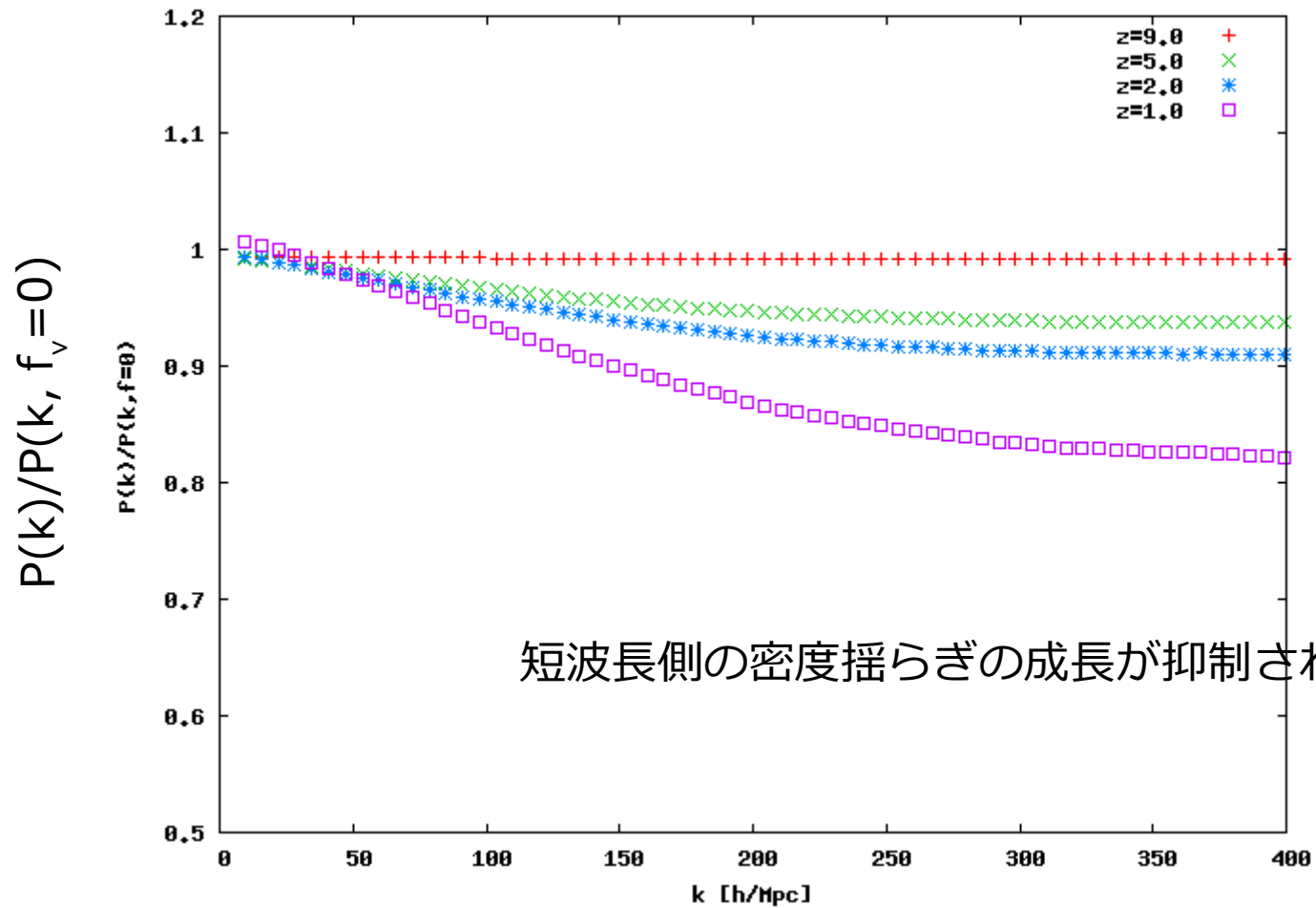
実際のCMBの観測に即した比較

▶ 今回は前者の比較を行った。



Dumping of Power Spectrum

3世代のニュートリノ質量和が 3 eVの場合

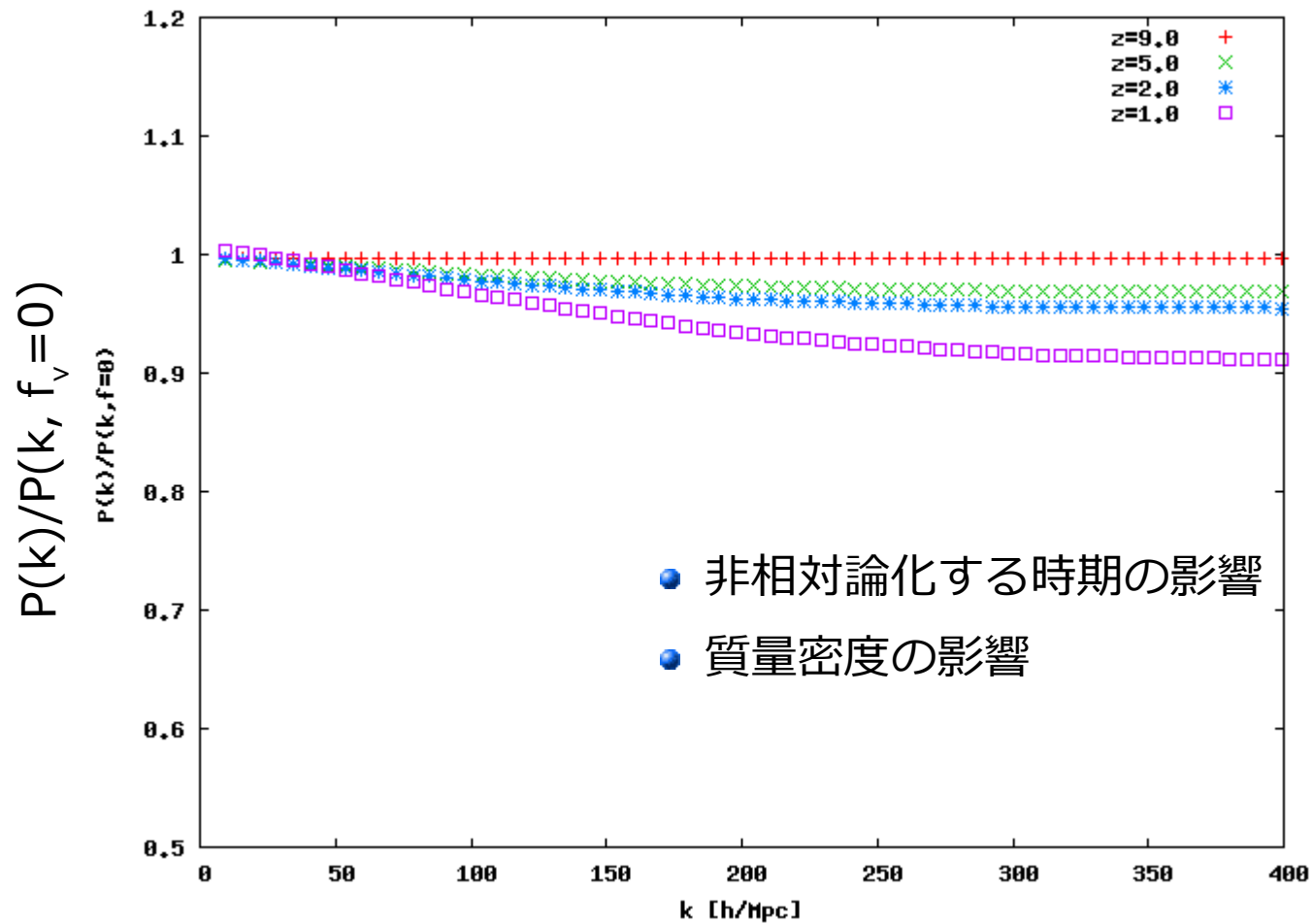


短波長側の密度揺らぎの成長が抑制されている。

波数 [h Mpc⁻¹]

Dumping of Power Spectrum

3世代のニュートリノ質量和が 1 eVの場合



- 非相対論化する時期の影響
- 質量密度の影響

波数 [h Mpc⁻¹]

Summary / Future Prospects

- ▶ 宇宙論的なスケールでの密度揺らぎのパワースペクトルの変更

非線形効果まで含めたパワースペクトルに対する影響を求めることが出来た。

(論文準備中)

- ▶ 3世代のニュートリノ質量の縮退が解けた場合の質量階層性の効果

- ▶ ダークマターハロー・フィラメント・シート構造の形成過程に対する変更

➡ ニュートリノのstreaming motionによる効果

➡ より高解像度のシミュレーションが必要

- ▶ 現在の advection scheme は 空間3次精度のPositive Flux Conservation (PFC) 法

- ▶ 5次精度に拡張工事中。