

CMB lensing を用いた ニュートリノ質量の制限

宇宙物理学研究室

B4 斎藤 光

1.背景

- ・ ニュートリノ
- ・ 重力レンズ
- ・ CMB lensingとパワースペクトル

2.研究目的

3.結果

- ・ ニュートリノ質量とパワースペクトル
- ・ パワースペクトルの計算
- ・ Markov Chain Monte-Carlo 法 (MCMC) による制限

4.まとめと今後の展望

ニュートリノ：

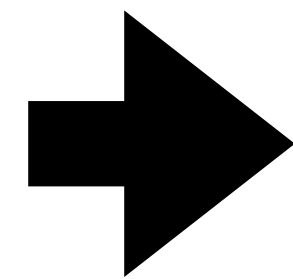
物質とはほとんど相互作用しない、素粒子の1種

ニュートリノ振動：

ニュートリノが移動する間に、別世代のニュートリノへ変化する

$m_\nu \neq 0$ の決定的な証拠

温度 T_ν
質量 m_ν



数密度 n
エネルギー密度 ρ
圧力 p

m_ν の値を制限したい

重力レンズ効果：

天体などの重力で光の進路が曲がり、像が歪んだり、複数に分かれたりする現象

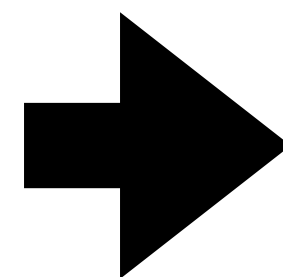
$$\vec{\beta} = \vec{\theta} - \nabla \phi$$

重力ポテンシャル $\phi = -2 \int_0^{\chi_s} d\chi \frac{\chi_s - \chi}{\chi_s \chi} \psi(\chi \hat{n}, \eta(\chi))$

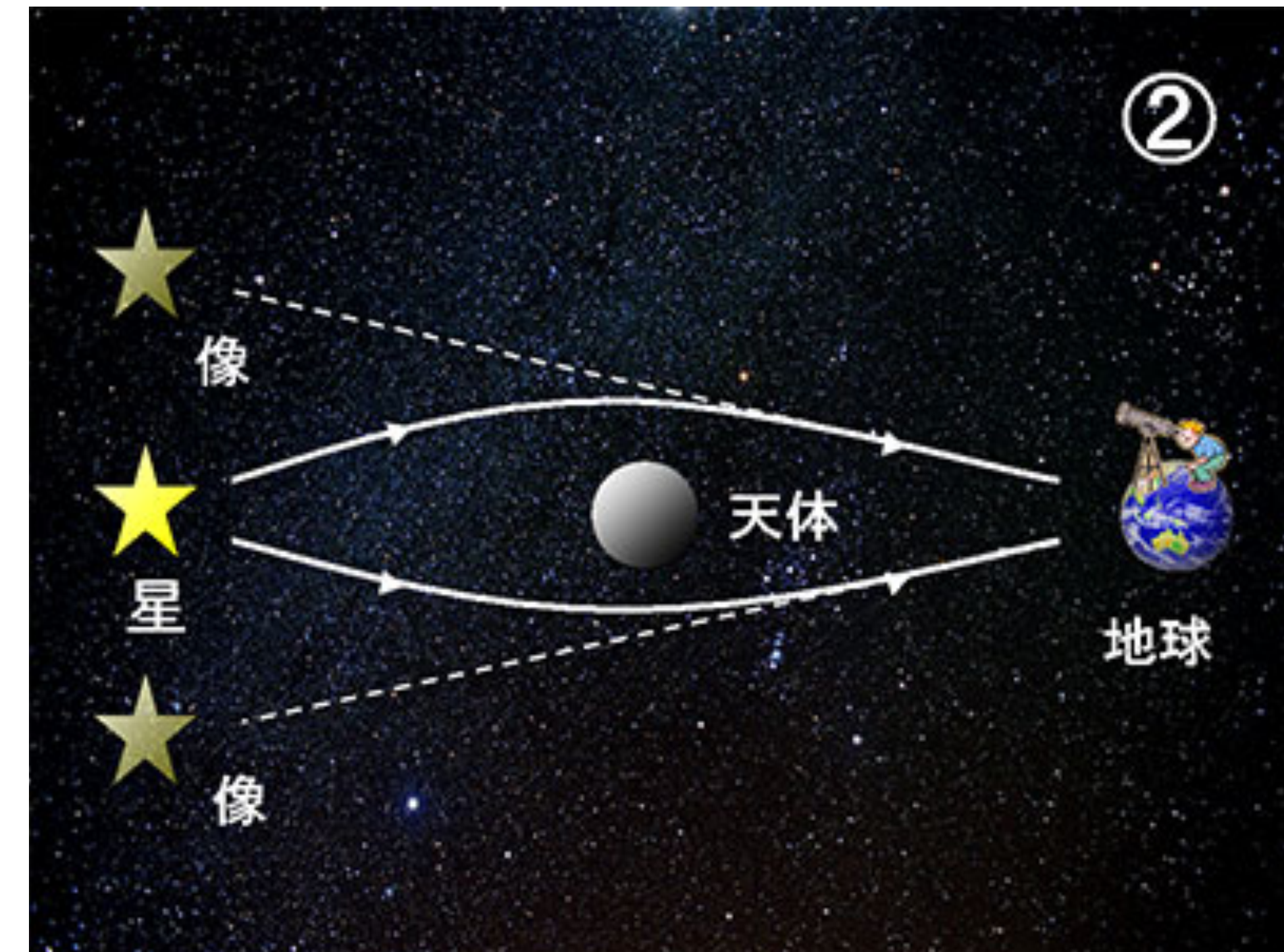
$$\Delta \psi = 4\pi G a^2 \delta \rho \quad (\delta \rho = \rho - \bar{\rho} : \text{密度揺らぎ})$$

重力ポテンシャル ψ の源は物質分布

ϕ の測定



物質分布
→ m_ν の制限



<https://student.tsutawarudesign.com/story/>

CMB lensing とパワースペクトル

5

宇宙マイクロ波背景放射 : Cosmic Microwave Background radiation ; **CMB**

宇宙全体にほぼ均一に広がる、微弱なマイクロ波放射

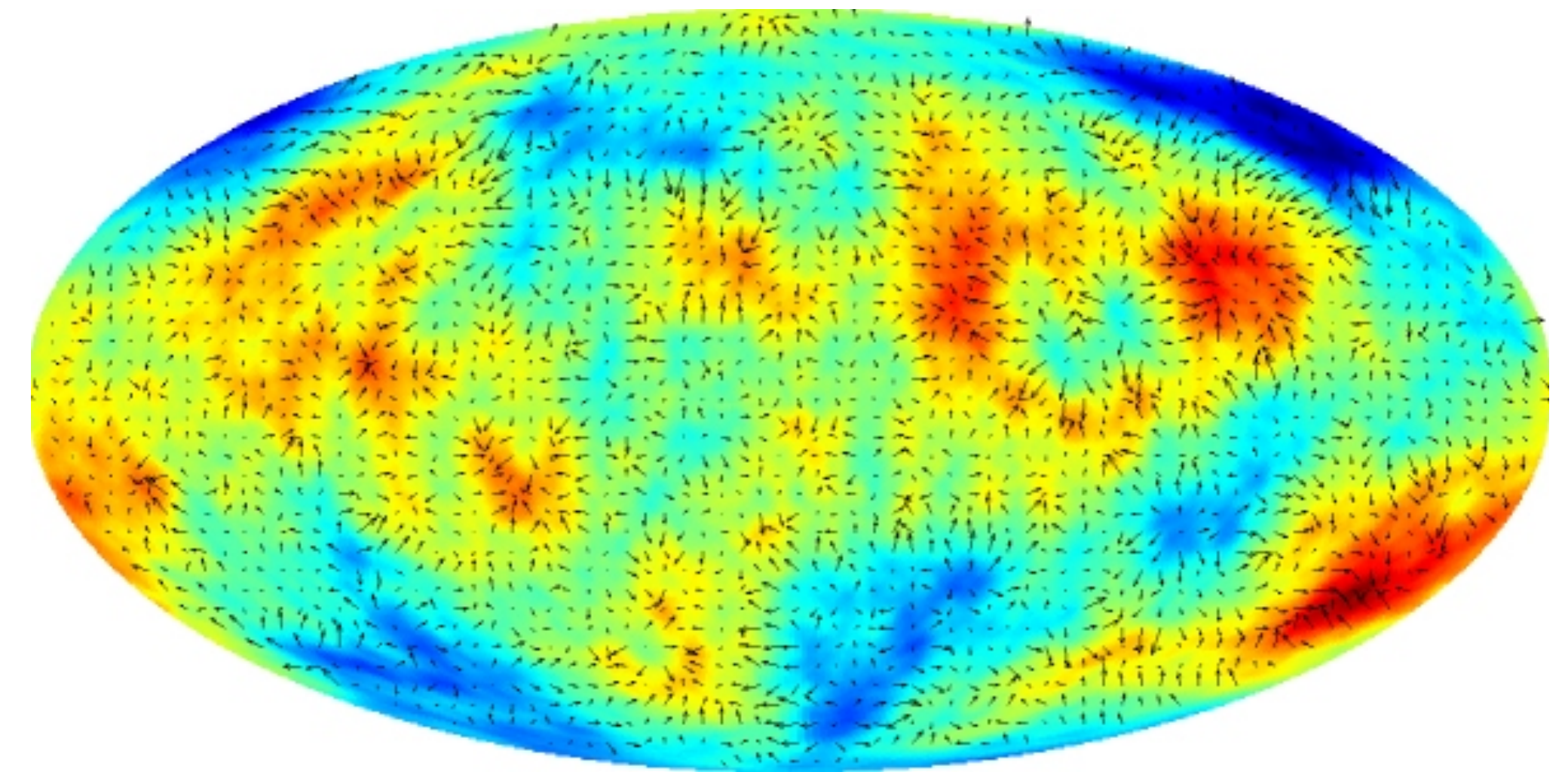
CMB 温度・偏光マップ

<https://cosmologist.info/lenspix/>

CMB lensing:

CMBの光が弱重力レンズ効果で進路を曲げる現象

温度や偏光の揺らぎに影響を及ぼす



パワースペクトル :

揺らぎから計算される、観測と理論をつなげる統計量

レンズポテンシャル ϕ の角度パワースペクトル

$$C_l^{\phi\phi} \approx \frac{4}{(l(l+1))^2} \frac{9H_0^4 \Omega_m^2}{4c^4} \int_0^{\chi_s} d\chi \frac{1}{a^2(\chi)} \left(\frac{\chi_s - \chi}{\chi_s} \right)^2 P_m(k = l/\chi, z)$$

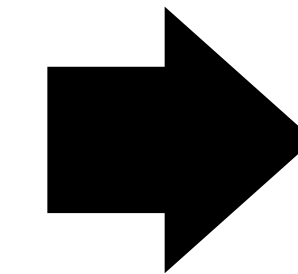
$P_m(k = l/\chi, z)$:物質パワースペクトル, H_0 :ハッブルパラメータ, Ω_m :物質エネルギー密度, χ :共動距離

ダークマターモデル：冷たいダークマター＋質量ありニュートリノ

Planck衛星
CMB温度・偏光異方性

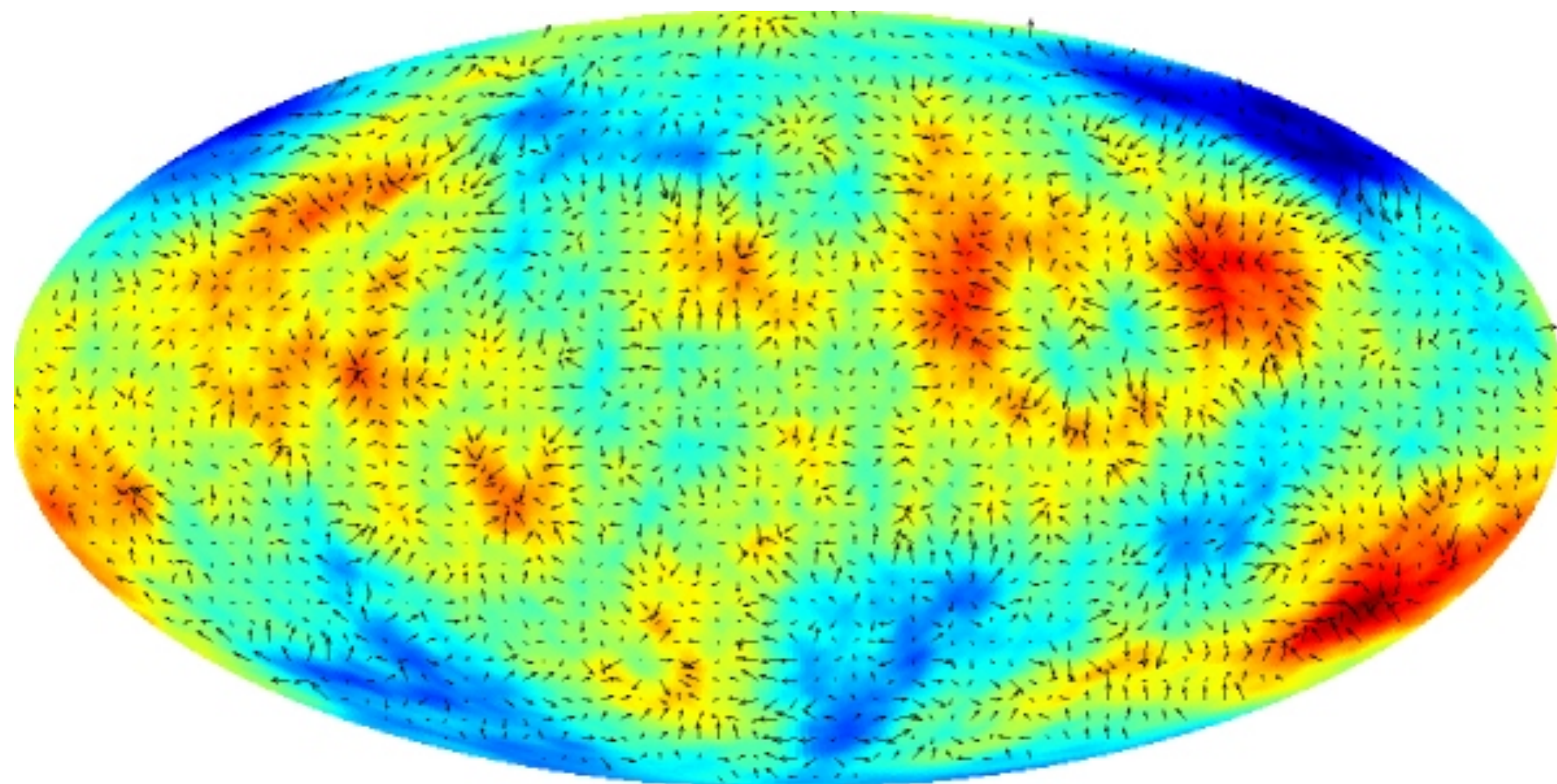
+

Atacama Cosmology Telescope(ACT)
CMB lensing

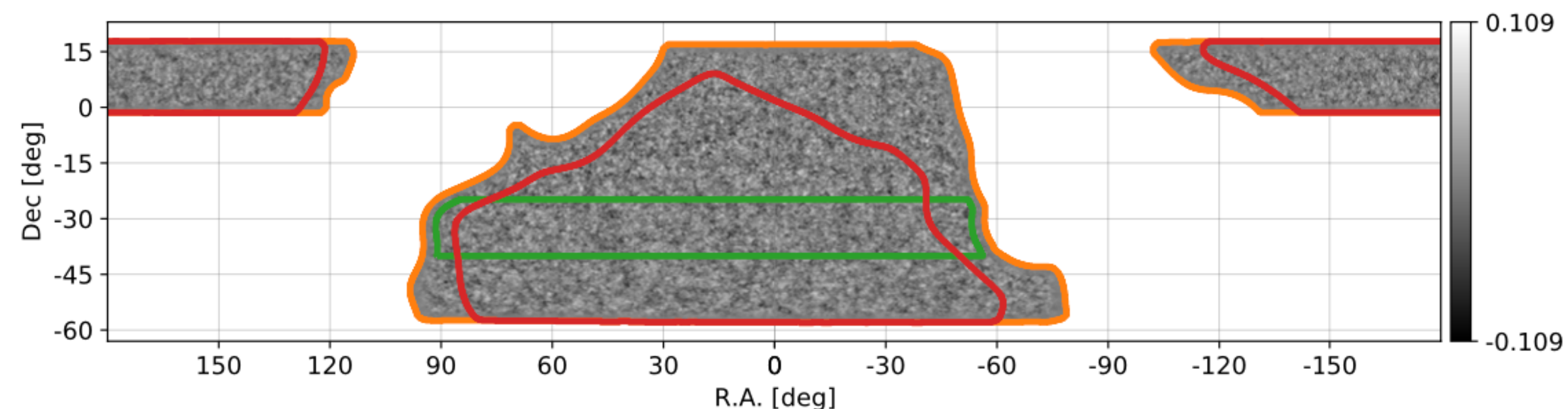


m_ν の制限

CMB 温度・偏光マップ
<https://cosmologist.info/lenspix/>



ACT レンズ収束場マップ
Frank J. Qu, 2024



ニュートリノ質量と物質パワースペクトル

7

横軸：波数 k h/Mpc

縦軸： $P_m(k, m_\nu)/P_m(k, m_\nu = 0\text{eV})$

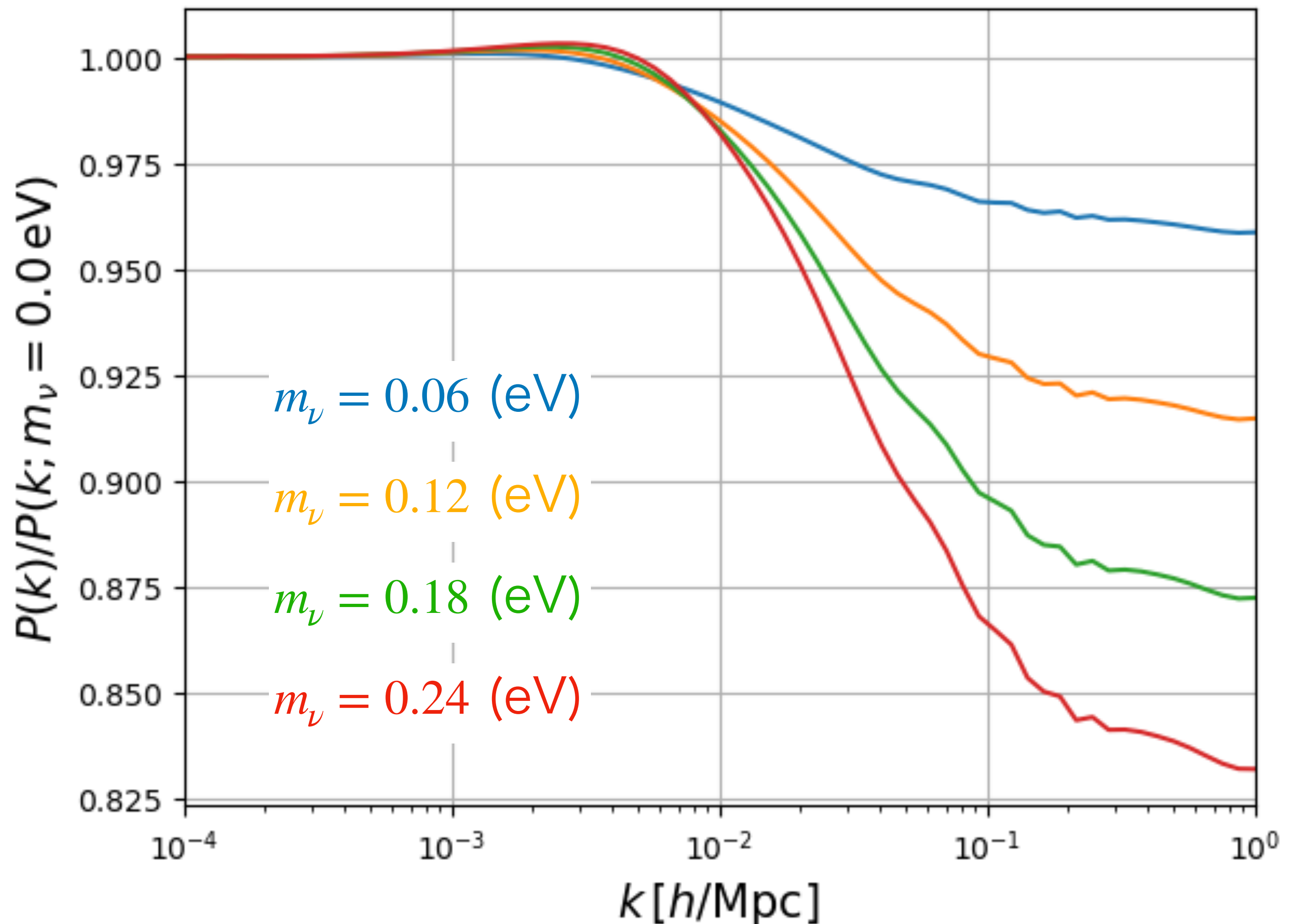
宇宙論計算ツール：CLASS

(Cosmic Linear Anisotropy Solving System, Julien Lesgourgues, 2011)

自由流減衰：

粒子の速度分散が大きいと、その自由運動によって揺らぎが減衰する

小スケールの P_m が抑えられる



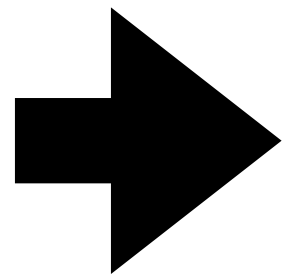
ニュートリノ質量と角度パワースペクトル

8

横軸：角波数 l

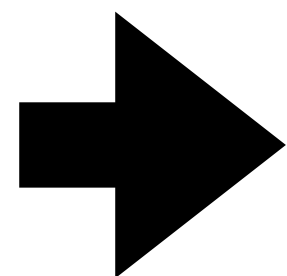
縦軸： $C_l^{\phi\phi}(m_\nu)/C_l^{\phi\phi}(m_\nu = 0\text{eV})$

m_ν の変化

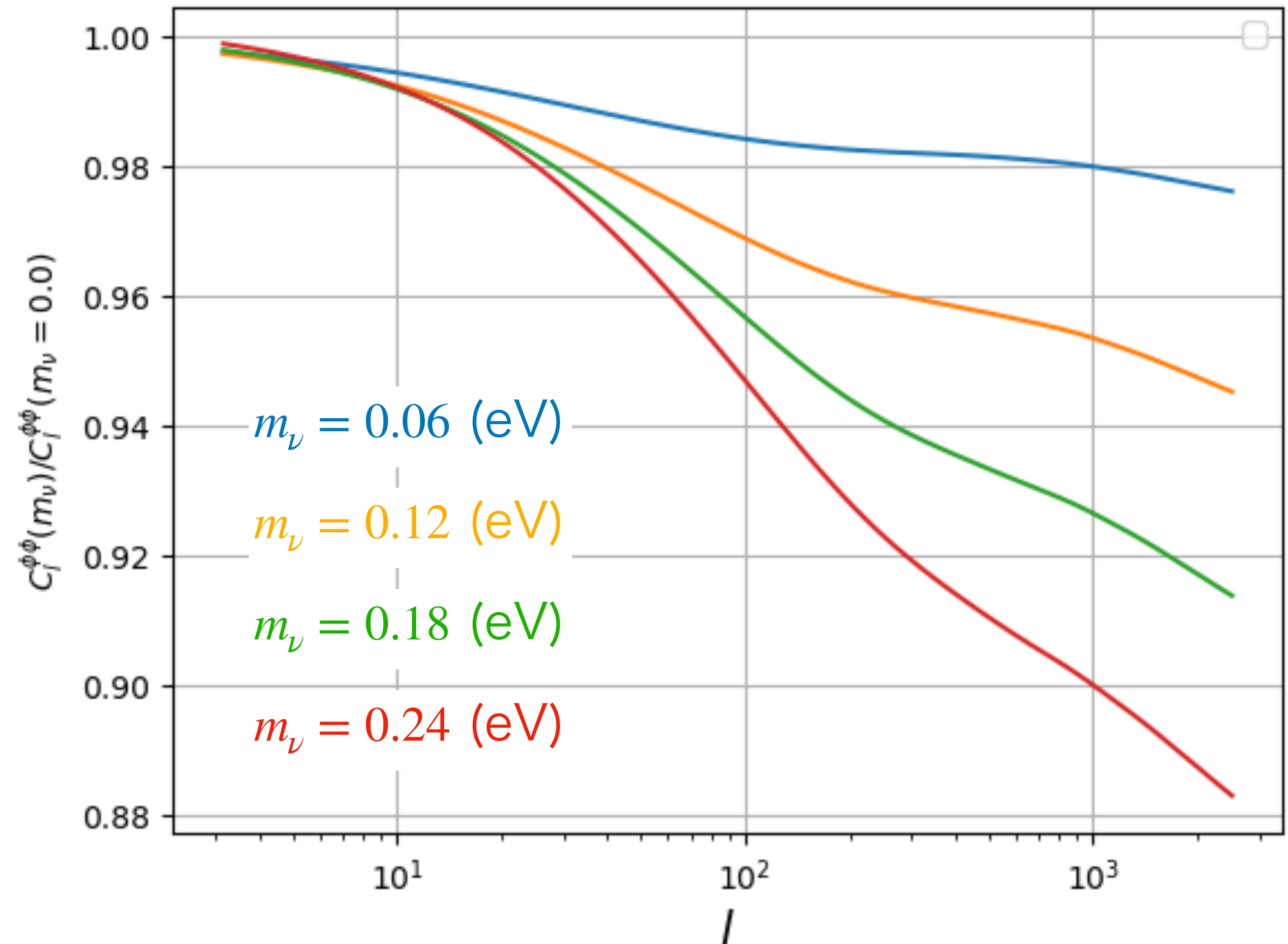


$C_l^{\phi\phi}$ の変化

$\therefore C_l^{\phi\phi}$ の観測値



m_ν の制限



角度パワースペクトルの計算

9

Planck 2018 温度・偏光揺らぎ測定
最良推定値

ハッブルパラメータ: $H_0 = 67.27 \text{ km/s/Mpc}$

バリオン密度パラメータ: $\Omega_b = 0.02225$

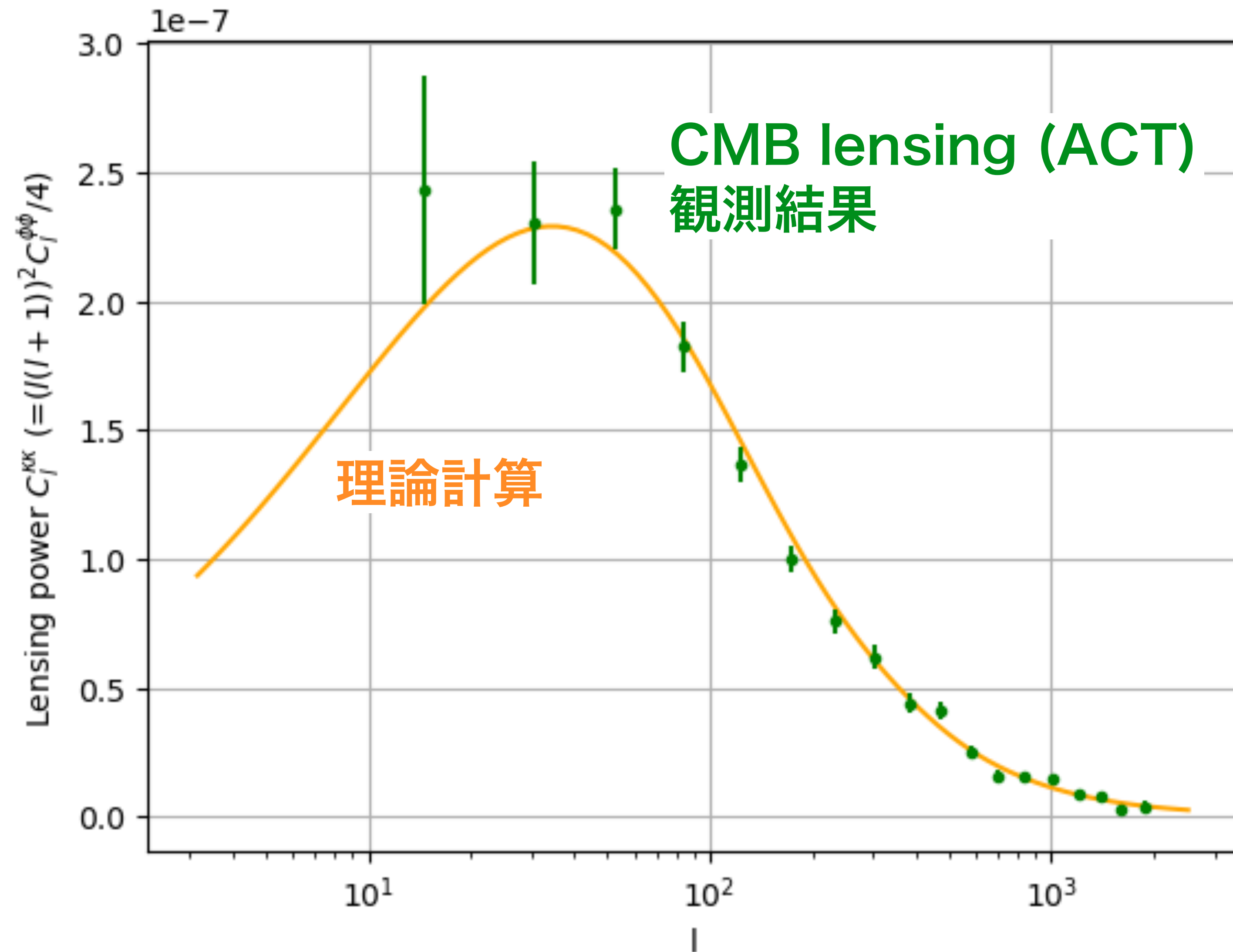
CDM密度パラメータ: $\Omega_{\text{cdm}} = 0.1198$

スペクトル指数: $n_s = 0.9645$

スカラー揺らぎの振幅: $A_s = 3.094 \times 10^{-9}$

ニュートリノ質量: $m_\nu = 0.06 \text{ eV}$

ACTの観測結果が
大まかに再現されている



ベイズの定理 : $P(\theta|d) = \frac{P(d|\theta)P(\theta)}{P(d)}$

d : 観測データ

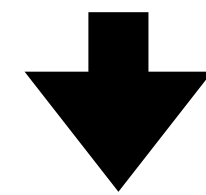
θ : 宇宙論パラメータ + ニュートリノ質量 m_ν

$P(\theta)$ を一様分布として、尤度 $P(d|\theta)$ がガウス分布に従うと仮定すると、

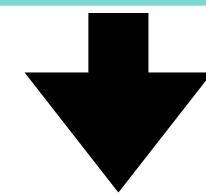
$$\log P(d|\theta) = -\frac{1}{2}\Delta d_i \text{Cov}_{ij}^{-1} \Delta d_j + \text{const}$$

$$\Delta d_i = d_i(\text{観測値}) - d_i(\text{理論値})$$

Cov : 共分散行列

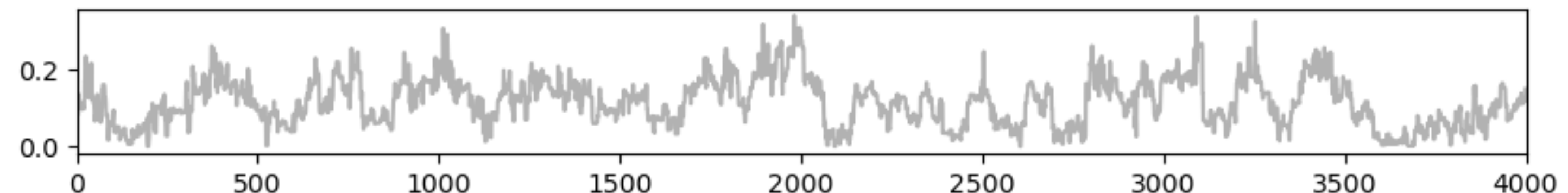


emcee (Daniel Foreman-Mackey, 2013) : Markov Chain Monte-Carlo (MCMC) コード



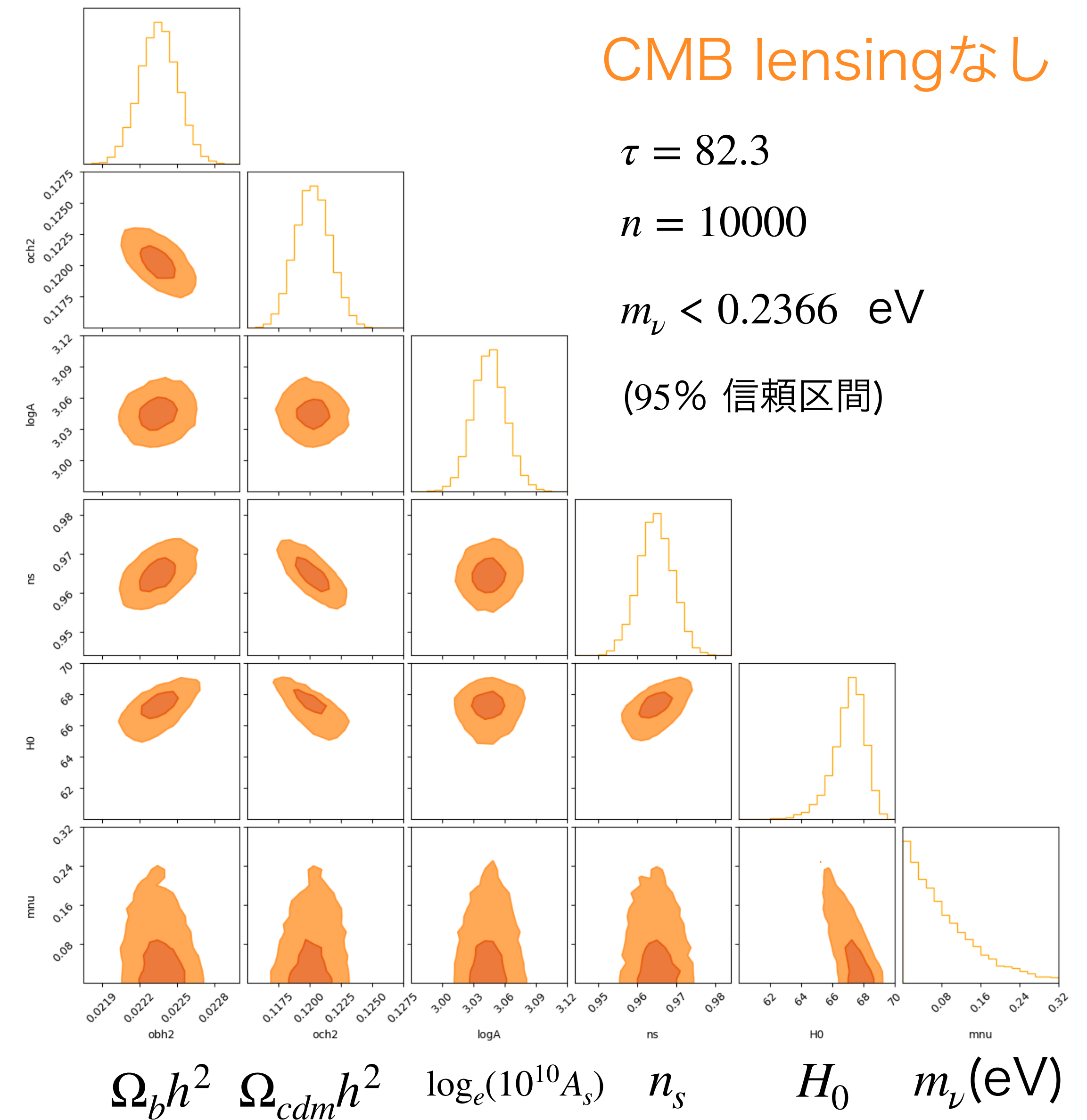
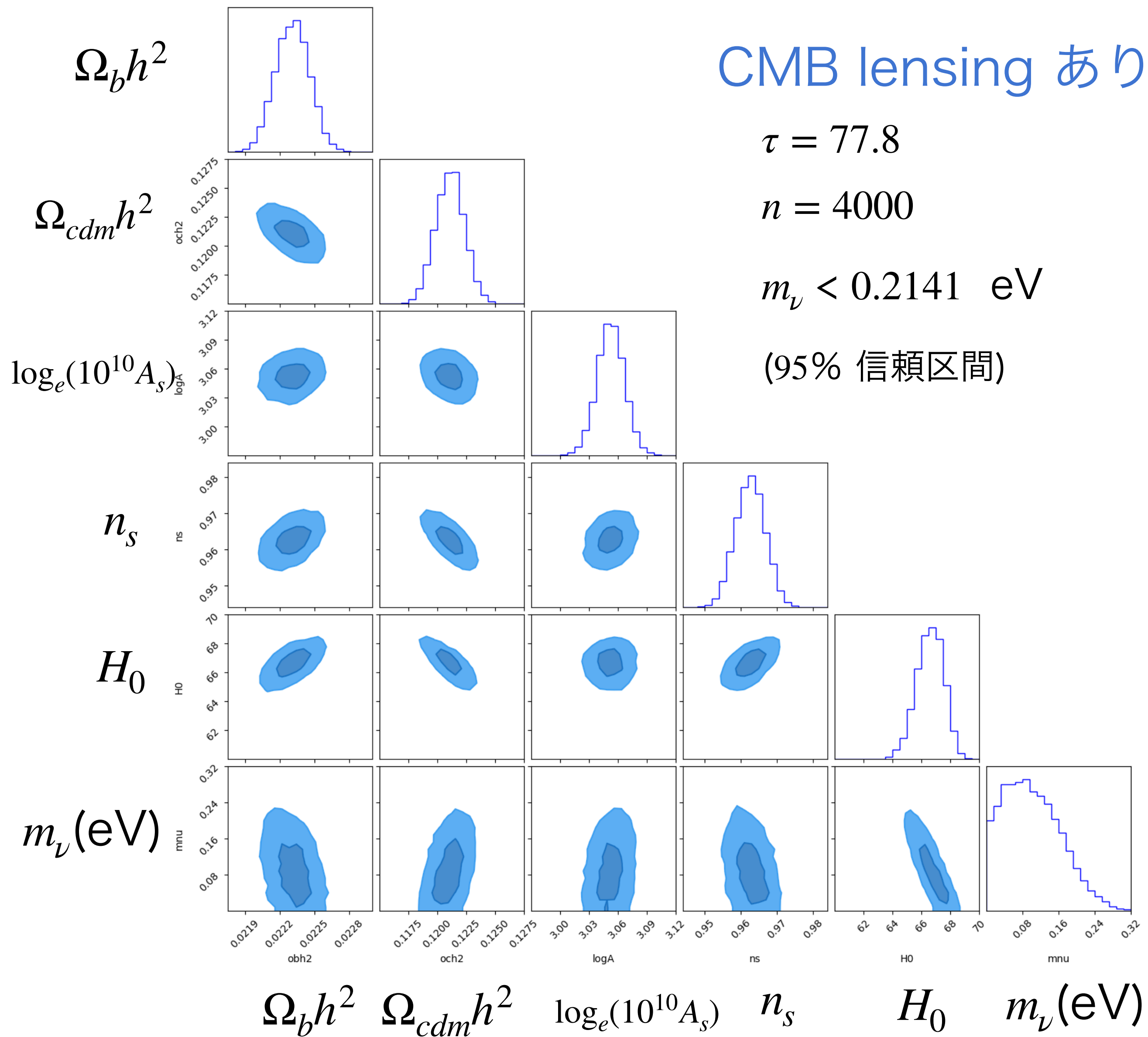
事後確率分布 $P(\theta|d)$

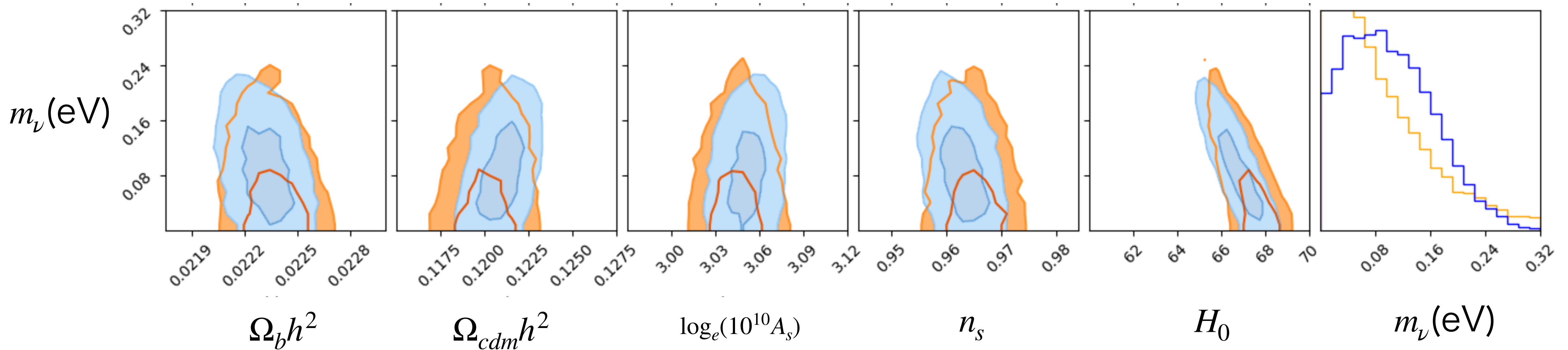
相関長 τ : 独立したサンプルが生成される間隔
ステップ数 $n > 50\tau$ なら、収束している



MCMCによる制限

11





CMB lensing あり

$$m_\nu < 0.2141 \text{ eV}$$

CMB lensingなし

$$m_\nu < 0.2366 \text{ eV}$$

(95% 信頼区間)

CMB lensing の結果も組み合わせることで、制限が強まった

$$\text{Reduced}\chi^2 = \frac{1}{n-p} \Delta d_i \text{Cov}_{ij}^{-1} \Delta d_j$$

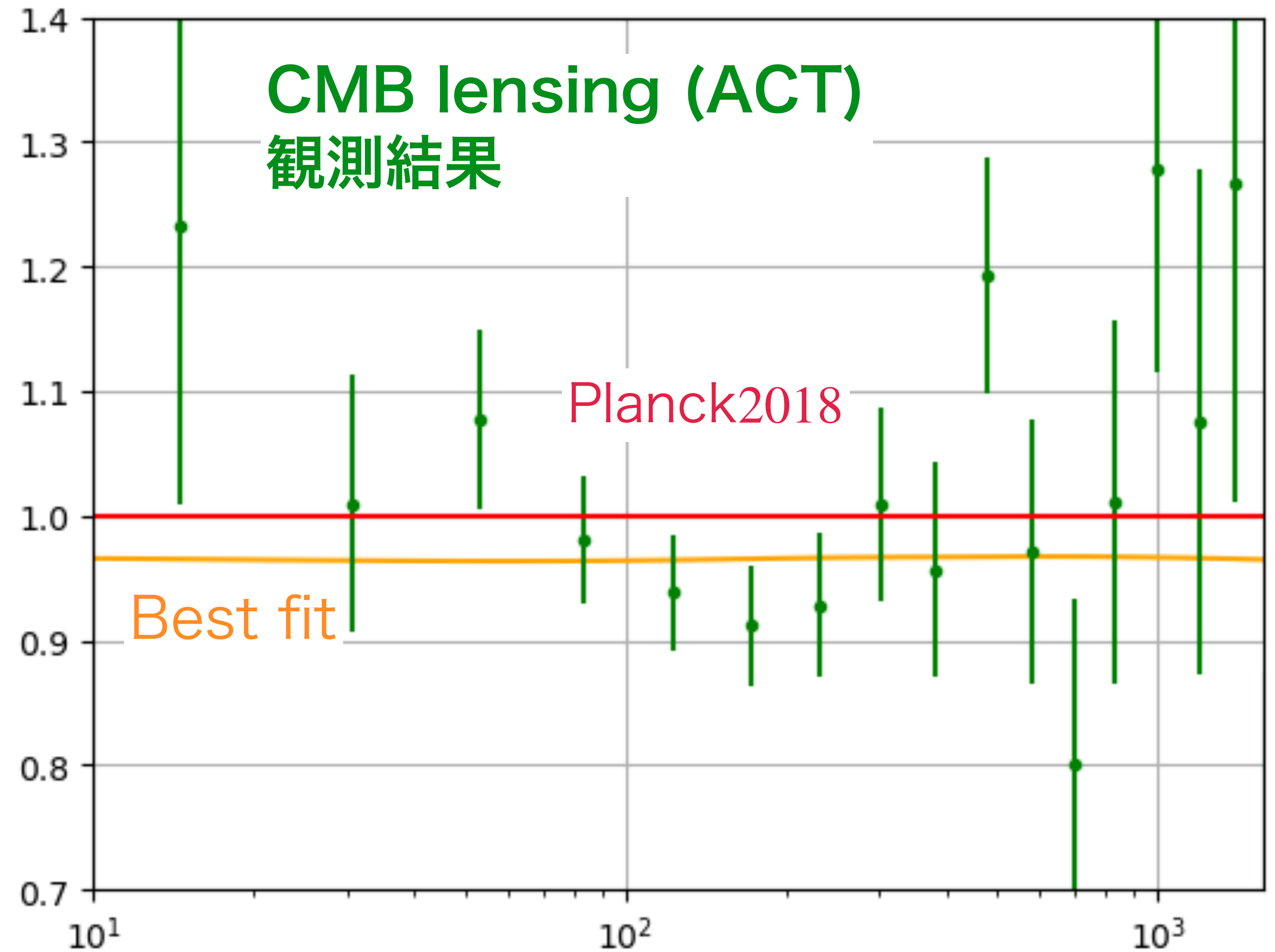
これが 1 に近いほど、観測と理論が
整合していると言える。

データ数 $n = 18$, パラメータ数 $p = 6$

Planck2018 : 1.963

Best fit : 1.940

Fit が改善されている



- CMB lensing はダークマターモデルを制限するのに使える
- MCMCを用いれば観測結果からパラメータ範囲を制限することができる
- ACTの観測結果も取り入れることで、特にニュートリノ質量の強い制限が得られることがわかった

今後の展望

- 理論計算を、機械学習に基づいた理論モデルであるエミュレータを用いて高速化する
- すばる望遠鏡Hyper Suprime-Cam 重力レンズ効果のデータも組み合わせる
- 他のダークマターモデル(light gravitino、axion dark matterなど)について制限を行う