

宇宙論的ニュートリノと

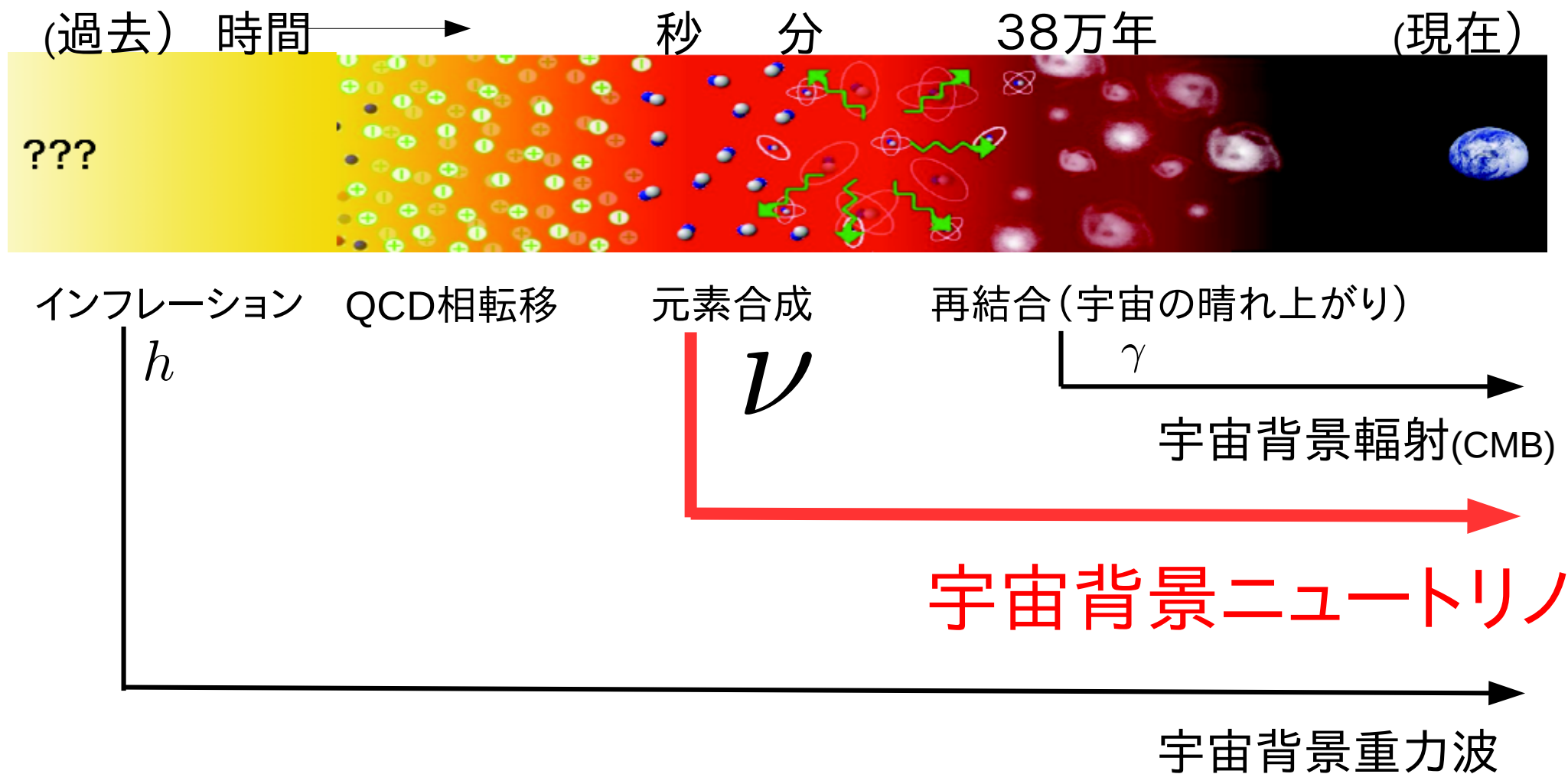
大規模構造形成

市來淨與 (名古屋大学・KMI)

内容

- 導入
 - 宇宙論的背景ニュートリノ
- 有限質量ニュートリノの宇宙論での役割について
 - ニュートリノ質量と宇宙論的観測の関係
 - 現在の観測からの制限
 - 銀河分布
 - Cosmic Shear
 - CMB lensing
 - Cluster number counts
 - 理論の進展
- まとめ

宇宙論的ニュートリノ(1)



宇宙論的ニュートリノ(2)

- ビッグバンの名残粒子

- 分布関数

$$f = \frac{1}{1 + e^{E/kT_\nu}}$$

- 温度

$$T_\nu \approx 1.95\text{K}$$

質量があればもっと冷たい

- 密度

$$n_\nu + n_{\bar{\nu}} \approx 113[1/\text{cm}^3]$$

結構たくさんある

宇宙論的ニュートリノ(2)

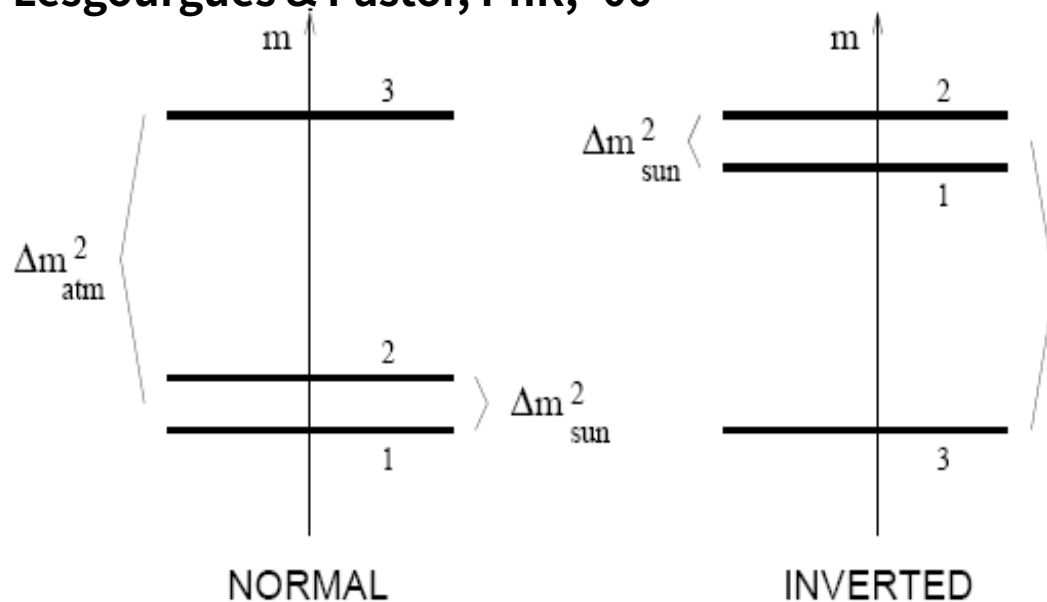
- 最もシンプルな制限(GZ bound)

$$\rho_\nu = \sum_j n_{\nu_j} m_{\nu_j} = \rho_{\text{crit}} h^{-2} \sum_j \left(\frac{m_{\nu_j}}{94\text{eV}} \right)$$

$$\sum_j m_{\nu_j} \lesssim 94\text{eV} \frac{\rho_\nu}{\rho_{\text{crit}}} h^2 = 94\text{eV} \Omega_\nu h^2$$

宇宙論的ニュートリノ(3)

Lesgourgues & Pastor, PhR, '06



Olive&Particle Data Group, '14

$$\begin{aligned} \Delta m_{\text{sun}}^2 & \leftarrow (7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{eV}^2 \\ \Delta m_{\text{atm}}^2 & \leftarrow (2.52 \pm 0.07) \times 10^{-3} \text{eV}^2 \end{aligned}$$



比較すると...

$$T_\nu = 1.7 \times 10^{-4} \text{eV}$$

2世代のニュートリノが現在は非相対論的

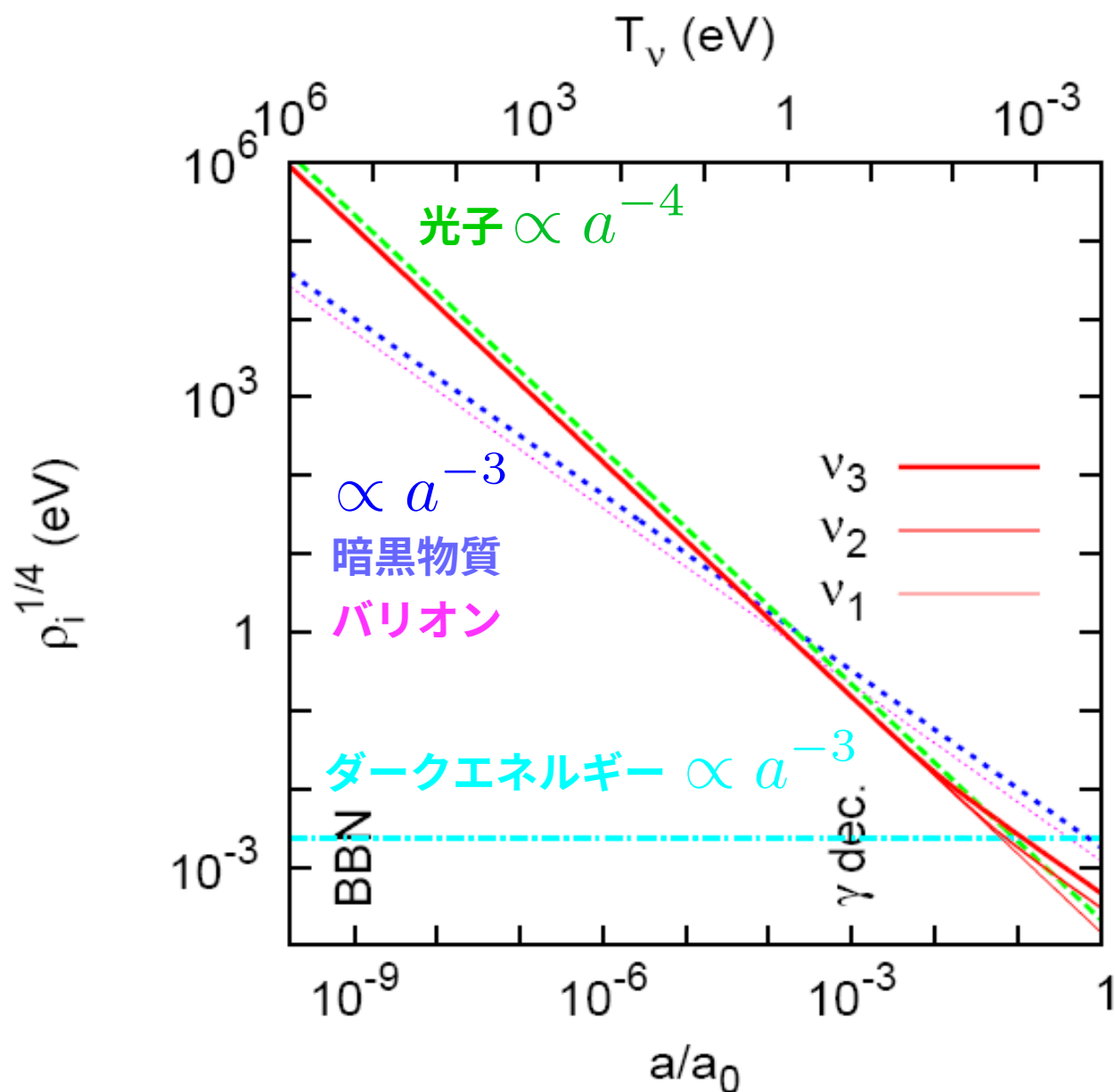
$$\sum m_\nu \gtrsim 0.05(0.1) \text{eV} \quad \longrightarrow \quad \Omega_\nu \gtrsim 1.2 \times 10^{-3} \left(\frac{h}{0.68} \right)^{-2}$$

または現在の物質密度の > 0.5%

内容

- 導入
 - 宇宙論的背景ニュートリノ
- 有限質量ニュートリノの宇宙論での役割について
 - ニュートリノ質量と宇宙論的観測の関係
 - 現在の観測からの制限
 - 銀河分布
 - Cosmic Shear
 - CMB lensing
 - Cluster number counts
 - 理論の進展
- まとめ

宇宙論的ニュートリノと熱史



ニュートリノに質量



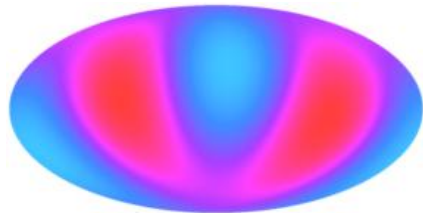
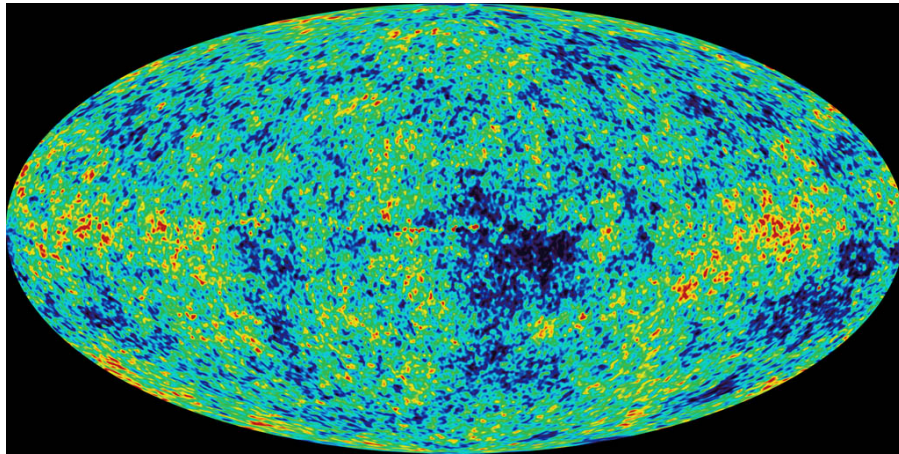
Matter-Radiation
Equalityが現在側
にずれる



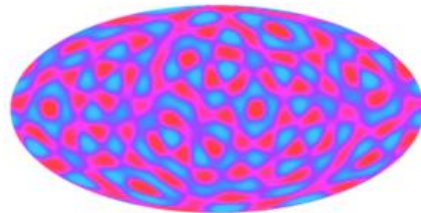
CMBで制限可能

CMBスペクトルへの影響

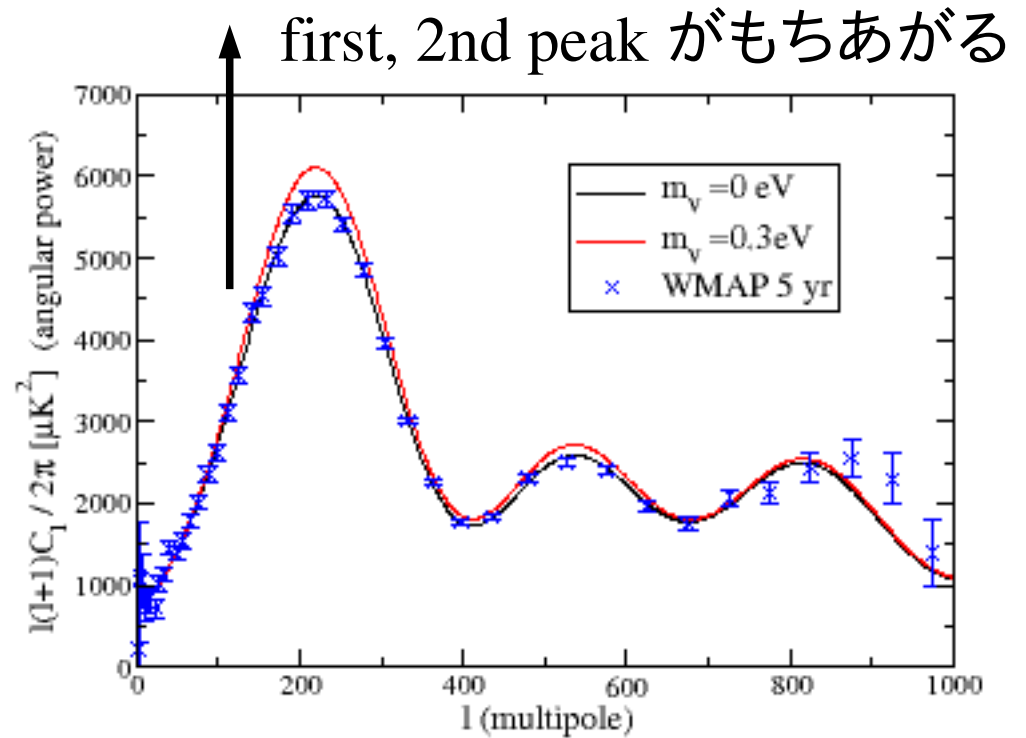
多重極展開



$\ell = 2$

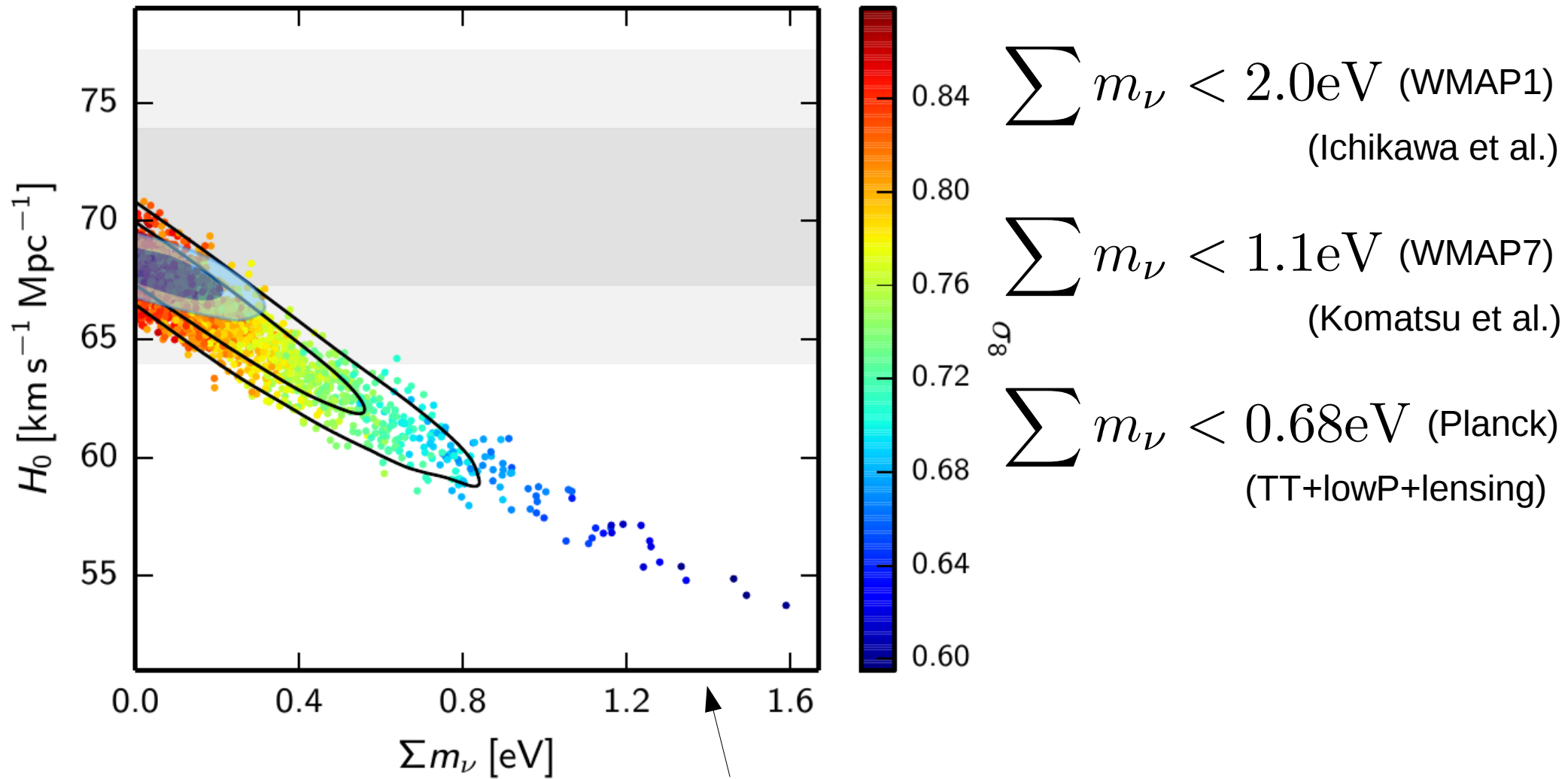


$\ell = 16$



- Equalityが現在側に → 重力ポテンシャルが壊される → そこから光子がエネルギーを得る → 揺らぎが増える (ISW効果と呼ばれる)

CMBからの制限



Neutrino massの制限は縮退だらけ

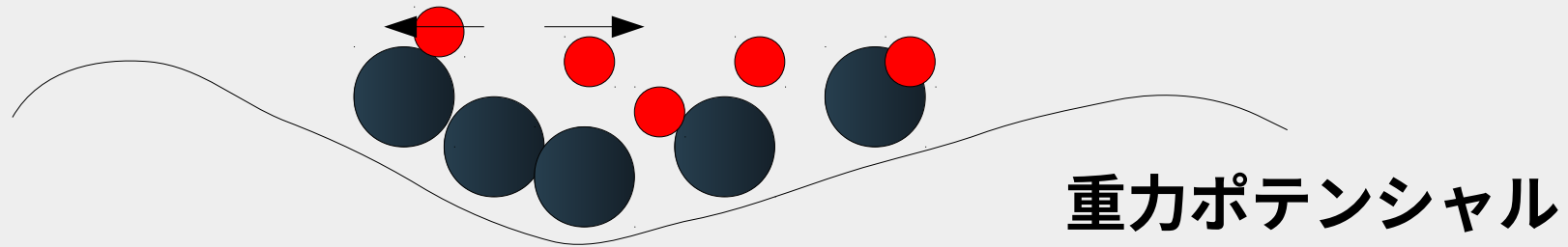
CMBの情報 ($z=1100$)だけでは
 $O(0.05)\text{eV}$ には到達できない

近傍宇宙の構造形成に対する
ニュートリノの影響を考える

Neutrinos in Cosmology

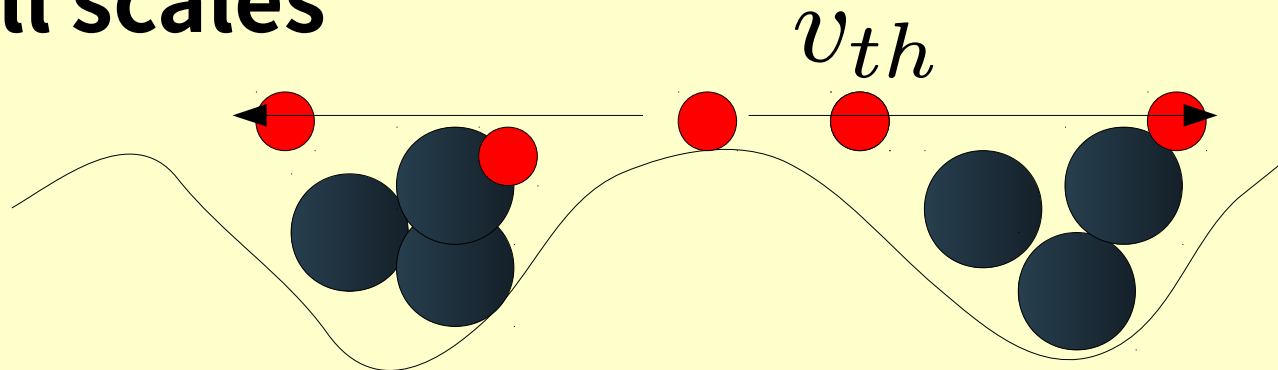
-- neutrino free streaming effect --

Large scales



ダークマター、ニュートリノ、共に重力的に集合可

Small scales



ダークマターのみ集合可、構造形成が遅くなる

Neutrinos in Cosmology

-- neutrino free streaming effect --

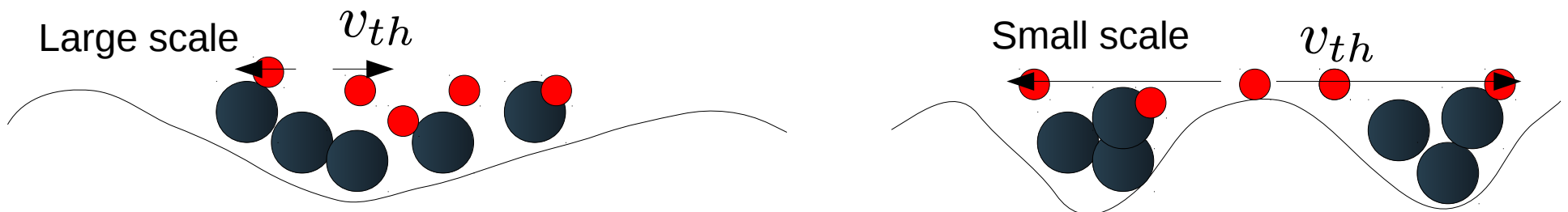
- 小さな質量 → 大きな熱 (ランダム) 速度

$$v_{\text{th}} = \frac{\langle p \rangle}{m} = \frac{3T_\nu}{m} \sim 1500 \left(\frac{1+z}{2} \right) \left(\frac{0.2 \text{ eV}}{m_\nu} \right) \text{ km/s}$$

銀河団の速度分散 $\lesssim 1000 \text{ km/s}$

- この速度で移動するスケール以下の構造には寄与できない
 - その最大距離 (comoving)

$$\lambda_{\text{fs}} \lesssim \lambda_{\text{nr}} = 1400 \left(\frac{\Omega_m}{0.3} \right)^{-1/2} \left(\frac{m}{0.2 \text{ eV}} \right)^{-1/2} h^{-1} \text{ Mpc}$$



CDM揺らぎの発展: 比較

$$\delta(x) = \frac{\delta\rho(x)}{\rho} = \int d^3k \delta(k) e^{ik \cdot x}$$

$$k \ll k_{\text{nr}}$$

$$\ddot{\delta}_c + 2H\dot{\delta}_c = 4\pi G (\rho_c \delta_c + \rho_\nu \delta_\nu)$$

宇宙膨張による摩擦項
ニュートリノも寄与

重力: ニュートリノも寄与

$$k \gg k_{\text{nr}}$$

$$\ddot{\delta}_c + 2H\dot{\delta}_c = 4\pi G (\rho_c \delta_c)$$

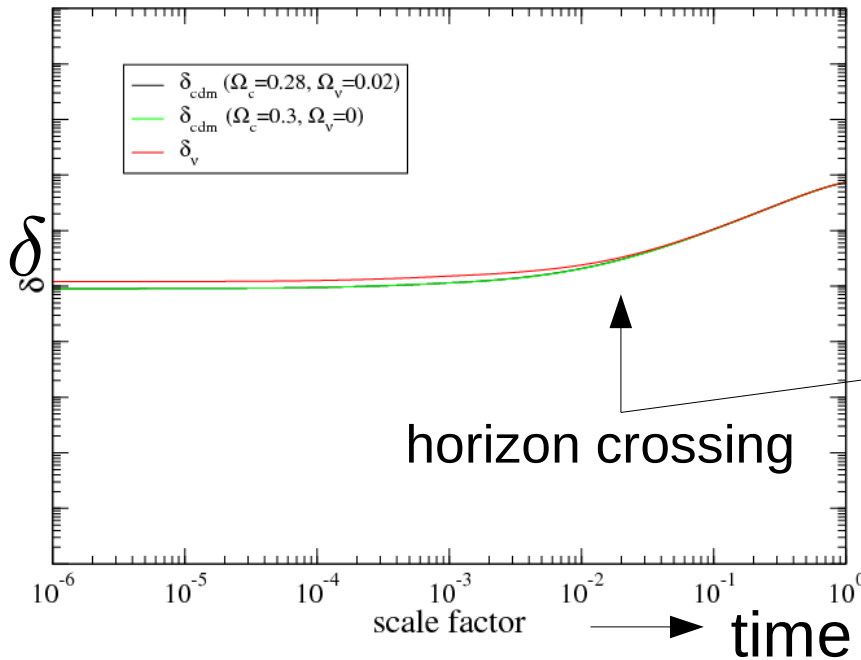
宇宙膨張による摩擦項
ニュートリノも寄与

重力: ニュートリノは寄与しない

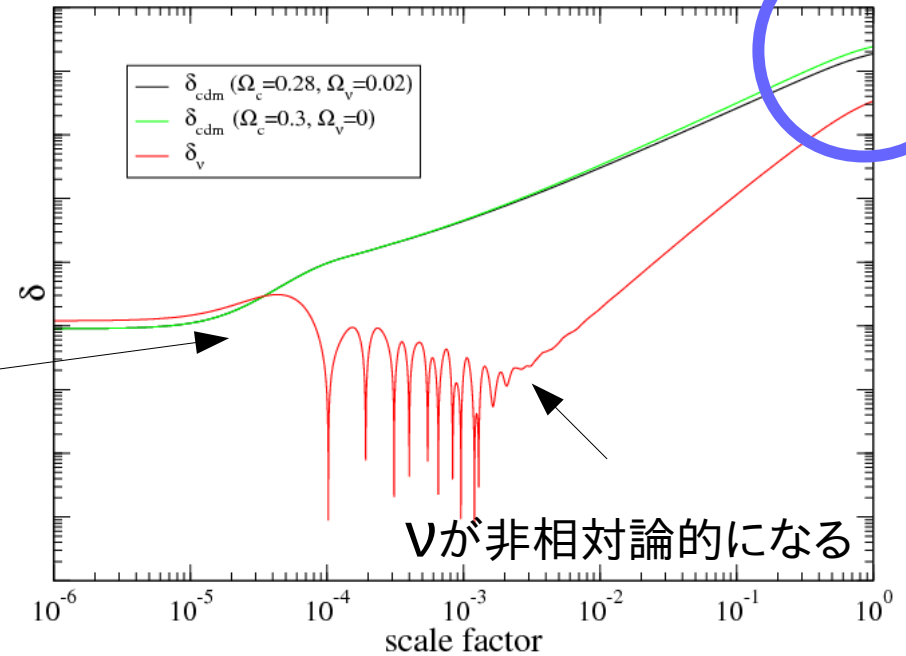
摩擦の強さは同じなのに、力が弱くなる
→ 構造形成の成長が遅くなる

密度揺らぎの発展: 比較

$$k = 2.0 \times 10^{-3} \text{Mpc}^{-1}$$



$$k = 0.2 \text{Mpc}^{-1}$$

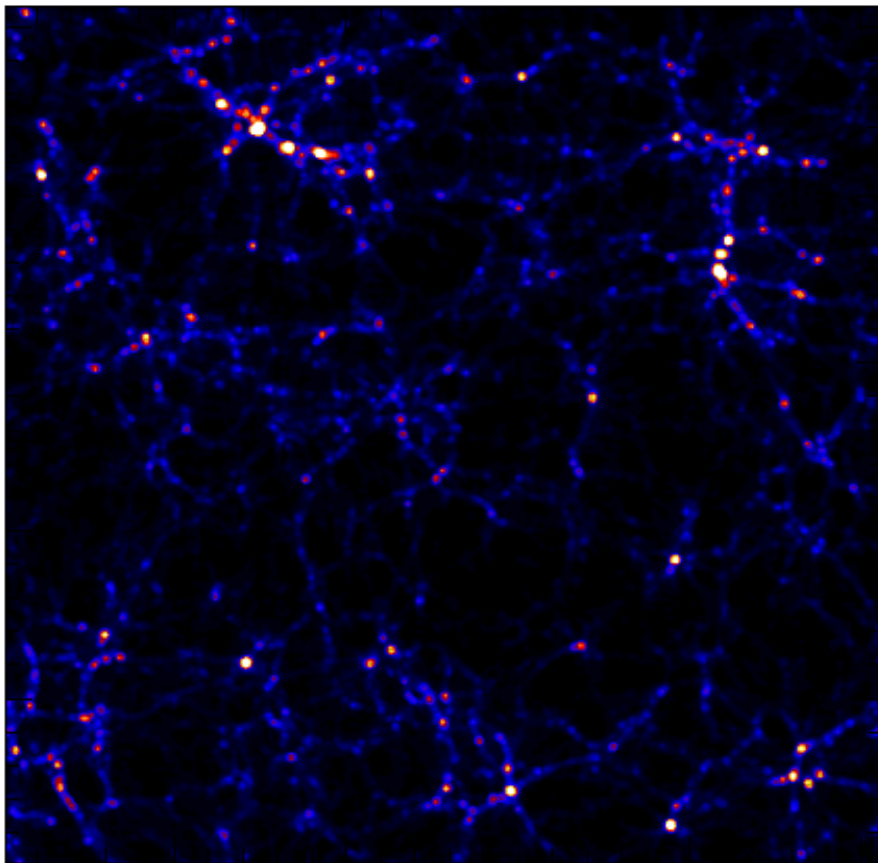


Large scales $\delta_\nu = \delta_c \propto a$

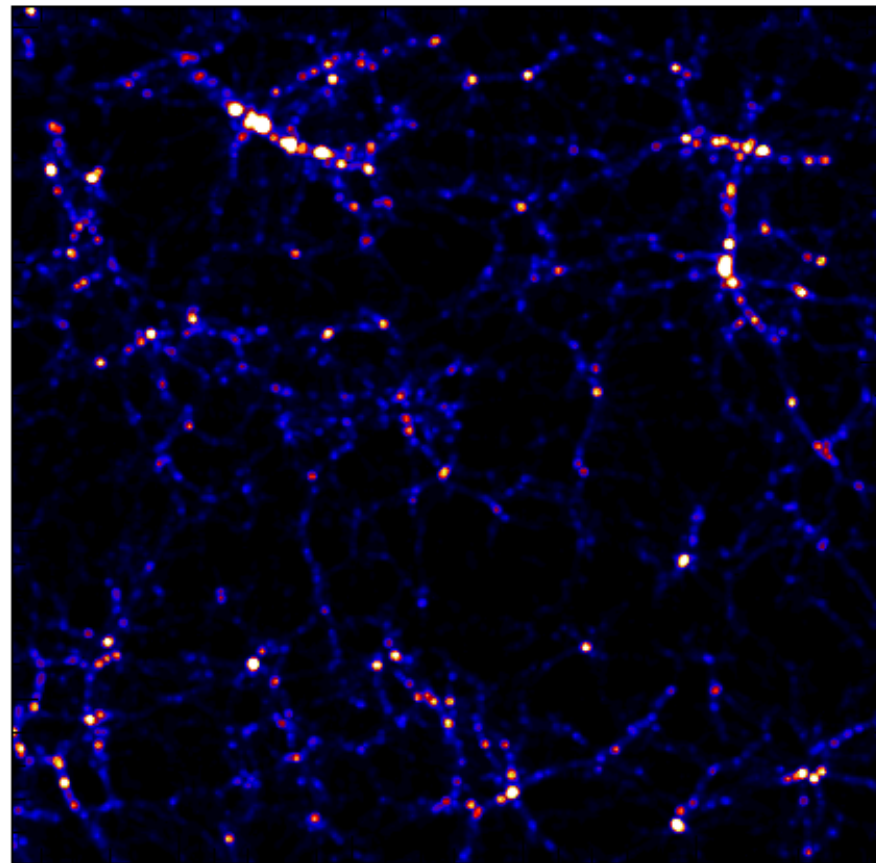
small scales $\delta_\nu \simeq 0, \delta_c \propto a^p$ $p = \frac{-1 + \sqrt{1 + 24(1 - f_\nu)}}{4}, f_\nu = \frac{\Omega_\nu}{\Omega_c + b + \Omega_\nu}$

密度揺らぎの大きさ

大規模構造シミュレーションの例

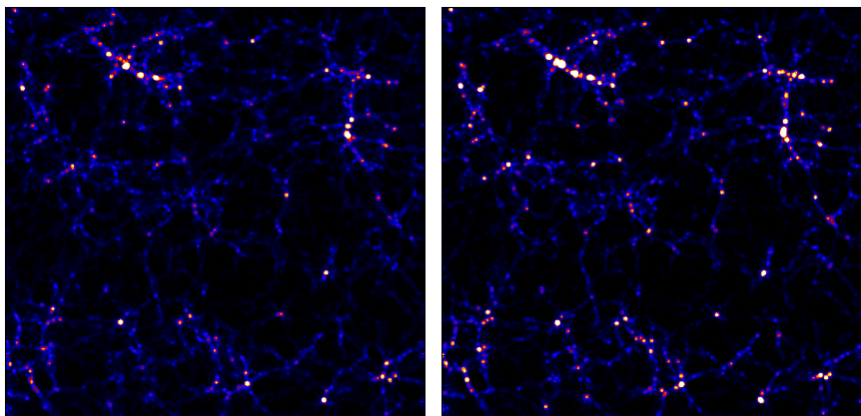


$$\sum m = 1.2\text{eV}$$

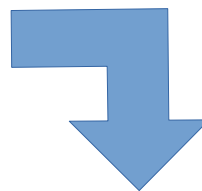


$$\sum m = 0.15\text{eV}$$

大規模構造シミュレーションの例



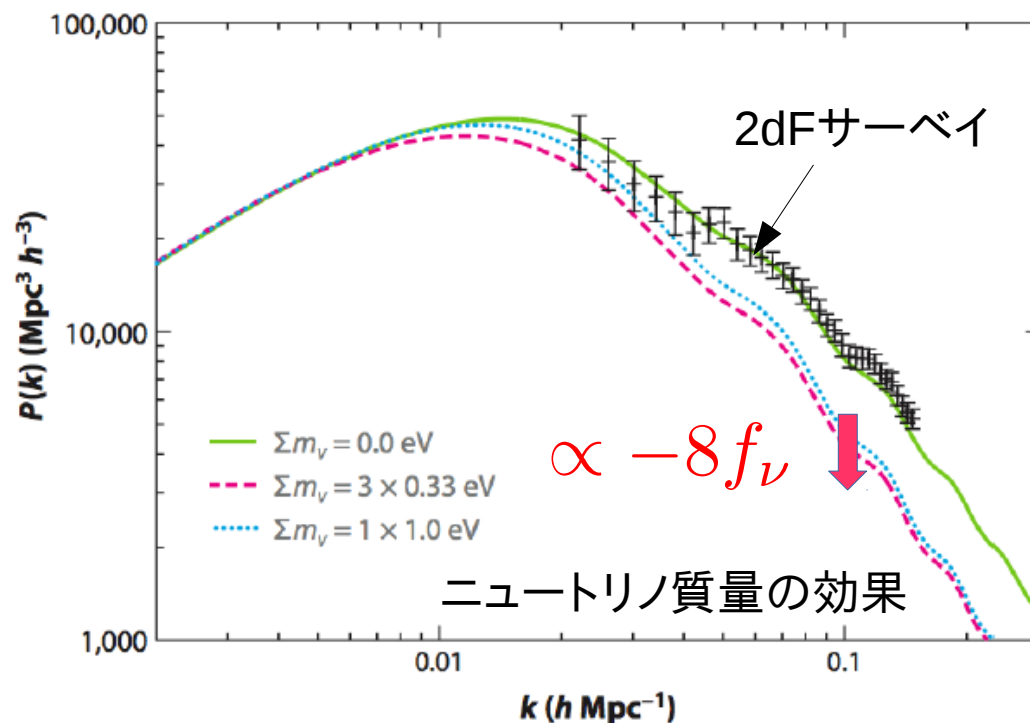
揺らぎのパワースペクトル解析



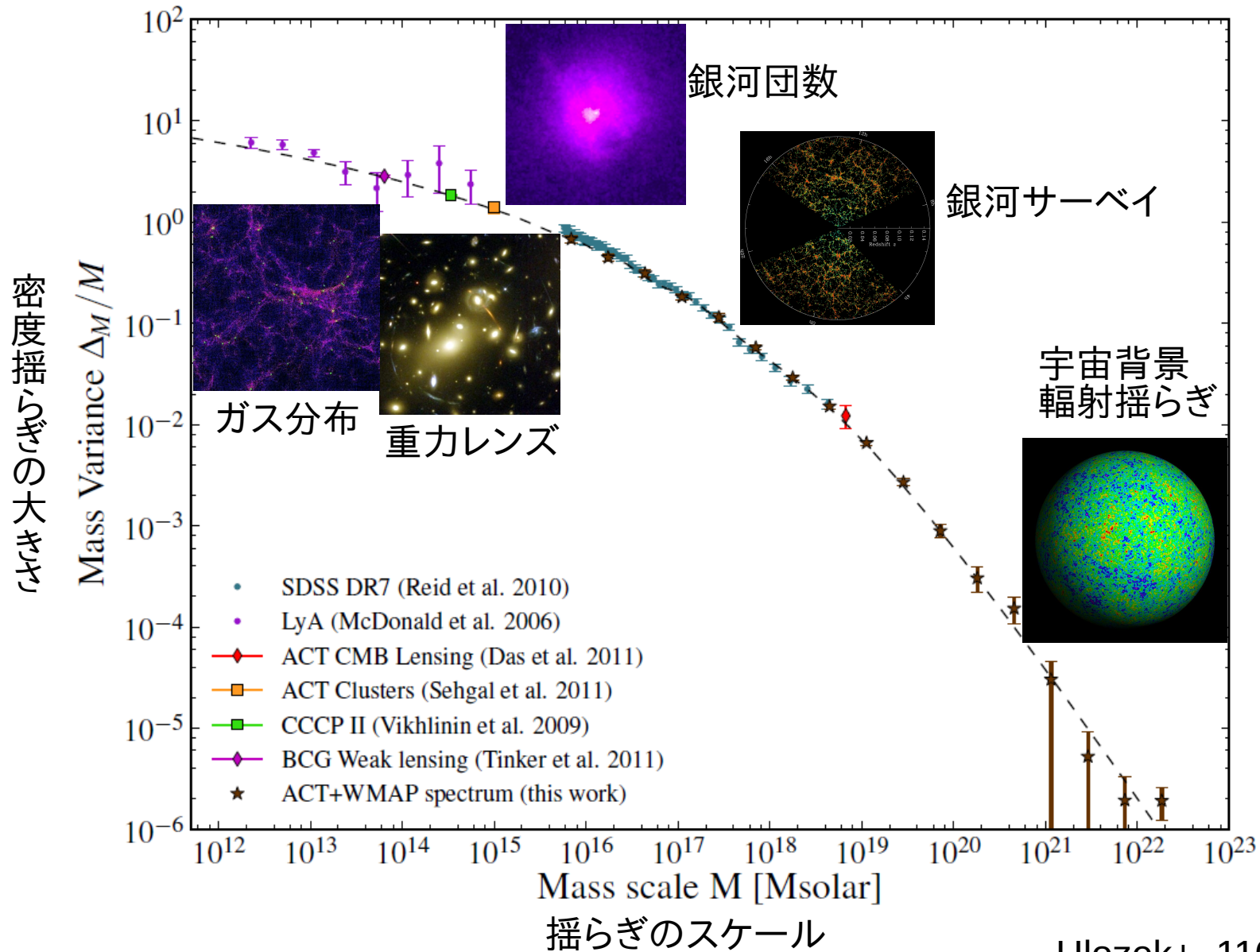
スケールに依って、ニュートリノ質量の
効果の大きさが異なる



大規模なサーベイ、異なるスケールの
プローブが必要



様々な観測から様々なスケールの 密度揺らぎを測る



内容

- 導入
 - 宇宙論的背景ニュートリノ
- 有限質量ニュートリノの宇宙論での役割について
 - ニュートリノ質量と宇宙論的観測の関係
 - 現在の観測からの制限
 - 銀河分布
 - Cosmic Shear
 - CMB lensing
 - Cluster number counts
 - 理論の進展
- まとめ

銀河サーベイによる ニュートリノ質量への制限

Cosmology with High-redshift Galaxy Survey: Neutrino Mass and Inflation

Masahiro Takada¹, Eiichiro Komatsu² and Toshifumi Futamase¹

PRD '06

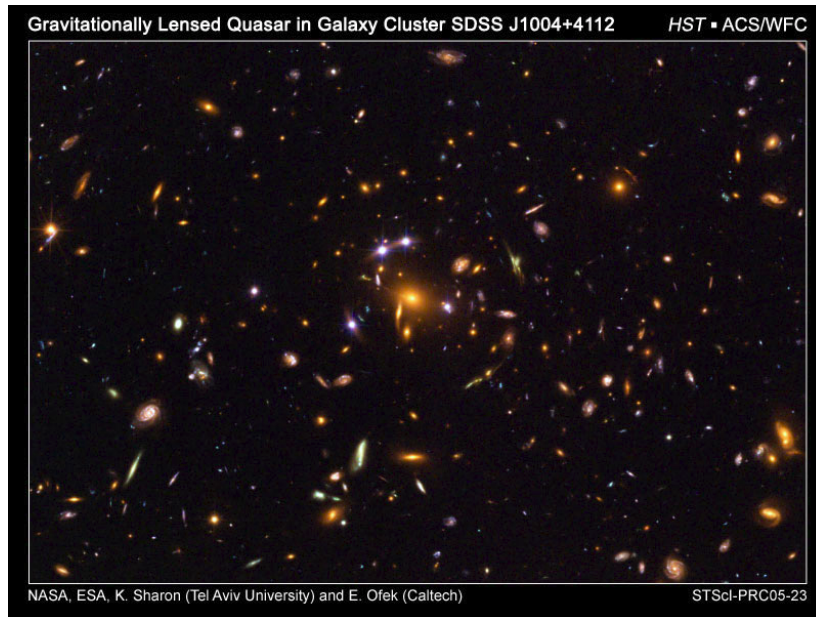
¹*Astronomical Institute, Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan and*

²*Department of Astronomy, The University of Texas at Austin, Austin, TX 78712*

High- z galaxy redshift surveys open up exciting possibilities for precision determinations of neutrino masses and inflationary models. The high- z surveys are more useful for cosmology than low- z ones owing to much weaker non-linearities in matter clustering, redshift-space distortion and galaxy bias, which allows us to use the galaxy power spectrum down to the smaller spatial scales that are inaccessible by low- z surveys. We can then utilize the two-dimensional information of the linear power spectrum in angular and redshift space to measure the scale-dependent suppression of matter clustering due to neutrino free-streaming as well as the shape of the primordial power spectrum. To illustrate capabilities of high- z surveys for constraining neutrino masses and the primordial power spectrum, we compare three future redshift surveys covering 300 square degrees at $0.5 < z < 2$, $2 < z < 4$, and $3.5 < z < 6.5$. We find that, combined with the cosmic microwave background data expected from the Planck satellite, these surveys allow precision determination of the total neutrino mass with the projected errors of $\sigma(m_{\nu,\text{tot}}) = 0.059, 0.043$, and 0.025 eV, respectively, thus yielding

天文学の王道 - 銀河サーベイ

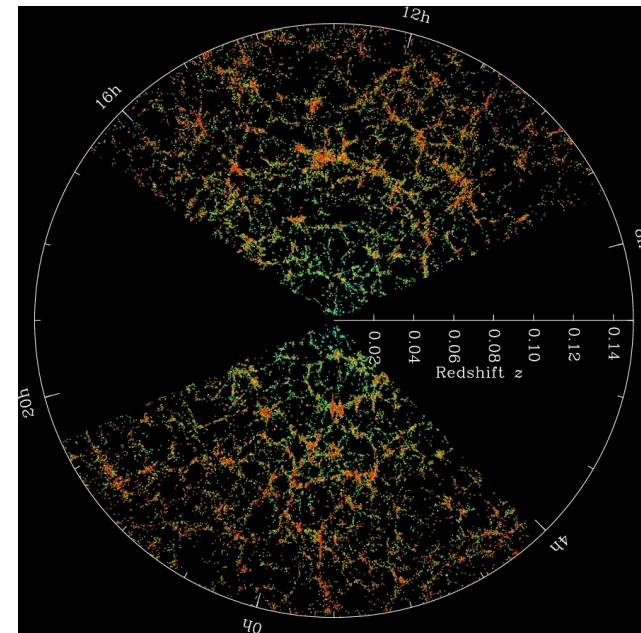
撮像探査



天球上の写真撮影

- 多色撮影で大雑把な距離を測る
- **2次元**パワースペクトル
- 重力レンズ効果による銀河の歪みから物質分布を直接的に測る

分光探査



宇宙の地図作り(SDSSより)

- スペクトルから距離を測る
- **3次元**パワースペクトル、BAO
- カタログ作り
(ニュートリノ質量測定は副次的)
- 物質分布を近似的に見ている

様々なサーベイ計画

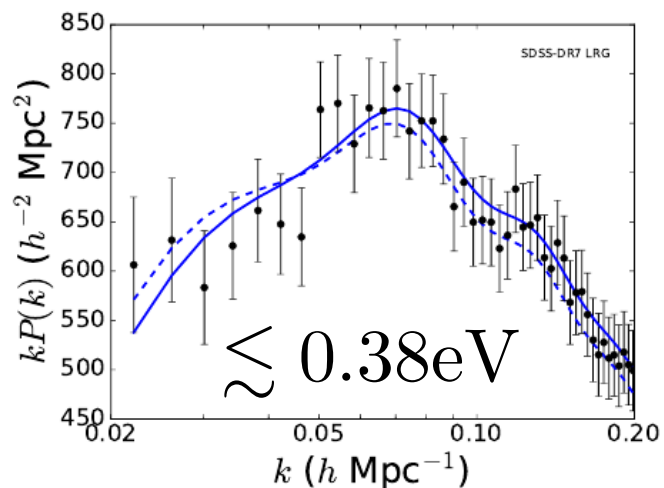
	口径	視野&領域	(平方度)	深さ (銀河数/平方分)	
DES (2013-)	4m	2.2	5000	10	5 filters
HSC (2014-)	8.2m	1.5	1400	40	5 filters
DUNE (2019?)	1.2m	0.6	20000	35	6 filters
LSST (2021?)	8.4m	9.6	18000	50	6 filters

	口径	視野&領域	(平方度)	ファイバー	
eBOSS(2014-)	2.5m	7	7500	1000	$0.6 < z < 2.2$
SuMIRe(201?)	8.2m	1.5	1400	2400	$0.6 < z < 1.6$
*WFIRST(2022?)	2.4m	0.34	2400	-	$1 < z < 3$
*Euclid (2020-)	1.2m	0.54	15000	-	$0.5 < z < 2.0$

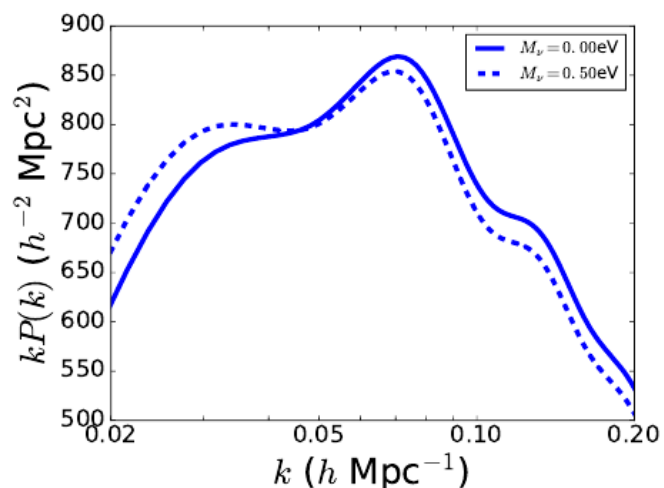
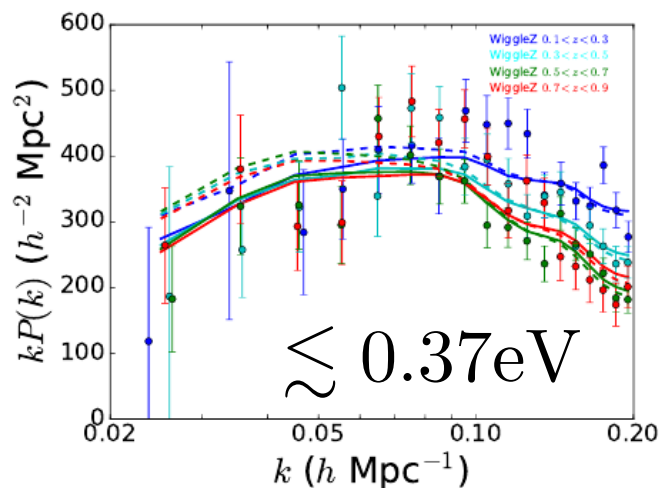
銀河サーベイからのニュートリノ質量への制限(現状)

Cuest et al., 1511.05983

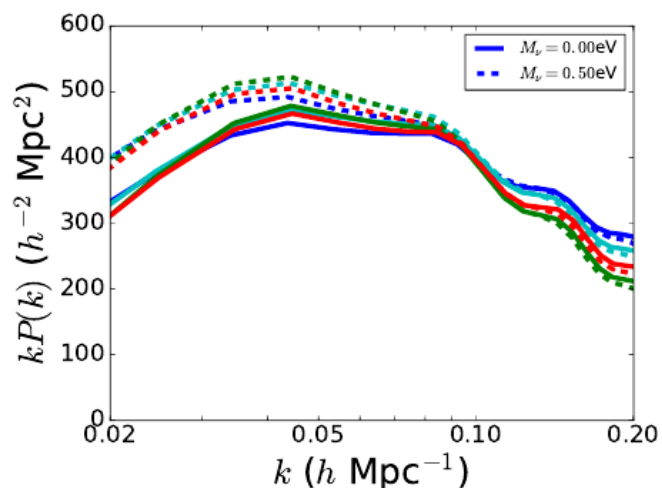
SDSS (LRG)



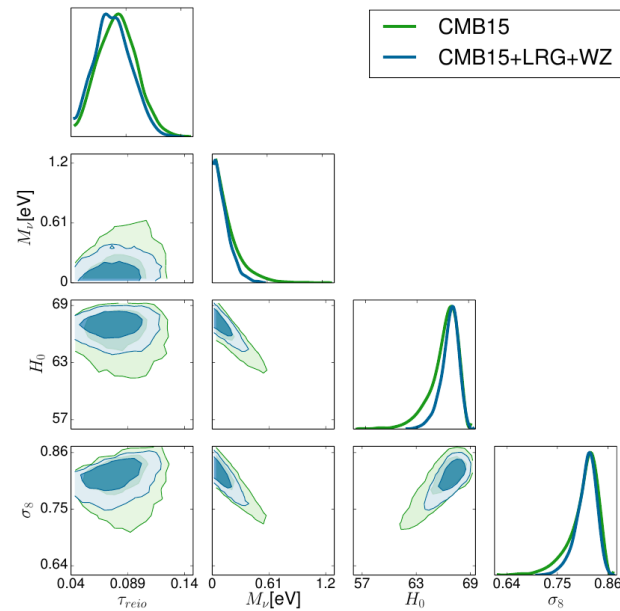
WiggleZ (LRG)



$$V_{\text{eff}} = 0.26 h^{-3} \text{Gpc}^3$$



$$V_{\text{eff}} = 0.34 h^{-3} \text{Gpc}^3$$





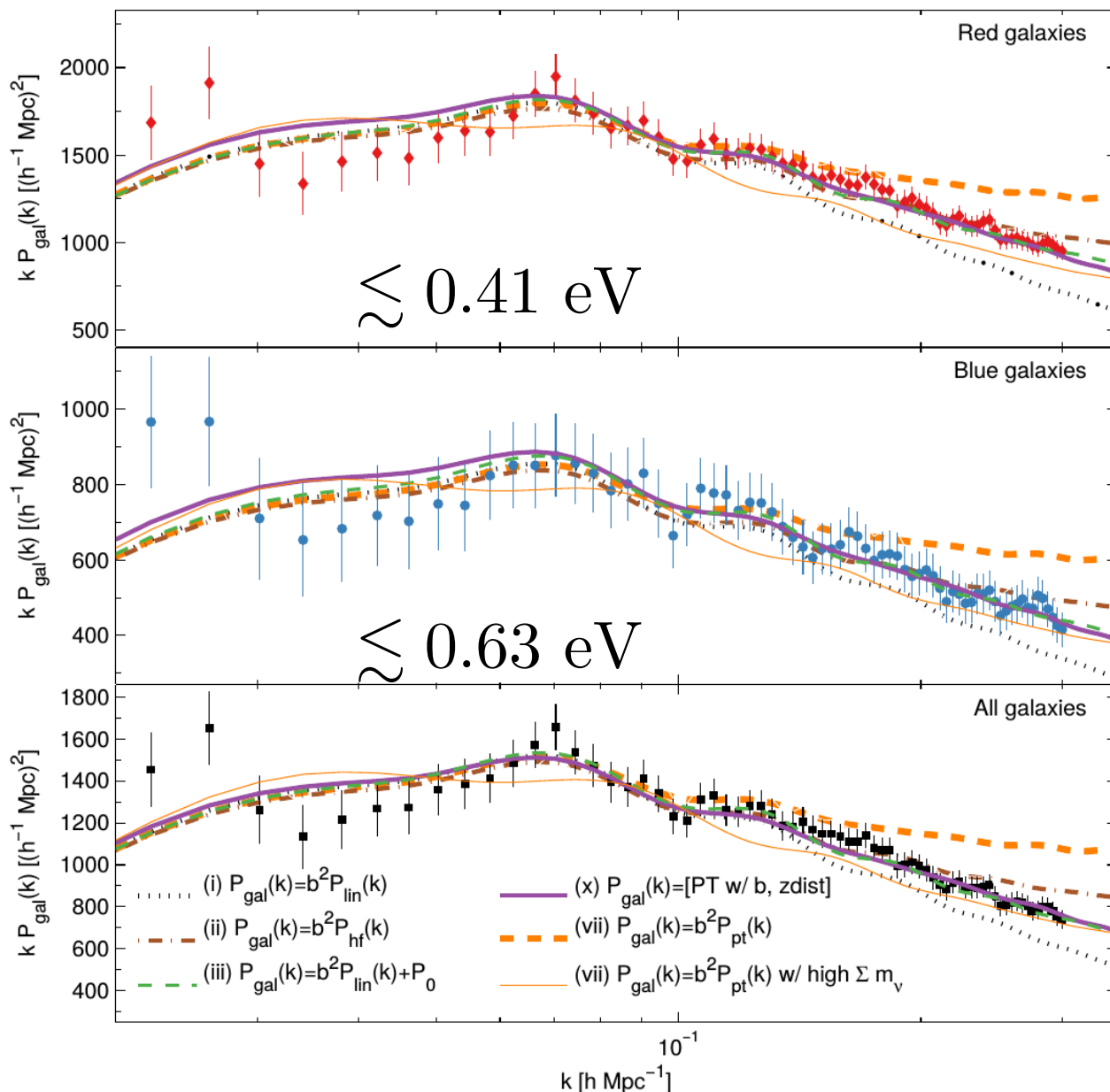
(銀河分布) $\neq$ (物質分布)

SDSS DR7 + WMAP5

銀河を2分割して解析



結果に0.22eVの差



アイデア: 1999

Astron. Astrophys. 348, 31–37 (1999)

ASTRONOMY
AND
ASTROPHYSICS

Weighing neutrinos: weak lensing approach

Asantha R. Cooray

Department of Astronomy and Astrophysics, University of Chicago, Chicago IL 60637, USA (asante@hyde.uchicago.edu)

Received 16 April 1999 / Accepted 12 May 1999

最初の制限: 2009

Constraints on Neutrino Masses from Weak Lensing

Kiyotomo Ichiki^{1,2*}, Masahiro Takada^{3†}, Tomo Takahashi^{4‡}

¹*Department of Physics and Astrophysics, Nagoya University, Nagoya 464-8602, Japan*

²*Research Center for the Early Universe, University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan*

³*Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (IPMU),
The University of Tokyo, Chiba 277-8582, Japan and*

⁴*Department of Physics, Saga University, Saga 840-8502, Japan*

(Dated: January 14, 2014)

Tereno et al., 0810.0555

Gong et al., 0810.3572

宇宙論的弱重力レンズ効果 (Cosmic Shear)

DEFLECTION OF LIGHT RAYS CROSSING THE UNIVERSE, EMITTED BY DISTANT GALAXIES

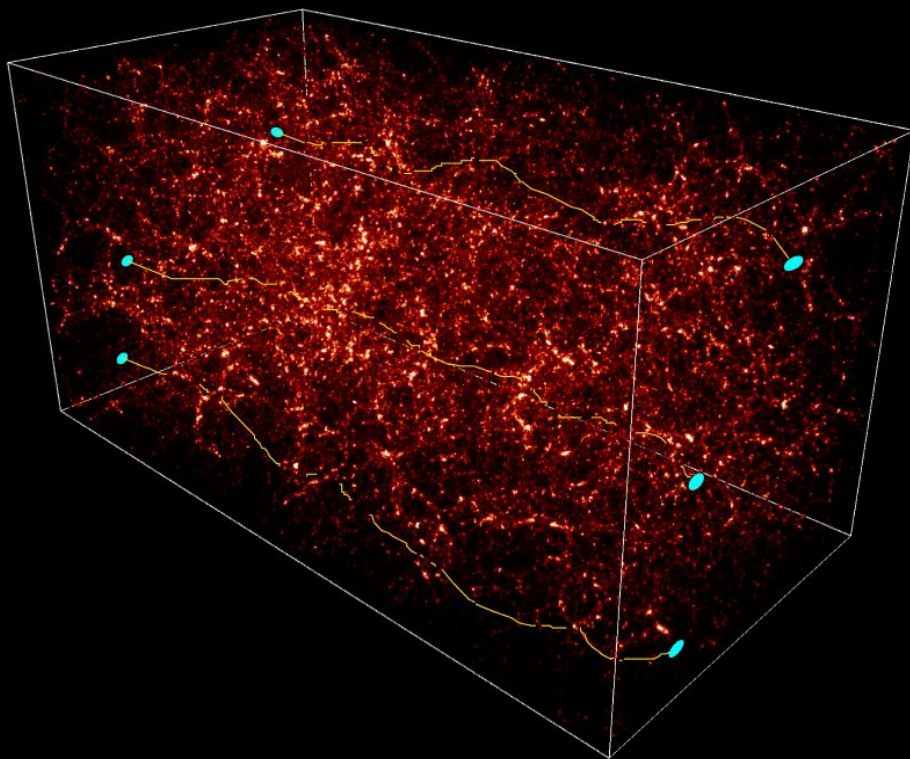
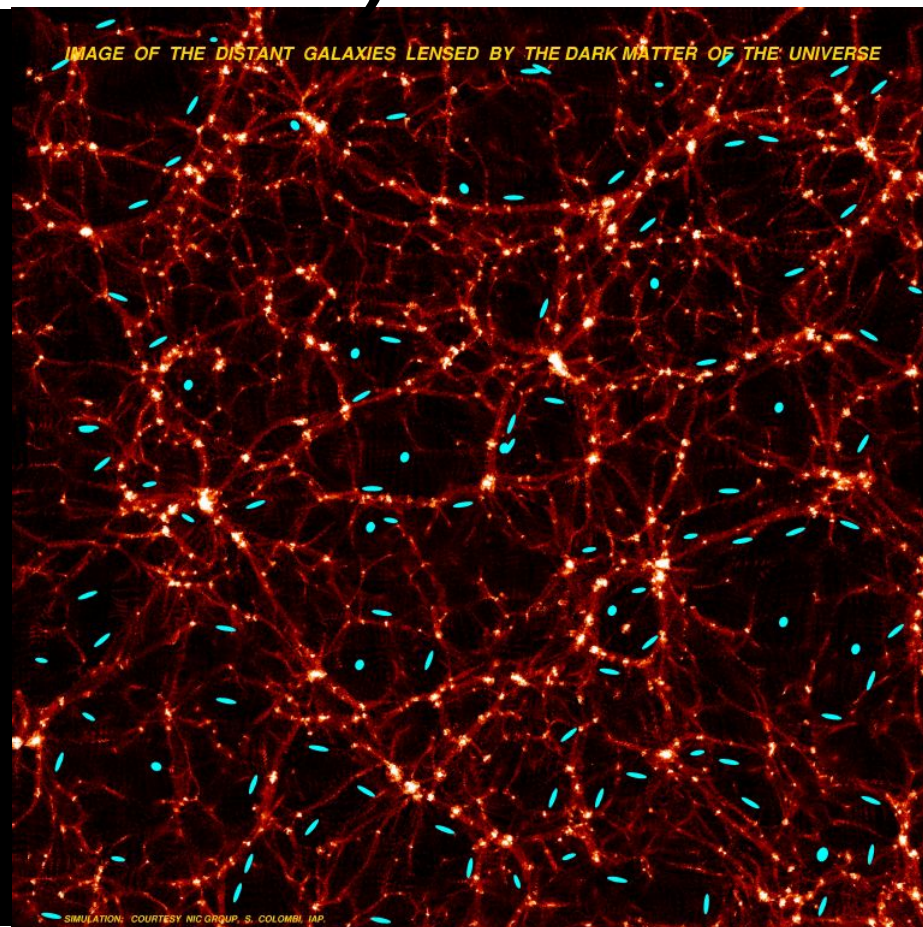
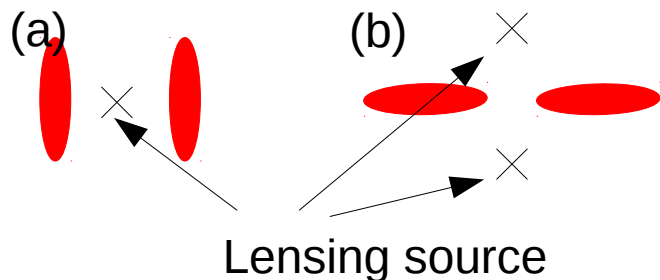


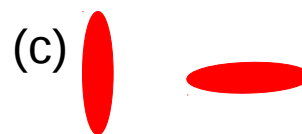
IMAGE OF THE DISTANT GALAXIES LENSED BY THE DARK MATTER OF THE UNIVERSE



Weak lensing produce:



Does not produce:



明日の浜名さんの講義を大いに参照

宇宙論的弱重力レンズ効果 (Cosmic Shear)

DEFLECTION OF LIGHT RAYS CROSSING THE UNIVERSE, EMITTED BY DISTANT GALAXIES

IMAGE OF THE DISTANT GALAXIES LENSED BY THE DARK MATTER OF THE UNIVERSE



- 銀河の重力レンズでの歪み具合を用いる
- 重力ポテンシャル（物質分布）を直接測定
- トモグラフィーで、近似的に3次元分布を推定可能 ↔ 揺らぎの時間発展
- 銀河の歪みを正確に測らなくてはいけない
- 重力進化の非線形段階にある
- 天体物理学的な影響

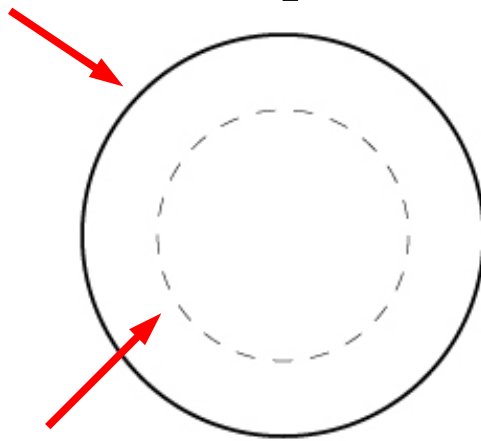
Lensing source

観測量: 楕円率 (Shear)

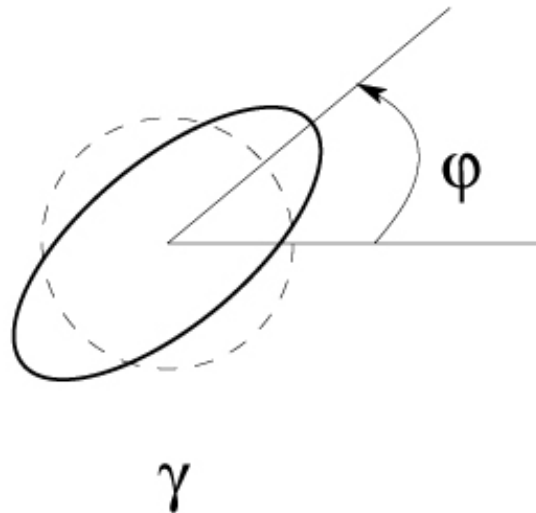
- レンズ効果: mapping between the source plane(S) and image plane(I)

$$\delta x_i^S = A_{ij} \delta x_j^I \quad A_{ij} = \begin{pmatrix} 1 - \kappa - \gamma_1 & -\gamma_2 \\ -\gamma_2 & 1 - \kappa + \gamma_1 \end{pmatrix}$$

observed shape



intrinsic shape κ



$$\begin{aligned} \gamma_1 &= |\vec{\gamma}| \cos 2\varphi \\ \gamma_2 &= |\vec{\gamma}| \sin 2\varphi \\ \gamma &= \frac{a - b}{a + b} \end{aligned}$$

- **Convergence** κ は観測が難しい
Shear γ の方が簡単

理論と観測の比較

観測量: shearの2点相関関数

$$\xi(\theta) = \langle \gamma(\vec{r}) \gamma^*(\vec{r} + \vec{\theta}) \rangle$$

理論: the lensig power spectrum

$$P_{\kappa}(\ell) = \frac{9}{4} \Omega_m^2 \left(\frac{H_0}{c} \right)^4 \int \frac{d\chi}{a^2(\chi)} P_{\delta} \left(\frac{\ell}{\chi}; \chi \right) \times \left[\int_{\chi}^{\chi_{lim}} d\chi' n(\chi') \frac{\chi' - \chi}{\chi'} \right]^2$$

物質密度

(重力の強さと関係)

密度揺らぎのパワー

(ニュートリノ質量に依存)

銀河分布

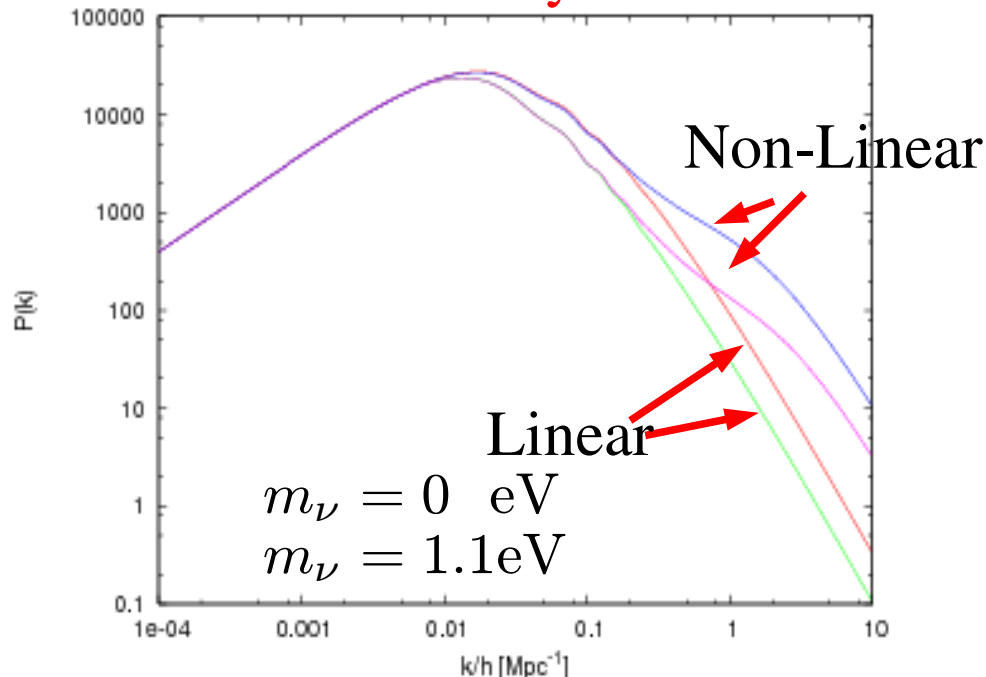
観測量とパワースペクトル間の関係:

$$\xi(\theta) = \int \frac{\ell d\ell}{2\pi} P_{\kappa}(\ell) J_0(\ell\theta)$$

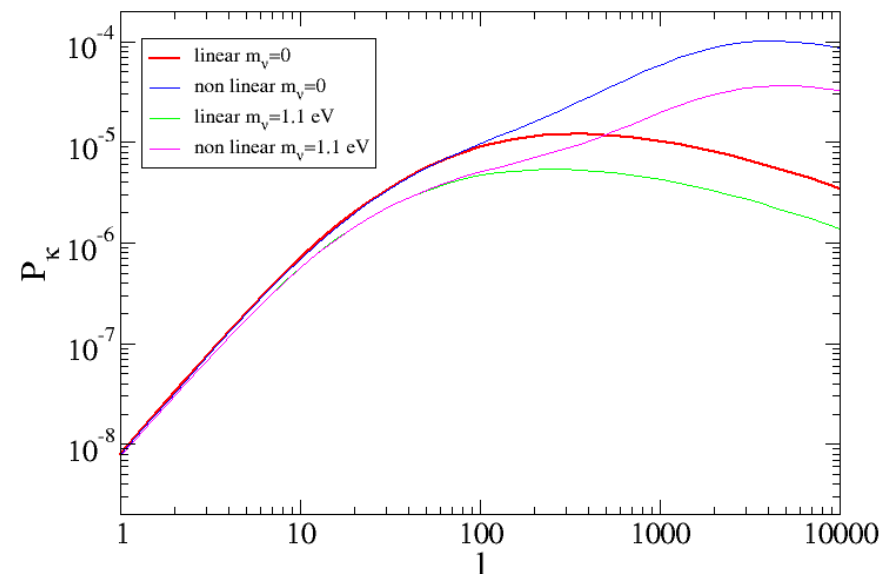
$P_\delta(k) \text{ \& } P_\kappa(\ell)$

- 線形理論は揺らぎが大きくなると破綻する $\langle \delta^2 \rangle \sim k^3 P(k) \sim 1$
- fitting formulae $^{NL}P(k, z) = f(^L P(k, z))$
 e.g., Smith et al., ('03),
 最近: Takahashi et al., ApJ, ('12), Bird et al., MNRAS, ('12)

Power of density fluctuation



Lensing power spectrum

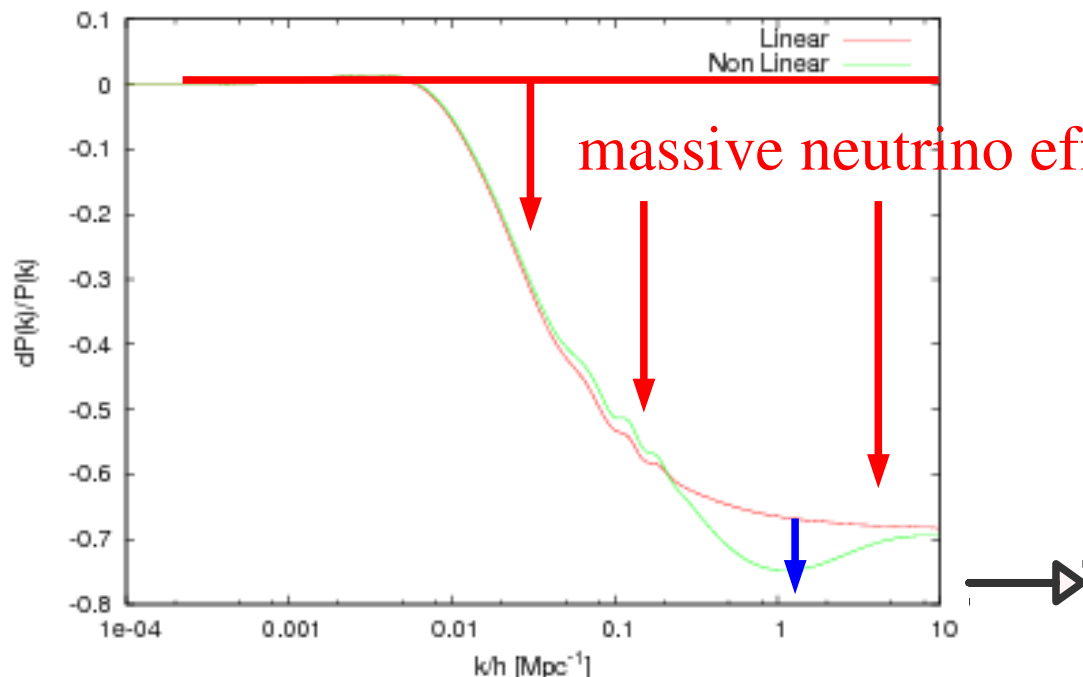


Fitting 公式の使い方

- バリオン流体とCDMは非線形段階でも、ニュートリノはまだ線形段階のはずなので

$$P(k) = \left(f_{\nu} \sqrt{P_{\nu}^L(k)} + (1 - f_{\nu}) \sqrt{P_{b+c}^{NL}(k)} \right)^2$$

Hannestad, '06
Ichiki et al., '08



N-body simulationで
確かめるべき。

非線形効果はニュートリノ
質量の影響を増大させる

MCMC Likelihood Analysis

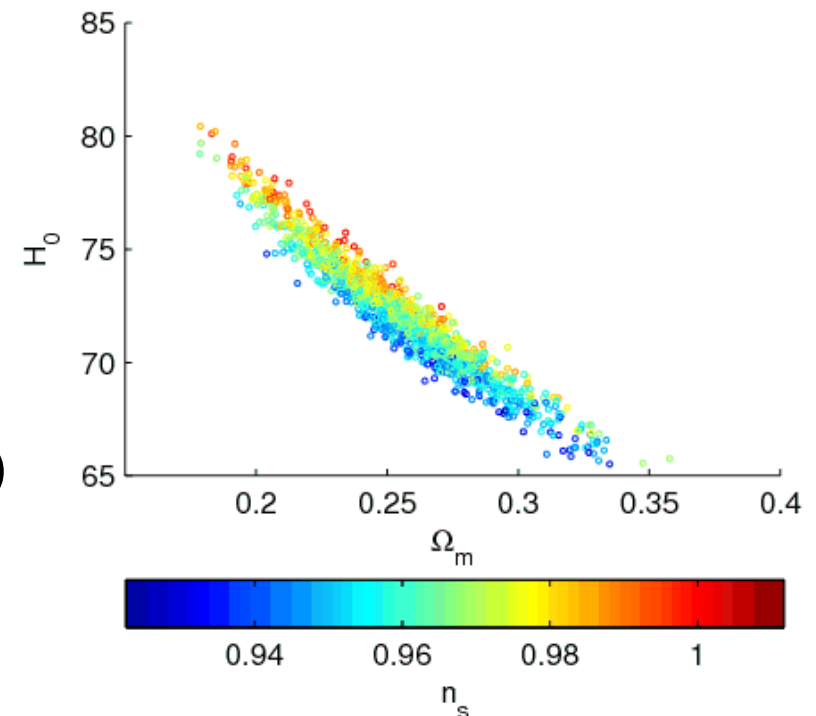
- 調べる宇宙論パラメタ (8 params)

$$\vec{P} = (\Omega_b h^2, \Omega_c h^2, \theta, \tau, m_\nu, n_s, A_s, z_c)$$

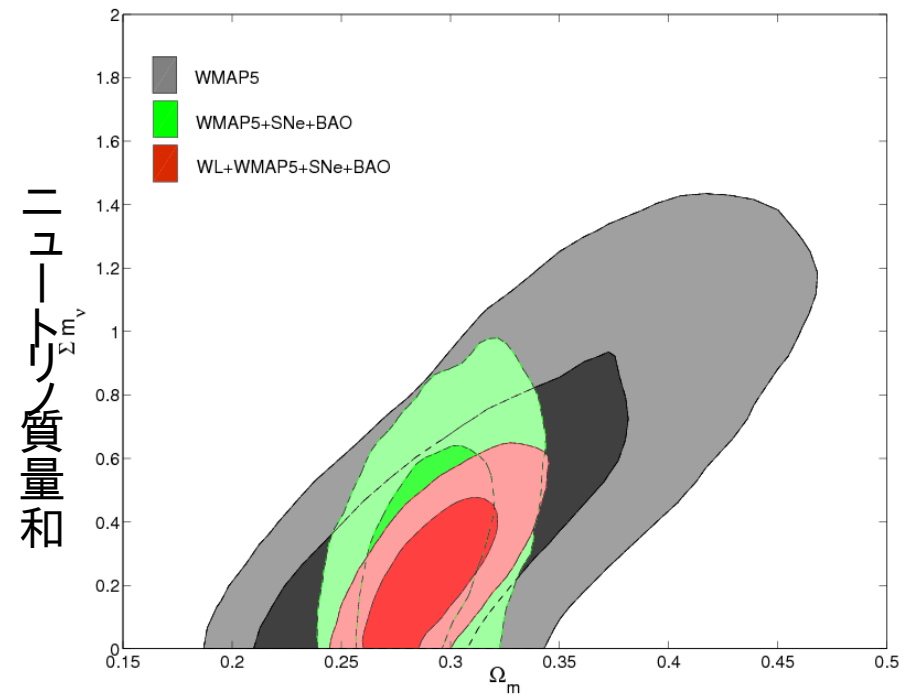
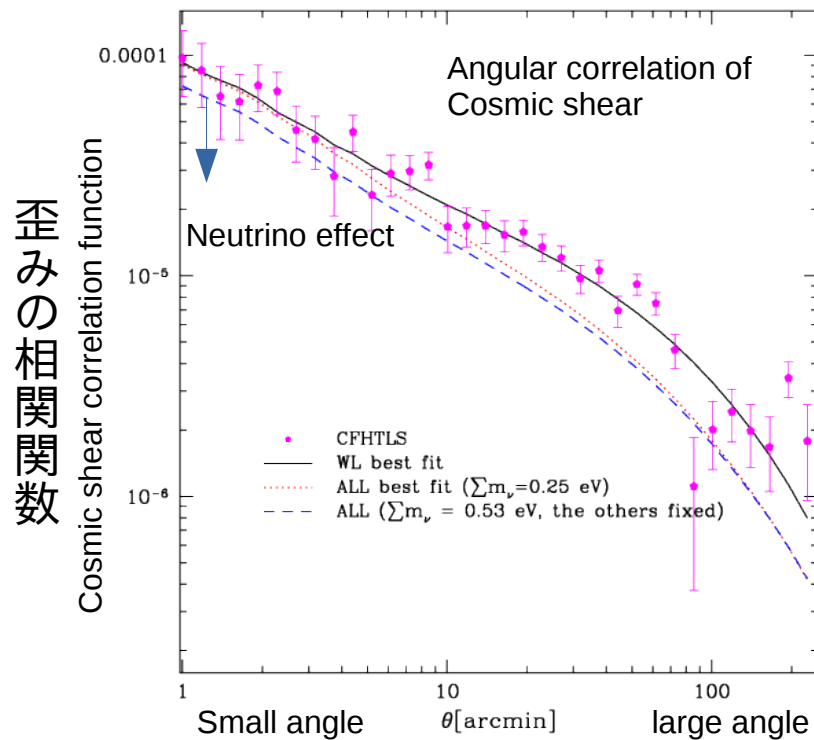
- explore the likelihoods of WMAP5 and CFHTLS data using Markov Chain Monte Carlo sampling

- CosmoMC:
Cosmological MCMC engine
(<http://cosmologist.info/cosmomc>)

Lewis & Bridle, PRD, '02 (1872 citations)



宇宙論的弱重力レンズ効果 ニュートリノ質量への制限



WMAP

$$\sum m_\nu < 1.2 \text{ eV}$$

+BAO+SNe

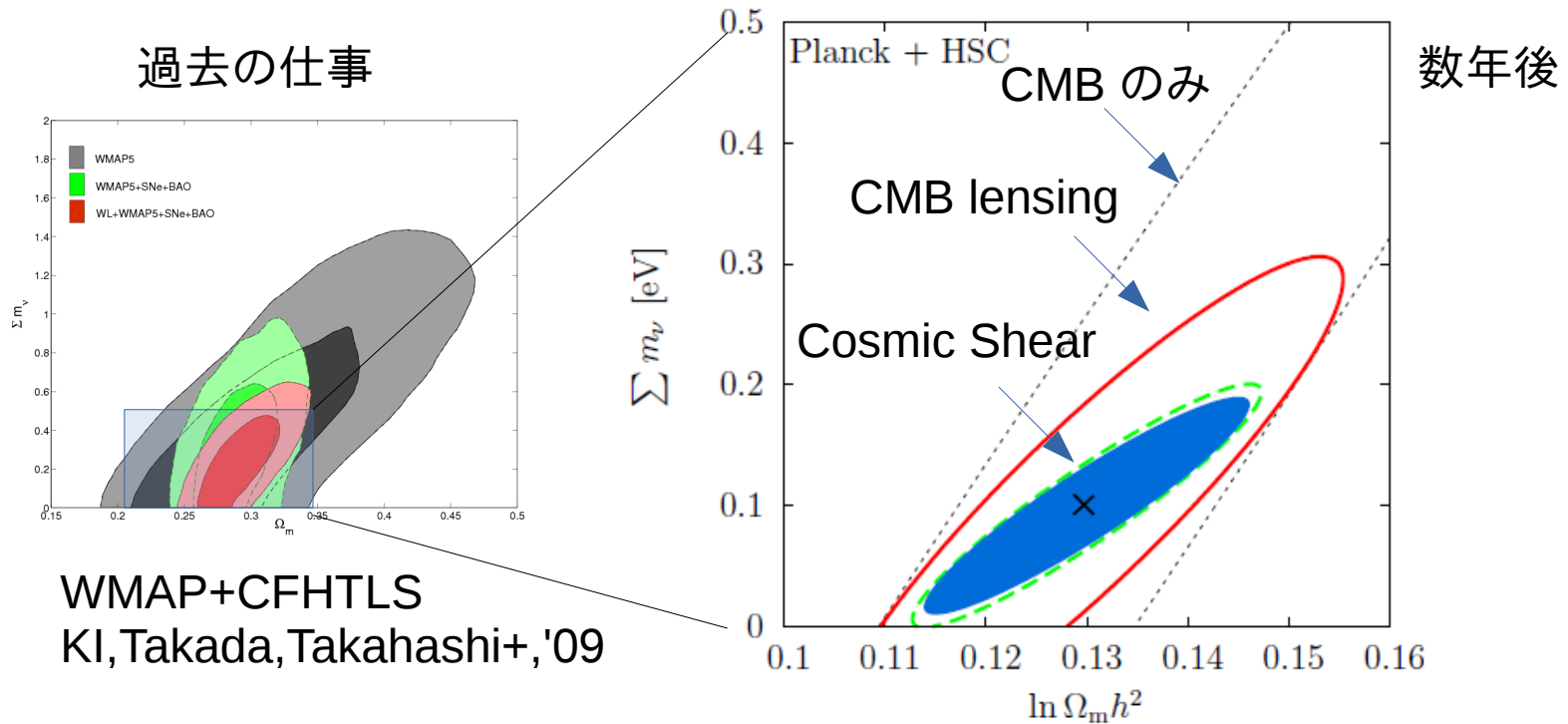
$$\sum m_\nu < 0.76 \text{ eV}$$

+BAO+SNe+WL

$$\sum m_\nu < 0.54 \text{ eV}$$

未来の Sensitivity (HSC)

(e.g., Namikawa, Saito, Taruya, JCAP, '10, Takeuchi, KI, Matsubara, PRD, '12)



	Planck + HSC			Planck + ACTPol + HSC		
parameter	+d	+γ	+d + γ	+d	+γ	+d + γ
w_0	0.14	0.12	0.11	0.056	0.054	0.052
Σm_ν [eV]	0.13	0.060	0.055	0.061	0.046	0.041
	CMB レンズ		銀河 レンズ			

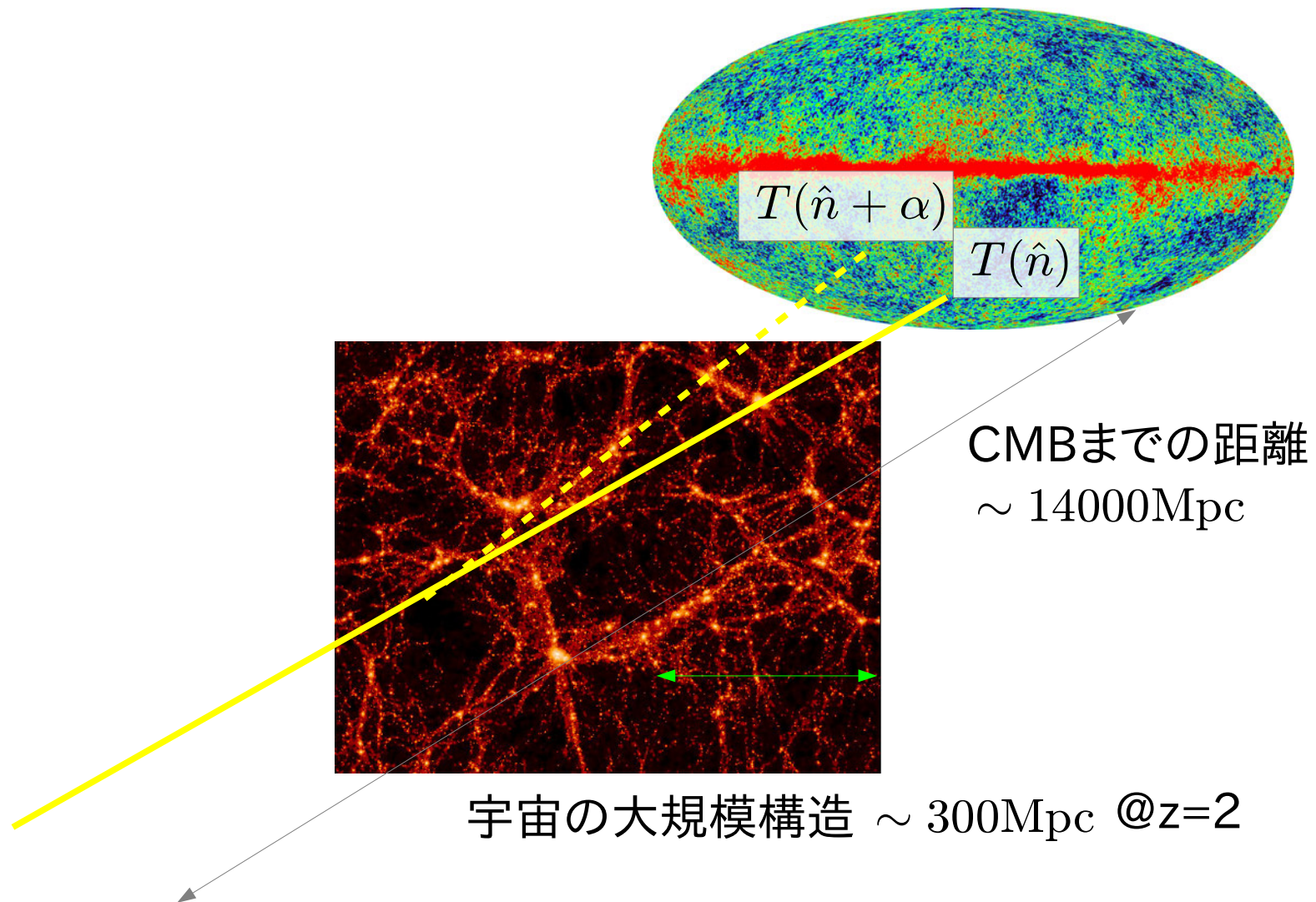
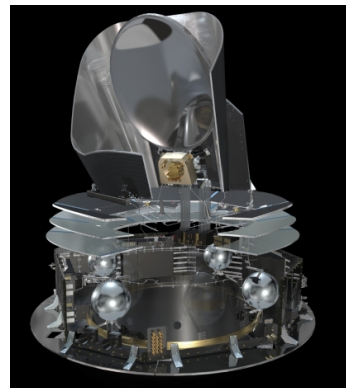
CMB lensing

“そんな観測は現時点では夢物語だが、、、
将来的にはこの効果は検出されるだろう”

(Blanchard & Schneider, 1987)

- Lensing timeline
 - 相互相関
 - WMAP+SDSS('07)
 - スムージング
 - ACBAR('08)
 - Lensing Power spectrum
 - ACT('11), SPT('12), PLANCK('13), SPTpol('15), PolarBear('15)

CMB lensing



CMB lensing

- 重力レンズ効果による曲がり角 α

$$\alpha \sim \underset{\substack{\uparrow \\ \text{重力ポテンシャル}}}{2\phi} \times \sqrt{\frac{14000}{300}} \underset{\substack{\uparrow \\ \text{散乱回数}}}{\sim 2'}$$

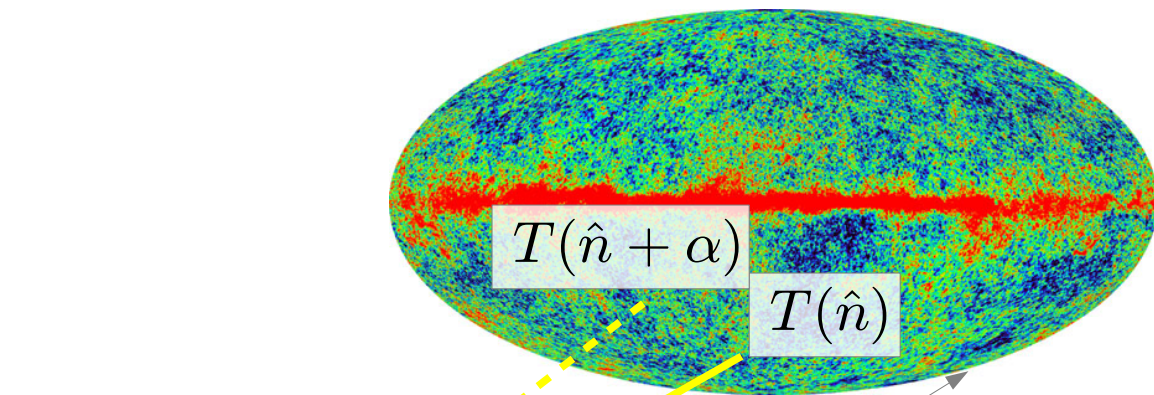
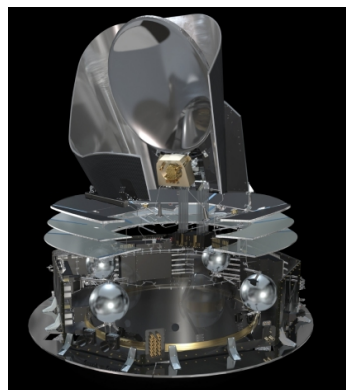
重力ポテンシャル

散乱回数

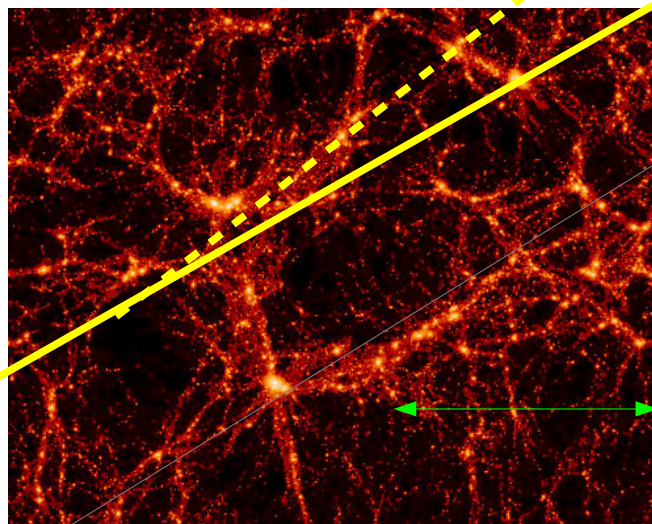
- coherent over

$$300 / (14000 / 2) \sim 2^\circ$$

(=CMB peak scale)



CMBまでの距離
 $\sim 14000\text{Mpc}$



宇宙の大規模構造 $\sim 300\text{Mpc}$ @ $z=2$
(ダークマター)

CMB lensing

- 重力レンズ効果による曲がり角 α

重力

- C

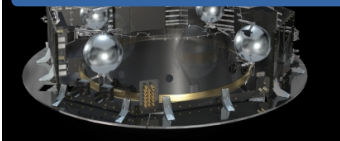


- CMBの重力レンズでの歪み具合を用いる
- 重力ポテンシャル（物質分布）を直接測定
- 遠方のレンズ天体が既知（線形）
- 全天サーベイ

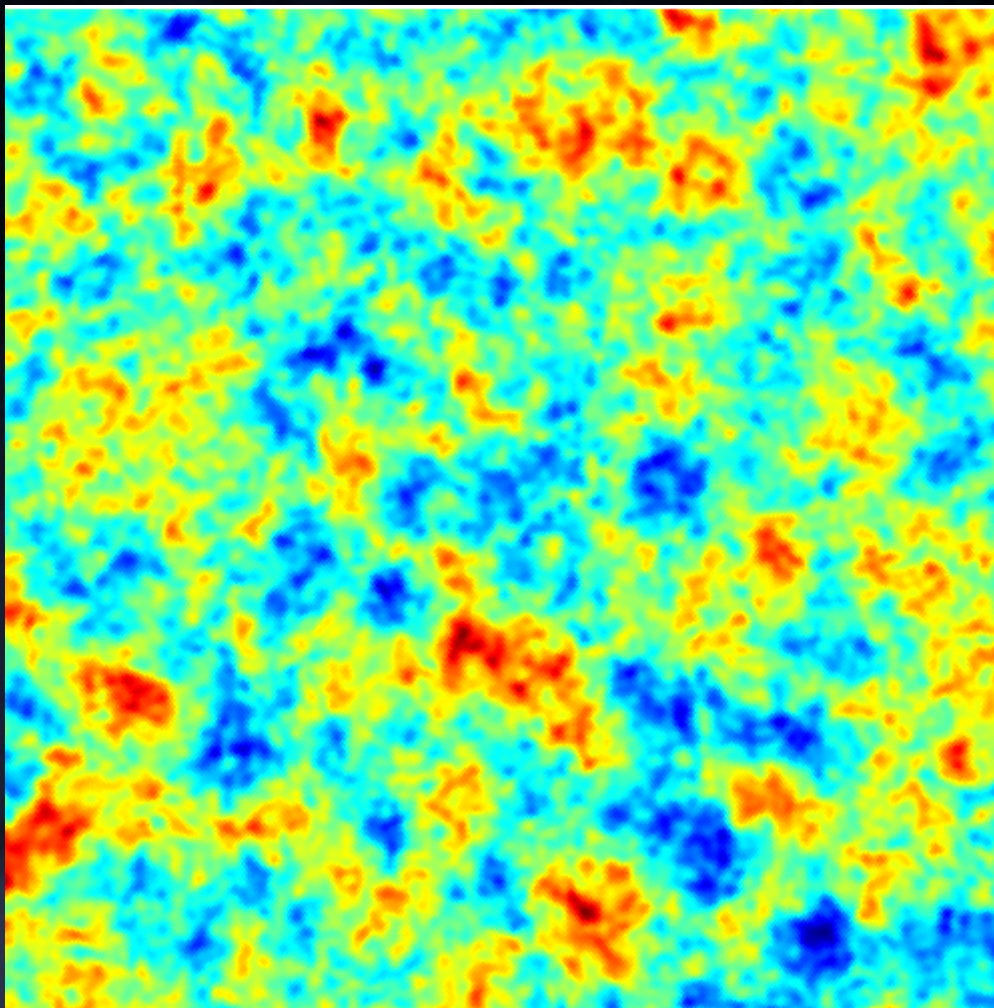
- ソースが一つしかない

の距離
 1pc

$=2$

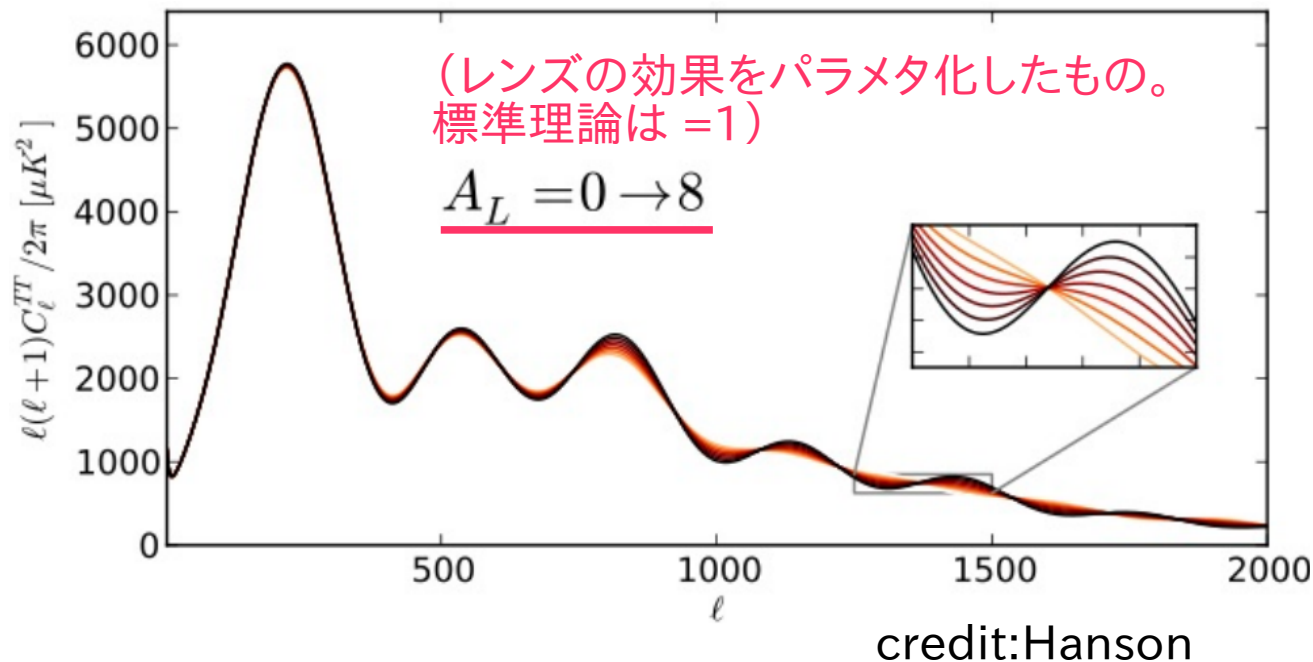


TO SEE IS TO BELIEVE



CMB温度揺らぎへの影響

- 視線方向に依存して拡大や縮小、歪みを受ける(レンズ)
 - 音響振動がなまされる (2 σ 検出 ACBAR+WMAP5 Reichardt, ApJ '09)
 - (E-B modeが混ざる)
- 局所的にCMBの一様等方性を破る
 - レンズポテンシャルの再構築

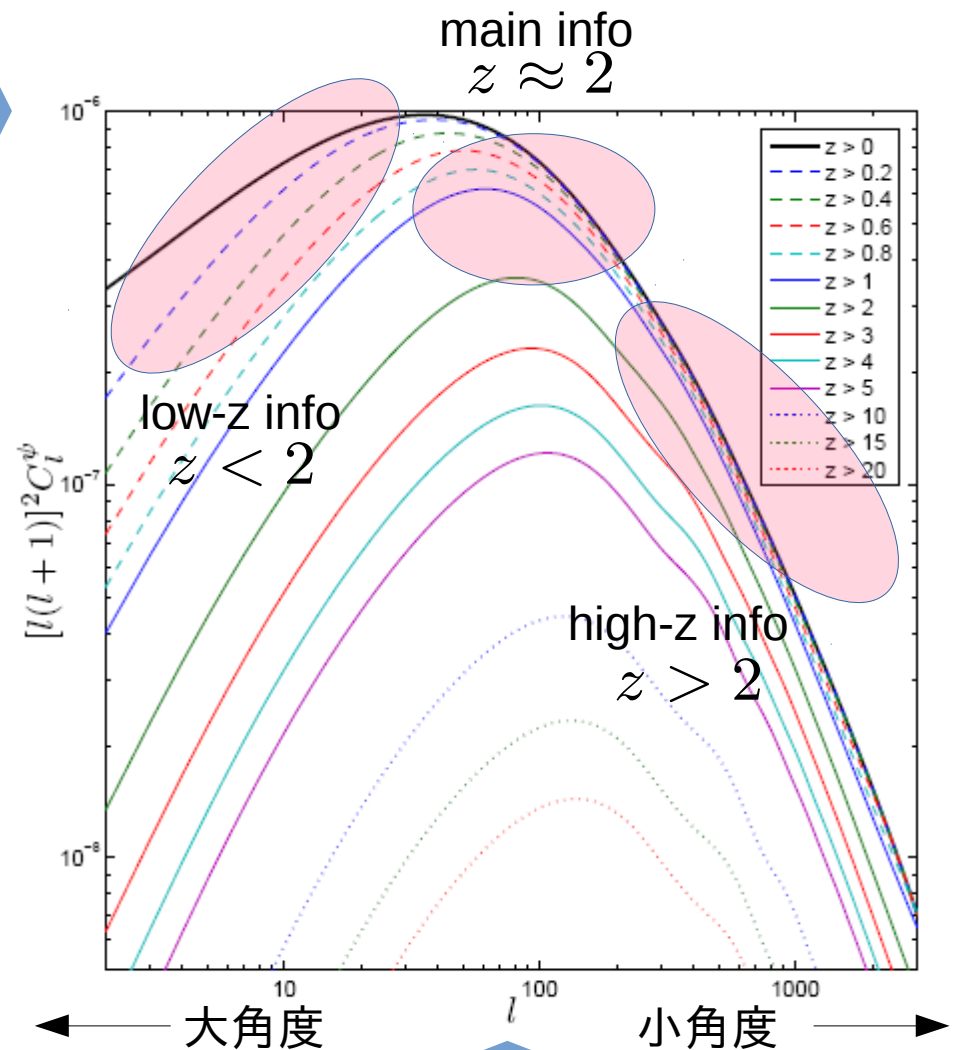


CMB lensing power spectrum

- 曲がり角 ~ 2 分
 - PLANCKでなんとか
- ~ 2 度で揃って曲がる
- $z \sim 2$ くらいの情報

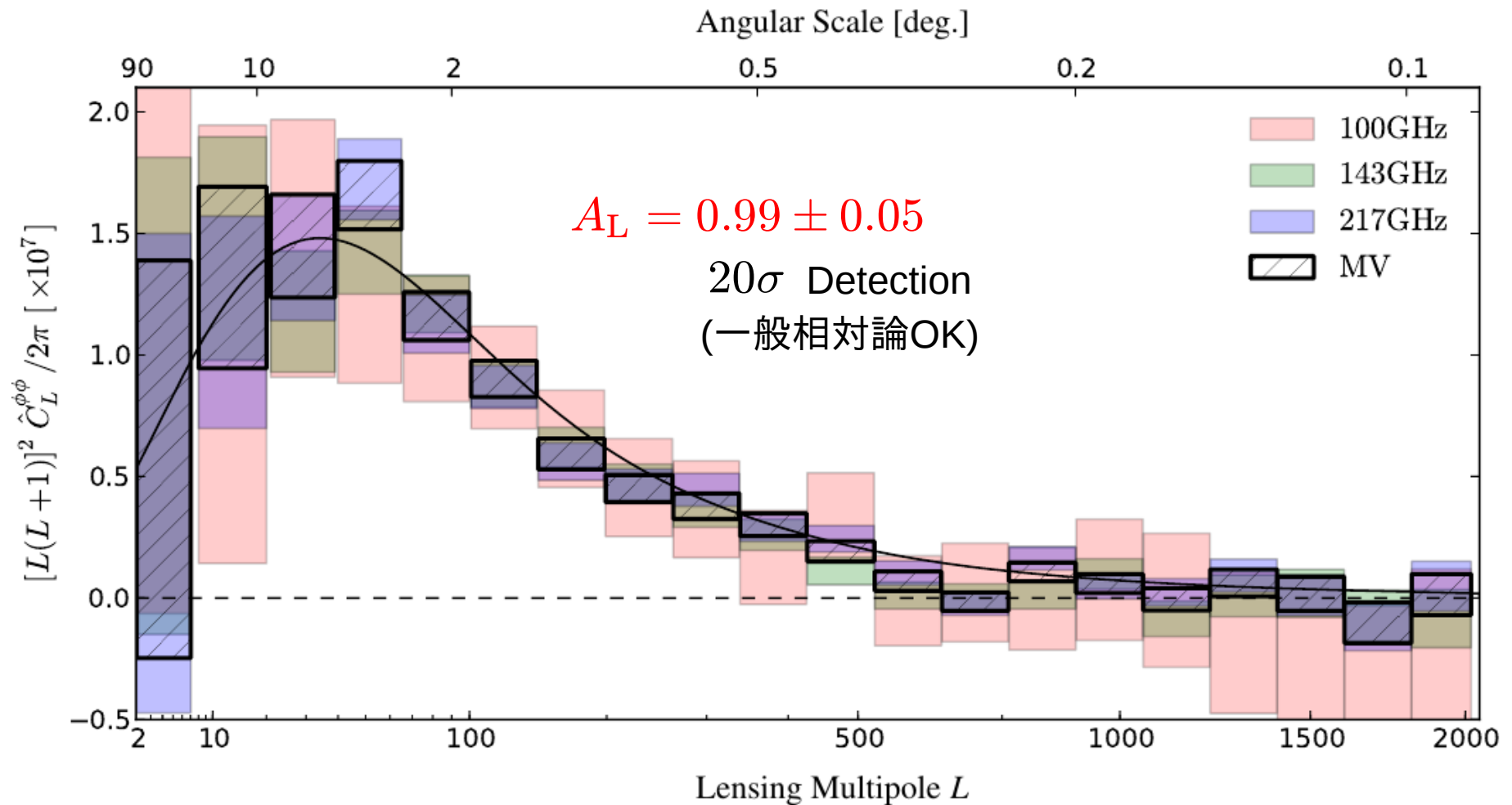
覚え方

CMB lensing: キーワードは
 ~ 2 (曲り角、相関、赤方偏移)



Lewis&Challinor, '06

PLANCK lensing power spectrum

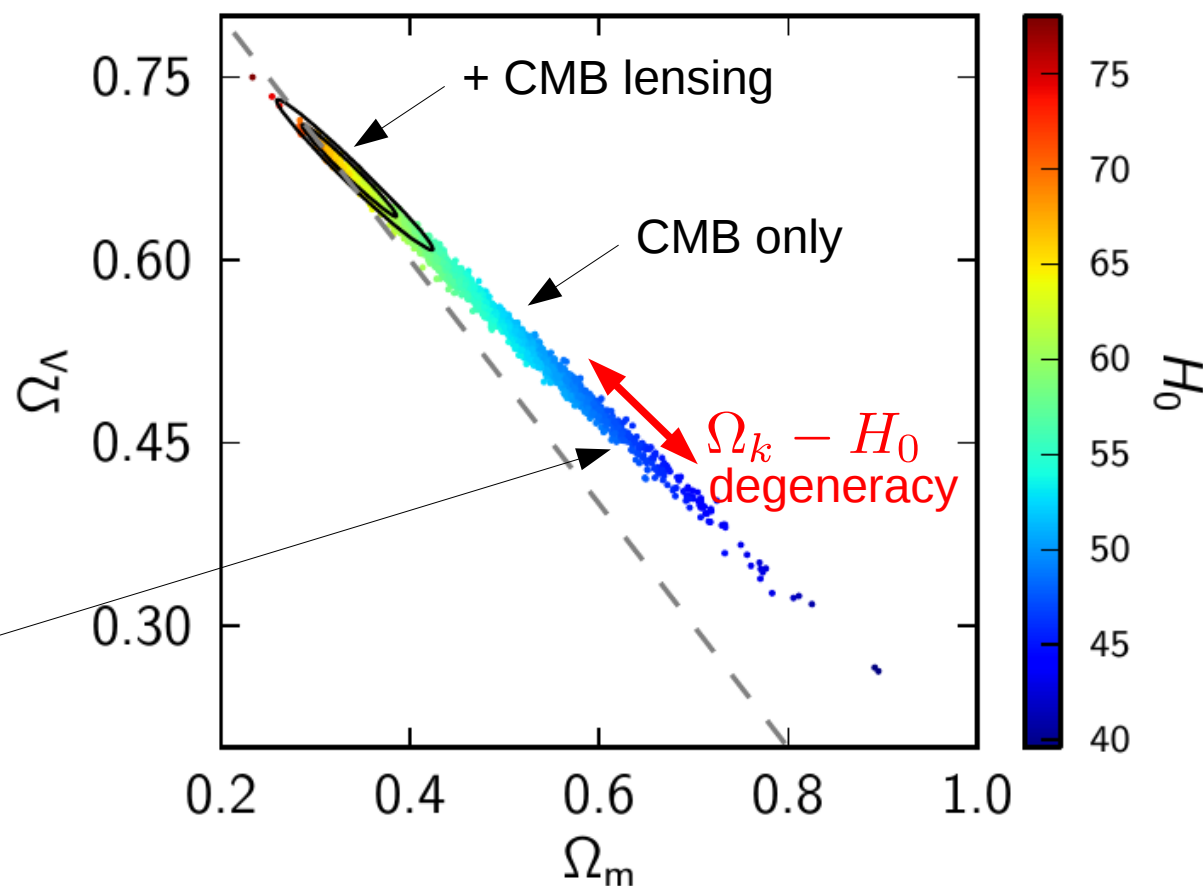


宇宙論へのインパクト

- $z=2$ までの
 - 距離の情報
 - 構造形成の様子 (Ω_m)

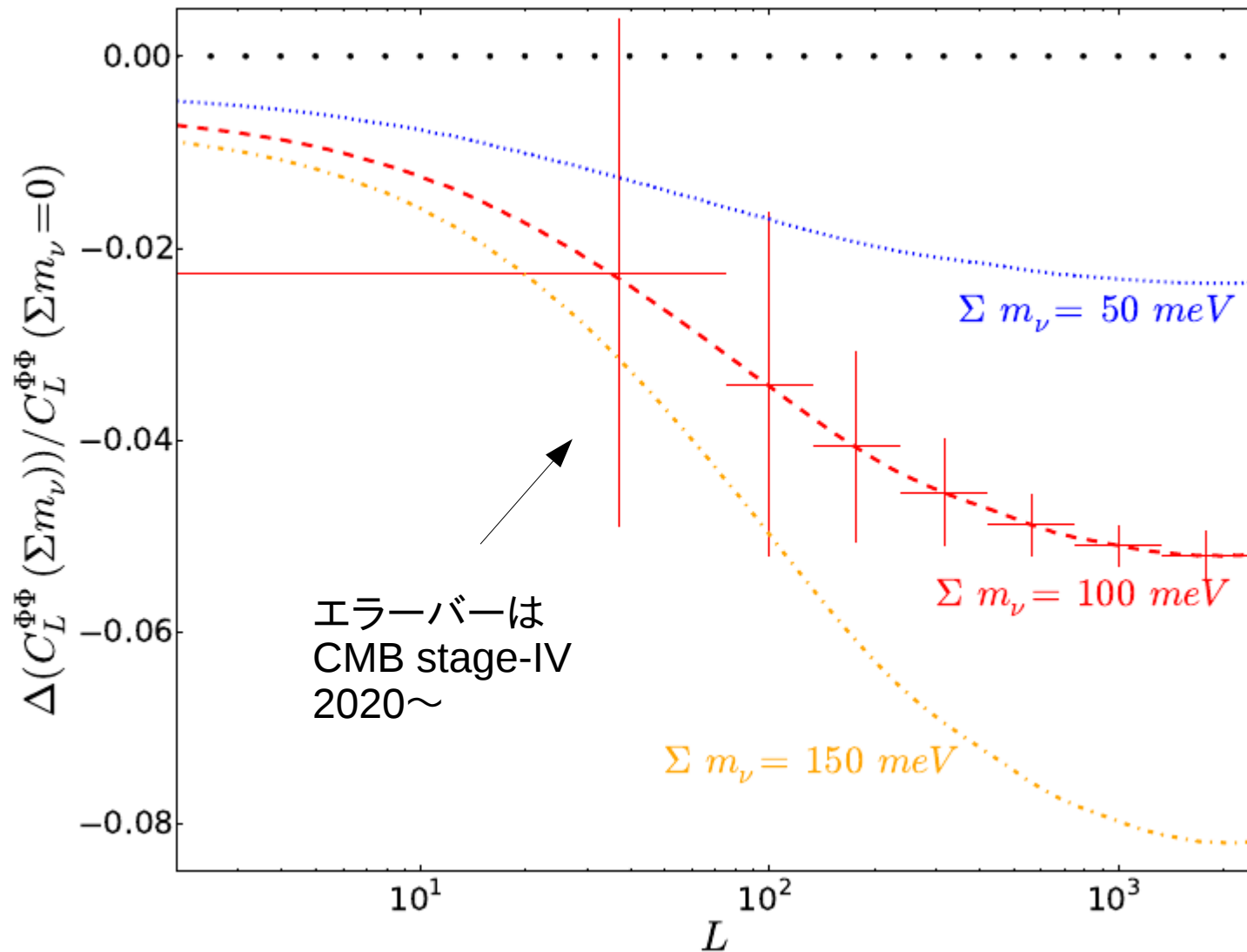


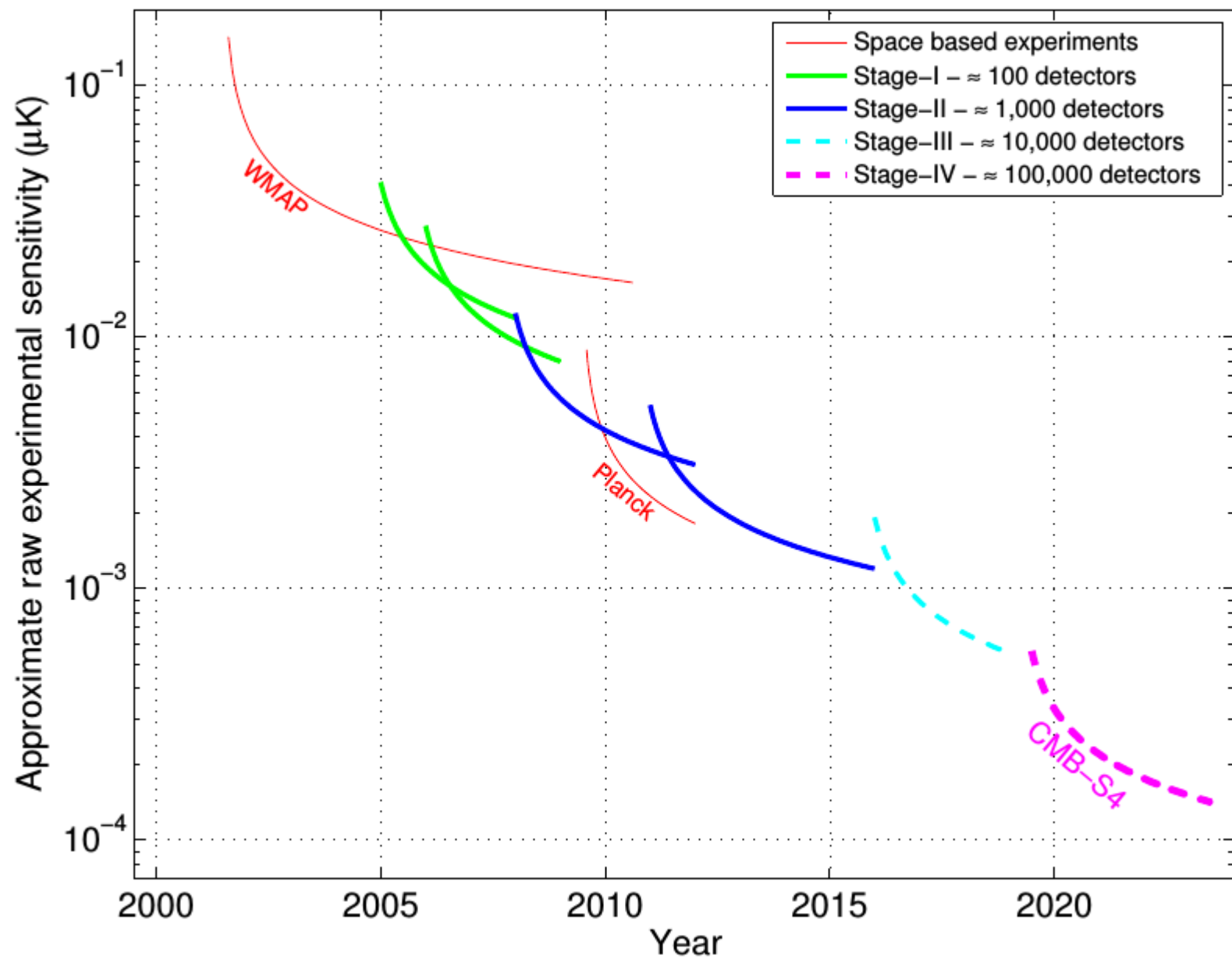
CMB温度揺らぎの振幅と、
最終散乱面までの距離に
付随する縮退が解ける！



*温度揺らぎとCMB lensingで光学的厚さについても制限がつく

Lensing power spectrum とニュートリノ質量





neutrino massへの制限



Planck 2013 results. XVI

$$\sum m_\nu < 0.66 \text{ eV} \quad (\text{CMB only})$$

$$\sum m_\nu < 0.23 \text{ eV} \quad (+\text{BAO})$$

$$\sum m_\nu < 0.85 \text{ eV} \quad (+\text{Lensing})$$

Planck 2015 results. XIII

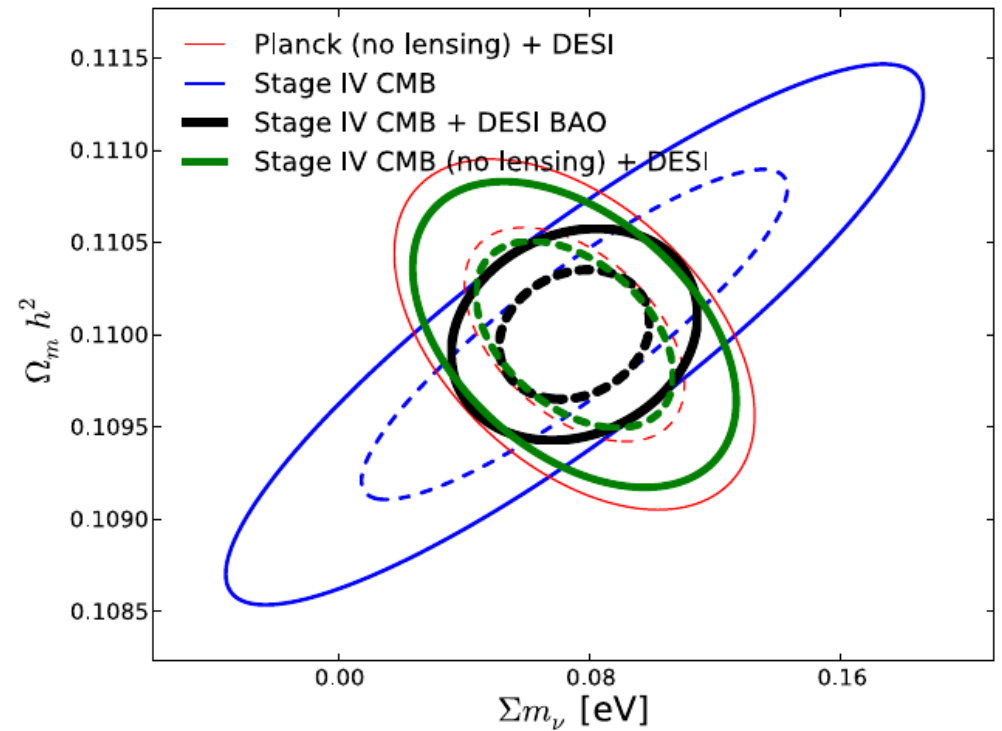
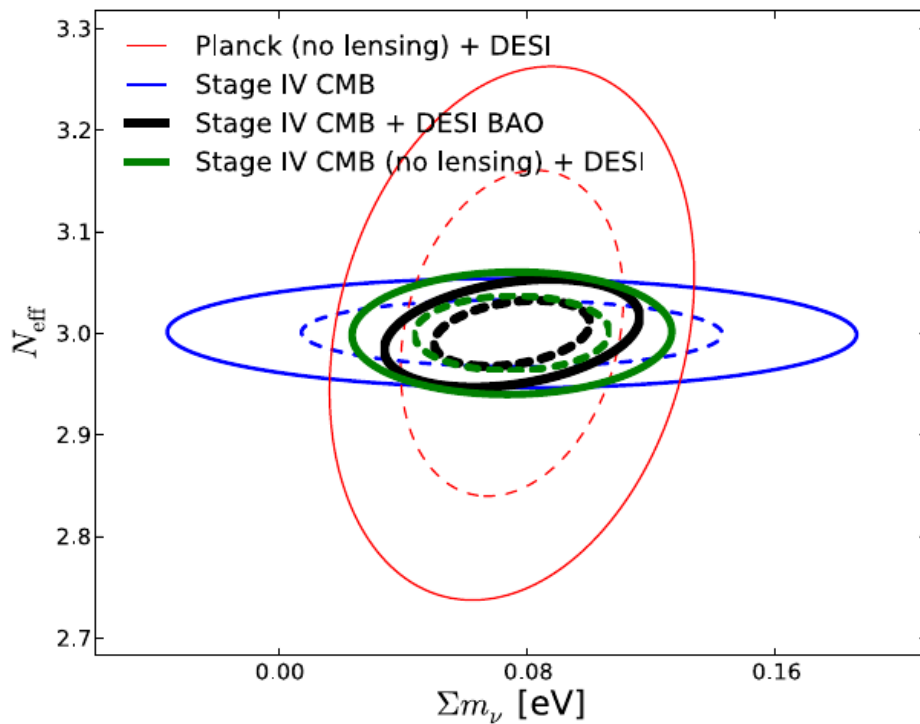
$$\sum m_\nu < 0.49 \text{ eV} \quad \text{Planck TT, TE, EE+lowP,}$$

$$\sum m_\nu < 0.59 \text{ eV} \quad (95\%, \text{Planck TT, TE, EE+lowP+lensing})$$

cantly lower amplitude. At this stage it is unclear what to make of this mild tension between neutrino mass constraints from the 4-point function and those from the 2-point, and we caution over-interpreting the results. We expect to be able to say more on this issue with the further data, including polarization, that will be made available in future *Planck* data releases.

The constraint of Eq. (57) is weaker than the constraint of Eq. (54b) excluding lensing, but there is no good reason to disregard the *Planck* lensing information while retaining other astrophysical data. The CMB lensing signal probes very-nearly linear scales and passes many consistency checks over the multipole range used in the *Planck* lensing likelihood (see Sect. 5.1

未来の制限(2020-)



$$\Sigma m_\nu \lesssim 0.01 \text{ eV}$$

$$N_{\text{eff}} \lesssim 0.02$$

銀河団の数を用いる方法

PRL **95**, 011302 (2005)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
1 JULY 2005

Weighing Neutrinos with Galaxy Cluster Surveys

Sheng Wang,^{1,2} Zoltán Haiman,³ Wayne Hu,⁴ Justin Khoury,⁵ and Morgan May¹

¹*Brookhaven National Laboratory, Upton, New York 11973-5000, USA*

²*Department of Physics, Columbia University, New York, New York 10027, USA*

³*Department of Astronomy, Columbia University, New York, New York 10027, USA*

⁴*Kavli Institute for Cosmological Physics, Department of Astronomy and Astrophysics, Enrico Fermi Institute, University of Chicago, Chicago, Illinois 60637, USA*

⁵*Center for Theoretical Physics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139, USA*

(Received 28 January 2005; published 30 June 2005)

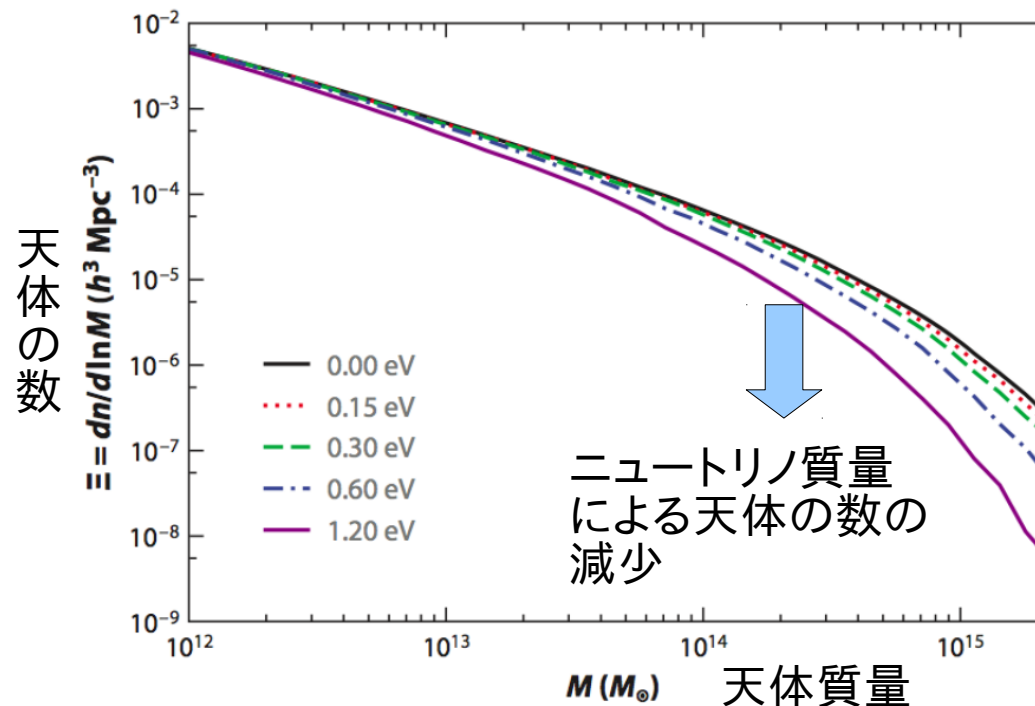
Large future galaxy cluster surveys, combined with cosmic microwave background observations, can achieve a high sensitivity to the masses of cosmologically important neutrinos. We show that a weak lensing selected sample of $\geq 100\,000$ clusters could tighten the current upper bound on the sum of masses of neutrino species by an order of magnitude, to a level of 0.03 eV. Since this statistical sensitivity is below the best existing lower limit on the mass of at least one neutrino species, a future detection is likely, provided that systematic errors can be controlled to a similar level.

DOI: [10.1103/PhysRevLett.95.011302](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.011302)

PACS numbers: 98.80.Es, 14.60.Pq, 98.65.Cw

銀河団 Cosmology

- 宇宙最大の天体 (現在形成中)
- 銀河団の数は宇宙の**体積に依存** e.g., Wang+, PRL, 05
 - さらに、指数関数的に**揺らぎの大きさに依存(パワフル)**



Brandbyge J., JCAP, 2010

銀河団 Cosmology

- 宇宙最大の天体(現在形成中)

- 銀河団クラスのダークマターハローの数を推定



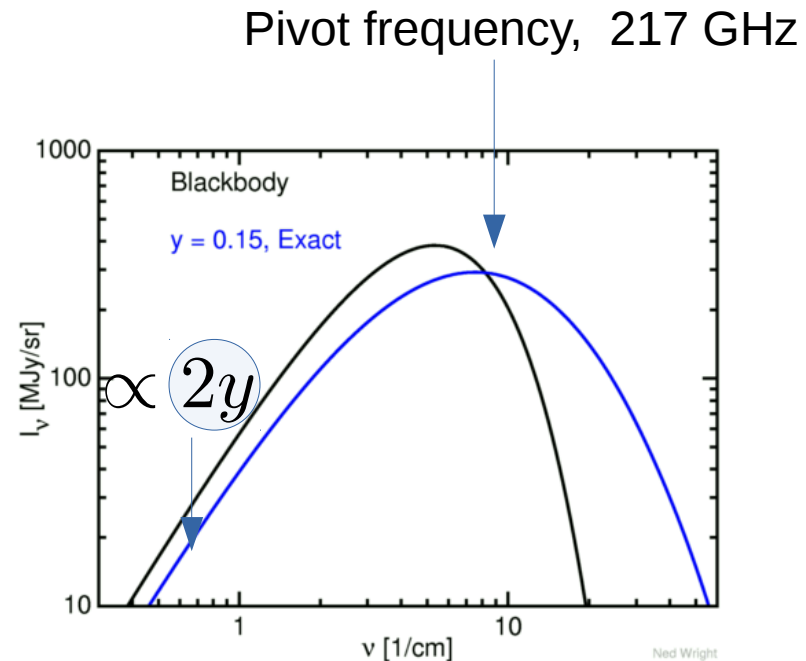
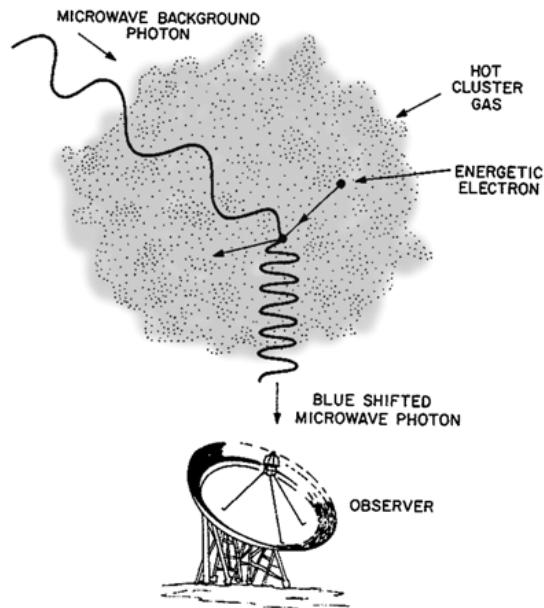
- 銀河団観測には様々な手法

可視光サーベイ、X線、SZ、重力レンズ...

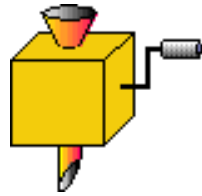
- 重力レンズ以外は質量を推定しなくてはいけない
(これが難しい)

SZ effect

- Some of the CMB photons are Compton-scattered by hot electrons in clusters of galaxies, **leading to a distortion of the Blackbody spectrum**
- A good way to detect cluster of galaxies

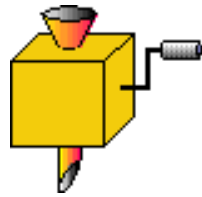


- Boltzmann equation $f(\omega)$



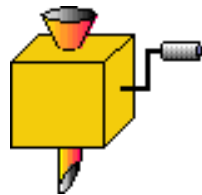
← Isotropic distribution
small energy transfer

$$\frac{\partial f}{c \partial t} \approx n_e \sigma_T \left(\frac{kT_e}{mc^2} \right) \frac{1}{\omega^2} \frac{\partial}{\partial \omega} \left(\omega^4 \frac{\partial f}{\partial \omega} \right)$$



← Optically thin

$$\Delta f \approx y \frac{1}{\omega^2} \frac{\partial}{\partial \omega} \left(\omega^4 \frac{\partial f}{\partial \omega} \right) \quad y = \int dr \frac{n_e \sigma_T k T_e}{m_e c^2}$$



$f(\omega)$ をBlack bodyで近似して温度変化に直すと

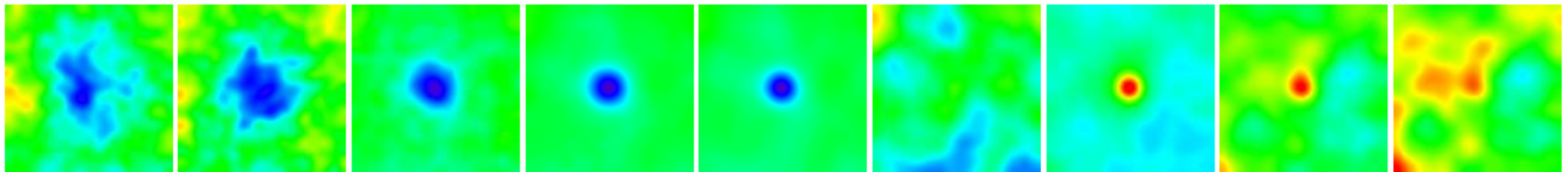
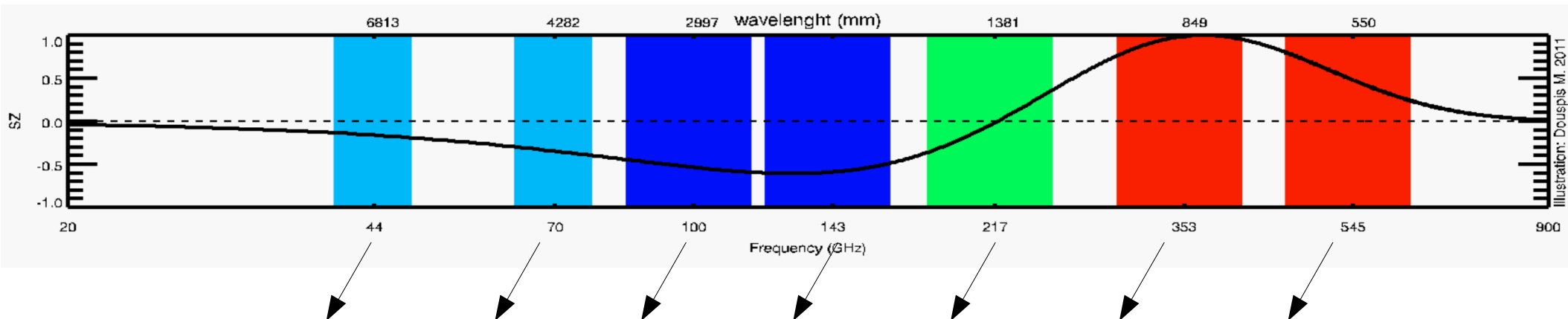
$$\frac{\Delta T}{T} = -y [4 - x \coth(x/2)] \longrightarrow -2y$$

$$x \equiv \omega/T \ll 1$$

SZ signal from Planck

$$Y = \int y d\Omega = \frac{\sigma_T}{d_A^2} \frac{dV n_e k_B T_e}{m_e c^2}$$

- Total thermal energy → unbiased mass-limited selection
- All-sky survey → rarest clusters → cosmology (DE, ν -mass)
- Can probe high- z clusters



Stacked signal from PLANCK

Samples for cosmology (2013)

- A sample of 187 clusters with $S/N > 7$
 - 1227 clusters & candidate **Planck 2015で439個へ**
 - 683 previously known
 - 178 new clusters
 - 366 candidates
- Important inputs:
 - Mass function
 - Scaling relation
 - completeness

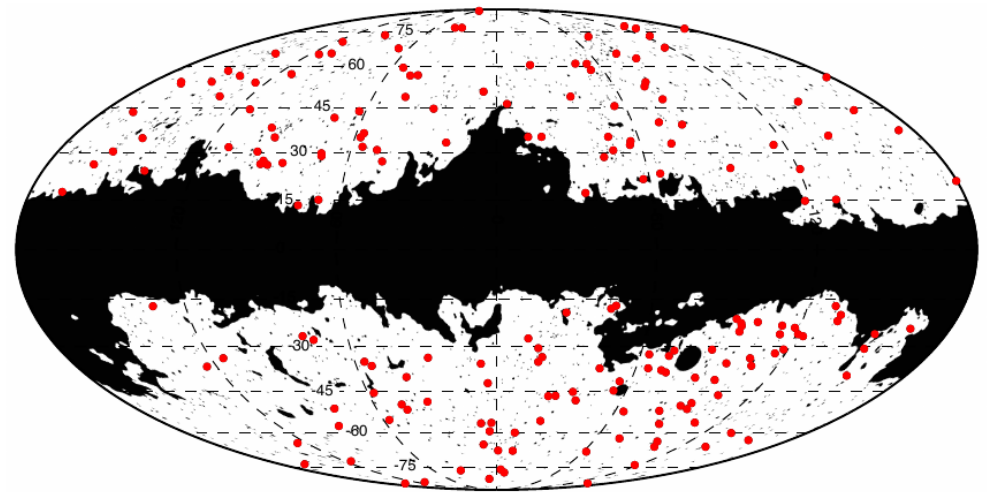
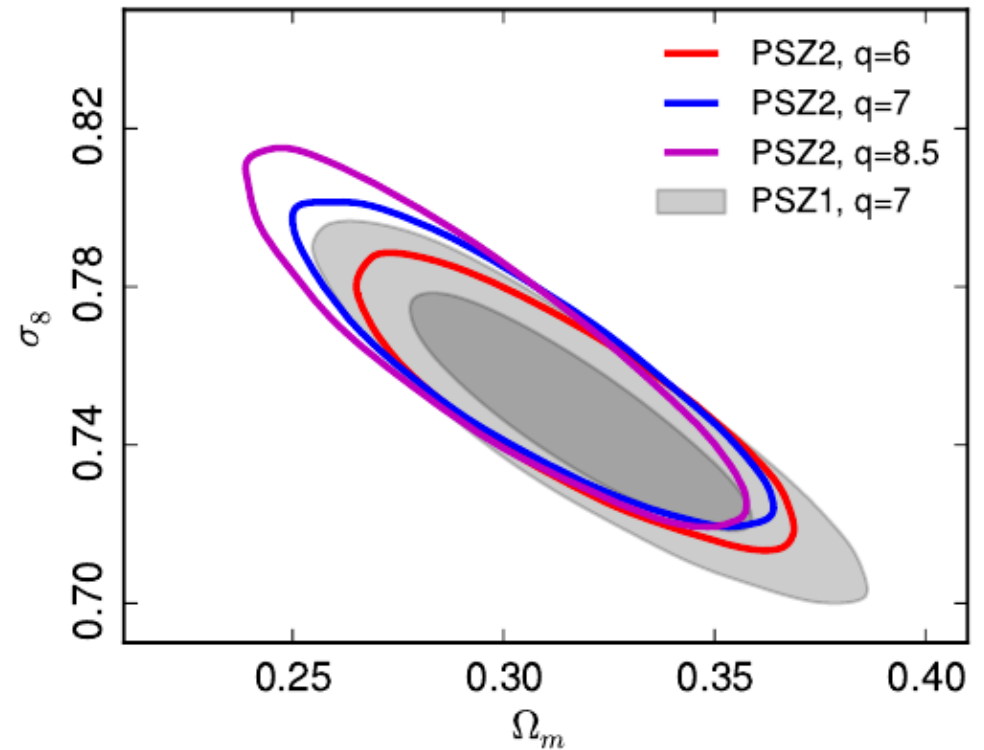
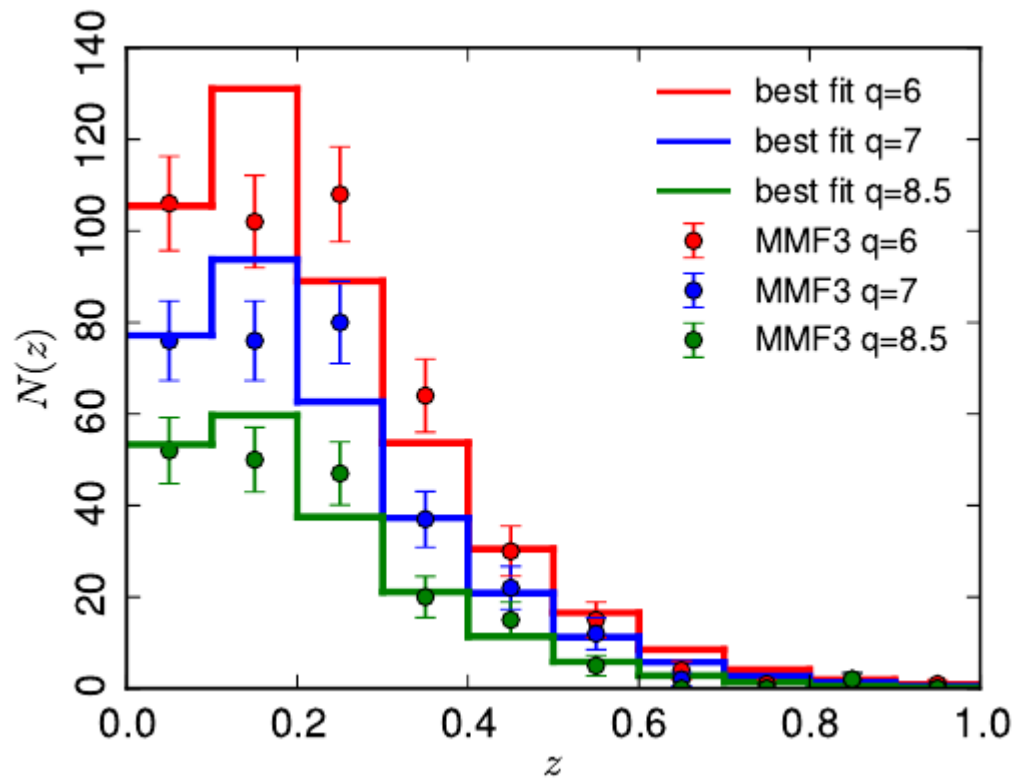


Fig. 1. The distribution on the sky of the *Planck* SZ cluster sub-sample used in this paper, with the 35% mask overlaid.

PLANCK SZ cluster number counts

Planck 2015 results XXIV



銀河団宇宙論の方法例

銀河団の数の数え方

$$dN_{\text{cluster}} = \int_{z_i}^{z_i + \Delta z} dz \int_0^{\infty} dM \frac{dn}{dM dV} x(M, z) \frac{dV}{dz}$$

銀河団宇宙論の方法例

銀河団の数の数え方

$$dN_{\text{cluster}} = \int_{z_i}^{z_i + \Delta z} dz \int_0^{\infty} dM \frac{dn}{dM dV} \xi(M, z) \frac{dV}{dz}$$

ハロー質量関数
(揺らぎの大きさに依存)

$$\frac{dn}{dM dV} = f(\sigma, z) \frac{\rho}{M} \frac{d \ln \sigma^{-1}}{dM} \quad [\text{個}/\text{cMpc}^3/\text{M}_{\text{sun}}]$$

$$f(\sigma) = A \left[\left(\frac{\sigma}{b} \right)^{-a} + 1 \right] e^{-c/\sigma^2} \quad (\text{Tinker et al., ApJ, '10})$$

$$\sigma^2(M, z) = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^{\infty} k^2 P(k, z) W^2(k, M) dk \quad (\text{質量} M \text{のスケールでの揺らぎの分散})$$

* 定数 a, b, c は N-body の結果への fitting パラメタとして与えられる

銀河団宇宙論の方法例

銀河団の数の数え方

$$dN_{\text{cluster}} = \int_{z_i}^{z_i + \Delta z} dz \int_0^\infty dM \frac{dn}{dM dV} x(M, z) \frac{dV}{dz}$$

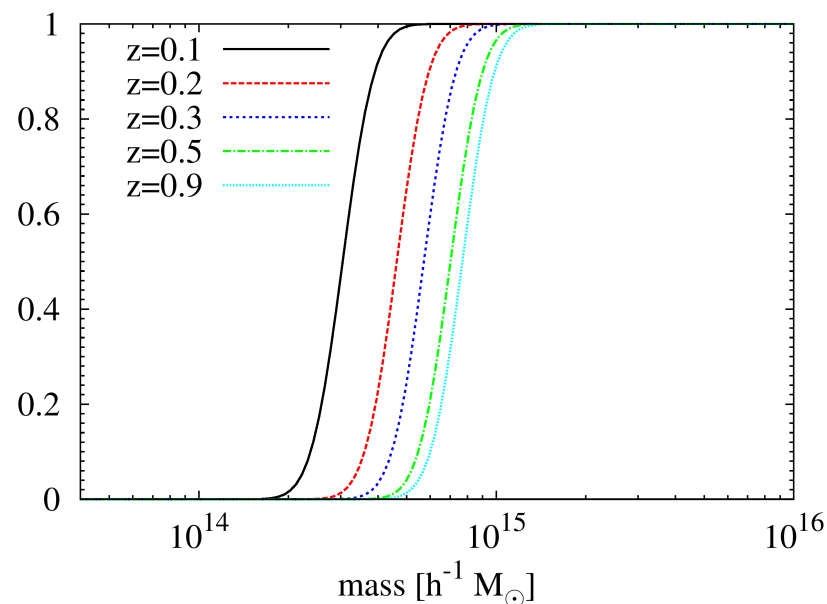
ハロー質量関数
(揺らぎの大きさに依存)

completeness

$$x(M, z) = \int_{M_{\text{lim}}(z)}^\infty d \ln M^{\text{obs}} p(M^{\text{obs}} | M)$$

$$p(M^{\text{obs}} | M) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp \left[-\frac{(\ln M^{\text{obs}} - \ln M)^2}{2\sigma^2} \right]$$

completeness



銀河団宇宙論の方法例

銀河団の数の数え方

$$dN_{\text{cluster}} = \int_{z_i}^{z_i + \Delta z} dz \int_0^\infty dM \frac{dn}{dM dV} x(M, z) \frac{dV}{dz}$$

体積要素
(宇宙膨張の歴史)

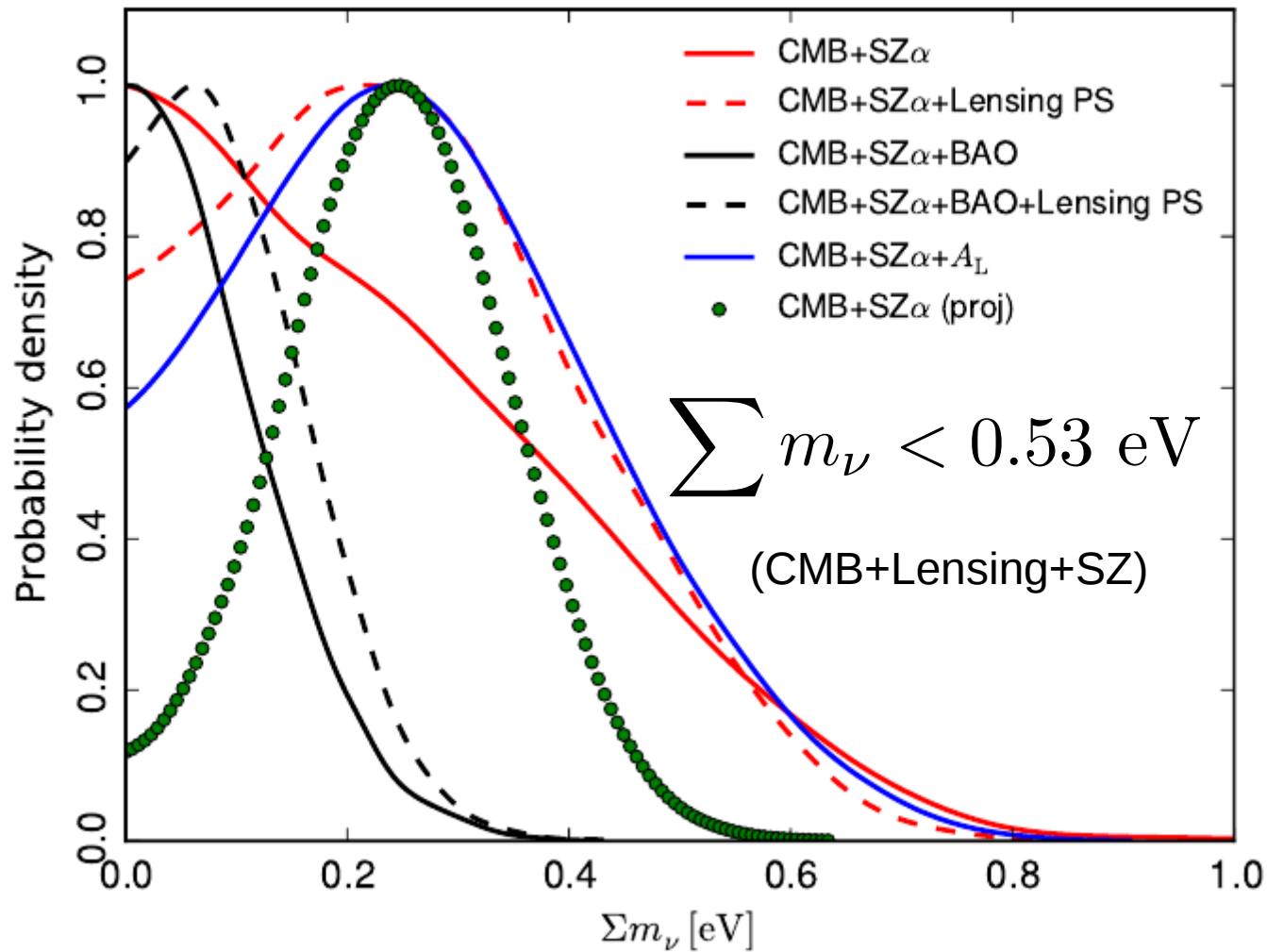
ハロー質量関数
(揺らぎの大きさに依存)

completeness

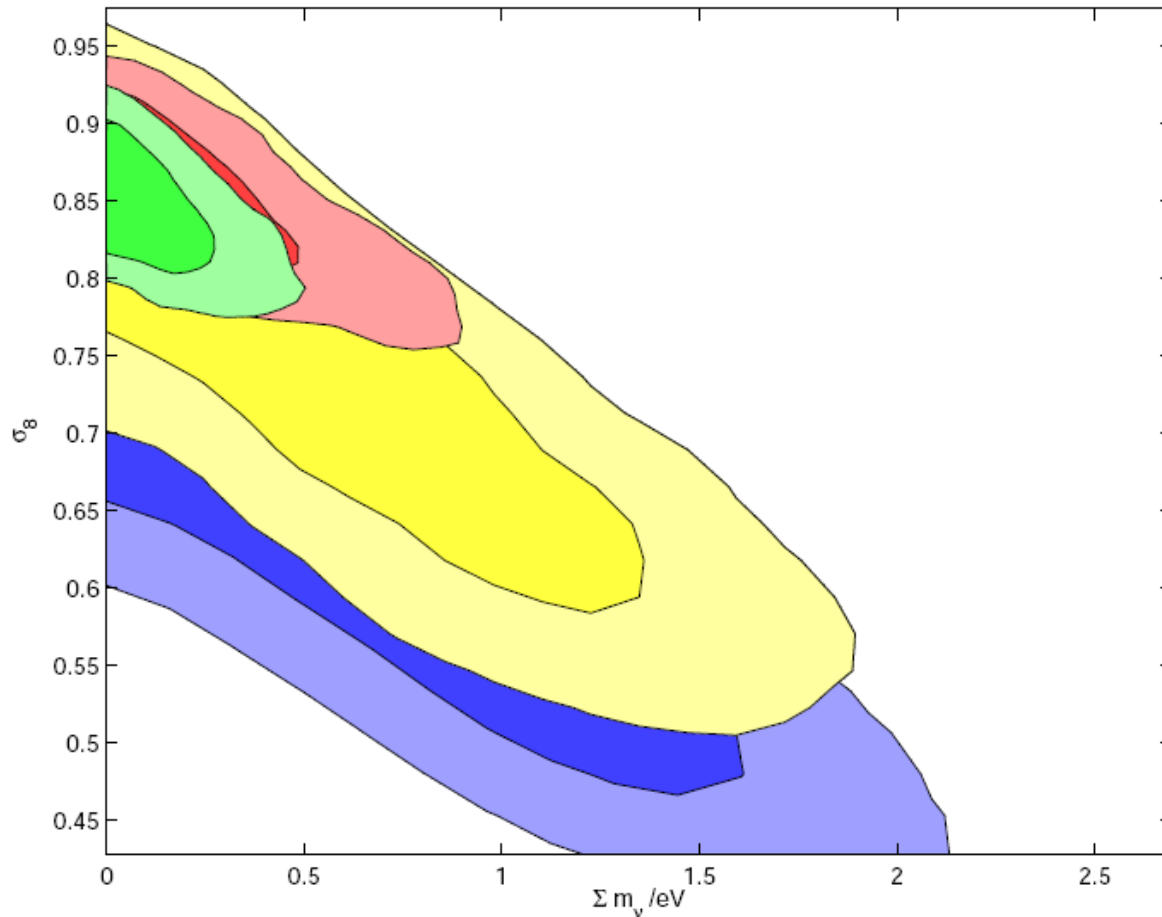
$$\frac{dV}{dz} = 4\pi d_A(z)^2 \frac{(1+z)^2}{H(z)}$$

*例えばダークエネルギーが $w > -1$ だったりすると
 $H(z)$ が宇宙項より大きくなるので単位赤方偏移
あたりの体積が減る

銀河団計数からの ニュートリノ質量への制限



教訓: 'Best' data set



Gratton, 0705.3100

8年前の当時のCMBはlower σ_8 を示唆
 $\text{Ly}\alpha$ (small scale data)はhigher σ_8



Neutrino massはない
ほうがよい

教訓: "Best" data set



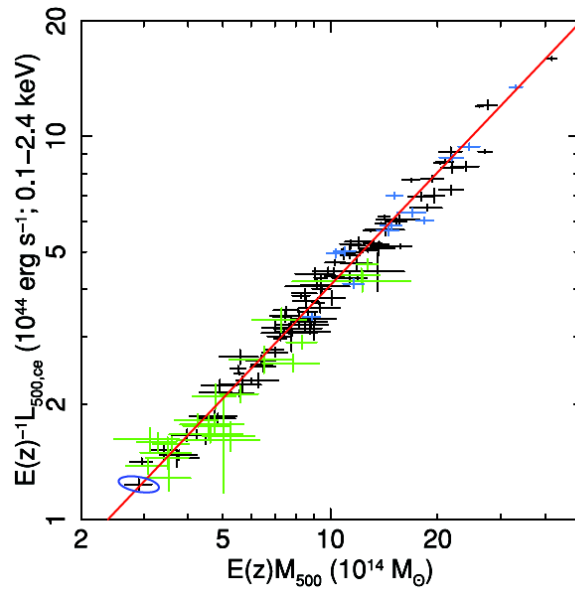
Gratton, 0705.3100

- データ解析は基本的にLCDMの枠組みでなされる。(prior依存)
- 異なる種類の(inconsistentな)データを組み合わせることで
(それぞれ単独には感度がないパラメタにも)
(予想以上に)強い制限を与えることがある
- Systematics or New physics
- redshiftが同じようなところなら要注意

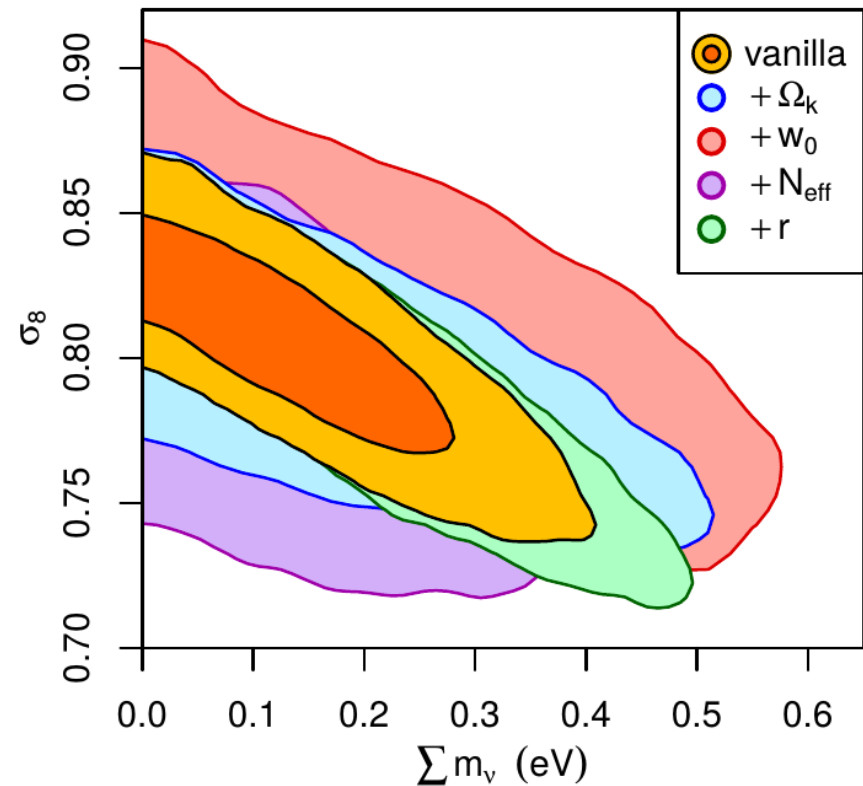
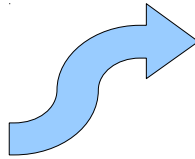
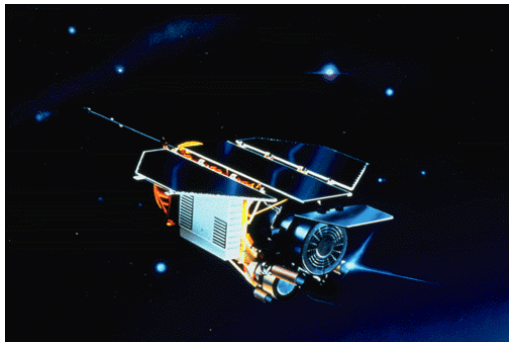
ない

銀河団計数からのニュートリノ質量 (X-ray luminosity function)

銀河団のサンプル



ROSAT all sky survey
(238 clusters)



$$\sum m_{\nu} < 0.22 \text{ eV}$$

(95% confidence)

Mantz+, MNRAS, 2015

Euclidによるサーベイで

$$\sum m_{\nu} < 0.08 \text{ eV}$$

Carbone+, arxiv:1112.4810

さらなるサーベイ体積を求めて、、、

10年後？

- 21cm tomography (中性水素からの微弱な電波)

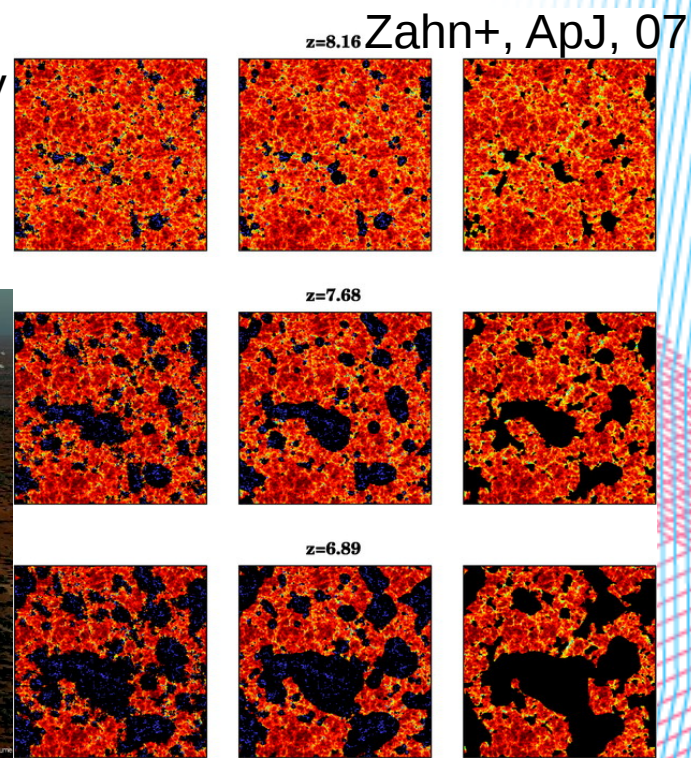
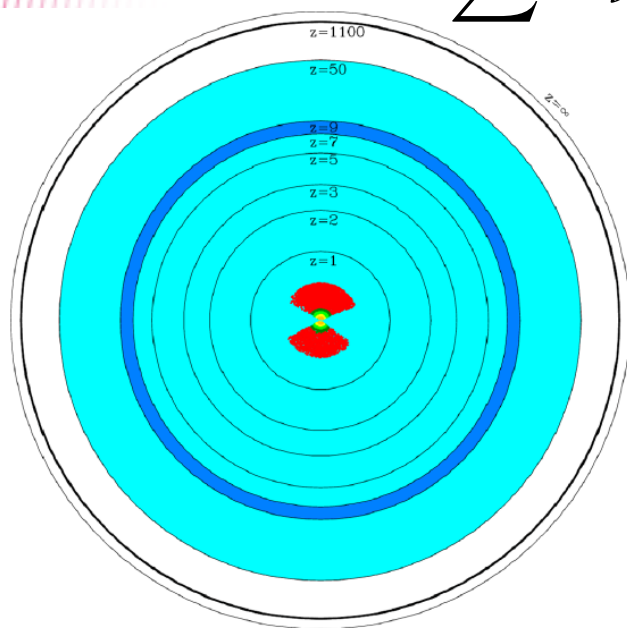
- 👍 – Small scaleが線形になる。DEが悪さをしない。
 - 再イオン化による不定性, 銀河前景放射除去

(Mao+, PRD, 08)

$$\sum m_\nu \lesssim 0.056 \text{ eV} \quad \text{PLANCK+SKA2}$$

$$\sum m_\nu \lesssim 0.02 \text{ eV} \quad \text{SKA2+Simons Array}$$

(Oyama, Kohri, Hazumi, JCAP, 16)



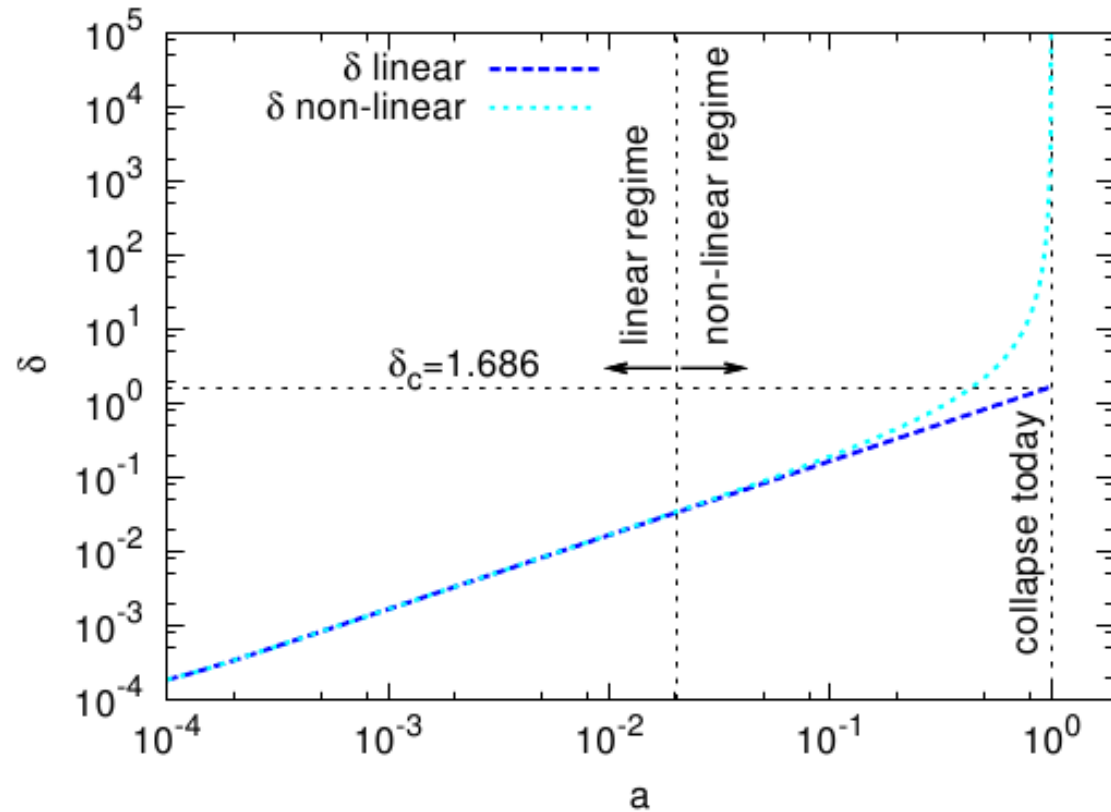
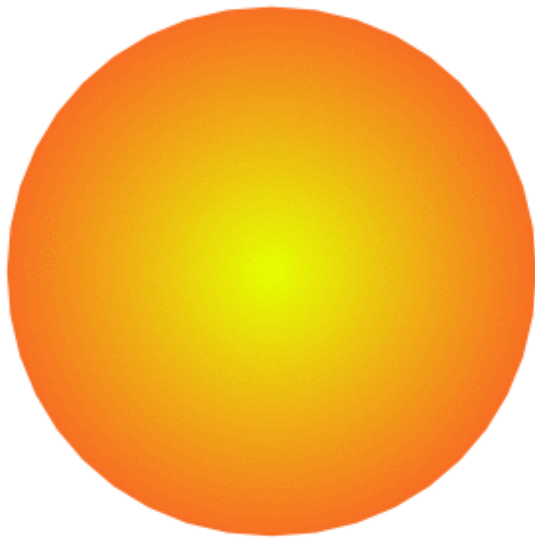
内容

- 導入
 - 宇宙論的背景ニュートリノ
- 有限質量ニュートリノの宇宙論での役割について
 - ニュートリノ質量と宇宙論的観測の関係
 - 現在の観測からの制限
 - 銀河分布
 - Cosmic Shear
 - CMB lensing
 - Cluster number counts
 - 理論の進展
- まとめ

理論面での問題点

- 線形理論はいつかは破綻
 - 処方箋は、CDMのみ宇宙での重力多体計算でチューンされたfitting公式 (eg. Peacock&Dodds '96, Smith+, '03 Takahashi+, '12)
$$^{NL}P(k, z) = f(^L P(k, z))$$
- m_ν を考慮した非線形重力計算に進展
 - 高次摂動論 (Saito+ '08, '09, '11)
 - 球対称崩壊モデル (Ichiki&Takada '12, Loverde '14)
 - ニュートリノN-body計算 (Brandbyge+ '08, Viel+ '10, ...)
 - Hybrid計算 (Brandbyge&Hannestad '09)
 - ニュートリノ流体近似 (Hannestad+ '11)

球対称崩壊モデル

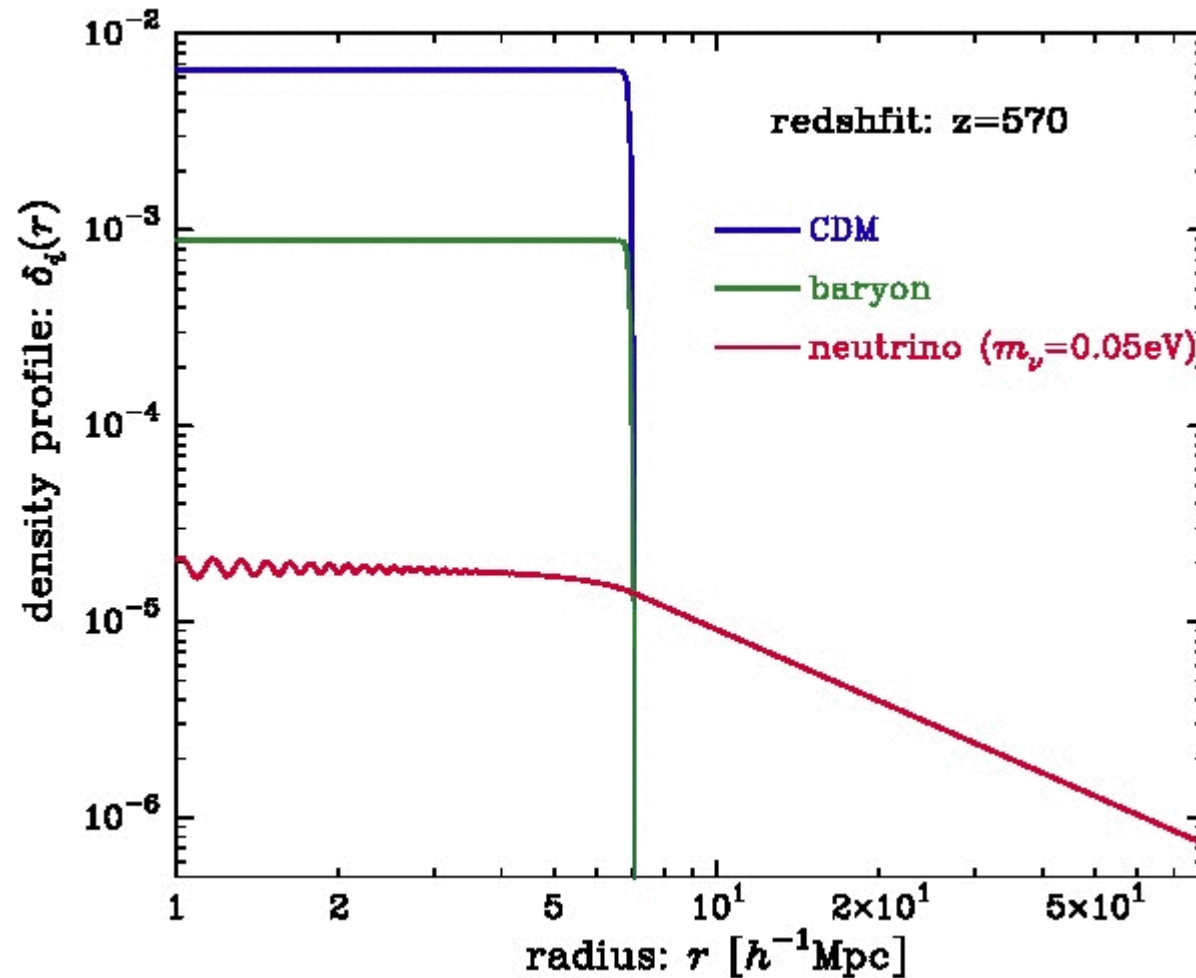


手法: 球対称性を仮定することで非線形段階までを追う。
密度が無限大になる時刻における線形理論での値を調べ
対応づけを行う。

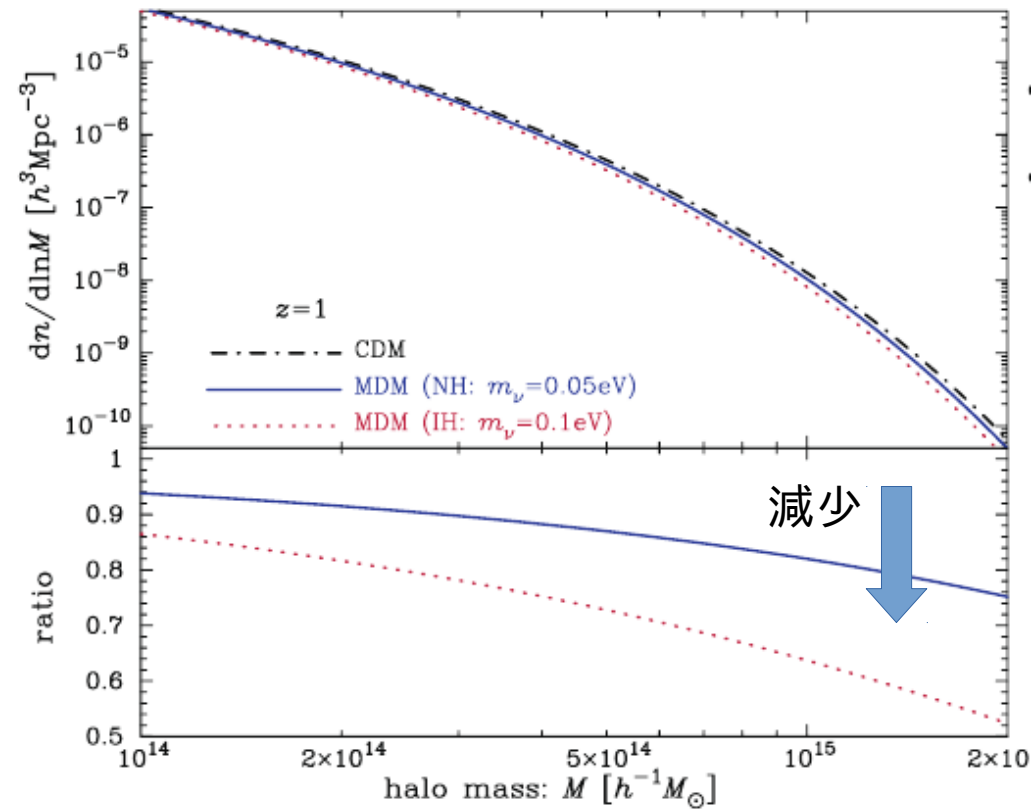
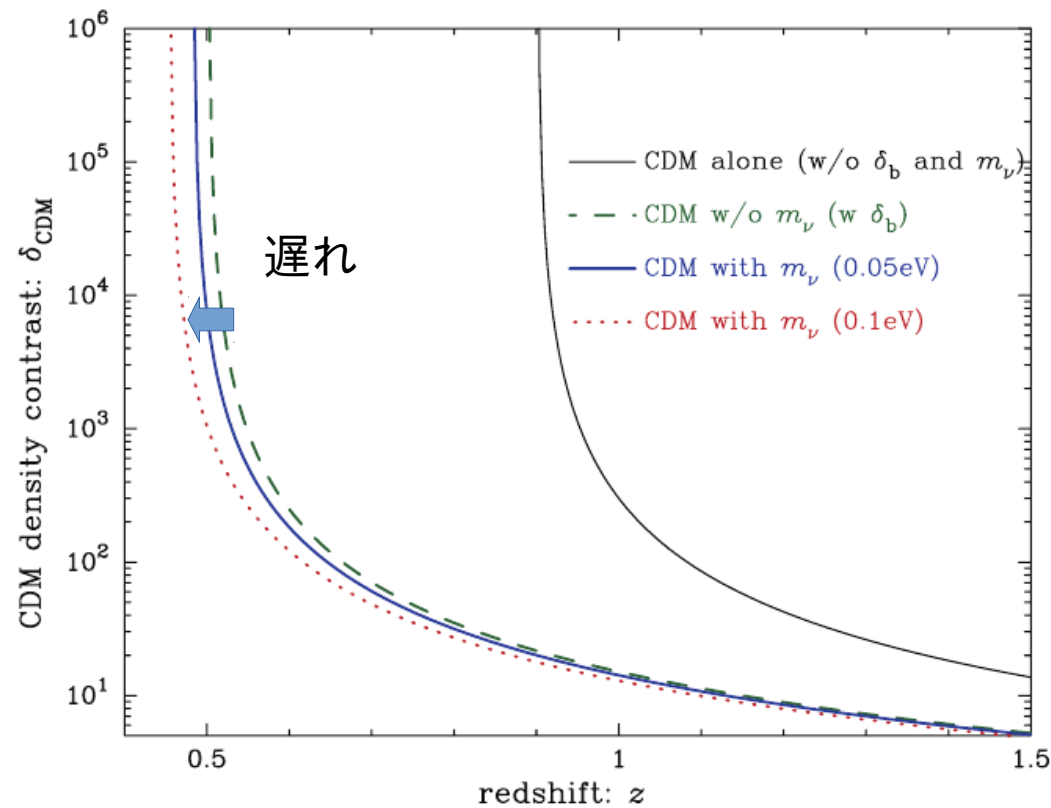
球対称崩壊モデル

- History of the Spherical Collapse model
 - CDM only (e.g., Tomita, PTP, '69, Gunn&Gott, ApJ, '72)
 - CDM + Λ (e.g., Lahav et al., MNRAS, '91)
 - CDM + Quintessence (e.g., Wang&Steinhardt, ApJ, '98)
 - CDM + Λ + Baryon (Naoz & Barkana, MNRAS, '06)
 - CDM + coupled quintessence (e.g., Nunes & Mota, MNRAS, '06)
 - Decaying DM+ Λ (Oguri, Takahashi, Kotake, '03)
 - CDM + early dark energy (e.g., Bartelmann et al., A&A, '06, Francis et al., MNRASL, '08)
 - CDM + clustering dark energy (Bjaelde&Wong, '11)
 - CDM + Λ + baryon + massive ν (Ichiki&Takada, '12, LoVerde, '14)

ニュートリノ入り球対称崩壊モデル



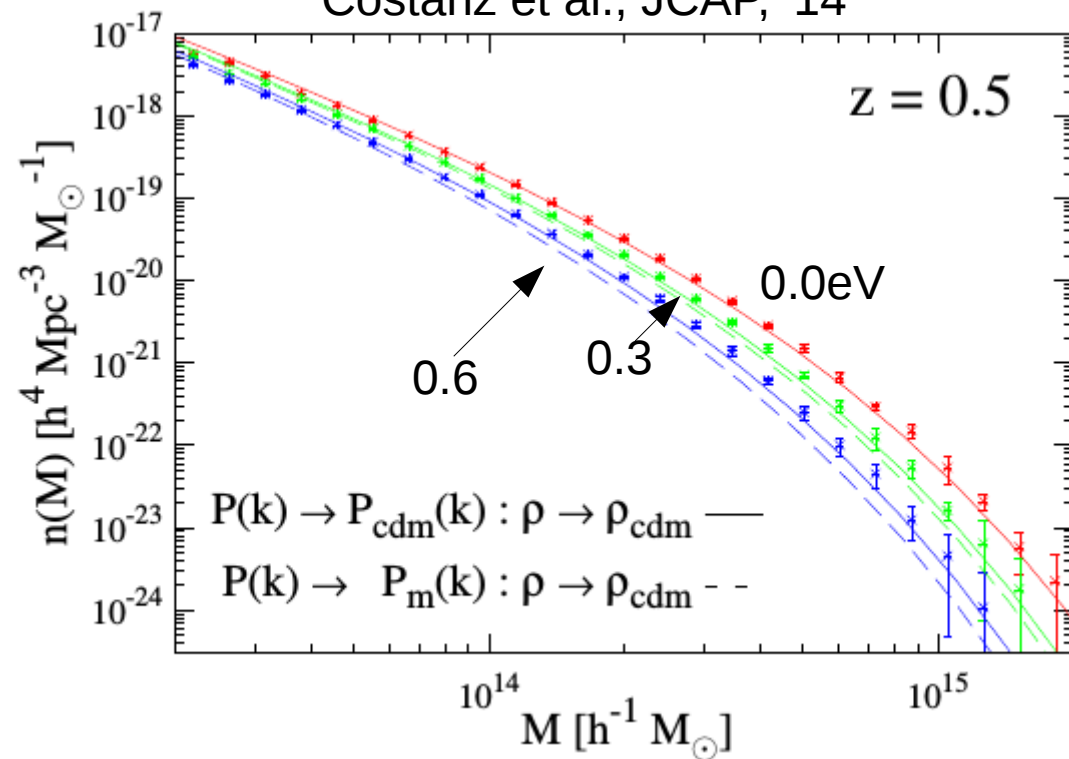
崩壊時刻の遅れと質量関数の減少 をニュートリノ質量の関数として定量化



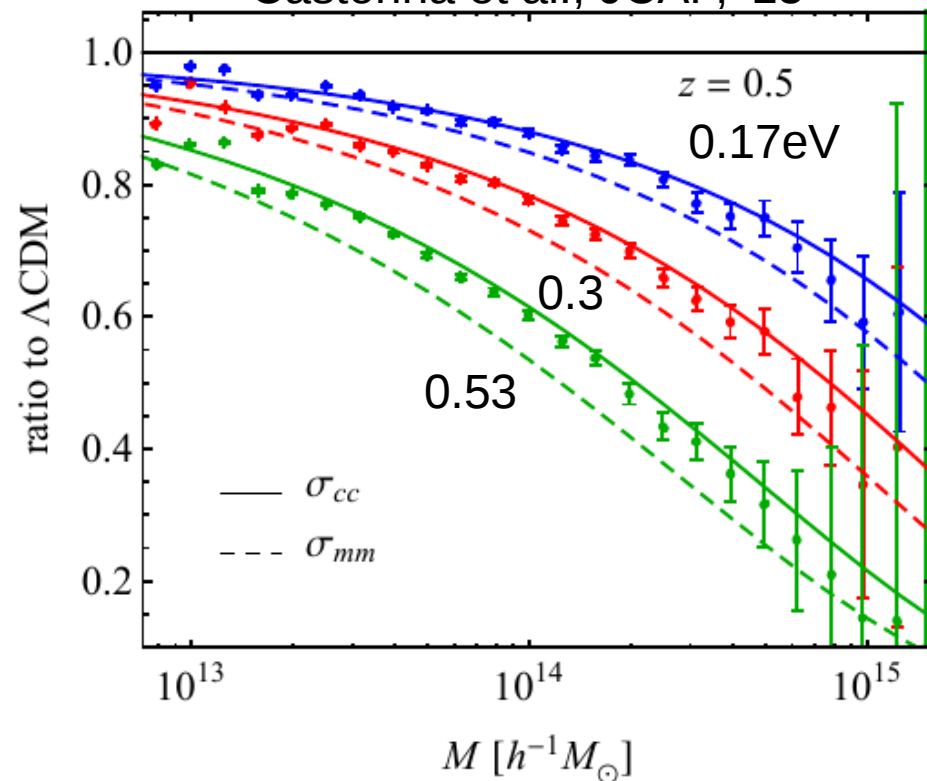
結論....ほとんど影響なし!

最近のN-bodyでも同じ結論が

Costanz et al., JCAP, '14

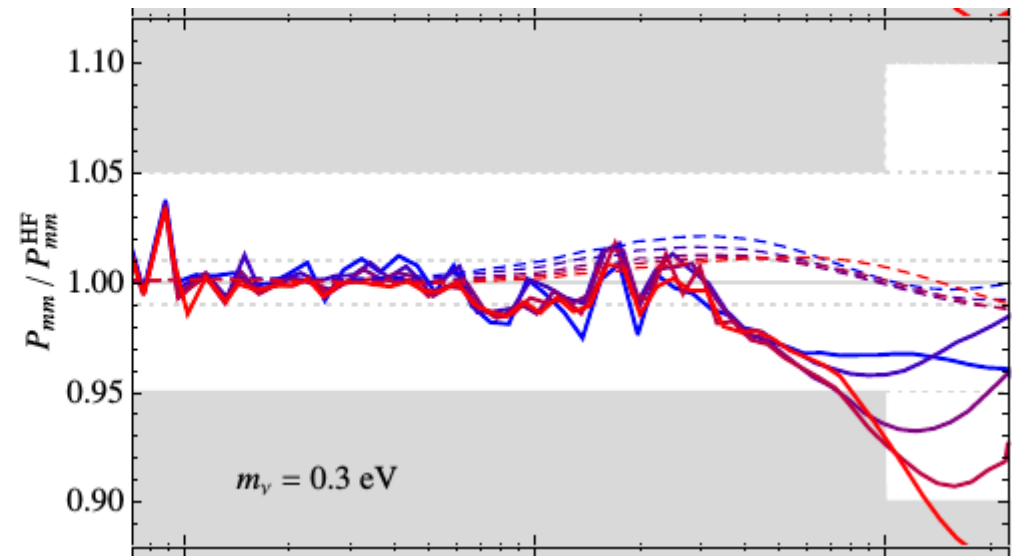
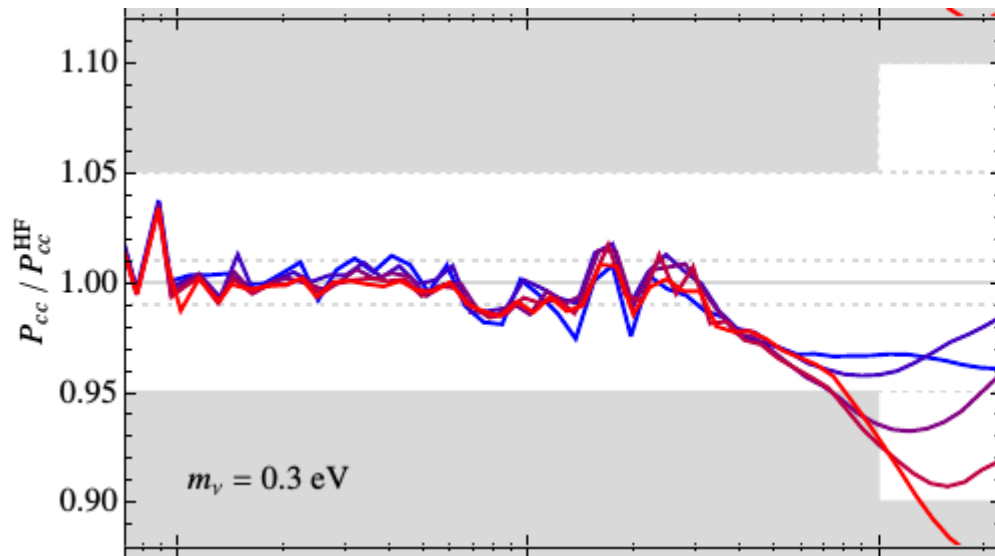


Castorina et al., JCAP, '15



- Tinkerの質量関数の公式に当てはめる揺らぎの振幅について
全体のものを用いたもの（点線）と
CDMの揺らぎのみを用いたもの（実線）

最近のN-bodyでも同じ結論が



- 高橋さんのHalofitモデル (*) とニュートリノ入りN-bodyとの比較

$$(*) \quad P_{\text{mm}}^{\text{HF}}(k) \equiv (1 - f_\nu)^2 P_{\text{cc}}^{\text{HF}}(k) + 2f_\nu(1 - f_\nu)P_{c\nu}^{\text{L}} + f_\nu^2 P_{\nu\nu}^{\text{L}}(k)$$

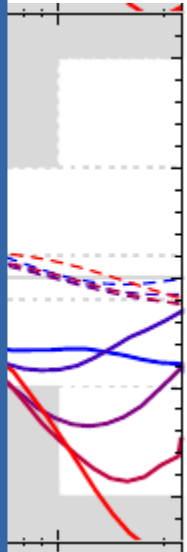
色:redshift=0 (blue), 0.5, 1, 1.5, 2 (red)

最近のN bodyでも同じ結論が

Tips!

LCDM (massless ν) modelでチューンされたこれまでの遺産はニュートリノをのぞいたCDMの成分に対して用いればよい

$$\cancel{P_{\text{mm}}(k)} \text{ (total matter)} \longrightarrow P_{\text{cc}}(k) \text{ (CDM component)}$$

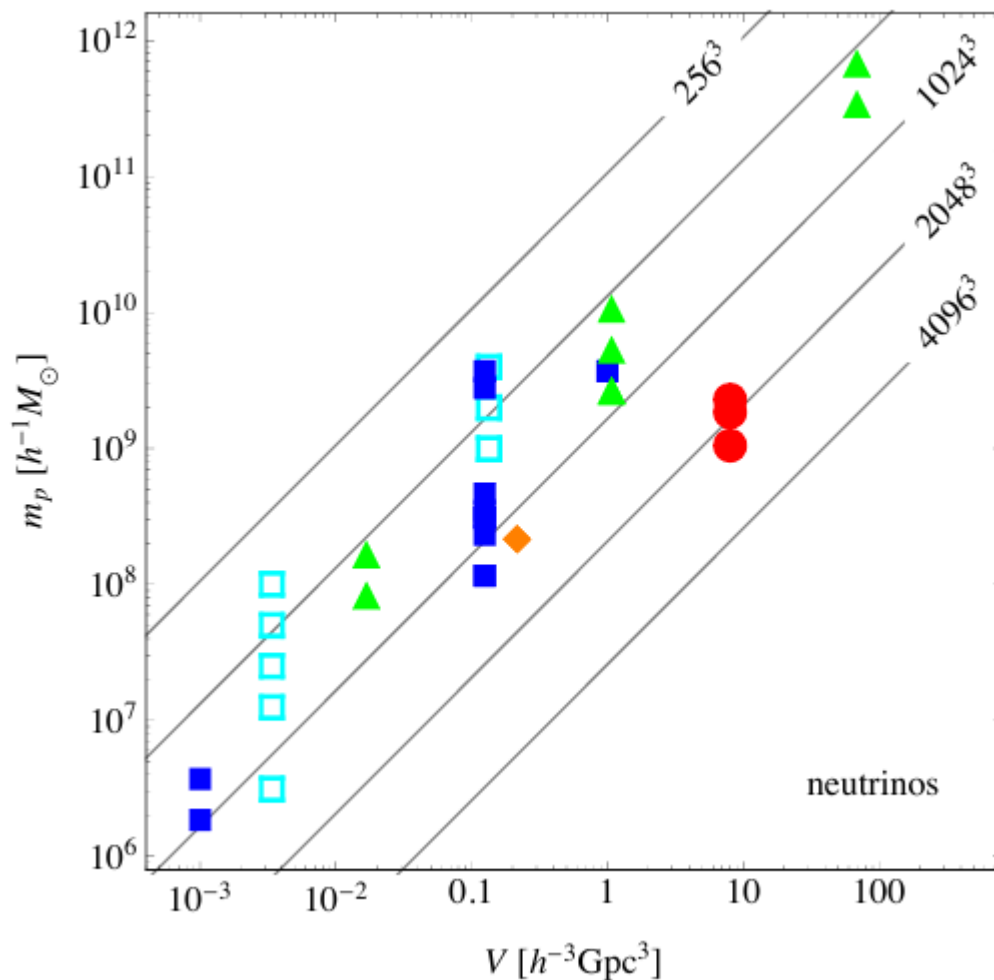
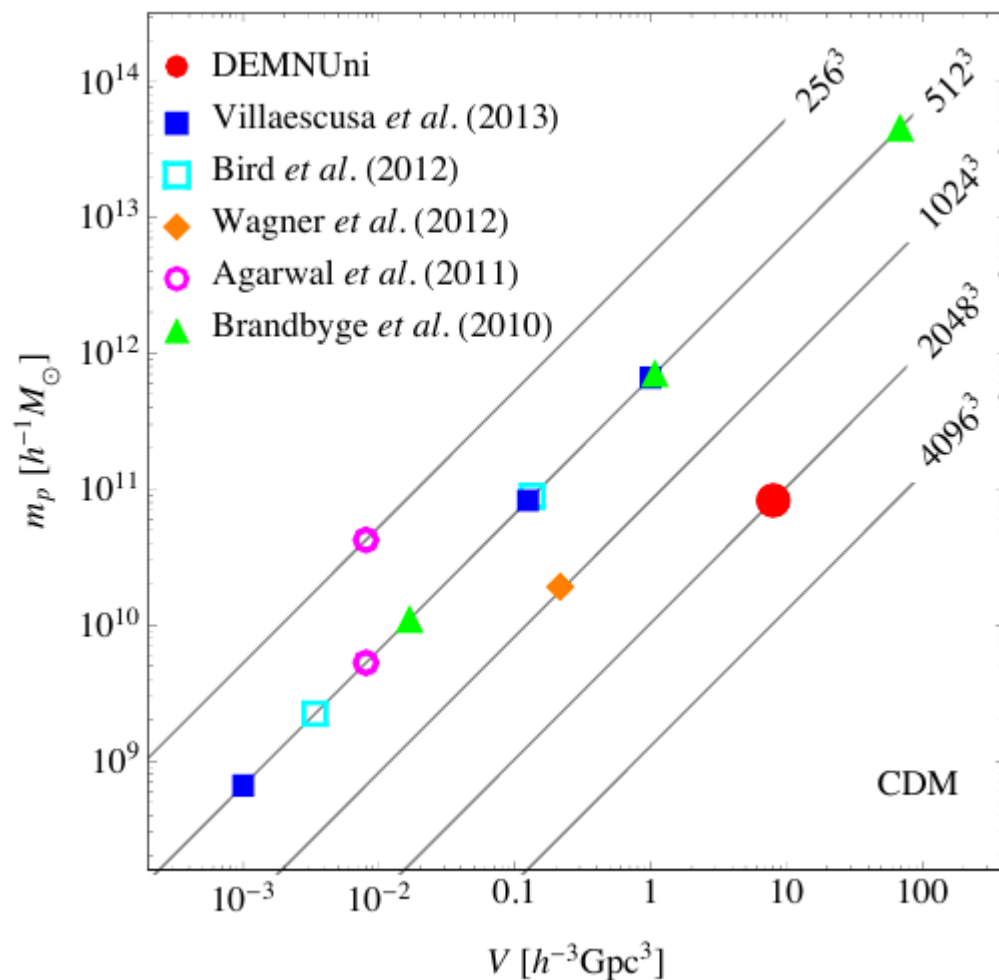


の比較

$L_{\nu}(k)$

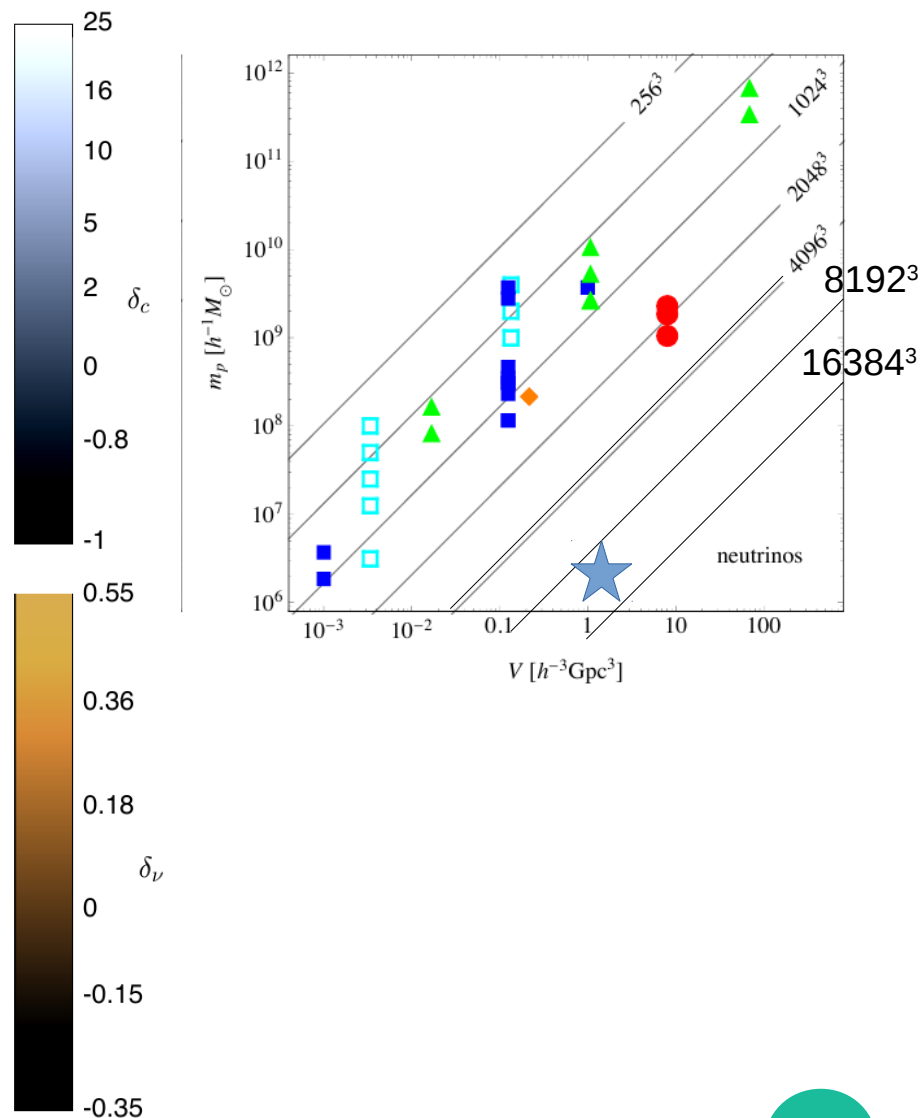
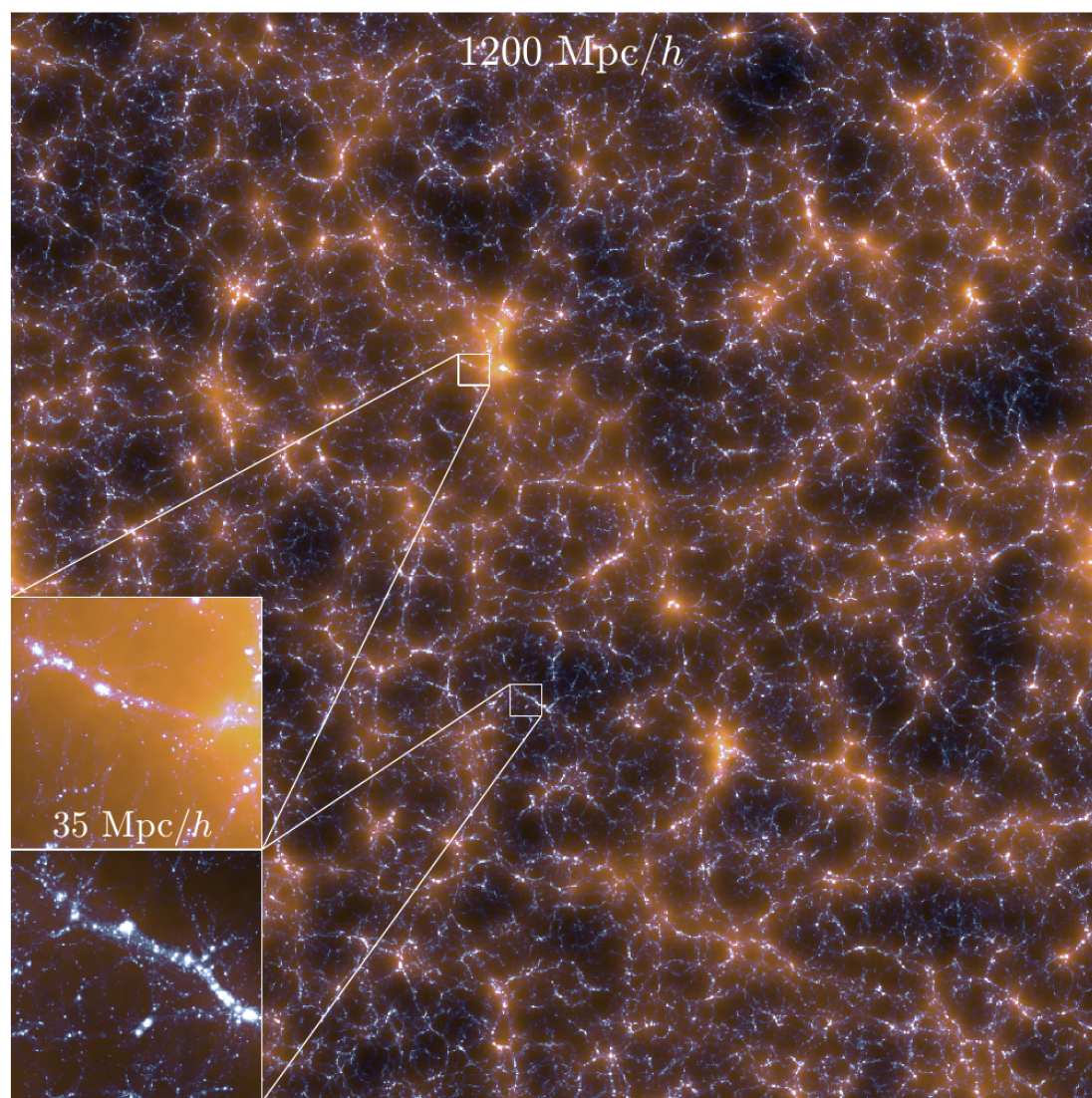
色:redshift=0 (blue), 0.5, 1, 1.5, 2 (red)

Neutrino simulationの状況



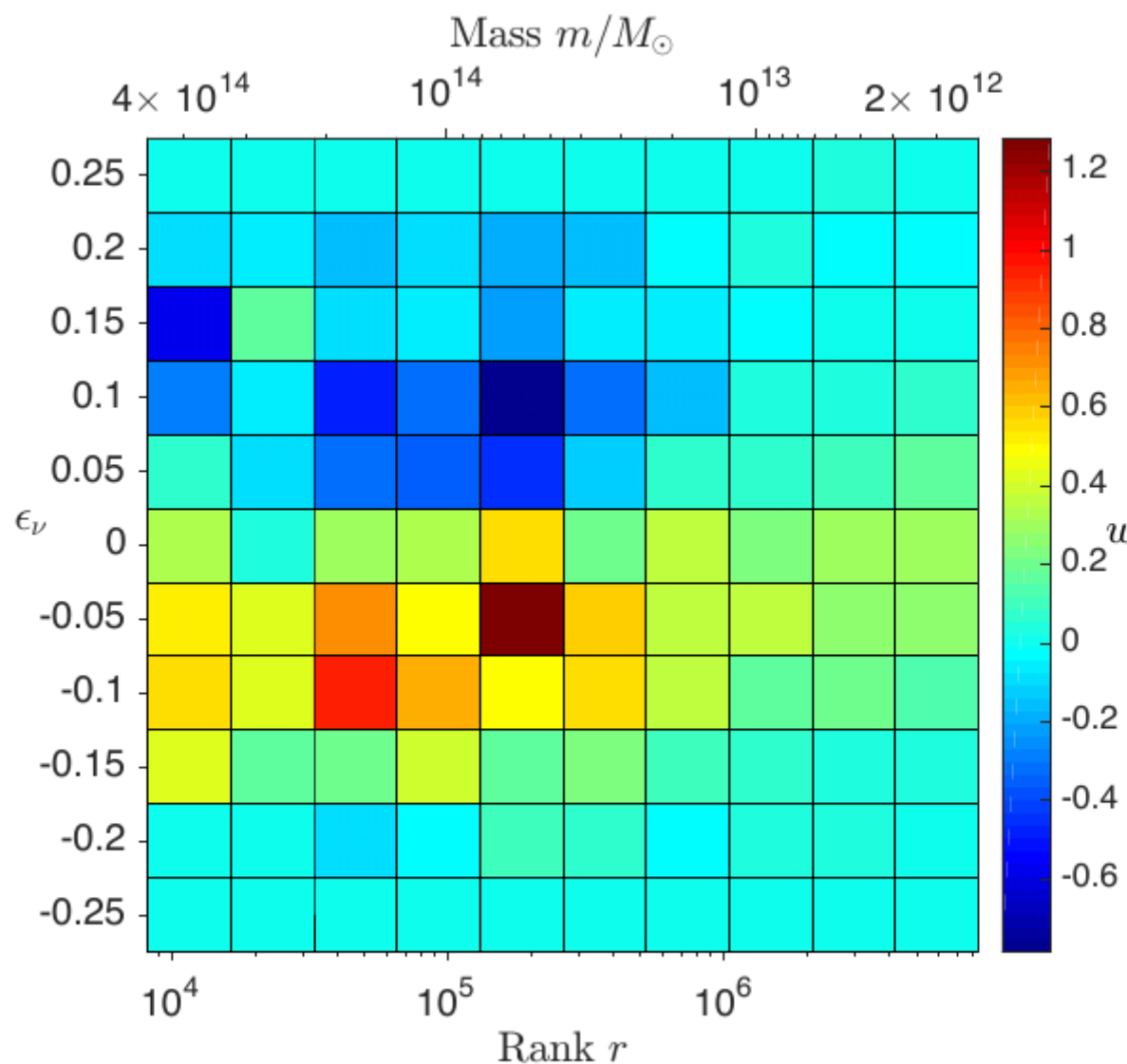
現在のニュートリノの様子

Yu et al., arxiv:1609.08968



現在のニュートリノの様子

Yu et al., arxiv:1609.08968



**(NEW!) Neutrino
Condensation effect**

neutrinoが集まっている所
には大きなハローが形成

まとめ

- neutrino は宇宙に最も多く存在する粒子のひとつで、宇宙の構造形成に様々な影響をもつ
- neutrino は小さなスケールの揺らぎの成長を抑える。膨張には物質として寄与するがクラスタリングはしないため
- neutrino 質量を制限する手法として様々な天文観測的な手段がある。気をつけて組み合わせる。
- 近年の大規模シミュレーションの結果によると、これまでの非線形に関する公式は neutrino 成分を抜いた部分に適用すればよいことを示唆
- neutrino condensation effect の登場



