

# POLARBEAR実験

## シミュレーションによる ニュートリノ質量和誤差の評価

清水景絵、羽澄昌史<sup>A</sup>、西野玄記<sup>A</sup>  
鈴木純一<sup>A</sup>、都丸隆行<sup>A</sup>  
(総研大、KEK<sup>A</sup>)  
他、POLARBEAR Collaboration

# 本研究の目的

- POLARBEAR実験でニュートリノ質量和がどれぐらいの精度で測定できるかを知る。
  - ニュートリノ質量のCMBへの影響を用いて、ニュートリノ質量和( $\Sigma m_\nu = m_1 + m_2 + m_3$ )測定の誤差を評価する。
- 先行研究とは異なり、実験で実際に用いるパイプラインを用いてニュートリノ質量和誤差の見積もりを行う。

# neutrino質量はどこまでわかっているか

ニュートリノ質量和  $\Sigma m_\nu = m_1 + m_2 + m_3$

**上限**

$\Sigma m_\nu = 1.4 \text{eV} (95\% \text{CL})$  WMAP 7year

**下限**

NH :  $\Sigma m_\nu \geq 0.05 \text{eV}$

IH :  $\Sigma m_\nu \geq 0.1 \text{eV}$

neutrino振動

スーパーカミオカンデ、  
etc...

3



POLARBEARは上限0.37eV(1 $\sigma$ )まで上限をつけられる。

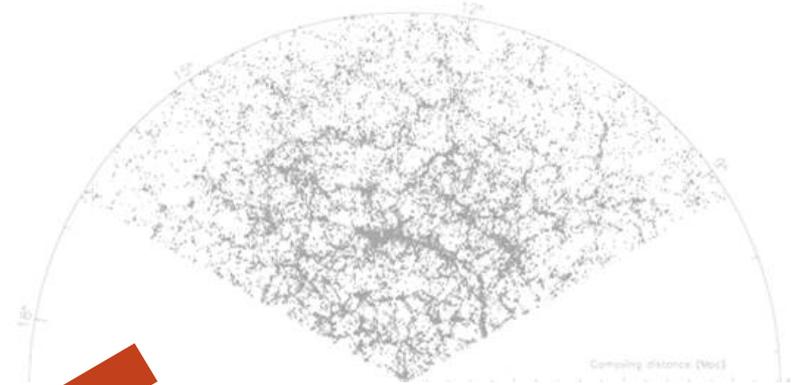
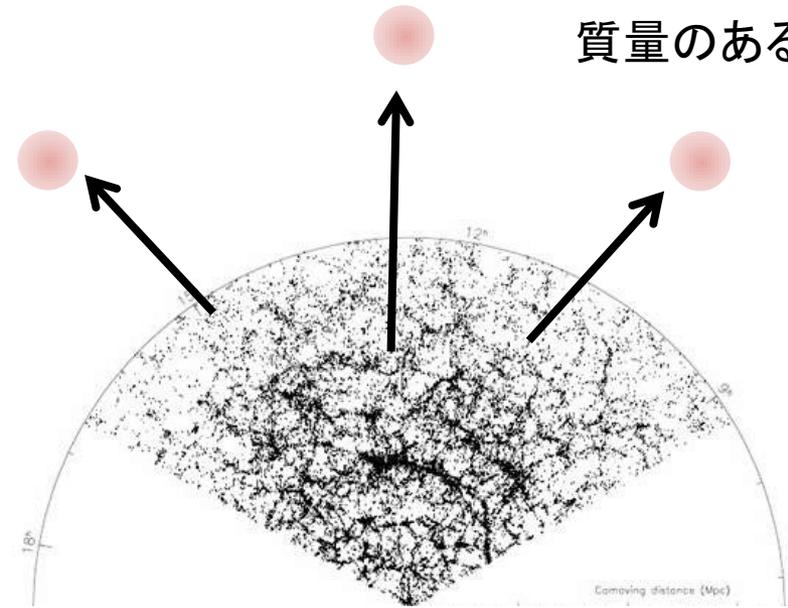
M.Shimon, et. al..(2010)

3

# ニュートリノ質量と大規模構造の関係

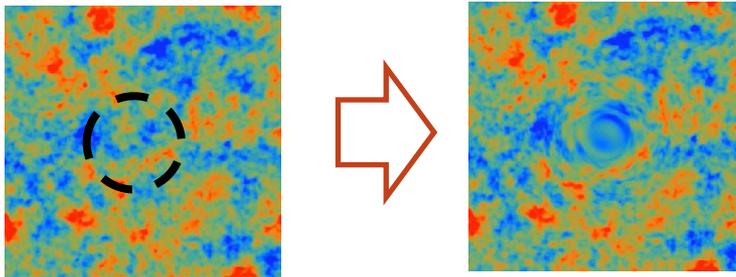
質量のあるニュートリノが質量をもちだすので

大規模構造のポテンシャルが浅くなる



重力レンズ効果

大規模構造: 宇宙の質量の分布



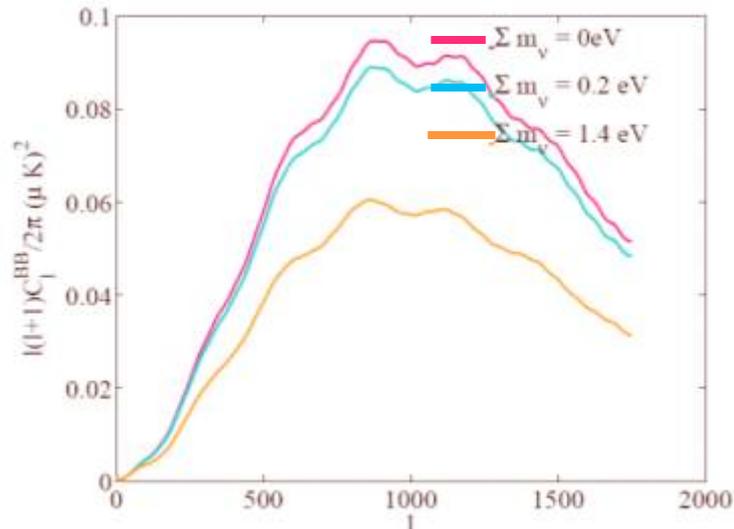
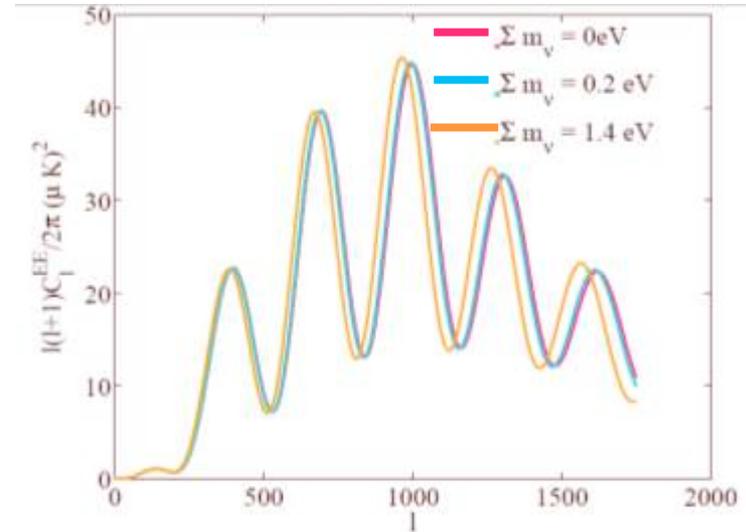
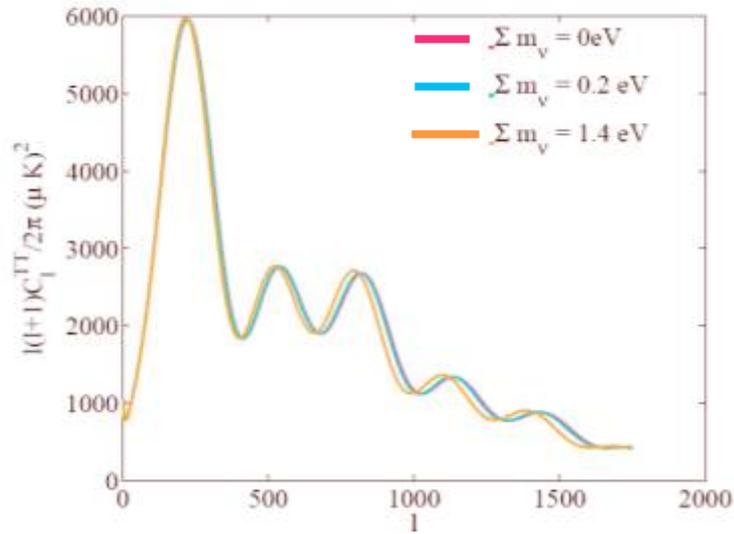
Neutrinoの質量に応じて、大規模構造の滑らかさが変わる。

(大規模構造のポテンシャルは $\Sigma m_\nu$ に依存する)

この変化をCMB偏光を通して検出する。

大規模構造のポテンシャルにより、パワースペクトルがゆがむ。

# ニュートリノ質量のCMBへの効果



ニュートリノ質量に応じて、スペクトルが変化するのが見て取れる。

# 実験のシミュレーション

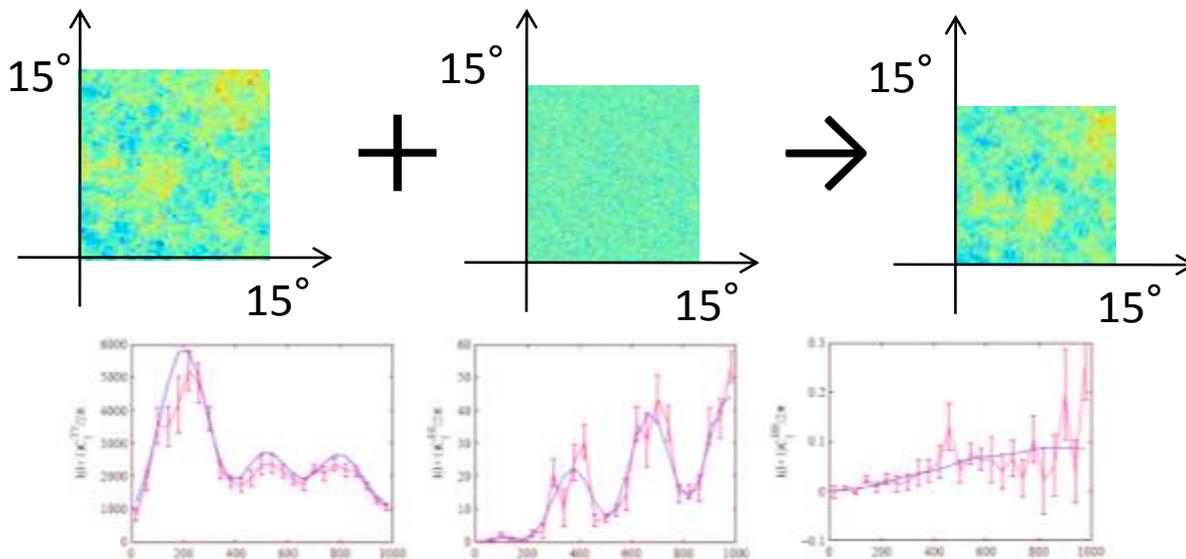
$\Lambda$ CDM+ $M_\nu$ モデル  
パワースペクトル

NOISED  
I,Q,U マップ作成

パワースペクトル  
の再構築

宇宙論パラメータ  
への影響

$$\Sigma m_\nu = 0.2 \text{ eV}$$



## シミュレーション

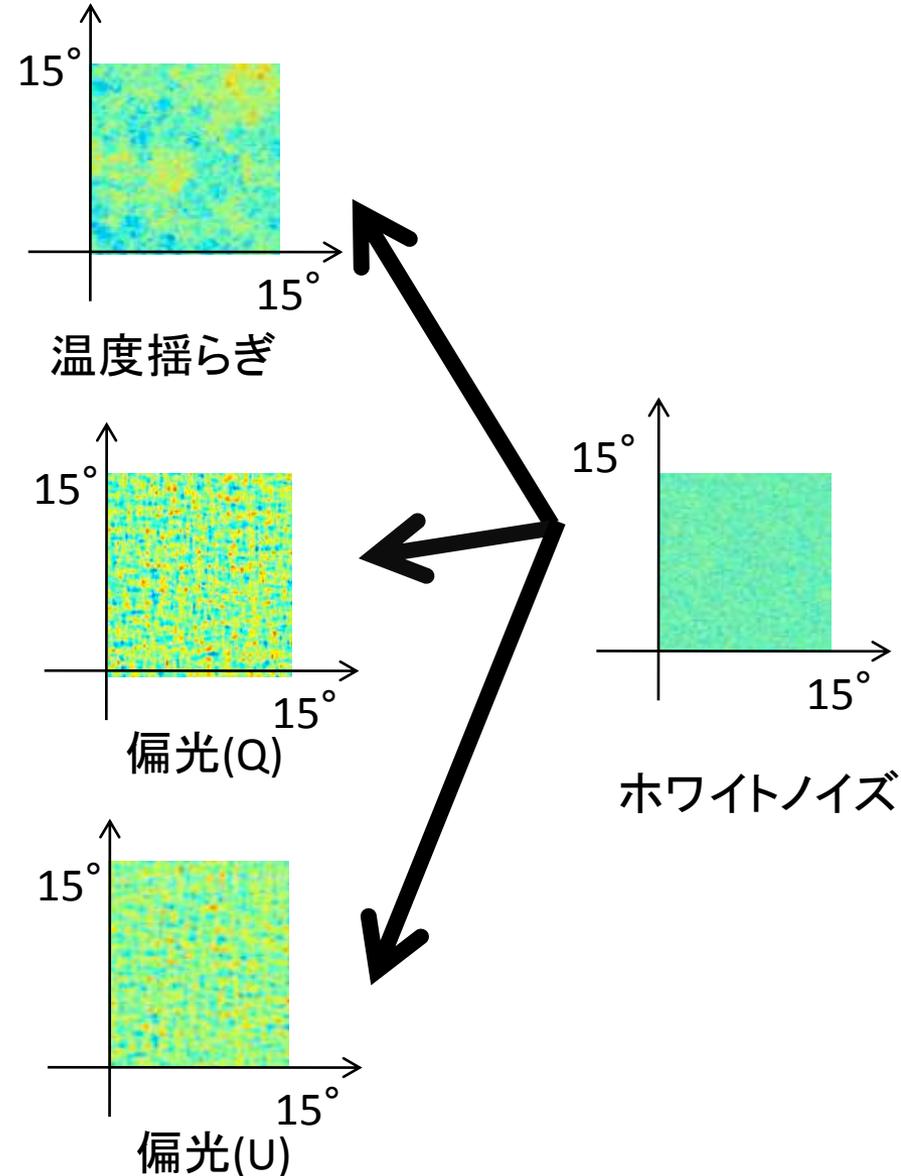
|  |               |                                |     |
|--|---------------|--------------------------------|-----|
| $f_{\text{sky}}(15^\circ \times 15^\circ)$ | 0.047         | $\theta_{\text{FWHM}}$         | 4'  |
| Nside                                      | 2048          | $\Delta_T(\mu\text{K arcmin})$ | 3.5 |
| ピクセルサイズ                                    | 1.72' × 1.72' | $\Delta_p(\mu\text{K arcmin})$ | 5.0 |

# 温度ゆらぎ・偏光のマップ

➤  $\Lambda$ CDM +  $M_\nu$  のモデルに基づいた温度揺らぎと偏光のマップを作る。

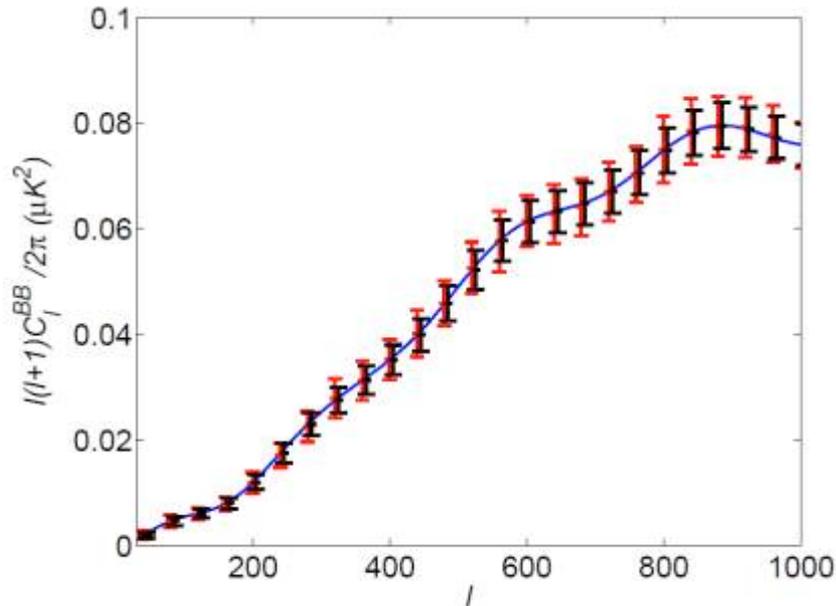
➤ そのマップの各ピクセルに、POLARBEARの検出器の性能に基づいたホワイトノイズを乗せる。

1ピクセルあたりのノイズ  
 $\Delta_T = 2.1 \mu\text{K}$   $\Delta_p = 2.9 \mu\text{K}$



# パワースペクトルの再構築

最適なエラーに近い誤差が得られた。

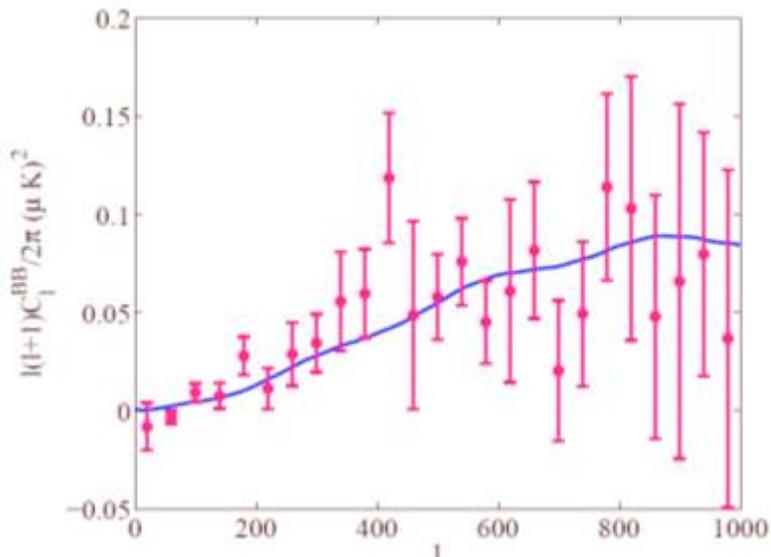
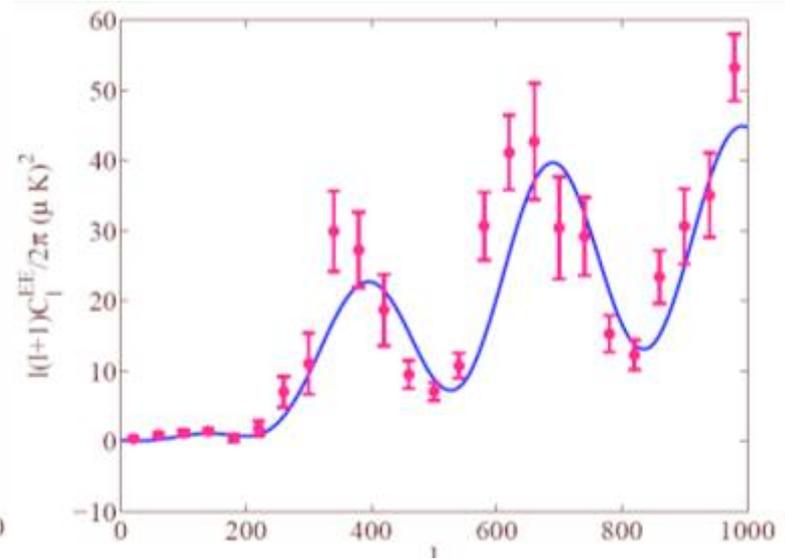
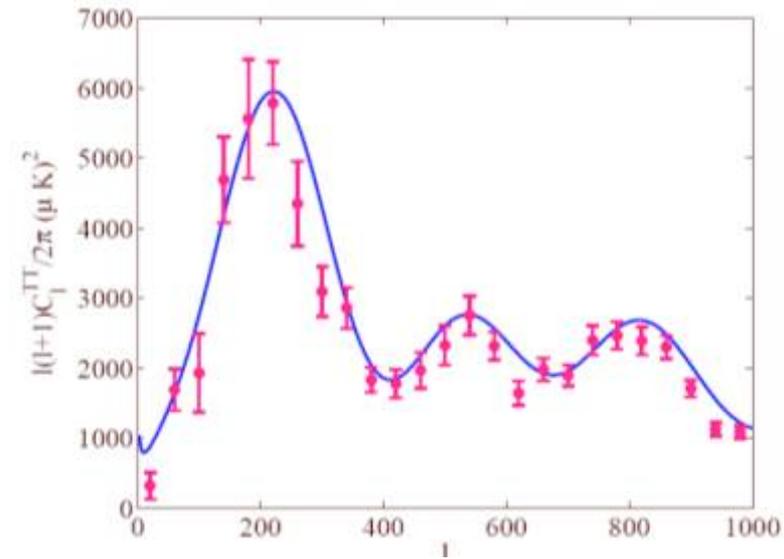


赤: このコードによるパワースペクトル見積りの誤差

黒: 期待されるエラー

地上実験での偏光観測に最適化されたコード (J.Grain, 2009) を用い、パワースペクトルの reconstruct を行った。

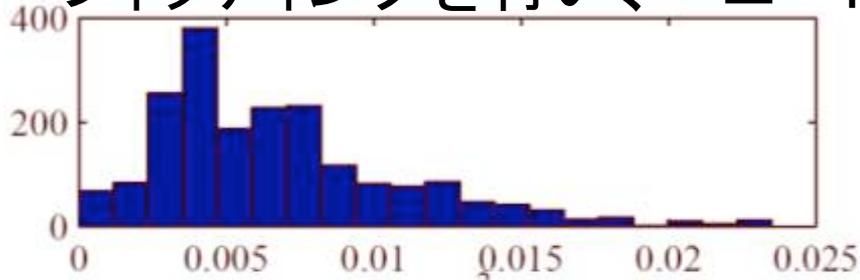
# パワースペクトル



シミュレーションに使ったパワースペクトル。

# 宇宙論パラメータの見積もり

得られたパワースペクトルをマルコフ連鎖モンテカルロでフィッティングを行い、ニュートリノ質量和の見積もりを行った。



$$\Omega_\nu h^2 = \Sigma m_\nu (\text{eV}) / 94.2$$

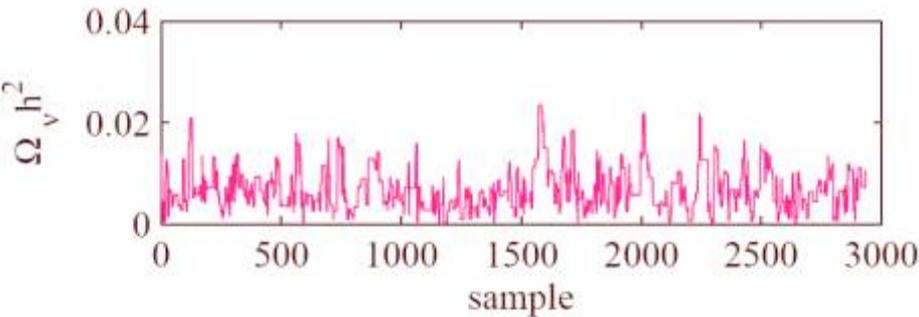
Input:  
 $\Omega_\nu h^2 = 0.0021$   
( $\Sigma m_\nu = 0.2 \text{ eV}$ )

Result:  
 $\Omega_\nu h^2 = 0.0068 \pm 0.004$   
( $\Sigma m_\nu = (0.64 \pm 0.40) \text{ eV}$ )

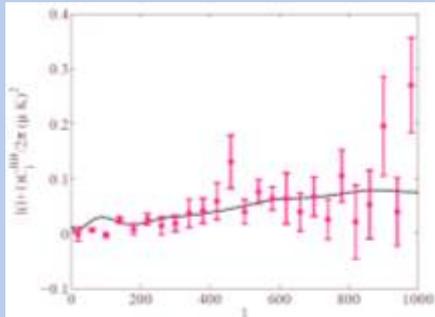
→  $1\sigma$  で input と一致。

→ 先行研究  $\sigma(\Sigma m_\nu) \sim 0.37 \text{ eV}$  (M. Shimon et. al., 2010) と consistent な結果が得られた。

→ 今後、さらに現実的な状況についてシミュレーションを行う。



データ点に best-fit value を重ねたもの。



# 今後の展望

## パイプラインの実装

- TODからreconstructしたマップを使う
- MCMCでのパラメータを増やす。
- 他の実験データとのcombined analysis (WMAP, Planck, QUIET, etc...)

## 実験のシミュレーション

- Scanパターンに応じたノイズ
- 大気ゆらぎをのせる
- $1/f$ ゆらぎをマップに乗せる
- Bolometer同士で関連したノイズ
- Foreground

## システムティックエラーの研究

- ビームシステムティクス
- ポインティング
- Ellipticity
- エラーの除去
- HWP Rotation
- Scan Strategy

# まとめ

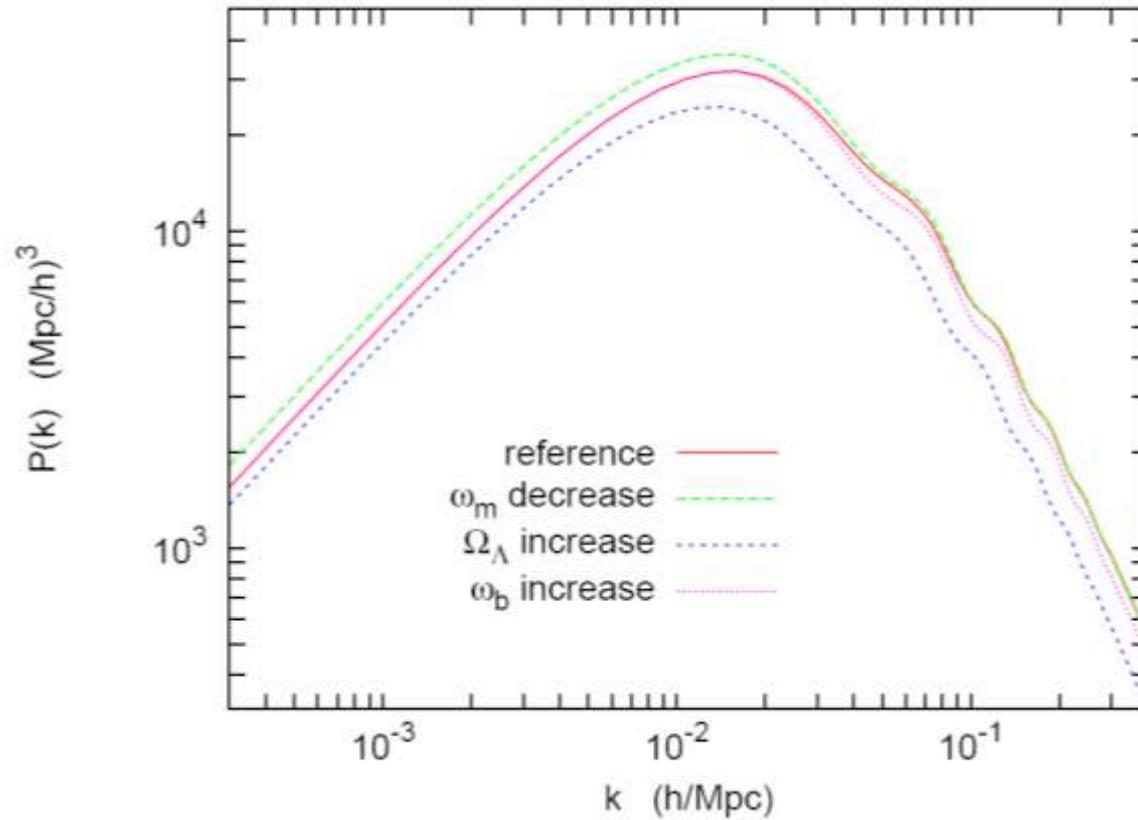
- POLARBEAR実験でニュートリノ質量和に制限を付けるために、POLARBEAR実験のパイプラインの実装と、実験に即したシミュレーションを始めた。
- まず、第一段階として、検出器に由来するホワイトノイズをマップに乗せ、ニュートリノ質量和の見積もりを行った。
- その結果、先行研究とほぼconsistentな結果が得られた。
- 今後、さらに現実的な状況についてシミュレーションを行い、システムティックエラーの研究を行いたい。



# まとめ

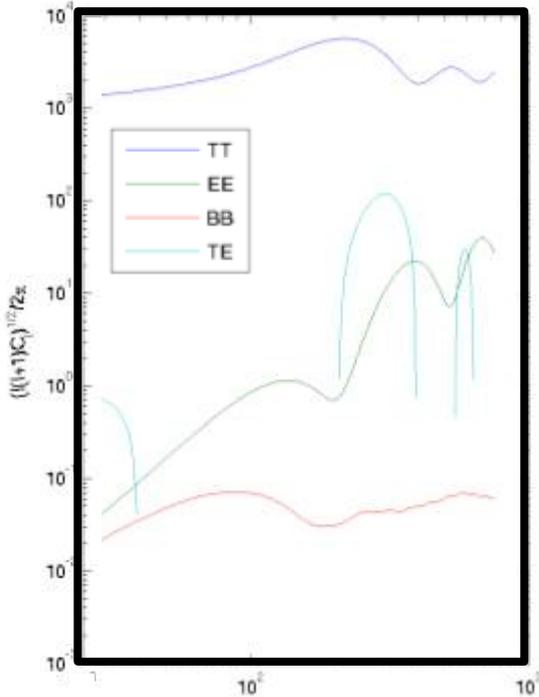
- POLARBEAR実験でニュートリノ質量和に制限を付けるために、POLARBEAR実験のパイプラインの実装と、実験に即したシミュレーションを始めた。
- パイプラインの個々のプログラムはsignal onlyでは正しく動作している。
- MCMCは今3パラメータでsignal onlyでは正しく動作している。
- ホワイトノイズを乗せてシミュレーションしてみたが、 $H_0$ とニュートリノ質量和の縮退が激しく、ニュートリノ質量を正しく見積もることができない改善の余地がある。

# マタースペクトルへの影響



# 誤差を決める方法

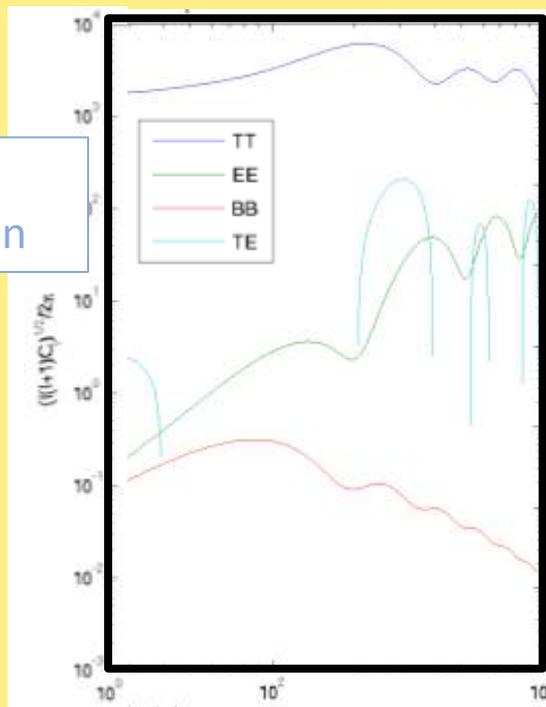
Lensed Power Spectra



Lensing  
Extraction

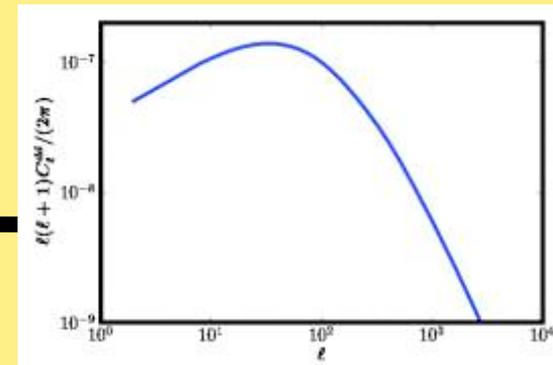


Unlensed Power Spectra



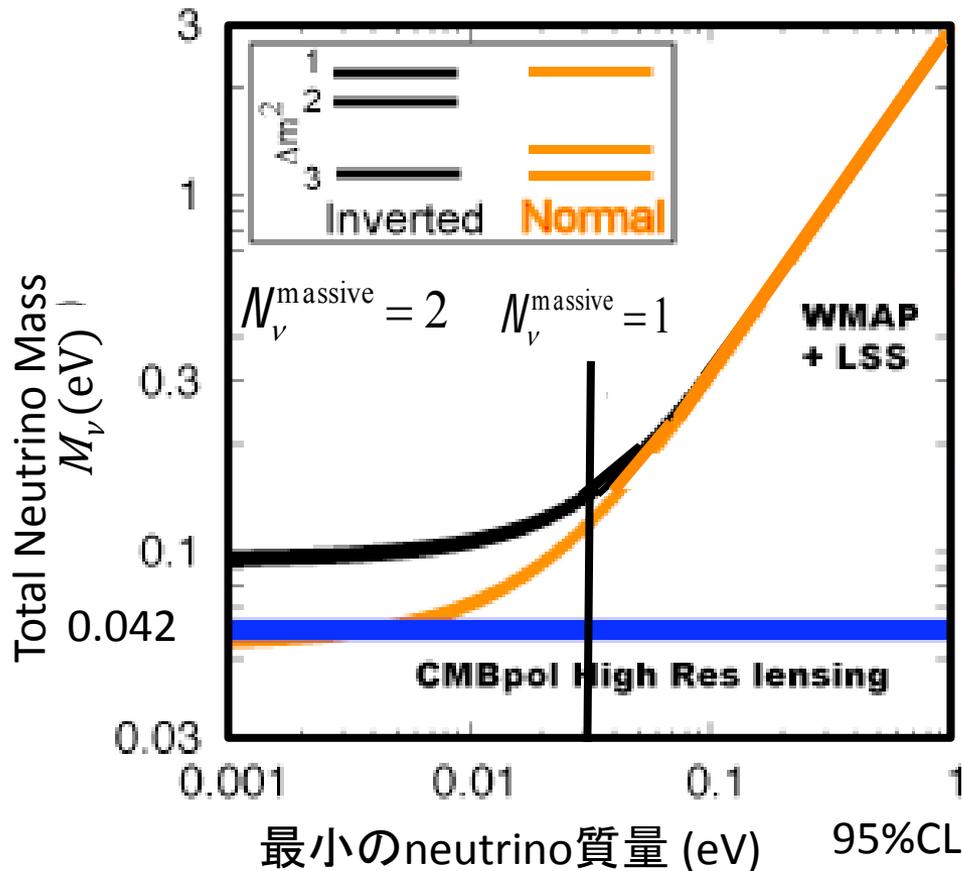
+

$C_l^{dd}$



レンズ効果を取り除いたパワースペクトルと、レンズ効果から Quadratic Estimator というものを用いて得られた deflection fieldのパワースペクトル( $C_l^{dd}$ )から、誤差を計算することができる。

# 階層問題の解決方法



上限から

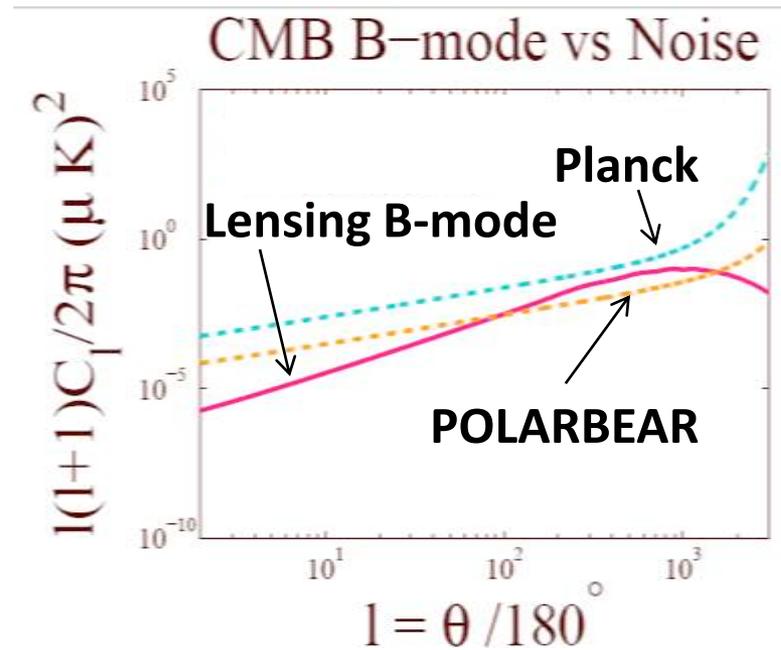
$M_\nu$ が0.1eVから有意に小さければ、階層が決まる。

Neutrinoの数でfitting

重いneutrinoの数  
 $N_\nu^{\text{massive}}$ をフリーパラメータとしてlensing extractionを行う。

本論文ではこちらを採択

# What's POLARBEAR?

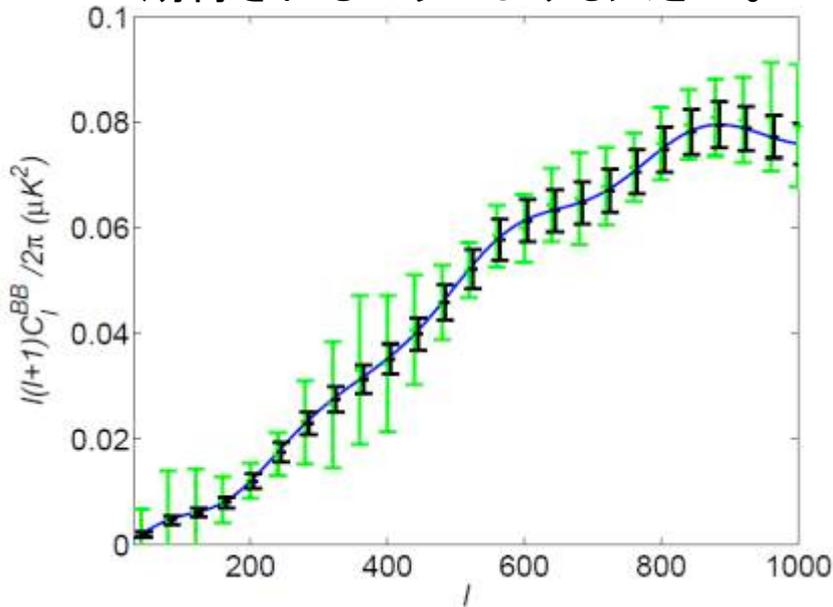


# 将来のneutrino mass

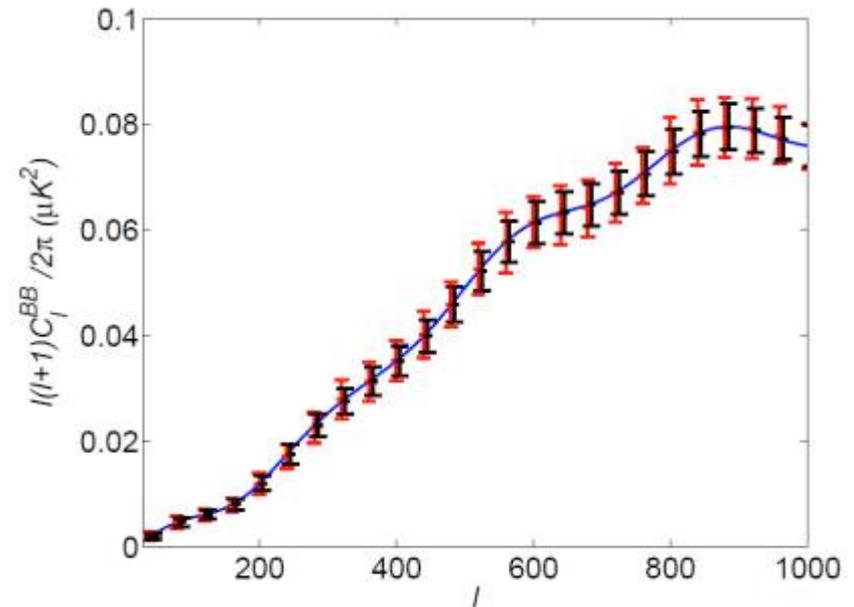
- KATRIN : 0.2eV (tritium beta-decay)
- CMBpol : 0.14eV

# パワースペクトルの再構築

従来のアルゴリズムに基づいたコードで見積もられた誤差。期待されるエラーよりも大きい。



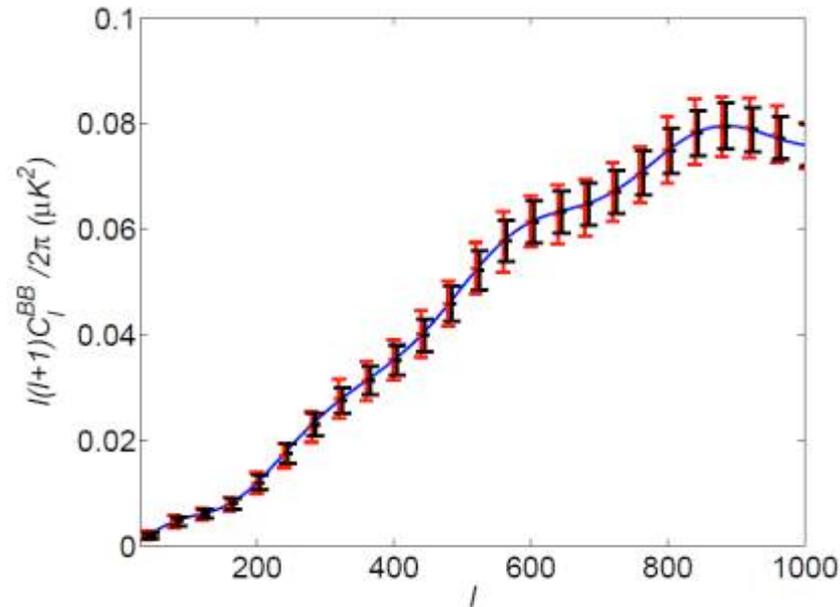
最適なエラーに近い誤差が得られた。



- ・従来のコードでは、B-modeの正しい見積もりが行えない。これは、POLARBEARが空の一部分しか見ないことによりE/B leakageが起こるためである。
- ・J. Grain( 2009)が開発したコードを用いることにより、最適なB-modeのスペクトルを得ることができた。

# パワースペクトルの再構築

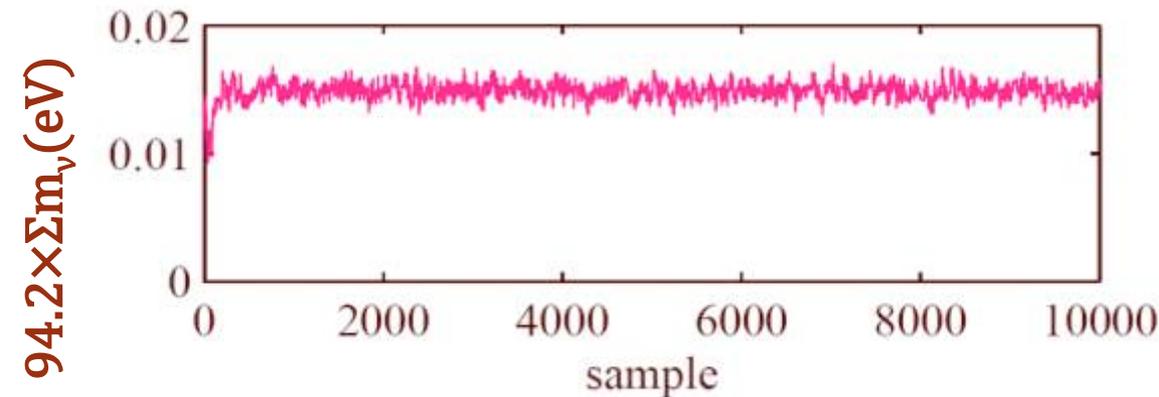
最適なエラーに近い誤差が得られた。



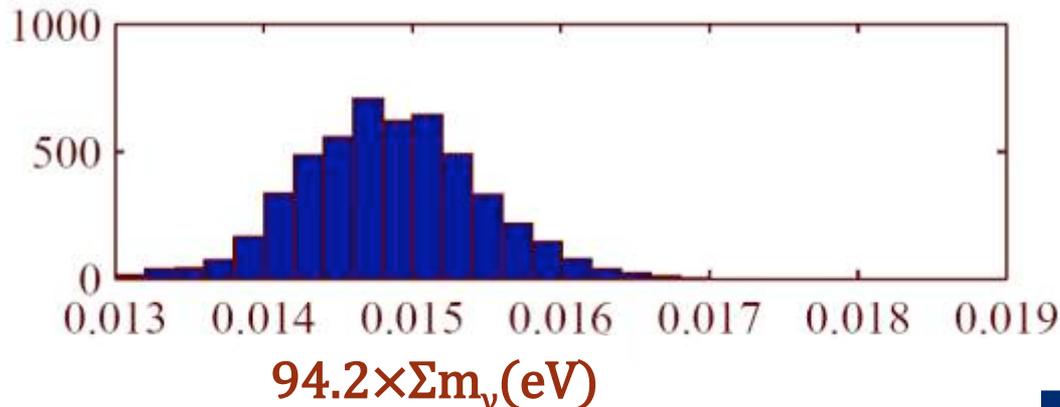
・J. Grain( 2009)が開発したコードを用いることにより、最適なB-modeのスペクトルを得ることができた。

# ニュートリノ質量和の見積もり

エラーはCosmic Varianceのみするとき、ニュートリノ質量和に関しては期待される結果が出ている。



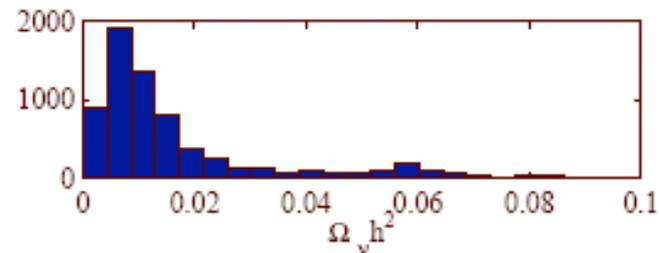
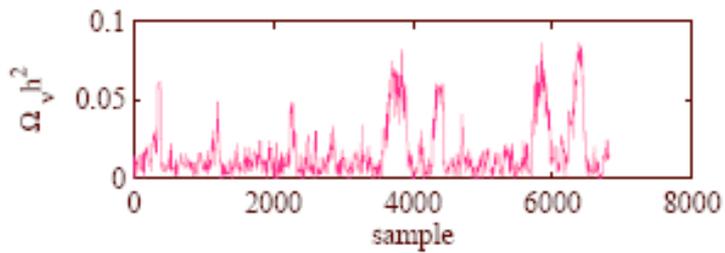
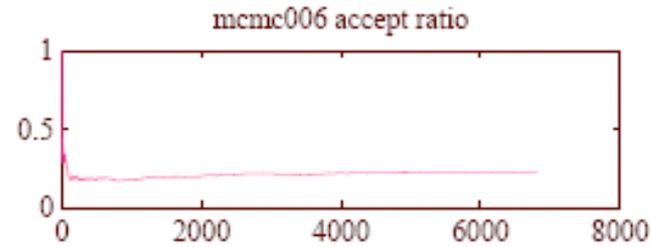
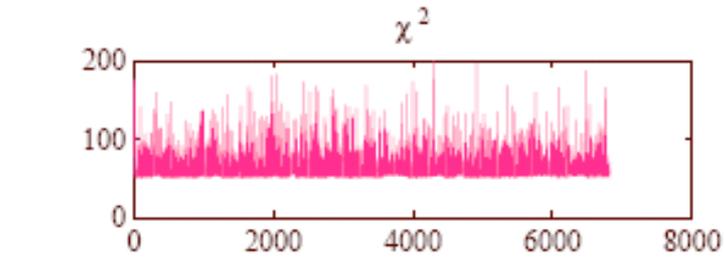
Input:  
 $\Omega_\nu h^2 = 0.015$   
( $m_\nu = 1.4 \text{ eV}$ )



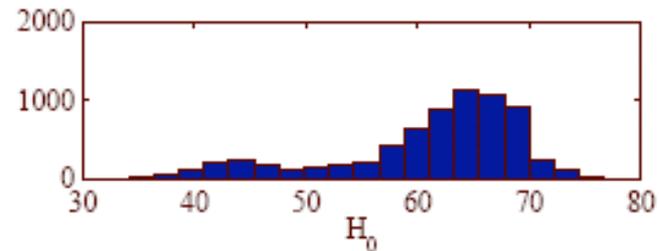
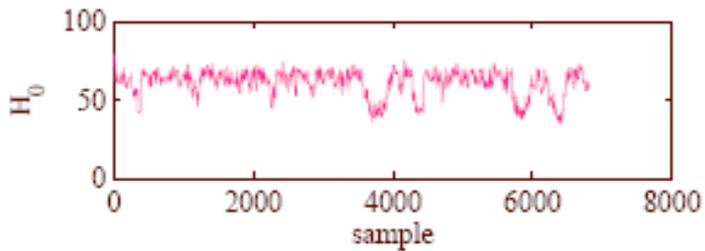
Result:  
 $\Omega_\nu h^2 = 0.0149 \pm 0.00059$   
 $m_\nu = 1.4 \pm 0.056$

➡ 期待通りの動作

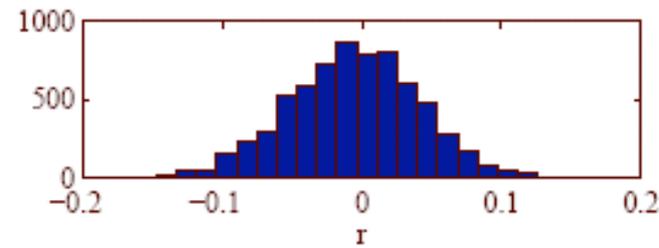
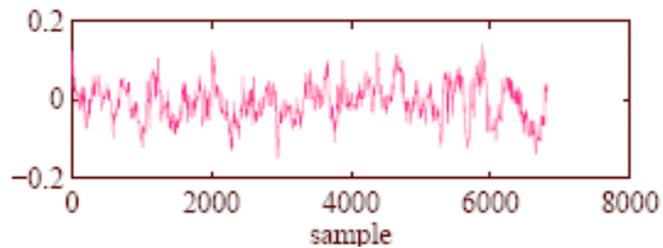
# MCMC



$0.0167 \pm 0.0173$



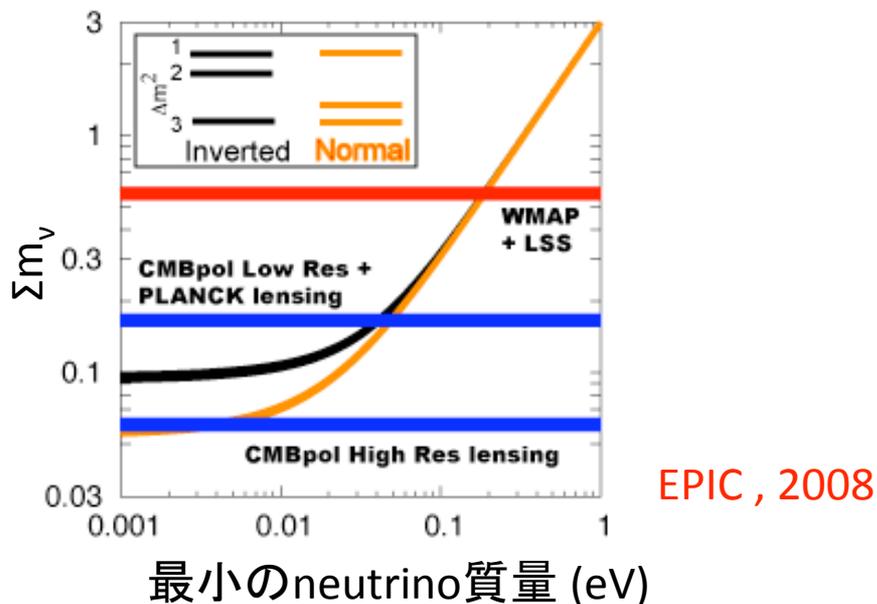
$61.1936 \pm 8.1722$



$-0.0062 \pm 0.0463$

# neutrino質量和が検出できると

- 素粒子標準模型を越える物理への足がかり
- Neutrino 階層問題の解決

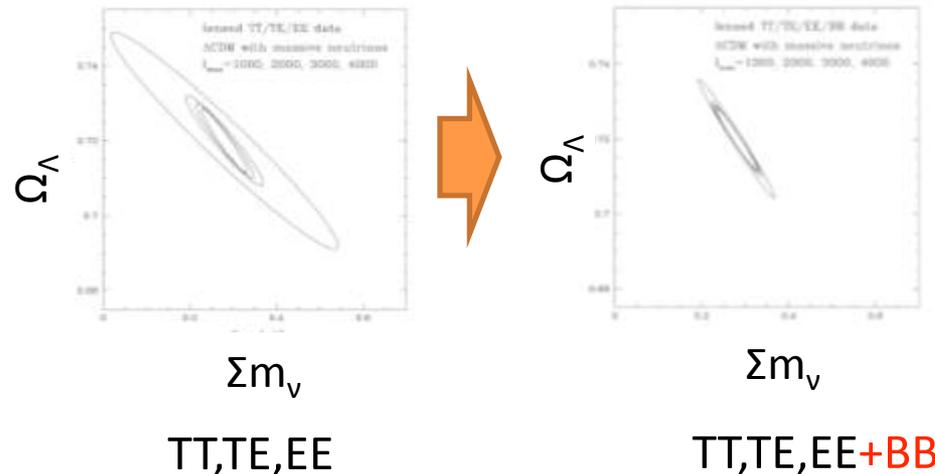


# POLARBEARの意義

B-modeが観測できるとニュートリノ質量和に対するエラーが改善される

POLARBRAR:  $0.75\text{eV}(2\sigma)$ ,  
PLANCKでは  $0.29\text{eV}(2\sigma)$   
(M. Shimon, et. al. (2010))

POLARBEARでB-modeが加わればneutrino massに対する制限がより強くなる。



J. Lesgourgues, L. Perotto, S. Pastor and M. Piat

# 重力レンズ効果とは

DISTANT OBJECT

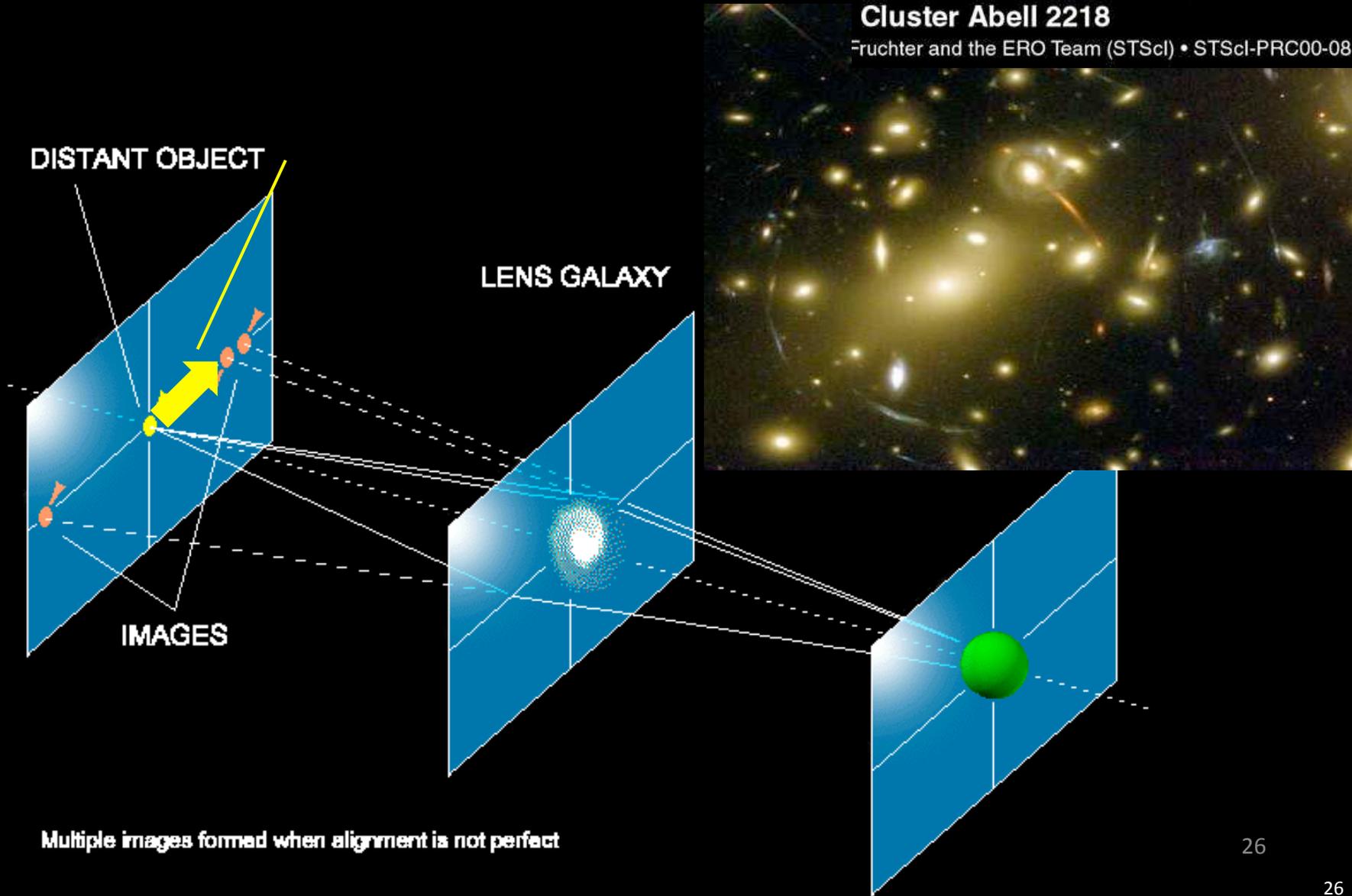
LENS GALAXY

IMAGES

Cluster Abell 2218

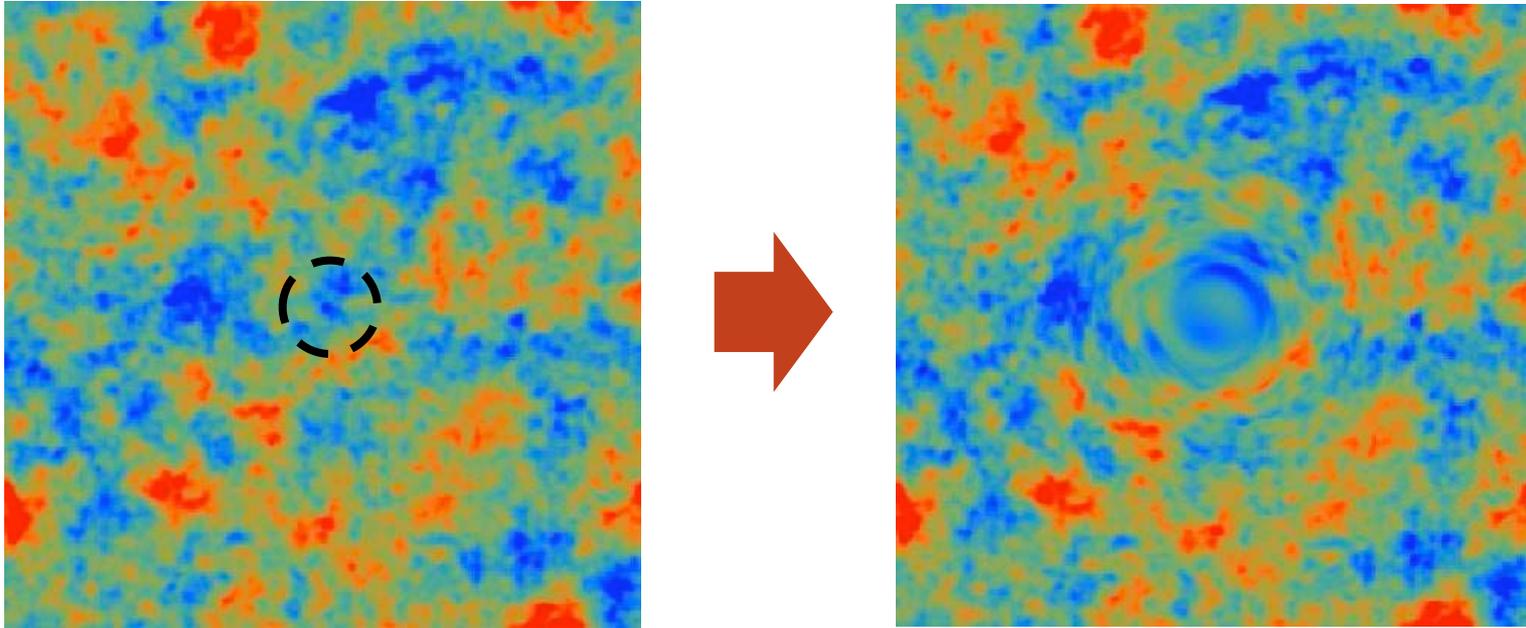
Fruchter and the ERO Team (STScI) • STScI-PRC00-08

Multiple images formed when alignment is not perfect



# 重力レンズ効果とCMB

大規模構造のポテンシャルにより、パワースペクトルがゆがむ。



重力レンズ効果を受けたCMBのパワースペクトルから、大規模構造のポテンシャルを決めることができる。

→  $M_V$ が決まる。

# 本研究の目的

POLARBEAR実験解析のパイプラインを完成させ、  
実験に即したシミュレーションを行い、  
ニュートリノ質量和に対する誤差を評価する。

パイプラインの(実装)

実験のシミュレーション

システムティックエラー  
の研究

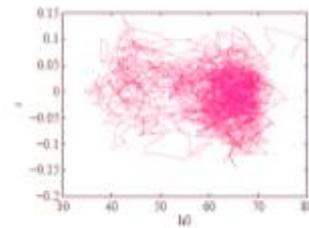
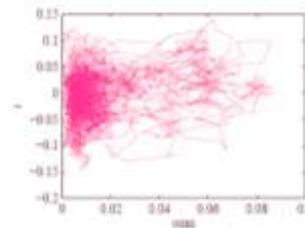
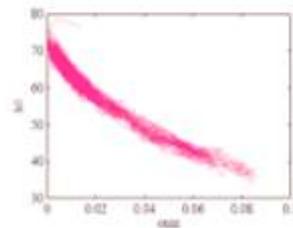
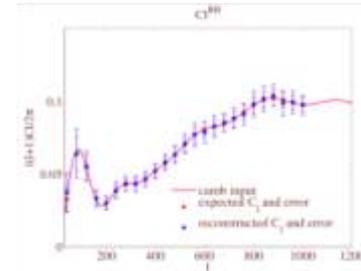
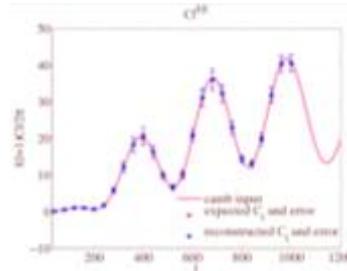
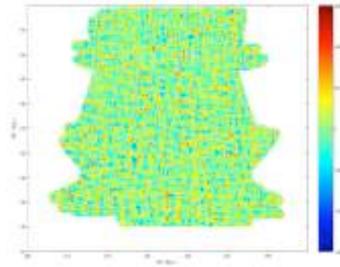
# パイプラインの実装

TODデータ

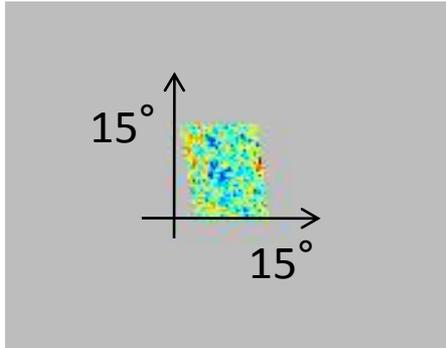
I,Q,U マップ作成

パワースペクトルの再構築

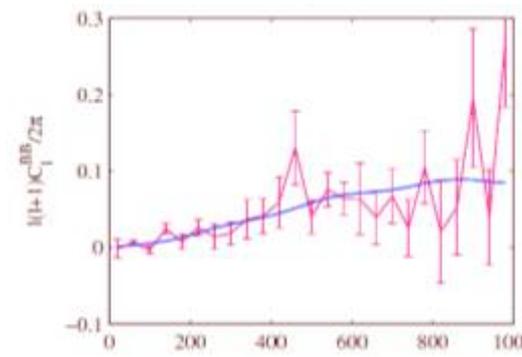
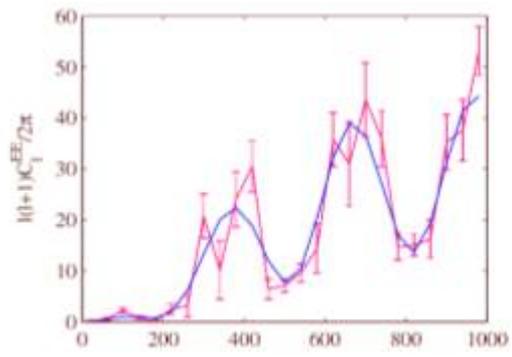
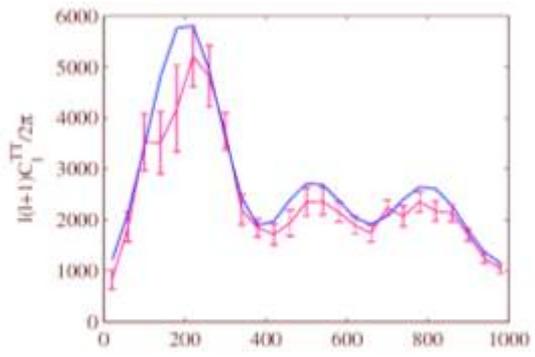
宇宙論パラメータの見積もり



# シミュレーションデータの作成

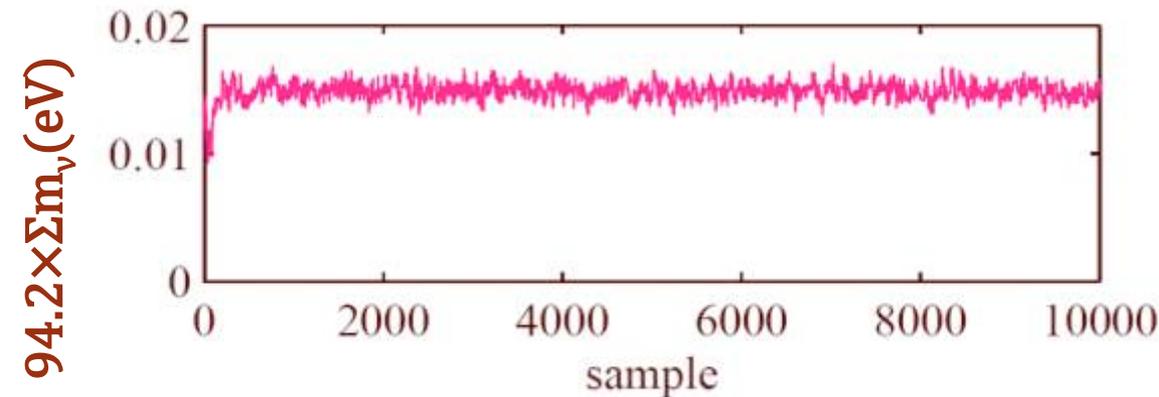


| シミュレーション                                   |                      |
|--|----------------------|
| $f_{\text{sky}}(15^\circ \times 15^\circ)$ | 0.047                |
| Nside                                      | 2048                 |
| ピクセルサイズ                                    | 1.72' $\times$ 1.72' |
| $\theta_{\text{FWHM}}$                     | 4'                   |
| $\Delta_{\text{T}}(\mu\text{K arcmin})$    | 3.5                  |
| $\Delta_{\text{P}}(\mu\text{K arcmin})$    | 5.0                  |

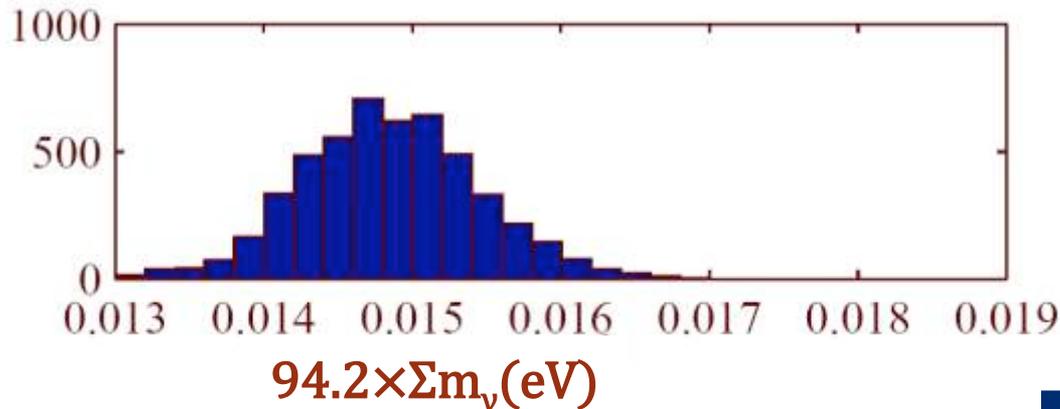


# ニュートリノ質量和の見積もり

エラーはCosmic Varianceのみするとき、ニュートリノ質量和に関しては期待される結果が出ている。



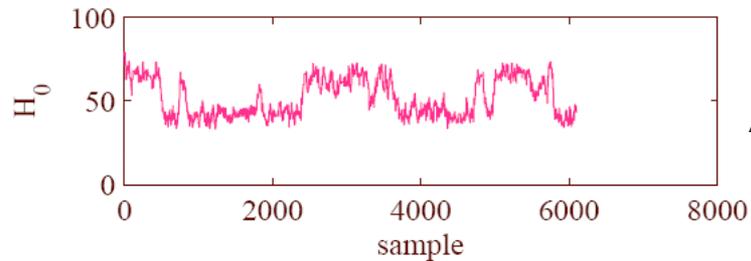
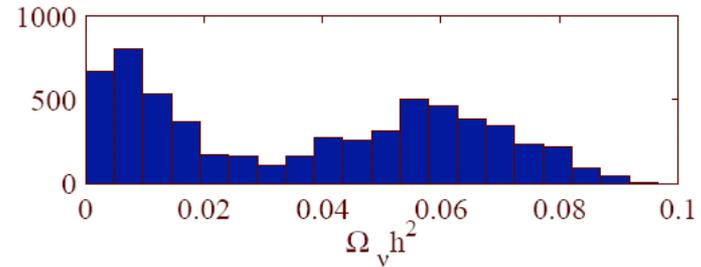
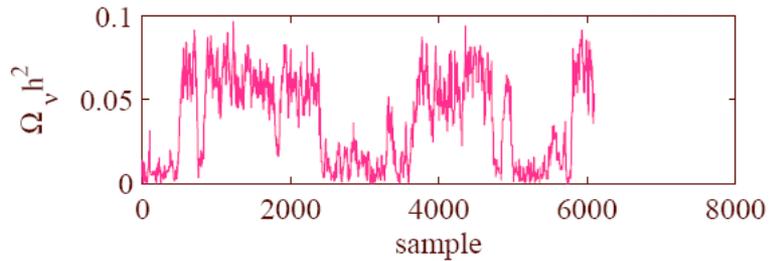
Input:  
 $\Omega_\nu h^2 = 0.015$   
( $m_\nu = 1.4 \text{ eV}$ )



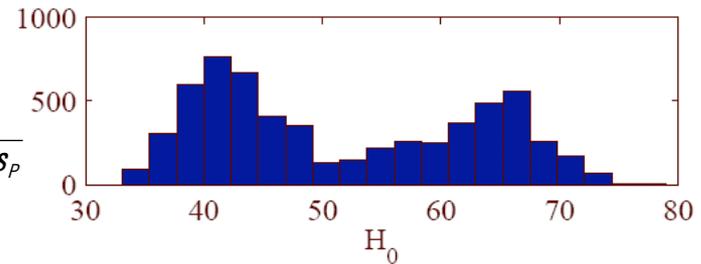
Result:  
 $\Omega_\nu h^2 = 0.0149 \pm 0.00059$   
 $m_\nu = 1.4 \pm 0.056$

➡ 期待通りの動作

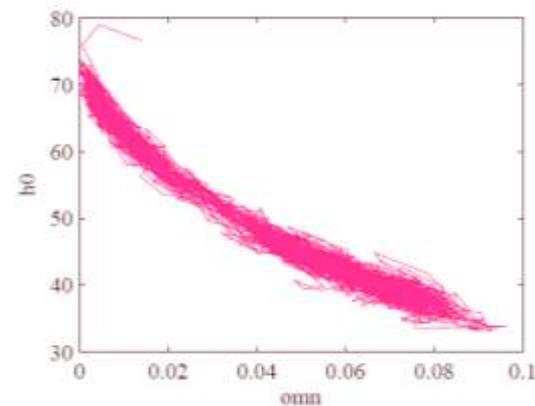
# MCMC(Noised)



$$\frac{\Delta_P}{\sqrt{s_P}}$$



Input:  
 $\Omega_\nu h^2 = 0.005 (m_\nu = 0.2 \text{ eV})$   
 $H_0 = 70$



$H_0$ と縮退しているため、neutrino massが良い精度で決まらない。  
 $H_0$ 、BBN等のPrior、他のCMB実験とのcombine analysisが必要。

# 実験のシミュレーション

## 1 × 1 [arcmin<sup>2</sup>]あたりのノイズ

$$\Delta_P = \sqrt{\frac{\Omega_{\text{NET}}^2}{(N_{\text{bolo}}/2)t_{\text{obs}}}} = 5.0 \mu\text{K arcmin}$$

$$\Delta_T = \frac{\Delta_P}{\sqrt{2}} = 3.5 \mu\text{K arcmin}$$

$$\Delta_T = 3.5 \mu\text{K arcmin}$$

$$\Delta_P = 5 \mu\text{K arcmin}$$

$$\text{NET} = 360 \mu\text{K} \sqrt{\text{s}}$$

$$\Omega = 1000 \text{deg}^2$$

$$N_{\text{bolo}} = 637$$

$$t_{\text{obs}} = 2_{\text{years}} \times 9_{\text{months}} \times 30_{\text{days}} \times 8_{\text{hour}} \times 3600_{\text{sec}}$$

## 1 ピクセルあたりのノイズ

$$\frac{\Delta_P}{\sqrt{S_P}} = 2.9 \mu\text{K}$$

$$\frac{\Delta_T}{\sqrt{S_P}} = 2.06 \mu\text{K}$$

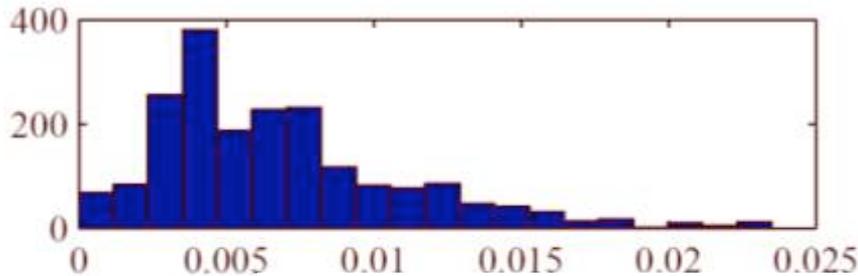
I,Q,Uの各ピクセルに、このホワイト  
Inputとする。

Sp:ピクセルの面積。ここでは、1.72' × 1.72'

- $hubble = 69.3$
- $use\_physical = T$
- $ombh2 = 0.02260$
- $omch2 = 0.1096$
- $omnuh2 = 0.00214$
- $initial\_ratio(1) = 0.025$

# 宇宙論パラメータの見積もり

得られたパワースペクトルをマルコフ連鎖モンテカルロでフィッティングを行い、ニュートリノ質量和の見積もりを行った。

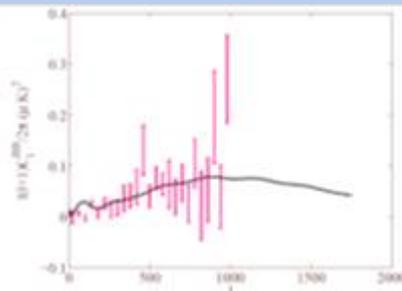
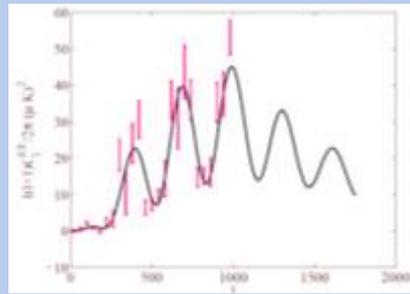
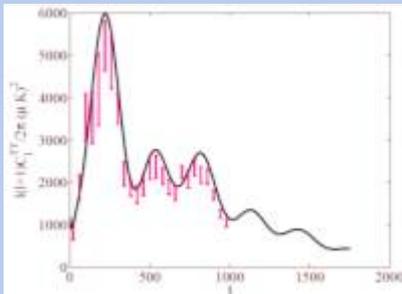


$$\Omega_\nu h^2 = \Sigma m_\nu (\text{eV}) / 94.2$$

Input:  
 $\Omega_\nu h^2 = 0.0021$   
( $m_\nu = 0.2 \text{ eV}$ )

Result:  
 $\Omega_\nu h^2 = 0.0068 \pm 0.004$   
( $m_\nu = (0.64 \pm 0.40) \text{ eV}$ )

→  $1\sigma$  で input と一致。



データ点に best-fit value を重ねたもの。

→ 先行研究  $\sigma(\Sigma m_\nu) \sim 0.37 \text{ eV}$  (M. Shimon et. al., 2010) とほぼ consistent な結果が得られた。

→ 今後、さらに現実的な状況についてシミュレーションを行う。