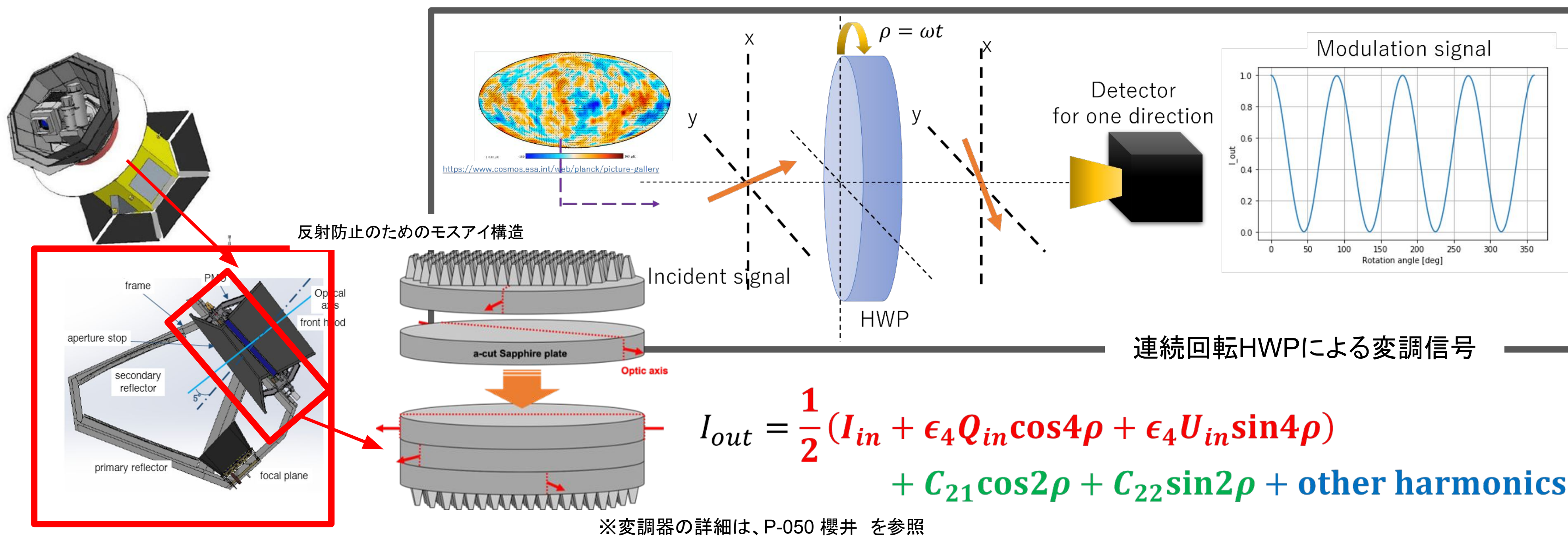


LiteBIRD低周波望遠鏡のための半波長板の結晶軸のずれがCMB観測に与える影響について

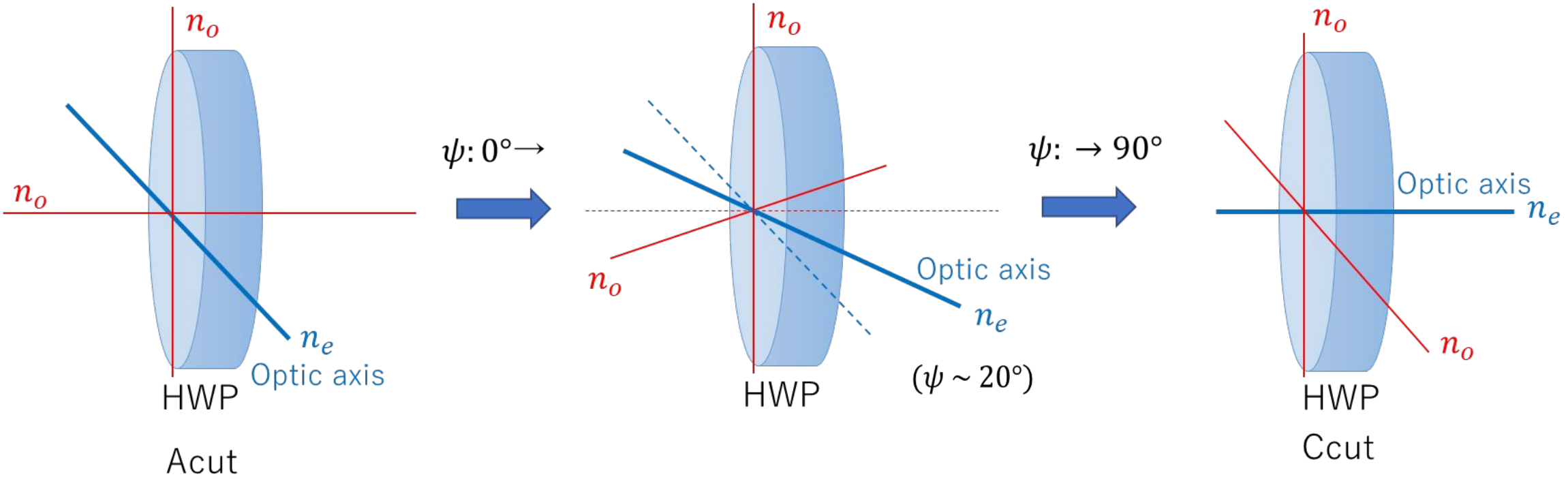
星野百合香^A、松村知岳^B、櫻井雄基^C、長谷部孝^B、片山伸彦^B、Ghigna Tommaso^B、田代信^A、寺田幸功^A、佐藤浩介^A、勝田哲^A、小松国幹^C、杉山真也^A、高久諒太^D
埼玉大学^A、東大Kavli IPMU^B、岡山大学^C、東京大学^D

HWPによる変調信号



- LiteBIRD低周波望遠鏡に搭載される偏光変調器には、連続回転する半波長板(Half Wave Plate; HWP)が用いられる。
- 理想的なHWPを透過した信号を単一方向に関して検出すると、偏光は**HWPの回転角の4倍波(4f)**の変調信号となる。
- これにHWP表面における反射の影響や機器の系統誤差を加味すると、変調信号には**回転角の2倍波成分(2f)**や、**その他の成分(1f, 3f, 5f...)**が含まれる。
- 4倍波以外の成分は、信号の解析の際の系統誤差になり得るため、削減と発生する条件・大きさの把握が求められる。

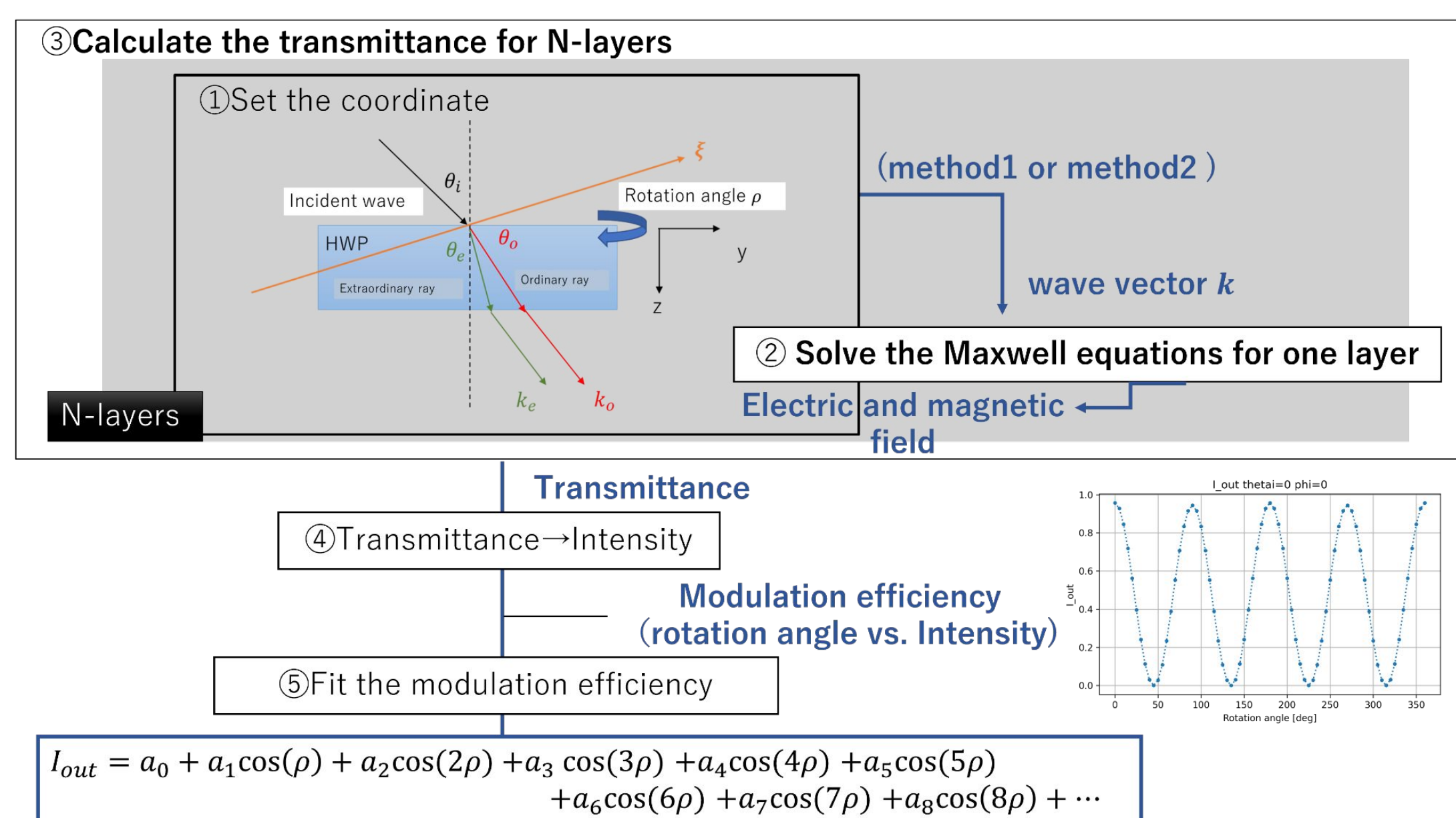
光学軸のずれ



- 高調波成分の原因として、HWPとして機能する**理想的なA-cut サファイアからの光学軸のずれ**が挙げられる。
- ここで挙げる光学軸のずれとは、左図のように入射面に対して結晶軸が傾いた状態を指す。
- 光学軸のずれは製造段階でHWPを切削する際に生じる可能性がある。実機に搭載する直径500mmのHWPでは最大3°程度ずれる可能性がある。
- 光学軸のずれによるHWPに非対称性が生まれる事で、1f, 3f, 5f等の奇数倍波が発生すると考えられる。

光学軸ずれHWPを用いた際の変調信号

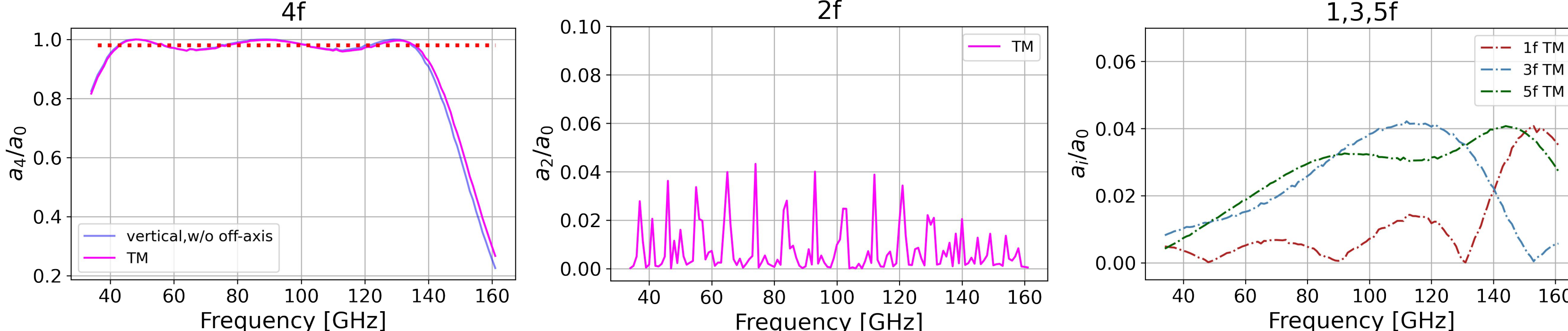
シミュレーションによる変調信号の計算



- pythonによるシミュレーションコードを作成し、**複雑な光学系について、従来のツールより早く正確な変調信号の計算を実現できた。**
- 多層のプレートに対する透過信号を計算することが可能である。



- 以下の条件で光学軸のずれに対する各成分の大きさを導出した。
 - 単層の5mmHWP+反射防止薄膜 (ここでは簡単のため透過率~%の薄膜@90GHz)
 - 入射角 $\theta_i=7.25[\text{deg.}]$ 、周波数 90[GHz]、TMモード
- 変調効率は光学軸のずれに対して98%以上を保っている。2倍波については、反射防止膜による反射の削減によって大きさ削減されている。
- 予想通り、**奇数倍波について数%の大きさでの発生が確認された。**

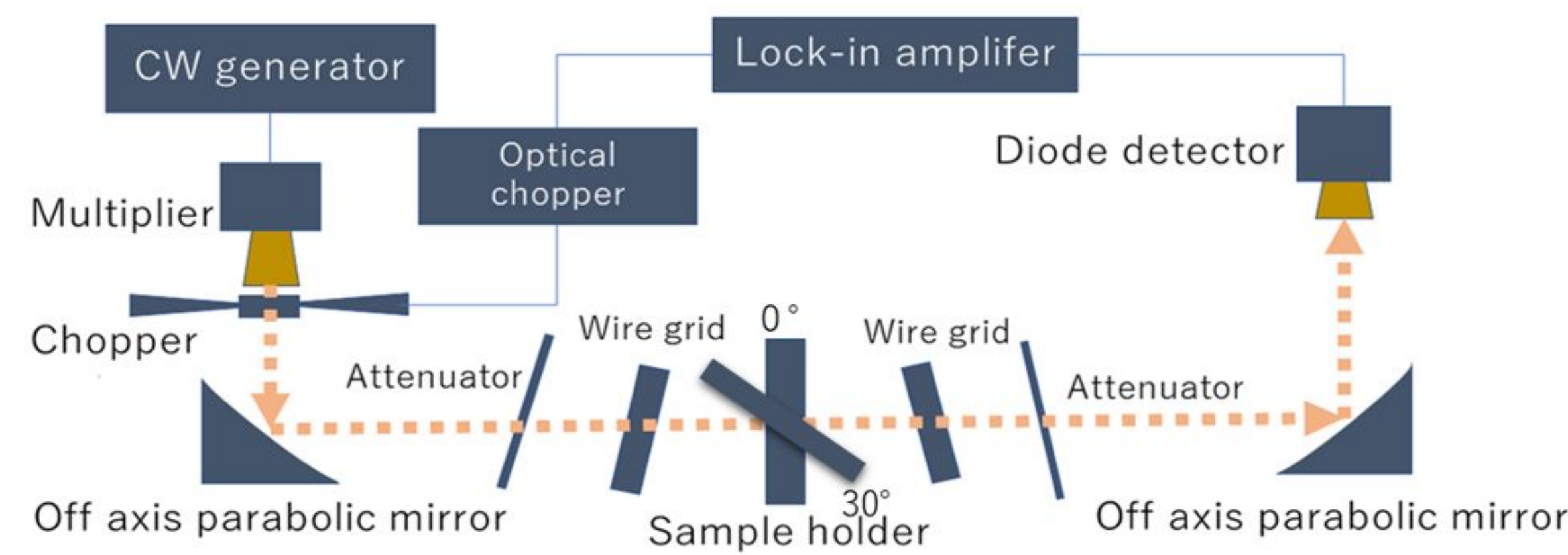


- 上の条件に加え、実機に近い5層HWPが、全て5°軸がずれた場合について解析を行った。
- 奇数倍波について、**広帯域に対して数%の発生が確認された。**

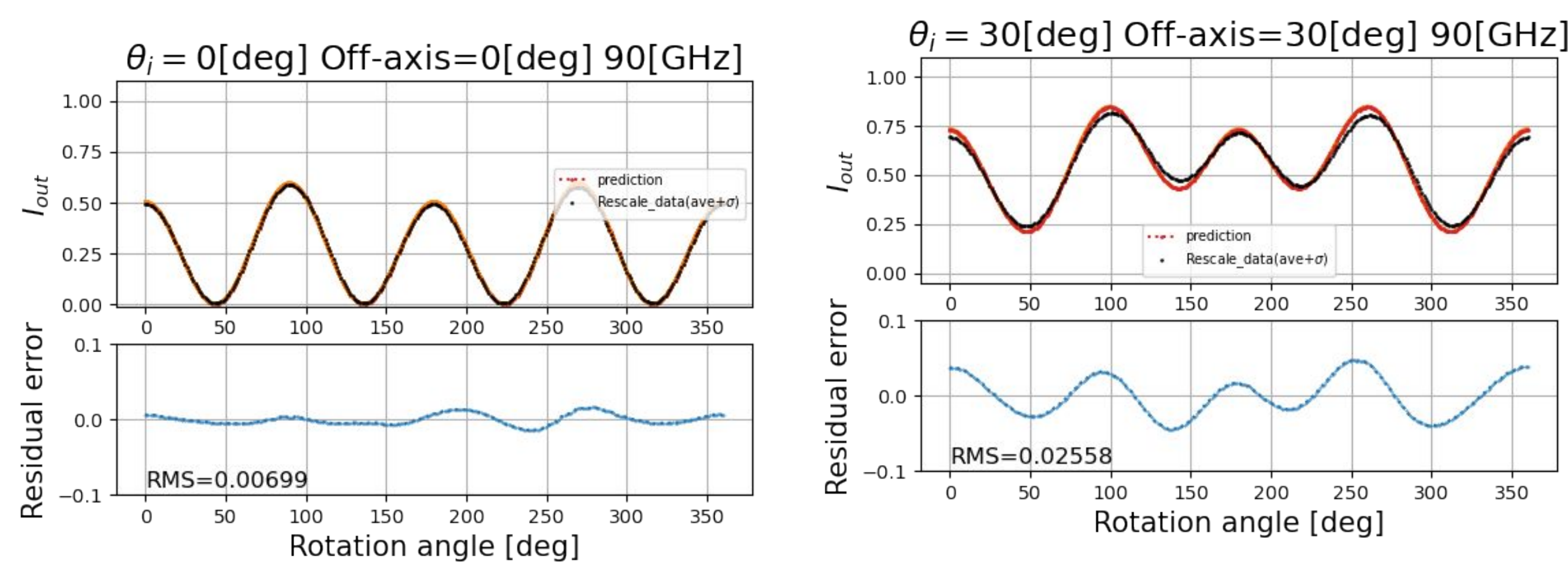
まとめと今後の展望

- 変調信号に含まれる4倍波以外の成分は、解析の際の系統誤差になる可能性がある。HWPの回転角の奇数倍に関する高調波の原因として、光学軸のずれが考えられる。
- 光学軸のずれによる奇数波成分の大きさについて、pythonによるシミュレーションと実験から定量的に求めた。
- 搭載するHWPの状態がわかれば、光学軸のずれによる誤差を補正できる。
- 次のステップとして、光学軸のずれの要求値、宇宙論への影響を考える必要がある。

シミュレーションによる予測と実験結果の比較



- ノイズ低減のためにロックインアンプを用いて測定を行う。
- 通常のAカットサファイアと、光学軸のずれたサンプルを用いて測定を行い、シミュレーションによる予測と比較を行った。



	Prediction	Data	Residual
4f	0.9928	0.9702	0.0226
2f	0.1679	0.1716	0.0037
1f	0.0	0.0094	0.0094
3f	0.0	0.0103	0.0103
5f	0.0	0.0141	0.0141
6f	0.0	0.0069	0.0069
7f	0.0	0.0007	0.0007
8f	0.0	0.0045	0.0045

	Prediction	Data	Residual
4f	0.3834	0.3375	0.0459
2f	0.0706	0.0733	0.0027
1f	0.1578	0.1646	0.0068
3f	0.2245	0.193	0.0315
5f	0.0659	0.0474	0.0185
6f	0.0165	0.0143	0.0021
7f	0.0005	0.002	0.0015
8f	0.0021	0.0014	0.0007

- 測定結果と変調信号予測値の残差は最大5%程度であった。
- 残差の原因の1つとして、サンプルの光学軸が傾いていることによって屈折率を正しく予測できない事が挙げられる。
- 変調信号の各成分の大きさ(1f~8f)は数%の差で予測値と一致する。
- 通常のA-cut サファイアの測定結果においても、測定系由来と思われる奇数波が数%発生する。
- 軸のずれたサンプルの測定において、**奇数倍波の大きさについて5%以内の精度で予測値と実験値が一致した。**

関連ポスター

P-042	LiteBIRD低周波望遠鏡のためのモスアイ反射防止広帯域サファイア半波長板の開発	高久諒太
P-403	LiteBIRD低周波望遠鏡に用いる偏光変調機回転部の熱損失の研究	長谷部孝
P-050	LiteBIRD低周波望遠鏡用偏光変調器の概要と開発状況	櫻井雄基