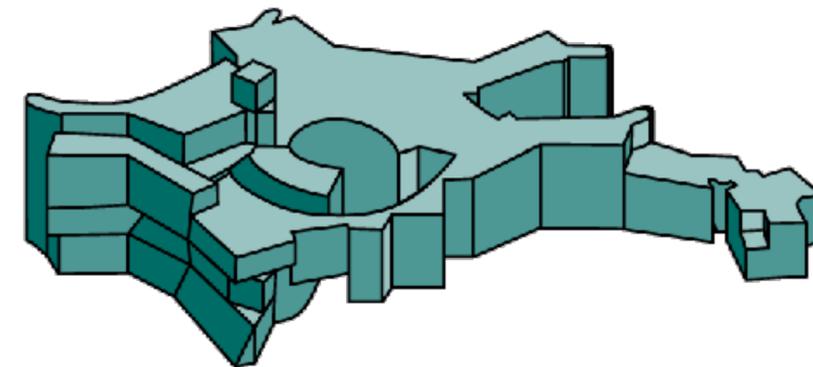


A Hint of Parity Violation in Polarized Light of the CMB

CMBにおける

パリティ対称性の破れの兆候



なぜパリティ対称性を見るか

新しい物理の探索

- 現在の宇宙モデル (Λ CDM) は、素粒子と場の標準モデルを超える新たな物理を必要とする。
- ダークマター (CDM) の実体は何か？
- ダークエネルギー (Λ) の実体は何か？

なぜパリティ対称性を見るか

多くのアイデアはあるが、どのようにして前へ進めば良いか？

- 現在の宇宙モデル (Λ CDM) は、素粒子と場の標準モデルを超える新たな物理を必要とする。
- ダークマター (CDM) の実体は何か？ \Rightarrow CDM, WDM, FDM, ...
- ダークエネルギー (Λ) の実体は何か？ \Rightarrow スカラー場, 修正重力, 量子重力,

...

宇宙論における新展開

パリティ対称性の破れが鍵かもしれない！

Reference: nature reviews physics

Nature Rev. Phys. 4, 452 (2022)

Explore content ▾

About the journal ▾

Publish with us ▾

Subscribe

[nature](#) > [nature reviews physics](#) > [review articles](#) > [article](#)

アーカイブ版は

arXiv:2202.13919

Review Article | [Published: 18 May 2022](#)

New physics from the polarized light of the cosmic microwave background

[Eiichiro Komatsu](#) 

Key Words:

1. Cosmic Microwave Background (CMB)
2. Polarization
3. Parity Symmetry

[Nature Reviews Physics](#) 4, 452–469 (2022) | [Cite this article](#)

1. パリティ

パリティ変換に対する対称性

定義

- **パリティ変換 = 3次元空間座標の反転**
 - $(x, y, z) \rightarrow (-x, -y, -z)$
- 物理系がパリティ変換に対して対称であれば:
 - 物理法則は、3次元空間座標の反転に対して不変である。
- **パリティ対称性の破れ = 物理法則は、3次元空間座標の反転に対して不変ではない。**

パリティ変換と回転変換

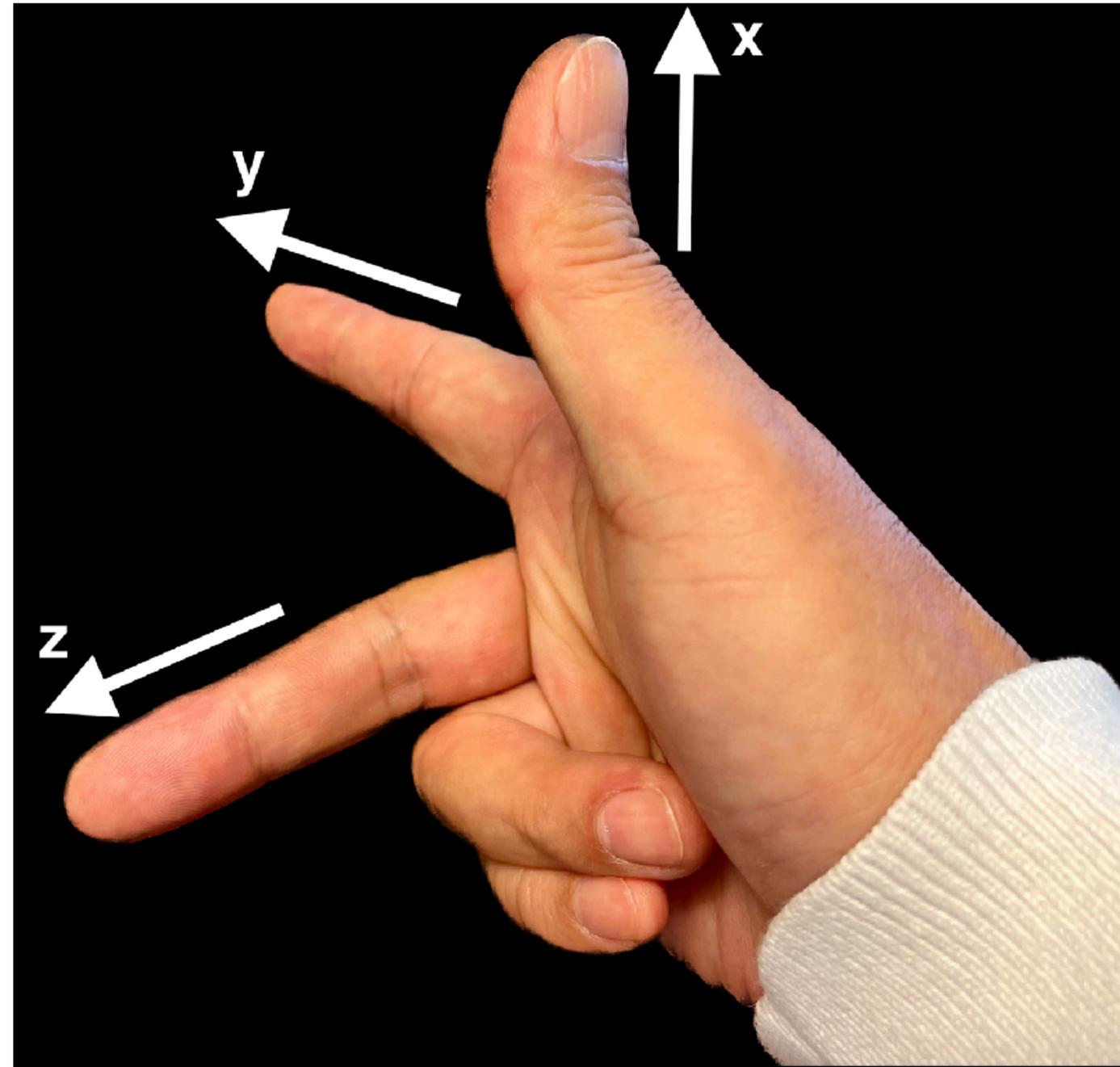
- パリティ変換 ($\mathbf{x} \rightarrow -\mathbf{x}$) と3次元回転変換 ($\mathbf{x} \rightarrow R\mathbf{x}$) は異なる。
 - 回転変換Rは連続的な変換で、行列式は $\det(R) = +1$.
 - パリティ変換は離散変換で、**行列式は-1**

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -x \\ -y \\ -z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -x \\ -y \\ -z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

パリティ変換 = 鏡像 + 2次元回転

- パリティ変換は、1つの座標軸に関する鏡像変換（例えば、 $z \rightarrow -z$ ）と、その座標軸周りの180度の2次元回転であると考えることができる。
- 実際にやってみよう！

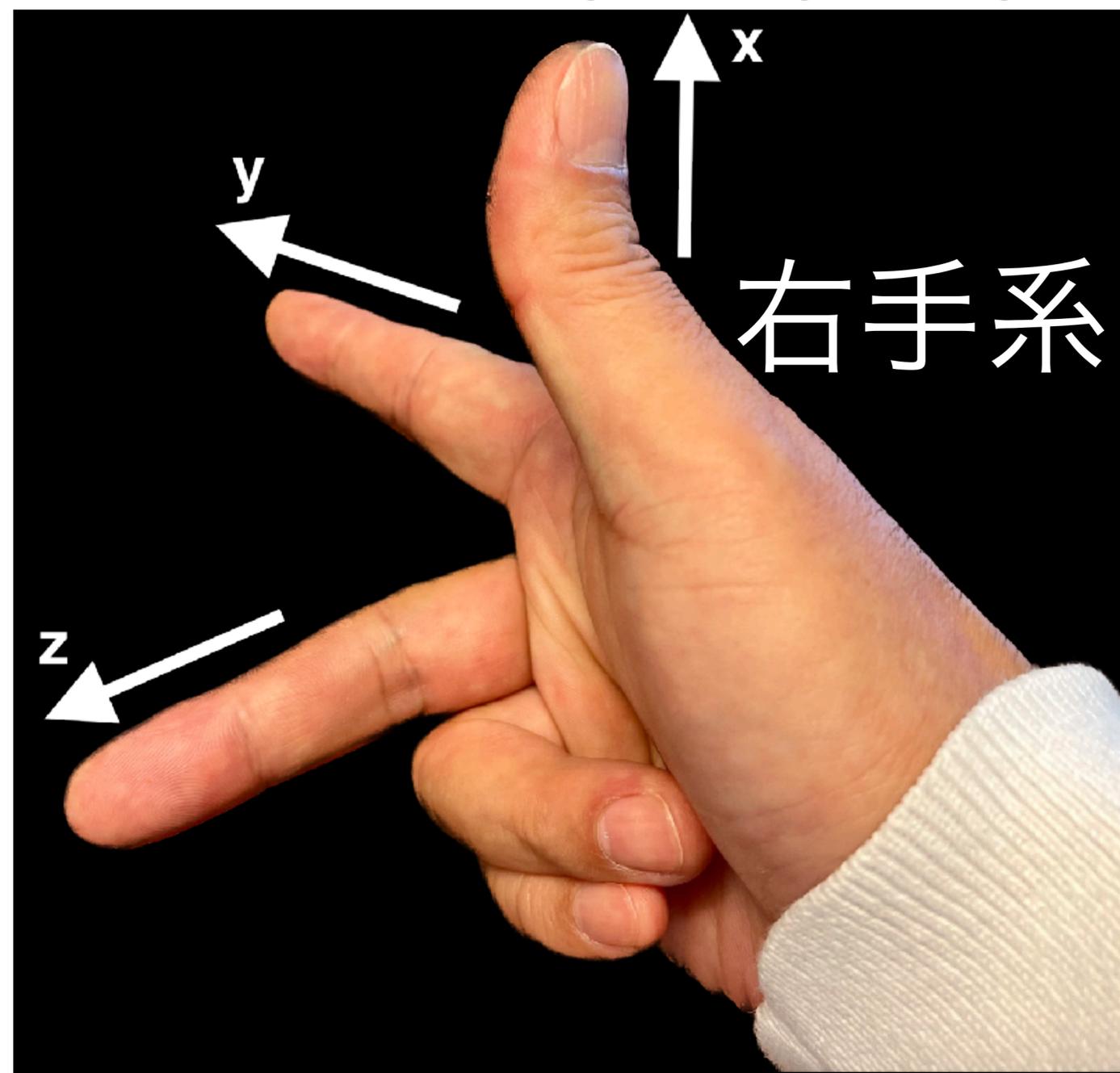


$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -x \\ -y \\ -z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$



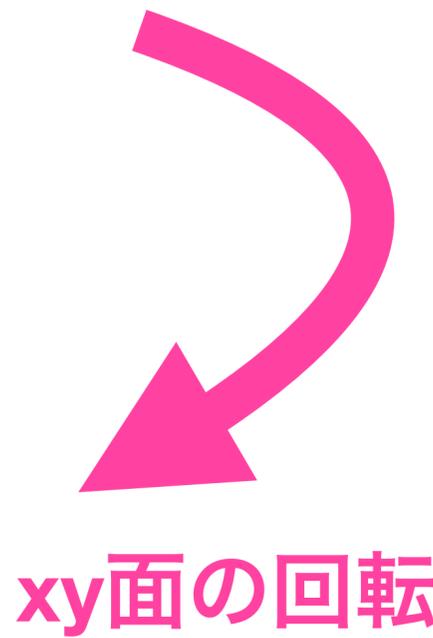
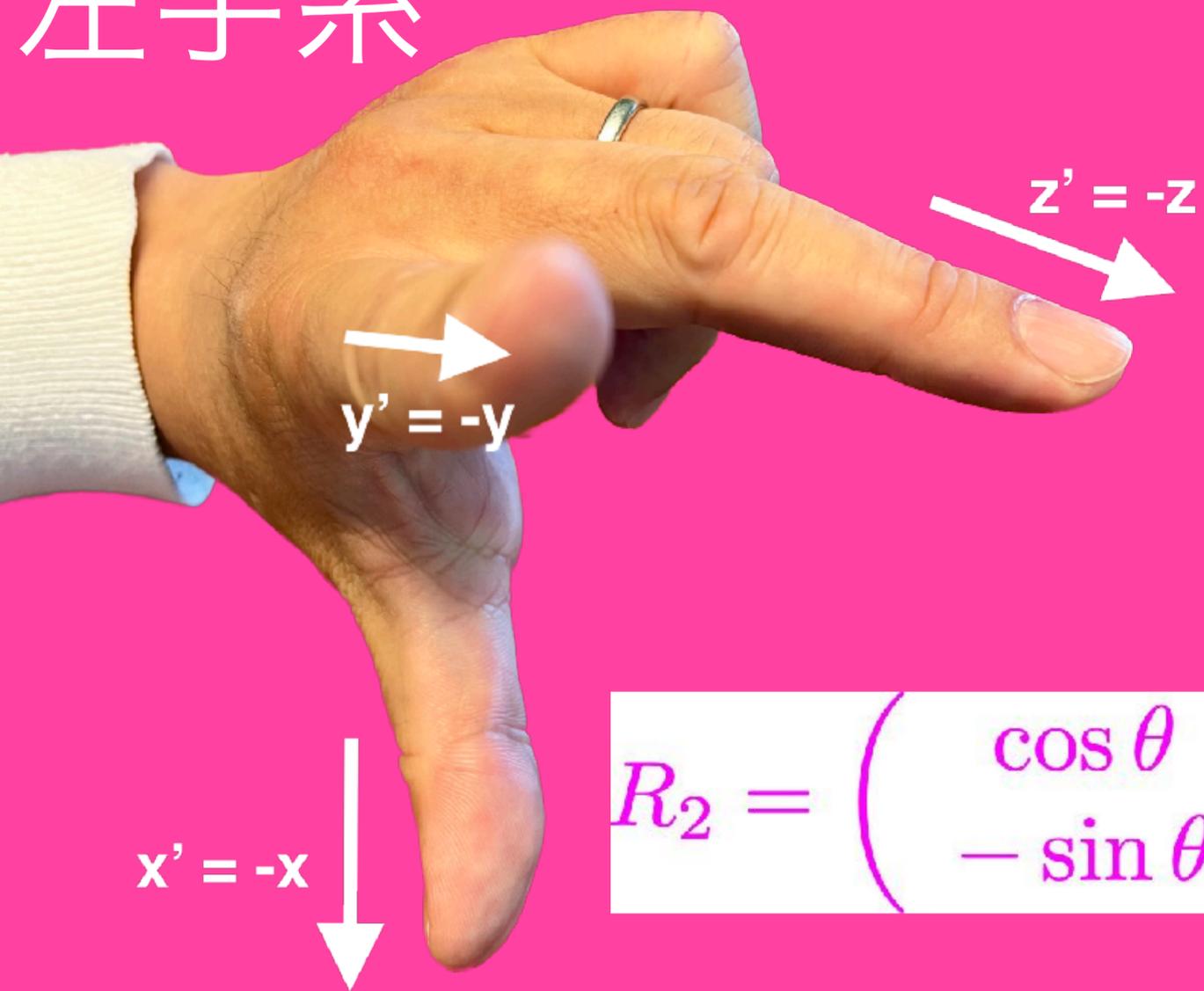
$$\longleftrightarrow$$

$$z \rightarrow z' = -z$$



$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -x \\ -y \\ -z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

左手系

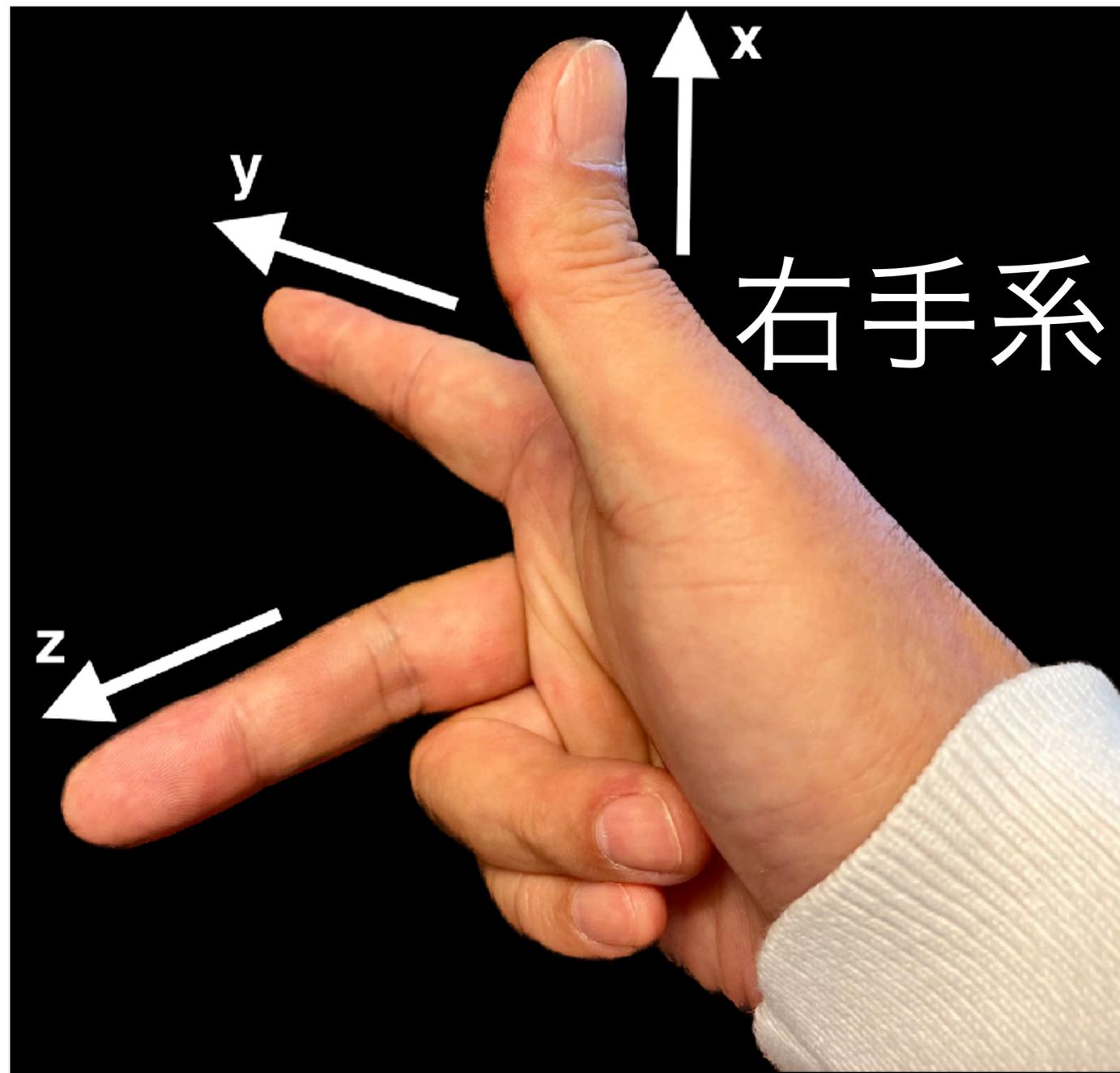


xy面の回転

$$R_2 = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

with $\theta \stackrel{10}{=} \pi$

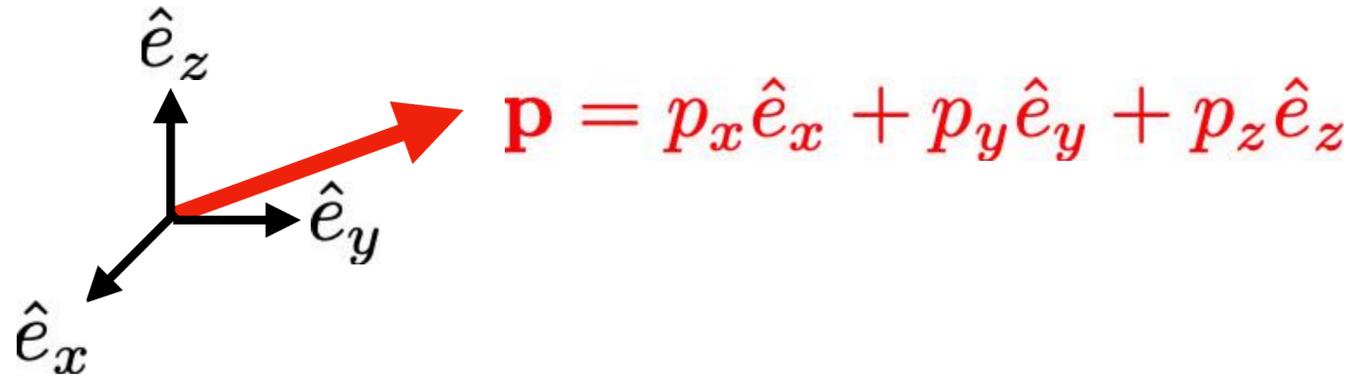
右手系



2. 擬ベクトルと擬スカラー

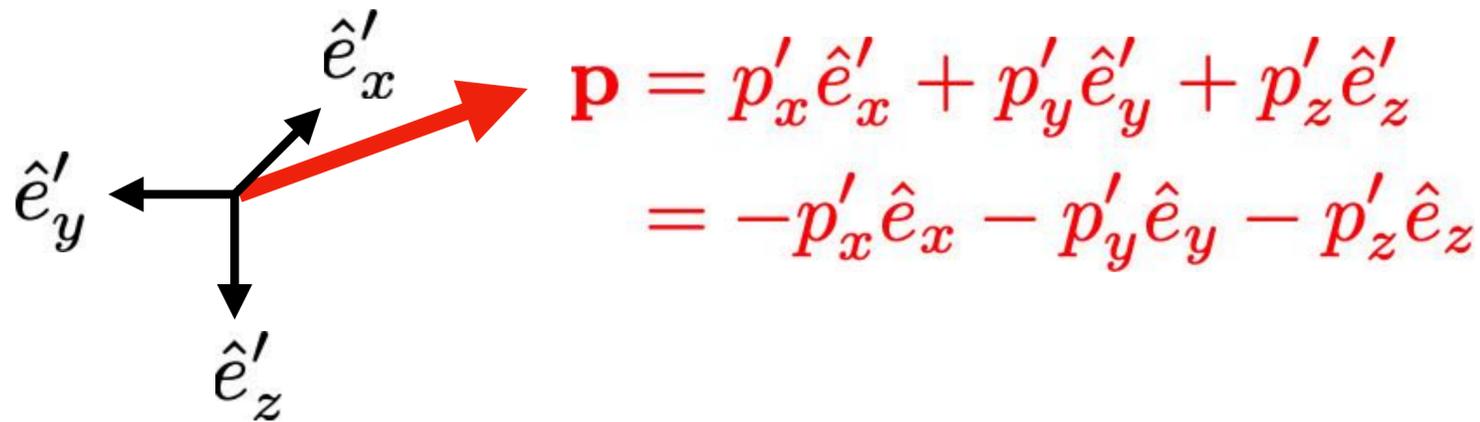
ベクトル

例：運動量や電場



$$\mathbf{p} = p_x \hat{e}_x + p_y \hat{e}_y + p_z \hat{e}_z$$

\hat{e}_i は基底単位ベクトル



$$\begin{aligned} \mathbf{p} &= p'_x \hat{e}'_x + p'_y \hat{e}'_y + p'_z \hat{e}'_z \\ &= -p'_x \hat{e}_x - p'_y \hat{e}_y - p'_z \hat{e}_z \end{aligned}$$

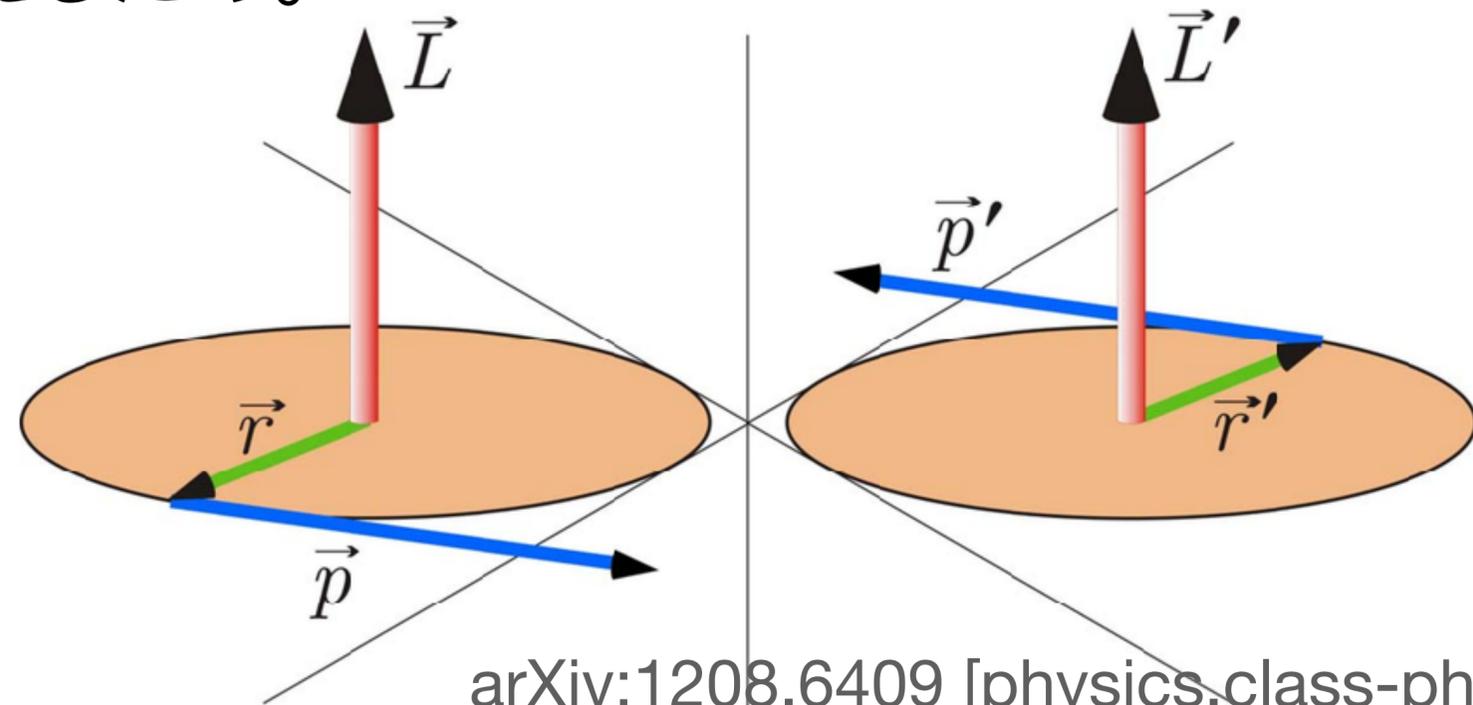
- \mathbf{p} を2つの異なる基底ベクトルを用いて展開する。
- \mathbf{p} は同じなのだから、その成分は $(p'_x, p'_y, p'_z) = (-p_x, -p_y, -p_z)$ と変換される。

擬ベクトル

例：角運動量や磁場

- 軌道角運動量 ($\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}$) は、擬ベクトル。その成分はパリティ変換に対して不変。 $(L'_x, L'_y, L'_z) = (L_x, L_y, L_z)$
- なぜなら、位置ベクトル $\mathbf{r} = (X, Y, Z)$ も運動量ベクトル $\mathbf{p} = (p_x, p_y, p_z)$ もその成分はパリティ変換に対して符号を変えるため。

$$\begin{aligned} L'_x &= Y' p'_z - Z' p'_y \\ &= (-Y)(-p_z) - (-Z)(-p_y) \\ &= L_x \end{aligned}$$



擬スカラー

パリティ対称性の探索に必要な量

- ベクトルと擬ベクトルの積は**擬スカラー**。
 - スカラーと同様に、擬スカラーは回転変換に対して不変。
 - スカラーはパリティ変換に対しても不変だが、擬スカラーは符号を変える。
- **パリティ対称性の探索の仕方**：測定量から擬スカラーを構築し、その平均値が誤差の範囲内でゼロであるかどうかを確認する。ゼロでなければパリティ対称性は破れている。
 - 例: 粒子Aの運動量と粒子Bの角運動量の積 $\mathbf{p}_A \cdot \mathbf{L}_B$ を何度も測定する。その平均値はゼロか？ ($\langle \mathbf{p}_A \cdot \mathbf{L}_B \rangle = 0?$)

3. ベータ崩壊におけるパリティ 対称性の破れの発見

Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay*

C. S. Wu, *Columbia University, New York, New York*

AND

E. AMBLER, R. W. HAYWARD, D. D. HOPPES, AND R. P. HUDSON,
National Bureau of Standards, Washington, D. C.

(Received January 15, 1957)

IN a recent paper¹ on the question of parity in weak interactions, Lee and Yang critically surveyed the experimental information concerning this question and reached the conclusion that there is no existing evidence either to support or to refute parity conservation in weak interactions. They proposed a number of experiments on beta decays and hyperon and meson decays which would provide the necessary evidence for parity conservation or nonconservation. In beta decay, one could measure the angular distribution of the electrons coming from beta decays of polarized nuclei. If an asymmetry in the



Smithsonian Institution Archives

Chien-Shiung Wu



Chen-Ning Yang

Tsung-Dao Lee

Wuの実験



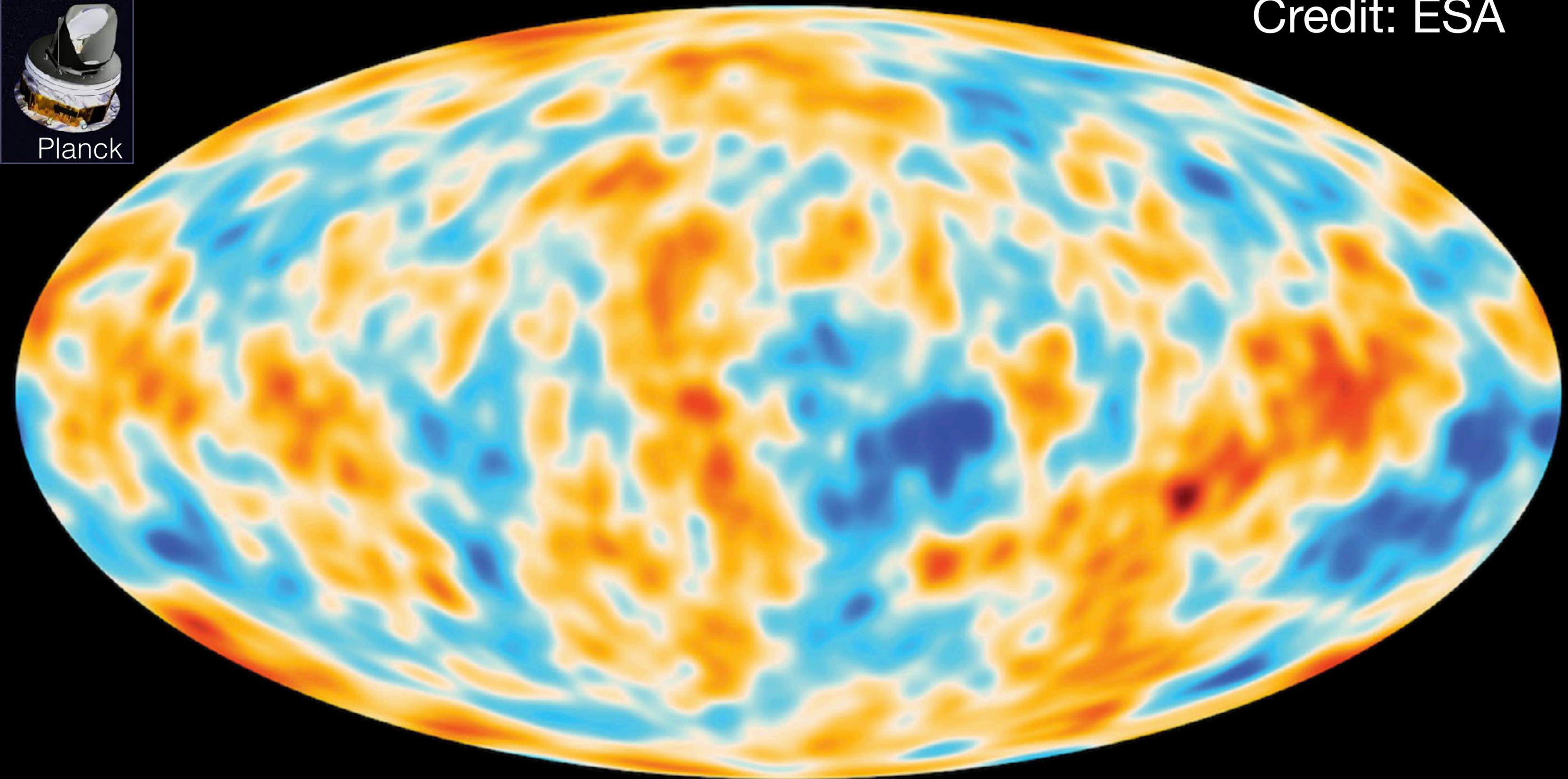
- もしパリティ対称性が破れていなければ、電子は核スピン角運動量に対して等方的に放出されるはず。すなわち、 $\langle \mathbf{p}_e \cdot \mathbf{J} \rangle = 0$ 。
- しかし、測定されたのは $\langle \mathbf{p}_e \cdot \mathbf{J} \rangle \neq 0$ 。ベータ崩壊はパリティ対称性を破る。

4. CMBにおけるパリティ対称性の破れの兆候

Credit: ESA



Planck

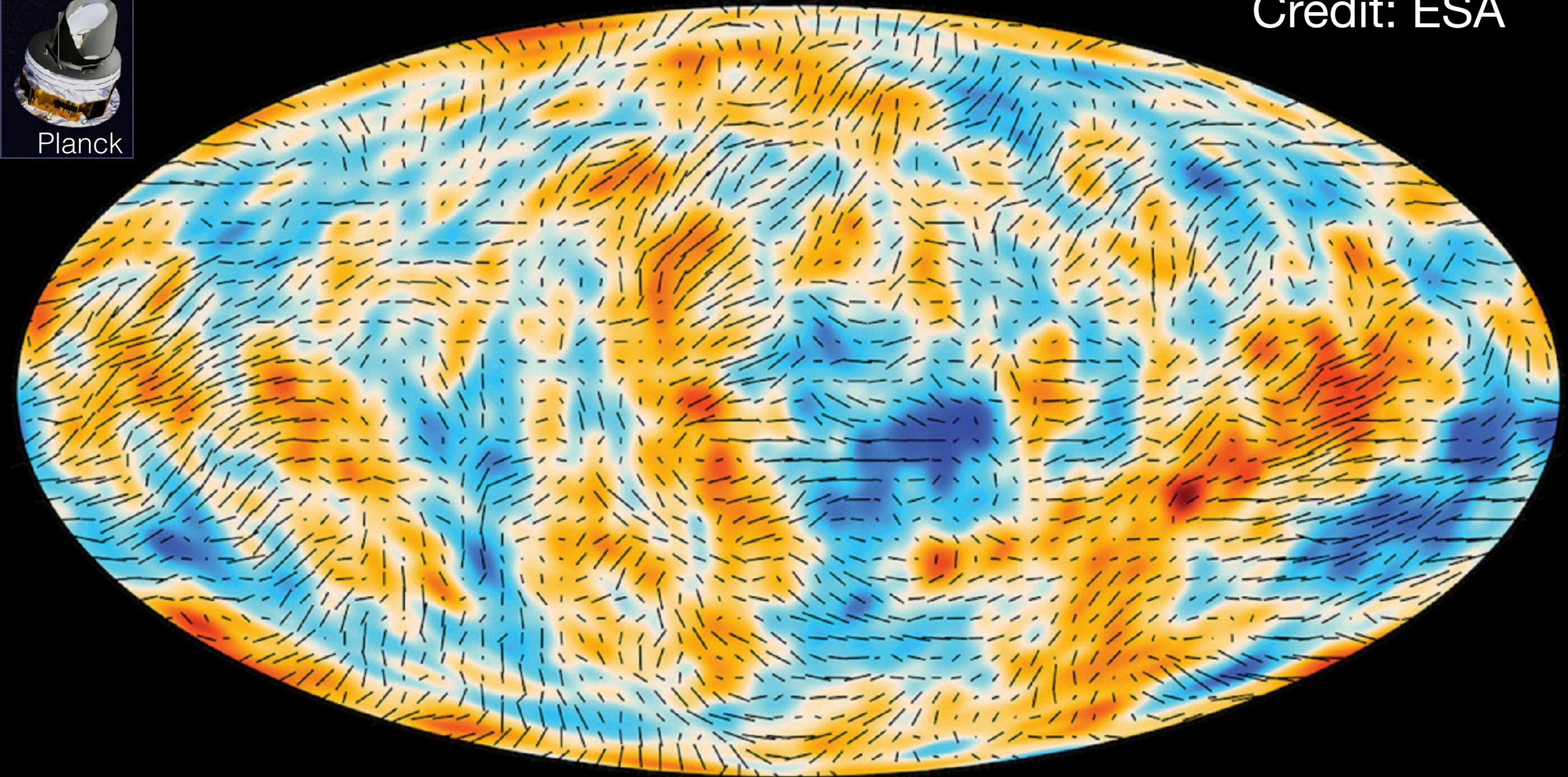


Temperature (smoothed)

Credit: ESA



Planck

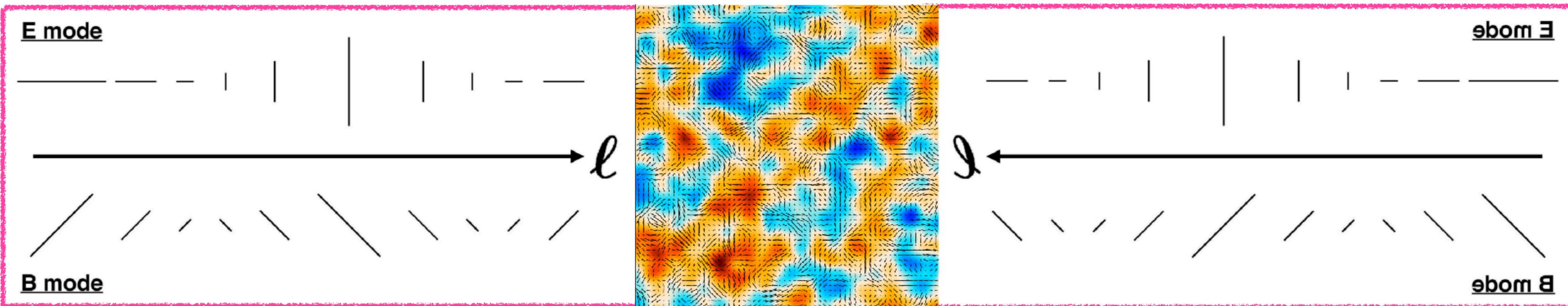


Temperature (smoothed) + Polarisation

擬スカラー: EB相関

ポイント

- CMBの偏光を記述する場合は、**パリティ変換の固有状態** (EモードとBモード) に分解できる。



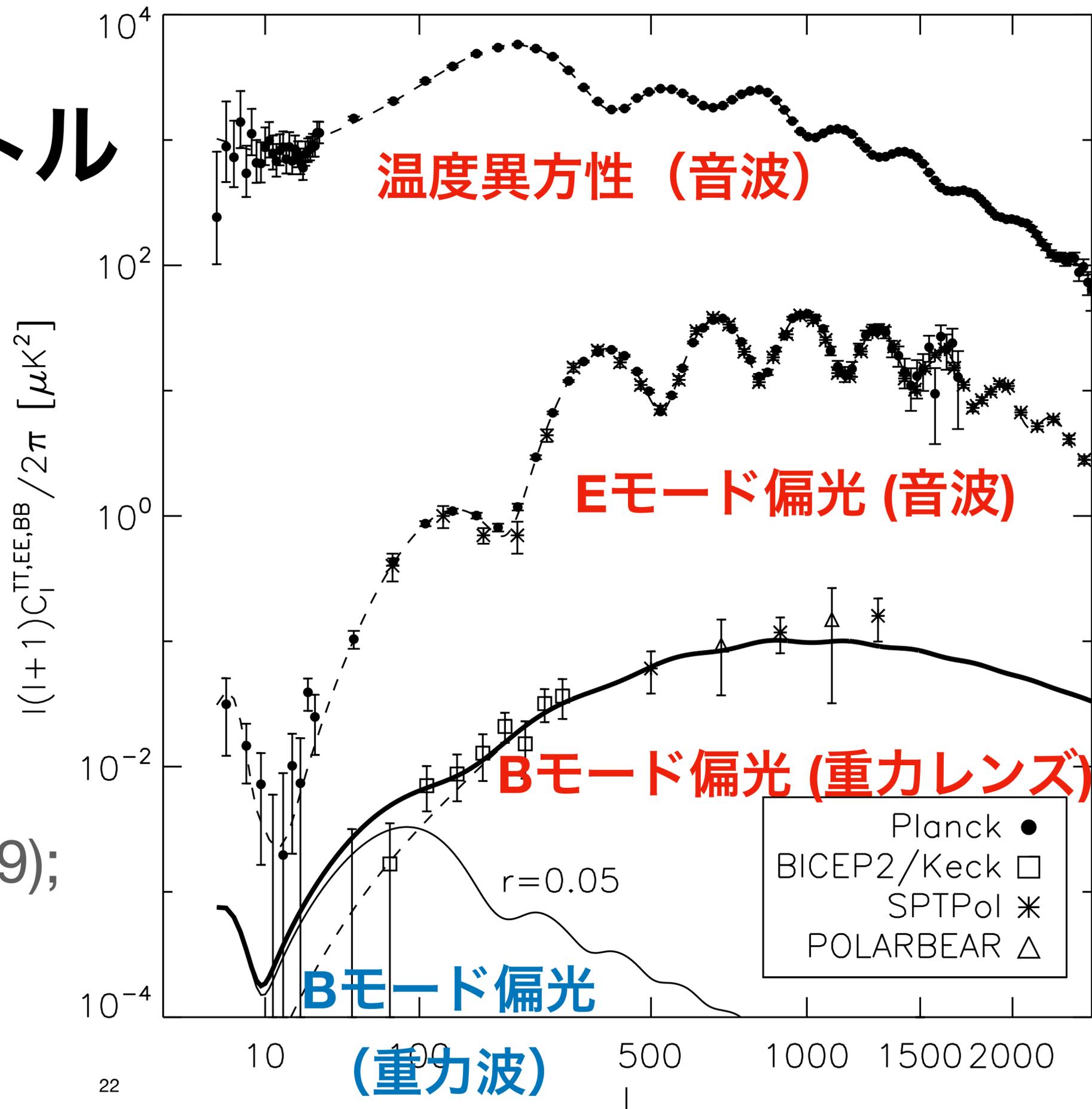
- EモードとBモード偏光はパリティ変換に対して符号が異なるので、**その積**
「EB相関」は擬スカラー量である！
- **パリティ対称性が破れていなければ、EB相関の全天平均は (誤差の範囲内で) ゼロになるはず。**

CMBのパワースペクトル

30年間の研究成果

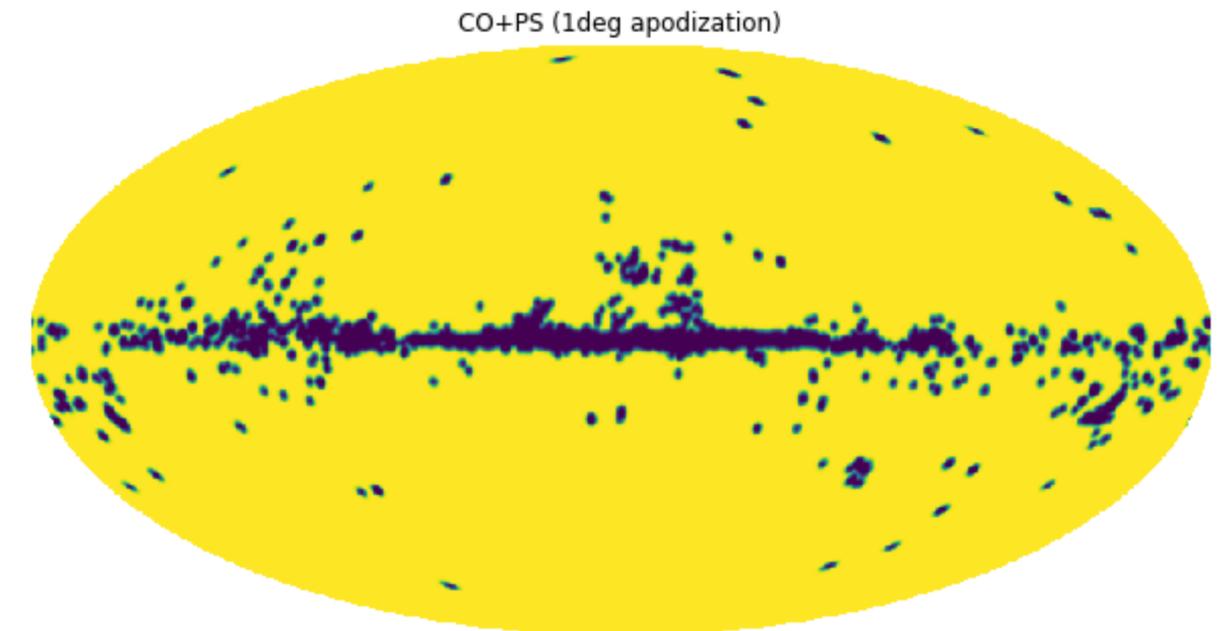
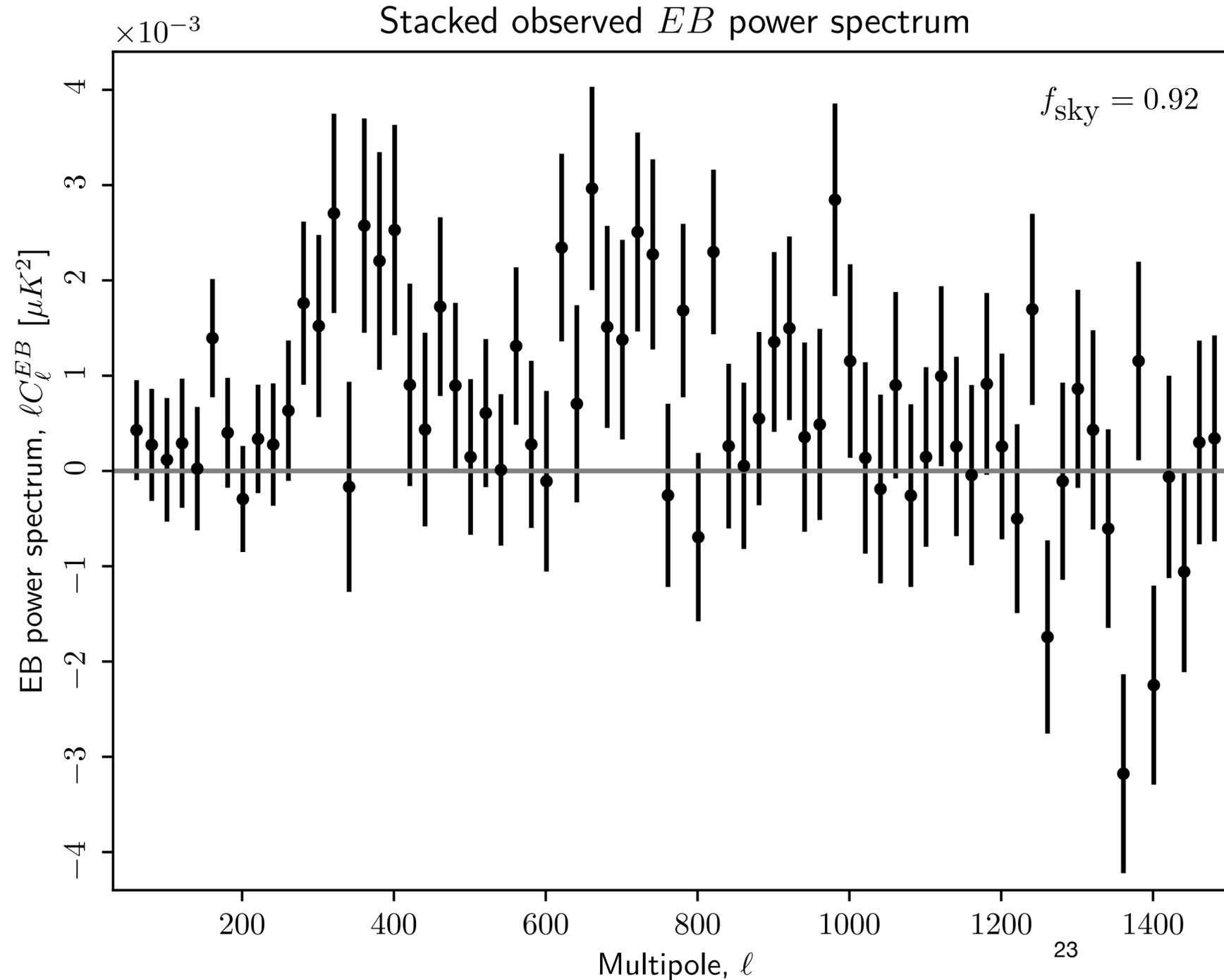
- これはCMB業界でよく使われる図だが、示されているのはスカラー量 (TT, TE, EE, BB) のみ。
- パリティ対称性の破れはTBとEBに現れる。

Lue, Wang, Kamionkowski (1999);
Feng et al. (2005, 2006)



EB相関 (WMAP+Planck)

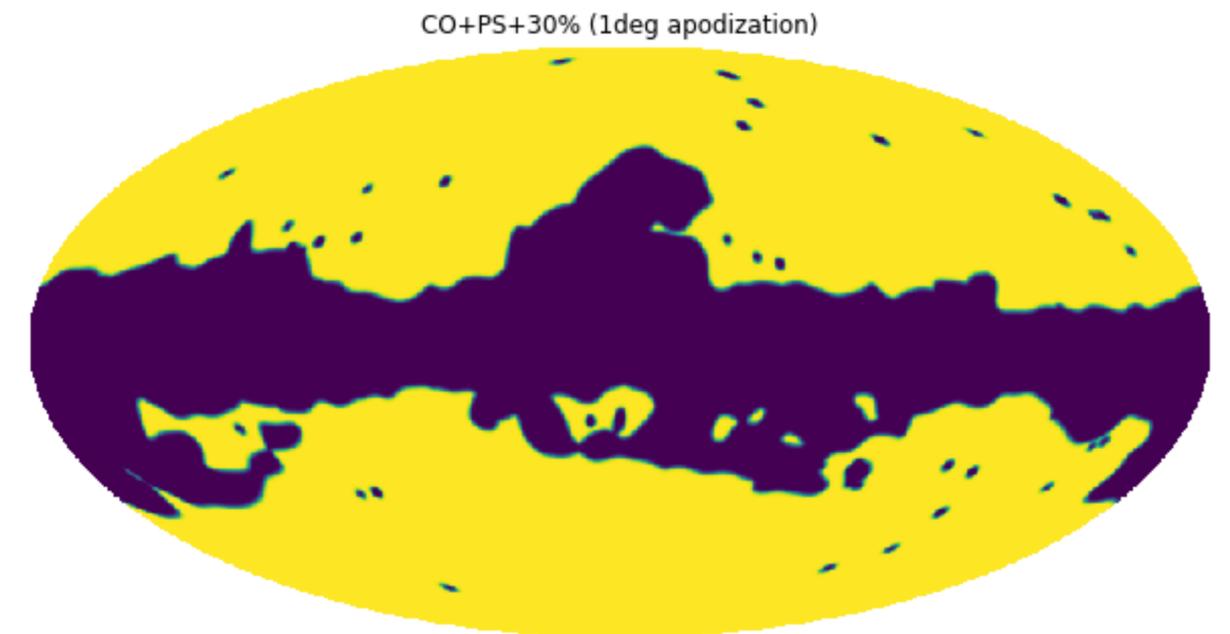
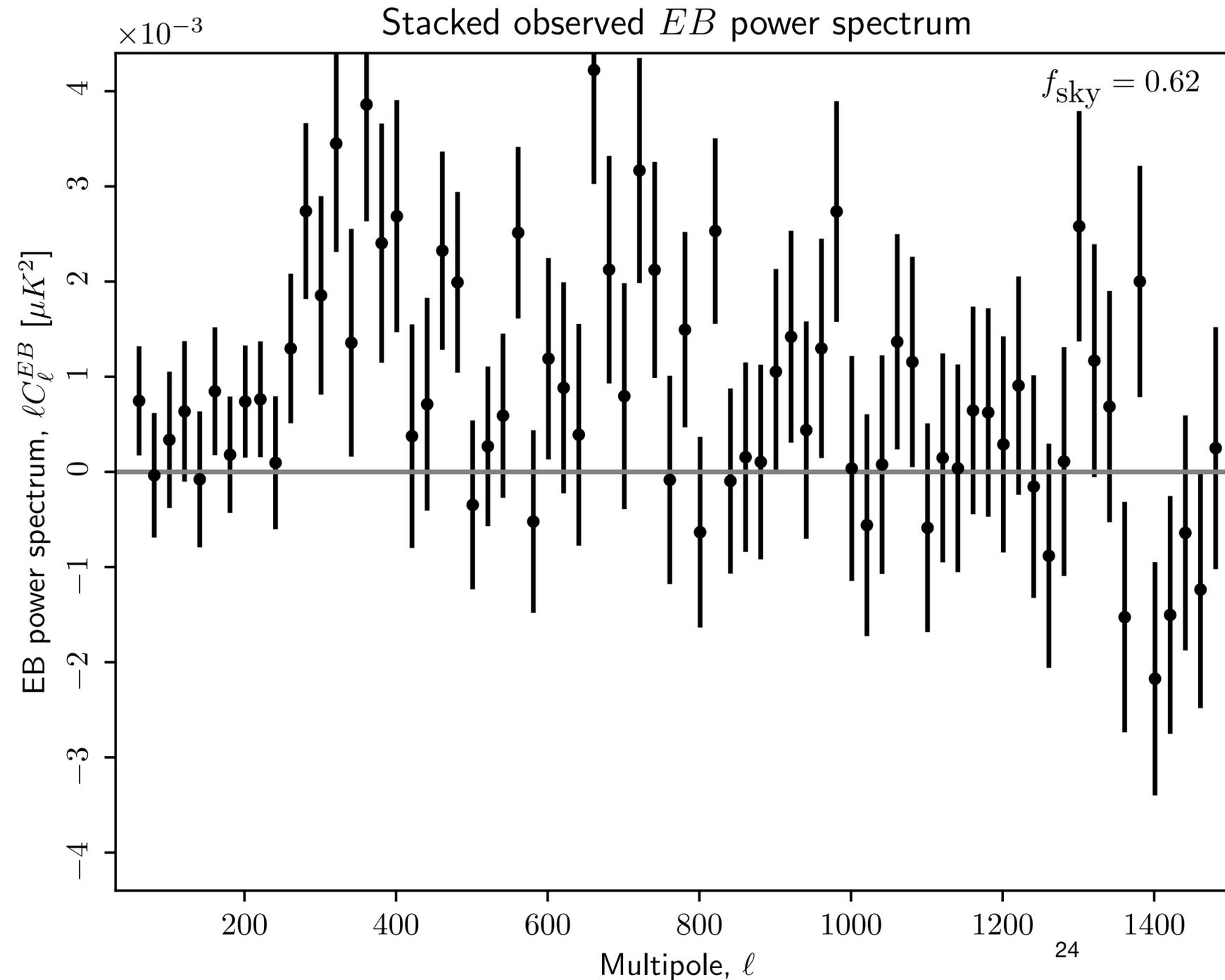
ほぼ全天のデータ (全天の92%を使用)



- $\chi^2 = 125.5$ for DOF=72
- 何かが見えている！

銀河面をマスクしても結果は同じ

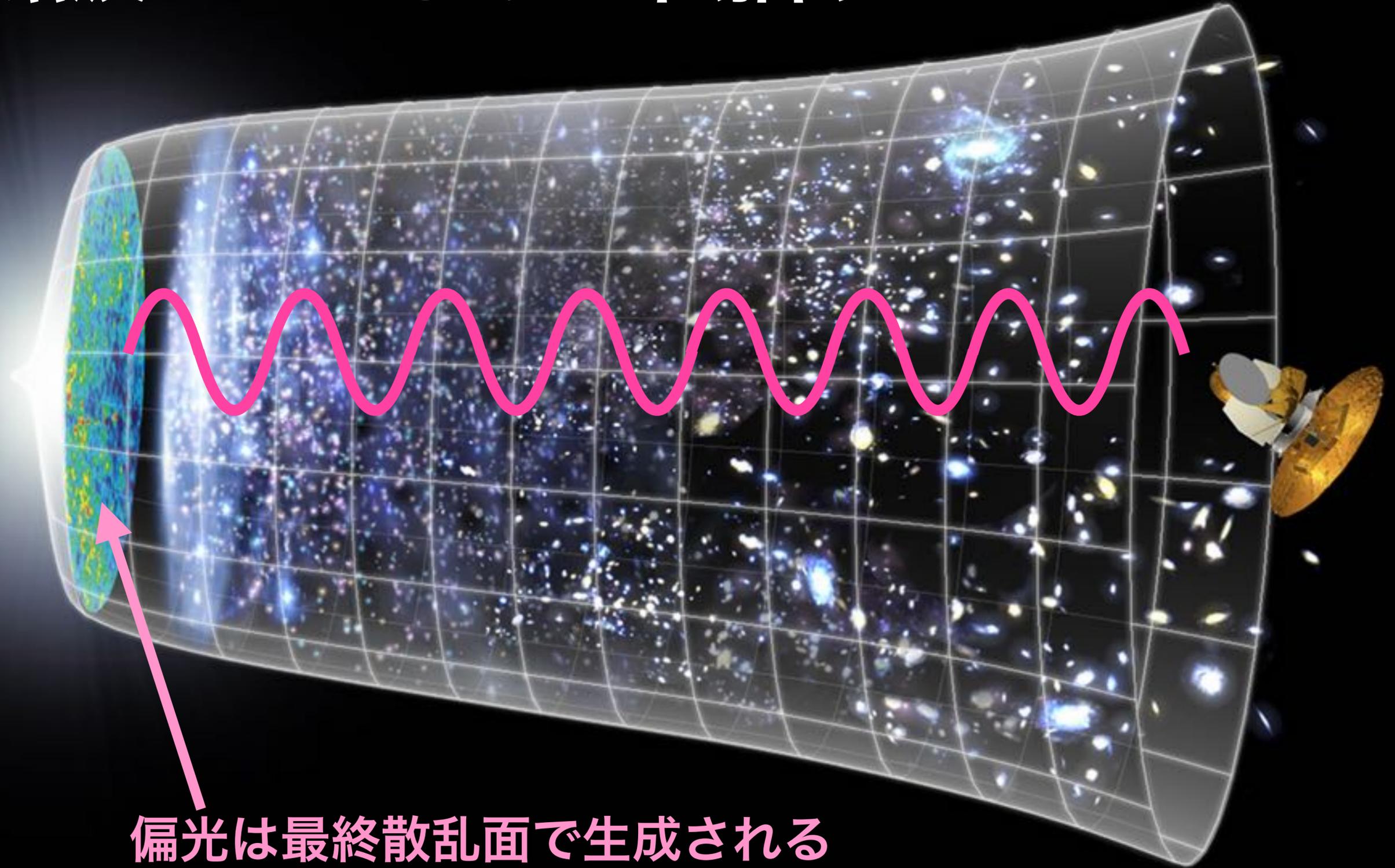
全天の62%を使用



- $\chi^2 = 138.4$ for DOF=72
- 銀河面の放射では説明できない。

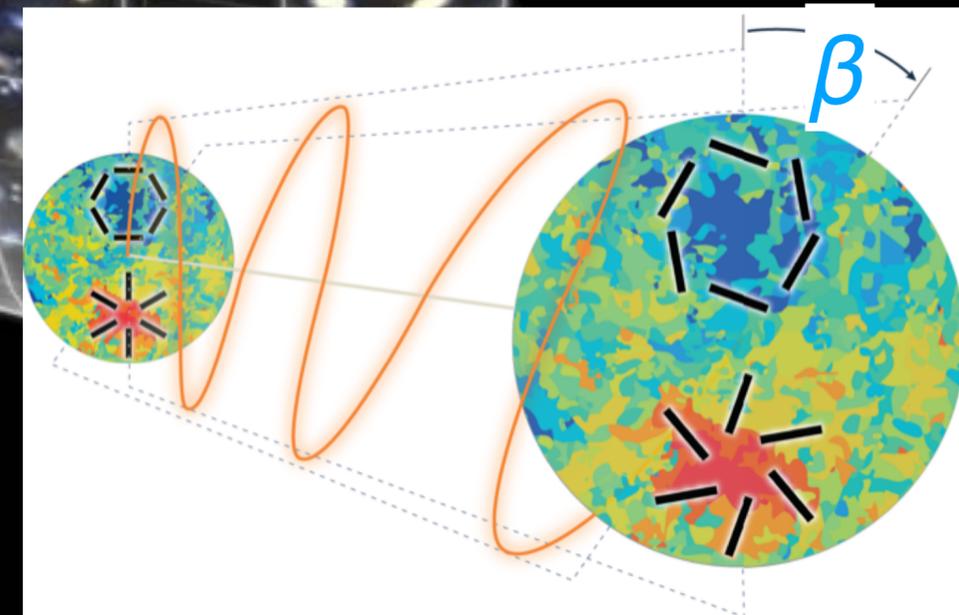
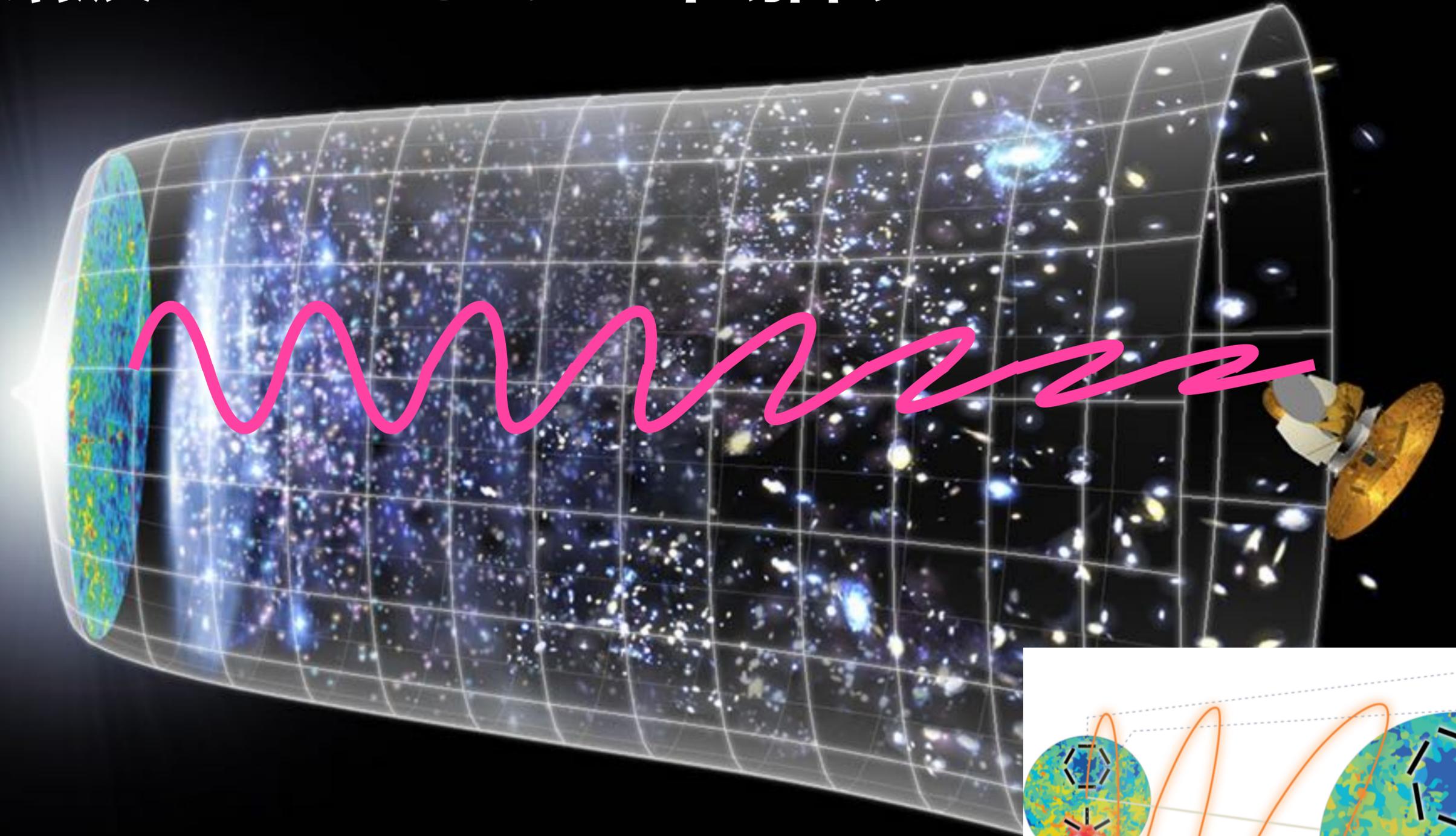
5. 宇宙複屈折効果: 偏光面の回転

CMBの電磁波はどのように伝播するか？



偏光は最終散乱面で生成される

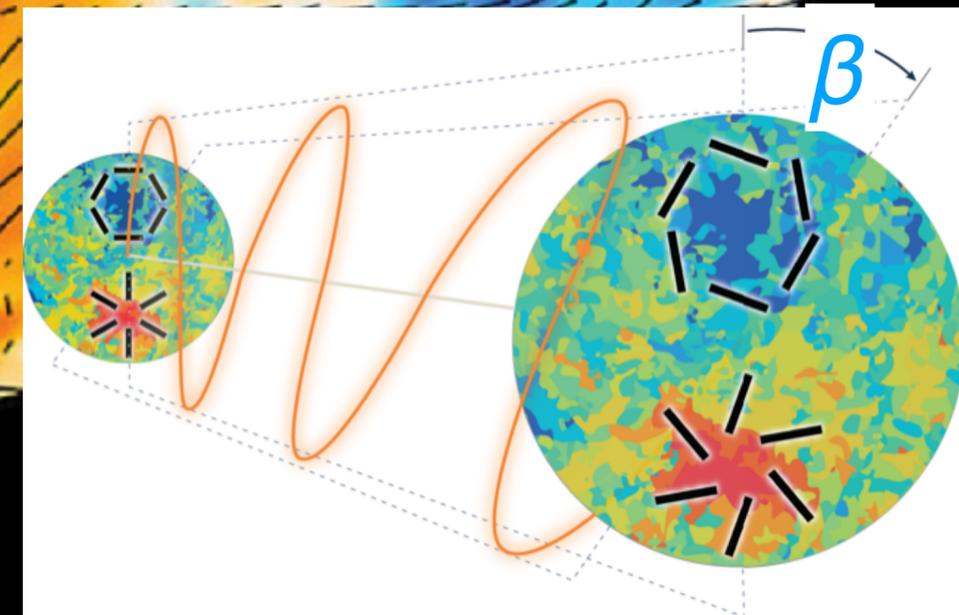
CMBの電磁波はどのように伝播するか？



“宇宙複屈折効果”

もしCMBの偏光面が全天で一様に回転していれば、パリティ対称性の破れの証拠となる。

Temperature (smoothed) + Polarisation



偏光面の回転によって、EモードとBモードは混合される

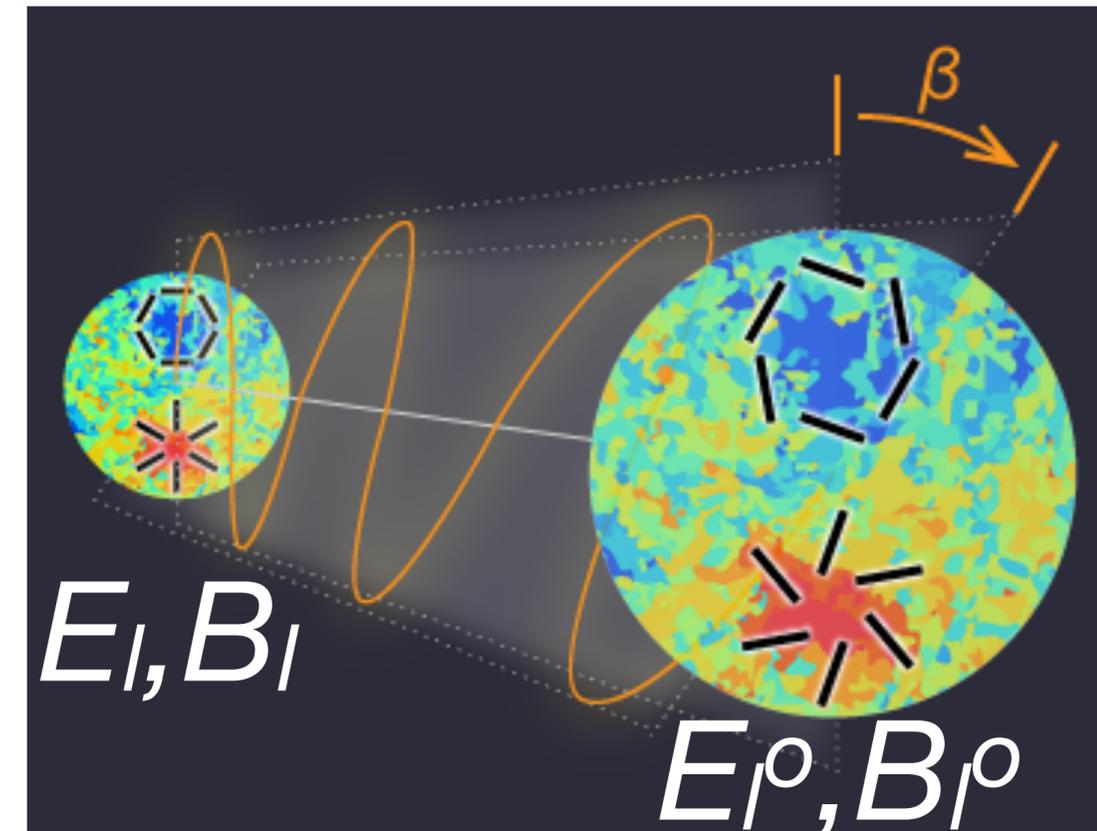
- 偏光面が角度 β で回転すると、観測されるEモードとBモード (E_l°, B_l°) は回転前のものと

$$E_l^\circ \pm iB_l^\circ = (E_l \pm iB_l)e^{\pm 2i\beta}$$

- のように関係する。すなわち

$$E_l^\circ = E_l \cos(2\beta) - B_l \sin(2\beta)$$

$$B_l^\circ = E_l \sin(2\beta) + B_l \cos(2\beta)$$

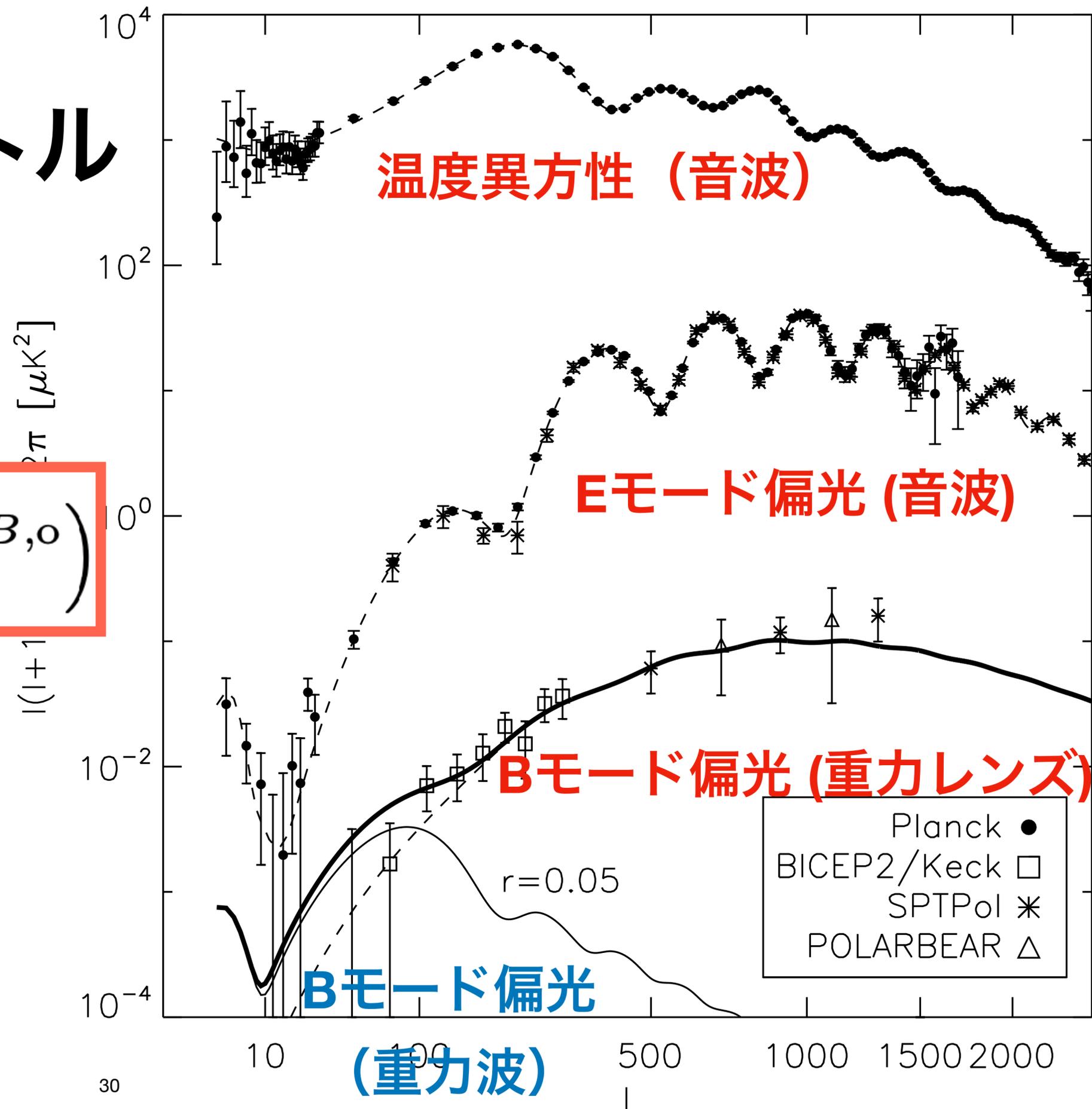


CMBのパワースペクトル

- EB相関は、**EEとBB相関の差**で与えられる。

$$C_{\ell}^{EB,o} = \frac{\tan(4\beta)}{2} \left(C_{\ell}^{EE,o} - C_{\ell}^{BB,o} \right)$$

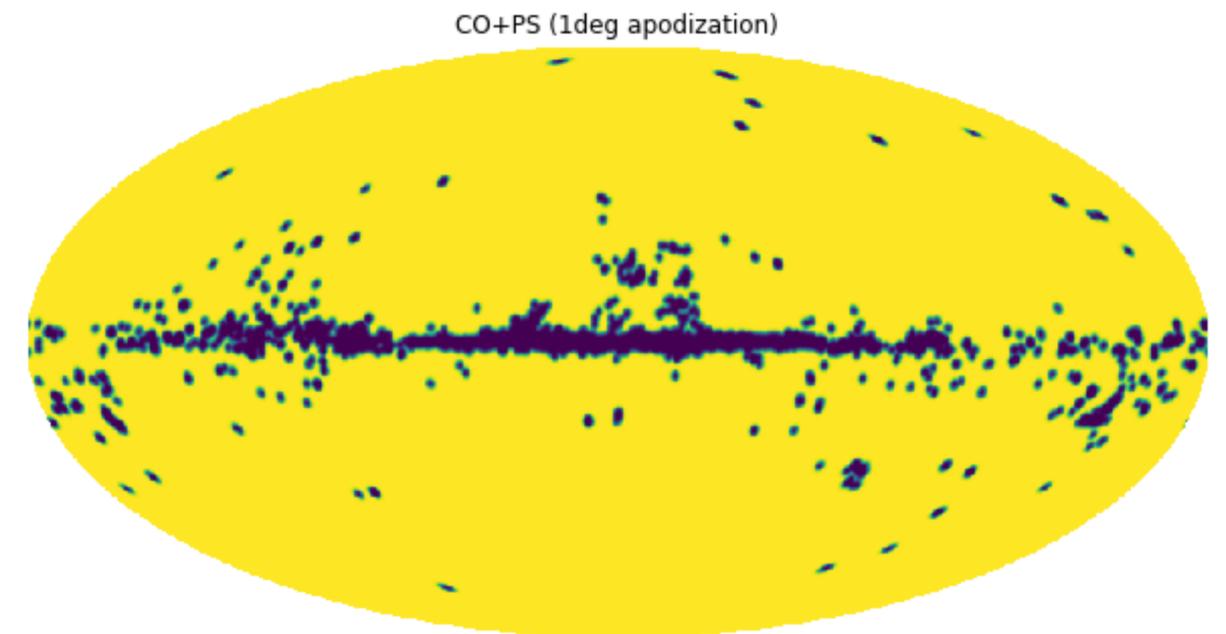
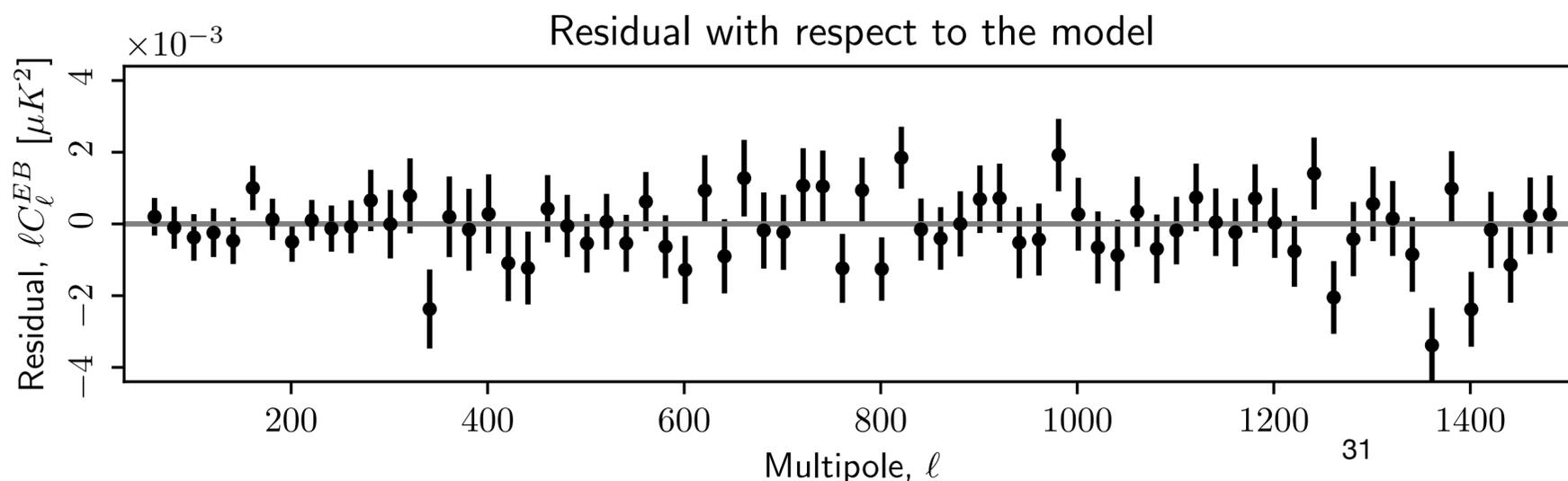
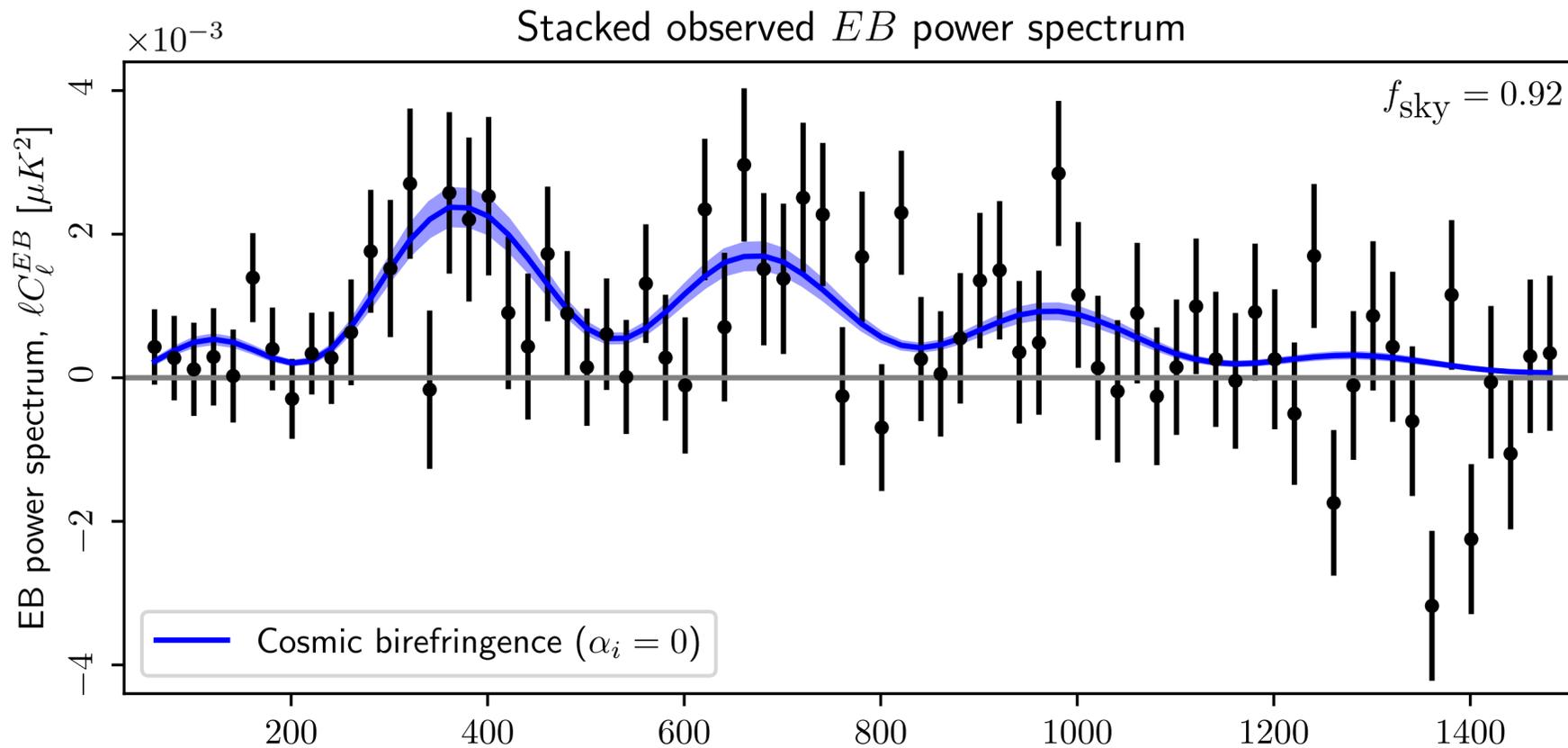
- $EE \gg BB$ なので、**EB相関はEE相関のように見えるはず。**



宇宙複屈折効果で説明できる(?)

ほぼ全天のデータ (全天の92%を使用)

$$C_{\ell}^{EB,o} = \frac{\tan(4\beta)}{2} (C_{\ell}^{EE,o} - C_{\ell}^{BB,o})$$

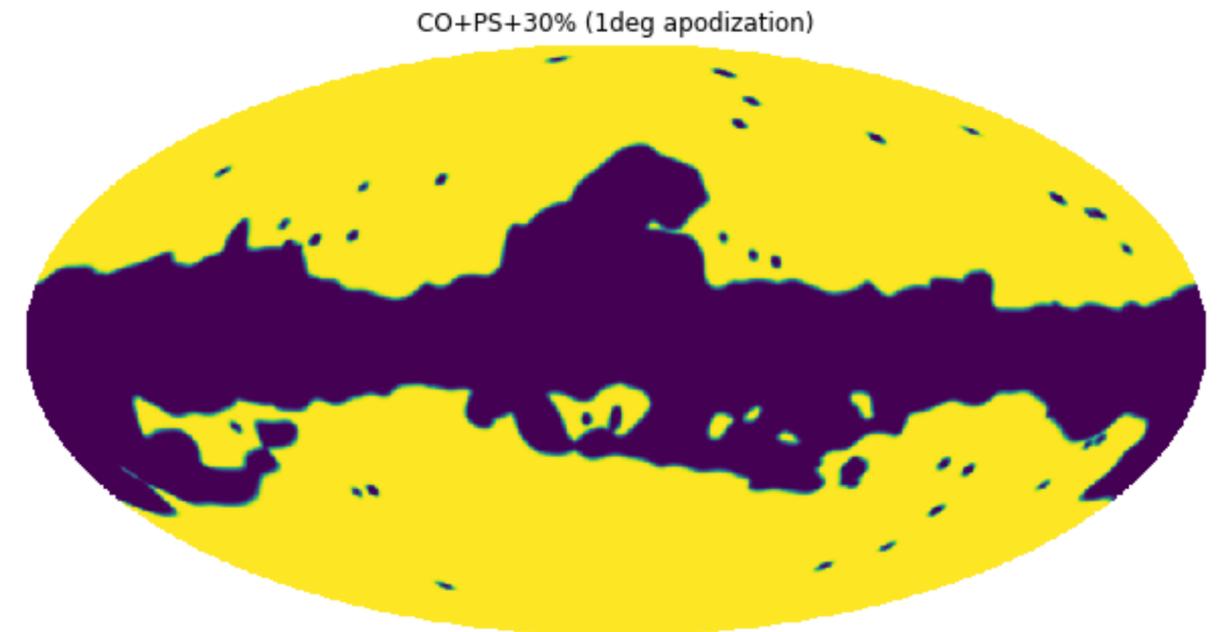
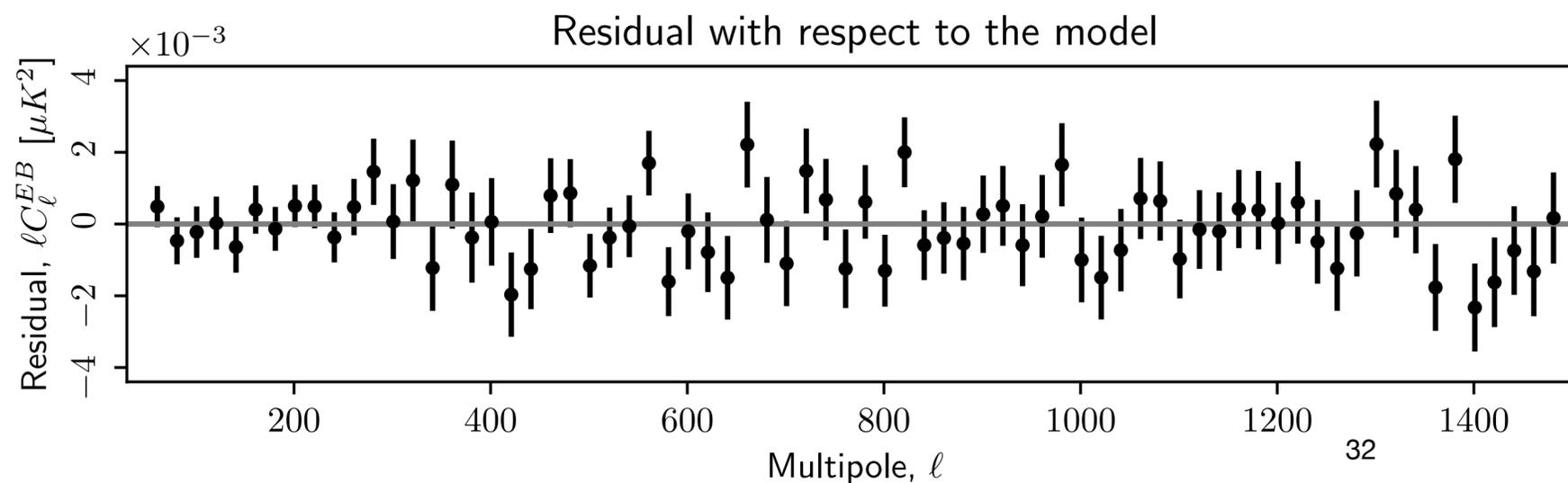
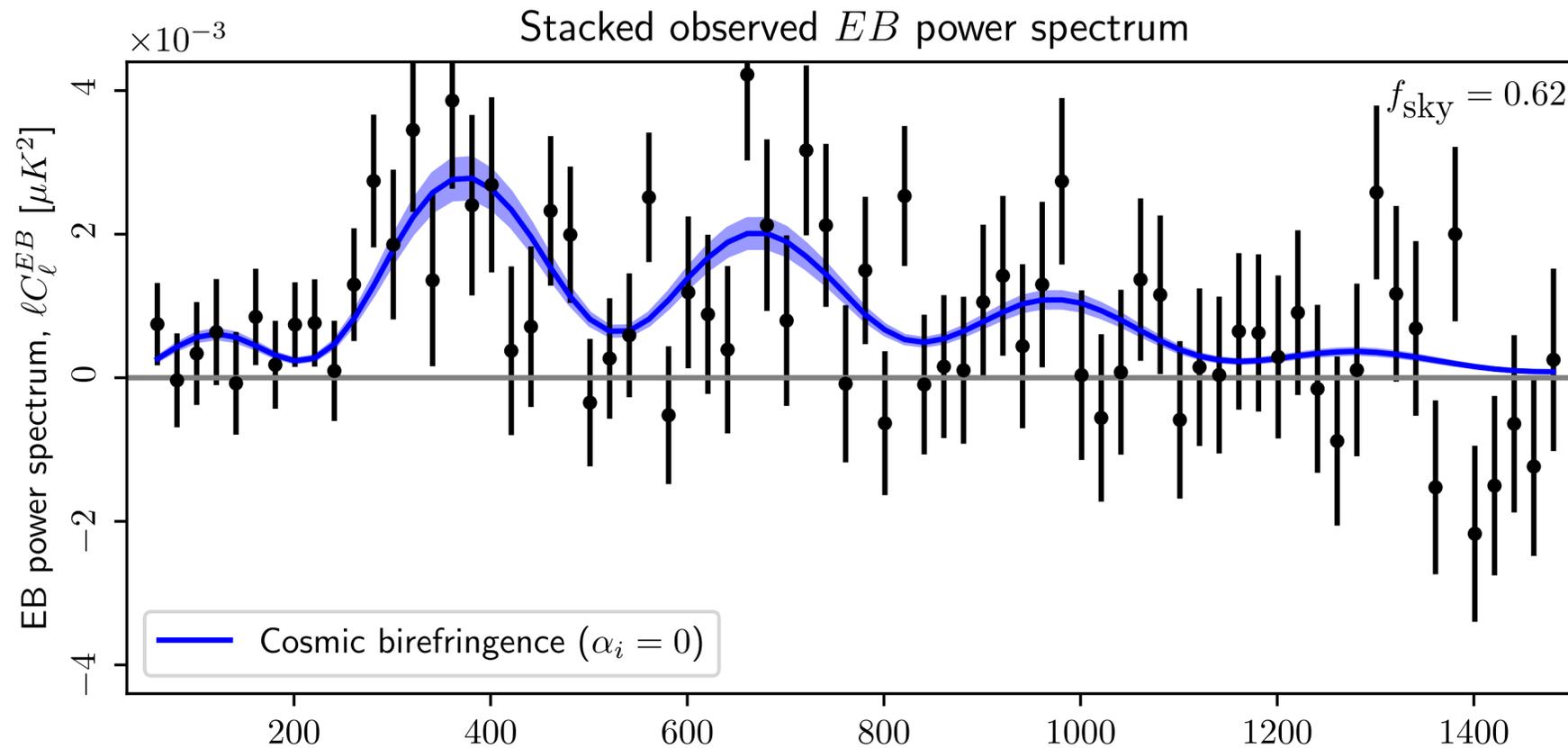


- $\beta = 0.288 \pm 0.032$ deg
- $\chi^2 = 66.1$ for DOF=71
- 良くフィットできる。
- 統計的有意性は 9σ !

銀河面をマスクしても結果は同じ

全天の62%を使用

$$C_{\ell}^{EB,o} = \frac{\tan(4\beta)}{2} (C_{\ell}^{EE,o} - C_{\ell}^{BB,o})$$



- $\beta = 0.330 \pm 0.035$ deg
- $\chi^2 = 64.5$
- 銀河面の放射では説明できない。

偏光角度のミスキャリブレーション

宇宙複屈折効果か、検出器の効果か？



- 偏光面が回転しているように見えるのは、検出器が感度がある偏光方向を理解できていないだけかもしれない？
- 検出器が感度がある偏光方向が角度 α だけ異なる場合、EB相関から測定されるのは2つの角度の和の $\alpha+\beta$ 。

解決策: 銀河面放射を用いて
検出器の偏光方向を決める



ESA's Planck

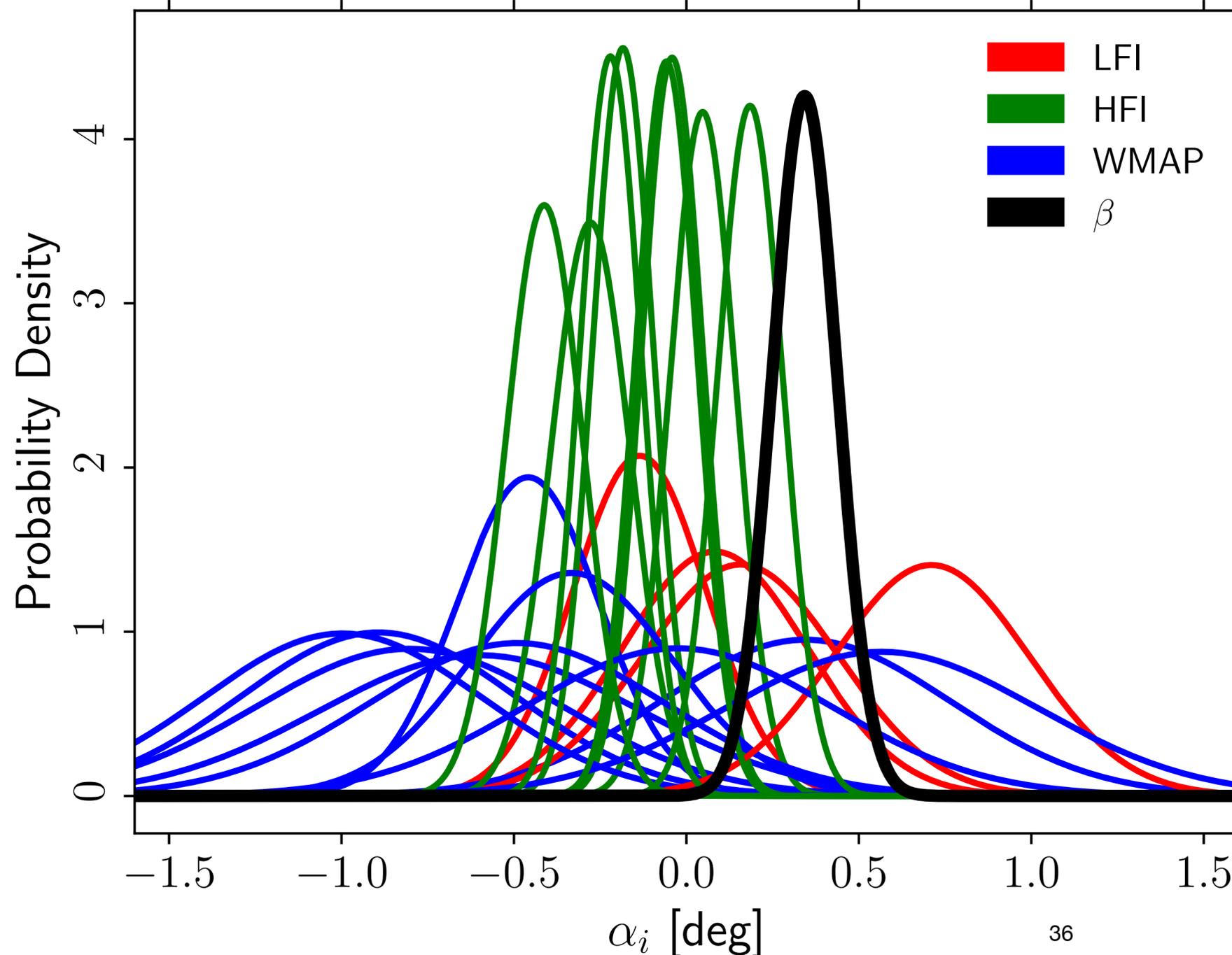
銀河系内ダストからの放射の偏光

「すぐそこ」で発せられた光なので、宇宙複屈折効果の影響は小さいはず。

銀河系内ダストからの放射の偏光から推定された銀河系内磁場の方向を示す図

ミスキャリブレーション角度 (WMAP and Planck)

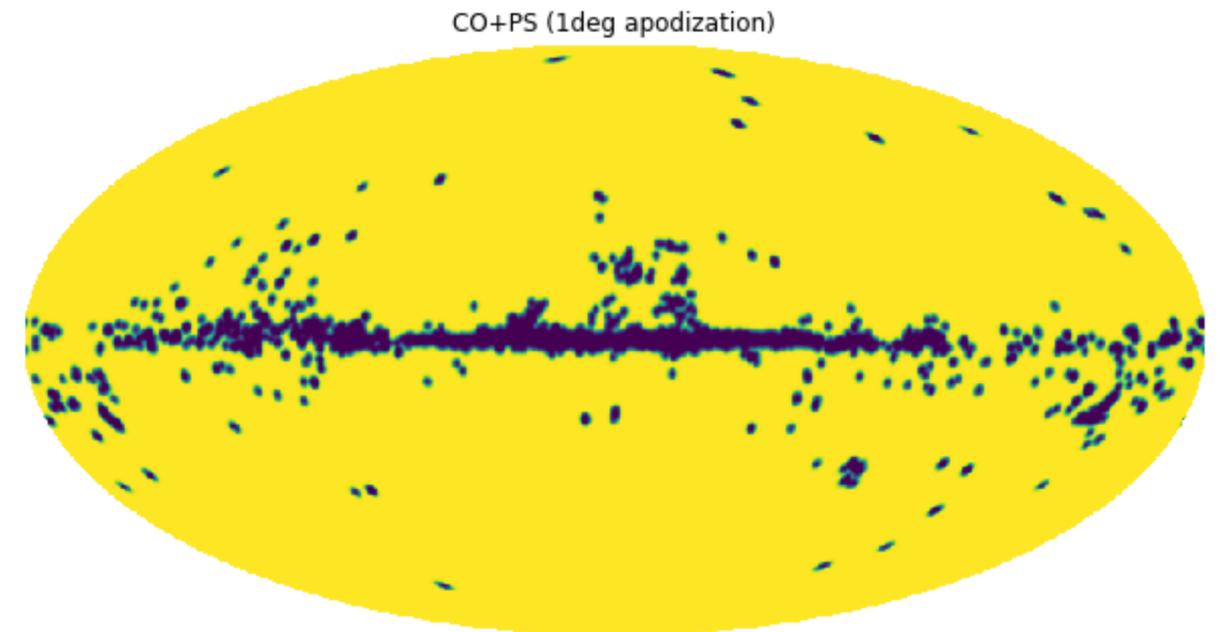
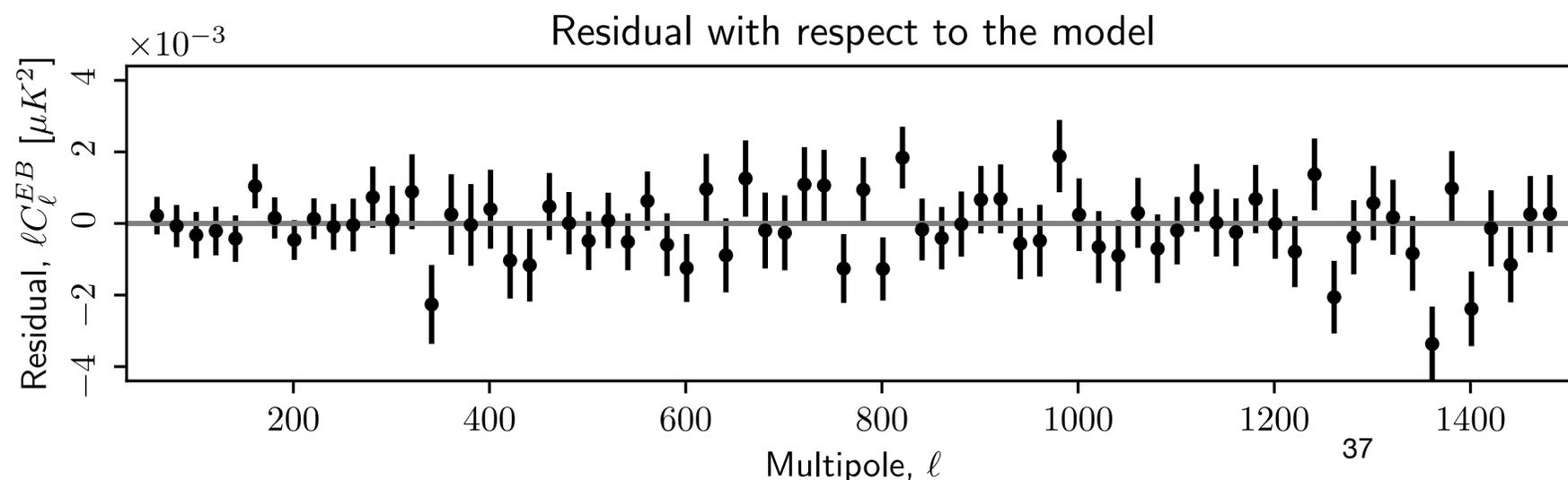
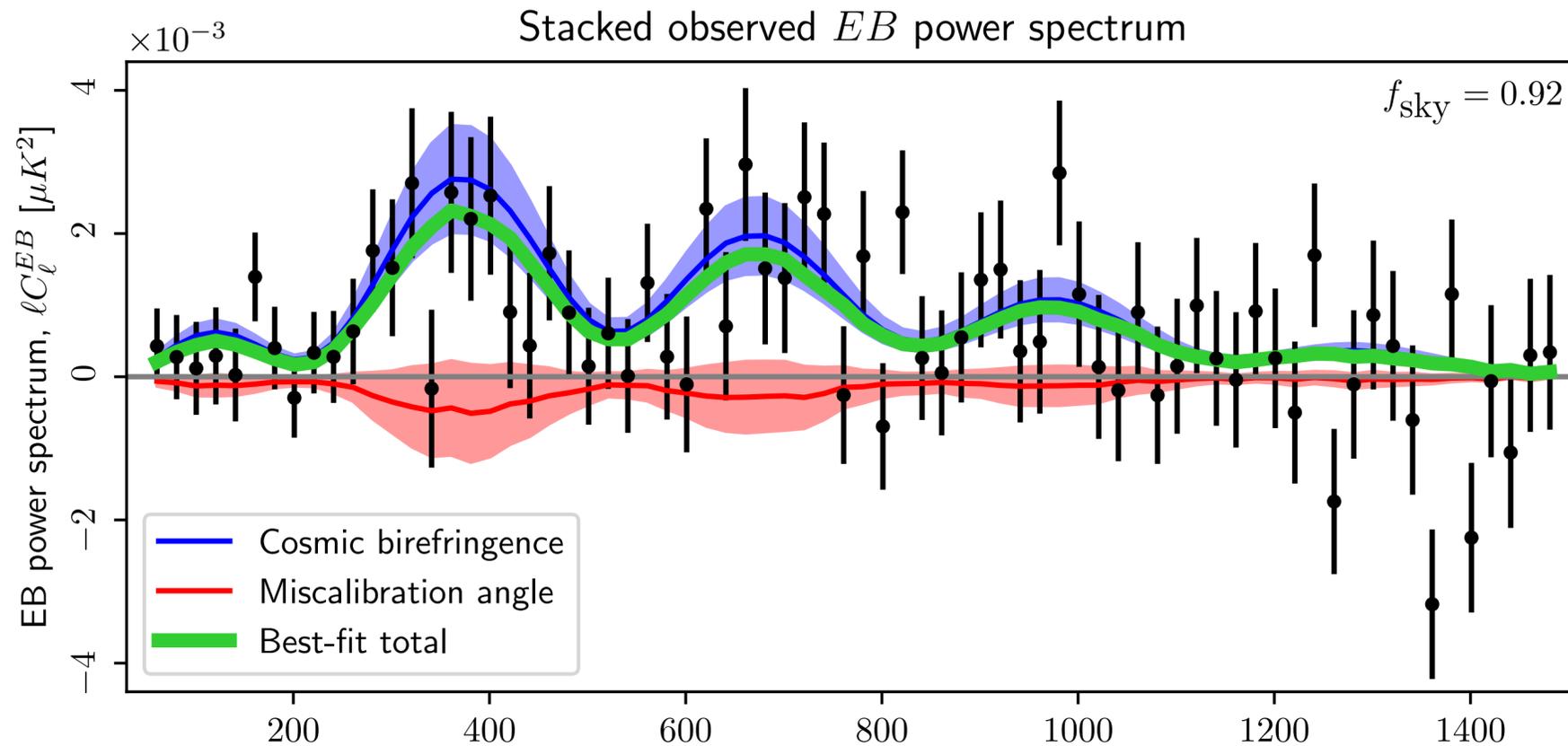
ほぼ全天のデータ (全天の92%を使用)



- 推定されたミスキャリブレーション角度は、地上のキャリブレーションデータの精度と無矛盾。
- 1.5度 (WMAP)
- 1度 (Planck)
- 異なる検出器のミスキャリブレーション角度は独立なので、それらを全てを使えばミスキャリブレーションの効果は相殺される。

宇宙複屈折効果で説明できる！ (WMAP+Planck)

ほぼ全天のデータ (全天の92%を使用)



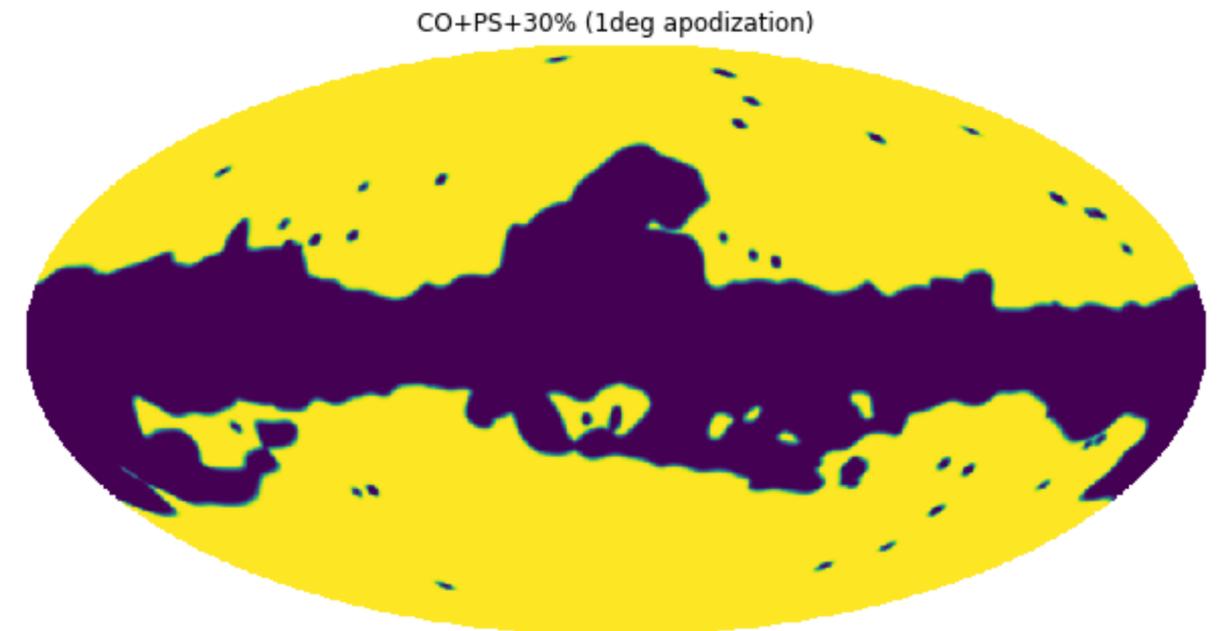
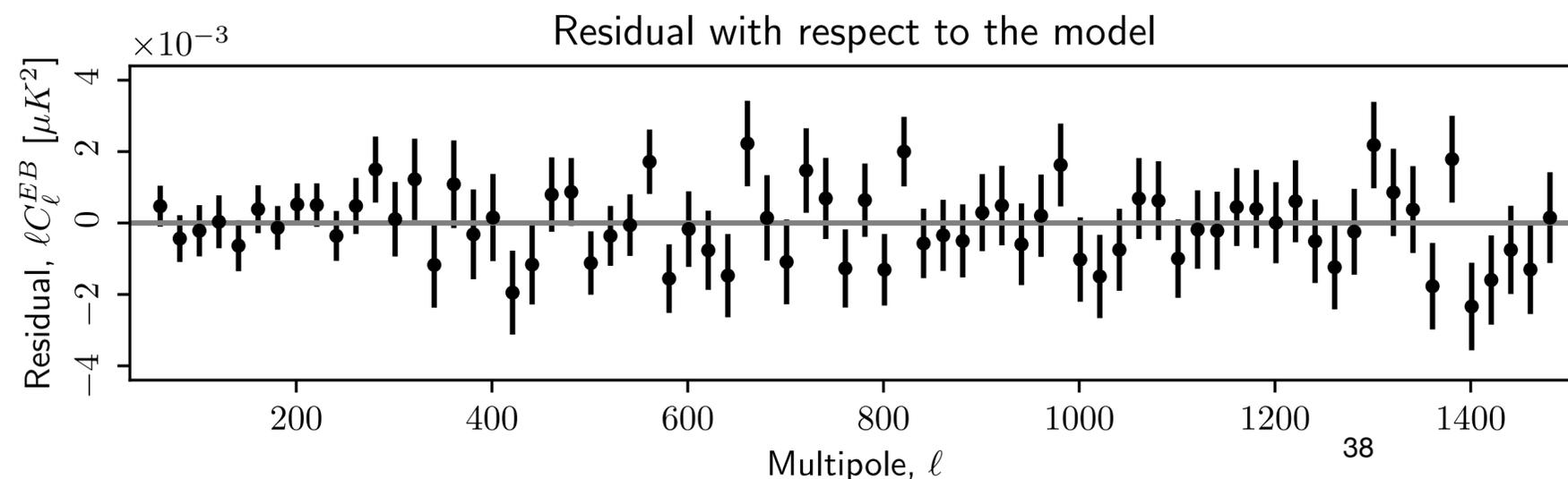
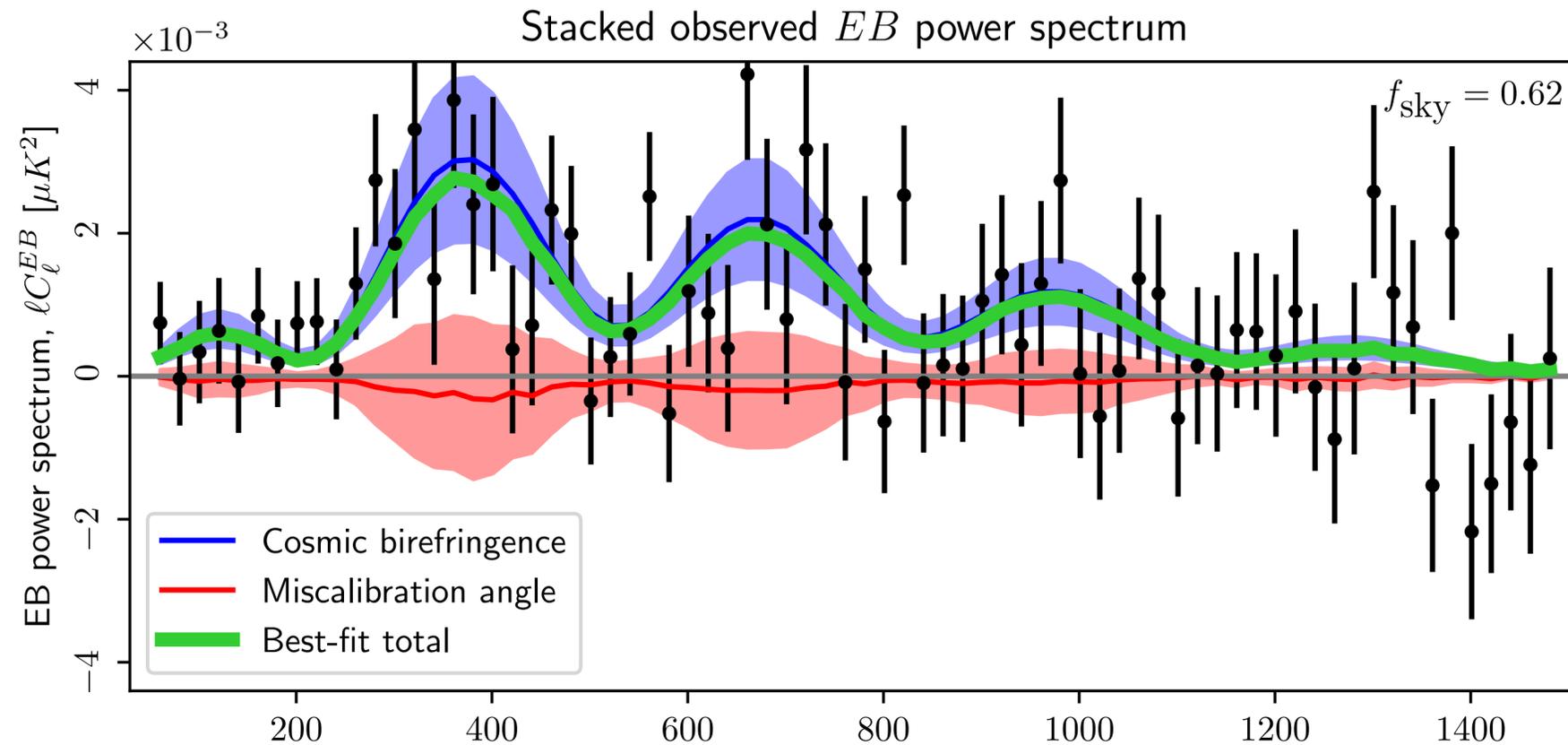
• ミスキャリブレーション
角度の寄与は小さい。

• $\beta = 0.34 \pm 0.09 \text{ deg}$

• $\chi^2 = 65.3$

銀河面をマスクしても結果は同じ

全天の62%を使用



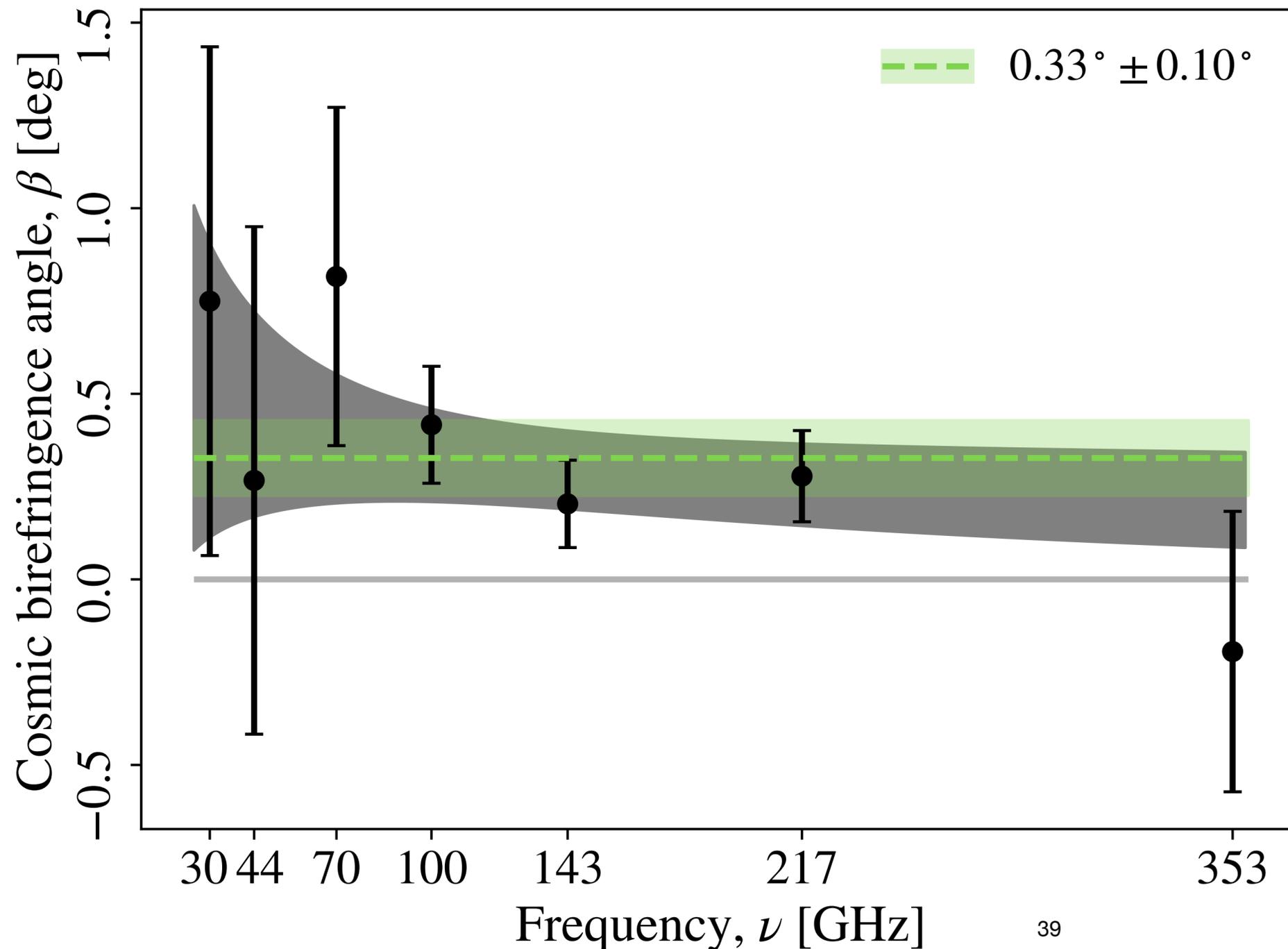
- ミスキャリブレーション
角度の寄与は小さい。

- $\beta = 0.37 \pm 0.14$ deg

- $\chi^2 = 65.8$

周波数依存性はない

従って、磁場によるファラデー回転では説明できない。



- 一様な磁場を通過する光の偏光面は回転する（**ファラデー回転**）が、その回転角度は周波数に依存する $\beta(\nu) \propto \nu^{-2}$ 。

- 測定結果は

- $\beta \propto \nu^n, n = -0.20^{+0.41}_{-0.39}$
(68% CL)

- **ファラデー回転 ($n = -2$) では説明できない。**

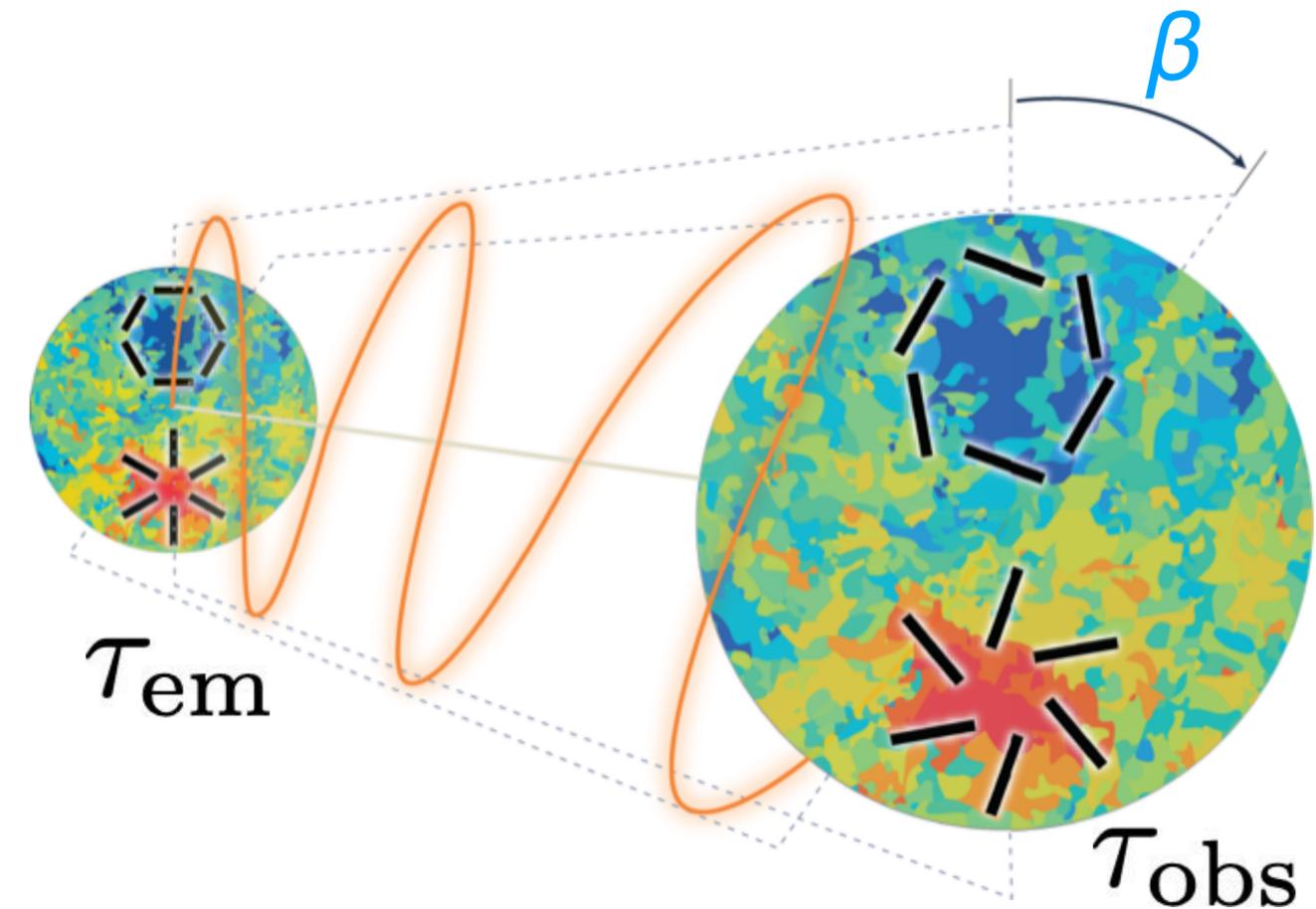
宇宙複屈折効果なら何を意味するか？

暗黒物質、あるいは暗黒エネルギーの場 χ によって説明できる。

$$I = \int d^4x \sqrt{-g} \left[-\frac{1}{2} (\partial\chi)^2 - V(\chi) - \frac{1}{4} F^2 - \frac{\alpha}{4f} \chi F \tilde{F} \right]$$

- 変更面の回転角度は

$$\begin{aligned} \beta &= - \int_{\tau_{\text{em}}}^{\tau_{\text{obs}}} d\tau (\omega_+ - \omega_-) \\ &= \frac{\alpha}{2f} [\chi(\tau_{\text{obs}}) - \chi(\tau_{\text{em}})] \end{aligned}$$



宇宙複屈折効果なら何を意味するか？

暗黒物質、あるいは暗黒エネルギーの場合 χ によって説明できる。

$$I = \int d^4x \sqrt{-g} \left[-\frac{1}{2} (\partial\chi)^2 - V(\chi) - \frac{1}{4} F^2 - \frac{\alpha}{4f} \chi F \tilde{F} \right]$$

- 測定された角度 β から以下の制限が与えられる。

$$\Delta\chi = \chi(\tau_{\text{obs}}) - \chi(\tau_{\text{em}}) \simeq \frac{10^{-2}}{\alpha} f$$

- もし暗黒エネルギーなら：宇宙定数は棄却される！
- もし暗黒物質なら：少なくとも暗黒物質の一部はパリティ対称性を破る！

まとめ

新しい物理の兆候か？

- パリティ対称性の破れは、宇宙論における新しい研究テーマ。
 - 暗黒物質や暗黒エネルギーの実体を探る鍵になる可能性がある。
- パリティ対称性は弱い相互作用で破れているのだから、暗黒物質や暗黒エネルギーの場の相互作用でパリティ対称性が破れていても不思議ではない。
- **現在の到達点：宇宙複屈折効果の統計的有意性は 3.6σ** 。宇宙空間は、パリティ対称性を破る暗黒物質や暗黒エネルギーで埋め尽くされているのか？
- 独立した観測による確認が必要。アタカマ宇宙論望遠鏡のデータリリース6 (ACT DR6) が3月18日に予定されている。とても待ち遠しい。

