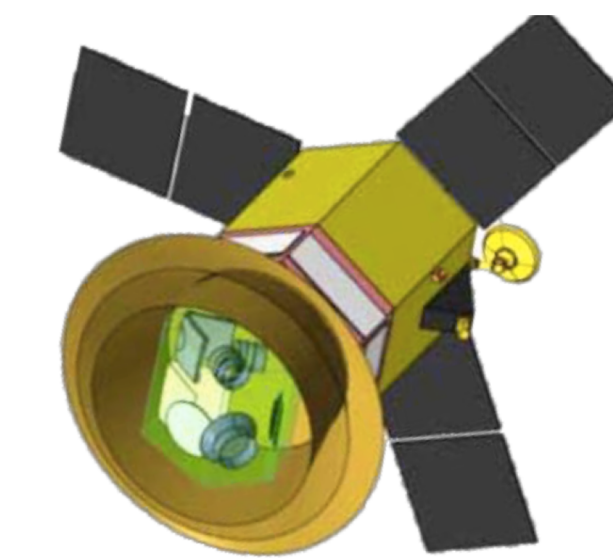


# 銀河系放射の偏光を用いた新しい偏光角度の較正手法とCMB偏光解析への影響

越智紘輝, 南雄人<sup>A</sup>, 市来淨與<sup>B</sup>, 片山伸彦<sup>C</sup>, 小松英一郎<sup>C,D</sup>, 松村知岳<sup>C</sup>, 他 LiteBIRD Phase-A1 team

横浜国大, KEK<sup>A</sup>, 名古屋大<sup>B</sup>, Kavli IPMU<sup>C</sup>, Max Planck Institute for Astrophysics<sup>D</sup>



## Introduction

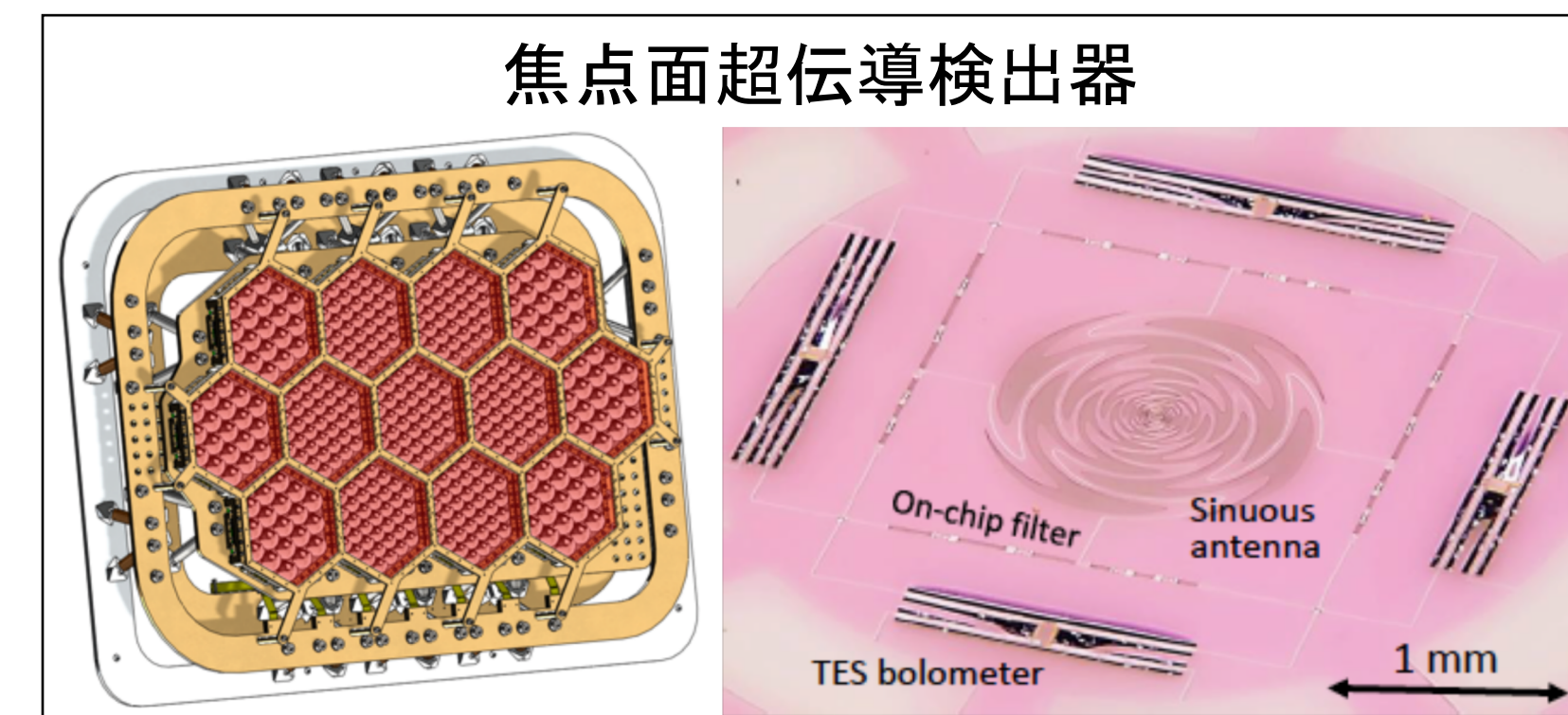
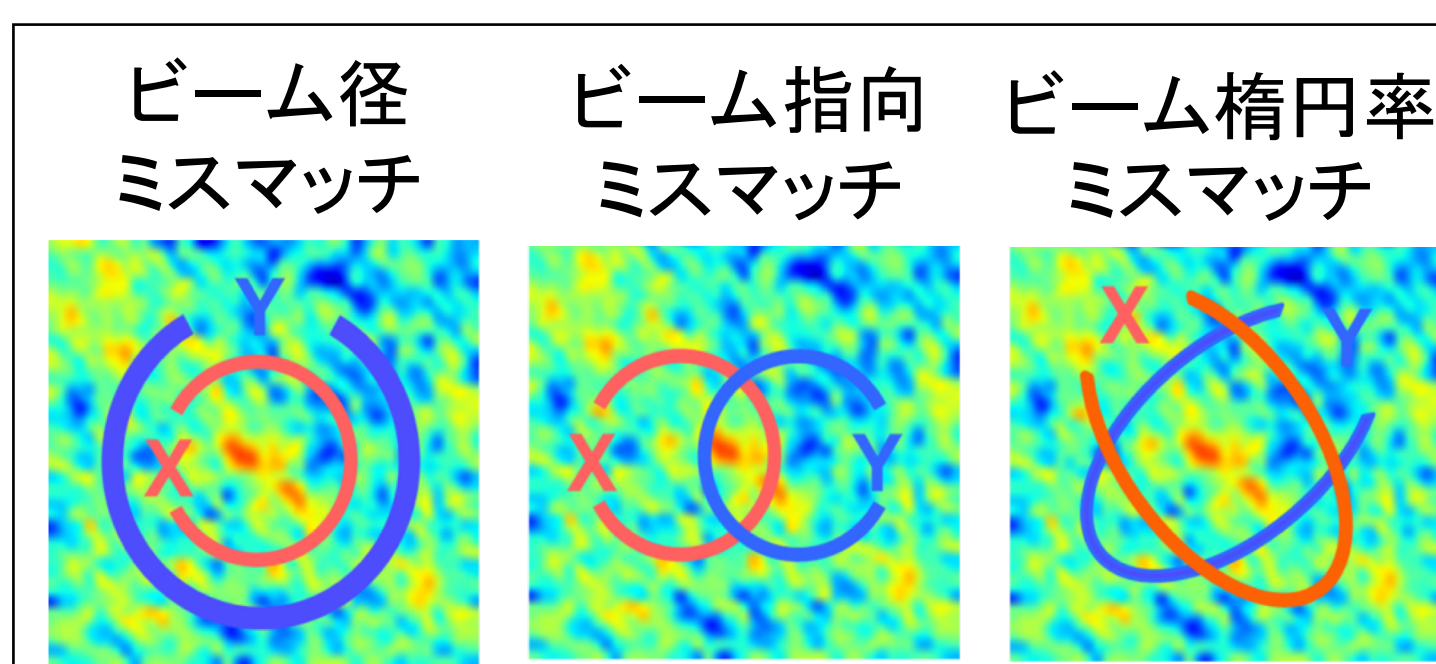
LiteBIRDは、CMBの偏光を精密に観測することでインフレーション仮説の検証を試みる現在計画中の科学衛星である。Bモードの強さの指標であるパラメータ tensor-to-scalar 比  $r$  を0.001の精度で測定することを目標とする。CMBの微弱なBモード偏光を測定するには、衛星システム・検出器による系統誤差を小さく抑えなければならない。その為、生じうる全系統誤差を把握し、各項目の較正手法を確立する必要がある。

系統誤差低減の重要な項目である宇宙空間での検出器の**偏光角度の較正**に関して、**観測される銀河系放射の偏光データ**を使用する新たな手法を検討している。本講演では、シミュレーションにより生成される擬似的な観測データを用いた偏光角度推定解析の概要を報告する。

## LiteBIRD衛星における系統誤差

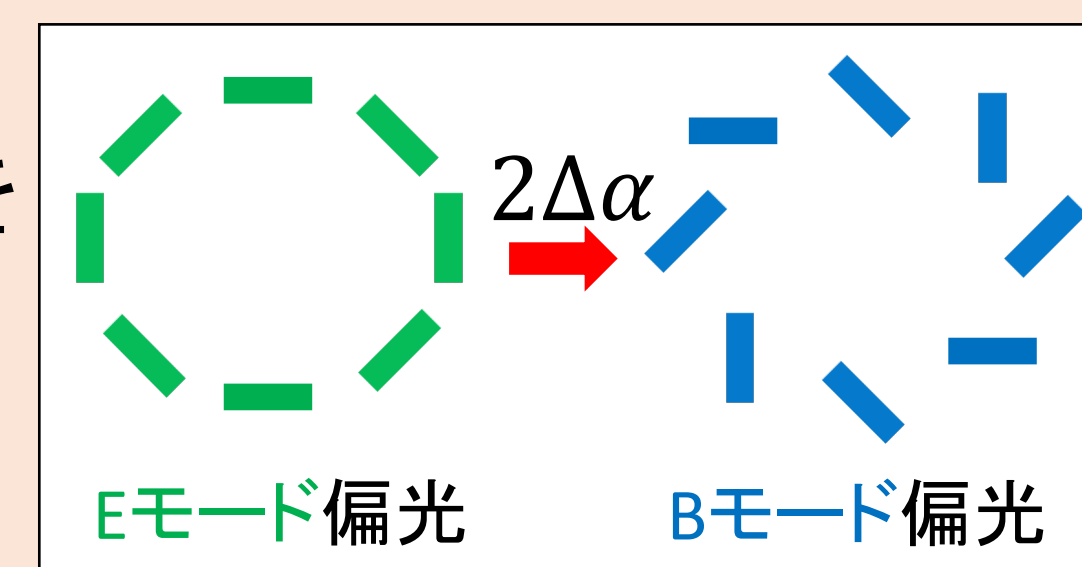
CMBのBモード偏光の精密な測定において系統誤差になり得る項目は、等方な温度成分、温度異方性成分、Eモード偏光や検出器等に由来する偽のBモード偏光である。以下に無偏光成分に由来する代表的な系統誤差源を挙げる。以下の系統誤差はHWPによって低減されることが示されてきた。

- 相対ゲインミスマッチ → 検出器ペアのゲインのミスマッチに由来する。
- ビーム径ミスマッチ → 差分偏光計の個々の検出器において縦方向の強度を測る検出器と横方向を測る検出器のビーム径に差がある時に生じる。
- ビーム指向ミスマッチ → 検出器ごとの縦方向の強度を測る検出器と横方向を測る検出器でビームの指向方向がずれた場合に生じる。
- ビーム楕円率ミスマッチ → 検出器ペアのビームの楕円率のミスマッチに由来する。縦方向の強度を測る検出器と横方向を測る検出器でビームの長軸がずれた場合に生じる。



## Angle Calibration

- 研究背景と目的**...上記の系統誤差とは異なりHWPの有無によらず、右図のように検出器の偏光方向の回転( $2\Delta\alpha$ )で**Eモード**偏光から偽の**Bモード**偏光が作られるため検出器の**偏光角度の較正**(angle calibration)はLiteBIRDのミッション要求を満たす上で重要な項目の一つである。マイクロ波で十分明るくて強度があり、他のCMB実験で較正に使っていた天体はTauAと呼ばれる天体だが、各周波数帯毎に3arcmin未満の高精度を要求されるLiteBIRDで使用するには不十分である。そこで、銀河系放射の偏光の**EE相関**と**BB相関**の差から**EB相関**を求めて偏光角度 $\Delta\alpha$ を推定し較正を行う手法を検討している。



- 解析概要**...標準宇宙論では、偏光方向を回転させるような作用がなく、**Eモード**と**Bモード**の相互相関スペクトル  $C_l^{EB}$  は0である。偏光角度が $\Delta\alpha$ だけずれていたとすると、観測される  $C_l^{EB,obs}$  は、 $C_l^{EB,obs} = \frac{1}{2}(C_l^{EE} - C_l^{BB}) \sin(4\Delta\alpha)$  で表され、 $C_l^{EE,obs}$ ,  $C_l^{BB,obs}$  は、 $C_l^{EE,obs} = C_l^{EE} \cos^2(2\Delta\alpha) + C_l^{BB} \sin^2(2\Delta\alpha)$ ,  $C_l^{BB,obs} = C_l^{BB} \cos^2(2\Delta\alpha) + C_l^{EE} \sin^2(2\Delta\alpha)$  で表される。これらを用いて、 $C_l^{EB,obs} \cong 2\Delta\alpha(C_l^{EE,obs} - C_l^{BB,obs})$  でフィッティングし0とすることで、 $\Delta\alpha$ の推定を行った。(今までに理論的なCMBのパワースペクトルをフィットして $\Delta\alpha$ を推定していたことはあったが、本研究では観測されたデータの使用で推定できる新しい手法を検討した。)

解析条件(検出器の各パラメータ)と解析結果

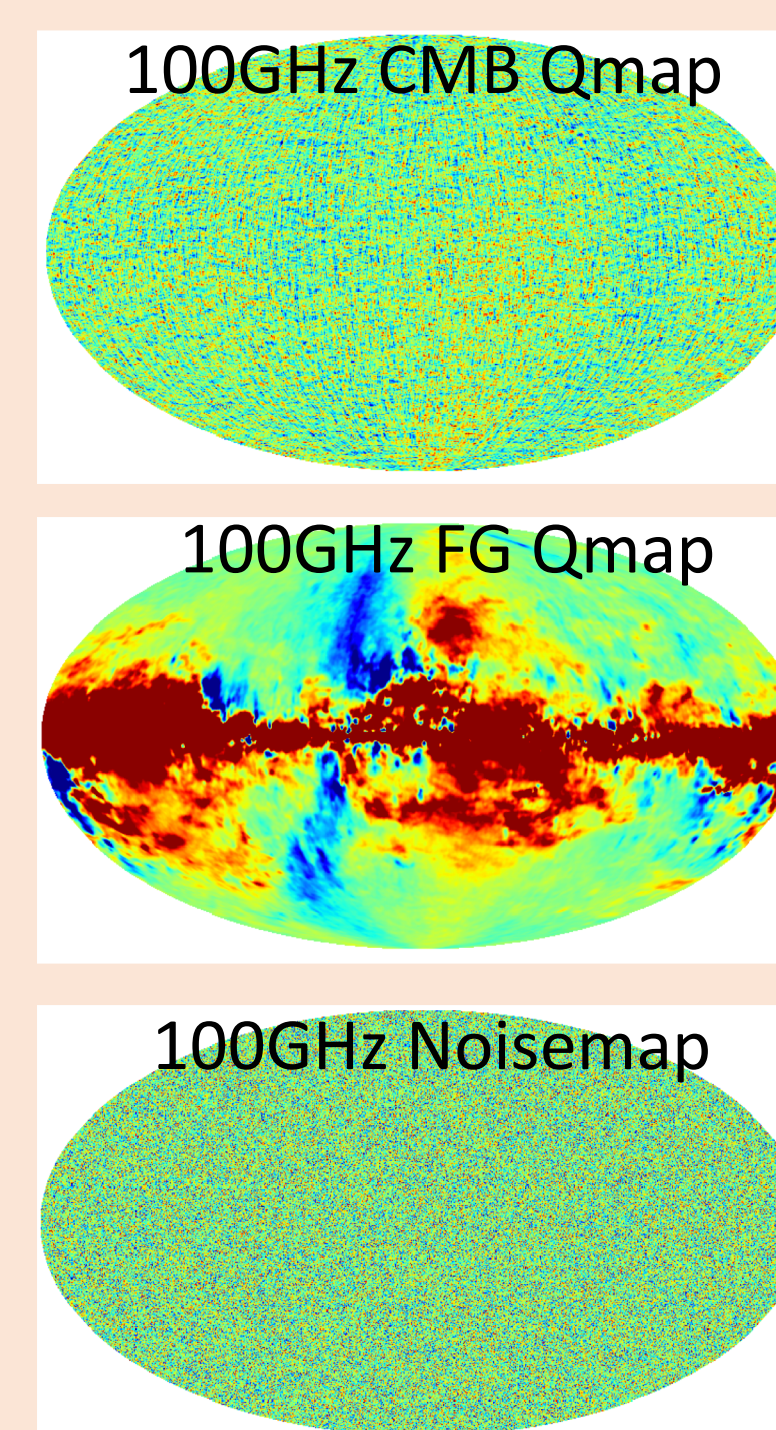
解析条件 及び結果	Band (Center) [GHz]	Beam Size [arcmin]	Polarization Sensitivity [μK-arcmin]	Band Width	$\Delta\alpha$ [arcmin]	$\sigma_{\Delta\alpha}$ [arcmin]
LFT 34 - 161 GHz	40	69.2	27.9	0.30	4.081	11.200
	50	56.9	19.6	0.30	4.530	5.950
	60	49.0	15.6	0.23	2.001	4.627
	68	40.8	12.3	0.23	0.092	2.433
	78	36.1	10.0	0.23	-0.298	1.688
	89	32.3	9.4	0.23	-0.237	1.223
	100	27.7	7.6	0.23	-0.002	0.820
	119	23.7	6.4	0.30	0.018	0.505
HFT 89 - 448 GHz	140	20.7	5.1	0.30	0.046	0.487
	100	37.0	7.6	0.23	-0.383	1.379
	119	31.6	6.4	0.30	-0.137	0.815
	140	27.6	5.1	0.30	-0.005	0.669
	166	24.2	7.0	0.30	0.064	0.620
	195	21.7	5.8	0.30	0.147	0.534
	235	19.6	8.0	0.30	0.039	0.687
	280	13.2	9.1	0.30	0.079	0.580
	337	11.2	11.4	0.30	0.013	0.534
	402	9.7	19.6	0.23	-1.545	1.256

Y. Sekimoto et al., "Concept design of the LiteBIRD satellite for CMB B-mode polarization", Proc. of SPIE Vol. 10698 106981Y-1, 9 August 2018. より

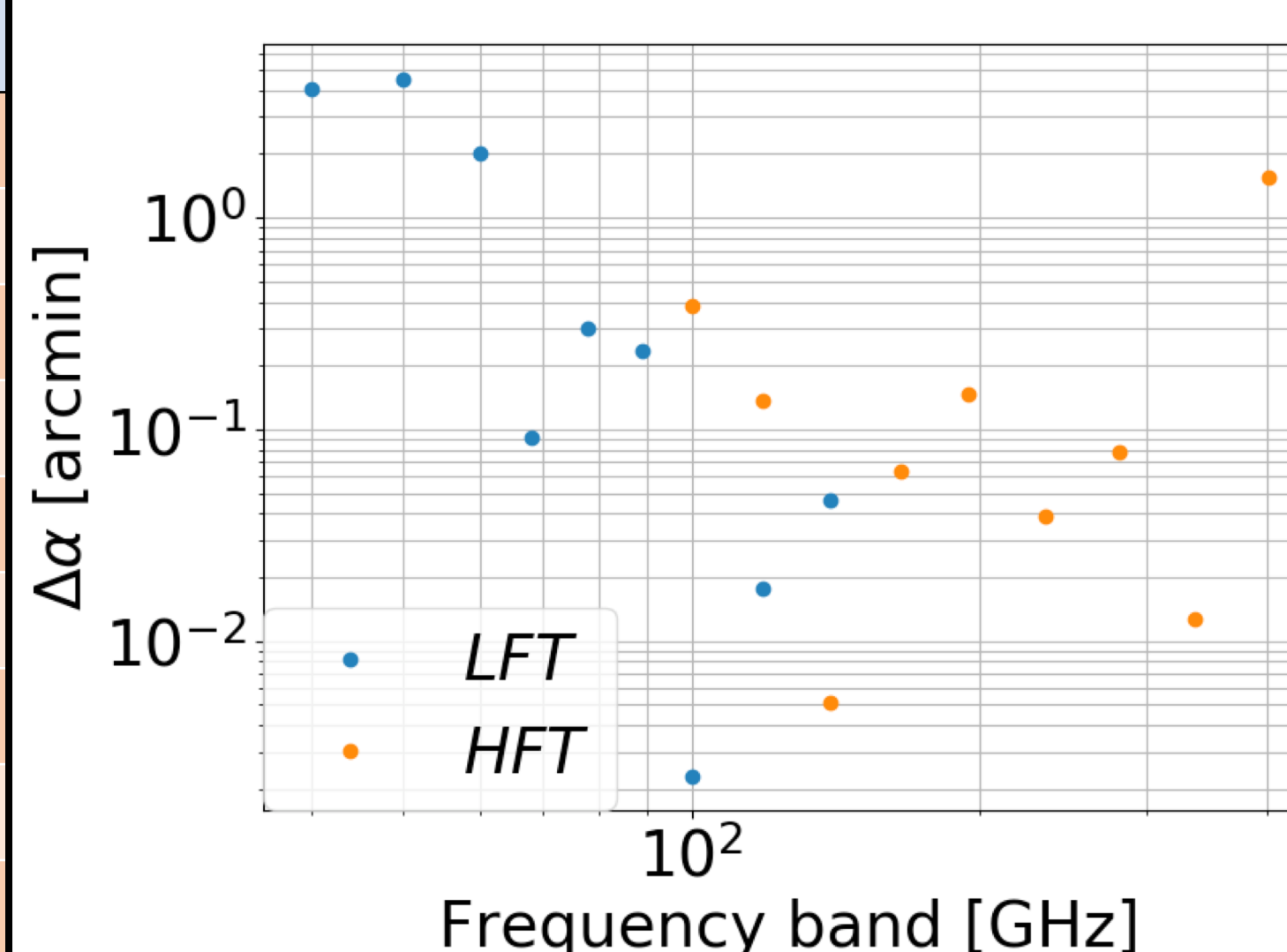
### 解析手順

- 左下の表の解析条件で各周波数帯毎に理論モデルに従うパワースペクトルをもとにしたCMB偏光Mapの作成。
- 低周波数域で支配的な**シンクロトロン放射**及び高周波数域で支配的な**ダストの熱放射**によるForeground偏光Mapの追加。
- 検出器のノイズによる偏光Mapの追加。
- 観測Mapからパワースペクトル  $C_l^{EB,obs}$ ,  $C_l^{EE,obs}$ ,  $C_l^{BB,obs}$  の算出。
- $\Delta\alpha \cdot \sigma_{\Delta\alpha}$  算出

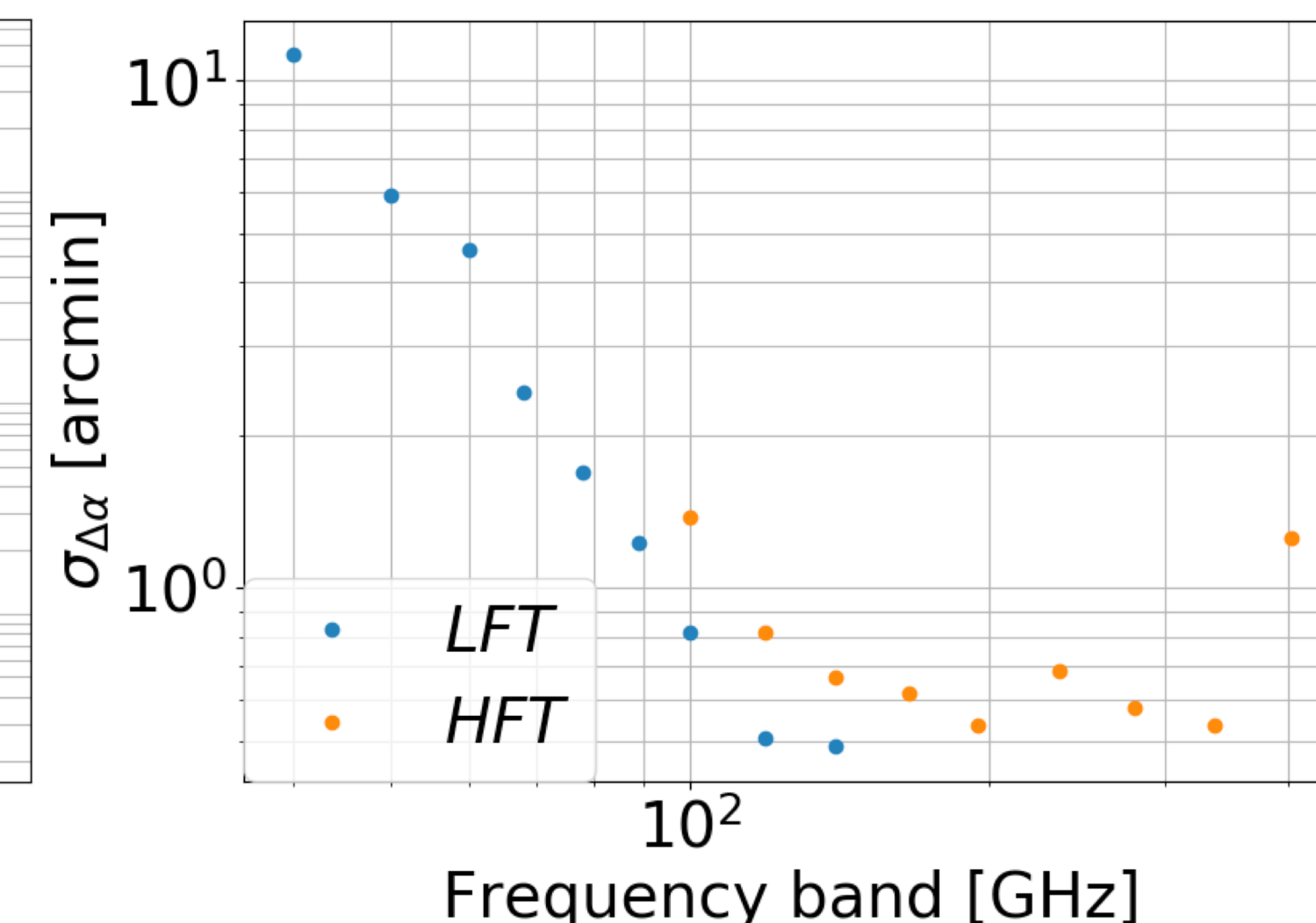
$$C_l^{EB,obs} \text{ を } 2\Delta\alpha(C_l^{EE,obs} - C_l^{BB,obs}) \text{ でフィッティングすると, } \Delta\alpha \text{ と } \sigma_{\Delta\alpha} \text{ は,}$$
$$\Delta\alpha = \frac{1}{2} \frac{\sum_{l=2}^{l_{max}} C_l^{EB,obs} (C_l^{EE,obs} - C_l^{BB,obs}) / \text{Var}(C_l^{EB,obs})}{\sum_{l=2}^{l_{max}} (C_l^{EE,obs} - C_l^{BB,obs})^2 / \text{Var}(C_l^{EB,obs})},$$
$$\text{Var}(C_l^{EB,obs}) = \frac{1}{2l+1} \langle C_l^{EE,obs} \rangle \langle C_l^{BB,obs} \rangle$$
$$\text{Var}(\Delta\alpha) = \frac{1}{4} \left\{ \sum_{l=2}^{l_{max}} \frac{(C_l^{EE,obs} - C_l^{BB,obs})^2}{\text{Var}(C_l^{EB,obs})} \right\}^{-1}, \quad \sigma_{\Delta\alpha} = \sqrt{\text{Var}(\Delta\alpha)}$$



各周波数帯毎の偏光角度 $\Delta\alpha$ (絶対値)



各周波数帯毎の偏光角度 $\Delta\alpha$ の標準偏差 $\sigma_{\Delta\alpha}$



## Summary

- 40, 50, 60GHz以外のBandの銀河系放射を用いた偏光角度推定においては、要求値の3arcmin未満を達成することがわかった。LiteBIRDでは、一つのwaferが複数の周波数帯に感度をもつため、達成できていないBandに関しては、多Band相関を用いた解析を行う予定である。
- CMB由来の  $C_l^{EB}$  は0であるが、Foreground由来の  $C_l^{EB}$  は0とは限らない為、Foreground由来の  $C_l^{EB}$  の影響を考慮した場合の式で  $C_l^{EB,obs}$  のフィットをした  $\Delta\alpha$  の推定を行う予定である。
- 最終的には、偏光方向の較正誤差がある時の前景放射除去解析が及ぼす tensor-to-scalar 比  $r$  のバイアスを見積もり、 $r$  と偏光方向を同時推定することを目標としている。